

06;07

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

© Н.Т.Гурин

Ульяновский филиал Московского государственного университета
им. М.В.Ломоносова
432700 Ульяновск, Россия
(Поступило в Редакцию 10 января 1995 г.)

На основе анализа эквивалентной схемы тонкопленочного (ТП) электролюминесцентного (ЭЛ) конденсатора (ТП ЭЛК) получены выражения для мгновенной, активной и полной мощностей, а также зависимости внешних квантового, энергетического выходов, светоотдачи и эффективности ТП ЭЛК от параметров слоев структуры, порогового поля в ЭЛ слое и электрического режима работы на синусоидальном напряжении в приближении монохроматичности излучения ТП ЭЛК. Показано, что при равных средних яркостях свечения и пороговой плотности мощности, соответствующий началу свечения, внешний квантовый и энергетический выходы, а также светоотдачи ТП ЭЛК с одинаковыми диэлектрическими слоями гиперболически уменьшаются с ростом отношения удельных емкостей диэлектрических и ЭЛ слоев, а эффективность ТП ЭЛК максимальна при значениях этого режима отношения, равных 2-4.

Одними из важнейших параметров, характеризующих тонкопленочные электролюминесцентные (ТП ЭЛ) конденсаторы (ТП ЭЛК), являются внешние квантовый и энергетический выходы люминесценции, а также светоотдача, определяемая отношением излученных элементом светового потока или световой мощности к активной мощности, затраченной на возбуждение излучения. В то же время для емкостных светоизлучающих элементов, каковыми являются ТП ЭЛК, гораздо более существенным параметром с точки зрения создания устройств управления является эффективность, определяемая отношением излученных светового потока или световой мощности к полным затратам мощности на возбуждение излучения, учитывающим также потери мощности на формирование емкостных токов в ТП ЭЛК [1,2]. Оценки квантового и энергетического выходов, а также светоотдачи ТП ЭЛК проведены в [3] исходя из толщины ЭЛ слоя и таких внутренних параметров ЭЛ слоя, как концентрация активатора, вероятность излучательных переходов и др. Оценка эффективности ЭЛК, приведенная в [1,2], выполнена без учета соотношения параметров слоев ТП ЭЛ структуры и специфики ее поведения до и после начала свечения. В то же время для создания ТП ЭЛК с оптимальными энергетическими параме-

трами, а также для сравнения различных типов ТП ЭЛК необходимо знать зависимости данных параметров от параметров слоев, образующих структуру ТП ЭЛК, и условий его возбуждения. Оценка светоотдачи и эффективности ТП ЭЛК, выполненная автором в [4], не учитывает временных зависимостей энергетических параметров (мгновенной активной и реактивной мощностей). В связи с этим выполнен анализ внешних квантового и энергетического выходов, светоотдачи и эффективности ТП ЭЛК в зависимости от параметров ЭЛ и диэлектрических слоев ЭЛ структуры, порогового напряжения, а также от электрического режима работы ТП ЭЛК при возбуждении его синусоидальным напряжением [5].

Для определения составляющих полных затрат мощности на возбуждение ТП ЭЛК структуры металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл (МДПДМ) примем, что диэлектрики являются однородными и не имеющими диэлектрических потерь аналогично [4,6,7]: структура ТП ЭЛК симметрична и волны яркости излучения ТП ЭЛК в разные полупериоды возбуждающего напряжения одинаковы.

Тогда при работе в режиме непрерывного возбуждения синусоидальным напряжением ТП ЭЛК может быть представлен в области рабочих напряжений, не превышающих порогового напряжения ТП ЭЛК V_t , в виде последовательно соединенных конденсаторов, образованных ЭЛ слоем толщиной d_e и двумя диэлектрическими слоями [3,4]. Примем для упрощения аналогично [6], что оба диэлектрических слоя выполнены из одного материала суммарной толщиной d_i .

Для определения указанных выше энергетических параметров необходимо найти токи, протекающие через ТП ЭЛ структуру до и после начала свечения, а также заряд, протекающий через ЭЛ слой во время генерации излучения.

Под воздействием возбуждающего напряжения $V(t) = V_m \sin \omega t$ в течение времени $t < t_i$ до достижения этим напряжением порогового значения V_t ток через ТП ЭЛК $I(t)$ является емкостным

$$I(t) = I_c(t) = \frac{C_e C_i}{C_e + C_i} \omega V_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где C_e, C_i — емкости конденсаторов, образованных ЭЛ слоем и диэлектрическими слоями.

При этом значение времени t_i равно

$$t_i = \frac{T}{2\pi} \arcsin \frac{1}{n}, \quad (2)$$

где T — период возбуждающего напряжения с амплитудой V_m ,

$$n = V_m / V_t. \quad (3)$$

При $V \geq V_t$ падение напряжения на ЭЛ слое определяется процессом генерации носителей заряда за счет ударной ионизации и остается примерно постоянным и равным значению порогового напряжения собственно ЭЛ слоя V_{te} [6,7]. При этом до достижения внешним напряжением значения V_m при $t = T/4$ ток, протекающий через ТП ЭЛК, является активным и равен

$$I(t) = I_a(t) = C_i \frac{dV_i(t)}{dT} = C_i \omega V_m \cos \omega t, \quad (4)$$

где $V_i(t)$ — напряжение на диэлектрических слоях ТП ЭЛК.

Этот ток сопровождается нарастанием интенсивности свечения ТП ЭЛК. Следовательно, в момент времени $t = t_t$ происходит скачкообразный рост тока, причем отношение амплитуд токов до начала свечения при $t = 0 - I_m^c$ и после при $t = t_t - I_m^a$ равно

$$\frac{I_m^a}{I_m^c} = \frac{(a+1)\sqrt{n^2-1}}{n}, \quad (5)$$

где

$$a = \frac{C_i}{C_e} = \frac{\varepsilon_i/\varepsilon_e}{d_i/d_e}, \quad (6)$$

$\varepsilon_i, \varepsilon_e$ — диэлектрические проницаемости материалов диэлектрических и ЭЛ слоев.

При $t > T/4$, когда амплитуда возбуждающего напряжения становится меньше V_m , уменьшается напряжение на ЭЛ слое ниже V_{te} , прекращается процесс генерации носителей за счет ударной ионизации и начинается спад интенсивности смещения ТП ЭЛК. До следующего достижения приложенным напряжением значения V_t при $T/4 < t < (T/2 + t_t)$ ток через ТП ЭЛК является емкостным и определяется формулой (1).

Заряд, протекший через ЭЛ слой во время генерации носителей в ЭЛ слое, с учетом (4), (6) равен

$$Q = \int_{t_t}^{T/4} I_a(t) dt = C_i V_t (n-1) = a C_e V_t (n-1). \quad (7)$$

Так как V_t связано с V_{te} соотношением [6]

$$V_t = V_{te} \left(1 + \frac{C_e}{C_i} \right) = V_{te} \left(\frac{e+1}{a} \right), \quad (8)$$

то

$$Q = C_e V_{te} (a+1)(n-1) = Q_t (a+1)(n-1), \quad (9)$$

где Q — пороговый заряд в ЭЛ слое, соответствующий началу свечения.

Внешний квантовый выход ТП ЭЛК η_k определяется отношением числа излученных квантов к общему числу носителей, прошедших через ЭЛ слой во время свечения ТП ЭЛК и в приближении монохроматичности излучения и равномерно излучающей в любом направлении поверхности ТП ЭЛК равен

$$\eta_k = \frac{q \int_0^{T/2} \phi_e(t) dt}{f_\lambda h \nu_e Q} = \frac{q S_e \Omega}{f_\lambda h \nu_e Q} \int_0^{T/2} L_e(t) dt, \quad (10)$$

где q — заряд электрона; f_λ — видность излучения ТП ЭЛК с энергией кванта $h \nu_e$, частотой ν_e (h — постоянная Планка); $\phi_e(t)$, $L_e(t)$ —

изменение светового потока и яркости излучения ТП ЭЛК в течение полупериода возбуждающего напряжения; Ω — телесный угол, в котором распространяется излучение; S_e — площадь ТП ЭЛК.

В соответствии с законом Тальботта средняя за полупериод яркость свечения ТП ЭЛК равна

$$L = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} L_e(t) dt. \quad (11)$$

Для равномерно излучающей во всех направлениях поверхности ТП ЭЛК $\Omega = \pi$ и в соответствии с (10), (11)

$$\eta_k = \frac{\pi q S_e L T}{2 h \nu_e f_\lambda Q_i (a+1)(n-1)} = \frac{\pi q L T}{2 h \nu_e f_\lambda Q_i^s (a+1)(n-1)}, \quad (12)$$

где Q_i^s — пороговая плотность заряда в ЭЛ слое.

Для определения энергетического выхода η_w , светоотдачи η_L и эффективности G необходимо найти значения затрачиваемых на возбуждение ТП ЭЛК активной, реактивной и полной мощностей.

Активная мощность P_a равна с учетом одинаковости полуволн возбуждающего напряжения среднему за полупериод значения мгновенной активности мощности $P_a(t)$ [7]

$$P_a = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{T/4} P_a(t) dt. \quad (13)$$

Учитывая (4),

$$P_a(t) = I_a(t) V_{te} = C_i V_{te} V_m \cos \omega t. \quad (14)$$

Выражение (14) с учетом (6), (8) соответствует полученному в [8]. Величина $P_a(t)$ максимальна при $t = t_i$ и равна

$$P_a(t_i) = \pi P_i^s (a+1) \sqrt{n^2 - 1} S_e, \quad (15)$$

где

$$P_i^s = 2 F Q_i^s V_{te} = 2 F Q_i^s E_{te} d_e \quad (16)$$

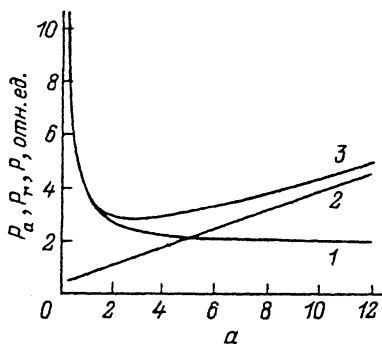
— пороговая плотность мощности, $F = 1/T$ — частота возбуждающего напряжения, E_{te} — пороговое поле в ЭЛ слое.

Цифра 2 в выражении (16) свидетельствует о том, что процессы генерации носителей и излучения в ЭЛ слое идут дважды за период приложенного напряжения, т.е. с удвоенной частотой.

Активная мощность определяется из выражений (13), (14)

$$P_a = P_i^s (a+1)(n-1) S_e. \quad (17)$$

Рис. 1. Зависимости реактивной P_r (1), активной P_a (2) и полной P (3) мощностей от отношения $a = \frac{z_i/z_e}{d_i/d_e}$ при $n = 1.35$.



Из (17) следует, что P_a линейно возрастает с увеличением a (рис. 1) и n при одинаковых значениях P_t^s , что подтверждается экспериментальными данными [8].

Мгновенное значение реактивной мощности $P_r(t)$, в интервалы времени $0 \leq t < t_i$ и $T/4 < t < (T/2 + t_i)$ определяется с учетом (1)

$$P_r(t) = I_c(t)V(t) = \frac{C_i}{2(a+1)} \omega V_m^2 \sin 2\omega t. \quad (18)$$

В соответствии с физическим смыслом реактивной мощности, пропорциональной среднему за четверть периода энергии, которую источник питания дважды отдает в цепь и дважды получает обратно за период переменного тока [7], абсолютные значения реактивной мощности в интервалы времени $0 \leq t \leq T/4$ и $T/4 \leq t \leq T/2$ должны быть равны

$$P_r = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} P_r(t) dt = -\frac{4}{T} \int_{T/4}^{T/2} P_r(t) dt. \quad (19)$$

Это возможно в том случае, если выражение для $P_r(t)$ (18) справедливо также и в интервале времени $t_i \leq t \leq T/4$. Тогда мгновенное значение реактивной мощности при $t = t_i$ и максимальное при $t = T/8$ составляют

$$P_r(t_i) = \pi P_t^s \left(\frac{a+1}{a} \right) \sqrt{n^2 - 1} \cdot S_e, \quad P_r(T/8) = P_t^s \left(\frac{a+1}{a} \right) n^2 S_e, \quad (20)$$

а реактивная мощность в соответствии с (18), (19) равна

$$P_r = P_t^s \left(\frac{a+1}{a} \right) n^2 S_e. \quad (21)$$

Из (21) следует, что P_r значительно возрастает при уменьшении a менее 2-4 и слабо уменьшается с ростом a более 2-4 (рис. 1); P_r также квадратично зависит от n .

Полная мощность в соответствии с [7] и с учетом (17), (21) равна

$$P = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = P_t^s \left(\frac{a+1}{a} \right) \sqrt{a^2(n-1)^2 + n^4} \cdot S_e. \quad (22)$$

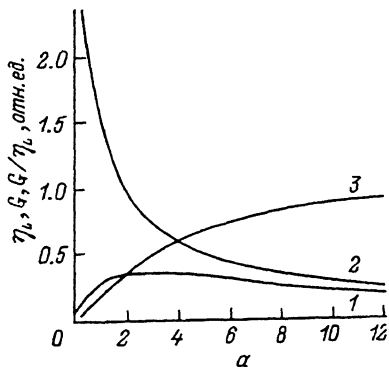


Рис. 2. Зависимость эффективности G (1), светоотдачи η_L (2) и отношения G/η_L (3) от отношения $a = \frac{\epsilon_i/\epsilon_e}{d_i/d_e}$ при $n = 1.35$.

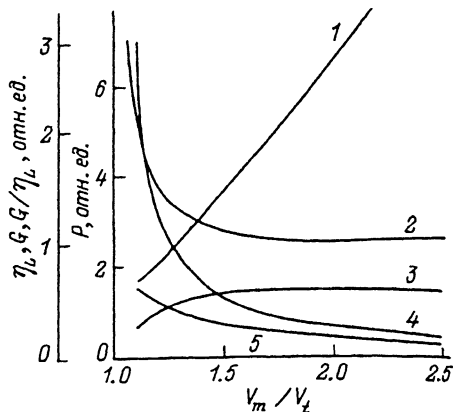


Рис. 3. Зависимости полной мощности P (1), a_m (2), G/η_L (3), светоотдачи η_L (4), эффективности G (5) от отношения V_m/V_t при $a_m = 3$.

Из (21) следует, что при $a \ll 1$ $P \sim 1/a$, а при $a \gg 1$ — $P \sim a$, т.е. зависимость $P(a)$ имеет минимум (рис. 1). Беря производную и приравнявая ее нулю, получаем оптимальное значение a_m , при котором полная мощность минимальна

$$a_m = \sqrt[3]{\frac{n^4}{(n-1)^2}}. \quad (23)$$

При этом зависимость $a_m(n)$ также имеет минимум при $n = 2$, при котором $a_m \approx 2.5$. Для обычных ТП ЭЛК $n = 1.2-1.5$. При $n = 1.35$ $a_m \approx 3$.

Следует отметить, что минимум мощности возбуждения в зависимости от толщины ЭЛ слоя при фиксированной удельной емкости диэлектрических слоев получен также при расчете характеристик многоэлементного матричного ТП ЭЛ индикатора [9].

С учетом (17) выражение (12) можно записать в виде

$$\eta_k = \pi q L E_{te} d_e \left[h \nu_e f_\lambda P_t^s (a+1)(n-1) \right]^{-1}. \quad (24)$$

Энергетический выход ТП ЭЛК η_w определяется отношением энергии излучения к энергии, затраченной на возбуждение этого излучения,

$$\eta_w = \frac{\int_0^{T/2} \phi_e(t) dt}{f_\lambda \int_{t_i}^{T/4} P_a(t) dt} = \frac{\pi L}{f_\lambda P_t^s (a+1)(n-1)}. \quad (25)$$

Светоотдача ТП ЭЛК составляет

$$\eta_L = \eta_w f_\lambda = \frac{\pi L}{P_t^s (a+1)(n-1)}. \quad (26)$$

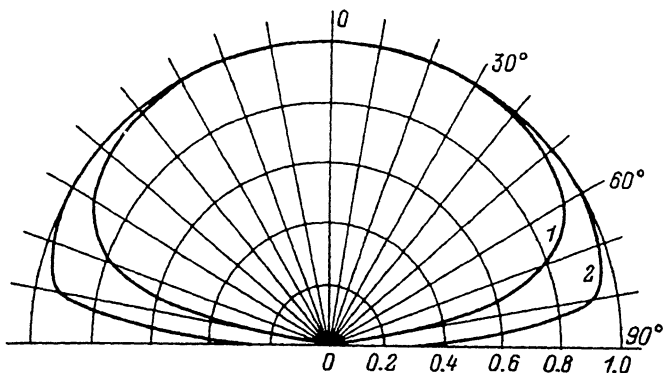


Рис. 4. Диаграммы направленности ТП ЭЛК длиной 7 мм с толщиной подложки (1 — 2, 2 — 1 мм).

Из (24)–(26) следует, что при одинаковых L и P_t^s энергетический выход η_w и светоотдача η_L (а также при постоянных E_{te} и d_e внешний квантовый выход η_k) гиперболически уменьшаются с ростом a (рис. 2) и n , т.е. фактически с уменьшением крутизны вольт-яркостной характеристики (ВЯХ) (рис. 3), причем зависимость $\eta_L(n)$ наиболее сильная в практически используемом в обычных ТП ЭЛК диапазоне $1 \leq n \leq 1.5$.

Эффективность ТП ЭЛК G с учетом (22) равна

$$G = \frac{\pi a L}{P_t^s (a + 1) \sqrt{a^2 (n - 1)^2 + n^4}}. \quad (27)$$

В соответствии с зависимостью $P(a)$ (22) при постоянных L и P_t^s зависимость $G(a)$ имеет максимум при том же значении a_m (рис. 2). При этом с возрастанием n эффективность G падает, причем наиболее сильно в области $n \lesssim 1.5$ (рис. 3).

Из (26), (27) отношение G/η_L равно

$$G/\eta_L = \left[1 + \frac{n^4}{a^2 (n - 1)^2} \right]^{-1/2}. \quad (28)$$

Зависимость $G/\eta_L(a)$ (рис. 2) свидетельствует о том, что с увеличением a до 10 и более эффективность ТП ЭЛК приближается к светоотдаче, однако сами значения η_L при этом в 2–3 раза ниже соответствующих значений при a_m . Для $n = 1.35$ и $a = 3$ отношение $G/\eta_L \simeq 0.5$, т.е. эффективность ТП ЭЛК примерно в 2 раза ниже светоотдачи. Указанное отношение возрастает с увеличением n особенно сильно при $n \lesssim 1.5$, достигая при a_m максимума $G/\eta_L \simeq 0.6$, если $n = 2$. В области $n \gtrsim 1.5$ отношение G/η_L слабо зависит от n .

Приведенные выше результаты подтверждают полученные автором данные оценки энергетической эффективности ТП ЭЛК [4], в соответствии с которыми зависимости $P(a)$ и $G(a)$ имеют соответственно минимум и максимум при некотором значении a_m , хотя приведенный выше диапазон оптимальных величин $a_m = 2-4$ несколько выше оценочного значения $a_m \simeq 2$ [4].

Следует отметить, что у реальных ТП ЭЛК поверхность не является равномерно излучающей в любом направлении. Как показывают экспериментальные исследования диаграмм направленности излучения ТП ЭЛК, выполненные с помощью яркомера-люксметра ЯРМ-3, гониометра Г5М и генератора ГЗ-112/1, угол обзора возрастает при увеличении отношения размеров светящегося элемента к толщине стеклянной подложки, находится для исследованных образцов в пределах $135-170^\circ$ и составляет $140-160^\circ$, когда размеры элемента и толщина подложки одного порядка (рис. 4). В формулах (24)–(27) уменьшение телесного угла, в котором распространяется излучение, может быть учтено введением поправочного коэффициента K_Ω , величина которого составляет $K_\Omega = 0.75-0.95$ для исследованных образцов ТП ЭЛК.

В целом полученные зависимости позволяют рассчитывать выход люминесценции и энергетическую эффективность ТП ЭЛК различных типов и производить их сравнение. Так, для ранее исследованных ТП ЭЛК обычной МДПДМ структуры [11], где в качестве материала диэлектрических слоев использовалась смесь $ZrO_2Y_2O_3$ (13% мас.) с $d_i = 0.6$ мкм, $\epsilon_i = 19$, ЭЛ слоя $ZnS:Mn$ с $d_e = 0.6$ мкм, $\epsilon_e = 8.5$, величина a составляет $a \approx 2.23$. Принимая значения $Q_i^s = 1$ мкКл/см² и $E_{te} = 10^6$ В/см, получаем при $n = 1.35$, $K_\Omega = 0.8$ на частоте $F = 1$ кГц значение $P_i^s = 0.12$ Вт/см². С учетом яркости свечения ТП ЭЛК при $F = 1$ кГц $L \approx 2900$ кд/м², значениях $f_\lambda = 545$ лм/Вт, $h\nu_e = 2.2$ эВ энергетические параметры ТП ЭЛК составляют $\eta_k \approx 0.0027$, $\eta_w \approx 0.98\%$, $\eta_L = 5.36$ лм/Вт, $G \approx 2.1$ лм/В·А. По сравнению с обычными МДПДМ структурами МДПКМ и МПКМ структуры, где K — композиционный жидкий диэлектрик [11,12], а также ТП ЭЛК, выполненные на сегнетокерамических подложках [13], имеющих пониженную крутизну ВЯХ и соответственно более высокие значения n , достигающие 2–2.5, будут иметь заводом более низкие значения $\eta_k, \eta_w, \eta_L, G$.

Необходимо подчеркнуть, что диапазон величин $a \approx 2-4$, при котором значения полной мощности минимальны, а эффективности максимальны и слабо зависят от a (рис. 1,2), обеспечивает в соответствии с [6] получение ТП ЭЛК МДПДМ структуры с пороговыми и рабочими напряжениями, не превышающими 100 В.

Заключение

Таким образом, при равных средних яркостях свечения и пороговой плотности мощности, соответствующей началу свечения, энергетический выход и светоотдача, а также (при постоянном пороговом напряжении ЭЛ слоя) внешний квантовый выход ТП ЭЛК с одинаковыми диэлектрическими слоями гиперболически уменьшаются с ростом отношения удельных емкостей диэлектрических ЭЛ слоев, а эффективность ТП ЭЛК максимальна при значениях этого отношения, равных 2–4 для обычных МДПДМ структур, и приближаются к значениям светоотдачи при возрастании данного отношения более 4, однако значения светоотдачи при этом уменьшаются в 2–3 раза относительно величин при оптимальном отношении удельных емкостей диэлектрических и ЭЛ слоев. При этом уменьшение крутизны ВЯХ и связанное с ним увеличение отношения амплитуд возбуждающего синусоидального и порогового напряжений ТП ЭЛК также приводит к

гиперболическому уменьшению внешнего квантового и энергетического выходов и светоотдачи, а также к уменьшению эффективности. В связи с этим оптимальными по энергетической эффективности являются ТП ЭЛК МДПДМ структуры, имеющие ВЯХ с максимальной крутизной, у которых отношение удельных емкостей диэлектрических и ЭЛ слоев находится в пределах $\sim 2-4$. При этом обеспечивается возможность получения ТП ЭЛК с пороговыми и рабочими напряжениями, не превышающими 100 В. ТП ЭЛК с композиционным жидким диэлектриком, а также выполненные на основе сегнетокерамических слоев и подложек, при равных средних яркостях свечения и пороговой плотности мощности имеют более низкие энергетические параметры по сравнению с МДПДМ структурами ввиду меньшей крутизны ВЯХ.

Список литературы

- [1] Прикладная электролюминесценция / Под ред. М.В.Фока. М.: Сов. радио, 1974. 416 с.
- [2] Лямичев И.Я. Устройства отображения информации с плоскими экранами. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
- [3] Электролюминесцентные источники света / Под ред. И.К.Верещагина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 168 с.
- [4] Гурин Н.Т. // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1994. № 3-4. В печати.
- [5] Гурин Н.Т. // Тез. Междунар. конф. по люминесценции. Ч. III. М., 1994. С. 214.
- [6] Гурин Н.Т. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1990. № 1 (135). С. 88-90.
- [7] Гурин Н.Т. // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. № 3-4 (64-65). С. 61-64.
- [8] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. 528 с.
- [9] Самохвалов М.К., Рябинов Е.Б. // ЖПС. 1993. Т. 50. № 5-6. С. 495-499.
- [10] Kuwata J., Ozaki E., Fujita Y. // Electroluminescence. Proc. 4th Intern. Workshop. Berlin, 1989. P. 254-258.
- [11] Бригаднов И.Ю., Гурин Н.Т. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 23. С. 71-74.
- [12] Бригаднов И.Ю., Гурин Н.Т., Рябинов Е.Б. // ЖПС. 1993. Т. 59. № 1-2. С. 175-181.
- [13] Ратлин М.Я., Родионов В.Е. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 23. С. 2144-2147.