

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЭМИТТЕРЫ УПРАВЛЯЕМОЙ
ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

В. Г. ГАВАЛЯН, М. П. ЛОРИКЯН, А. Н. АРВАНОВ

Интерес к процессам дрейфа и размножения электронов в пористых диэлектрических слоях, находящихся в сильных электрических полях, созданных с помощью внешних электродов, — управляемой вторичной электронной эмиссии (УВЭЭ) — вызван как с точки зрения использования этого явления для создания детекторов частиц, так и в связи с возможностью создания прострельных динодов с высоким коэффициентом эмиссии.

Указанное явление, когда вторичные электроны электрическим полем высасываются в вакуум из диэлектрического слоя (УВЭЭ), было исследовано в работах [1—6], а в случае, когда вторичные электроны собираются и регистрируются на погруженных в диэлектрический пористый слой анодных нитях (диэлектрический детектор), — в работах [7, 8].

Первые исследования в этой области были выполнены для KCl , причем исследовалась эмиссия вторичных электронов из слоя при прохождении минимально ионизирующих электронов и α -частиц с энергией 3,6 МэВ [9]. В этих работах был обнаружен сильный рост коэффициента вторичной эмиссии $\sigma = \bar{n}$ с увеличением напряженности электрического поля, причем максимальное значение $\sigma_{max} = 250$, что на два порядка больше значения, достигнутого в аналогичных условиях при аномальной вторичной электронной эмиссии [10—12].

Большое быстроедействие, безынерционность, большая пространственная локализация вторичной электронной лавины в слое вселяет надежды, что детекторы частиц с рабочим веществом из пористых диэлектрических слоев существенно пополнят арсенал методов регистрации частиц в скором будущем [13—15].

В настоящее время хорошо изучена УВЭЭ из пористых слоев KCl и CsI . Хорошие результаты получены при использовании в диэлектрическом детекторе CsI [7, 8]. Однако в литературе до настоящего времени отсутствуют данные систематических исследований зависимости эффективности дрейфа и размножения вторичных электронов от технологических особенностей изготовления слоев. Эффективность дрейфа и размножения вторичных электронов в пористых слоях в сильной степени зависит от вещества, от средней плотности, структуры пор и стенок между порами и других факторов, многие из которых определяются технологией изготовления слоев. Результаты этих исследований полезны не только с точки зрения подбора материала, структуры, толщины, плотности слоя, но и для лучшего понимания физических процессов, происходящих в пористых диэлектриках, находящихся в сильном электрическом поле.

В настоящей работе приводятся подробное описание технологии изготовления пористых диэлектрических слоев MgO , CsI , KBr и LiF и результаты исследования эмиссионных свойств этих слоев при облучении α -частицами с энергией 5,46 МэВ.

Эмиттер имел такую же конструкцию, что и в работах [3, 4], с той лишь разницей, что управляющая сетка была более мелкоструктурной, с размерами ячеек 50×50 мкм. Для исследования эмиссионных свойств использовались экспериментальная установка и методика измерений, описанные подробно в работах [5, 6].

1. Для изготовления пористых диэлектрических слоев MgO стружки металлического магния помещались в молибденовую лодочку, которая подогревалась электрическим током. Лодочка была изготовлена из молибденовой фольги толщиной 150 мкм прямоугольной формы с размерами 16×40 мм, сложенной пополам в виде лодочки, края которой зажимались в зажимы, подключенные к источнику тока. На расстоянии 120 мм прямо над лодочкой располагалась металлическая подложка эмиттера, которая вращалась со скоростью 1—2 об/с в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, проходящей через центры лодочки и подложки (для равномерного осаждения слоя). Между лодочкой и подложкой помещалась шторка, которая открывалась при осаждении и закрывалась для прекращения осаждения MgO на подложку. Из объема, где производилось осаждение слоя MgO , предварительно откачивался воздух до давления 10—20 Торр. Затем в объем напускался воздух и производилось сжигание магния. В зависимости от давления воздуха получались пористые слои MgO с разными плотностями.

Осаждение MgO производилось в двух режимах подогрева лодочки. В первом случае после поджига магния ток, питающий лодочку, понижался так, что осаждение MgO происходило при самопроизвольном горении магния. Во втором случае во время осаждения MgO горение магния происходило при том же токе лодочки, при котором имел место поджиг. В обоих случаях с помощью шторки доступ MgO к подложке предотвращался в начале и в конце процесса горения Mg .

Слои, полученные вторым способом, внешне были белыми и непрозрачными. При наблюдении под микроскопом с 200 кратным увеличением были заметны кристаллические зерна с размерами порядка $10 \div 15$ мкм. В первом случае полученные слои MgO были прозрачными. Кристаллические зерна при таком же увеличении не наблюдались.

На рис. 1 приведена зависимость плотности пористых слоев MgO , полученных вторым способом, от давления воздуха в объеме. Микроскопические наблюдения показали, что в приведенной области давлений воздуха слои имели практически одинаковую структуру по зернистости. Измерения статистического распределения числа вторичных электронов были выполнены как для пленок, изготовленных первым способом, так и для пленок, изготовленных вторым способом. Толщина обоих слоев составляла 100 мкм, относительная плотность — 1,5%.

На рис. 2 приведены распределения числа вторичных электронов для слоя, полученного первым способом (гистограмма 1), и для слоя, полученного вторым способом (гистограмма 2). По оси абсцисс отложено число вторичных электронов n_e , выбитых каждой проходящей частицей, а по оси ординат — число событий с данным числом $N_{\text{соб}}$. Распределения сняты при числе $N = 10000$ прошедших через слой α -частиц. Напряженность поля в обоих слоях составляла $E = 4 \cdot 10^4$ В/см.

Из рисунка видно, что распределения сильно отличаются друг от друга по характеру. Наличие максимума во втором распределении и его отсутствие в первом указывает на то, что во втором случае в процессе дрейфа

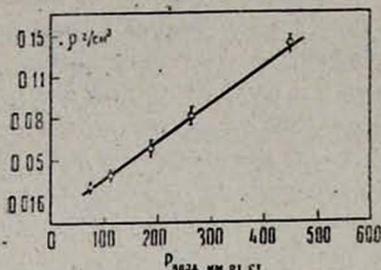


Рис. 1.

Рис. 1. Зависимость плотности пористых слоев MgO от давления воздуха $P_{\text{возд}}$.

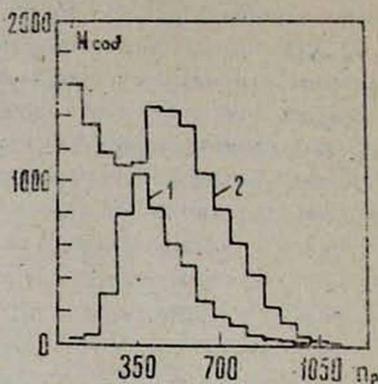


Рис. 2.

Рис. 2. Статистическое распределение числа вторичных электронов, эмиттированных на одну первичную частицу, для слоев MgO толщиной 100 мкм при $E = 4 \cdot 10^4$ В/см. Гистограмма 1 получена для слоев MgO , изготовленных первым методом, гистограмма 2 — для слоев, изготовленных вторым методом.

и размножения участвует больше электронов ионизации, образованных непосредственно α -частицей, чем в первом случае. Так как число истинно вторичных электронов, образованных α -частицей, в обоих случаях одинаково (количество вещества на пути одинаково), то из этого можно заключить, что в прозрачном эмиттере вторичные электроны поглощаются в веществе эмиттера значительно сильнее, чем в зернистом эмиттере. На ухудшение условий дрейфа и размножения вторичных электронов в незернистых слоях указывает и то, что среднее значение вышедших из слоя электронов в первом случае меньше, чем в случае зернистых слоев.

Отметим, что распределение числа электронов n_e без максимума наблюдается и в случае зернистых пленок, когда через слой проходит минимально ионизирующая β -частица, которая образует в слое на несколько порядков меньше электронов, чем α -частица [5, 6].

Таким образом, в слоях MgO , полученных при самостоятельном сгорании магния, дрейф и размножение электронов происходит менее эффективно, чем в слоях MgO , которые получают при дополнительном нагревании горевшей массы магния в процессе осаждения. По-видимому более высокая температура осаждаемого на подложку дыма MgO способствует формированию зернистого по структуре слоя MgO . Для проверки этого предположения мы произвели осаждение слоя MgO с высокотемпературной лодочкой, но с меньшим количеством воздуха в объеме ($P_{\text{возд}} < 50$ Торр), так, что магний в лодочке горел с такой же интенсивностью, как это происходило во время изготовления слоев MgO первым способом. Полученные таким образом слои по своим эмиссионным свойствам мало отличались от слоев, полученных первым способом.

Очевидно, что для выяснения физических причин необходимы более детальные структурные исследования полученных слоев как с точки зрения их пористости, так и кристаллического строения. Из-за отсутствия соответствующей методики мы на данном этапе не смогли провести подобные исследования.

Здесь уместно упомянуть исследования аномальной вторичной электронной эмиссии пористых слоев MgO на прострел, проведенные в работах [12, 16—18]. Пористые слои в этих работах были получены сжиганием металлического магния либо в атмосфере кислорода при давлении 0,08 Торр, либо в атмосфере воздуха с осаждением дыма MgO на подложку. Остальные детали метода в указанных работах не приводятся. Было показано, что эмиссия из этих слоев является практически безынерционной до определенного значения напряженности поля в слое. При больших значениях напряженности поля появляется инерционная составляющая эмиссии — самоподдерживающаяся эмиссия. Пороговое значение напряженности электрического поля зависит от многих условий эксперимента, например, чистоты материала, структуры и т. д. Было обнаружено также, что эмиссия из этих слоев нестабильна.

При исследовании эмиссионных свойств пористых слоев, полученных нами, в широком диапазоне напряженности поля в слое инерционность и нестабильность эмиссии не были обнаружены.

2. Пористые слои щелочно-галогидных материалов получались напылением этих диэлектриков в атмосфере аргона при давлении 4 Торр. Аргон напускался в объем после откачки воздуха до давления 10^{-4} Торр.

Напыление производилось из лодочек, сделанных из фольги молибдена (Mo) толщиной 35 мкм и из фольги сплава тантал-ниобий ($Ta + Nb$) толщиной 50 мкм. Эти лодочки имели такую же форму и размеры, что и лодочки, в которых производился поджиг магния.

Осаждение пористых слоев производилось следующим образом. Вначале диэлектрик подогревался в лодочке при непрерывной откачке объема (для обезгаживания) при температуре ниже температуры плавления. Затем в объем напускался сухой аргон до давления 4 Торр и медленно увеличивался ток лодочки до полного расплавления диэлектрика. После этого открывалась шторка, расположенная прямо под подложкой, и производилось осаждение диэлектрика на подложку, расположенную на расстоянии 50 мм от лодочки прямо над ней.

На рис. 3 приведена зависимость толщины полученных пористых пленок CsI от тока лодочки. Кривая 1 снята для лодочки из молибдена толщиной 35 мкм, кривая 2 — для лодочки из сплава тантал-ниобий толщиной 50 мкм. Время напыления во всех случаях было одинаковым и составляло 5 минут.

Из рис. 3 видно, что толщина слоя в обоих случаях вначале растет с ростом тока J (температуры) лодочки и достигает максимума, а затем уменьшается. В случае напыления слоя из лодочки сплава тантал-ниобий кривая $d_{сл} = f(J)$ сдвинута в сторону больших J . Наблюдения показали, что при токах, соответствующих максимуму этих кривых, начинается процесс кипения расплавленного диэлектрика.

На рис. 4 показана зависимость плотности слоя от тока лодочки. Из рисунка следует, что для обоих типов лодочек зависимость ρ от J имеет

одинаковый характер и опять для лодочки из $Ta + Nb$ кривая сдвинута в сторону больших J . В обоих случаях вначале до определенного значения тока J лодочки (ток кипения диэлектрика) ρ не зависит от J . При больших токах с увеличением тока (температуры) лодочки плотность слоя растет.

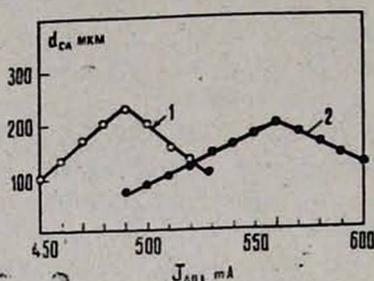


Рис. 3.

Рис. 3. Зависимость толщины получаемых пористых слоев CsI от тока (температуры) лодочки $d_{сл} = f(J)$, время напыления — 5 мин. Кривая 1 получена для лодочки из молибдена толщиной материала 35 мкм., кривая 2 — для лодочки из сплава тантал-ниобий толщиной материала 50 мкм.

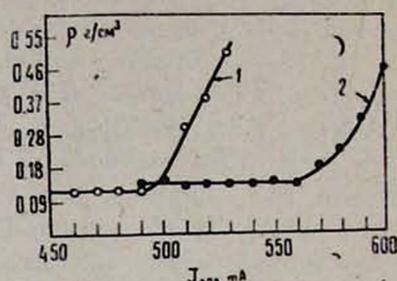


Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость глотности получаемых пористых слоев CsI от тока (температуры) лодочки, $\rho = f(J)$: кривая 1 — лодочка из молибдена толщиной 35 мкм, кривая 2 — лодочка из сплава тантал-ниобий толщиной 50 мкм.

Аналогичные исследования были проведены и для слоев KBr и LiF . В случае KBr мы наблюдали такие же по характеру зависимости $d_{сл}$ от J и ρ , как и для CsI . В случае LiF мы не достигали области температуры кипения и поэтому изломы в зависимостях $d_{сл} = f(J)$ и $\rho = f(J)$ не наблюдались.

Проводились измерения распределения числа вторичных электронов для пористых слоев MgO , KBr , CsI и LiF при прохождении α -частиц с энергией 5,46 МэВ в широком диапазоне напряженности поля в слоях и были сняты вольт-эмиссионные характеристики, т. е. зависимости среднего числа вторичных электронов от E , для слоев KBr , LiF и MgO .

На рис. 5 для примера приведены распределения числа вторичных электронов для слоев LiF и KBr при разных напряженностях поля в слоях. Толщина слоев KBr и LiF составляла 100 мкм, а относительная плотность — соответственно 0,8% и 1%.

Распределение числа вторичных электронов для всех слоев, кроме слоев MgO , изготовленных первым способом, при всех напряженностях поля в слоях имеет четко выраженные максимумы. С увеличением напряженности поля максимумы кривых сдвигаются в сторону большего числа электронов. Для слоев MgO , изготовленных первым способом, эти распределения при всех напряженностях поля в слое падают; с увеличением напряженности поля растет хвост распределения.

На рис. 6 приведены зависимости среднего числа вторичных электронов \bar{n} от напряженности поля в слое для эмиттеров KBr , LiF и MgO . Из рисунка видно, что для всех вольт-эмиссионных кривых в области малых E наблюдается более слабая зависимость \bar{n} от E , чем в области больших E , где начинает доминировать процесс лавинного размножения вторичных электронов в слое под воздействием сильного электрического поля. Видно

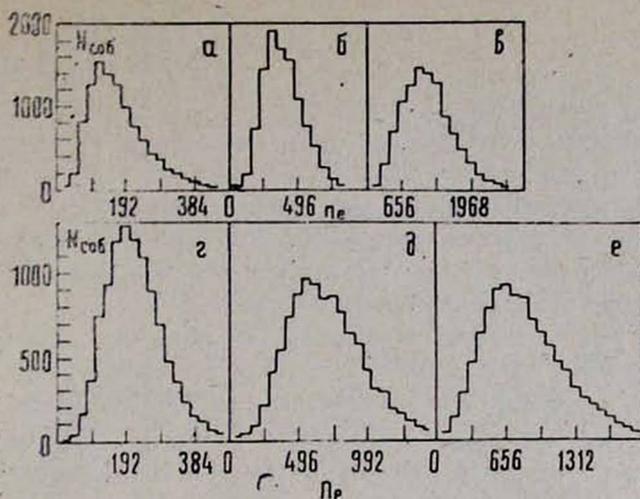


Рис. 5. Статистическое распределение числа вторичных электронов, эмиттированных на одну первичную частицу, для слоев из LiF и KBr : гистограммы а, б, в получены для слоя LiF при напряженности электрического поля в слое соответственно $E = 10^4$, $3 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^4$ В/см, толщина слоя LiF — 100 мкм, относительная плотность — 1,0%; гистограммы с, д, е получены для слоя KBr при напряженности электрического поля в слое соответственно $E = 10^4$, $1,6 \cdot 10^4$, $2,2 \cdot 10^4$ В/см, толщина слоя KBr — 100 мкм, относительная плотность — 0,8%.

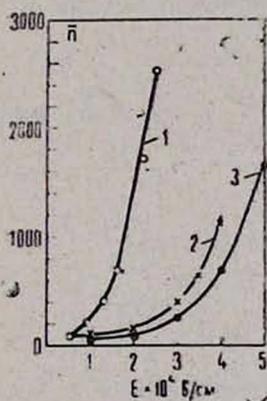


Рис. 6.

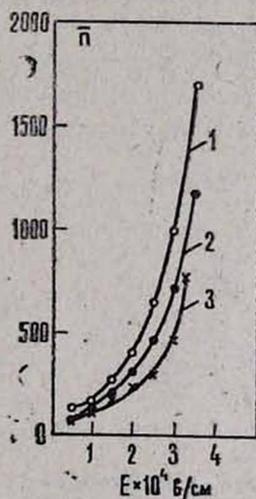


Рис. 7.

Рис. 6. Вольт-эмиссионные характеристики, т. е. зависимости $\bar{n} = f(E)$ для слоев KBr , LiF и MgO : кривая 1 получена для слоя KBr толщиной 100 мкм и относительной плотностью 0,8%, кривая 2 — для слоя LiF толщиной 100 мкм и относительной плотностью 1,0%, кривая 3 — для слоя MgO толщиной 100 мкм и относительной плотностью 1,4%.

Рис. 7. Вольт-эмиссионные характеристики слоев KBr : кривая 1 получена для слоя толщиной 200 мкм и относительной плотностью 0,8%, который не имел контакта с воздухом, кривая 2 — для того же слоя после контакта с воздухом в течение 1,5 мин, кривая 3 — для того же слоя после контакта с воздухом в течение 3 мин.

также, что в слое KBr этот процесс начинается при более низких напряжениях поля в слое, чем в слоях LiF и MgO , т. е. эмиттер на основе KBr является более низковольтным.

Исследовалось также воздействие воздуха на эмиссионные свойства слоев MgO , LiF , CsI и KBr . Было установлено, что MgO и LiF не меняют своих эмиссионных свойств при достаточно длительном контакте с воздухом (в течение нескольких часов). Пористые слои KBr , также как и CsI , гигроскопичны и при контакте с воздухом в них ухудшаются условия дрейфа и размножения электронов.

На рис. 7 приведены вольт-эмиссионные характеристики слоя KBr , не имевшего контакта с воздухом (кривая 1), после контакта с воздухом в течение 1,5 мин (кривая 2) и после контакта с воздухом в течение 3 мин (кривая 3). Все кривые сняты для одного и того же образца. Было установлено также, что при длительной работе в вакууме (около 10 часов) все исследованные слои заметно не меняют своих эмиссионных свойств.

Таким образом, применяемая технология изготовления пористых диэлектрических слоев MgO , KBr , CsI и LiF позволяет получать эмиттеры вторичных электронов с очень высоким коэффициентом вторичной эмиссии в режиме УВЭЭ. Надо отметить, что достигнутые значения коэффициентов вторичных электронов эмиссии далеки от максимальных, так как эмиттеры могут устойчиво работать и при более высоких значениях напряженности электрического поля в слоях.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А. Ц. Амадуни и Г. А. Вартапетяну за содействие и постоянный интерес к работе, Ю. Л. Маргаряну за большую помощь, оказанную при измерениях, а также Ж. Г. Саркисяну и Л. Г. Давтяну за помощь при создании экспериментальной установки.

Ереванский физический
институт

Поступила 10. III. 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Лорикян М. П., Кавалов Р. А., Трофимчук Н. Н. Изв. АН АрмССР, Физика, 7, 118 (1972).
2. Лорикян М. П., Кавалов Р. А., Трофимчук Н. Н. Изв. АН АрмССР, Физика, 8, 33 (1973).
3. Лорикян М. П. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 6, 297 (1971).
4. Лорикян М. П. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 7, 118 (1972).
5. Трофимчук Н. Н. и др. ЖЭТФ, 69, 640 (1975).
6. Лорикян М. П. и др. Научное сообщение ЕФИ—131, 1975.
7. Гукасян С. М., Кавалов Р. А., Лорикян М. П. Научное сообщение ЕФИ—84, 1974.
8. Gukastan S. M. et al. Nucl. Inst. Meth., 171/3, 427 (1980).
9. Lortkian M. P., Trofimtchouk N. N. Nucl. Inst. Meth., 140, 505 (1977).
10. Яснопольский Н. Л., Малышева В. С. Радиотехника и электроника, 7, 1657 (1962).
11. Яснопольский Н. Л., Карелина Н. А., Малышева В. С. Доклад на XV Заседании межведомственного семинара по катодной электронике, апрель, 1960.
12. Яснопольский Н. Л., Шабельникова А. Э., Ложкина Н. С. Изв. АН СССР, 30, 1882 (1966).
13. Fatore J. C. et al. IEEE Trans., NS—24, № 5, 299 (1977).

14. Charpak G. et al. CERN Preprint 70-05, 1978.
15. Гарубян Г. М. ДАН СССР, 240, 572 (1978).
16. Goetze G. W., Boerio A. H., Green M. J. Appl. Phys., 3, 35 (1964).
17. Jacobs H., Freeby G., Brand F. Phys. Rev., 88, 3492 (1952).
18. Sternglass E. J., Goetze G. W. IEEE Trans., NS-9, № 3, 97 (1962).

**ՂԵԿԱՎԱՐՎՈՂ ԵՐԿՐՈՐԴԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ
ԷՄԻՍԻԱՅԻ ԷՖԵԿՏԻՎ ԷՄԻՏԵՐՆԵՐ**

Վ. Գ. ՂԱՎԱԼՅԱՆ, Մ. Պ. ԼՈՐԻԿՅԱՆ, Ա. Ն. ԱՐՎԱՆՈՎ

Աշխատանքում մանրամասն նկարագրվում է MgO , CsI , KBr , LiF դիէլեկտրիկներից ծակոտիկներ բարակ թաղանթներ ստանալու մեթոդը: Ուսումնասիրված է այդ թաղանթներից ղեկավարվող էլեկտրոնային էմիսիան, հրը նրանց միջով անցնում են 5,46 ՄէՎ էներգիայով օժտված α -մասնիկներ: Ստացված են երկրորդային էլեկտրոնների թվի ստատիստիկական բաշխումները թաղանթներում դաշտի լարվածության լայն միջակայքում և հանված են վոլտ-էմիսիոն բնութագրերը ($\bar{n} = f(E)$): Ցույց է տրված, որ կիրառվող տեխնոլոգիան թույլ է սալիս ստանալ երկրորդային էմիսիայի բարձր գործակցով էֆեկտիվ էմիտերներ:

**EFFECTIVE EMITTERS OF CONTROLLABLE
SECONDARY ELECTRON EMISSION**

V. G. GAVALYAN, M. P. LORIKYAN, A. N. ARVANOV

Methods for growing dielectric MgO , CsI , KBr , LiF films of different density and thickness are described in detail. The controllable secondary electron emission from these films are compared for the passage of 5.46 MeV α -particles.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, 17, 109—113 (1982)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РЕЗОНАНСНЫЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ ФИЛЬТР

В. М. АРУТЮНЯН, Т. А. ПАПАЗЯН, С. М. САРКИСЯН,
С. П. ИЩХАНЯН, И. Г. АРУТЮНЯН

При исследовании резонансных явлений часто предъявляются высокие требования к стабильности частоты и к ширине линии лазерного излучения. Для непрерывных лазеров достигнуты большие успехи в области стабилизации и выделения сверхузких линий генерации. В таких системах используются поглощающие или рассеивающие пленки, дисперсионные элементы, обеспечивающие частотную дискриминацию в пределах линии усиления активной среды. С применением средств сложной автоматической подстройки нескольких элементов сложного резонатора, включающего частотно-селективный элемент, удается получить высокое значение стабильности и ширины линии генерации [1, 2].

В работах [3, 4] обсуждаются возможности использования фазо-поляризационных методов для создания частотно-селективных потерь в пре-