

04:07

## Одно- и двухбарьерные эксилампы ВУФ диапазона на димерах ксенона

© М.И. Ломаев, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: VET@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 июня 2007 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований источников спонтанного излучения в ВУФ-области спектра на основе одно- и двухбарьерного импульсно-периодического разряда в ксеноне. Приведены характерные осциллограммы импульсов тока и напряжения разряда, вольт-кулоновские фигуры, а также расчетные кривые падения напряжения на газоразрядной плазме, мощности и энергии возбуждения как функции времени. Получены зависимости мощности излучения от давления ксенона, частоты следования импульсов возбуждения и средней мощности возбуждения. Значения средней плотности мощности излучения составили  $\sim 20\text{--}30 \text{ мВт/см}^2$  для однобарьерных и  $\sim 40 \text{ мВт/см}^2$  для двухбарьерных эксиламп.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Tn

### Введение

Источники спонтанного излучения на основе неравновесного излучения эксимерных и эксиплексных молекул — эксилампы, позволяющие получать излучение в УФ- и ВУФ-областях спектра, обладают рядом особенностей, востребованных как в научных исследованиях, так и во многих современных технологиях. Эксимеры (возбужденные димеры) инертных газов излучают в ВУФ-области спектра, а эксиплексы (возбужденные комплексы) молекул галогенидов инертных газов — в УФ-, ВУФ- и видимой областях спектра. Основным отличием эксиламп от имеющихся люминесцентных, а также тепловых источников спонтанного излучения УФ- и ВУФ-диапазонов является спектр излучения — до 80% энергии излучения эксиламп может быть сосредоточено на относительно узком спектральном интервале полушириной от 2 до 20 нм. Изменением состава рабочей смеси и условий возбуждения можно управлять спектральными и амплитудно-временными характеристиками излучения эксиламп. В совокупности с высокой эффективностью наработки рабочих молекул это обеспечивает возможность получения излучения с высокой эффективностью в выбранном узком спектральном участке. При этом удельные мощности излучения превышают значения, характерные для ламп низкого давления на резонансных переходах атомов. Кроме того, при возбуждении многокомпонентных газовых смесей можно получить одновременно излучение с соизмеряемой интенсивностью на двух и более молекулах. Все это стимулировало проведение на протяжении последних 15–20 лет большого числа работ, направленных на исследование, разработку, создание действующих образцов и практическое использование эксиламп как в нашей стране, так и за рубежом [1–10].

Наиболее полно исследованы эксилампы УФ-диапазона, работающие на  $V\text{--}X$ -переходах эксиплексных молекул галогенидов инертных газов:  $\text{XeCl}$  ( $\lambda = 308 \text{ нм}$ ),

$\text{KrCl}$  (222),  $\text{XeI}$  (253),  $\text{XeBr}$  (282) и др. К числу наиболее изученных и востребованных относится также эксилампа на переходах димера ксенона  $\text{Xe}_2^*$  ( $\lambda = 172 \text{ нм}$ ). Это объясняется, во-первых, достаточно большой величиной энергии светового кванта на данной длине волны ( $\sim 7.2 \text{ эВ}$ ), что оказывается необходимым для целого ряда практических применений. Во-вторых, эффективность данных эксиламп достаточно высока и при низких уровнях удельной мощности возбуждения может достигать  $\sim 40\%$  и более [4,5]. Кроме того, освоен промышленный выпуск высококачественного кварца с прозрачностью в данном спектральном диапазоне ( $\lambda = 172 \text{ нм}$ )  $\geq 75\%$ , который используется для изготовления колб отпаянных эксиламп.

Наработка эксимерных/эксиплексных молекул может осуществляться различными способами: пучками заряженных частиц, широкополосным (тепловым) изучением плазмы мощного электрического разряда, разрядом, инициируемым или контролируемым внешним ионизатором, а также самостоятельным разрядом. Наряду с другими типами самостоятельного разряда в эксилампах, как правило, используются барьерный [1–8] и емкостной [7,10,11] разряды. Барьерный разряд, являющийся разновидностью емкостного, наиболее часто используется для возбуждения эксиламп. При этом существуют одно- [4] и двухбарьерный [2] варианты конструкций колб ламп.

Несмотря на большое число теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию и созданию эксиламп на димерах ксенона [1–6,8,9,12–15] в литературе часто отсутствует информация, необходимая при разработке эксиламп для конкретных применений. В частности, отсутствуют данные по оптимизации частоты следования импульсов возбуждения, давления, удельной мощности возбуждения и излучения для однобарьерных эксиламп, а также сравнение их основных параметров с параметрами двухбарьерных эксиламп.

Настоящая работа посвящена исследованию однобарьерных эксилламп на димерах ксенона, которые могут быть использованы в качестве источников ВУФ-излучения в различных применениях, например при создании фотореакторов высокого (до  $\sim 40$  atm) давления [16], а также сопоставлению параметров одно- и двухбарьерных эксилламп на димерах ксенона.

## Экспериментальные установки и методики измерений

Для создания одно- и двухбарьерных эксилламп были использованы колбы традиционной коаксиальной конструкции [2–4], изготовленные из кварцевых трубок с пропусканием на рабочей длине волны ( $\lambda = 172$  nm)  $\sim 70\%$ . Внешний диаметр и толщина стенки трубок, использованных при изготовлении колб однобарьерных эксилламп, а также в качестве внешней трубки колбы двухбарьерной эксилламп, составляли соответственно 22 и 2 mm. Трубка с внешним диаметром 7 mm и толщиной стенки 1 mm была использована в качестве внутренней трубки двухбарьерной эксилламп (лампа 1). Внутренний электрод однобарьерных эксилламп был выполнен в двух вариантах. Во-первых, в виде спирали с внешним диаметром 7 mm и шагом той же величины, установленной коаксиально кварцевой трубке (лампа № 2). Во-вторых, в виде зигзагообразной змейки с шириной, равной внутреннему диаметру кварцевой трубки (лампа 3). Шаг змейки составлял  $\sim 15$  mm. Таким образом, в лампах 1 и 2 значения газоразрядного промежутка  $d$  были равными и составляли  $\sim 5.5$  mm. В лампе 3 величина  $d$  варьировалась от 0 — для участков касания внутренним электродом (змейкой внутренней поверхности трубки), до  $\sim 7$ –8 mm — для участков внутреннего электрода, находящихся в приосевой зоне кварцевой трубки. На внешнюю поверхность всех ламп наматывалась спираль из стальной проволоки диаметром  $\sim 0.1$  mm, выступавшая в качестве заземленного электрода. Прозрачность намотки не менее  $\sim 85\%$ . Двухполярные (лампа 1) и однополярные отрицательной полярности (лампы 2,3) импульсы напряжения прямоугольной формы с длительностью на полувысоте  $\sim 2$   $\mu$ s и частотой повторения 30–90 kHz подавались между заземленным электродом и металлической фольгой, установленной на внутренней поверхности внутренней трубки (лампа 1), внутренним электродом-спиралью (лампа 2) и внутренним электродом-змейкой (лампа 3). Длина рабочей части ламп составляла 37 (лампы 1,3) и 34 см (лампа 2).

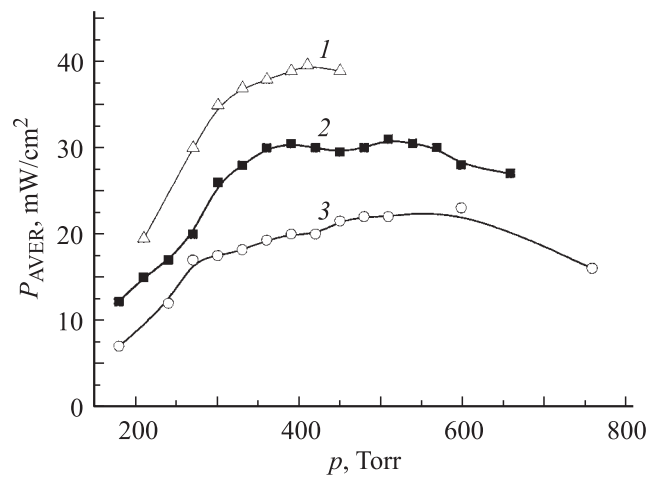
Импульсы напряжения на электродах ламп, а также тока в контуре регистрировались на осциллографе TDS-220. Измерение плотности мощности излучения на внешней поверхности ламп проводилось с использованием фотоприемника компании Hamamatsu, который включал в себя измерительный блок С8026 и фотоприемную головку Н8025-172. Определение мощности возбуждения проводилось двумя независимыми способами. Во-первых, измерением мощности, потребляемой генератором

возбуждения от сети с учетом КПД генератора. Во-вторых, по известной методике [17] с использованием вольт-кулоновских фигур. Расчет падения напряжения и омической составляющей тока на газоразрядном промежутке, мощности и энергии возбуждения как функций времени осуществлялся в соответствии с [18].

## Экспериментальные результаты и обсуждение

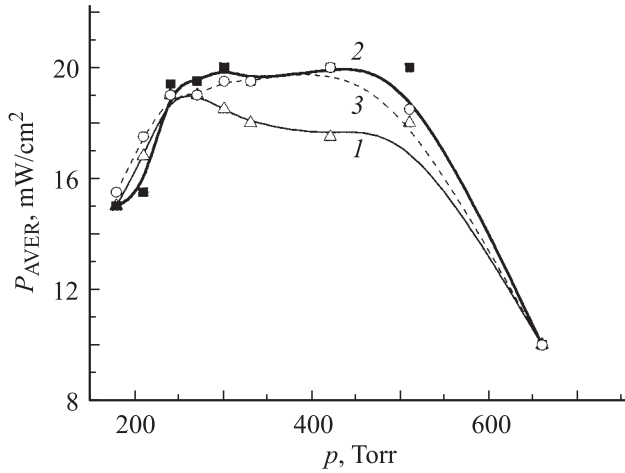
При проведении работы основное внимание было уделено получению зависимостей мощности излучения от давления ксенона  $p$ , частоты следования  $f$  и удельной мощности  $w$  импульсов возбуждения. Величины  $p$ ,  $f$ ,  $w$  изменялись соответственно в диапазонах от 150–760 Torr, 30–90 kHz, 0.20–3 W/cm<sup>3</sup>. Средняя мощность возбуждения  $w$  измерялась при варьировании как  $f$ , так и амплитуды импульсов напряжения. При этом измерения средней плотности мощности излучения  $P_{\text{AVER}}$  проводились в тех режимах, когда разряд зажигался во всем рабочем объеме лампы.

На рис. 1 приведены зависимости  $P_{\text{AVER}}$  от давления ксенона при  $w = 2$  W/cm<sup>3</sup> для ламп 1–3. На всех кривых наблюдается характерный перегиб при  $p \sim 300$ –350 Torr. При  $p < 300$  Torr во всех лампах наблюдается диффузный разряд, а при  $p \sim 300$  Torr в газоразрядной плазме однобарьерных ламп формируются конусообразные диффузные микрокразряды с вершинами на катоде и основаниями, опирающимися на анод — внутреннюю поверхность кварцевой трубки. В случае двухбарьерной лампы диффузные микрокразряды также начинают формироваться при давлении  $\geq 300$  Torr, но эта зависимость менее выражена. Формирование микрокразрядов в газоразрядной плазме при неизменной  $w$  означает появление в газоразрядной плазме пространственных зон с большей (объем, занимаемый микро-

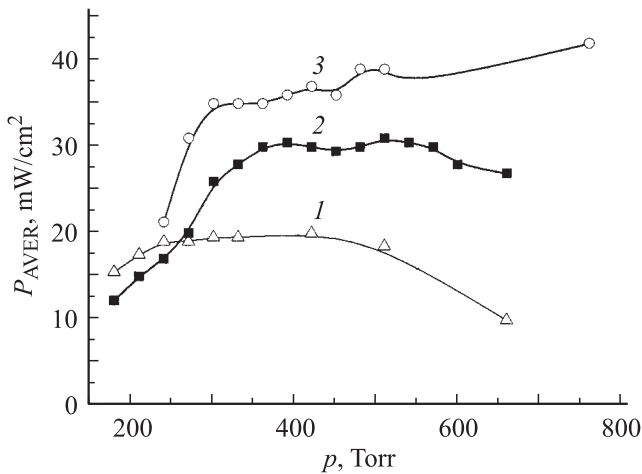


**Рис. 1.** Зависимость плотности мощности излучения  $P_{\text{AVER}}$  от давления ксенона  $p$  при мощности возбуждения  $w = 2$  W/cm<sup>3</sup>: лампа 1,  $f = 120$  (1); лампа 2,  $f = 90$  (2); лампа 3,  $f = 90$  kHz (3).

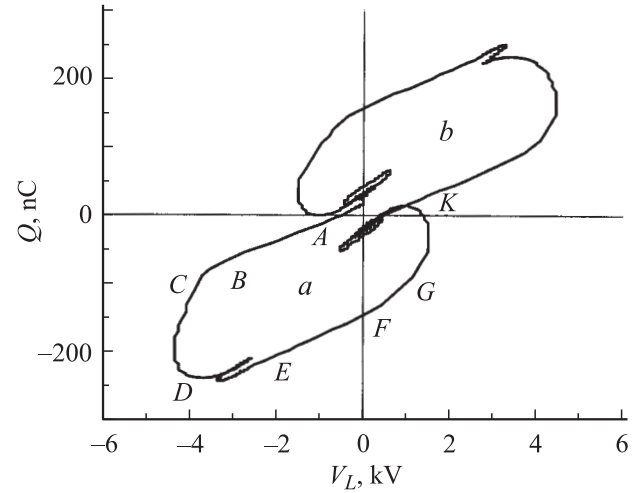
разрядами) и меньшей (оставшаяся часть возбуждаемого объема) удельной мощностью возбуждения. В зонах преимущественного энерговыделения (в областях микрозарядов) из-за увеличения степени ионизации и концентрации электронов эффективность излучения эксимерных молекул будет снижаться [4,5], что, вероятно, является причиной наблюдаемого перегиба кривых на рис. 1 для области давлений  $\sim 300\text{--}350$  Торг. Тем не менее в ряде практических применений требуются источники излучения с повышенной плотностью мощности излучения, что достигается увеличением мощности возбуждения несмотря на уменьшение эффективности работы лампы. В исследованных образцах эксиламп эффективность (полная, с учетом КПД генератора) излучения составляла  $\sim 4\text{--}6\%$  при  $w \sim 1\text{--}2$   $\text{W}/\text{cm}^2$  и плотности мощности излучения до  $\sim 40, 20\text{--}30$   $\text{mW}/\text{cm}^2$  соответственно для двухбарьерной и однобарьерных эксиламп.



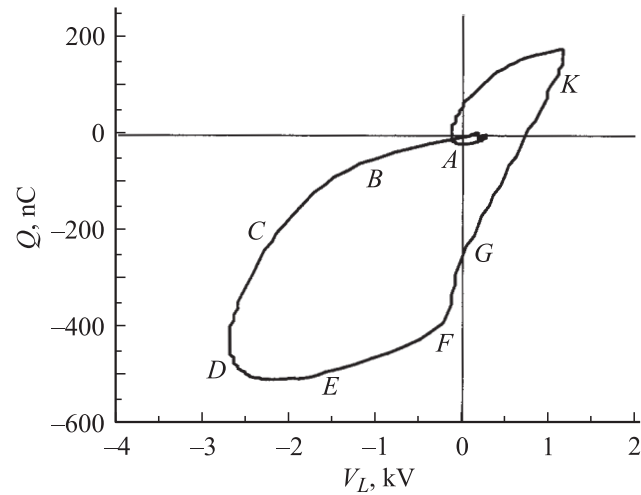
**Рис. 2.** Зависимость плотности мощности излучения  $P_{\text{AVER}}$  от давления ксенона  $p$  при мощности возбуждения  $w = 1.1$   $\text{W}/\text{cm}^3$ : лампа 2,  $f = 30$  (1), 60 (2), 90 kHz (3).



**Рис. 3.** Зависимость плотности мощности излучения  $P_{\text{AVER}}$  от  $p$  и  $w$ ; лампа 2,  $w \sim 1.1$  (1),  $\sim 2$  (2),  $\sim 2.6$   $\text{W}/\text{cm}^3$  (3).



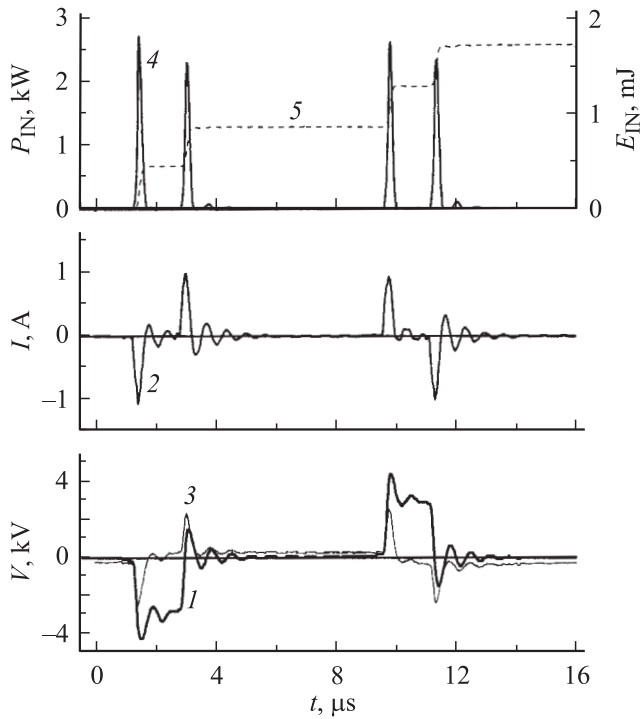
**Рис. 4.** Вольт-кулоновская фигура в случае лампы 1,  $f = 60$  kHz,  $w \sim 1.4$   $\text{W}/\text{cm}^3$ . Зона  $a$  соответствует отрицательному,  $b$  — положительному импульсам напряжения.



**Рис. 5.** Вольт-кулоновская фигура в случае лампы 3,  $f = 60$  kHz,  $w \sim 1$   $\text{W}/\text{cm}^3$ .

Одним из параметров, влияющих на характер протекания разряда и, в конечном счете, эффективность излучения, является частота повторения импульсов возбуждения  $f$ . На рис. 2, 3 приведены зависимости  $P_{\text{AVER}}$  соответственно от  $f$  и  $w$  при изменении давления ксенона в диапазоне от 200 до 660 Торг для лампы 2. Из рис. 2 видно, что мощности излучения, соответствующие  $f = 60, 90$  kHz, оказались несколько большими относительно полученного для  $f = 30$  kHz. Из приводимых на рис. 3 данных следует, что в исследованном диапазоне  $w \sim 1\text{--}3$   $\text{W}/\text{cm}^3$  эффективность излучения практически неизменна.

Известно [17,19], что вольт-кулоновские фигуры можно использовать не только для определения энергии, вводимой в плазму разряда в течение одного периода импульсов возбуждения, но и для расчета электрической емкости лампы для интервалов времени, соответст-



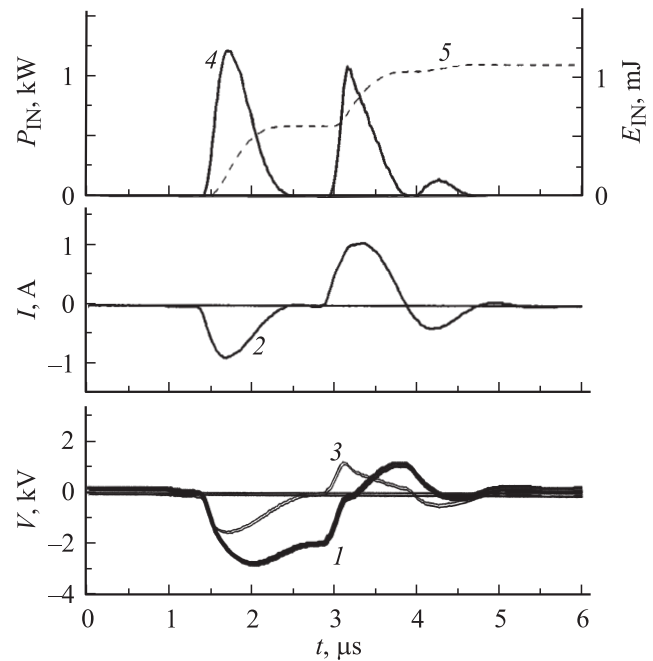
**Рис. 6.** Осциллограммы импульсов напряжения на электродах лампы (1), тока в контуре (2), расчетные кривые падения напряжения на газоразрядном промежутке (3), мощности (4) и энергии (5) возбуждения: лампа 1,  $f = 60 \text{ kHz}$ ,  $w \sim 1 \text{ W/cm}^3$ .

ющих различным фазам разряда. Кроме того, сравнив величины емкостей, рассчитанные как с использованием вольт-кулоновских фигур, построенных на основе экспериментальных данных, так и исходя из геометрических размеров используемой колбы лампы, можно получить дополнительную информацию о проводимости газоразрядного промежутка в рассматриваемый интервал времени. На рис. 4, 5 приведены типичные вольт-кулоновские фигуры, а на рис. 6, 7 — осциллограммы импульсов тока в контуре, напряжения на электродах, а также расчетные кривые падения напряжения на газоразрядном промежутке, мощности и энергии возбуждения для двухбарьерного (лампа 1) и однобарьерного разряда (лампа 3).

Зоны  $a$  и  $b$  на рис. 4 относятся к импульсам напряжения соответственно отрицательной и положительной полярности. Участки  $AB$  и  $EF$  (рис. 4, 5) соответствуют переднему и заднему фронтам импульса напряжения, а участки  $CD$  и  $GK$  — активным фазам разряда, в течение которых происходит электрический пробой газа и соответственно энерговод в плазму разряда. Из приведенных на рис. 4, 6 данных можно заключить в целом об идентичности обеих полярностей. Одинаков энергоклад (кривая 5 на рис. 6), а также форма вольт-кулоновской фигуры для зон  $a$  и  $b$  на рис. 4. Тем не менее наблюдаются также и некоторые различия. Так, электрический заряд  $Q$ , переносимый в течение импульса напряжения отрицательной полярности, оказывается нескомпенсированным, что означает наличие остаточ-

ного заряда на поверхностях обеих кварцевых трубках и соответственно остаточного напряжения на емкости барьеров и разрядном промежутке между импульсами отрицательной и положительной полярности. В течение оставшейся части периода  $T$  (зона  $b$ , рис. 4) значение  $Q$  становится равным исходному  $Q(t+T) = Q(t)$ .

Одним из преимуществ однобарьерной конструкции относительно двухбарьерной является уменьшение напряжения генераторов, используемых для возбуждения лампы. Анализ полученных в эксперименте данных для лампы 2, а также сопоставление кривых  $I, 3$  на рис. 6, 7 для лампы 1 и 3 показывает, что в случае однобарьерных ламп максимумы как подаваемого, так и напряжения пробоя оказываются более чем в 1.5 раза меньшими при сопоставимых величинах давления газа и газоразрядного промежутка. Кроме того, в случае однобарьерных ламп оказывается возможным зажигание диффузного разряда вдоль всей рабочей длины лампы при уменьшении мощности возбуждения, что позволяет увеличить эффективность излучения. В то же время при снижении мощности возбуждения в двухбарьерной лампе количество конусообразных микрозарядов уменьшается, и разряд формируется лишь в части рабочего объема. Соответственно удельная мощность возбуждения уменьшается незначительно. При этом известно [4,5], что данный параметр в значительной степени определяет эффективность излучения лампы. Тем не менее в отличие от однобарьерных в двухбарьерных лампах при увеличении мощности возбуждения  $w \geq 3 \text{ W/cm}^3$  характер разряда не меняется, что позволяет получать  $P_{\text{AVER}} \geq 100 \text{ mW/cm}^2$  [20].



**Рис. 7.** Осциллограммы импульсов напряжения на электродах лампы (1), тока в контуре (2), расчетные кривые падения напряжения на газоразрядном промежутке (3), мощности (4) и энергии (5) возбуждения: лампа 3,  $f = 60 \text{ kHz}$ ,  $w \sim 1 \text{ W/cm}^3$ .

## Заключение

В работе приведены результаты экспериментальных исследований излучательных и разрядных характеристик ксеноновых эксиламп одно- и двухбарьерной конструкции. Плотности мощности излучения димеров ксенона ( $\lambda = 172 \text{ nm}$ ) составили  $\sim 20\text{--}30$  и  $\sim 40 \text{ mW/cm}^2$  соответственно для одно- и двухбарьерных эксиламп при удельной мощности возбуждения  $\sim 1\text{--}2 \text{ W/cm}^3$  и полные эффективности  $\sim 4\text{--}6\%$ . Преимуществом однобарьерной конструкции является увеличение эффективности излучения при понижении мощности возбуждения, а также возможность использования ламп данной конструкции при повышенных (до 40 atm) внешних давлениях. Кроме того, для возбуждения однобарьерных ламп можно использовать генераторы с меньшими выходными напряжениями. В то же время лампы двухбарьерной конструкции позволяют, во-первых, исключить контакт рабочего газа с металлом электрода, что увеличивает ресурс работы. Во-вторых, при увеличении мощности возбуждения характер разряда не изменяется и плотность мощности излучения достигает  $100 \text{ mW/cm}^2$  и более.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (гранты № 2706, 3583) и РФФИ (грант № 05-08-33621-а).

## Список литературы

- [1] Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В. // ЖПС. 1984. Т. XLI. Вып. 4. С. 691–695.
- [2] Geller B. and Kogelschatz U. // Appl. Phys. 1991. Vol. 52. P. 14–21.
- [3] Zhang Jun-Ying and Boyd Ian W. // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 80 (2). P. 633–638.
- [4] Vollkommer F., Hitzschke L. // The 8<sup>th</sup> Int. Symp. on the Sci. and Techn. of LIGHT SOURCES LS-8. Greifswald, Germany, 1998. P. 51–60.
- [5] Mildren R.P., Carman R.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. L1–L6.
- [6] Kogelschatz U. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. Vol. 23. N 1. P. 1–45.
- [7] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [8] Kogelschatz U. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5483. P. 272–286.
- [9] Bogdanov E.A., Kudryavtsev A.A., Arslanov R.R., and Kolobov V.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Vol 37. P. 2987–2995.
- [10] Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скакун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. // ПТЭ. 2006. № 5. С. 5–26.
- [11] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 25. Вып. 21. С. 27–32.
- [12] Oda A., Sakai Y., Akashi H., and Sugawara H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. P. 2726–2736.
- [13] Carman R.J. and Mildren R.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol 36. P. 19–33.

- [14] Liu S. and Neiger M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 1565–1572.
- [15] Beleznai Sz., Mihajlik G., Agod A., Maros I., Juhasz R., Nemeth Zs., Jakab L., and Richter P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. Vol. 39. P. 3777–3787.
- [16] 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. // ПТЭ. 2006. № 1. С. 142–144.
- [17] Manley T.C. // Trans. Electrochem. Soc. 1943. Vol. 84. P. 83–96.
- [18] Ломаев М.И. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1091–1095.
- [19] Falkenstein Z., Coogan J.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. Vol. 30. P. 817–825.
- [20] Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 68–73.