

# Возбуждаемые барьерным разрядом коаксиальные эксилампы с повышенной энергией излучения в импульсе

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко

*Проведены исследования характеристик отпаянных барьерных эксиламп при высокой мощности возбуждения. Получена полная энергия излучения в импульсе до 25 мДж (площадь излучающей поверхности KрСl-эксилампы до 1500 см<sup>2</sup>, мощность излучения более 100 кВт и КПД до 10 %). Показано, что при увеличении вкладываемой в рабочую смесь энергии и частотах следования импульсов возбуждения до 50 Гц в коаксиальной эксилампе формируется объемный разряд. Получена пиковая интенсивность излучения на поверхности эксилампы до ~100 Вт/см<sup>2</sup>. Определена оптимальная энергия возбуждения для барьерной эксилампы; она составляет 0.1–0.2 мДж/см<sup>3</sup>. Дальнейшее увеличение вкладываемой энергии приводит к быстрому падению эффективности эксилампы.*

**Ключевые слова:** коаксиальные УФ эксилампы, мощное спонтанное излучение, возбуждение барьерным разрядом.

## 1. Введение

В настоящее время источники спонтанного излучения УФ и ВУФ диапазонов (эксилампы) находят широкое применение в различных областях науки, технологии, медицины [1–4]. Обычно в многочисленных приложениях используются коаксиальные эксилампы с возбуждением барьерным разрядом. Такие эксилампы достаточно просты по конструкции и надежны в работе, их средняя мощность излучения достигает 100 Ватт [5, 6]. Высокие средние мощности излучения эксиламп данного типа реализуются за счет большой частоты следования импульсов (до 100 кГц), тогда как энергия и мощность их излучения в отдельном импульсе сравнительно малы и оказываются недостаточными для ряда применений. По сравнению с лазерами УФ и ВУФ диапазонов эксилампы имеют в несколько раз больший КПД, больший набор длин волн излучения, позволяют получать высокие средние мощности, имеют отпаянные излучатели с большим сроком службы, отличаются простотой и разнообразием конструкций. Лазеры, в свою очередь, являются источниками направленного излучения с малой шириной спектра, а также позволяют получать большие плотности мощности излучения и значительные энергии излучения в импульсе.

Повысить интенсивность излучения эксилампы можно при возбуждении ее оптической среды поперечным разрядом, который используется в импульсных лазерах. Планарные эксилампы могут иметь интенсивность излучения до нескольких кВт/см<sup>2</sup> [7, 8], однако в них рабочая смесь контактирует с металлическими электродами. Это существенно ограничивает время работы на одной порции смеси и делает невозможным создание отпаянных образцов.

Импульсные характеристики коаксиальной эксилампы при возбуждении барьерным разрядом, в конечном счете, ограничены энергией  $E$ , запасаемой в емкости барьера  $C_{\text{бар}}$  ( $E = C_{\text{бар}} U^2 / 2$ ). Использование в качестве барьера керамики с высокой диэлектрической проницаемостью (при этом достигается увеличение  $E$ ) и второго металлического электрода с малым радиусом кривизны позволило получить параметры излучения, близкие к параметрам планарных эксиламп по интенсивности излучения (~1 кВт/см<sup>2</sup>) [9]. Однако и при этой конструкции эксилампы имелись контакт рабочей смеси, содержащей молекулы галогенов, с металлическим электродом, что тоже ограничивало время работы на одной порции смеси. Кроме того, в подобных конструкциях из-за больших потерь при выводе излучения из разрядной плазмы энергия спонтанного излучения эксилампы в импульсе не превышала нескольких миллиджоулей, а КПД – 1 %. В работе [10] исследовались параметры барьерных эксиламп при накачке высоковольтными импульсами с частотой следования до 12 кГц. Однако эффективность данных эксиламп была низкой из-за неоптимальных условий возбуждения и неоптимальных газовых смесей.

Целью настоящей работы является создание коаксиальных отпаянных эксиламп с высокими импульсной мощностью, эффективностью и энергией излучения. Для возбуждения применен барьерный разряд, а электроды изолированы от рабочей смеси двумя барьерами.

## 2. Конструкция эксилампы и методика измерений

Конструкция эксилампы с накачкой барьерным разрядом показана на рис.1. Барьерный разряд формировался в зазоре между двумя коаксиальными кварцевыми трубками, заполненном смесью криптона или ксенона с различными галогенами. Оптимальное соотношение давлений инертного газа и галогена для всех режимов работы эксиламп было ~ 100 : 1 при общем давлении смеси 150–200 Тор. Длина возбуждаемой области составляла 10–90 см. Диаметр внешней трубки был равен 40–60

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 3 апреля 2007 г., после доработки – 22 июня 2007 г.

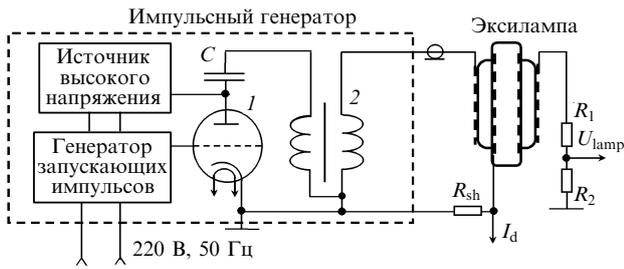


Рис.1. Схема барьерной эксилампы с генератором накачки:  $C$  – накопительный конденсатор;  $I$  – тиратрон;  $2$  – импульсный трансформатор;  $I_d$  и  $U_{lamp}$  – сигналы с токового шунта  $R_{sh}$  и делителя напряжения  $R_1 - R_2$  соответственно.

мм, расстояние между кварцевыми барьерами составляло 8–12 мм. В качестве электродов использовались металлическая сетка и полированная алюминиевая фольга. При этом излучение могло как выводиться из эксилампы, так и концентрироваться в ее центре через стенки внутренней кварцевой трубки. Для увеличения мощности и энергии возбуждения, вводимой в рабочую смесь, было увеличено напряжение на электродах эксилампы. Для этого были применены импульсный генератор на основе тиратрона ТГИ-1-270/12 и импульсный трансформатор. Данный генератор формировал импульсы напряжения длительностью 200–500 нс с амплитудой до 60 кВ. Величина емкости  $C$  в цепи первичной обмотки импульсного трансформатора составляла 8–15 нФ, зарядное напряжение  $U_0$  изменялось в пределах 5–20 кВ.

Импульсная мощность и энергия излучения определялись вакуумным фотодиодом ФЭК-22. Измерения проводились по методике, описанной в [11]. Излучатель закрывался непрозрачным экраном с отверстием диаметром  $d$ . За отверстием на расстоянии  $L \gg d$  располагался фотодиод. При этом отверстие в экране можно рассматривать как точечный источник, равномерно излучающий в телесный угол  $2\pi$ . Доля излучения от отверстия, регистрируемая фотокатодом,  $k = \sin^2(\alpha/2)$ , где  $\alpha = \arctan(A/2L)$  и  $A$  – диаметр фотокатода. Полная мощность и энергия спонтанного излучения активной среды

эксилампы рассчитывались с учетом чувствительности фотокатода и площади излучающей поверхности эксилампы.

Для расчета вводимой энергии измерялись ток в цепи вторичной обмотки импульсного трансформатора и напряжение на эксилампе шунтом и делителем напряжения соответственно. Электрические сигналы записывались цифровым осциллографом типа TDS - 224.

### 3. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис.2 приведены характерные осциллограммы напряжения на эксилампе, тока разряда и мощности спонтанного излучения на  $\lambda \sim 222$  нм. После подачи импульса напряжения на эксилампу в течение 50 нс заряжаются емкости барьеров. Пробой разрядного промежутка происходит при напряжении на эксилампе 20 кВ, формируются первые импульсы возбуждения и излучения длительностью 150 нс. В течение этого времени осуществляется дальнейшая зарядка емкости барьеров эксилампы. Затем ток через промежуток прекращается, и импульс излучения заканчивается. Повторный рост тока через промежуток и, следовательно, импульс спонтанного излучения возникают через 200 нс после начала разрядки барьеров через вторичную обмотку импульсного трансформатора.

Отличительной особенностью разряда, который формируется в двухбарьерной эксилампе при высоком напряжении на промежутке, является однородность разряда и заполнение им всего пространства между электродами. Как известно [5], в традиционных коаксиальных эксилампах, работающих с частотами следования импульсов в сотни килогерц, разряд имеет другую форму. В оптимальных условиях возбуждения он состоит из множества конусообразных диффузных микроразрядов, причем каждый микроразряд в свою очередь состоит из двух конусов с соединенными вершинами в центре промежутка и основания микроразрядов заполняют практически всю поверхность кварцевых трубок между электродами. Генерация сдвоенных импульсов излучения обусловлена наличием плоской вершины у импульса напря-

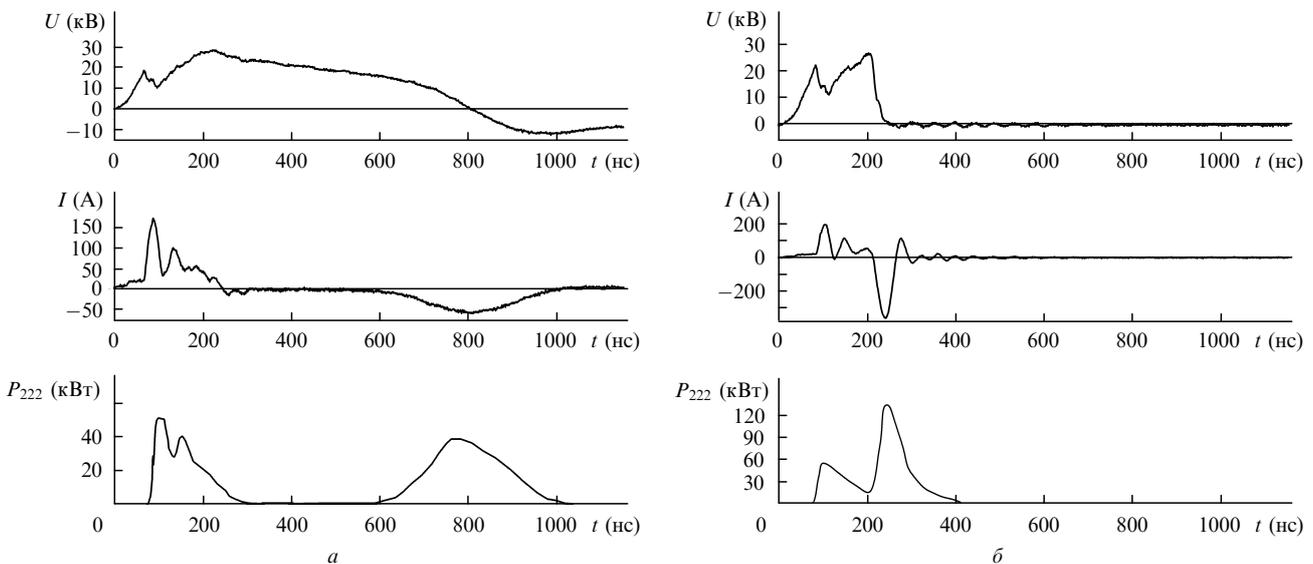


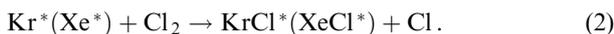
Рис.2. Характерные осциллограммы напряжения на эксилампе и импульсов тока в цепи эксилампы, а также временная зависимость полной мощности спонтанного излучения на  $\lambda = 222$  нм в обычном режиме (а) и при замыкании вторичной обмотки трансформатора разрядником (б); смесь Кг:Cl<sub>2</sub> = 150:1 при давлении 210 Тор,  $C = 14$  нФ,  $U_0 = 8$  кВ.

жения и реализуется как при высоких напряжениях на промежутке эксилампы, так и при традиционных режимах с напряжением в несколько киловольт. Различие проявляется только в изменении времени задержки между началом возбуждения и появлением УФ излучения. При высоких напряжениях на промежутке и, следовательно, токах разряда в сотни ампер задержка уменьшается до нескольких наносекунд.

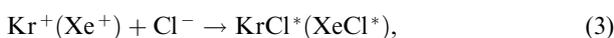
Проведенные эксперименты показали, что генератор возбуждения на основе импульсного трансформатора позволяет достаточно легко менять время задержки между пиками излучения и мощность второго пика. Для импульсного трансформатора максимально возможная амплитуда  $U$  и длительность  $t$  генерируемых импульсов связана с площадью сердечника  $S$  и числом витков  $W$  простым соотношением [12]:

$$Ut = \Delta BSW, \quad (1)$$

где  $\Delta B$  – перепад магнитной индукции в сердечнике трансформатора. Увеличивая  $U$  или  $t$ , можно в определенный момент времени вызвать насыщение сердечника. Это приводит к резкому уменьшению индуктивности в цепи эксилампы, а мощность второго импульса возбуждения резко возрастает за счет увеличения тока разряда. Аналогичного результата можно достичь, уменьшая  $\Delta B$  путем предварительного подмагничивания сердечника постоянным током или замыкая электроды эксилампы при помощи дополнительного разрядника. Характерные для данного режима работы эксилампы осциллограммы показаны на рис.2,б. В этом режиме пики излучения накладываются друг на друга. Мощность второго пика возрастает примерно в 3 раза (до 150 кВт). Интересно, что отношение энергий  $Q_1/Q_2$ , излучаемых в течение первого ( $Q_1$ ) и второго ( $Q_2$ ) импульсов практически не зависит от режима возбуждения. Для условий рис.2 общая энергия спонтанного излучения равна 12.5 мДж, а  $Q_1/Q_2 = 1/1.6$ . КПД относительно вложенной энергии составил 7% при удельной вложенной энергии 0.25 мДж/см<sup>3</sup>. Поскольку вложенная в активную среду энергия в каждом пике примерно одинакова и определяется напряжением, до которого можно зарядить емкость барьера, эффективность преобразования электрической энергии в спонтанное излучение во втором пике возрастает. Это связано с затратами энергии на создание проводимости в разрядном промежутке эксилампы за счет ионизации атомов инертного газа. В смесях с молекулярным хлором при накачке барьерным разрядом формирование эксиплексных молекул в основном происходит в гарпунной реакции метастабилей инертного газа ( $Kr^*$  или  $Xe^*$ ) с молекулами  $Cl_2$  [7]:



Вклад же реакции рекомбинации ионов инертного газа  $Kr^+(Xe^+)$  и хлора  $Cl^-$ ,



в заселение В-состояния эксиплексных молекул мал. Поэтому энергия, затраченная на ионизацию при формировании разряда, теряется. Перед вторым пиком импульса тока прочность промежутка не успевает полностью восстановиться, и потери энергии на ионизацию уменьшаются.

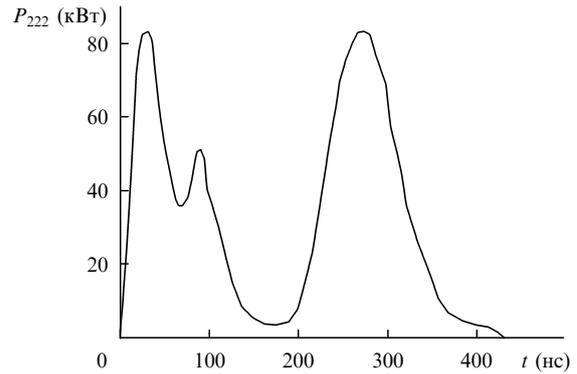


Рис.3. Зависимость полной мощности излучения эксилампы на  $\lambda = 222$  нм от времени в оптимальном режиме возбуждения; смесь  $Kr:Cl_2 = 100:1$  при давлении 180 Тор,  $C = 10$  нФ,  $U_0 = 8$  кВ.

Замена в смеси эксилампы хлора на хлористый водород приводила к падению энергии и мощности спонтанного излучения примерно в пять раз при одинаковых условиях формирования разряда. Это связано с низкой эффективностью гарпунной реакции (2) в смесях с  $HCl$  [7]. По мере увеличения мощности накачки растут степень ионизации рабочей смеси и доля эксиплексных молекул, которые возникают в процессе рекомбинации (3). Однако исследования, проведенные в [10], показали, что эффективность смесей с  $HCl$  при накачке барьерным разрядом остается низкой вплоть до вложенной энергии 8 мДж/см<sup>3</sup>.

Оптимизация конструкции импульсного трансформатора позволила поднять рабочие параметры эксилампы (рис.3). В данном режиме пики излучения имеют одинаковую мощность 80 кВт, а общая излучаемая энергия достигает 15 мДж при КПД  $\sim 10\%$ . При увеличении длины эксилампы до 90 см энергия излучения возросла до 25 мДж при неизменном КПД. Максимальная частота следования импульсов излучения коаксиальных эксиламп в данных экспериментах составила 50 Гц, а максимальная средняя мощность излучения отпаянной эксилампы с активной длиной 90 см превысила 1 Вт.

Отметим, что КПД традиционных барьерных эксиламп при максимальной средней мощности излучения также составляет  $\sim 10\%$ . Однако, как мы уже отмечали, форма разряда в этом случае существенно отличается. При высоких частотах следования импульсов промежуток заполняется большим числом конусообразных микро-разрядов, хаотично перемещающихся на фоне однородного слаботокового разряда [2, 5, 6]. При этом мощность возбуждения распределена по промежутку неравномерно, и максимальная мощность реализуется у вершин конусов. Возникает вопрос о том, как будет меняться эффективность работы эксилампы с увеличением мощности возбуждения при объемном разряде без микро-разрядов и филаментов. Для увеличения мощности возбуждения активная длина эксилампы была уменьшена до 10–12 см, а диаметр кварцевых трубок до 43 и 23 мм. На рис.4 приведены зависимости КПД и энергии излучения  $XeCl$ -эксилампы с активным объемом 100 см<sup>3</sup> от удельного энерговклада. Видно, что эффективность свечения эксиплексных молекул резко падает по мере роста вложенной энергии. Подобные зависимости наблюдались и для  $XeI$ - и  $Cl_2$ -эксиламп. Таким образом, при использовании высоковольтных импульсов оптимальные мощности возбуждения для получения максимальных

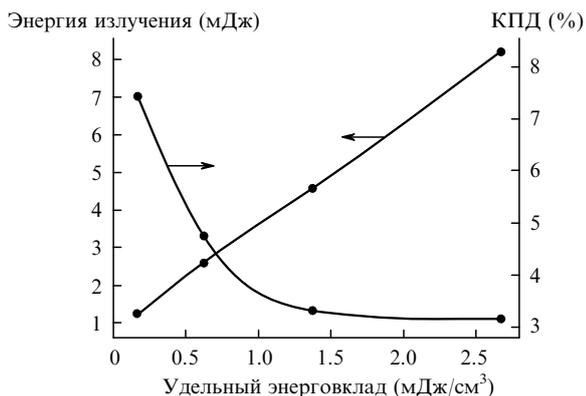


Рис. 4. Зависимости КПД и полной энергии излучения ХеСl-эксилампы с активным объемом 100 см³ от удельного энерговклада.

эффективностей и максимальных энергий существенно различаются. Отметим, что в этих экспериментах максимальная интенсивность излучения на поверхности эксилампы достигала 100 Вт/см².

Для объяснения уменьшения эффективности излучения с ростом мощности возбуждения рассмотрим основные процессы, происходящие в активной среде эксилампы. Как отмечалось выше, в смесях с хлором эксиплексные молекулы формируются в гарпунной реакции (2). Скорость этой реакции

$$\frac{d[\text{XeCl}^*]}{dt} = k_{\text{гар}}[\text{Xe}^*][\text{Cl}_2], \quad (4)$$

где  $k_{\text{гар}}$  – константа гарпунной реакции;  $[\text{Xe}^*]$  и  $[\text{Cl}_2]$  – концентрации частиц, участвующих в реакции. Однако при увеличении мощности возбуждения растет ток разряда и концентрация электронов, что приводит к росту скорости ступенчатой ионизации Хе\*

$$\frac{d[\text{Xe}^*]}{dt} = k_{\text{sti}}[\text{Xe}^+]n_e \quad (5)$$

( $k_{\text{sti}}$  – константа ступенчатой ионизации, а  $n_e$  – концентрация электронов) и скорости тушения молекул ХеСl\* электронами

$$\frac{d[\text{XeCl}^*]}{dt} = k_d[\text{XeCl}^*]n_e \quad (6)$$

( $k_d$  – константа тушения). Поэтому с ростом тока разряда будут расти потери Хе\* в процессе ступенчатой ионизации и потери рабочих молекул ХеСl\* в результате их тушения электронами, а эффективность работы эксилампы будет падать. Подобный механизм снижения эффективности образования эксиплексных молекул в отдельном филаменте барьерного разряда при росте степени ионизации газа был обнаружен в [13] при моделировании работы барьерных эксиламп. Для характерных условий объемного разряда [14–16] скорости реакций (4)–(6) станут равными при  $n_e \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Оценка концентрации электронов в объемном барьерном разряде для дрейфовой скорости электронов в чистом ксеноне  $V_{\text{др}} \sim 10^6 \text{ см/с}$ , приведенной в [17], дает  $n_e > 10^{13} \text{ см}^{-3}$  уже

при удельной энергии накачки  $\sim 0.5 \text{ мДж/см}^3$ , когда наблюдается быстрое уменьшение эффективности эксилампы (рис.4). Отсюда также можно сделать вывод о работе барьерных эксиламп в режимах с высокой частотой следования импульсов. В таких эксилампах рабочие молекулы наиболее эффективно формируются около кварцевых стенок у оснований конусообразных микроузоров, где мощность возбуждения оптимальна для реализации высоких КПД.

#### 4. Заключение

Таким образом, проведены исследования излучения эксиплексных молекул КгСl, ХеСl при повышенных мощностях возбуждения. Созданы импульсные эксилампы с энергией излучения до 25 мДж, пиковой мощностью излучения до 150 кВт и КПД до 10 %. Показано, что импульс излучения состоит из двух пиков. При этом время задержки между пиками и амплитуда каждого пика могут изменяться в широких пределах при сохранении общей энергии излучения. Получена пиковая интенсивность УФ излучения на поверхности эксилампы до  $\sim 100 \text{ Вт/см}^2$ .

Определена оптимальная удельная энергия возбуждения для барьерной эксилампы, которая составляет 0.1–0.2 мДж/см³. Дальнейшее увеличение вкладываемой энергии приводит к быстрому падению эффективности эксилампы.

Работа поддержана МНТЦ (проект № 2706).

1. Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. *Pure Appl. Chem.*, **71**, 1819 (1999).
2. Kogelschatz U., Esromb H., Zhang J.-Y., Boyd I.W. *Appl. Surf. Sci.*, **168**, 29 (2000).
3. Gao S.L., Häßler R., Mader E., Bahners T., Opwis K., Schollmeyer E. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **81**, 681 (2005).
4. Алексеев С.Б., Кувшинов В.А., Лисенко А.А., Ломаев М.И., Орловский В.М., Панарин В.А., Рождественский Е.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. *ИТЭ*, (1), 136 (2006).
5. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. *УФН*, **173**, 201 (2003).
6. Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скакун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. *ИТЭ*, (5), 5 (2006).
7. Boichenko A.M., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Fomin E.A., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **3**, 838 (1993).
8. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36**, 169 (2006).
9. Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **71**, 137 (2001).
10. Визирь В.А., Скакун В.С., Смородов Г.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Червяков В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 519 (1995).
11. Гуревич М.М. *Фотометрия (теория, методы и приборы)* (Л.: Энергоатомиздат, 1983).
12. Вдовин С.С. *Проектирование импульсных трансформаторов* (Л.: Энергоатомиздат, 1991).
13. Boichenko A.M., Skakun V.S., et al. *Laser Phys.*, **10**, 540 (2000).
14. Velazco J.E., Kolts J.H., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **69**, 4357 (1978).
15. Golubovskii Yu.B., Lange H., Maiorov V.A., Porokhova I.A., Sushkov V.P. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 694 (2003).
16. Levin L.A., Moody S.E., Klosterman E.L., Center R.E., Ewing J.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 2282 (1981).
17. Šašić O., Jovanović J., Petrović Z.Lj., de Urquijo J., Castrejón-Pita J.R., Hernández-Ávila J.L., Basurto E. *Phys. Rev. E*, **71**, 04640 (2005).