

## СИНЯЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ В АТОМАРНЫХ ПАРАХ Cs, ВЫЗВАННАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ 852 НМ

А.Д. САРГСЯН\*, Д.Г. САРКИСЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

\*e-mail: sarmeno@mail.ru

(Поступила в редакцию 16 июня 2025 г.)

С использованием лазерного излучения с длиной волны 852 нм, находящегося в резонансе с переходом  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  атомов Cs, изучена яркая лазерно-индуцированная флуоресценция (LIF) на синих линиях 456 и 459 нм (переходы  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  и  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$ ). Применялась Т-образная сапфировая ячейка длиной 1 см, содержащая пары атомов Cs. Мощность LIF исследовалась в зависимости от температуры ячейки. Наблюдалась линейная зависимость мощности LIF от излучения накачки. LIF достигала максимума при 100°C. Показано, что ячейка с Cs может служить эффективным оптическим фильтром-ап-конвертором излучения с длиной волны 852 нм в излучение с длиной волны 456 нм.

### 1. Введение

В работе [1] экспериментально продемонстрировано, что излучение синего лазера успешно использовалось для беспроводной подводной связи на расстояниях до 36 км в Желтом море. Это стало возможно из-за того, что синее лазерное излучение с длиной волны 456 нм имеет сравнительно небольшой коэффициент поглощения водой некоторых океанов, равный  $0.01 \text{ м}^{-1}$  [2]. Поэтому важно изучить условия эффективной регистрации и преобразования синего излучения. Регистрируя LIF на 456 нм, можно полностью подавить излучение 852 нм, при этом ячейка с парами Cs может служить оптическим фильтром-ап-конвертором [3, 4].

В настоящее время активно исследуются переходы атома Cs  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2, 3/2}$  с линиями на длинах волн 456 и 459 нм, соответственно. Переходы Cs  $D_2$  были теоретически исследованы в работе [5] и сравнены с переходами  $D_1$  ( $\lambda = 459 \text{ нм}$ ). В работе [6] переходы линии  $D_2$  исследовались с использованием метода насыщенного поглощения (SA), который позволяет проводить субдоплеровскую спектроскопию. Переходы линии Cs  $D_1$  были исследованы в [7]. В работе [8] наблюдалась инверсия населенностей между уровнями  $7S_{1/2}$  и  $6P_{3/2}$  в цезиевой ячейке лазером на 455.5 нм, вследствие чего возникала лазерная генерация на 1470 нм. В работе [4] показано, что, используя излучение на 456 нм и дополнительное излучение на 1070 нм, можно также исследовать высоко лежащий ридберговский уровень  $32S_{1/2}$ .

Бихроматическая накачка с использованием лазеров с длинами волн 852 и 917 нм переводит атомы Cs на возбужденный уровень  $6D_{5/2}$ , после чего происходит каскадный распад, в результате которого в условиях фазового согласования

образуется когерентное синее лазерное излучение длиной волны 456 нм [9, 10]. Генерация полихроматического и коллимированного света на 456, 459 и 761 нм посредством двухфотонного возбуждения перехода  $6S_{1/2} \rightarrow 8S_{1/2}$  с накачкой двумя лазерами, имеющими длины волн 852 и 795 нм, продемонстрирована в работах [11, 12]. В работе [9] отмечается, что генерация на 456 нм посредством двухфотонного возбуждения перехода  $6S_{1/2} \rightarrow 6D_{5/2}$  может быть предпочтительнее, чем использование двухфотонного возбуждения перехода  $6S_{1/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ .

В настоящей работе лазерное излучение с длиной волны 852 нм, находящееся в резонансе с переходом  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ , создает яркую лазерно-индуцированную флуоресценцию (LIF) синего цвета на длинах волн 456 и 459 нм на переходах  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2, 3/2}$ . Используется полностью сапфировая ячейка длиной 1 см, которая содержит пары атомов Cs и может нагреваться до 500°C [13].

В отличие от некоторых из вышеупомянутых работ, данное исследование демонстрирует простую схему преобразования красного излучения в синее с использованием только одного лазерного излучения с длиной волны 852 нм, без необходимости использования двух или более лазеров.

## 2. Эксперимент

Экспериментальная установка показана на рис.1. Для резонансного возбуждения переходов  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  атома Cs использовался перестраиваемый диодный лазер с внешним резонатором (ECDL) со спектральной шириной линии  $\sim 0.1$  МГц и возможностью перестройки длины волны вблизи  $\lambda = 852$  нм.

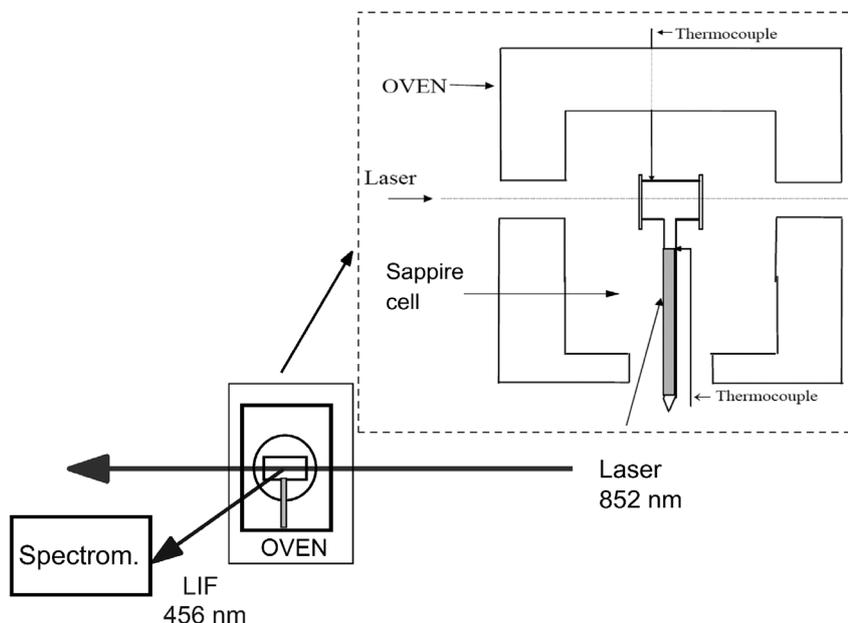


Рис.1. Экспериментальная установка: диодный лазер с длиной волны 852 нм сканировался вблизи переходов  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  атомов Cs. На вставке – оригинальная Т-образная ячейка длиной 1 см, изготовленная из сапфира и содержащая пары атомов Cs. Oven – печь, Thermocouple – термопара для определения температуры на корпусе и хвосте ячейки, Spectrom. – спектрометр.

Лазерный луч направлялся нормально к окнам самодельной Т-образной сапфировой ячейки (ASC) длиной 1 см, содержащей атомарные пары Cs, которая схематически изображена на вставке рис.1. Специально разработанная печь состоит из двух нагревателей: нагревателя для корпуса ячейки и нагревателя для бокового отвода (хвоста), содержащего металлический Cs. Благодаря оригинальной конструкции давление атомарных паров Cs определяется температурой границы столба металлического Cs в хвостовой части ячейки. Печь имеет три отверстия: два отверстия для прохождения лазерного излучения и одно отверстие для регистрации LIF излучения в боковом направлении, перпендикулярном направлению распространения лазерного луча.

Диаграмма уровней атома Cs и длины волн излучений возможных переходов, создаваемых лазером с длиной волны 852 нм, показаны на рис.2. Одно из возможных объяснений формирования синего излучения следующее. Излучение 852 нм эффективно заселяет уровень  $6P_{3/2}$  (энергия  $\sim 11\,740\text{ см}^{-1}$ ), с которого атом Cs поглощает еще 2 фотона 852 нм (энергия  $\sim 23\,470\text{ см}^{-1}$ ), что в сумме превышает энергию ионизации атома цезия, которая составляет  $\sim 31\,400\text{ см}^{-1}$ . Поэтому происходит ионизация атомов Cs с последующей рекомбинацией, в результате которой атом Cs оказывается на верхних уровнях. Далее путем каскадного спонтанного излучения заселяется, в частности, уровень  $7P_{1/2,3/2}$  с последующей яркой синей флуоресценцией на переходах  $7P_{1/2,3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$ . Уровни  $7P_{1/2,3/2}$  могут также заселяться вследствие эффекта «объединения энергии» (energy pooling): столкновения между возбужденными атомами Cs приводят к заселению более высоких возбужденных уровней с последующим их распадом на уровни  $7P_{1/2,3/2}$ , что приводит к появлению ярко-синей флуоресценции на переходах  $7P_{1/2,3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$  [3, 14]. Одно из наиболее ярких проявлений эффекта «energy pooling» в парах атомов Rb было представлено в работе [15], где был экспериментально продемонстрирован узкополосный фильтр и оптическое усиление с использованием электромагнитно-индуцированной прозрачности лестничного типа в оптически плотных атомарных парах.

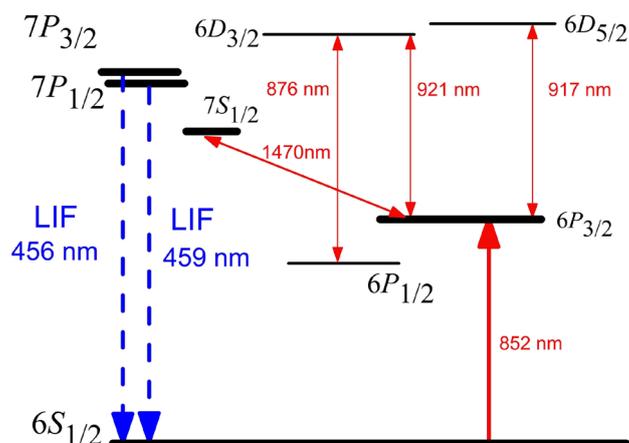


Рис.2. Диаграммы энергетических уровней атомарного цезия. Возбуждение переходов  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{1/2,3/2}$  происходит при накачке излучениями 852 и 895 нм путем каскадных переходов с верхних уровней. LIF наблюдается на длинах волн 456 и 459 нм.

Для выделения LIF на 456 и 459 нм использовались интерференционные узкополосные фильтры. Мощность излучений определялась измерителем мощности Thorlabs PM 100 D, а также регистрировалась фотодиодом ФД-24 и четырехканальным осциллографом Tektronix TDS2014B. Для определения длины волны излучения в эксперименте использовался спектрометр фирмы Tunder Optics.

На рис.3а показано ярко-синее свечение при температуре ячейки  $\sim 100^\circ\text{C}$ , которое регистрируется обычной фотокамерой. LIF синего цвета на длинах волн 456 и 459 нм возникает с применением лазерного излучения с длиной волны 852 нм. Плотность паров Cs,  $N = 1.6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

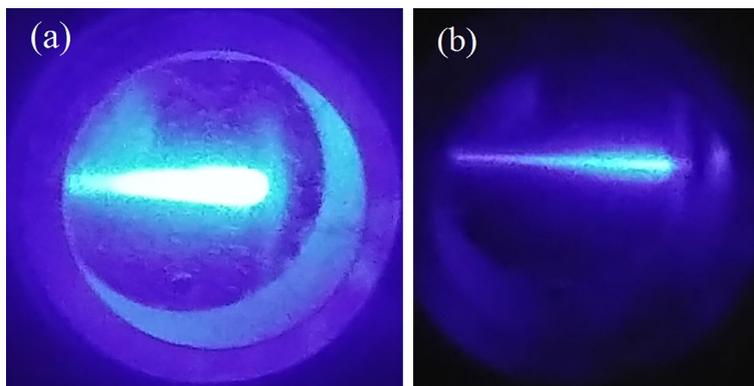


Рис.3. (а) Ярко-синее свечение, регистрируемое обычной фотокамерой на длинах волн 456 и 459 нм. LIF формируется накачкой с длиной волны 852 нм и мощностью 62 мВт. (б) LIF формируется лазером с длиной волны 895 нм и мощностью 12 мВт поэтому LIF слабее, чем при накачке 852 нм.

Падающее на ячейку лазерное излучение с  $\lambda = 852 \text{ нм}$  фокусировалось линзой (не показано на рис.1) с фокусным расстоянием 20 см в пятно с диаметром 1.5 мм. Отметим, что при отстройке частоты излучения 852 нм на  $\sim 2 \text{ ГГц}$  от резонансной частоты синий LIF исчезает. На рис.3б показано, что синяя LIF также формируется с применением накачки с длиной волны 895 нм. Зависимость мощности LIF на длине волны 456 нм от температуры ячейки представлена на рис.4а. Как видно, максимальная мощность излучения достигается при  $100^\circ\text{C}$ , а при более высоких температурах она уменьшается. Это происходит из-за конкуренции двух процессов: при увеличении температуры ячейки происходит увеличение концентрации атомов цезия и увеличение населенностей уровней  $7P_{1/2,3/2}$ , что приводит к усилению LIF-излучения в синей области.

В то же время увеличение концентрации Cs на основном уровне  $6S_{1/2}$  приводит к увеличению поглощения LIF излучения на переходах  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2,3/2}$ . Поэтому имеется оптимальная концентрации атомов цезия. Пересчет общей мощности излучения на 456 нм, которое излучается в телесный угол  $4\pi$  (то есть спонтанно излучается во всех направлениях) показывает, что эффективность преобразования излучения 852 нм составляет  $\sim 1.7\%$ . Зависимость мощности LIF на длине волны 456 нм от мощности излучения на длине волны 852 нм при температуре  $100^\circ\text{C}$  представлена на рис.4б. Заметим, что наблюдается почти линейная

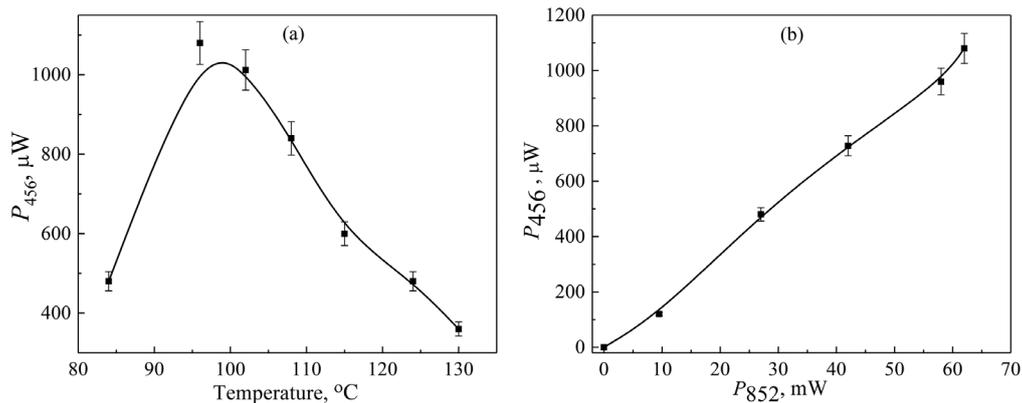


Рис.4. Зависимость мощности LIF на длине волн 456 нм от (а) температуры ячейки и (б) мощности излучения на длине волн 852 нм при температуре 100 $^{\circ}\text{C}$ .

зависимость мощности LIF от мощности лазера с длиной волн 852 нм.

На рис.5. показан спектр излучения LIF, который регистрируется с помощью спектрометра Thunder Optics (спектральное разрешение около 2 нм) в боковом направлении. Оптическими фильтрами отсекалось излучение с длинами волн выше 500 нм.

Из рисунка видно, что спектр LIF регистрируется на длинах волн 456 и 459 нм. Эффективность преобразования мощности излучения 852 на длине волн 459 нм составляет  $\sim 1.4\%$ . Отношение сил осцилляторов  $f_{456}/f_{459} = 2$ , поэтому ожидалось, что отношение амплитуд в спектре также будет равно двум. Однако из рис.5 видно, что отношение амплитуд  $A_{456}/A_{459} = 1.2$ . Следовательно, населенность уровня  $7P_{1/2}$  атомов Cs больше населенности уровня  $7P_{3/2}$ . Отметим, что преобразование синего излучения в красное, то есть даун-конверсия с уменьшением частоты фотона, в парах атомов цезия было осуществлено в работах [3, 16].

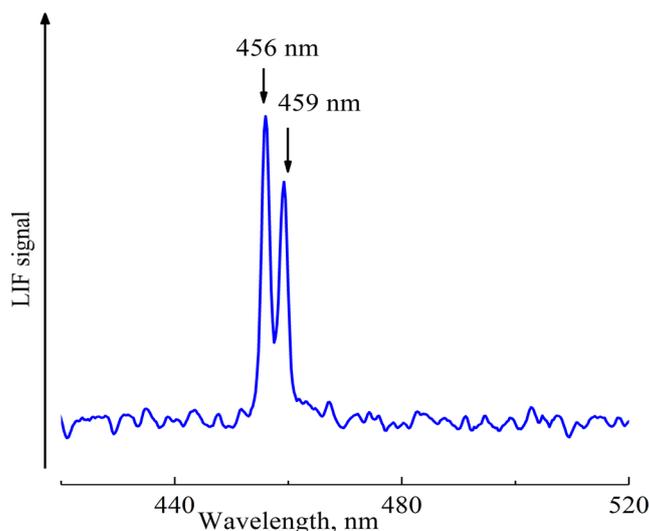


Рис.5. Спектр LIF, зарегистрированный в боковом направлении с помощью спектрометра фирмы Thunder Optics, при температуре ячейки 100 $^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Заключение

Используя лазерное излучение с длиной волны 852 нм, резонансное с переходом  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  атомов Cs, и сапфировую ячейку, содержащую пары атомов Cs и способную быть нагретой до 500°C, были изучены яркие LIF излучения на длинах волн 456 и 459 нм (переходы  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2,3/2}$ ). Эффективность преобразования красного излучения на длине волны 852 нм в синее с длинами волн 456 и 459 нм составляет ~1.7 и 1.4%, соответственно. Показано, что уровень  $7P_{1/2}$  заселяется больше, чем уровень  $7P_{3/2}$ . Мощность LIF излучения демонстрирует почти линейную зависимость до 62 мВт мощности лазера накачки на 852 нм. Оптимальная температура, при которой сигнал LIF максимальный на длинах волн 456 и 459 нм, составляет 100°C. Дальнейшее увеличение температуры приводит к ослаблению сигнала LIF. На входе фотодетектора излучение 852 нм может быть полностью подавлено без уменьшения мощности LIF излучения, поэтому цезиевая ячейка может служить эффективным оптическим преобразователем – ап-конвертором излучения 852 нм в 456/459 нм. Отметим, что слабая LIF на 456 нм также наблюдалась в тонкой Cs ячейке толщиной  $L = 5$  мкм, но эффективность преобразования составила всего около 0.1% при температуре ячейки 220°C.

Важно отметить, что красное смещение частоты атомного перехода, вызванное взаимодействием Ван-дер-Ваальса между атомами Cs и поверхностью диэлектрика (сапфировое окно ячейки с парами цезия) на длине волны 456 нм почти в 20 раз больше, чем при 852 нм [17]. Это мотивирует наш дальнейший интерес к изучению перехода  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  (вторая резонансная линия  $D_2$ ). Так как узкополосные непрерывные диодные лазеры на длине волны 852 нм, а также стеклянные ячейки, содержащие пары атомов, доступны и широко распространены, то мы надеемся, что настоящая работа стимулирует дальнейшее изучение процесса 852 нм  $\rightarrow$  456/459 нм. Также интересным и важным будет применение импульсного лазера с длительностью импульса накачки нс, пс и фс для процесса 852 нм  $\rightarrow$  456/459 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА в рамках проекта N 25RG-1C008.

### ЛИТЕРАТУРА

1. L. Ji, J. Gao, A.-L. Yang, Z. Feng, X.-F. Lin, Z.-G. Li, X.-M. Jin. Optics Express, **25**, 19795 (2017).
2. B. Wozniak, J. Dera. Light Absorption in Sea Water. Springer Science Business Media, LLC, 2007.
3. J. Huennekens, Z. Wu, T.G. Walker. Phys. Rev. A, **31**, 196 (1985).
4. A. Urvoy. Diploma Thesis, University of Stuttgart, 2011 - pi5.uni-stuttgart.de
5. A. Damitz, G. Toh, E. Putney, C.E. Tanner, D.S. Elliott. Phys. Rev. A, **99**, 062510 (2019).
6. W. Williams, M. Herd, W. Hawkins. Laser Physics Letters, **15**, 095702 (2018).
7. E. Klinger, A. Mursa, C.M. Rivera-Aguilar, R. Vicarini, R. Boudot. Optics Letters, **49**, 1953 (2024).
8. Y. Wang, D. Wang, T. Zhang, Y. Hong, S. Zhang, Z. Tao, X. Xie. J. Chen. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, **56**, 1107 (2013).

9. S.V. Kargapol'tsev, V.L. Velichansky, A.V. Yarovitsky, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin. *Quantum Electronics*, **35**, 591 (2005).
10. G. Ge, L. Tian, G. Zhang, N. Zheng, W. Liu, V. Sovkov, J. Wu, Y. Li, Y. Fu, P. Li, J. Ma, L. Xiao, S. Jia. *Front. Phys.*, **18**, 42302 (2023).
11. B. Yang, J. Fan, J. Xu, L. Zheng, W. Huang, H. Zhou. *Opt. Express*, **32**, 3492 (2024).
12. B. Yang, J. Xu, J. Fan, H. Zhou. *Optics Letters*, **49**, 3846 (2024).
13. D. Sarkisyan, U. Hinze, L. Meyer, B. Wellegehausen. *Appl. Phys. B*, **70**, 351 (2000).
14. L. Weller, R.J. Bettles, C.L. Vaillant, M.A. Zentile, R.M. Potvliege, C.S. Adams, I.G. Hughes. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1308.0129> .
15. J. Keaveney, A. Sargsyan, D. Sarkisyan, A. Papoyan, C.S. Adams. *Physics B: At. Mol. Opt. Phys.*, **47**, 075002 (2014).
16. A. Sargsyan, A. Gogyan, D. Sarkisyan. *JQSRT*, **345**, 109549 (2025).
17. A. Sargsyan, E. Klinger, R. Boudot, D. Sarkisyan. *Opt. Lett.*, **50**, 3229 (2025).

ԿԱՊՈՒՅՑ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՖԼՈՒՈՐԵՍԵՆՑԻԱ Cs-Ի ԱՏՈՄԱԿԱՆ  
ԳՈՒՆՐԵՐՆԵՐՈՒՄ ԱՌԱՋԱՑԱԾ 852 ՆՄ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՄԲ

Ա.Դ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Դ.Հ. ՍԱՐԿԻՍՅԱՆ

Օգտագործելով 852 նմ ալիքի երկարությամբ լազերային ճառագայթը, որը գտնվում է Cs ատոմների հետ ռեզոնանսի մեջ, ուսումնասիրվել է լազերային ճառագայթմամբ առաջացրած պայծառ ֆլուորեսցենցիան (ԼՊՖ) 456 և 459 նմ կապույտ գծերի տիրույթում ( $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  և  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$  անցումներ): Օգտագործվել է 1 սմ երկարությամբ T-աձև շափյուղա բջիջ, որը պարունակում է Cs-ի ատոմական գոլորշիներ: Ուսումնասիրվել է ԼՊՖ-ի հզորությունը բջջի ջերմաստիճանից կախվածությունը: Գրանցվել է մոդոլ ճառագայթումից ԼՊՖ-ի հզորության գծային կախվածություն: ԼՊՖ-ն հասել է իր առավելագույն արժեքին 100°C ջերմաստիճանում: Ցույց է տրված, որ Cs-ի բջիջը կարող է ծառայել որպես 852 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթումը՝ 456 նմ ճառագայթման արդյունավետ օպտիկական գտիչ՝ փոխարկիչ:

BLUE LASER-INDUCED FLUORESCENCE IN Cs ATOMIC VAPOR  
CAUSED BY 852 NM RADIATION

A.D. SARGSYAN, D.H. SARKISYAN

Using laser radiation with a wavelength of 852 nm, which is in resonance with Cs atoms, the bright laser-induced fluorescence (LIF) on the blue lines of 456 and 459 nm (transitions  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  and  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$ ) was studied by the transition  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ . A 1 cm long T-shaped sapphire cell containing Cs atomic vapors was used. The LIF power was studied as a function of the cell temperature. A linear dependence of the LIF power on the pump radiation was observed. The LIF reached a maximum at 100°C. It is shown that Cs cell can serve as an effective optical up-converter filter of radiation with a wavelength of 852 nm to radiation with a wavelength of 456 nm.