# академии наук армении Былоог-Зоза Сизиизить чьопрозпратьго ичиче и изра Брдрци Брдрци Брдрци Брдрци Брдрци Брдрци Брдрци

# СОДЕРЖАНИЕ

| С. Г. Отакссян, С. В. Абаджян. Генерация гармоник аблизи че-   |        |
|----------------------------------------------------------------|--------|
| ренковского резонанса                                          | 125    |
| Т. А. Папазян, Л. Х. Муралян, Н. Л. Маркарян, А. В. Зограбян.  |        |
| Подавление шумов дазерного излучения в спектральном ком-       |        |
| COUCCODE                                                       | 128    |
| А. О. Назарян. Б. М. Смирнов. Н. Т. Шахбазян. Метолы опе       | ne her |
| АРНИЯ ТЕПАОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТОВАРНЫХ ХАОЗКТЕОИСТИК В*-         |        |
|                                                                | 135    |
| O B Francesory A B Jackey Developments                         |        |
| О. В. Вигдисиряя, А. В. Дирояя. Рекурреатные выражения         | ДЛЯ    |
| расчета коэффициента отражения от многослонных оред            | 141    |
| с. А. Гер-Аветисян. О типе взанмоденствия при тушения мета     | - ANIA |
| стабильных и ревонасьсно-возбужденных атомов гелия             | 146    |
| С. М. Арутюнян, Р. Б. Костанян, Т. В. Санамян. Спектрал        | DHO-   |
| свойства кристаллов                                            |        |
| YAlO3: E <sup>3+</sup>                                         | 151    |
| В. Г. Бабаджанян, Г. Г. Демирханян, Р. Б. Костанян. Светокалу- | FISION |
| церованные электонческие отклики поляоных воиста               | AAOB   |
| LINE THE                                                       |        |
| LINDURIE,                                                      | 157    |
| Ю. С. Варланян. Теория поносферного динамо полной модели       | A AL   |
| околоземного космического пространства на высоких и уме-       |        |
| ренных широтах                                                 | 163    |
| С. Г. Озанесян, С. В. Абалжян. Нелинейная теория черенког      | CKO-   |
| TO ABBEDA                                                      | 174    |
| К. Б. Петоосян. К. М. Похсодовн. Эффективная внутовоезова-     | 1 Car  |
| TOURSE TEREDALINE BIOOOR TROMMENT HRAVESTER ARADA IS           |        |
|                                                                | 178    |
| and a many sector incompany sector personal                    |        |
|                                                                |        |

Том 27 Выпуск 3 1992

#### PA4U174U4APP3AP1

| 2nd Sud Shuju & U. A., Upuzju & U. d. Zupun bhilipp akupughu i tophiladjub nban-                 |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| hmhuh dam                                                                                        | 125 |
| ominaging o. U., Unirunging I. b., Umrquering b. I., Antemping U. J. Indeputio                   |     |
| նառաղալիման աղմուկների ննչումը սպեկտրալ սեղմիչում                                                | 128 |
| buquering U. Z., Udhalad P. T., Tulpuque b. P. Lughpuilt mugugdut hppun-                         |     |
| մամբ հյուների շերմաֆիզիկական և սպեկտրալ բնունագրերի որոշման մենոդներ                             | 135 |
| Pungmumeyna 2. 4., Ameyna U. 4. Abhrephin mpmusmymnifinibbe pungingbon af-                       |     |
| ջավալրերից անդրադարձման գործակցի հաշվարկի համար                                                  | 141 |
| Shr-Udhuhujub U. 2. 26thnath almanmuphe h abquantauth ququelus unadubph                          |     |
| մարման ռեակցիաներում փոխազդեցությունների տիպի մասին                                              | 146 |
| 2<br>աբությունյան Ս. Մ., Կոստանյան Ռ. Բ., Սանավյան Տ. Վ. YAlO3: $\mathcal{E}_r^{3+}$<br>թյուրեղ- |     |
| ների սպեկարալ, լաղերային և լյումինեսցենտային հատկությունները                                     | 151 |
| Բարաջանյան վ. Գ., Դեմիշխանյան Գ. Գ., Կոստանյան Ռ. Բ. LiNbO $_3$ : $E_r^{3+}$ թենոային            |     |
| բյուրեղների լասաինդուկցված էլեկտրական արձադանցները                                               | 157 |
| darquegue Bai. U. bebegepub ghaudentaunifigue Stephengu mhegepuque mupu-                         |     |
| ծության լրիվ մողելի համար բարձր և չափավոր լայնություններում                                      | 163 |
| Հովնաննիսյան Ս. Գ., Արաջյան Ա. Վ. Չերենկովյան լաղերի ոչ դծային տեսությունը                       | 174 |
| Apmraujuli 4. P., Anjeururjuli 4. V. bepabgahumapuish beyenen supuntifik the                     |     |
| տիվ դեներացիան իմպուլսա-հանախային YAI-03: Nd <sup>3+</sup> լաղերում                              | 178 |

Изв. АН Армении, Физика, т. 27, вып. 3, с. 125-128 (1992)

#### УДК 535.14:530.182

12.

# ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК ВБЛИЗИ ЧЕРЕНКОВСКОГО РЕЗОНАНСА

# С, Г, ОГАНЕСЯН, С. В. АБАДЖЯН

#### НПО «Лазерная техника» ЕГУ

#### (Поступила в редакцию 30 марта 1991 г.)

Показаща нозможность преобразования энергии лазерного излучения в произнольную гарполику на пучке электронов в газовой среде. Эффективаость процесса определяется двумя резонансами-черенковским и продольным.

В лазере на свободных электронах возможна плавная перестройка излучения в широком диапазоне длин волн. Так, например, в ондуляторе с шагом  $\lambda_0 = 1$  см изменение энергии шучка электронов є от 1 МэВ до 1ГэВ возволяет, в принципе, получать излучение в области от жм

до рентгеновского длин воли  $\lambda = \frac{1}{4} \lambda_0 (mc^2/\epsilon)^2$ . В черенковском лазере

[1, 2] область перестройки определяется из условия  $\Pi(\omega) > 1$ , где ппоказатель преломления диэлектрической ореды. Из өтого неравенства следует, что для обычных газовых сред область генерации черенковского лазера ограничена средним ультрафиолетом. В настоящей работе показано, что этот недостаток черенковского лазера можно устранить с помощью эффекта генерации гармоник базисной частоты  $\omega$ . Отметим, что в отличие от комптоновкого лазера или лазера на ондуляторе, эти частоты отсутствуют в спектре спонтанного черенковского излучения.

Процесс генерации гармоник в черенковском лазере развивается следующим образом: слабый сигнал (или спонтанный шум) усиливается до такого уровня, что в токе пучка электронов становятся существенными нелинейные слагаемые. Они приводят к насыщению усиления и генерации гармоник. Для оценки эффективности генерации гармоник рассмотрим простую модель, когда на пучок электронов падает достаточно интенсивный сигнал—накачка. В этом случае процесс усиления становится несущественным и скорости электронов можно взять вне черенковского конуса, что существенно облегчает расчеты. Эффективность преобразования накачки в Г-ю гармонику определим, как отношение средних плотностей потоков внертии на частотах ГФ и Ф:

$$\eta r = Sr/S_1$$
, где  $S = \frac{c}{4\pi}$  [EH] — вектор Пойтинга поперечной волны.

Пусть волна накачки имеет линейную поляризацию и распространяется вдоль оси z

$$E_{x} = \frac{1}{2} E_{1x} \exp[i(k_{1}z - \omega t)] + k.c.$$
(1)

# До взаимодействия с электронами волновой вектор k1 = - n1. Взан

модействие волны накачки (1) с пучком электронов, движущимся подуглом θ к оси z, приводит к генерации продольных и поперечных волн на всех гармониках базисной частоты ω:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} (i E_{mx} + k E_{mz}) \exp[i (k_m z - m \omega t)] + k.c.$$

Здесь амплитуды  $E_{mx,z}$  ( $m \ge 2$ ) слабо зависят от координаты Z, волновые векторы  $k_m = n_m m \omega/c$ ,  $\hat{i}$ ,  $\hat{k}$  —единичные векторы вдоль осей x и z. Отметим, что в результате интерференции полей, излучасмых электронами, генерируемые волны распространяются вдоль оси Z.

Пусть взаимодействие пучка частиц с лазерным полем происходит на отрезке (0, z). Решая систему уравнений Власова и Максвеллла

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial r} + F \frac{\partial f}{\partial p} = ,$$
  
$$\Delta E - \nabla (\nabla E) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial j}{\partial t}, \quad j = e \rho_0 \int v f(p) \, dp$$

по теории возмущений, находим эффективность преобразования поля (1) в произвольную гармонику

$$\eta_r = \frac{1}{n_1 n_r} \left| \frac{(2r-1)!!}{2^r r!} \frac{\beta_x}{\xi} \rho_0 r_0 \lambda z \gamma^r \right|^2 \sin^2(\alpha) \qquad (2)$$

Здесь r — произвольное целое число,  $\beta_{x,z} = v_{x,z}/c$ ,  $\xi = eE_{1x}/m\omega c$  — безразмерный параметр волны накачки,  $\rho_0$ —плотность начального пучка частиц,  $\lambda = 2\pi c/\omega$ ,  $r_0 = e^2/mc^2$  — классический радиус электрона,

$$\gamma = \frac{\xi \beta_x (n_1^2 - 1) m c^2 / \varepsilon}{(n_1^2 - N_1^2)(1 - n_1 \beta_x)^2}, \quad N_1^2 = \frac{\rho_0 r_0 \lambda^2 (n_1^2 - 1) m c^2 / \varepsilon}{\pi n_1^2 (1 - n_1 \beta_x)^2},$$
$$\alpha = \frac{\pi (n_r - n_1) z}{\lambda}.$$

Теория возмущений справедлива при условии v < 1. При расчете формулы (2) учитывались неравенства  $|1 - n_1\beta_z| \ll 1$ ,  $|n_1 - N_1| \ll 1$ . Анализ нерелятивистского случая  $\beta_z \ll 1$  в вакууме показывает, что продольная волна генерируется оптимальным образом, если частота волны накачки  $\omega$  порядка частоты собственных колебаний пучка электронов  $\omega_p =$ 

 $\sqrt{\frac{4\pi e^2 \rho_0}{m}} (-z) \sim E (1-(w_p/w)^2)^{-1}$ . Для релятивистских пучков электро-

нов в дивлектрической среде это условие имет вид  $E_{1z} \sim E_{1x} (n_1^2 - N_1^2)^{-1}$ , которое для простоты будем называть продольным резонансом. Очевид-

но, что эффективность процезса определяется двумя резонансами--черенковским и продольным. Как обычно, он оптимален при выполнении условия фазового синхронизма α=0 (или αг≪1).

Обобщим выражение (2) на случай, когда пучок электронов имеет гауссовы разбросы по энергиям и углам с ширинами Δ и δ соответственно. Очевидно, что среди множества частиц найдутся электроны, для которых выполняется условие Черенкова 1—пβ<sub>z</sub>=0. Они будуг усиливать или поглощать болну накачки (1) [1, 2]. Однако, если

$$s = s_r - r\Delta/V \overline{ln2}, \quad \Theta = \Theta_r - r\delta/V \overline{ln2},$$

где Е—средняя энергия пучка частиц,  $\theta$ —угол между его центральной осью и осью z,  $\varepsilon_r$  и  $\theta_r$ —энергия и угол, удовлетворяющие условию Черенкова, то вклад этих процессов экспоненциально мал. В этом случае усреднение (2) по гауссову разбросу эквивалентно подстановке

$$(1-n_1\beta_z)^2 = \frac{r(2r+1)}{2\ln 2} [(mc^2/\varepsilon)^4(\Delta/\varepsilon)^2 + \Theta^2\delta^2/2],$$

а Vx теперь является проекцией средней скорости пучка частиц на ось Z.

При генерации высших тармоник (г≫1) в качестве среды можновзять резонансный газ. Учет резонансного поглощения поля г-ой гармоники в (2) осуществляется заменой

$$\sin^2(\alpha r)/(\alpha r)^2 \to [(e^{-\gamma z} - 1)^2 + 4e^{-\gamma z} - \sin^2(\alpha r)]/[(2\alpha r)^2 + (\gamma z)^2],$$

где у-коэффициент поглощения среды.

Рассмотрим возможность экспериментального наблюдения второй гармоники. Пусть волна накачки, мощность которой  $P = 2,93 \cdot 10^4 \,\text{Br/cm}^2$  ( $\xi = 1,29 \cdot 10^{-6}$ ) на длине волны  $\lambda = 10,6$  мкм, распространяется в воздухе н пересекает пучок электронов с  $\varepsilon = 15,8$  МэВ,  $\delta = \Delta/\varepsilon = 10^{-3}$ , током  $25kA/\text{cm}^2$  ( $\rho_0 = 4,51 \cdot 10^{12} \,\text{сm}^{-3}$ ) под углом  $\theta = 1,41 \cdot 10^{-3}$  рад. Учитывая, что показатель преломления воздуха [3]

$$n_{0} = 1 + p \cdot 10^{-6} \left[ 64 + 29448 / (146 - \lambda^{-2}) + 25 / (41 - \lambda^{-2}) \right],$$

где р—давление газа, измеренное в атм,  $\lambda$ —длина волны в мкм, получаем  $\eta_1 = 1.0005$ ,  $\Gamma_2 - \eta_1 < 10^{-7}$ , если  $\rho = 1.83$  атм. Если длина взаимодействия z = 1 см, то  $\eta_2 = 27$ %. Отметим, что на таких расстояниях можно пренебречь многократным рассеянием электронов [4] на молекулах, т. к. среднеквадратичный угол рассеяния  $\overline{\theta}^2 = 0.9 \cdot 10^{-6}$ .

Пусть теперь волна накачки имеет мощность  $\rho = 5,33 \cdot 10^3 \text{ Br/cm}^2$ ( $\xi = 6,61 \cdot 10^{-7}$ ) на длине волны  $\lambda = 1,06$  мкм. Оценим эффективность генерации 18-ой тармоники  $\lambda_{18} = 0,0589$  мкм. Для обеспечения условия синхронизма ( $n_1 = n_{18}$ ) возьмем смесь газов из воздуха и гелия ( $n = n_{18} + \frac{3,32 \cdot 10^{-3} p_1}{293,21 - \lambda^{-2}}$ , где  $p_1$ -парциальное давление гелия).Учитывая, что атомы гелич имеют резонансную линию поглощения  $\lambda = 0,0584$  мжм [5], получаем соотношение плотностей гелия и воздуха 1:1,68. Если давление воздуха  $\rho = 0,18$  атм, то  $n_1 = 1,00005$ . Пусть средняя энергия пучка электронов  $\varepsilon = 50$  МэВ,  $\rho_0 = 9,26 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $\delta - \Delta/\varepsilon = 10^{-4}$ ,  $\theta =$  $= 1,41 \cdot 10^{-4}$  рад,  $\gamma = 0,9$ . В этом случае  $\eta_{18} = 0,15$  °/0, если  $\varepsilon = 1$  см. Численные оценки показывают, что для выбранных параметров можно пренебречь многократным рассеянием электронов ( $\bar{\theta}^2 = 8,6 \cdot 10^{-9}$ ), резонансным поглощением ( $\gamma \varepsilon \sim 10^{-6}$ ) и резонансным рассеянием поля [6] 18-ой гармоники на атомах гелия (4,6 °/0). Отметим, что требовашия к параметрам пучка электронов при генерации гармоник с большими номерами высоки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Арутюнян В. М., Оганесян С. Г. Письма в ЖТФ, 7, 539 (1981).

2. Оганесян С. Г., Абаджян С. В. Изв. АН АрмССР, Физика, 22, 133 (1987).

3. Аллен К. У. Астрофизические величины. ИЛ. М., 1960, 304 с.

4. Джексон Д. Классическая электродинамика. Изд. Мир, 1965, 702 с.

 Смирноз Б. М. Физика слабононизированного газа. Изд. Наука, М. 1978, 416 с.
 Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 3—4, Изд. Мир. М., 1977, 347 с.

### ՀԱՐՄՈՆԻԿՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑԻԱՆ ՉԵՐԵՆԿՈՎՑԱՆ ՌԵՋՈՆԱՆՍԻ ՄՈՏ Ս. Գ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՑԱՆ, Ս. Վ. ԱԲԱՋՑԱՆ

Յույց է արված, որ գաղային միջավայրում հնարավոր է էլեկտրոնային փեջի օգնությամբ փոխակերպել լաղերային ճառագայթնան էներգիան կամայական հարմոնիկի վրա։ Գրոցեսի Հֆեկտիվությունը որոշվում է երկու տիպի ռեզոնանսներով՝ լերենկովյան և ընդլայնական։

# GENERATION OF HARMONICS NEAR THE CHERENKOV RESONANCE

#### S. G. OGANESYAN, S. V. ABADJYAN

The possibility for the generation of an arbitrary harmonics on an electron beam in gaseous medium is investigated. It is shown that the conversion efficiency is determined by Cherenkov and longitudinal resonances.

Изв. АН Армении, Физика, т. 27, вып. 3, с. 128-134 (1992)

100

#### УДК 621.373.826

# ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ КОМПРЕССОРЕ

Т. А. ПАПАЗЯН, Л. Х. МУРАДЯН, Н. Л. МАРКАРЯН, А. В. ЗОГРАБЯН

### НПО «Лазерная техника» ЕГУ

(Поступила в редакцию 10 октября 1991 г.)

В статье исследован процесс спектральной компрессии случайно-модулированного импульсного излучения. Показано, что для сверхкодотких атомы гелич имеют резонансную линию поглощения  $\lambda = 0,0584$  мжм [5], получаем соотношение плотностей гелия и воздуха 1:1,68. Если давление воздуха  $\rho = 0,18$  атм, то  $n_1 = 1,00005$ . Пусть средняя энергия пучка электронов  $\varepsilon = 50$  МэВ,  $\rho_0 = 9,26 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $\delta - \Delta/\varepsilon = 10^{-4}$ ,  $\theta =$  $= 1,41 \cdot 10^{-4}$  рад,  $\gamma = 0,9$ . В этом случае  $\eta_{18} = 0,15$  °/0, если  $\varepsilon = 1$  см. Численные оценки показывают, что для выбранных параметров можно пренебречь многократным рассеянием электронов ( $\bar{\theta}^2 = 8,6 \cdot 10^{-9}$ ), резонансным поглощением ( $\gamma \varepsilon \sim 10^{-6}$ ) и резонансным рассеянием поля [6] 18-ой гармоники на атомах гелия (4,6 °/0). Отметим, что требовашия к параметрам пучка электронов при генерации гармоник с большими номерами высоки.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Арутюнян В. М., Оганесян С. Г. Письма в ЖТФ, 7, 539 (1981).

2. Оганесян С. Г., Абаджян С. В. Изв. АН АрмССР, Физика, 22, 133 (1987).

3. Аллен К. У. Астрофизические величины. ИЛ. М., 1960, 304 с.

4. Джексон Д. Классическая электродинамика. Изд. Мир, 1965, 702 с.

 Смирноз Б. М. Физика слабононизированного газа. Изд. Наука, М. 1978, 416 с.
 Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 3—4, Изд. Мир. М., 1977, 347 с.

### ՀԱՐՄՈՆԻԿՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՑԻԱՆ ՉԵՐԵՆԿՈՎՑԱՆ ՌԵՋՈՆԱՆՍԻ ՄՈՏ Ս. Գ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՑԱՆ, Ս. Վ. ԱԲԱՋՑԱՆ

Յույց է արված, որ գաղային միջավայրում հնարավոր է էլեկտրոնային փեջի օգնությամբ փոխակերպել լաղերային ճառագայթնան էներգիան կամայական հարմոնիկի վրա։ Գրոցեսի Հֆեկտիվությունը որոշվում է երկու տիպի ռեզոնանսներով՝ լերենկովյան և ընդլայնական։

# GENERATION OF HARMONICS NEAR THE CHERENKOV RESONANCE

#### S. G. OGANESYAN, S. V. ABADJYAN

The possibility for the generation of an arbitrary harmonics on an electron beam in gaseous medium is investigated. It is shown that the conversion efficiency is determined by Cherenkov and longitudinal resonances.

Изв. АН Армении, Физика, т. 27, вып. 3, с. 128-134 (1992)

100

#### УДК 621.373.826

# ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНОМ КОМПРЕССОРЕ

Т. А. ПАПАЗЯН, Л. Х. МУРАДЯН, Н. Л. МАРКАРЯН, А. В. ЗОГРАБЯН

### НПО «Лазерная техника» ЕГУ

(Поступила в редакцию 10 октября 1991 г.)

В статье исследован процесс спектральной компрессии случайно-модулированного импульсного излучения. Показано, что для сверхкодотких лаверных импульсов спектральный компрессор является эффективным фильтром шумов.

Достижения современной лазерной техники и, в частности, техники волоконно-опгической компрессии (ВОК) позволили расширить диапазон длительностей сверхкоротких световых импульсов (СКИ) до единиц фемтосекунд [1, 2]. Однако освоение пико-фемтосекундного временного диапазона—внедрение источников нового поколения в научные исследования, во многом зависит от повторяемости и управляемости параметров излучения. Этим обусловлены исследования процесса ВОК и соответствующие разработки, направленные на управление спектром и временной огибающей [3, 4], мощностью [5, 6] и статистическими параметрами [7, 8] СКИ. Развитие идев ВОК на основе анализа обратимости процесса и спектрально-временной аналогии привело к разработке схемы спектральной компрессии [9, 10].

Предметом настоящей работы является анализ особенностей процесса спектральной компрессии случайно-модулированных СКИ, наделенный на разработку методов шодавления шумов и стабилизации параметров излучения. Спектральный компрессор, предложенный в [9], состоит из обычных устройств ВОК—дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) и одномодового волоконного 'световода '(OBC). В ДЛЗ импульсы удлиняются, приобретая отрицательную линейную частотную модуляцию (чирп, ЧМ). Последующее прохождение излучения через ОВС приводит, вследствие кубической нелинейности среды, к гашению ЧМ и сжатию спектра при неизменной форме удлиненного импульса. Общие закономерности, оптимальные режимы и предельные возможности процесса, для спектрально ограниченных импульсов, выявлены в [10]. В общем случае, однако, излучение генераторов СКИ случайномодулировано и возникает необходимость описания и анализа процесса с учетом случайного характера излучения.

Математичсское описание процесса основано на втором приближении теории дисперсии и методе медленно меняющихся амплитуд. Для нормированной комплексной медленно меняющейся амплитуды  $\Phi(\zeta, \eta)$ волны, распространяющейся в OBC, имеем

$$i\frac{\partial\Phi}{\partial\zeta} = -\frac{1}{2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\eta^2} + R |\Phi|^2 \Phi.$$
(1)

В уравнении безразмерные расстояние  $\zeta = z/L_A$  и бегущее время  $\eta := (t-z/u)/\tau_0$  нормированы, соответственно, на дисперсионную длину  $L_A = \tau_0^2/k_{\omega^*}^2$  и начальную длительность импульса  $\tau_0$  (k—волновое число,  $\omega$ —частота излучения). Параметр нелинейности R определяется как  $R = L_A/L_{\phi}$ , где  $L_{\phi} = (kn_2/_0)^{-1}$ —длина фазовой самомодуляции,  $\eta_2 = -3,2\cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт—коэффициент нелинейности кварца,  $I_0$ —эффективное значение пиковой интенсивности [1]. Описание ДЛЗ сводится к уравнению типа (1) с R = 0:

·泰强命六十八天1.11,.....

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial^a \Phi}{\partial \eta^2}.$$
 (2)

Start Barry

Дисперсионная длива L<sub>д</sub> в этом случае задается конкретным типом ДЛЗ и параметрами устройства (см. [1]).

В бездисперсионном приближении ( $z < L_{cs} \sim (L_{\phi} L_{a})^{1/2}$ ) уравнение (1) интегрируется

 $\Phi(\zeta, \eta) = \Phi(0, \eta) \exp[-iR |\Phi(0, \eta)|^{2} \zeta].$ (1')

Аналогичный вид имеет решение уравнения (2) в слектральном пред-

$$f(\zeta, \Omega) = f(0, \Omega) \exp(i\Omega^2 Z).$$
<sup>(2')</sup>

где 
$$f(\Omega) = (2\pi)^{-1/4} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\eta) \exp(i\eta\Omega) d\eta - фурье-гармоники, \Omega = (\omega - \omega_0)\tau_0$$

—безразмерная частота. Из подобия уравнений (1'), (2') следует, что для фурье-гармоник излучения ДЛЗ служит «фазовым модулятором», а OBC—«дисперсионной задержкой». Следовательно, спектральный компрессор—это система ВОК, используемая в обратном направлении. Обратимость процесса самовоздействия СКИ в OBC, в общем случае, следует из инвариантности уравнения (1) относительно преобразований  $\zeta \rightarrow -\zeta, \phi \rightarrow \phi^*$  [9].

Количественный анализ процесса с учетом случайного характера излучения возможен в числевном эксперименте, основанном на полной волновой картине. И, хотя спектральная компрессия спектрально ограниченных СКИ адекватно описывается бездисперсионным приближением [10], учет мелкомасштабных флуктуаций поля излучения приводиг к необходимости учета дисперсии OBC.

Численное моделирование процесса спектральной компрессии случайно-модулированных импульсов проводилось по методу статистических испытаний (метод Монте-Карло): статистические характеристики излучения определялись по выборке N реализаций, являющихся решением уравнений (2) и (1). Начальные условия задавались в виде

$$\Phi(0, \eta) = \Phi_0(\eta) [1 + \sigma\xi(\eta)]$$
(3)

(импульсы со случайной амплитудно-фазовой модуляцией [8]). В (3)  $Ф_0$  детерминированная составляющая поля,  $\sigma$  — амплитуда шумовой составляющей,  $\xi(\eta)$ .—стационарный комплексный гауссов шум с нулевым средним и автокорреляционной функцией  $\xi(\eta')\xi^*(\eta'+\eta) = \exp(-\eta^2/\eta_k^2)$ (чертой обозначено усреднение по времени). Для выявления типа флуктуаций, оказывающих наибольшее влияние на процесс, рассматривались также, отдельно, импульсы со случайной фазовой (4) и амплитудной (5) модуляцией:

$$\Phi(0, \eta) = \Phi_0(\eta) \exp[i\sigma\xi(\eta)], \qquad (4)$$

$$\Phi(0, \eta) = \Phi_0(\eta) [1 + \sigma\xi(\eta)].$$
(5)

- Berner

В (4) и (5) случайная функция  $\xi(\eta)$  вещественная— $\xi = \xi^*$ .

В численном эксперименте для каждой реализации определялись временная огибающая  $I(\eta)$ , спектр  $I(\Omega)$  и зависимость мтновенной частоты от времени  $\Omega(\eta)$  в ДЛЗ и ОВС. Строились характерные зависимости степени спектрального сжатия  $S_{2}$  от длины ОВС  $\zeta$ . Далее проводилось усреднение всех параметров и зависимостей по ансамблю реализаций (обозначено знаком <>). Определялись статистические характеристики излучения в зависимости от длины ОВС. Результаты численных исследований позволили обобщить полученные в [10] вакономерности процесса и выявить ее характерные особенности, связанные со случайным дарактером излучения.



Рис. 1. Самовоздействие импульса со случайной амплитудной модуляцией в системе ДЛЗ—ОВС ( $\sigma=0,4$ ;  $\eta_k=0,4$ ; R=100;  $\zeta=0,11$ ; Z=3): а) временная сгибающая интенсивности I ( $\eta$ ) на входе в систему; б) временная огисающая I( $\eta$ ) на выходе из системы; в) временной профиль мгновенной частоты  $\Omega(\eta)$  на выходе из ДЛЗ (сплошная линия) и на выходе из системы (пунктир); г) спехтральный профиль интенсивности I ( $\Omega$ ) на входе в систему (сплошная линия) и на выходе (пунктир). В качестве наглядных примеров на рис. 1, 2 представлены зависимочсти  $I(\eta)$ ,  $I(\Omega)$ ,  $\Omega(\eta)$  на входе в систему, после ДЛЗ и на выходе, для отдельных реализаций импульсов со случайной амплитудой (рис. 1) и фазовой (рис. 2) модуляцией. В ДЛЗ амплитудные флуктуации исходного импульса вытесняются из ее центральной энергонесущей части, формируя гладкий колоколообразный «главный» импульс—с липейной ЧМ, и сопутствующие сателлиты (рис. 1 а, 6). Фазовые флуктуации



Рис. 2. Самоноздействие импульса со случайной фазовой модуляцией в системе ДЛЗ-ОВС ( $\sigma$ =0,4;  $\eta_k$ =0,4; R=100;  $\zeta$ =0,11; Z=3): а) временная огноакщам интенсивности I ( $\eta$ ) на входе в систему (оплошная линия) и на выходе из ДЛЗ (пунктир); б) временной профиль мгновенной частоты  $\Omega(\eta)$  на входе; в) временной профиль мгновенной частоты  $\Omega(\eta)$  на входе в ОВС (оплошная линия) и на выходе (пунктир); г) сиситаральный профиль интенсивности I( $\Omega$ ) на входе в систему (сплошная линия) и на выходе (пунктир).

также не отражаются на главном импульсе приводя в основном к амплитудным и фазовым случайным осцилляциям сателлитов (рис. 2 а. б. в). Далее в ОВС происходит «селективное» сжатие спектра: частотные компоненты, соответствующие главному импульсу, собираются к центру, а крылья, спектра, соответствующие сателлитам, практически не сжимаются (г).Однозначная связь (в) временного профиля интенсивности I ( $\eta$ ) со спектральным I ( $\Omega$ ) позволяет при необходимости простым диафрагмированием в ДЛЗ удалить крылья спектра и сателлиты импульса (ср. с. [8]). На выходе практическое отсутствие ЧМ главного импульса с длительностью т определяет значение ширины спектра  $\Delta \omega \approx \tau^{-1}$ , таким образом, повышая степень когерентности импульсного излучения.

Важной характеристикой процесса является степень сжатия спектоа излучения—S<sub>0</sub> = I (ζ, Ω = 0)/I(0,Ω=0). Для случайно-модулированных импульсов представляет интерес усредненная характеристика <S<sub>0</sub> > . На рис. 3 представлена зависимость стелени сжатия <S<sub>9</sub> > от длины ОВС С для импульсов со случайной амплитудно-фазовой модуляцией (σ=0,1; η<sub>1</sub>=0,5; R=100). Вертикальными линиями на кривой обозначены доверительные интервалы. Для сравнения приведена аналогичная кривая S° (с) для спектрально отраниченного импульса. Как показывают численные исследования, оптимальная длина ОВС для спектрально ограниченных и случайно-модулированных импульсов совпадает, однако максимальная степень сжатия по мере роста шумовой составляющей снижается. Данное утверждение, как и для временной компрессии, справедливо при низком уровне шумов:0 ≤ σ ≤ 0,5; 0,3 ≤ η<sub>4</sub>≤1,5. При вы соком уровне шумов σ≥1 вместо (3) имеем вспышки оптического шума [8], для которых оптимальная длина ОВС и максимальная степень сжатия существенно зависят от статистических параметров начальных полей (эи л.).



Рис. 3. Усредненная по N=30 реализациям степень спектрального сжатия <S<sub>2</sub> >= <I(ζ, Ω=0)/I(0,0)> в зависимости от длины OBC ζ для импульсов с амплитудно-фазовой модуляцией (сплошная линия) в сравнении с аналогичной юривой для спектрально опраниченного импульса (пунктир). Вертикальными ликиями обозначены доверительные интервалы. Параметры счета: R=100; σ=0,1; η<sub>k</sub> =0,5; Z=10.

В заключение отметим, что, хотя использумая выше матехатическая модель процесса ограничена диапазоном длительностей СКИ  $\tau_0 \sim 100 \, \phic$ —100 nc (при мощностях  $P < 10^6 {\rm Br}$ ), очевидно, что нелинейный фильтр шумов на базе спектрального компрессора можно создать и в фемтосекундном и в наносекундном диапазонах длительностей, подбирая соответствующие ДЛЗ и среды с кубической нелинейностью. Для наносекундных импульсов, например, ОВС следует заменить на «керровские жидкости», а для фемтосекундных СКИ в качестве ДЛЗ можно использовать призменные компрессоры.

Следует также отметить, что принцип подавления шумов в спектральном компрессоре может использоваться в задачах пространственной фильтрации и коррекции модовой структуры лазерного излучения. Явление дифракции служит, в этом случае, пространственным аналогом дисперсии, а пространственая фазовая модуляция, проявляющаяся в процессах типа самофокусировки, заменяет временную.

# ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ахманов С. А., Еыслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.
- 2. Brito-Gruz C. H., Fork R. L., Shank C. V., Conference on Lasers and Electro-Optics, 1987, Technical Digest, p. 26.
- 3. Weiner A. M., Heritage J. P., Thurston R. H., Opt. Lett. 1985, v. 11, N3, p. 153.
- 4. Heritage J. P., et al. Appl. Phys. Lett., 1985, v. 47, p. 87.
- 5. Eberly J. H., et al. Laser Focus/Electro-Optics, 1987, N10, p. 84.
- 6. Maine P., et al. IEEE J. Quantum Electronics, 1988, v. 24, N2, p. 398.
- 7. Мурадяч Л. Х. Вестник МГУ, 1987, сер. 3, физика, астронсмия, 28, № 5,: 86.
- 8. Выслоу: В. А., Мусадян Л. Х. Квант. электрон., 1987, 14, № 7, с. 1437.
- Muradyan L. Kh., et al. Conference on Lasers and Electro-Optics, 1990, Technical Digest, p. 120-121.
- Маркарян Н. А., Мурадян Л. Х., Папазян Т. А. Квант. электрон., 13, 1991, № 7, с. 865-867.

### <u>1ԱՉԵՐԱՑԻՆ ԺԱՌԱԳԱՑԹՄԱՆ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԻ ՃՆՇՈՒՄԸ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ՍԵՂՄԻՉՈՒՄ</u>

P. U. MUAUSSUL, L. W. UNPPUASUL, L. H. UUPAUPSUL, U. J. SALPUPSUL

Հնտաղոտված է պատահականորեն մոդուլացված իմպուլսային ճառադայիման ոպեկտրալ սեղմման երեւույթը։ Յույց է տրված, որ գերկարճ իմպուլսների համար սպեկտրալ սեղմիչը հանդիսանում է աղմուկների ՙէֆֆեկտիվ ղտիչ։

# SUPPRESSION OF LASER NOISE IN THE SPECTRAL COMPRESSOR

### T. A. PAPAZYAN, L. KH. MURADYAN. N. L. MARKARYAN, A. V. ZOHRABYAN

The spectral compression process of random-modulated pulse radiation is analyzed. It is shown that the spectral compressor is effective neise-filter for ultrashort laser pulses.

134

and and a later of the

УДК 536.631

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЩЕСТВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ

### А. О. НАЗАРЯН, Б. М. СМИРНОВ, Н. Т. ШАХБАЗЯН

(Поступила в редакцию 5 августа 1991 г.)

В работе представлены лазорные методы определения теплофизических и спектральных характеристик веществ. Максимальная температура натрева составляет 2000 К. Возможности методики продемонстрированы на примере древесного угля в области температур от 300 до 700 К.

Введение. В современной технологии при исследовании и расчетах режимоз работы разного рода реакторов необходимо знать значения теплофизических и спектральных характеристик веществ, используемых в реакторах в качестве топлива, а также продуктов их горения. Лазерные методы определения указанных характеристик разработаны относительно недавно [1, 2] и позволяют определить температуропроводимости, удельные теплоемкости, излучательные способности, коэффициент серости и эптические константы элементов топлива АЭС при высоких температурах. Эти константы используются при анализе телловых потоков в реакторе и изучении возможности охлаждения активной зоны реактора после аварии. Данные по излучательной способности дополнительно позволяют измерять температуру расплавленного топлива пирометрическим методом в высокотемпературных экспериментах. Все это должно способствовать пониманию процессов, происходящих в реакторах и тем самым увеличить надежность и безопасность их эксплуатация.

В [1--4] сообщается о большом числе экспериментальных работ по определенню температуропроводимости, удельной теплоемкости топлива АЭС лазерным методом. Принцип его действия заключается в следующем: небольшой образец в виде диска помещается в вакуумную камеру и нагревается до заданной температуры. Когда температура выравнивается, импульс лазера повышает температуру в некоторой точке поверхности образца. Повышение температуры в центре обратной стороны диска регистрируется термодатчиком. Определяется время, необходнмое для достижения обратной стороной образца половины максимума температуры [2], далее вычисляется температуропроводимость.

Удельная теплоемкость образца определяется измерением поглощенной плотности потока энергии лазерного импульса и максимума температуры. Как указано в работе, основная трудность заключается в точном опрделении поглощенной энергии лазерного излучения. Для решения этой проблемы на образце закрепляется тонкий гладкий диск из углерода в целях увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения.

В данной работе представлены экспериментальные методы определения теплофизичских и спектральных характеристик веществ, использующие лазерный нагрев. Методы позволяют измерить температуропроводность, удельную теплоемкость, излучательную способность, коэффициент серости и коэффициент поглощения лазерного излучения одновременно, что существенно увеличивает точность определяемых и теоретических расчетов, где впоследствии используются эти величины. Область исследуемых температур составляет до 2000 К. Возможности методики продемонстрированы на примере древесного угля. Максимальная темпеоатура пон этом не превышает 700 К. Ограничение обусловлено тем, что пон больших температурах заметным становится процесс горения угля. Эксперименты проводятся в инертной газовой среде, но присутствие малых примесей кислорода в газе, а также адсорбированного в микропорах. утля, делают отмеченный процесс горения существенным, что вносит дополнительную погрешность.

Экспериментальные методы и результаты. Методы основаны на аналязе скоростей натрева и остывания образца. На рис. 1 показана термограмма нагрева образца лазерным излучением. Разные участки термограммы характеризуются соответствующим видом уравнения теплового баланса [5]. Нагрев (область t<sub>1</sub>—t<sub>2</sub>) карактеризуется следующим видом уравнения

$$c_{p} m \frac{dT}{dt} = \beta I - \gamma (T - T_{0}),$$

где с<sub>р</sub>, пl. T, β----соответственно удельная теплоемкость, масса, температура, коэффициент поглощения лазерного излучения сбразцом. І---интепсивность лазерного луча, γ---параметр теплоотдачи образца, !----время нагрева, T<sub>2</sub>----начальная температура образца.



Рис. 1.-Термограмма нагрева образца лазерным излучением.

Отрезок t2-ta характеризуется уравнением баланса

$$f\beta = \gamma \left( T_m - T_0 \right), \tag{1}$$

где Тт--максимальная температура образца.

Отревох времени с момента 13 характеризуется урачечения

$$c_{p}m\frac{dT}{dt}=\gamma(T-T_{0}).$$

Величина полной теплопотери у (T-T<sub>0</sub>) в случае образца сферической формы может быть записана [5]

$$\gamma (T - T_0) = 4\pi r_0^2 \alpha \sigma (T^4 - T_0^4) + \frac{x(T)}{r_0} (T - T_0) 4\pi r_0^2, \qquad (2)$$

где г<sub>0</sub>—раднус образца, α—коэффициент серости, σ—постоянная Стефана-Больцмана, »(T)—теплопроводность газа.

В эксперименте проводились измерения полных теплопотерь, ЛЛЯ чего исследуемый образец в виде шарика или диска закреплялся на термопаре, помещался в термостат в виде сферы [6], который натревался с двух сторон излучением неодимового лазера, максимальная мощность которого составляла 200 Вт. Все это помещалось в камеру с инертной газовой средой. Термостат-сфера изготовлен из молибденовой фольги толщиной 5×10<sup>-6</sup> м. лиаметром 1,5×10<sup>-2</sup> м. При определенной мощности лазера термограмма нагрева образца имеет соответствующую температуру насыщения Т, после достижения которой вещество натревается дополнительно на  $\Delta T \ll T_m$  третьим лучом, потом дополнительный нагрев выключался. По термограмме натрева и остывания от дополнительного нагрева определялась величина полной теплопотери. Сравнением расчетных значений (2) с экспериментальными получаем величины ср и С. Как отмечалось, козможности методики показаны на примере древесного угля типа БАУ. В табл. 1 приведны температурные зависимости теплоемкости разных типов утлей от температуры. Результаты данной работы показаны и на рис. 2.



Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости древесного угля (БАУ).

В случае определения излучательной характеристики угля БАУ отметим, что при экспериментальных измерениях и расчетах по определению тепловых потерь за счет теплового излучения необходимо учесть, что этот канал потерь дает существенный вклад в общие теплопотери при достаточно высоких температурах. Так, для тела сферической фор-

мы отношение теплопотерь за счет излучения к общим представлено в табл. 2.

Таблица Т

| 1   | + | Įæ |
|-----|---|----|
| °p' | r | ĸ  |

| Вид угля               | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | Литература       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| Антрациты и тощне уган | 0,924 | 0,966 | 1,050 | 1,134 | 1,176 | [7]              |
| Каменный уголь         | 0,966 | 1,092 | 1,260 | 1,428 |       |                  |
| Бурый уголь            | 1,092 | 1,260 | 1,470 |       | -     |                  |
| Древесный уголь БАУ    | 0,997 | 1,011 | 1,022 | 1,023 | 1,031 | Данная<br>работа |

Таблица 2

| T°K | Теплопотери<br>нэлучением,<br>Вт | Теплопотери<br>теплопровод.<br>газа, Вт | Полные теп-<br>лопотери,<br>Вт | Отношение<br>потерь излуч.<br>на полные, % | Давление<br>газа N <sub>2</sub><br>кПа | Раднус<br>образца,<br>10м <sup>-2</sup> |     |
|-----|----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----|
| 400 | 0,01                             | 0,04                                    | 0,05                           | 2)                                         |                                        | a Stat                                  |     |
| 500 | 0,03                             | 0,08                                    | 0,11                           | 27                                         | 6,7                                    | 6.7                                     | 0.1 |
| 600 | 0,07                             | 0,11                                    | 0,18                           | 39                                         |                                        |                                         |     |
| 700 | 0,13                             | 0,15                                    | 0,28                           | 46                                         | and the second                         | 124                                     |     |

Как видно из таблицы, при 400 К это отношение составляет 0,2. а при 700 К—почти половина всех теплопотерь сбусловлена тепловым излучением. Озметим, что в указанной области давлений газа и размеров образца, а также при этих температурах конвекция отсутствует и полные теплопотери складываются за счет теплопроводности газа и теплового излучения. Из сказанного следует, что для практических применений представляют интерес эначения коэффициента серости при относительно высознях температурах. С другой стороны, при невысоких температурах большая погрешность определения теплопотерь за счет излучения приводиг к большой погрешности определения самого коэффициента серости. С учетом зышеивложенного отметим, что указанный коэффициент в настоящей работе был определен в области температур от 500 до 700 Ки равен  $\alpha = 0.83 \pm 0.11$  (погрешность отражает статистическоз усреднение значений для разных температур).

В работе определялся коэффициент поглощения лазерного излучения. Этот параметр позволяет определить долю энергии лазера, которая идет на нагрев образца. Очевидно, что эта характеристика зависит от формы образца. Являясь максимальной при нормальном падении излучения на поверхность, эта величина убывает, окажем, в случае сферической формы образца, по закону *COSi*, где *i*—утол падения излучения лазера на поверхность. В экспериментах использовались образцы как сферической формы, так и в виде таблетки. Воспользовавшись уравнением (1) при энании темлератур насыщения, мощности лазерного луча и теплопотерь, получим для

$$\beta = \frac{\gamma \left(T_m - T_0\right)}{I}$$

соответствующие значения. На рис. З представлена температурная зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения. Отметим, что погрешность определенная в случае сферической формы образца порядка 46%, в случае таблетки—10%. Это объясняется наличием модового состава лазерного излучения и ее определенной пространственной нестабильностью. Погрешность, указаная на рис. 3, является следствием статистического усреднения разных значений.

И, наконец, в эксперименте определялся коэффициент гемпературопроводности. Как известно, он связан с ксэффициентом теплопроводно-

сти соотношением  $e = \frac{\lambda}{c_p \rho} \ cm^2/c$ , где  $\lambda$ —теплопроводность,  $c_p$ — теплоемкость,  $\rho$ —удельный вес исследуемого вещества.



Рис. 3 -Температуреая зависимость коэффециента поглощения лазерного излучения древесным углем (БАУ).

Рис. 4-Температурная зависниюсть температуропроводности дредсского угля (БАУ).

Температуропроведность определялась следующим образом: как и в [2] образец в ниде диска помещался в гахујмную камеру и нагревался в термостате с лазерным нагревом до заданной температуры. Образец в термостате закреплялся на термопаре. После установления и вырашивания температуры образец нагревался лучом дополнительного нагрева доопределенного уровня температур (см. рис. 1). После определения времени коэффициент температуропроводности определялся по формуле [2].

$$a = \frac{1,37x^2}{\pi^2 t_{10}}$$
, где х-толщина образца.

Проводились измерения для разных толщин образца и для разных мощностей лазерного луча. Результаты представлены на рис. 4. Указанная погрешность является следствием статистического усреднения результатов измерения.

Заключение. В работе представлены методы определения теплофизических и спектральных характеристик веществ на примере древесного угля. Получены значения температуропроводности, теплоемкости. излучательной способности и коэффициента поглощения лазерного излучения в области температур от 300 до 700 К. Методика использует лазерный нагрев и может быть использоване для разных веществ, максимальная температура нагрева 2000 К. Основные преимущества методики: экспериментальное определение параметра теплоотдачи исследуемого образца, одновременность определения перечисленных характеристик веществ в одном эксперименте, что повышает точность получаемых значений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Takahshi Y., Murabayshi M., J. Nucl. Sci. Technol., 12, 133 (1975).

- 2. Промышленное применение лазеров. Под ред. Г. Кебнера, М., 1988, с. 178.
- 3. Weilbacher J. C., High Temperatures-High Pressures, 4, 431 (1972).
- 4. Schulz B., Private Communication. Institute of Materials and Solid State Research, Nuclear Research Centre, Karlsruhe, FRG, 1981.
- 5. Назарян А. О. Кандидатская диссертация, Новосибирск. 1985, 126 с.
- •6. Григорьев Г. Ю., Назарян А. О., Плюхин В. Г., Смирнов Б. М. Устройство для вымерения терловыделения. А. С. № 1241117, 26.1.2.84 г.
- 7. Тепловой расчет котельных агрегатов. Под ред. Н. В. Кузнецова, М., 1973, 296 с.

# ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՏԱՔԱՅՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՋԵՐՄԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՍՊԵԿՏՐԱԼ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ Ա. Հ. ՆԱՉԱՐՑԱՆ, Բ. Մ. ՍՄԻՌՆՈՎ, Ն. Բ. ՇԱՀԲԱՉՑԱՆ

Աշխատանջում ներկայացված են նյուների ջերմաֆիզիկական և սպեկտրալ բնունագրերի որոշման լազերային մենքոդներ։ Տաջացման մաջսիմալ ջերմաստիճանը 2000 К։ Մենքոդիկայի հնարավորունյունները ցույց են տրված փայտածաի օրինափի վրա 300-ից մինչև 700 К ջերմաստիճանային տիրույթում։

# METHODS FOR DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL AND SPECTRAL PROPERTIES OF MATERIALS USING LASER HEATING

### A. N. NAZARIAN, B. M. SMIRNOV, N. T. SHAHBAZIAN

Methods for determination the thermophysical and spectral properties of materials are given. The maximum temperature of heat is 2000 K. The possibilities of the method is demonstrated using the example of charcoal in temperature region from ...300 K to 700 K.

УДК 621.371.1

# РЕКУРРЕНТНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ МНОГОСЛОЙНЫХ СРЕД

#### О. В. БАГДАСАРЯН, А. В. ДАРЬЯН

#### НПО «Лазерная техника» ЕГУ

(Поступила в редакцию 5 июня 1991 г.)

Получены аналитические выражения, позволяющие рекуррентным : образом вычислять коэффициенты прохождения и отражения от многослойных сред. Отличительной особенностью предлагаемых выражений . является возможность, по ходу вычисления, получить распределение амплигуды поля в слоях многослойной среды.

Исследование особенностей отражения и прохождения плоских электромагнитных воли через слоистые среды имеет большое прикладное значение. Этому вопросу посвящено большое число работ-как теоретических, так и прикладных. Достаточно полный обзор исследований в этомнаправлении проведен в работах [1-4]. Одним из центральных вопросов теории является определение коэффициентов прохождения и отражения от подобных сред. Как известно, соответствующие выражения для двух и более слоев чрезмерно громоздки [1] и на практике для вычислений применяют матричные и рекуррентные выражения [1-4]. В. случае большого числа различных слоев предпочтительными являются рекуррентные выражения, которые и широко используются в настоящее ... время [см., напр., 5]. Но как матричные, так и известные рекуррентные выр жсния не позволяют получить информацию о поведении амплитуды поля в слоях. В то же время подобная информация может быть полезной для прогнозирования изменений коэффициента отражения (прохождения) в зависимости от параметров среды: толщины слосв, их от--носительных диэлектрических проницаемостей, числа слоев.

Ниже будут получены рекуррентные выражения, позволяющие опи--сывать также поведение амплитуды поля плоской волны в слоях много--слойной среды.

#### 1. Основные соотношения

В настоящей работе решения волнового уравнения в слоях ищутся не в виде встречных воли, как принято, а в виде единого выражения:

$$E(z, t) = U(z) \cos[\omega t - S(z)], \qquad (1)^{\omega}$$

HOLD BEAR REAK APRILIES CON

где U(z) и S(z)-действительные функции, описывающие распределе-

141

1

¥.

10

1/22

ние по координате, соответственно, амплитуды и фазы волны. Такой поиск решения волнового уравнения предложен в [6, 7].

Подстановка (1) в одномерное волновое уравнение сводит его к системе дифференциальных уравнений

$$\frac{dU}{dk_0 z} = Y, \quad \frac{dY}{dk_0 z} = \frac{\Pi^2 - \varepsilon U^4}{U^3}, \quad (2)$$

где  $k_0 = \frac{w}{c}$ ,  $\varepsilon$ -диэлектрическая проницаемость вещества, а П-констан-

та, пропорциональная плотности потока энергии волны [6]. Интеграл си--стемы (2) равен

$$C = Y^3 + \frac{\Pi^2}{U^2} - \varepsilon U^2, \tag{3}$$

где С-константа интегрирования, пропорциональная плотности энергии электроматнитной волны.

В случае линейного однородного слоя (ε=const) система (2) интегрируется в замкнутом виде, а расчет многослойных оред может быть сведен к рекуррентной процедуре, учитывающей непрерывность функций U(z), ее производной Y(z) и потока П на границе раздела двух сред [8, 9].

### 2. Вывод рекуррентных соотношений

Рассмотрим плоскую слоистую среду, состоящую из N слоее с толщинами  $l_i$  и дивлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_i$ (i=1,2,...N). При падении плоской волны слева на рассматриваемую слоистую среду (рисунок) на выходе из нее, в правом полупространстве, имеем однородную бегущую волну. Как показано в [8], для нее выполняется условие постоянства амплитуды, т. е. U(z)=const, Y(z)=0. Амплитуду волны на выходе из слоистой среды ввиду линейности задачи, можно взять произвольной. Тогда для решения задачи можно задаться граничными условиями

$$U(l_1) = U, Y(l_1) = 0.$$

По заданному U(11) вычисляется константа

$$\Pi = U^2(l_1) \not\models \varepsilon_0, \tag{4}$$

которая неизменна во всех слоях (при отсутствии поглощения) [8]. Что касается константы С, то она меняется от слоя к слою, но постоянна в жаждом слое. Для правого полупространства, с учетом того, что Y(!<sub>1</sub>)=0, из (3) получаем

$$C_0 = 2\dot{z}_0 U^2 (l_1). \tag{5}$$

The sector and a

В силу непрерывности U(z) и Y(z) на транице слоев, в частности,

i-го и i-1-го, из (3) получаем рекуррентное соотношение для вычисления константы С

$$C_{i} = C_{i-1} + (\varepsilon - \varepsilon_{i-1}) L^{\prime 2}(l_{i}), \qquad (6)$$

где U(l<sub>1</sub>)-- это амплитуда волны на правой границе i-то слоя (z =l<sub>1</sub>).



Интегрируя первое уравнение системы (2) с учетом (3) в случає однородного і-то слоя без потерь с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$  и учитывая непрерывность U(z), Y(z) и П, получим для поведения амплитуды волны в i-ом слое (i=1,2...N)

$$U^{2}(z_{i}) = \frac{1}{2\varepsilon_{i}} \left\{ C_{i} - \sqrt{C_{i}^{2} - 4\varepsilon_{i}\Pi^{2}} \sin \left[ \varphi(l_{i}) - \frac{1}{2\varepsilon_{i}} k_{0}(l_{i} - z_{i}) \right] \right\}.$$
(7)

где  $l_1$ —координата выходной (неосвещенной) стороны слоя, Z — текущая координата в слое (м.с рисунок),  $\phi(l_1)$ —начальная фаза, определяемая амплитудой  $U(l_1)$  и знаком производной  $Y(l_1)$  на выходной стороне слоя:

$$\varphi(l_{i}) = \begin{cases} \operatorname{Arc\,sin} \frac{C_{i} - 2\varepsilon_{i}U^{2}(l_{i})}{VC_{i}^{2} - 4\varepsilon_{i}\Pi^{2}}, & \operatorname{при} Y(l_{i}) \geq 0, \\ \pi - \operatorname{Arc\,sin} \frac{C_{i} - 2\varepsilon_{i}U^{2}(l_{i})}{VC_{i}^{2} - 4\varepsilon_{i}\Pi^{2}}, & \operatorname{при} Y(l_{i}) < 0. \end{cases}$$
(8)

Дифференцированием (7) легко увидеть, что знак Y в точке l<sub>1</sub> определяется выражением (для слоев с i=2, 3,...N)

$$\operatorname{sign}[Y(l_i)] = \operatorname{sign}[\cos\varphi_{i-1}(0)]$$

где

$$\varphi_{i-1}(0) = \Psi(l_{i-1}) - 2 \sqrt{\varepsilon_{i-1}} k_0 l_{i-1}, \tag{9}$$

т. е.  $\varphi_{i-1}(0)$ — фаза на левой границе (i—1) слоя. Тогда окончательно для фазы  $\varphi(l_1)$  можем записать (i=2, 3,...N):

$$\Psi(l_{i}) = \begin{cases} \operatorname{Arc\,sin} \frac{C_{i} - 2\varepsilon_{i}U^{2}(l_{i})}{\sqrt{C_{i}^{2} - 4\varepsilon_{i}}\Pi^{2}}, & \operatorname{прм } \cos \varphi_{i-1}(0) \ge 0, \\ \pi - \operatorname{Arc\,sin} \frac{C_{i} - 2\varepsilon_{i}U^{2}(l_{i})}{\sqrt{C_{i}^{2} - 4\varepsilon_{i}}\Pi^{2}}, & \operatorname{при } \cos \varphi_{i-1}(0) < 0. \end{cases}$$
(10)

Значение  $\varphi(l_1)$  находится непосредственно из граничных условий на выходе из слоистой среды

$$\varphi(l_1) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2}, & \text{при } \varepsilon_1 > \varepsilon_0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } \varepsilon_1 < \varepsilon_0. \end{cases}$$
(11)

Заметим, что из (7) при i=1 можно получить известное выражение для. поведения амплитуды поля в одиночном слое [10].

# 3. Алгоритм вычисления

Итак, мы можем построить следующую рекуррентную процедуру: а) задаемся произвольным значением амплитуды U(l<sub>1</sub>) бегущей волны в правом полупространстве (к примеру U(l<sub>1</sub>)=1);

- б) вычисляем по формуле (5) константу C<sub>0</sub>;
- в) вычисляем С1 по формуле (6);
- г) вычисляем  $\phi(l_1)$  по формуле (11);
- д) вычисляется U(z<sub>1</sub>) по формуле (7).

Далее последовательно по выражениям (6, 9, 10, 7) вычисления проводятся для всех остальных слоев, начиная с i=2 до N+1, т. е. включая и леное полупространство. Полученное распределение амплитуды поля в левом полупространстве позволяет спределить модуль ковффициента отражения по полю:

$$|R| = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \Big|_{s < 0} = \sqrt{\frac{C_{N+1} - 2\prod \sqrt{\varepsilon_{N+1}}}{C_{N+1} + 2\prod \sqrt{\varepsilon_{N+1}}}}$$

Ввиду отсутствия потерь в слоях для коэффициента прохождения имеем

 $|T| = \sqrt{1 - |R|^2}.$ 

Заметим, что для вычисления коэффициентов отражения и прохождения (без распределения амплитуды поля по слоям) достаточно вычислять амплитуду поля по (7) только на границах слоев. В заключение авторы выражают надежду, что предложенный метод расчета слоистых сред получит распространение ввиду своей простоты и будет полезен также в методическом плане.

Авторы благодарны участникам теоретического семинара НПО «Лазерная техника» Ереванского государственного университета за полезные обсуждения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Брехонских Л. М. Волны в слонстых средах. Изд. АН СССР, М., 1957.
- 2. Элаши Ш. Волны в активных и пассивных периодических структурах. Обзор, Труды ИИЭР, 64, 22 (1976).
- 3. Борн М., Вольф Э. Основы оптнки. Изд. Наука, М., 1973.
- 4. J. R. Wait, Electromagnetic Waves in Stratified Media. London, 1962.
- J. Ohlidal, Immersion spectroscopic reflectrometry of multilayer systems. I. Theory, J. Opt. Soc. Am, A./5, 459 (1988).
- 6. Басс Ф. Г., Гуревич Ю. Г. Горячие электроны и сильные электромагнитиме волны в плавме полупроводников и газового разряда. Изд. Наука, М., 1975.
- 7. Силин В. П. ЖЭТФ, 53, № 5 (11), 1662 (1967).
- 8. Багдасарян О. В., Дарьян А. В. Метод фазовой плоскости в теории распространения электромагнитных воли. МТСНТ по раднотехнике «Излучение и распространсние электромагантных воли», Изд. ЕрПИ, Ереван, 64, 1988.
- Багдасарян О. В., Дарьйн А. В. Прохождение плоской электромагнитной волны через смонстые структуры. МТОНТ по раднотехнике «Конструирование радноэлектронных средств», Изд. ЕрПИ, Ереван, 67, 1990.
- Багдасарян О. В., Лебедев А. М., Пермяков В. А. Закономерности прохождения плоской Н-волны через слой дивлектрика с отрицательной нелинейностью. Сб. трудов НИИ ФКС ЕГУ: Нелинейные оптические взаимодействия, Изд. ЕГУ, Ереван, 169 (1987).

# ՌԵԿՈՒՐԵՆՏ ԱՐՏԱՀԱՅՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐԻՑ ԱՆԳՐԱԴԱՐՁՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՄԱՐ

#### 2. 4. คนาาแบนกรนบ, น. 4. านกรนบ

Ստացված են անալիտիկ արտահայտություններ, որոնք թույլ են տալիս ռեկուրենտ ձևով հաշվարկել բաղմաշերտ միջավայրերից անդրադարձման և թափանցման գործակիցները։ Առաջարկվող արտահյտությունների առանձնահատկությունը կայանում է Նրանում, որ հաշվարկի ընթացթում հնարավոր է ստանալ նաև դաշտի ամպլիտուդի բաշխվածությունը բաղմաշերտ միջավայրի յուրաքանչյուր շերտում։

# RECURRENT EXPRESSIONS FOR CALCULATION OF REFLECTIVITY FROM MULTILAYER MEDIA

#### H. V. BAGDASARYAN, A. V. DARYAN

Recurrent expressions for calculations of transmissivity and reflectivity from multilayer media are obtained. A distinctive feature of proposed expressions is the possibility to obtain the distribution of field amplitude in each layer of multilayer medium.

the second entered to

調え

3 :

УДК 539.186.3

# О ГИПЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ТУШЕНИИ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ И РЕЗОНАНСНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ

С. А. ТЕР-АВЕТИСЯН

Институт физических исследований АН Армении (Поступила в редакцию 16 июня 1991 г.)

Рассампривается альтернативный подход определения типа возликодесйтвия возбужданных атомов телея в реакциях тушения  $\text{He}^* + B \rightarrow \text{He} + B^+ + e$ . Показано, что в процесс исперации разлочаются дополнительные каналы вланмодействия, завысящие от состояния возбуждениего атома. Эти разнимодействия существенно отличаются от использованного до сих пор приблажения  $U(R) \sim R^{-5}$ .

Важнейшими процессами в ниэкотемпературной плазме газопогоразряда являются неупругие столжновения возбужденных атомов с невозбужденными, приводящие к ионизации последнего

$$A^* + B \to A + B^+ + e. \tag{1}$$

Это с одной стороны один из тлавных источников ионов, а с другой эффективный канал тушения вижних, наиболее заселенных состояний. Если атом A<sup>\*</sup> находится в метастабильном состоянии, то процесс (1) обычно называют ионизацией Пеннинта. Общирная литература, посвященная пеннинговской ионизации, наиболее полно отражена в обзорах [1, 2]. Однако до сих пор остается некоторая ноясность в метанизме пеннинговской ионизации и в типе взаимодействия сталкивающихся частиц, хотя расчеты соответствующих сечений производнлись в предположении, что энергия взаимодействия в исходном канале реакции (1) описывается потенциалом  $U(R) = -C/R^6$ .

Настоящая работа посвящена определению типа взаимодействия по имеющимся в литературе разрозненным экспериментальным данным в предположении, что между сталкивающимися частицами возникают дальнодействующие дисперсионные силы с энертией взаимодиствия, описываемой потенциалом.

$$U(R) = -\frac{C}{R^n} (C > 0, n > 0).$$
(2)

Теоретическая трактовка ионизации Пеннинга основана на аналогии. с распадом автоионизационных состояний, так как в процессе (1) начальное дискретное электронное состояние квазимолекулы (А\*-В) погружено в непрерывный спектр конечных состояний (А—В<sup>+</sup>). Скорость распада квазимолекуллы связана с шириной  $\Gamma(R)$  этого автоионизационного уровня при заданном расстоянии R между ядрами. В области энергии столкновений E намного большей, чем глубина потенциала взаимодействия  $\varepsilon(E \gg \varepsilon)$ , то есть когда существует однозначная связь между расстоянием наибольшего сближения ядер го и прицельным параметром и процесс в основном протекает в отталкивательном потенциале взаимодействия атомов в начальном канале, имеет место рост сечения пеннинговского процесса с увеличением энергии столкновения частиц [3, 4]. Действительно, с увеличением энергии столкновения достигаются более близкие расстояния между частицами, на которых из-за большой ширины автоионизационного уровня  $\Gamma(R)$  ионизация протекает с большей вероятностью.

При малых кинетических энергиях сталкивающихся частиц, сечение процесса ионизации (1) дается формулой [5]:

$$\sigma_{\Pi} = f_{\omega} P_{i} \sigma_{aa \forall a} , \qquad (3)$$

где  $f_{\omega}$  —вероятность того, что данный процесс разрешен по полному электровному спину,  $P_1$ —вероятность ионизации при сближении сталкивающихся частиц,  $\sigma_{\text{махв}}$  —сечение захвата возбужденного атома сталкивающейся с ней частицей. В (3) ионизация имеет место при сильном сближении сталкивающихся частиц за счет захвата в потенциале притяжения дейстбующего между ними. В соответствии с результатами оценок в работе [6] вероятность ионизации щелочных металлов равна единице, а для инертных тазов [7] она меняется незначительно от 0,11 до 0,15.

Инсходя из (2), сечение захвата описывается формулой

$$\sigma_{anxn} = \pi n (n-2)^{\frac{2-n}{n}} \left(\frac{C}{mv_{m}^{2}}\right)^{\frac{2}{n}},$$
 (4)

где П- приведенная масса сталкивающихся частиц,  $v_{\infty}$ —скорость на бесконечности. Указанная зависимость сечения ионизации от скорости подтверждается многими экспериментальными данными. Так, в [8] измерялась зависимость сечения пеннинговского процесса от скорости столкновения Ne(<sup>3</sup>P<sub>2</sub>) с атомами аргона, криптона и ксенона в области скоростей столкновения  $v = (0,3-1,7) \cdot 10^5$  см/с. Из нажлона k кривой логарифмической зависимости сечения ионизации от v был определен тип взаимодействия, то есть определено п по формуле (4); k=4/n. Для столкновений метастабильного неона с атомами аргона, криптона и ксенона было получено, соответственно, n = 6,45; 5,48; 4,6. В работе [3] было получено n = 4 для Ne(<sup>3</sup>P<sub>2</sub>)—Кг, что значительно отличается от приведенного выше эначения. Конечно, п может меняться с рассгояныем R, что означает зависимость k от скорости столкновений. В [3] при маленьких скоростях столкновений He(2<sup>3</sup>S), He(<sup>3</sup>P<sub>2</sub>0), Ar(<sup>8</sup>P<sub>2</sub>0) с атомами **П**g. n=6, указывая на Ван-дер-Ваальсовский характер притяжения у этих систем при больших расстояниях. При малых расстояниях, то есть при больших скоростях для He(2<sup>3</sup>S), Ne(<sup>3</sup>P<sub>2,0</sub>)—Hg силы притяжения хорошо описываются диполь-квадрупольным взаимодействием и n=4. В случае столкновения He(2<sup>1</sup>S)—Hg, при больших расстояниях между частицами, притяжение описывается n=2,66, указывая на «химический» тип взаимодействия.



На <sub>г.</sub>исунке г.редставлены зависимости сечений ионизации атомов а) Ar, Kr, Xe и b) Na, K, Rb, Cs от их поляризуемости, при столжновении с возбужденными атомами гелия в состояниях:  $\bigcirc -2^1P_1$ ,  $\textcircled{} -2^1S_0$ ,  $\textcircled{} -2^3S_0$ . (Значения сечений взяты из работ [10-12]).

В настоящей работе используется следующий альтернативный подход. Так как в исходном канале взаимодействия один из атомов находится в возбужденном состоянии, то согласно [9], можно написать  $C = \alpha \overline{r^2}$ , где  $\alpha$ —поляризуемость атома В в основном состоянии,  $\overline{r^2}$ —квадрат орбиты возбужденного электрона атома A\*, усредненный по его состояниям. Так как из (4)

$$\ln \sigma_{\text{saxs}} = \frac{2}{n} \ln \alpha + \ln \frac{\pi n}{n-2} \left( \frac{\overline{r^2}}{2E} (n-2) \right)^{\overline{n}},$$

то для определенной энергии взаимодействия график зависимости сечения ионизации от поляризуемости невоэбужденных атомов (см. рис. а и б) определенной труппы периодической системы элементов, даст возможность определить тип взаимодействия из наклона k=2/п. Полученные намч значения П и соотвтствующие ссылки приведены в таблице. Когда во взаимоделствии участвуют метастабильные атомы гелия в состоянии 2<sup>1</sup>S, то независимо от ионизируемого атома взаимодействие носит диполь-дипольный характер, а в случае 2<sup>3</sup>S—ион-дипольный. При взаимодействии резонансно-возбужденных атомов гелия с атомами инертных гавов и с атомами щелочных металлов действуют ион-октупольные или диполь—квадрупольные силы притяжения.

Таблица

| Атон | Bost                    | бужденный атом А'<br>Не* |                |
|------|-------------------------|--------------------------|----------------|
| B    | 23S0                    | 21S0                     | 21P1           |
| Na   | The state of the second | and the state            | A Charles and  |
| K    | 1,9±0,4 [11]            | 3,2±0,5 [11]             | 4,3+0,6 [11]   |
| Rb   |                         | The strange              |                |
| Cs   | a set the set           | The Cales of St          |                |
| Ar   |                         |                          | A STATISTICS   |
| Kr   | 2,1±01 [12]             | 2,9±0,1 [10]             | 3,5±0,1 [10]   |
| Xe   |                         | A CONTRACTOR             | The second and |
| Hg   |                         | 2,66 [3]                 | The second     |

Типы взаимодействия п для процессов столкновений (1). Указаны источники экспериментальных дляных. Подчеркнут результат других авторов.

Иолученные данные говорят о том, что переход системы из автононизационного (А\*—В) состояния на ионный терм (А—В+) происходит через включения дополнительных каналов взаимодействия сильно определяющих величину сечения тушения. Например, в случае ионизации метастабильными 2<sup>3</sup>S атомами гелия, когда возбужденный влектрон не может перейти в основное состояние из-за того, что влятростатическое взаимодействис атомов не снимает запрета по спину на триплет-синглентный переход, процесс понизации можно представить схематически в следующем виде

$$\operatorname{He}(2^{3}S) + B \rightarrow (\operatorname{He}^{+} + B^{-}) \rightarrow \operatorname{He} + B^{**} \rightarrow \operatorname{He} + B^{+} + e,$$

то есть, имеет место подбарьерный переход электрона между атомами A\* и В. Такое взаимодействие приводит к обляжению частиц на малые межъядерные расстояния, где вероятность автоионизации становится очень большой, что подтверждается экспериментально. В случае He(2<sup>1</sup>5) кроме реакции (5) возможна также прямая передача возбуждения (удары второго рода) на автоионизационное состояние В<sup>••</sup>, сечение которсй достаточно велико [13]. Из анализа электорнных спектров [14] пеннинговской ионизации в [15] указывалось на то, что механизм ионизации для атомов щелочных металлов и атомов ртути, аргона, криптона и ксенона имеет различный характер. Однако, согласно приведенному анализу, такое различие не наблюдается.

Полученные результаты позволяют исходя из разроэненных измерений предсказать типы взаимодействия (см. таблицу, где экспериментально определена величина п лишь в последней строке для ртути). Показано, что ионизационный процесс (1) происходит через дополнительные каналы, приводящие к разным типам взаимодействия, существенно отличающихся от использованного до сих пор приближения  $U(R) \sim R^{-6}$  для потенциала взаимодействия.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Слирнов Б. М. Возбужденные атомы, Энергонздат, М., 1982.
- 2. Rundel R. D., Stebbing R. F., In: Case studies in atomic collision physica, v.2. Ed. by McDaniel E. W. North-Holland, 1972.
- 3. E. Illenberger, A. Niehaus, Z. Phys., B20, 33 (1975).
- 4. Woodard M. R., et al. J. Chem. Phys., 69, 2978 (1978).
- 5. Bates D. R., et al. Proc. Phys. Soc., 91, 288 (1967).
- 6. Жданов В. П., Чисисов М. И. Опт. и спектр. 41, 521 (1976).
- 7. Bolden R. C., et al. J. Phys., B3, 61 (1970).
- 8. Tang S. Y., et al. J. Chem. Phys., 55, 56 (1972).
- Слирнов Б. М. Азомные столкновения и электронные процессы в плазме, Атомиздат, М., 1968.
- 10. Девдариани А. Э. н др. ЖТФ, 55, 368 (1985).
- 11. Толмачев Ю. А. Опт. и спектр. 62, 750 (1987).
- 12. A. L. Schmeltekopf, F. C. Fensenfeld, J. Chem. Phys. 53, 3173 (1970).
- 13. Габпислян Ю. К. и др. ЖПС, 53, 535 (1990).
- 14. Куприянов С. Е., Кабанов С. П. В сб. Химия плазмы, Изд. Атомиздат, М., 3, 189 (1976).
- 15. Толмачев Ю. А. В сб. Химия плазмы, Изд. Энергондзат, М., 9, 80 (1982).

## ՀԵԼԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍՏԱԲԻԼ ԵՎ ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՑԻՆ–ԳՐԳՌՎԱԾ ԱՏՈՄՆԵՐԻ ՄԱՐՄԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐՈՒՄ ՓՈԽԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԻՊԻ ՄԱՍԻՆ

#### U. 2 .SbP-U.4bShUSUL

Քննարկվում է այլընտրական մոտեցում պարդելու համար փոխազդեցության տիպը հեր լիումի գրդոված ատոմների մարման ռեակցիաներում. Не\*+B→He+B++e: 8ույց է արված, որ գործընβացի մեջ ընդդրկվում են լրացուցիչ փոխազդեցություններ, որոնց կախված են գըրգրոված ատոմի վիճակից։ Այդ փոխազդեցությունները էապես տարբերվում են մինչև այժմ օգտագործվող  $U(R) \sim R^{-6}$  մոտավորությունից։

# ON THE TYPE OF INTERACTIONS IN QUENCHING REACTIONS OF METASTABLE AND RESONANTLY-EXCITED HELIUM ATOMS

### S. A. TER-AVETISYAN

An alternative approach to the determination of the type of interactions in reactions of excited helium atoms quenching:  $\operatorname{He}^* + B \to \operatorname{He} + B^+ + e$  was considered. It is shown that additional interaction channels depending on the state of the excited atom are involved. These interactions are essentially different from conventional  $U(R) \sim R^{-6}$  approximation.

### УДК 621.373.826.038.825.2

# СПЕКТРАЛЬНО-ГЕНЕРАЦИОННЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ. СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ YALO3: Er34

С. М. АРУТЮНЯН, Р. Б. КОСТАНЯН, Т. В. САНАМЯН

Институт физических исследований АН Армении

(Поступила в редакцию 10 мая 1991 г.)

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований времени жизни уровней  ${}^{2}H_{11/2}$ ,  ${}^{4}S_{3/2}$ ,  ${}^{4}F_{9/2}$ ,  ${}^{4}I_{11/2}$  и  ${}^{4}I_{13/2}$  иона эрбия в кристалле ортоалюмината иттрия. Сравнением экспериментальных и расчетных кривых затухания возбуждения с уровня  ${}^{4}I_{13/2}$  определены величины вероятностей передачи энергии.

При ламповой и лазерной накачке с длиной волны излучения 1,54 мкм получены соответственно переспраиваемая в области 2,71— 2,92 мкм и на длине волны 2,79 мкм генерация.

### Введение

Трехмикронные лазеры находят применение в медицине, голографии, молекулярной спектроскопии, для контроля загрязнения атмосферы [1--4]. Наилучшими энергетическими параметрами на сегодняшний день обладают кристаллы YAG:Ег на длине волны излучения 2,94 мкм, в которых реализуется КПД до 1,5% в режиме свободной генерации [5]. За последнис несколько лет трехмикронная генерация на трехвалентных ионах эрбия с удовлетворительными параметрами получена в ряде кристаллов [6-9].

## Люминесцентные характеристики YAlO3: Er3+

В настоящей работе приводятся результаты исследований кинетических, люминесцентных и генерационных характеристик кристаллов YAI O<sub>3</sub>:Er<sup>+</sup>, о трехмикронной генерации которых впервые сообщалось в [10]. Кристаллы YAlO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup> по теплофизическим свойствам не уступают кристаллам YAG:Er. Ряд специфических свойств этих кристаллов, таких как многоволновая генерация, низкие пороги генерации и сравнительно высокий КПД [11] делают лазеры на их основе привлекательными для дальнейшего приложения в науке и технике.

Для понимания работы трехмикронного лазера на переходе <sup>4</sup>/<sub>11/2</sub>-+<sup>4</sup>/<sub>13/2</sub>, а также оценки предельных лазерных характеристик этих кристаллов нами были измерены времена жизни (т) уровней <sup>2</sup>*H*<sub>11/3</sub>, <sup>4</sup>*S*<sub>3/3</sub>, <sup>4</sup>*F*<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>/<sub>9/2</sub>, <sup>4</sup>/<sub>11/2</sub> и <sup>4</sup>/<sub>13/2</sub> нона эрбия в YAlO<sub>3</sub>, участвующих в процессе создания инверсной населенности, в широком концентрационном диапазоне, а также средние вероятности кросс-релаксационных переходов по схеме (рис. 1):

 $[{}^{4}I_{n_{j_{2}}}, {}^{4}J_{u_{j_{2}}}] \to [{}^{4}J_{u_{j_{2}}}, {}^{4}I_{u_{j_{2}}}]. \tag{1}$ 

Источником возбуждения уровней <sup>2</sup> $H_{w_{12}}$ , <sup>4</sup> $S_{v_{12}}$ , <sup>4</sup> $I_{w_{13}}$ , <sup>4</sup> $I_{w_{15}}$  н <sup>4</sup> $F_{*_3}$ , <sup>4</sup> $I_{*_1}$ служил лазер на YAG:Nd с удвоением частоты на длинах волн 0,53 и 0,66 мкм и с длительностями импульсов 20 и 100 нс, соответственно. Люминесценция с исследуемых уровней наблюдалась на длинах волн 0,86 мкм (<sup>4</sup> $S_{v_{13}} \rightarrow {}^4I_{w_{13}}$ ), 0,67 мкм (<sup>4</sup> $F_{*_3} \rightarrow {}^4I_{w_{15}}$ ), 0,78 мкм (<sup>4</sup> $I_{v_{12}} \rightarrow {}^4I_{w_{12}}$ ), 1,02 мкм (<sup>4</sup> $I_{w_{12}} \rightarrow {}^4I_{w_{13}}$ ), и 1,65 мкм (<sup>4</sup> $I_{w_2} \rightarrow {}^4I_{w_{13}}$ ). Регистрация проводилась с использованием монохроматора СДЛ-1 и фотоприемников ФЭУ-83 и ФД-9Э-111.

Tabauga 1

1 Martine ......

| 1      | 10                                        | 15                                                                                                                                        | 25                                                                                                                                                                                                              | 100                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 45 MRC | 5 MRC                                     | 1.2 MRC                                                                                                                                   | 0.4 MRC                                                                                                                                                                                                         | <0.1 MRC                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ~8 MRC | ~8 MKC                                    | ~8 MRC                                                                                                                                    | ~8 MRC                                                                                                                                                                                                          | <u></u>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 1.6 ме | 1.5 MC                                    | 1.3 mc                                                                                                                                    | 0.9 мс                                                                                                                                                                                                          | -                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 9.5 мс | 8 MC                                      | 5 wc                                                                                                                                      | 1.8 мс                                                                                                                                                                                                          | 0.4 mc                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|        | 1<br>45 мкс<br>~8 мкс<br>1.6 мс<br>9.5 мс | 1         10           45 мжс         5 мжс           ~8 мжс         ~8 мкс           1.6 мс         1.5 мс           9.5 мс         8 мс | 1         10         15           45 мжс         5 мжс         1.2 мжс           ~8 мжс         ~8 мжс         ~8 мкс           1.6 мс         1.5 мс         1.3 мс           9.5 мс         8 мс         5 мс | 1         10         15         25           45 мкс         5 мкс         1.2 мкс         0.4 мкс           ~8 мкс         ~8 мкс         ~8 мкс         ~8 мкс           1.6 мс         1.5 мс         1.3 мс         0.9 мс           9.5 мс         8 мс         5 мс         1.8 мс |

Время жизни (т) уровней 'S<sub>3/2</sub>, 'F<sub>9/2</sub>, 'I<sub>11/2</sub> и 'I<sub>13/2</sub> от концентрации нонов эрбия.

В таблице 1. приведены значения т уровней  ${}^{4}S_{3/_{3}}$ ,  ${}^{4}F_{9/_{3}}$ ,  ${}^{4}J_{\omega_{/_{3}}}$  и  ${}^{4}J_{\omega_{/_{3}}}$ при концентрациях (С) ионов врбия 1, 10, 15, 25 и 100 ат% при T = 300 К. Как видно из указанных уровней  ${}^{4}S_{3/2}$  подвержен наиболее сильному концентрационному тушению, что связано, как и в других врбийсодержащих кристаллах, с увеличением с концентрацией вероятности кросс-релаксационных переходов по схеме:

$$[{}^{2}H_{n_{l_{2}}}, {}^{4}h_{s_{l_{2}}}] \to [{}^{4}J_{s_{l_{2}}}, {}^{4}J_{s_{l_{2}}}] \times [{}^{2}H_{n_{l_{2}}}, {}^{4}h_{s_{l_{2}}}] \to [{}^{4}J_{s_{l_{2}}}, {}^{4}J_{s_{l_{2}}}].$$
(2)

Времена жизни уровней <sup>2</sup> $H_{u/s}$  и <sup>4</sup> $I_{0/s}$  определялись по методике, описанной в [12], их значения были меньше постоянной времени регистрацви используемой аппаратуры и были меньше 0,1 и 1 мкс, соответственно. Для исследования кросс-релаксации по схеме (1) наблюдалась люминесценция на переходе (<sup>4</sup> $I_{0/s} \rightarrow {}^{4}I_{0/s}$ ) с длиной волны излучения  $\lambda = 1,65$  мкм, в оптически тонких образцах кристаллов YAlO<sub>3</sub>:Ес при различных значениях плотности возбужденных ионов. Изменение плогности возбужденных ионов өрбия осуществлялось варьированием диаметра лазерного пучка при помощи линзы или использованием набора светофильтров. Энертия лазерного излучения измерялась калориметром ИМО-2Н. Диаметр сфокусированного на образец пучка измерялся фотографичским методом [13].

На рис. 2 приведены осциллограммы люминесценции кристаллов. YAiO<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> (25 ат<sup>0</sup>/<sub>0</sub>) с уровня <sup>4</sup>I<sub>0/2</sub> при двух значениях концентрации возбужденных ионов эрбия (10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup> и 5·10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>). О наличии эффективной передачи между ионами Ег свидетельствует разная скорость затухания люминесценции на приведенных осциллограммах, что особенно ясно видно на начальном участке кривой затухания. Об этом свидетельствует также наблюдаемое в эксперименте увеличение эффективного времени жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>0/2</sub>.





Кинетические уравнения, описывающие изменения населенностей лазерных уровней  ${}^{4}I_{n_{12}}$  и  ${}^{4}I_{n_{12}}$ , при условиях  $\tau ({}^{2}H_{n_{12}})$ ,  $\tau ({}^{4}I_{o_{12}})$ , и  $\tau_{B} \ll \tau ({}^{4}I_{n_{12}})$ , и  $\tau_{B} \ll \tau ({}^{4}I_{n_{12}})$ , и  $\tau ({}^{4}I_{o_{12}})$ , где  $\tau_{B}$  — длительность импульса возбуждения, можно записать в виде:

$$\dot{N}_{3} = W \cdot N_{2}^{2} - N_{3} \cdot A_{31} - N_{3} \cdot W_{3},$$

$$\dot{N}_{3} = W_{3} \cdot N_{3} + N_{3} \cdot A_{32} - 2 \cdot W \cdot N_{2}^{2} - N_{3}/\tau_{32}.$$
(3)

153.

С начальным условием  $N_3(0) = N_1(0) = N_{\Pi}$ , где  $N_3(0)$  и  $N_2(0)$ число возбужденных ионов эрбия на уровнях  ${}^4I_{u_{12}}$  и  ${}^4I_{u_{12}}$ , к моменту завершения импульса накачки,  $N_n$ —число поглощенных кристаллом квантов излучения. Величины  $N_3(0)$  и  $N_2(0)$  определялись по известным значениям коэффициента поглощения кристаллов YAlO<sub>3</sub>:Er<sup>+3</sup> на  $\lambda$ = 0,53 мкм (k), энергии лазерного излучения и площади сфокусированного на кристалле лазерного луча—S по выражению для оптически тонких образцов

$$N_{30}-N_{20}=\frac{N_{H}\cdot k}{S},$$

N<sub>п</sub>-число квантов накачки. Коэффициенты Эйнштейна были определены экспериментально по формуле Кравца:

$$A_{31} = \frac{8\pi n_{\lambda} c \left(2 \cdot f' + 1\right)}{N_0 \cdot \lambda^4 \left(2 \cdot f + 1\right)} \int k(\lambda) d\lambda,$$

где  $n_{\lambda}$ —коэффициент преломления среды, с—скорость света.  $N_0$ —концентрация нонов активатора,  $k(\lambda)$ —коэффициент поглощения для переходз с основного состояния, J, J'—полные моменты количества движения 4f-электронов в основном и возбужденном состояниях,  $\lambda$ —длина волны перехода.

Значение  $A_{32}$  измерялось из сравнения интенсивности люминесценции на переходах  ${}^{4}J_{u_{1a}} \rightarrow {}^{4}J_{u_{1a}} \rightarrow {}^{4}J_{u_{1a}}$ ,

$$A_{32} = A_{31} \cdot \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

где  $J_1$ ,  $J_2$  и  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ —интенсивности и длины воли люминесценции, соответствующие переходам  ${}^4J_{n_{12}} \rightarrow {}^4J_{n_{23}}$  и  ${}^4J_{n_{23}} \rightarrow {}^4J_{n_{23}}$  [14].

Величина  $W_3$  определялась из выражения  $\tau({}^4I_{n_{12}}) = \frac{1}{W_3 + A_{31} + A_{32}}$ по известным  $\tau({}^4I_{n_{12}}), A_{31}$  и  $A_{32}$ .

Уравнения (3) решались численным методом Рунте-Кутта при помощи ЭВМ. Значения W определялись сравнением экспериментальных кривых затухания люминесценции с расчетной зависимостью числа возбужденных ионов эрбия от времени на уровне  ${}^{4}I_{\rm M_{2}}$  с учетом соотношения  $I_{2}(t) = k \cdot n_{2}(t)$ , где  $I_{2}(t)$ —интенсивность люминесценции, k—коэффициент пропорциональности. Наилучшее совпадение было получено для значения W, равных 0,75×, 2,5× и 5×10<sup>-17</sup> см<sup>3</sup> сек<sup>-1</sup> для концентрации ионов Ег—10, 15 и 25 ат%.

Для характерного числа возбужденных ионов Ег при работе эрбиевого лазера в режиме свободной генерации в кристаллах YAlO:Ег (25 ат%)  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> вероятность переходов (W<sub>n</sub>) благодаря кросс-релаксации (1) становится равным  $W_n = W \cdot N_2 \sim 2,5 \cdot 10^3$  сек<sup>-1</sup>, величина которого на порядок превосходит значение вероятности спонтанных переходов с уровня <sup>4</sup>I<sub>m/a</sub>, равное 2,5·10<sup>2</sup> сек<sup>-1</sup>.

Величина квантового выхода люминесценции с верхнего лазерного уровня  ${}^{4}I_{P_{15}}\eta = \frac{A_{31} + A_{32}}{A_{31} + A_{32} + W_{3}}$  оказалась равной 0,21, которая в 14 раз превосходит  $\eta$  для YAG:Ег христаллов.

### Спектрально-генерационные жарактеристики кристалаов УАЮ3: Er<sup>3+</sup>

Для спектрально-генерационных исследований были выращены кристаллы YAlO<sub>5</sub>.Er<sup>3+</sup> вдоль мристаллической осн [114] с концентрациямы ионов эрбия 10, 15 и 25 ат% размерами Ø 5×80 мм. Спектр тенерации изучался при помощи монохроматора СДЛ-1, энертия измерялась калориметром ИМО-2Н. Для перестройки длины волны генерации в пределах длин волн от 2,7—2,9 мкм в оптический резонатор вводилась сапфировая призма с брюстеровскими торцами. Спектральное разрешение в указанной области составляло величину ~400. Выделялись спектральные линим 2,71, 2,73, 2,76, 2,79, 2,82, 2,84, 2,86 и 2,92 мкм.

Основные параметры перестранваемого трехмикронного лавера приведены в таблице 2.

Таблица 2

| λ <sub>r</sub> (мкм)   | 2.71 | 2.73 | 2.75 | 2.79 | 2.82 | 2.84 | 2.86 | 2.92 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E <sub>nop</sub> (Az)  | 0 15 | 0 15 | 0.4  | 0.25 | 0.25 | 0.2  | 0.15 | 0.05 |
| С <sub>в</sub> =400Дя) | 0.15 | 0.15 | 0.4  | 0.25 | 0.25 | 0.2  | 0.15 | 0.05 |

Спектрально-генерационные характеристык користаллов

Линия 2,92 мкм, отсутствующая в спектре свободной генерации, наблюдалась только при подавлении остальных спектральных компонент.

Тенденции к насыщению выходной энергии генерации при энергиях накачки до 500 Дж не наблюдалось.

Эффективная кросс-релажсация по схеме (2) поэволила наблюдать трехмикронную генерацию при возбуждении ее с нижнего лазерного уровня  ${}^{4}/{}_{n}{}_{l}$ , который накачивался излучением лазера на эрбиевом стекле с длиной волны излучения  $\lambda = 1,54$  мкм. При поперечной накачке с энергией до 20 Дж/см<sup>3</sup> с использованием цилиндрической линзы с фокусным расстоянием 15 см, генерация наблюдалась только на кристаллах с 25-процентным содержанием ионов эрбия. В кристаллах YAlO<sub>3</sub>:Er<sup>3-</sup> (25 ат%) порот генерации равнялся 10 Дж/см<sup>3</sup>, генерация наблюдалась на длине волны 2.79 мкм.

and a star of the star of the star

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров А. М. Физика-медицине, Вестинк АН СССР. 1981, в. 7, с. 121-130.

2. Гнатюк Л. Н., Гурари М. П. н др. Квантовая электроника. 5, 164 (1978).

 Лазерная спектроскопия атомов и молекул. Под ред. Вальтера Г. Мир. М., 1979, 432 с.

4. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Финкли Э. Д. Мир .М., 1979, 416 с.

- 5. Жеков В. И. н др. Квантовая электроника. 10, 1871 (1983).
- 6. Каминский А. А. ДАН СССР, 290, 1103. (1986).
- 7. Воронько Ю. К ., Гессен С. Б., и др. Квантовая электронека. 16. 1785 (1989).
- 8. Александров В. И., Вишняков М. А. н др. Квантовая электроннка, 16, 2421 (1989).
- 9. Еськов Н. А., Кулевский Л. А. и др. Крантовая электреника, 17, 865 (1990).
- 10. Каминский А. А. "Бутаева Т. И. н др. Письма в ЖТФ. 2, 787 (1976).
- 11. Арутюнян С. М., Костанян Р. Б. и др. Кнантовая электрописса. 14, 1592 (1987).
- 12. Костанян Р. Б., Санамян Т. В. ДАН АрмССР. 81, 128 (1985).
- 13. Хиря Г. Измерение лазерных параметров. Мир. М., 1970. 540 с.

14. Баздасаров Х. С., Жехов В. И. и др. Изв. АН СССР, 46, 1496 (1982).

# YAIO3: E+3 ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՍՊԵԿՏՐԱԼ, ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԵՎ ԼՅՈՒՄԻՆԵՍՑԵՆՏԱՅԻՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

#### Ս. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ռ. Բ., ԿՈՍՏԱՆՑԱՆ, Տ. Վ. ՍԱՆԱՄՅԱՆ

Uzhummuhanu pend pendud en impinisi opinuljaisi humani  $l_{ppinisi}$  independ pendud en is impinisi opinuljaisi opinisi independent i se independent independent

Լամպային և 1,54 մկմ լաղերային մղման աղբյուրների օգտադործմամբ համապատասիանաբար ստացված են 2,71–2,92 մկմ տիրույթում վերալարվող և 2, 79 մկմ ալիջի երկարության լաղերային ճառագալթում,

# SPECTRAL, LUMINESCENCE AND LASER PROPERTIES OF YAIO, : Er+3 CRYSTALS

# S. M. HARUTYUNYAN, R. B. KOSTANYAN, T. V. SANAMYAN

Results of experimental investigations of the lifetime of  ${}^{2}H_{n_{1_{2}}}$ ,  ${}^{4}S_{s_{1_{2}}}$ ,  ${}^{4}F_{s_{1_{2}}}$ ,  ${}^{4}I_{n_{1_{2}}}$ , and  ${}^{4}I_{n_{1_{2}}}$  erbium ion levels in yttrium orthoaluminates are given. From the comparison of experimental and calculated curves of excited  ${}^{4}I_{n_{1_{2}}}$  level relaxation, the values of energy transfer probabilities have been defined.

Using a lamp and 1.54 µm pump sources we have respectively obtained an emission tunable in 2.71-2.92 µm range and 2.79 µm.

1 Stand

122.15

#### УДК 535.215:537.226.83

# СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОТКЛИКИ ПОЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ LiNbO<sub>3</sub>:Er<sup>3+</sup>

В. Г. БАБАДЖАНЯН, Г. Г. ДЕМИРХАНЯН, Р. Б. КОСТАНЯН

Институт физических исследований АН Армении

(Поступила в редакцию 6 сентября 1991 г.)

Приволотот ферультаты изследований влектрических отклинов полярных присталлев LNbO<sub>0</sub>: Er<sup>3+</sup> при комнетных температурах на оптические возбуждения сулмернольными импульсами в полотах поглощения примесных котов.

Электрические отсылли легиробанных полярных кристаллов на оптические возбуждегся в полосах поглощения примесных ионов содержат информацию о темия важных спектроскопических характеристиках поглощающих центров, как времена жизни внертстических уровней, квантовые выходи излучений, с них, вероятиссти излучательных и безызлучательных переходов, дипольные моменты различных состояний и т. д. [1]. В работах [1, 2] из зарядовых откликов исследуемых кристаллов на соответствующие оптические возбуждения были определены эти величины для ионов  $Cr^{3+}$  в  $LiNbO_3$  и  $LiTaO_3$  а также ионов  $Cu^{2+}$ в  $LiT_aO_3$ .

В данной работе приведены результаты исследований световндуцированных электрических откликов, проведенных при комнатных температурах на кристаллах LiNbO<sub>3</sub>;Er<sup>3+</sup>, при возбуждении прямоугольными световыми импульсами. Развита теоретическая модель расчета вкладов в токовый отклик различных процессов, приводящих к изменению дипольного момента единицы объема образцов.

Токовый стклик легированного полярного кристалла на оптическое возбуждение примесного иона обусловлен как прямым пироэлектрическим эффектом, связанным с многофононной безызлучательной релаксацией части поглощенной энергии возбуждения (фононный механизм), так и изменением поляризации кристалла вследствие переходов между энергетическими состояниями примесного нона (примесной механизм).

Вклад от фонсиного механизма в общую плотность тока имеет вид [2, 3]

$$i^{\Phi}(t) = \gamma \times \frac{k \times B(t) \times r}{C_{\tau}}, \qquad (1)$$

где  $\gamma = dP/dT$ —пировлектрический коэффициент материала, (Р—поляризация кристалла, Т—температура), k—коэффициент поглощения для возбуждающего оптического излучения, B(t)—интенсивность падающих световых импульсов, r—часть поглощенной внергии, безызлучательно

1 In her town

релаксируемая в фононный ревервуар основы, Су-удельная теплоемкость кристалла.

Вклад примесного механизма в общую плотность тока при перехо-. дах между состояниями иона λ и v равен [3]

$$j^{\mathrm{np.}}(t) = \sum_{\mathbf{v}' \neq \lambda} \mathbf{n}_{\mathbf{v}'} \cdot \Delta P_{\lambda \mathbf{v}'}, \qquad (2)$$

где п, —населенность уровня v,  $\Delta P_{\lambda v}$  —разность дипольных моментов примесного иона в состояниях  $\lambda$  и v. В стационарных условиях ( $n_v = 0$ ) вклад примесного механизма равен нулю.

Для исследований в качестве модельного нами еыбран кристала LiNbO<sub>3</sub>: $Er^{3+}$ , который ранее спектроскопически исследован в работах [4, 5]. Такой выбор позволяет посредством борбуждения спределенных энергетических уровней ионов  $Er^{3+}$ , разделить вклады примеского и Сононного механизмов. Кроме того, как известно, при влептронных переходах в примесных  $TR^{3+}$  ионах конфигурационные координаты мало меняются. Это позволяет предположить, что при возбуждении примесного иона изменение дипольного момента обусловлено лишь изменением электронного состояния самого примесного центра.

В рамках теории кристаллического поля (КП) лигандов, выбирая направление z вдоль оптической осн C<sub>3</sub> кристалла  $LiNbO_3$  и учитывая, что наибольший вклад в потенцисл КП дают кездрупольные члены, для изменения z компоненты дипольного момента  $TR \,\omega^+$ иона, можно записать [6]:

$$\Delta P_{\lambda_{v}}^{s} = A \cdot \frac{Z_{0} \cdot e \cdot a_{0}}{R_{0}^{2}} \left(\frac{d}{R_{0}}\right)^{3} (2f_{\lambda} + 1) (2f_{v} + 1) \left[\frac{|\langle f_{\lambda} || U_{2} || f_{\lambda} \rangle|}{V 2f_{\lambda} + 1} - \frac{|\langle f_{\lambda} || U_{2} || f_{v} \rangle|}{V 2f_{v} + 1}\right].$$
(3)

Эдесь  $A = (16 \cdot 7 \cdot \sqrt{7}) / (15 \cdot \sqrt{3}); R_0, Z_6$  — радиус и эффективный заряд первой координационной сферы приместого иона;  $\alpha_0$  — его статическая электронная поляризуемость; d — расстояние остова примеси от центра кислородного октаздра;  $J_{\lambda}$  — полный угловой момент состояния  $\lambda$ ;  $< \dots | U_2 || \dots >$  — приведенные матричные элементы неприводимого единичного тензорного оператора U<sub>2</sub>, значения которых табулированы в [7].

Исследования проводились на ориентированных пластинах размерами  $10 \times 2 \times 7$  (X, Y, Z) мм.<sup>3</sup>, вырезанных из монодоменных кристаллов  $LiNbO_3:Er^{3+}$ , выращенных методом Чохральского. Концентрация примеси  $(Er_2O_3)$  в исходной шихте была порядка 1% вес. Световое возбуждение производилось в направлении оптически полированных Y-граней исследуемых пластин. Возбуждающие оветовые прямоугольные импульсы формировались из излучения непрерывной лампы накаливания с помощью механического прерывателя. Длительность световой засветки образцов была порядка 15 мс., частота следования импульсов—33 Гц. Выбор соотистствующей спектральной области возбуждения осуществлялся препусканием излучения 100-ватной лампы накаливания через монохроматор. Средняя мощность возбуждающего излучения на выходе монохромагора во всем исследованном спектральном диапазоне была не более 1 мВт. Измерения токовых откликов с Z-граней образцов проводились в режиме «короткого замыкания» [3] с применением селективного усилителя, настроенного на частоту модуляции светового потока. Автоматизированное управление процессами регистрации и обработки спектральных вависимостей токовых откликов исследуемых кристаллов велось с помощью ЭВМ на спектрально-аналитическом хомплексе, подробно опесанком в [8]. На рис. 1 приведсны нормированиея на поглещенную энергию спектральная зависимость токового отклика кристалла *LiNDO*<sub>3</sub>: *Er*<sup>3+</sup> (а) и его же спектр поглощения (в), снятый на спектрофотометрах СФ-8 и Specord M-40. Низкая разрешающая способность на рис. 1 (а) обусловлена малой интенсивностью светового возбуждения.

Расчет токовых откликов для системы, вилючающей состояния  ${}^{4}I_{w_{12}}(1)$ ,  ${}^{4}I_{w_{12}}(2)$  и  ${}^{4}I_{w_{12}}(3)$  ионов  $Er^{3+}$  в  $LiNbO_3$  при мгновенном воз буждении ее прямоугольными световыми импульсами (рис. 2, а, в) проведем предполагая, это переход  $3\rightarrow 2$ —чисто безывлучательный (так как квантовый выход с уровня  ${}^{4}I_{w_{12}} \lesssim 0,05$ ), а  $2\rightarrow 1$ —чисто излучательный (ввиду большого анергетического завора между инми  $\Delta E_{21} \simeq 6600$ -см<sup>-1</sup>). При возбуждении уровня 2 в интервале времени [0, t<sub>1</sub>] ток отсутствует, так как здесь стационарное освещение( $n_2=0$ ,  $\tau$ . е.  $j_2^{np.}=0$ ), а переход  $2\rightarrow 1$ —чисто излучательный ( $j_2^{cp}=0$ ). В интервале времен [1,  $t_2$ ] вклад примесного механизма запишется в сиде

$$j_z^{\rm ap}(t) = \frac{k_2 \times B_2 \times \Delta P_{21}}{E_2} \times \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_2}\right). \tag{4}$$

Такам образом, в интервале [0,  $t_2$ ] полный тек обусловлен примесным механизмом, т. е.  $j_2(t) = j_2^{np}(t)$ .

При возбуждении уровня 3, вклад в общий ток дают: фононный механизм—на переходе 3→2 во всем временном интербале [0, t<sub>2</sub>]

$$j_{3}^{0} = \gamma \times \frac{(E_{3} - E_{2}) \times W_{32} \times n_{3}^{0}}{C_{v}},$$
 (5)

где  $n_3^0$  — стационарная заселенность уровня 3; и примесный механизмна переходах 3 $\rightarrow$ 2 и 2 $\rightarrow$ 1 в интервале времен [ $t_1$ ,  $t_2$ ]

$$j_{3}^{np} = n_{3} \times W_{32} \times \Delta P_{32} + n_{2} \times A_{21} \times \Delta P_{21}$$
(6)

Определяя  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  из системы балансных уравнений для исследуемых уровней, а  $\Pi_3^0$  —из условия стационарной заселенности уровня 3 в ин-

тервале [0, t1] и подставляя в формулу (6), получим:

$$j_{\mathbf{3}}^{\mathrm{np}} = \frac{k_{\mathbf{3}} \cdot B_{\mathbf{3}}}{E_{\mathbf{3}}} \left\{ \Delta P_{\mathbf{32}} \cdot \exp\left(-\frac{t-t_{1}}{\tau_{\mathbf{3}}}\right) + \frac{\tau_{\mathbf{3}} \cdot \Delta P_{\mathbf{21}}}{\tau_{\mathbf{2}} - \tau_{\mathbf{3}}} \left| \exp\left(-\frac{t-t_{1}}{\tau_{\mathbf{2}}}\right) - \exp\left(-\frac{t-t_{1}}{\tau_{\mathbf{3}}}\right) \right| \right\}.$$

$$(7)$$

Общая плотность тока при возбуждении уровия 3 будет спределяться суммой выражений (5) и (7).





1.800

ŀ

Так кал в системе регистрации электрических откликов исследуемых кристаллов применен селективный усилитель со среднеквадратичиым выходом измеряемой величины, то при сравнении расчетных величии с эксприментальными необходим учет этого сбстоятельства. Отношение среднеквадратично усредненных значений плотностей токов, регистрируемых при возбуждении уровней 3 и 2 в интервале времен [0, t<sub>2</sub>], можно записать в виде:

$$\frac{\overline{f_{3}^{o.e.}}}{\overline{f_{2}^{o.e.}}} = \left[ \frac{\frac{t_{2}}{\Delta t} \cdot A^{2} + B^{2}f\left(2\frac{\Delta t}{\tau_{3}}\right) + C^{2}f\left(2\frac{\Delta t}{\tau_{2}}\right) + 2ABf\left(\frac{\Delta t}{\tau_{2}}\right) + AP_{12} \times f\left(2\frac{\Delta t}{\tau_{2}}\right) + 2ACf\left(\frac{\Delta t}{\tau_{2}}\right) + 2BCf\left(\frac{\Delta t}{\tau_{2}}\right) \right]^{1/2} \times \left[ \frac{L_{3} \cdot B_{3} \cdot E_{2}}{L_{2} \cdot E_{3}} \right],$$
(8)





чде  $A = (\gamma \cdot \Delta E_{32})/C_v$ ;  $B = (z_3 \cdot \Delta P_{13} - z_2 \Delta P_{23})/(z_3 - z_2)$ ;  $C = (z_3 \Delta P_{12})/(z_2 - z_3)$ (x) =  $[1 - \exp(-x)]/x$ ;  $z' = (z_2 \cdot z_3)/(z_2 + z_3)$ ;  $\Delta E_{32} = E_3 - E_2$ ;  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Значения  $\Delta F_{i,i}$ , вычисленные по формуле (3) со значениями параметров  $d = 0.44 \hat{A}$ ;  $R_0 = 2.03 \hat{A}$  [9];  $Z_0 = 1.8$  а. е. заряда (найденденное из условия статического равновесия первой координационной сферы); а также  $a_0 \simeq 1 \hat{A}^3$ , дают:  $\Delta P_{12} = 0.4E3D$ .,  $\Delta P_{23} = 0.096D$ .  $\Delta P_{13} = 0.524D$ . Подстановка экспериментальных значений  $E_3/E_2 = 1$ ,)  $E_2/E_3 = 0.64 k_3/k_2 = 4.405$  (из интегральных коэффициентов поглощений);  $\Delta t = 15000$  мкс.; а также  $z_3 = 220$  мкс.;  $z_2 = 7300$  мкс. [8];  $C_v = 2.8 \cdot 10^6 \text{ Дж м}^{-3}$ .  $K^{-1}$ ;  $\gamma = 0.4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  [3, 10]; в формулу (8) с вышеприведенными значениями  $\Delta P_{ij}$ , дает ( $j_3^{e,n}/j_2^{e,n}$ ),  $\simeq 53.3$ , что неплохо согласуется с измеренным значением ( $j_3^{e,n}/j_2^{e,n}$ )  $\Delta_{sec} \simeq 50$ . Полуенное соответствие позволяет надеяться на правомерность предлог женной модели и приближений расчета.

Таким образом, приведенные результаты свидстельствуют о перспективности подобного рода исследований для легированных полярных кристаллов ввиду существенного дополнения получаемой информации о примесных центрах. Приведенные на рис. 1, кривые спекктральной зависимости токовых откликов (1 а) и поглощения (1 в) кристалла LiNbO<sub>3</sub>:  $Er^{3+}$  указывают на возможность разработки нового типа спектрофотометров, основанных на регистрации влектрических сигналов исследуемых образцов без привлечения приемников излучения (при наличии мощкого, перестраиваемого в соответствующем диапазоне длин источника светового излучения).

Креме того, на этом пути можно по формуле (4) оценивать величины статических электронных поляризуемостей примесных  $TR^{3+}$  понов, что представляет самостоятельный интерес.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. A. M. Glass, D. H. Auston, Opt. Commun., v. 5, 45 (1972).
- 2. D. H. Auston, A. M. Glass, Appl. Phys. Lott, v. 20, 398 (1972).
- 3. Лайнс М., Гласс А. М. Сегнетовлектрики и родственные им материалы. М., 1981.
- 4. W. T. Gabrielgan, A. A. Kaminskii, Li L. Phys. stat. sol., v. (a) 3, K37 (1970).
- 5. Бабаджанян В. Г. н др. Изв. АН Арменин, Физика, 25, 356 (1991).
- 6. Демирханян Г. Г., Оганесян С. С., Сафарян Ф. П. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 21, 227 (1989).
- S. W. Nielson, G. F. Koster, Spectroscopic coefficients for p<sup>n</sup>, d<sup>n</sup> and f<sup>n</sup> configurations. Cambridge, 1963.
- Вабаджанян В. Г., Барсегян Э. В., Оганесян С. В. Преприят ИФИ АН Арм. ССР, № 131, Ереван. 1988.
- Кузиминов Ю. С. Электро-сптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М., 1987.
- Кременчурски: Л. С., Ройцина О. В. Пироэлектрические приеменным излучения. Киев, 1979.

# LiN6O<sub>8</sub> : E<sup>3+</sup> ԲԵՎԵՌԱՑԻՆ ԲՑՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ԼՈՒՍԱԻՆԳՈՒԿՑՎԱԾ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԱՐՁԱԳԱՆՔՆԵՐԸ

#### Վ. Գ. ԲԱԲԱԶԱՆՅԱՆ, Գ. Գ. ԳԵՄԻԲԽԱՆՅԱՆ, Ռ. Բ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Բերված են խառնուրդային իռնների կլանման տիրույթներում լուսային իմպուլսներով գըրգրոված LiNbO3: E<sup>3+</sup> բեեռային բյուրեղների էլեկտրական արձագացնների ուսումնասիրման արդյունըները։ Ջարգացված է TR<sup>3+</sup> իռնների ներգրումները հայվելու տեսական մոդել։ Քըննարկվում են խառնուրդային իռնների հատկությունների որոշման նմանատիպ մոտեցման առավելությունները և հարավոր կիրառությունները

# LIGHT-INDUCED ELECTRICAL RESPONSES OF LiNbO<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> POLAR CRYSTALS

#### V. G. BABADJANYAN, G. G. DEMIRKHANYAN, R. B. KOSTANYAN

Results of an investigation of electrical responses from  $LiNbO_3:Er^{3+}$  polar crystals excited by rectangular optical pulses in the absorption bands of impurity ions are reported. The calculational model for contributions of various processes to the electrical responses of the polar hosts, doped with  $TR^{3+}$  ions, is presented. The advantages and possible applications of such investigations are discussed.

Изв. АН Армония, Физника, т. 27, вып. 3, с. 163-174 (1992)

УДК 550.388.2

# ТЕОРИЯ ИОНОСФЕРНОГО ДИНАМО ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ВЫСОКИХ И УМЕРЕННЫХ ШИРОТАХ

### Ю. С. ВАРДАНЯН

Институт раднофизики и электроники АН Армении

(Поступила в редаждию 28 декабря 1990 г.)

В приближении босконечно проводящей Зомли рассчитаны возбуждаемые ноносферйыми встрами электрические и маснитные поля, токи и неоднородности плотности заряженных частиц для многослойной модели околоземного космического пространства на высоких и умеренных инфотах. Причем область F ноносферы подразделена на слои F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>.

Известно, что верхние слои Земли обладают хорошей проводимостью и что ее раднус R<sub>3</sub> и высота ионосферного слоя намного больше толщины нейтральной атмосферы. Отсюда ясно, что электромагнитные процессы, протекающие в верхних слоях ионосферы и в недрах Земли, должны взаимодействовать через атмосферу и иметь взаимное отражение. Таким образом, необходимо решить самоссгласованную задачу для

# LiN6O<sub>8</sub> : E<sup>3+</sup> ԲԵՎԵՌԱՑԻՆ ԲՑՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ԼՈՒՍԱԻՆԳՈՒԿՑՎԱԾ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԱՐՁԱԳԱՆՔՆԵՐԸ

#### Վ. Գ. ԲԱԲԱԶԱՆՅԱՆ, Գ. Գ. ԳԵՄԻԲԽԱՆՅԱՆ, Ռ. Բ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Բերված են խառնուրդային իռնների կլանման տիրույթներում լուսային իմպուլսներով գըրգրոված LiNbO3: E<sup>3+</sup> բեեռային բյուրեղների էլեկտրական արձագացնների ուսումնասիրման արդյունըները։ Ջարգացված է TR<sup>3+</sup> իռնների ներգրումները հայվելու տեսական մոդել։ Քըննարկվում են խառնուրդային իռնների հատկությունների որոշման նմանատիպ մոտեցման առավելությունները և հարավոր կիրառությունները

# LIGHT-INDUCED ELECTRICAL RESPONSES OF LiNbO<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> POLAR CRYSTALS

#### V. G. BABADJANYAN, G. G. DEMIRKHANYAN, R. B. KOSTANYAN

Results of an investigation of electrical responses from  $LiNbO_3:Er^{3+}$  polar crystals excited by rectangular optical pulses in the absorption bands of impurity ions are reported. The calculational model for contributions of various processes to the electrical responses of the polar hosts, doped with  $TR^{3+}$  ions, is presented. The advantages and possible applications of such investigations are discussed.

Изв. АН Армония, Физника, т. 27, вып. 3, с. 163-174 (1992)

УДК 550.388.2

# ТЕОРИЯ ИОНОСФЕРНОГО ДИНАМО ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ВЫСОКИХ И УМЕРЕННЫХ ШИРОТАХ

### Ю. С. ВАРДАНЯН

Институт раднофизики и электроники АН Армении

(Поступила в редаждию 28 декабря 1990 г.)

В приближении босконечно проводящей Зомли рассчитаны возбуждаемые ноносферйыми встрами электрические и маснитные поля, токи и неоднородности плотности заряженных частиц для многослойной модели околоземного космического пространства на высоких и умеренных инфотах. Причем область F ноносферы подразделена на слои F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>.

Известно, что верхние слои Земли обладают хорошей проводимостью и что ее раднус R<sub>3</sub> и высота ионосферного слоя намного больше толщины нейтральной атмосферы. Отсюда ясно, что электромагнитные процессы, протекающие в верхних слоях ионосферы и в недрах Земли, должны взаимодействовать через атмосферу и иметь взаимное отражение. Таким образом, необходимо решить самоссгласованную задачу для всей длины силовой линии магнитного поля Земли, пронизывающей проводящую Землю и окружающее се пространство.

Все процессы, протекающие в ионосфере, могут быть подразделены на две группы: фотохимические процессы и процессы переноса. В области F обе группы процессов сравнимы по важности в противоположность областям D и E, где распределение электронов определяется в основном фотохимическими процессами.

В области F, которая исторически подразделяется на слои F1 и F2. в отличие от сбласти Е атомные ноны являются основными, и поэтому ионно-молекулярные реакции определяют как фотохимию области, так и скорость уничтожения электронов. Выступ F1 в распределении электронов представляет собой максимум ионообразования, но по мере увеличения высоты возрастает роль процесса диффузни, пока наконец в области выше максимума слоя F2 этот процесс не начинает определять оаспределение нонов даже в дневное время. В области максимума слоя F2 скорость диффузии нонов и электронов через нейтральный газ (амбинолярная диффузия) примерно равна скорости уничтожения нонов в фотохимических процесах, так что механизмы переноса влияют одновременно на концентрацию как ионов, так и электронов, т. с. не существует принципиального оделичия между фотохимией слоев F1 и F2 ионосферы. Основное различне между областями F1 и F2 состоит во вкладе происсса амбиполярной диффузии. В нейтральной атмосфере при медленных процессах можно пренебречь не только токами проводнмости, но и токами смешения. Следовательно, потенциал электрического поля будет удовлетворять уравнению Лапласа  $\Delta \Psi = 0$ .

Отсюда видно, что структура и свойства ионосферы сильно меняются с высотой, причем горизонтальная часть системы ионосферных токов течет главным образом в Е-области, где проводимости Педерсена и Холла имеют свои максимальные значения. На таких высотах вклад, вносимый электронами и ионами, в полный ток ядоль силовых лиций магнитного поля Земли не везде одинаков. В нижних торцах магнитной силовой трубки, где их отношение определяется подвижностью, токи, направленные вдоль магнитного поля, несутся тлавным сбразом электронами. На высоких уровнях гравитация и градиент давления также играют роль и это отношение может быть совершено другим. По этой причие будут иметь место определенные следствия [1].

В настоящей работе в соответствии с вышесказанным предложена многослойная модель околовемного космического пространства, в которой Земля, нейтральная атмосфера и слои E и  $F_1$ ,  $F_2$  ионосферы и магнитосфера представляются соответственно идеально проводящей, нейтральным газом и слоями нейтрального газа с примесью заряженных частиц, и идеально проводящей плазмы. В рамках этой модели рассматривается влияние мелкомасштабного «атмосферного динамо» [2, 3] на электродинамическое состояние околовемного космического пространства с учетом процесов амбиполярной диффузии в верхних слоях ионосферы.

Поскольку характерные размеры изучаемого явления малы по сравнению с раднусом Земли, то можно рассматривать плоскую задачу для следующей многослойной системы, симметричной относительно еси z=0(на рисунке представлено только южное полушарие). Слой бесконечно проводящей плазмы (магнитосфера) расположен между ловерхностями  $z=\pm(d-a-l-\rho)$  и соприкасается со слабононизированным газом в слое  $d-a-l-\rho \le | \cdot < 0$ , плоскости  $z=\pm d$  представляют собой грани цы между слабононизированным и нейтральным газом (атмосферой). Е., F-,  $F_{2}$ -ионосферные слои отделяются друг от друга соответственно плоскостями  $z=\pm(d-a)$ ,  $z=\pm(d-a-l)$ , границы между атмосферой и Зсмлей спеределяются плоскостями  $z=\pm(d+f)$ . Матнитное поле Н перпендикулярно к границам раздела (обоснование приемлемости такой модели можно посмотреть в работе [3]).

Будем считать, что слаболонизировалный газ ионосферы состоит из электронов, положительных ионов одного сорта с единичным зарядом и кейтральных молекул с возмущающей горизонтальной постоянной скоростью Ш—такое геострофическое движение, известное из наблюдений может быть вызвано соответствующими физическими фекторами [2].

Тогда, если предположить, что выполнено условие квазинейтральности  $N_{ei} \approx N_{os}$  и ионная и электронная температуры одинаковы  $T_I = T_{es}$ то из уравнения движения для ионов и электронов нетрудно получить выражения для «фонового» электрического поля при диффузионном равновесни (в отсутствии скорости нейтралов) [4]

$$\mathbf{E}_{0} = \frac{1}{2} \frac{1}{e} (\mathbf{g}) (m_{l} + m_{e}), \tag{1}$$

здесь g—ускорение силы тяжести, m<sub>i</sub>, m<sub>e</sub>—массы соответствино иона и элекрона. Другими словами, поле, возникающее за счет разделения зарядов, удваивает шкалу высот нейтральной смеси.

Выпившем уравнения движения, линеаризованные относительно возмущения физических величин, (с учетом «фонового» поля) соответственно для ионов и электронов в пренебрежении инерциальными, нелинейными членами, силой Кориолиса и частотой соударений электронов с ионами (необходимые для этого условия хорошо выполняются в ноносфере) [5-.7]

$$\frac{-\nabla}{N_{oi}} \overline{P}_{i} + e \left\{ -\nabla \psi + \frac{1}{c} \left[ \nabla_{i} \mathbf{H} \right] \right\} = \gamma_{in} (\nabla_{i} - \nabla) + \frac{n_{i}}{2N_{oi}} (m_{i} + m_{e}) \mathbf{g}, \qquad (2)$$

$$\frac{-\nabla}{N_{oe}} \overline{P}_{e} - e \left\{ -\nabla \psi + \frac{1}{c} \left[ \nabla_{e} \mathbf{H} \right] \right\} = \gamma_{en} (\nabla_{e} - \nabla) + \frac{n_{e}}{2N_{oe}} (m_{i} + m_{e}) \mathbf{g}.$$

В этих уравнениях  $\mathbf{v}_i$ ,  $\mathbf{v}_e$  и  $n_i$ ,  $n_e$  - соответственно скорости и возмущения равновесных концентраций  $N_{ei}$ ,  $N_{ee}$  ионов и электронов, возмущения их давлений  $\overline{P}_i = n_i k T_i$ ,  $\overline{P}_e = n_e k T_e$ , поскольку процес сы считаются изотермическими. k - постоянная Больцмана,  $\psi$  - потен циал электрического поля, g - ускорение силы тяжести,  $\gamma_{in}$ ,  $\gamma_{en}$  -частоты соударений ионов и электронов с частицами нейтрального газа,  $\overline{W}$  - скорость нейтральных частиц.

Процессы, протекающие в ионосфере (ножизация, рекомбинация и т. д.), тесно связаны с волновым и корпускулярным излучением Солица, весьма разнообразны и сильно меняются с высотой из-за разнообразия химического состава ионосферы и агентов ноимвации. Поэтсму система уравнений (2) должна быть дополнена, соответствующими для каждой области, уравнениями непрерывности заряженных частиц.

Основным фактором иснообразования во всем исносферном слое является фотопонизация. Однако в Е-сбласти, тде преобладают молекулярные поны, потеря иснов происходит путем диссоциативной рекомбинации. В F-области в противоположность области Е в физико-химических процессск основную роль играют атомарные исны и потеря иснов происходит путем передачи заряда от первичных понов к вторичным, а также переносом частиц [4]. Следовательно, уравнения истрерывлости для понов и влектронов соответственно в Е- и F-области будут иметь вид

$$\operatorname{div} N_{ot} \mathbf{v}_i = J - \alpha N_i N_e = -\alpha N_{ot} (n_i + n_e),$$

$$\operatorname{div} N_{ot} \mathbf{v}_e = J - \alpha N_i N_e = -\alpha N_{ot} (n_i + n_e)$$

$$(3)$$

И

$$div N_{ot} \nabla_{i} \equiv J - \beta N_{e} = -a_{r} N_{n} n_{e},$$

$$div N_{oe} \nabla_{e} = J - \beta N_{e} \equiv a_{r} N_{n} n_{e},$$
(4)

тде Ј—функция ионосбразования Чемпена, которая, по-видимому, здесь также справедлива, поскольку рассматривается простейший случай фотоионизации однокомпонентной изотермичной атмосферы монохроматическим излучением, а—коэффициент рекомбинации положительных понов с электронами,  $\beta$ —формальный (т. к. в этой области реакция прилипания отсутствует) коэффициент прилипания электронов к нейтральным атомам, линейно зависящий от концентрации нейтральных частиц, е.  $\beta = a_n N_n$ .

К этим уравнениям необходимо добавить еще и уравнение Пуассона  $\Delta \psi = 4\pi e (n_i - n_e)$ , поскольку даже малейшее разделение зарядов в квазинейтральной плазме, обусловленное различнем в силах трения между заряженными компонентами плазмы и нейтральным газом, а также фотохнмическими и др. факторами, может возбудить большие электрические поля [8].

Пусть сила тяжести и температура всех сортов частиц, составляющих слабононизованный газ, не зависят от высоты Z, тогда частоты столкновений  $\gamma_{i,e,n}$  (пропорциональные плотности нейтральных молекум выраженной барометрической формулой  $N_n = N_{on} \exp\left[-\frac{1}{H_n}z\right]$ , и невозмущенная плотность заряженных частиц  $N_{oi,e}$  будут иметь вид

$$\gamma_{i,en} = \gamma_{olie} \exp\left[-\frac{1}{H_n}z\right], \ N_{olie} = N_0 \exp\left[\frac{1}{H_m}z\right].$$

Здесь  $H_n = kT_n/m_n g$  —высота однородной атмосферы,  $T_n$  и  $m_n$  —температура и масса нейтральных частиц,  $\tau_{ol,e}$  и No—соответственно частоты столкновений и концентрация заряженных частиц на соответствующих каждому слою начальных высотах.  $H_m$ —постоянная ампрокенмации экспонентной концентрации заряженных частиц (такое приближение для большинства задач весьма удовлетворительно). Однако необходимо влесь отметить, что эти параметры разные в слоях Е и Г из-за неоднородности ноносферы.

Далсе, учитывая лишь вертикальные изменения регулярных повосферных нараметров, можно потенциал электрического поля Ψ, скорость нейтралов W и возмущения плотности П<sub>1</sub>, П<sub>е</sub> разложить в интеграл Фурье по координатам х, у и рассматривать отдельные составляющие

$$\begin{split} \psi &= \psi_k(z) \exp[i(k_1 z + k_2 y)], \ W = W_k(z) \exp[i(k_1 z + k_2 y)], \\ n_i &= n_k^{(i)}(z) \exp[i(k_1 z + k_2 y)], \ n_s = n_k^{(e)}(z) \exp[i(k_1 z + k_2 y)]. \end{split}$$

Если считать, что скорость нейтралов W не вависит от z и составляющая  $W_z=0$ , то, испольвуя уравнение непрерывности для несжимаемой жидкости div W=0, можно члены Фурье — разложения  $W_x$ ,  $W_y$  разбить на пары и решать задачу для каждой пары отдельно.

В качестве такой пары выберем [2]

$$\mathbb{W}_x = \frac{\mathbb{W}_0}{k_1} \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y, \quad \mathbb{W}_y = \frac{\mathbb{W}_0}{k_2} \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y,$$

тогда электрический потенциал Ψ и возмущения плотности n<sub>i</sub>, n<sub>e</sub> можно представить в виде

$$\psi = f_1 \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y, \quad n_i = f_2 \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y,$$

$$n_i = f_3 \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y.$$
(5)

Подставляя в (3) и (4) скорости  $V_i, V_e$ , найденные из (2), получаем уравнения, составляющие вместе с уравнением Пуассона замкнутые системы. для определения потенциала  $\Psi$  и  $n_i$ ,  $n_e$  соответственно в Е-и F-слое

$$a_{i,e,E,F}^{(1)}(z)f_{1zz}^{\prime} + a_{i,e,E,F}^{(2)}(z)f_{1z}^{\prime} + a_{i,e,E,F}^{(3)}(z)f_{1} + a_{i,e,E,F}^{(4)}(z)f_{2zz}^{\prime\prime} + a_{i,e,E,F}^{(5)}(z)f_{2,3x}^{\prime} + a_{i,e,E,F}^{(6)}(z) \times f_{2,3} + A_{i,e,E,F} = 0, \qquad (6)$$

$$k_{0}^{2}f_{1} - f_{1zz}^{\prime\prime} = 4 \pi e (f_{2} - f_{3}),$$

$$\begin{split} a_{l,e,E,F}^{(1)}(z) &= \frac{(2aN_0 e^{z/2H_n})_E \to (a_r N_n)_F}{N_{ol} \cdot 4\pi e} \mp \frac{c}{H_z} \dot{i}_{i,e} \\ a_{l,e}^{(2)}(z) &= \mp \dot{i}_{l,e} \frac{c}{H_e} \left(\frac{1}{H_n} + \frac{1}{H_m}\right), \ a_{l,e}^{(4)}(z) &= -\frac{k T_{i,r}}{\gamma_{i,eh} N_{ol,e}}, \\ a_{l,e,E,F}^{(3)}(z) &= -k_0^2 \left[\frac{(2\pi N_0 e^{z/2H_n})_E \to (a_r N_n)_F}{N_{ol} \cdot 4\pi e} \mp \frac{c}{H_z} \frac{\dot{i}_{i,e}}{1 + \lambda_{l,e}^2}\right], \\ a_{l,e,E,F}^{(5)}(z) &= -k_0^2 \left[\frac{(2\pi N_0 e^{z/2H_n})_E \to (a_r N_n)_F}{N_{ol} \cdot 4\pi e} \mp \frac{c}{H_z} \frac{\dot{i}_{i,e}}{1 + \lambda_{l,e}^2}\right], \\ a_{l,e,E,F}^{(5)}(z) &= -\frac{1}{\gamma_{i,en}} \cdot \frac{1}{N_{ol,e}} \left(\frac{1}{H_n} k T_{i,e} + \frac{1}{2} (m_i + m_e) g\right), \\ a_{l,e,E,F}^{(6)}(z) &= \frac{1}{N_{ol,e}} \left[(2aN_0 e^{z/2H_n})_E \to (a_r N_n)_F - \frac{1}{2} \frac{1}{H_z} \frac{(m_l + m_e)}{\gamma_{l,en}} g + \frac{k_0^2 k T_{i,en}}{\lambda_{l,e}^2 \gamma_{l,en}}\right], \\ A_{l,e,E,F} &= \mp \lambda_{l,e}^{-1} \frac{k_0^2}{k_* k_0} W_0, \quad k_0^2 = k_1^2 + k_2^2. \end{split}$$

В этой унифицированной записи уравнений первые и вторые индексые относятся соответственно к ионам и электронам, индексы Е и F к E- и

*F*-слою полосферы,  $\lambda_{i,e} = \frac{eH_s}{m_{i,e}} \frac{1}{c} \frac{1}{\gamma_{i,en}} m_{i,e}$  – отношение ларморовской. частоты вращения иснов (электронов) к частоте их соударений с нейтралеми.

Как видно из (6) в использованной модели учтена система ионосферных ветров, охватывающая не только E-, но и F-область ионосферы. Поскольку ветры и в F-сбласти могут играть немаловажную роль в генерация динамо-полей и токов [9, 10]. Однако учет силы тяжести заряженных частиц и членов, ответственных за амбиполярную диффузию, приводит к системе из трех уравнений второго порядка для  $\Psi$ ,  $\Pi_{L}$ ,  $\Pi_{e}$  и сведение ее в сбщем случае к одному уравнению относительно электрического потенциала  $\Psi$  весьма затруднительно [7]. Поэтому, используя условие квазинейтральности, положим в (6)  $f_2=f_3$ , после чего получим. систему из двух уравнений для  $f_1$ ,  $f_2$ , которая вместе с уравнением Пуассона определит и  $f_2$  [8].

Произведя замену  $f_1 = u(t)t^{-1}$ ,

$$f_3 = N_0 e^{z/H_m} u_1(t) t^{-1}$$
, где  $t = e^{-2}\xi$ ,  $\xi = z/H_n$  из

(6) можно легко исключить u(t) и получить уравнение четвертого порядка относительно  $u_1(t)$  для  $F_2$ -слоя и уравнения третьего порядка для  $F_1$ - и Е-слоя (при пренебрежении диффузионными членами). Но с помощью численных оценок реальных физических величии и параметров.

$$\alpha_1 = -\frac{1}{4} \left[ 2\left(2+3m\right) + g H_n \frac{\left(m_i \lambda_{eo} \tilde{\gamma}_{eo} + m_i \lambda_{io} \tilde{\gamma}_{io}\right)}{\left(k T_i \lambda_{eo} \tilde{\gamma}_{ea} + k T_e \lambda_{io} \tilde{\gamma}_{io}\right)} \right] \ge F_2 - c \operatorname{AOE},$$

$$a_{2} = -\frac{H_{n}^{2}}{4} \frac{a_{r}N_{on}\gamma_{io}\gamma_{eo}(\lambda_{io} + \lambda_{eo})}{(kT_{i}^{\lambda}e_{o}\gamma_{eo} + kT_{e}^{\lambda}e_{io}\gamma_{io})}, \quad B \quad F_{2}\text{-case}$$

$$a_{3} = \frac{a_{r}N_{on}H_{n}\gamma_{io}\gamma_{eo}(\lambda_{io} + \lambda_{eo})}{gm_{i}(\lambda_{eo}\gamma_{eo} + \lambda_{io}\gamma_{io})}, \quad B \quad E_{1}\text{-case},$$

$$a_{4} = -\frac{8aN_{0}H_{n}(\lambda_{io} + \lambda_{eo})\gamma_{io}}{m_{i}g\lambda} \quad B \quad E\text{-case}$$

характеризующих рассматриваемые слон, можно порядок уравнений в *F*-слое, если учесть соотношение  $\lambda_{i,e} \gg 1$ , (при горизонтальных размерах задачи больших, или порядка величины высоты однородной атмосферы<sup>\*</sup>) понизить на единицу и записать в том числе и в *E*-слое, принимая во внимание условие  $\lambda_i \gg 1$ ,  $\lambda_i \lesssim 1$ , в виде

$$t\frac{d^{2}u_{1}^{F_{2}}}{dt^{3}} + (a_{1}-1)\frac{d^{2}u_{1}^{F_{2}}}{dt^{2}} + a_{2}\frac{du_{1}^{F_{2}}}{dt} - \frac{2(3+m)}{4}\frac{a_{2}}{t}u_{1}^{F_{2}} + C = 0, \quad (7)$$

$$\frac{d^3 u_1^{F_1}}{dt^3} + a_3 \frac{d u_1^{F_1}}{dt} - \frac{(3+m)}{2} a_3 \frac{u_1^{F_1}}{t} + C = 0,$$
(8)

$$\frac{d^{3}u_{1}^{E}}{dt^{2}} - \frac{-15 + a_{4}t^{1/4}}{4t} \frac{d^{2}u_{1}^{E}}{dt^{2}} + \frac{(30t^{-2} + a_{4}t^{-7/4})}{4^{2}} \times \frac{du_{1}^{E}}{dt} - \frac{21}{4^{3}} a_{4}\lambda_{io}^{2} t^{-15/4} u_{1}^{E} = 0.$$
(9)

Решения уравнений (7), (8) и (9) ссответственно в  $F_{2}$ -,  $F_{1}$ - и E-слое будут иметь вид

$$u_{1}^{F_{2}}(t) = 3^{6} \sqrt{3} t^{13,6} [A J_{6} (2 \sqrt{a_{2}} t^{1/2}) + B Y_{6} (2 \sqrt{a_{2}} t^{1/2})] + C_{1} L_{-1/3} + C_{2} L_{1}, \quad u_{1}^{E} = C_{6} F(t) + C_{7} t^{-1/4} + C_{8}, \quad (10)$$

тде

$$F(t) = \frac{1}{2} t^{-1/2} - a_4 t^{-1/4} \ln \left| \frac{a_4}{t^{-1/4}} \right| - \frac{1}{2} a_4^2 \ln t^{-1/4} + t^{-1/2} \sum_{n=2}^{\infty} -\frac{1}{(-n+1)} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{(n+1)!} \left( \frac{a_4}{t^{-1/4}} \right)^{n+1}$$

\* Эдесь не приводится численный анализ коэффициентов уравнений из-за громоздкости выражений.

in 1

Эдесь I<sub>6</sub> и I<sub>6</sub>—соответственно функции Бесселя первого и второго рода, L<sub>-1/2</sub> и L<sub>1</sub>—функции Ломмеля, для которых имеем

$$L_{-1/3} = \frac{3}{2} \Gamma \left( -\frac{1}{6} + 3 \right) \Gamma \left( -\frac{1}{6} - \frac{1}{6} - \frac{1}{6}$$

А. В. С. - произвольные постоянные, которые спределяются из граничных условий — непрерывности потенциала электрического поля и пормального тока на границах раздела.

Далее, используя (6), (10) и уравнение Лапласа нетрудно определить и потенциал электрического поля в отдельных слоях ионосферы и атмосфере

$$\begin{split} f_{1}^{F_{0}} &= \alpha_{1} \left[ \left( \alpha_{2} t^{-2} + \alpha_{3} t^{-1} \right) u_{1}^{F_{0}} + \alpha_{4} t^{-1} u_{1t}^{\prime F_{0}} + \alpha_{5} u_{1tt}^{\prime F_{0}} \right] + \alpha_{6} , \\ f_{1}^{F_{1}} &= \alpha_{1} \left[ \left( \alpha_{7} t^{-2} + \alpha_{8} t^{-1} \right) u_{1}^{F_{1}} + \alpha_{9} t^{-1} u_{1t}^{\prime F_{1}} \right] + \alpha_{6} , \\ f_{1}^{E} &= \alpha_{10} t^{2} \left( 1 + \lambda_{io}^{2} t^{-1} \right) \left( 1 + \lambda_{io}^{2} t^{-1} \right) \left[ \left( \alpha_{7} t^{-2} + \alpha_{11} t^{-7/4} \right) \times u_{1}^{E} + \varepsilon_{9} t^{-1} u_{1t}^{\prime E} \right] + \alpha_{6} , \end{split}$$
(11)

$$a_{1} = \frac{H_{-}}{c} \frac{1}{k_{9}^{2}} \frac{\lambda_{io} \lambda_{eo}}{(\lambda_{io}^{2} - \lambda_{eo}^{2})}, \quad a_{9} = -\frac{7}{4} \frac{1}{H_{n}} \frac{1}{\gamma_{io}} \frac{1}{\gamma_{eo}} \times \\ \times [gm_{i}(\omega_{e} + \omega_{i}) + \frac{5}{H_{n}} (kT_{i} \lambda_{eo} \gamma_{eo} + kT_{e} \lambda_{io} \gamma_{io})],$$

$$\begin{aligned} \alpha_{3} &= \alpha_{r} N_{on} (\lambda_{io} + \lambda_{eo}) + k_{0}^{2} \left( \frac{\kappa T_{i}^{\Lambda} \epsilon_{eo}}{\gamma_{io} \lambda_{io}^{2}} + \frac{\kappa T_{e}^{\Lambda} \epsilon_{io}}{\gamma_{eo} \lambda_{eo}^{2}} \right), \\ \alpha_{4} &= \frac{1}{H_{n}} \cdot \frac{1}{\gamma_{io}} \cdot \frac{1}{\gamma_{eo}} \left[ gm_{i} \left( \omega_{e} + \omega_{i} \right) + \frac{2}{H_{n}} \left( k T_{i}^{\Lambda} \lambda_{eo} \gamma_{eo} + k T_{o}^{\Lambda} \lambda_{io} \gamma_{io} \right), \\ \alpha_{5} &= -\frac{4}{H_{n}^{2}} \cdot \frac{1}{\gamma_{io}} \cdot \frac{1}{\gamma_{eo}} \left( k T_{i} \lambda_{eo} \gamma_{eo} + k T_{e} \lambda_{io} \gamma_{io} \right), \\ \alpha_{6} &= -\frac{4}{H_{n}^{2}} \cdot \frac{1}{\gamma_{io}} \cdot \frac{1}{\gamma_{eo}} \left( k T_{i} \lambda_{eo} \gamma_{eo} + k T_{e} \lambda_{io} \gamma_{io} \right), \\ \alpha_{6} &= \frac{H_{z}}{c} \frac{W_{0}}{k_{1}k_{2}}, \end{aligned}$$

$$a_{\gamma} = -\frac{\gamma}{4} \cdot \frac{1}{H_n} \cdot \frac{1}{\gamma_{io}} \cdot \frac{1}{\gamma_{eo}} gm_i(\omega_e + \omega_i), \ a_8 = a_r N_{on} (\lambda_{io} + \lambda_{eo}),$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{1}{H_n} \frac{1}{\gamma_{io}} \cdot \frac{1}{\gamma_{eo}} gm_i (\omega_e + \omega_i), \ \alpha_{10} &= \frac{H_z}{c} \frac{1}{k_0^2} \frac{1}{\lambda_{io} \lambda_{eo} (\lambda_{io}^2 - \lambda_{eo}^2)}, \\ \alpha_{11} &= 2\alpha N_0 (\lambda_{io} + \lambda_{eo}) \end{aligned}$$

 $H \int_{1}^{amM} = 2C_0 \, \mathrm{shk} \, z.$ 

Здесь использовано условие сбращения в нуль потенциала электриче-ского поля на бесконечно проводящей поверхности Земли.

После этого можно определить в ионосфере и электрический гок $j = eN_{ol} (v_i - v_e)$ . компоненты которого из уравнений (2) будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_{x} &= eN_{al} \left[ -\frac{c}{H_{z}} \left( a_{1}\psi_{x}^{'} + a_{2}\psi_{y}^{'} \right) + a_{3}\overline{p_{lx}^{'}} + a_{4}\overline{p_{ly}^{'}} - a_{2} \, \mathbb{W}_{x} + a_{1} \mathbb{W}_{y} \right], \\ \mathbf{j}_{y} &= eN_{al} \left[ \frac{c}{H_{e}} \left( a_{2}\psi_{x}^{'} - a_{1}\psi_{y} \right) + a_{3} \, \overline{p_{iy}^{'}} - a_{4}\overline{p_{ex}^{'}} - a_{1} \mathbb{W}_{x} - a_{2} \mathbb{W}_{y} \right], \\ \mathbf{j}_{x} &= eN_{al} \left[ -\frac{c}{H_{x}} \left( \lambda_{i} + \lambda_{e} \right)\psi_{x}^{'} - \frac{1}{N_{al}} \left( \frac{1}{\gamma_{la}^{*}} - \frac{1}{\gamma_{ea}^{*}} \right) \times \right. \\ & \times \left( \overline{p_{lx}^{'}} + \frac{n}{2} \, g \left( m_{i} + m_{e} \right) \right], \end{aligned}$$

$$(12)$$

где

$$a_{1} = \frac{(\lambda_{i} + \lambda_{e})(1 + \lambda_{i}\lambda_{e})}{(1 + \lambda_{i}^{2})(1 + \lambda_{e}^{2})}, \quad a_{2} = \frac{(\lambda_{i}^{2} - \lambda_{e}^{2})}{(1 + \lambda_{i}^{2})(1 + \lambda_{e}^{2})},$$

$$a_{3} = \frac{-\gamma_{en}^{*}(1 + \lambda_{e}^{2}) + \gamma_{in}^{*}(1 + \lambda_{i}^{2})}{N_{oi}\gamma_{in}^{*}\gamma_{en}^{*}(1 + \lambda_{i}^{2})(1 + \lambda_{e}^{2})}, \quad a_{4} = -\frac{1}{N_{oi}}\frac{\gamma}{\gamma_{in}^{*}}\frac{1}{\gamma_{en}^{*}} \times \frac{\gamma_{en}^{*}\lambda_{i}(1 + \lambda_{e}^{2}) + \gamma_{in}^{*}\lambda_{e}(1 + \lambda_{e}^{2})}{(1 + \lambda_{i}^{2})(1 + \lambda_{e}^{2})}.$$

Для простоты в выражениях (12) опущены индексы Е и F, указывающие соответствующие слои.

При антивращении (когда направления движения нейтрального газа в ноносфере северного и южного полушарий противоположны) через магнитосферу по силовым линиям магнитного поля будет идти ток. Однак э электрического поля в магнитосферной плазме нет из-за симетрии и стационарности задачи [2]. Следовательно,  $\psi^{F_2} = 0$  при  $z = \pm (d - a - l - \rho)$  на границе F2-слоя испосферы и магнитосферы. При ковращения (когда направления движения мейтрального газа в испосфере северного и южного полушарий одинаковы) электрический ток через магнитосферу отсутствует, т. е.  $\mathbf{j}_{z}^{F_2} = 0$  при  $z = \pm (d - a - l - p)$  на границе F2-слоя испосферы [2].

Остальные траничные условия (в том числе и условие  $\psi^{aтм} = 0$  на границе между атмосферой и идеально проводящей Землей) совпадают для обоих случаев вращения нейтрального газа и те же, что и в работе [3], поэтому нет необходимости особо на них останавливаться.

Возмущение магнитного поля h, соответствующее току (12) определяется из уравнения rot h =  $\frac{4\pi}{c}$  j, требуя непрерывности поля на всех границах и исчезновения h на бесконечности.



Отметим, что необходимые сведения о структуре околоземного космического пространства здесь представлены в весьма сжатой форме и все оценки, и численные расчеты произведены при следующих значениях параметров: расстояние по силовой линии матиитного поля Земли между сопряженными точками на широтах 65°  $d=4\cdot10^4$  км, высота атмосферы от поверхности Земли f=100 км, толщина Е-слоя a=40 км, толщина  $F_1$ -слоя l=60 км (занимает область от 140 до 200 км), свыше 200 км до (условно принятой нами) высоты 400 км простирается  $F_2$ слой и P—200 км [11, 12]. Ионная и нейтральная компоненты в слоях .Е и F состоят соответственно из  $0^+_2$ ,  $0_2$  и  $0^+$ , 0.

Принимается, что температура нейтралов  $T_n = 300^{\circ}K$  в Е-слое и 1000°K в F-слое, температура ионов (электронов) в F<sub>2</sub>-слое  $T_{j,e} = 1000^{\circ}K$ . Высота однородной атмосферы  $H_n = 8 \cdot 10^5$  см в Е-слое и  $H_n = 8 \cdot 10^6$  в F-слое,  $\alpha = 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/сек,  $a_r = 10^{-13}$  см<sup>3</sup>/сек. Концентрации нейтральных и заряженных частиц на начальных условных высотах соответственно в Е- и F-слое  $N_{on} = 10^{12}$  ат. см<sup>-3</sup>,  $N_0 = 10^5$ и  $N_{on} = 4 \cdot 10^{10}$  ат. см<sup>-3</sup>,  $N_0 = 4 \cdot 10^5$ . Частоты столкновений ионов и электронов с нейтралами на тех же высотах  $\gamma_{lo} = 10^4$  сек<sup>-1</sup>,  $\gamma_{eo} = 3 \cdot 10^4$ сек<sup>-1</sup> в Е-слое и  $\gamma_{lo} = 2 \cdot 10^3$  сек<sup>-1</sup>,  $\gamma_{eo} = 10^4$  сек<sup>-1</sup> в F-слое. Амплитуда скорости ветра  $\frac{W_0}{k_0} = 200$   $\frac{M}{cek}$ , размер ячейки l = 200 км. Далее, аппроксимируя экспериментальную кривую для концентраций, заряженных частиц (взятую из [14]) формулой  $N_{oi,e} = N_0 e^{z/H_m}$ , находим токи, вариации полей и плотностей.

Таким образом, в работе рассмотрена многослойная модель околоземного космического пространства на высоких и умеренных широтах с учетом электропроводности Земли. Причем область F ионосферы подразделена на слои F1 и F2, где амбиполярная диффузия в динамике процессов играет существенную роль. В приближении бесконечно посволящей Земли и пренебрежнии частотой столкновений между электронами и нонами в верхних слоях ионосферы [5] во всем рассматриваемом поостранстве (в том числе и в приземной области [14]) рассчитаны. B03- · буждаемые ионосферными ветрами, электрические и магнитные поля, токи, неоднородности плотности заряженных частиц. Их высотные поофили будут приведены в следующей работе. В такой постановке задача. представляет большой интерес для сравнения опутниковых и наземных измерений с расчетными и изучения физических явлений, происходящих в недрах Земли и ее оболочке. Поскольку Земля представляет собой слоистый проводник, вариации основного земного магнитного поля, вызванные возбуждаемыми токами, используются для магнитотеллурического зондирования и изучения глубинного строения Земли, а ионосферные пеоднородности играют большую роль в долгосрочном прогновированни космической радиосвязи. Однако многообразие факторов, действующих в космических условиях и трудность учета их относительной роли. заставляют при количественных расчетах ограничиваться оценкамя попорядку величины.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Block L. P., Falthammar C.-G., J. Geophys. Res., 1968, 73, 4307.
- Алсксеева Л. М., Варданян Ю. С., Тверской Б. А. Геомагистизм и аэрономия., 1969, 9, 437.
- 3. Варданян Ю. С. Геомагнетнэм и аэросюмия, 1977, 17, 1012.
- 4. Акасофу С. И., Чемпен С. Солнечно-земная физика. Изд. Мир, М., 1974.
- 5. Дж. Данджи. Космическая электродинамика. Изд. Госатомиздат, М., 1961.
- Ленерт Б. Сб. Физика плазмы и магнителя гидродинамика, Изд. инсогр. Антер., М., 1961.
- 7. Гериман Б. Н. Диссамика нонссферсой плавмы. Изд. Наука. М., 1974.
- 8. Брачинский С. И. Сб. Ропросы теории плазмы, вып. І, Изд. Госатомиздат, М.,, 1963.
- 9. Matuura N., J. Geophys. Res., 1974, 70, 4679.
- Милии Б. М. Спокойные геомагнитные варнации и токи в магнитосфере. Изд. Наука, Новосибирск, 1976.
- Гурсвич А. В., Шварцбург А. Б. Нелящей ая теория распростраасния радноволи в вюносфере. Изд. Наука, М., 1973.
- 12. Данилов А. Д. Популярная авропомия. Изд. Гидрометеоиздат, М., 1978.
- Околоземное космическое пространство (под ред. В. П. Шабанского), Изд. Мир. М., 1966.
- 14. Гершман Б. Н., Самсонов А. В .Изв. высш. уч. зав. Радиофизика, 1976, 19, 1489.

# ԻՈՆՈԼՈՐՏԻ ԴԻՆԱՄՈ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆ ՄԵՐՁԵՐԿՐՅԱ ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ԼՐԻՎ ՄՈԴԵԼԻ ՀԱՄԱՐ ԲԱՐՋՐ ԵՎ ՉԱՓԱՎՈՐ ԼԱՅՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՒՄ

### SOF. U. JUPAULSUL

Երկրի անվերը էլեկտրանաղորդականունյան մոտավորունյամբ բարձր և չափավոր լայնու-Բյուններում դիտարկված է մերձեկրյա տինդերական տարածունյան բաղմաշերտ մոդել՝ ճաշվի առնված ամբիպոլլար դիֆուզիայի պրոցեսները իռնոլորտի վերին շերահրում։

# A THEORY OF IONOSPHERIC DYNAMO FOR COMPLETE MODEL OF TERRESTRIAL SPACE AT HIGH AND MEDIUM LATTITUDES

### YU. S. VARDANYAN

A multi-layer model of terrestrial cosmic space at high and medium lattitudes is considered in the approximation of infinite conductivity of the Earth taking into account the ambipolar diffusion processes in upper layers of ionosphere.

Изв. АН Армения, Физика, т. 27, вып. 3, стр. 174-178 (1992).

УДК 535.14;530.182

### НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО ЛАЗЕРА

#### С. Г. ОГАНЕСЯН, С. В. АБАДЖЯН

#### НПО «Лазерная техника». ЕГУ

(Поступила в редакцию 15 мая 1991 г.)

Развита теория черенковского лазера с учетом многофотонных процессов. Получены выражения для параметра касыщения усиления. Этот результат подтвержден численными расчетами.

В работах [1, 2] развиты классическая и квантовая теории черенковского лазера в линейном по полю приближении. Показано, что механизм усиления связан с тем, что в процессах излучения и поглощения участвуют электроны с разными энергиями. Ясно, что выражения для коэффициента усиления, полученные в этих работах справедлисы, если интенсивность усиливаемой волны невелика.

В работе [3] развита нелинейная теория черенковского лавера в случае, когда пучок частиц моноэнергетичен и имеет скорость несколько большую скорости волны. В этом случае механизм усиления связан с тем, что средняя скорость электронов, попавших в режим захвата, равиз скорости волны. Если размер области усиления подобран соответствующим образом, то электроны передают часть своей кинатической энергии в волну. Отметим, что эта же энергия определяет насыщение усиления.

# ԻՈՆՈԼՈՐՏԻ ԴԻՆԱՄՈ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆ ՄԵՐՁԵՐԿՐՅԱ ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ԼՐԻՎ ՄՈԴԵԼԻ ՀԱՄԱՐ ԲԱՐՋՐ ԵՎ ՉԱՓԱՎՈՐ ԼԱՅՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՒՄ

### SOF. U. JUPAULSUL

Երկրի անվերը էլեկտրանաղորդականունյան մոտավորունյամբ բարձր և չափավոր լայնու-Բյուններում դիտարկված է մերձեկրյա տինդերական տարածունյան բաղմաշերտ մոդել՝ ճաշվի առնված ամբիպոլլար դիֆուզիայի պրոցեսները իռնոլորտի վերին շերահրում։

# A THEORY OF IONOSPHERIC DYNAMO FOR COMPLETE MODEL OF TERRESTRIAL SPACE AT HIGH AND MEDIUM LATTITUDES

### YU. S. VARDANYAN

A multi-layer model of terrestrial cosmic space at high and medium lattitudes is considered in the approximation of infinite conductivity of the Earth taking into account the ambipolar diffusion processes in upper layers of ionosphere.

Изв. АН Армения, Физика, т. 27, вып. 3, стр. 174-178 (1992).

УДК 535.14;530.182

### НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО ЛАЗЕРА

#### С. Г. ОГАНЕСЯН, С. В. АБАДЖЯН

#### НПО «Лазерная техника». ЕГУ

(Поступила в редакцию 15 мая 1991 г.)

Развита теория черенковского лазера с учетом многофотонных процессов. Получены выражения для параметра касыщения усиления. Этот результат подтвержден численными расчетами.

В работах [1, 2] развиты классическая и квантовая теории черенковского лазера в линейном по полю приближении. Показано, что механизм усиления связан с тем, что в процессах излучения и поглощения участвуют электроны с разными энергиями. Ясно, что выражения для коэффициента усиления, полученные в этих работах справедлисы, если интенсивность усиливаемой волны невелика.

В работе [3] развита нелинейная теория черенковского лавера в случае, когда пучок частиц моноэнергетичен и имеет скорость несколько большую скорости волны. В этом случае механизм усиления связан с тем, что средняя скорость электронов, попавших в режим захвата, равиз скорости волны. Если размер области усиления подобран соответствующим образом, то электроны передают часть своей кинатической энергии в волну. Отметим, что эта же энергия определяет насыщение усиления. Аналогичный анализ механизма насыщения развит в случае лазера, основанного на коротком ондуляторе [4, 5]. Отметим, что в работе [6] получено выражение для ксэффициента усиления длинного ондулятора с помощью экстраполяции известных вырамений в области сильных и слабых полей.

В настоящей работе развита нелипейная теория черенковского лазера в случае, когда пучок электронов имеет гауссов разброс по эпергиям

$$f_0(E_0) = \sqrt{\frac{4\ln 2}{\pi} \frac{1}{2}} \exp\left\{-4\ln 2\left(\frac{E_0 - \overline{E}}{\Delta}\right)^2\right\},\tag{1}$$

а область внаимодействия частиц и поля нелика. Пусть электроматнитная волна линейно поляривована вдоль оси х'и распространяется в среде с показателем преломления П вдоль оси Z

$$A_x = \frac{A(z)}{2} \exp[i(kz - \omega t)] + \text{ s.c.}$$

Предположим, что амплитуда поля A(z) медленно зависит от координаты  $z\left(\frac{d\widetilde{A}}{dz}\ll k\widetilde{A}\right)$ . Направим пучок влектронов (1) под уг-

лом в к оси z и проанализируем зволюцию амплитуды  $\widehat{A}(z)$  на основе системы уравнений Власова и Максвелла

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial t}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = 0,$$

$$\Box \mathbf{A} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j},$$
(2)

 $\mathbf{j} = e \rho_0 \int \mathbf{v} f(\mathbf{p}) \, d\mathbf{p}. \tag{3}$ 

Решая характористическое уравнение

$$dt = \frac{d\mathbf{r}}{\mathbf{v}} = \frac{d\mathbf{p}}{\mathbf{F}} = \frac{df}{0},$$

получаем [3]

 $p_s =$ 

$$p_{x} = p_{ox} - \frac{e}{c} A_{x}, \qquad p_{g} = p_{og},$$

$$\frac{nE_{0} - p_{oz} c - n \sqrt{(E_{0} - np_{oz}c)^{2} - (n^{2} - 1)(e^{2}A_{x}^{2} - 2eA_{x}p_{ox}c)}}{c(n^{2} - 1)}.$$
(4)

Функция распределения электронов в поле  $f = f(\mathbf{p}_0(\mathbf{p}))$ , где характеристики  $\mathbf{p}_0$  определяются из уравнения (4). Вычислим ток пучка электронов (3). Переходя от переменных  $\mathbf{p}$  к переменным  $\mathbf{p}_0$  получаем

 $j_x = ep_0 \int v_x = f_0(\mathbf{p}_0) \left| \frac{d\mathbf{p}}{d\mathbf{p}_0} \right| d\mathbf{p}_0, \text{ где детерминант} \left| \frac{d\mathbf{p}}{d\mathbf{p}_0^*} \right| = \left| \frac{\partial p_x}{\partial p_{ox}} \right|. \quad \text{Подста-}$ 

вим ток в уравнение Максвелла (2) и усредним его по быстрым осцилляциям

$$\frac{d\tilde{A}}{dz} = 4 \pi e \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \frac{p_{ox}c}{E_{0}} f_{0} \sin \varphi \left(1 - \frac{(n^{2}-1)\left(e^{2}A_{z}^{2}-2e\tilde{A}_{x}p_{ox}c\cos\varphi\right)}{(E_{0}-np_{oz}c)^{2}}\right)^{-\frac{1}{2}} dp_{0}d\varphi.$$
(5)

Используя разложение  $\frac{1}{1/1+x} = 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m (2m-1)!!_x^m}{2^m m!}$ (x > -1), выполним усреднение по фазе  $\varphi$ . Интегрируя полученные слагаемые по частям и используя правило  $\frac{1}{x-i\delta} = i\pi\delta(x)$ , выделим в правой части (5) слагаемые, ответственные за усиление электромагнитной волны

$$\frac{d\xi}{dz} = \frac{\sqrt{\pi}}{n} \rho r_0 \lambda \overline{\beta} \sin \theta \sum_{r=1}^{r} \frac{r}{r!^2 4^{r-1} (4r-4)!!} \times \left( \left(n^2 - 1\right) \sin \theta \overline{\beta} \left(\frac{\overline{E}}{\Delta}\right)^2 \left(\frac{\overline{E}}{mc^2}\right)^3 \xi \right|^{2r-1} \frac{d^{4r-3}}{dy^{4r-3}} (e^{-y^2}).$$
(6)

Здесь безразмерный параметр волны  $\xi = e\tilde{A}/mc^2$ ,  $r_0 = e^2/mc^2$ ,  $\lambda = 2\pi c/\omega - длина волны усиливаемого излучения, <math>y = \frac{(p_{os} - p\cos\theta)c}{\Delta\cos\theta}$ . Если в ряде (6) ограничиться только первым слагаемым и  $y = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ , то получаем известный экспоненциальный рост амплитуды волны  $\xi = -\frac{\xi_0}{2}e^{\Gamma_s}$  [1]. Сравнение первого и второго слагаемых в ряде [6] пока-

зывает, что это происходит при & « Enne, где

$$\xi_{\rm mac} = \left(\frac{\Delta}{1-\theta}\right)^2 \left(\frac{mc^2}{\overline{E}}\right)^3 \frac{1}{(n^2-1)\sin\theta}.$$

Очевидно, что при  $\xi \sim \xi_{\text{нас}}$  процесс усиления носит нелинейный характер. Численный анализ показывает, что в области этих значений поля происходит насыщение усиления.

Пусть пучок электронов, плотность которого  $\rho_0 = 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, имсет среднюю энергию  $\overline{E} = 5$  МэВ и разброс  $\frac{\Delta}{\overline{E}} = 10^{-2}$ . Электромагнитная

волна ( $\lambda$ =0,1 мм) распространяется в диэлектрической среде с показателем преломления п=1,01. Угол  $\theta$ =0,1 рад. При этом параметр насыщения  $\xi_{nac} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ . Пусть  $\xi(z = 0) = 1,8 \cdot 10^{-7} \ll \xi_{nac}$ . Проинтегрируем уравнение (6) численно в двух случаях:  $y = -\frac{1}{2}$ , y = -1. Анализ показал, что в случаях, когда число слагаемых, учитываемых в сумме (6),  $r \ge 10$  кривые, описывающие эволюцию амплитуды поля, практически совпалают. На рис. 1 приведен результат интегрирования при  $y = -\frac{1}{2}$ , r = 10, а на рис. 2 y = -1, r = 10. Очевидно, что в области  $\xi \sim \xi_{me}$  происходит насыщение усиления. Расстояние  $z_{\mu}$ , на котором происходит насыщение, можно оценить, исходя из лицейного приближежения  $\xi_{nac} \sim \xi_0 e^{r_{x_0}}$ . Отсюда получаем  $z_n \sim \frac{\xi_{me} \cdot \ln (\xi_0/\xi_{hec})}{4 \sin \theta \rho_0 r_0}$ . Оценка этого выражения дает хорошее согласие с результатами, полученными численно (рис. 1, 2).





Анализ процесса насыщения, выполненный на основе квантовой механики показал, что при интенсивностях ё ~ Елас амплитуды многофотонных процессов в составляющих тока, связанных с поглощением и излучением фотонов, начинают компенсировать друг друга. При этом ток стрематся к нумо и усиление электромагнитной полны прекращается.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Арутюмян Е. М., Озанесян С. Г. Письма в ЖТФ. 7, 539 (1981). 2. Озанесян С. Г., Абаяжен С. Е. Изв. АН АрмССР, Физика, 22, 133 (1987).

3. Аругюяян В. М., Авегисян Г. К. ЖЭТФ, 62, 1639 (1972).

4. Генераторы котерентного излучения на свободных электронах (Сб. статей). Москва, Мер, 1983.

5. Мак Ивер Дж., Федоров М. В. ЖЭТФ, 76. 1996 (1979).

6. Фелоров М. В. ЖЭТФ, 88, 1268 (1982).

# ՉԵՐԵՆԿՈՎՅԱՆ ԼԱԶԵՐԻ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆԸ

#### U. 9. 2042ULLEBUSUL, U. 4. U.PU.28UL

Բաղմաֆոտոն պրոցեոների հաշվարմամբ ղարդացված է լերենկովյան լաղերի տեսությունը։ Ստացված է ուժեղացման գործակցի հաղեցման պարամետրի արտահայտությունը։ Այդ արդյունըը հաստատված է մերենայական հաշվարկի միջոցով։

# A NONLINEAR THEORY OF CHERENKOV LASER

### S. G. OGANESYAN, S. V. ABADZHYAN

A theory of Cherenkov laser is developed taking into consideration the multiphoton processes. An expression for gain saturation parameter is obtained.

Изв. АН Арменин, Физека, т. 27, с. 178-180 (1992).

УДК 621.373.535

# ЭФФЕКТИВНАЯ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВГОРОЙ ГАРМОНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА YA!Og:Nd3+ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

### К. Б ПЕТРОСЯН, К. М. ПОХСРАРЯН

#### НПО «Лазерная техника», ЕГУ

(Поступила в редакцию 25 марта 1991 г.)

При внутрирезонаторной генерации второй гармоннки излучения лазера на YAlO3:Nd3+ в кристалле LilO3, получены импульсы мощностью 200 Вт. длительностью 100 мисек, с частотой следования 50 Ги.

Внутриревонаторная генерация второй гармоники (ВРГВГ) является эффективным методом удвоения частоты излучения непрерызных лазеров на АМГ:Nd<sup>3+</sup>. Известно, что при оптимальной нелинейности связи можно получить максимальное (100%-ное) преобразование излуче-

Анализ процесса насыщения, выполненный на основе квантовой механики показал, что при интенсивностях ё ~ Елас амплитуды многофотонных процессов в составляющих тока, связанных с поглощением и излучением фотонов, начинают компенсировать друг друга. При этом ток стрематся к нумо и усиление электромагнитной полны прекращается.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Арутюмян Е. М., Озанесян С. Г. Письма в ЖТФ. 7, 539 (1981). 2. Озанесян С. Г., Абаяжен С. Е. Изв. АН АрмССР, Физика, 22, 133 (1987).

3. Аругюяян В. М., Авегисян Г. К. ЖЭТФ, 62, 1639 (1972).

4. Генераторы котерентного излучения на свободных электронах (Сб. статей). Москва, Мер, 1983.

5. Мак Ивер Дж., Федоров М. В. ЖЭТФ, 76. 1996 (1979).

6. Фелоров М. В. ЖЭТФ, 88, 1268 (1982).

# ՉԵՐԵՆԿՈՎՅԱՆ ԼԱԶԵՐԻ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆԸ

#### U. 9. 2042ULLEBUSUL, U. 4. U.PU.28UL

Բաղմաֆոտոն պրոցեոների հաշվարմամբ ղարդացված է լերենկովյան լաղերի տեսությունը։ Ստացված է ուժեղացման գործակցի հաղեցման պարամետրի արտահայտությունը։ Այդ արդյունըը հաստատված է մերենայական հաշվարկի միջոցով։

# A NONLINEAR THEORY OF CHERENKOV LASER

### S. G. OGANESYAN, S. V. ABADZHYAN

A theory of Cherenkov laser is developed taking into consideration the multiphoton processes. An expression for gain saturation parameter is obtained.

Изв. АН Арменин, Физека, т. 27, с. 178-180 (1992).

УДК 621.373.535

# ЭФФЕКТИВНАЯ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВГОРОЙ ГАРМОНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА НА YA!Og:Nd3+ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

### К. Б ПЕТРОСЯН, К. М. ПОХСРАРЯН

#### НПО «Лазерная техника», ЕГУ

(Поступила в редакцию 25 марта 1991 г.)

При внутрирезонаторной генерации второй гармоннки излучения лазера на YAlO3:Nd3+ в кристалле LilO3, получены импульсы мощностью 200 Вт. длительностью 100 мисек, с частотой следования 50 Ги.

Внутриревонаторная генерация второй гармоники (ВРГВГ) является эффективным методом удвоения частоты излучения непрерызных лазеров на АМГ:Nd<sup>3+</sup>. Известно, что при оптимальной нелинейности связи можно получить максимальное (100%-ное) преобразование излучения во вторую гармонику [1]. Теоретическому и экспериментальному изучению ВРГВГ посвящено много работ (см., напр., [2-4] ссылки в них). В настоящее время, в связи с использованием кристалла КТР в качестве удвоителя частоты, мощность излучения второй гармоники непрерывного лазера на АИГ:Nd<sup>3+</sup> достигает 9Вт [5].

В некоторых приложениях целесообразно осуществить ВРГВГ излучения импульсно-периодических лазеров, когда реализуются импульсы излучения второй гармоники пиковой мощностью в несколько сотен Вт и длительностью в несколько сотен мксек при высокой частоте следования импульсов. В [6] при ВРГВГ излучения импульсно-периодического лазера на АИГ:Nd<sup>3+</sup> в кристалле *LilO*<sub>3</sub> получены импульсы мощностью 100 Вт, длительностью 180 мксек, частотой следования 50 Гц.

В настоящей работе показано, что использование кристалла YAlO<sub>3</sub>: Nd<sup>3+</sup> в качестве активного элемента в лазере импульсно-периодического действия повеоляет заметно увеличьть интенсивность преобразованного излучения при ВРГВГ.

В работе в качестве активного элемента использовался кристалл  $YAIO_3: Nd^{3+}$  размерами Ø 6,3×100 мм. Накачка осуществлялась лампой ИНП2-5/90 А. Резонатор длиной 40 см был образован двумя плоскими зеркалами с 100%-ным отражением на длине волны  $\lambda = 1,0796$  мкм. В качестве иелинейного преобразователя частоты использовались три элемента  $LiIO_3$  размерами 10×10×30 мм. Торцы активного элемента и алементов  $LiIO_3$  были просветлены на длине волны основного излучения. Вывод излучения второй гармоники осуществляся через зеркало, расположенное за элементом  $LiIO_3$  с коэффициентом пропускания 90% на длине волны  $\lambda = 0,539$  мкм.

При накачке в 50 Дж и частоте следования импульсов 50 Гц, энергия импульса излучения второй гармоники (в одном направлении) изменялась в интервале 13—20 мДж., при использовании разных образцов LiIO<sub>3</sub>. Разброс в эффективности ВРГВГ можно объяснить исвоспроизводимостью условий выращивания кристаллов LiIO<sub>3</sub> [7].

Длительность импульсов второй гармоники составила 100 мксек. Таким образом, пиковая мощность второй гармоники достигала 200 Вт при средней мощности в 1 Вт. Следует отметить, что при использовании активного элемента из АИГ: $Nd^{3+}$  в тех же условиях эксперимента энергетические характеристики излучения на длине волны  $\lambda = 0,53$  мкм были почти на порядок ниже.

Высокую эффективность ВРГВГ в случае применения  $YA!O_3:Nd^{3+}$ можно объяснить возможностью генерации этим кристаллом полиризованного излучения, а также его высоким коэффициен.ом усиления (если предельное усиление АИГ: $Nd^{3+}$  составляет  $G \simeq 70$ , то в  $YAlO_3:Nd^{3+}$  без особого труда можно получить G > 100 [8]). На целесосбразность использования  $YAlO_3:Nd^{3+}$  при ВРГВГ указано также в [9, 10].

В заключение отметим, что оптимизируя геометрию резонатора с целью фокусировки излучения в нелинейный кристалл можно, по-видимому, существенно поднять эффективность преобразования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Geusic J., Levinstein H. et all. Appl. Phys. Lett, 12, 306 (1958).

- 2. Цернике Ф., Мидоинтер Дж. Прикладная нелинейная ептика. Пер. с англ. Подред. С А. Ахмянова.—М.: Мир, 1976, 262 с.
- Справочник по лазерам. Под ред. А. М. Прохорова. В 2-х томах. Т. Н.—М.: Сов. радно, 1978, 400 с.
- Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света.—М.: Радио и связь, 1982, 352 с.
- 5. Perkins P. E., Fahlen T. S., JOSA, B4, 1056 (1987).
- 6. Koenke A., Hirth A., Opt. Communs. 34. 245 (1980).
- 7. Ананян Э. С., Боласанян Р. Н. и др. Квавтовая электровека, 11, 1660 (1984).
- 8. Пашичин П. П., Сидоркин В. С., Шкловский Е. И. Квантовая электроника, 17 563 (1990).
- 9. Г. В. М. н др. Тезисы докладов V Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Леница - 16 яшваря, 1937, Ленинград. 1985, с. 118.
- 10. Tunable Solid State Lasers, May 1-3, 1989.
  - North Falmouth Cape Cod, MA, p. 152.

# ՆԵՐՌԵՋՈՆԱՏՈՐԱՑԻՆ ԵՐԿՐՈՐԴ ՀԱՐՄՈՆԻԿԻ ԷՖԵԿՏԻՎ ԳԵՆԵՐԱՑԻԱՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱ\_ՀԱՃԱԽԱՑԻՆ YAlO<sub>3</sub> : Nd<sup>3+</sup>

# ԼԱԶԵՐՈՒՄ

### 4. Բ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Կ. Մ. ՓՈԽՍՐԱՐՑԱՆ

Իմպուլսա-հաճախային YAlO3: Nd3+ լաղնրում LilO3 թյուրեղով ներռեղոնատորային երկրորդ հարմոնիկի դեներացիայի շնորհիվ ստացված են 50 Հց կրկնման հաճախությամբ իմպուլսներ՝ 200 Վա հղորությամբ և 100 մկվրկ տեռղությամբ։

# EFFICIENT INTRACAVITY GENERATION OF THE SECOND HARMONIC OF YA103:Nd3+ LASER AT FLASHLAMP PUMPED OPERATION

### K. B. PETROSYAN, K. M. POKHSRARYAN

The frequency-doubled 200 W pulses of 100  $\mu$  see duration with repetition rateup to 50 Hz were obtained at intracavity frequency doubling of YA10<sub>3</sub>:Nd<sup>3+</sup> laser radiation in LiIO<sub>3</sub> crystal.

# АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ТОМ 27 за 1992 г.

| 1.  | Абаджин С. В. (см. Оганесян С. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 3 | 125  |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|------|
| 3   | Арахан С. В. (см. Озанесян С. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3 | 174  |
|     | кисан Э. Л. Машеный авална частотной зависмости казактеоз аки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |   |      |
|     | отомагинациой входуляция субыналимстрового налучения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2 | 74   |
| 4.  | Австисян С. К., Енокян А. Э., Казарян Э. М. Оптические переходы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ~ |      |
|     | между допорными и акцепторными центрами в квазидвумерном по-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |   |      |
|     | хупроводнике                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2 | 68   |
| 5.  | Алексанян А. Г., Алексанян Ал. Г., Никогосян Г. С. К вопросу резо-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |      |
|     | нашеного тупнелирования в полупроводнижовых гетероперходах с уча-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |      |
|     | стием фотона                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1 | 30   |
| 6.  | Алексанян А. Г., Алексанян Ал. Г., Никогосян Г. С. Эмергетическое рас-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |      |
|     | пределение неравновестных носителей тока в полупроводниковых ге-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | - | -    |
| -   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2 | 78   |
| 1.  | Алексанян А. Г., Алексанян Ал. Г., Пикогосян Г. С. Релаксационные                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |      |
|     | процессы в полупроводниковых гетероструктурах с жвантово-размер-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2 | 107  |
| 8   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 4 | 30   |
| 0.  | A deveryon $A_{2}$ $\Gamma$ (cm. A deveryon $A_{2}$ $\Gamma$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0 | 18   |
| 10  | Apprendum An $\Gamma$ (cm. Apprendum A. $\Gamma$ )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 2 | 107  |
| 11  | Апринина С. М., Костания Р. Б. Санамин Т. В. Спектовльно-генералинон-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | ~ | 107  |
|     | ные и моминесцентные опойства консталов AiOs:Er37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3 | 151  |
| 12  | Бабалжаняя В. Г. Лемиоханян Г. Г. Костанян Р. Б. Светоченичинован-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | - | 13.1 |
|     | ные электовические отклики поляюных консталлов LiNbO3:Er37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3 | 157  |
| 13. | Бабериян Р. П., Егиазарян Г. А., Гарибян В. Х., Чобанян А. К. Иссле-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |   |      |
|     | довалие распределения тока заряженных частиц по поверхности ка-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |   |      |
|     | тода в разряде с юсциллирующными электронами                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2 | 103  |
| 14. | Багдасарян О. В., Дарьян А. В. Рекуррентные выражения для расчета                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |      |
|     | коэффициента отражения от многослойных сред                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3 | 141  |
| 15. | Бадалян А. М. Частотная зависимость фарадеевского вращения плоско-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |      |
|     | сти поляризации в парах натрия при наличии буферного газа .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2 | 88   |
| 16. | Бахшян Г. Г. Новый механэм преобразования механической энергии двн-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |      |
|     | жущихся паров воды в электрическую и оценка его роли в про-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |      |
|     | цессах электризации земной алмосферы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1 | 43   |
| 17. | Варданян Р. Р. Влияние магнитього поля на фототок диодов шотки .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2 | 97   |
| 18. | Варданян Ю. С. Теория выссферного двнамо полной моделя околозем-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |   |      |
| -   | ного космического пространства на высових и умеренных широтах .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3 | 163  |
| 19. | Гаспарян В. М., Касаманян З. А.: Сопротивление конечьой одномерной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |      |
|     | системы в точно решаемой модели случиного поля                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1 | 22   |
| 20. | Гаспарян Р. А. (см. Мовсисян К. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2 |      |
| 21. | Гарибян Б. А. (см. Бабериян Р. П.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |      |
| 22  | Геворкям С. Г. Эффекты резонатора в корреляции фотонов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1 | ,,   |
| 25. | РКО напости и принасти и принасти в принасти в принасти и принасти |   |      |
|     | р области 1 140_1 53 личи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1 | 22   |
| 24  | Гакасан А. Л. Саркисан Г. С. Чалтыкан В. О. Четырауфоточкый пара-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   | 22   |
| 27. | метокиеский поонесс с возбуживаного коспля 40 % атома казия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4 | 84   |
| 25  | Ажотян Г. П. Месоопян. Фазовые эффекты пон ВКР шиокополосной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1 |      |
|     | накачки в лиспергиочющей среде                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2 | 63   |

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2 | 4.4.4 |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------|
|       | 26. Дарьян А. В. (см. Багдасаряз О. В.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2 | 141   |
|       | 27. Демирханян Г. Г. (см. Бабаджанян В. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3 | 31    |
|       | 28. Зограбян А. В. (см. Папазян Т. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3 | 128   |
|       | 29. Егиазарян Г. А. (см. Баберцян Р. П.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2 | 103   |
|       | 30. Енокан А. Э. (см. Аветноян С. К.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 68    |
|       | 31. Кезарян Э. М. (см. Азетнеян С. К.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2 | 68    |
|       | 32. Карбушев Н. И., Ростомян Э. В. Особлености развития неустойчивости                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |       |
|       | пространственно разделенных электронного пучка и плазмы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1 | 50    |
|       | 33. Конарян Н. К. (см. Авахян А. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2 | 74    |
|       | 34. Костанян Р. Б. (см. Арутюнян С. М.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3 | 151   |
|       | 35. Костанян Р. Б. (см. Бабаджанян В. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 3 | 157   |
|       | 36. Мартиросян Р. М. (см. Авакян)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2 | 74    |
|       | 37. Мовсисян К. А., Гаспарин Р. А., Овсепян А. М. Кристаллизация поли-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |   |       |
|       | мерод, содержащих структурные перерегулярности                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 2 | 92    |
|       | 38. Месропян А. В. (см. Длютян Г. П.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 63    |
|       | 39. Моликажанян Л. Ю. Трехуровновый атом в поле двух немонохромати-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |   |       |
|       | ческих волн в условиях точного двухфотонного резонанса                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1 | 3     |
|       | 40 Миссаян А. Ж. Сседени раднус, толновой фронт и поляривация при ре-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |   |       |
|       | зонансной самофокусносовке                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1 | 13    |
|       | 41 Миралян Д. Х. (см. Папазан Т. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 3 | 128   |
|       | 42 Мариалян Н. А. (см. Пагазян Т. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3 | 128   |
|       | 43 Никогосян Г. С. (см. Алексанян А. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2 | 107   |
|       | 44 Hurozorgy F C (on Assessment A. F.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2 | 78    |
|       | 45. Назводу А. О. Смирнов Б. М., Шахбазян А. В. Метолы опораеления                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | - |       |
|       | чу, пазаряя и. С., Сларков Б. П., Даконови и. Б. инстерн определения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |   |       |
|       | теплоризических и споктральных характеристик веществ, использую-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3 | 135   |
|       | $\frac{10}{10} \frac{1}{10} $ | 1 | 30    |
|       | 40. HURDLOCKH I. C. (CM. MARCECAMI A. I.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |   | 50    |
|       | 41. Отанесян С. Г., Абеджян С. Б. Генерация гарагоных полна черенхол-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 425   |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2 | 123   |
|       | 48. Отанесян С. Г., Абаджян С. Б. Пельасиная теорня черевковского лазера                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2 | 114   |
|       | 49. UBCERTAH A. M. (CM. WIOBCECCHI R. A.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | z | 00    |
|       | 50. Папазян Г. А., Мурадян Л. А., Маркарян П. Л., Эограбян А. В. По-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |   | 100   |
|       | давление шумов лазерного излучения в спектральном компрессоре .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3 | 128   |
| 117   | 51. Петросян К. Б., Похсрарян К. М. Эффективая внутрирезсиаторная ге-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |   |       |
|       | нерация второй гармоники излучения лазера на YAIO3:Nd3+ в им-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |       |
|       | пульсно-периодической режиме                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3 | 178   |
|       | 52. Похсрарян К. М. (см. Петросян К. Б.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3 | 178   |
|       | 53. Прпрян В. Г. (см. Авакян А. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 2 | 74    |
| 10.00 | 54. Петросян У. В., Ростомян Э. В. К теории инжекции сильноточного элек-                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |   | 2.2.  |
|       | тренного пучка с плавным фронтом в плазму                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2 | 116   |
|       | 55. Ростомян Э. В. (см. Карбушев Н. И.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1 | 50    |
| -     | 56. Ростомян Э. В. (см. Петросян У. В                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 116   |
| 10    | 57. Саркисян Э. Л. (см. Авакян А. А.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 74    |
| -     | 58. Саркисян Г. С. (см. Гукасян А. Д.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2 | 84    |
| 1     | 59. Санамян Т. В. (см. Арутюнян С. М.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3 | 151   |
| 1     | 60. Смирнов Б. Ж. (см. Назарян А. О.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 3 | 135   |
|       | 61. Согомонян С. Б. (см. Григорян Г. Г.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1 | 22    |
| 1     | 62. Тер-Аветисяа С. А. О типе взаимодействий при тушески метастабильных                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |   |       |
|       | и резонансно-возбужденных атомов гелня                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3 | 146   |
| 1     | 64. Чобанян В. О. (см. Гукасян А. Д.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2 | 84    |
|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | - | 100   |
| 1     | 65. Шахбазян Н. Т. (см. Назарян А. О.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 3 | 135   |

#### PA4U174U4APP3AP1

| 2nd Sud Shujuh U. A., Upurjuh U. 4. Lupun bhhuhph abbhunghuh ibphuhadjuh nban-                   |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| hmhup dam                                                                                        | 125 |
| omhuquus o. U., Uniruquus I. b., Uurquerinte D. I., Antempine U. H. Lugopuifi                    |     |
| նառաղալիման աղմուկների ննչումը սպեկտրալ սեղմիչում                                                | 128 |
| buquerjant U. Z., Udhahad P. T., Suspengent b. P. Lughpusht augustut thous                       |     |
| մամը հյուների շերմաֆիդիկական և սպեկտրալ ընունագրերի որոշման մենոդներ                             | 135 |
| Pungmamejus 2. 4., Amejus U. 4. Abhrephim mpmushujunifiniship puninghum di-                      |     |
| ջավալրերից անդրադարձման գործակցի հաշվարկի համար                                                  | 141 |
| Shr-Udhuhujuh D. 2. 26thnedh dhawaamuphi h ahqubuuhu qaqadub waadubah                            |     |
| մարման ռնակցիանհրում փոխազդնցությունների տիպի մասին                                              | 146 |
| 2<br>առությունյան Ս. Մ., Կոստանյան Ռ. Բ., Սանավյան Տ. Վ. YAlO3: $\mathcal{E}_r^{3+}$<br>թյուրեղ- |     |
| ների սպեկարալ, լաղերային և լյումինեսցենտային հատկությունները                                     | 151 |
| Բարաչանյան վ. Գ., Դեմիբխանյան Գ. Գ., Կոստանյան Ռ. Բ. LiNbO $_3$ : $\mathbb{E}^{3+}_r$ թենռային   |     |
| բյուրեղների լասաինդուկցված էլեկտրական արձադանցները                                               | 157 |
| dmeguch Bar. U. bebugapuh aftundambuarfijuh abpabahaju mhanapuhuh mupu-                          |     |
| ծության լրիվ մողելի համար բարծը և չափավոր լայնություններում                                      | 163 |
| Հովնաննիսյան Ս. Գ., Արաջյան Ա. Վ. Չերենկովյան լաղերի ոչ գծային տեսությունը                       | 174 |
| Apmenayali 4. P., Anjuararyali 4. U. bapabaabaanapayihi behenen supinikihi tibet-                |     |
| տիվ դեներացիան իմպուլսա-հաճախային YAI-O3: $\mathrm{Nd}^{3+}$ լաղերում                            | 178 |

#### PALALARY PURCH

ն. 8. Ամատունի, Վ. Մ. Հաշությունյան (պատասխահատու իջվթագրի անդակալ), Հ. Հ. Վաշդապետյան, Գ. « ւաշություն (պաատշիածատու իմբագրի), Ռ. Մ. Ծաշար-այան, Ա. Ռ. Մկշաչյան, Մ. Ե. Ծովսիսյան, Է. Գ. Շաշոյան (պատասխահատու իմբագրի անդակալ), Գ. Ս. Սանուկյան, Ա. Հ. Միրթաշյան (պատասխահաաու բաթաուշլաթ)

### РЕДАКЦИОННАЯ КОАЛЕГИЯ

А. Ц. Аматуни, В. М. Арутюнян (заместитель ответственного редактора), Г. А. Вартапессон, Г. М. Гарибян (ответственный редактор), Р. М. Мартиросян, А. Р. Мкртчян, М. Е. Моссессия, Г. С. Саакян, Э. Г. Шароян (заместитель ответственного редактора), А. Г. Мхитарян (ответственный сепретарь)

Нав. АН Армении, Филина Индигельство АН Асмению

