

ЭКСИЛАМПЫ НА ДИМЕРАХ КСЕНОНА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

© 2012 г. М. И. Ломаев, доктор физ.-мат. наук; В. С. Скакун, канд. физ.-мат. наук;
В. Ф. Тарасенко, доктор физ.-мат. наук; Д. В. Шитц, канд. физ.-мат. наук

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Представлены экспериментальные исследования эксиламп на димерах ксенона, возбуждаемых барьерным разрядом. Исследованы их характеристики в режиме естественного и принудительного охлаждения. Установлено, что ограничение плотности мощности излучения при высоких мощностях возбуждения связано с эффективностью охлаждения излучателя эксилампы. Показано, что плотность мощности излучения отпаянных эксиламп на димерах ксенона может достигать 100 мВт/см² в квазистационарном режиме. Приведены схема источника возбуждения эксилампы, конструкции эксиламп, а также методика расчета энергии и мощности возбуждения эксиламп барьерного разряда.

Ключевые слова: эксилампа, барьерный разряд, вакуумное ультрафиолетовое излучение, димер ксенона.

Коды OCIS: 230.6080; 260.7210

Поступила в редакцию 14.03.2012

Введение

Эксилампы – источники спонтанного излучения, основанные на неравновесном излучении эксимерных R₂* или эксиплексных RX* молекул (R – атом инертного газа, X – атом галогена). Возбуждение люминесценции молекул этого типа может осуществляться различными способами. Наибольшее практическое применение получили эксилампы с возбуждением барьерным разрядом (БР). Первые работы по созданию эксиламп БР были выполнены в Государственном Оптическом институте им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург [1, 2]. Эксилампа состояла из отпаянного излучателя с окном для вывода излучения и импульсного источника питания. Быстрое развитие этого направления определили разработки и исследования компании ASEA Brown Boveri, Швейцария [3–6], в которой была создана эксилампа с излучателем из двух коаксиально расположенных кварцевых трубок разного диаметра. Данная конструкция наиболее часто используется при создании эксиламп вакуумного ультрафиолетового и ультрафиолетового диапазонов.

Из-за большой научной и практической значимости в литературе широко представлены результаты теоретического и эксперименталь-

ного исследования эксиламп на димерах ксенона Xe₂*, λ = 172 нм. Согласно результатам ряда работ эффективность излучения димеров ксенона может достигать ≈ 60% [7–9]. Основным условием реализации столь высокой эффективности является, в соответствии с [7], минимизация энергетических потерь, например, на ионизацию газа. Это достигается при формировании диффузного разряда и относительно низкой удельной мощности возбуждения, соответственно, при низкой удельной мощности излучения.

Одним из факторов, ограничивающих удельные энергетические параметры, является нагрев газа, вызывающий снижение мощности и эффективности излучения. Влияние нагрева газа рассматривалось в работах [10, 11]. Было установлено, что скорость образования димеров ксенона обратно пропорциональна температуре газа. Данный результат совпадает с наблюдаемым в эксперименте из-за роста температуры снижением мощности и эффективности излучения. Цель настоящей работы – исследование отпаянных эксиламп барьерного разряда на димерах ксенона с различными режимами охлаждения, а также представление методики расчета энергии и мощности энерговклада в рабочий газ.

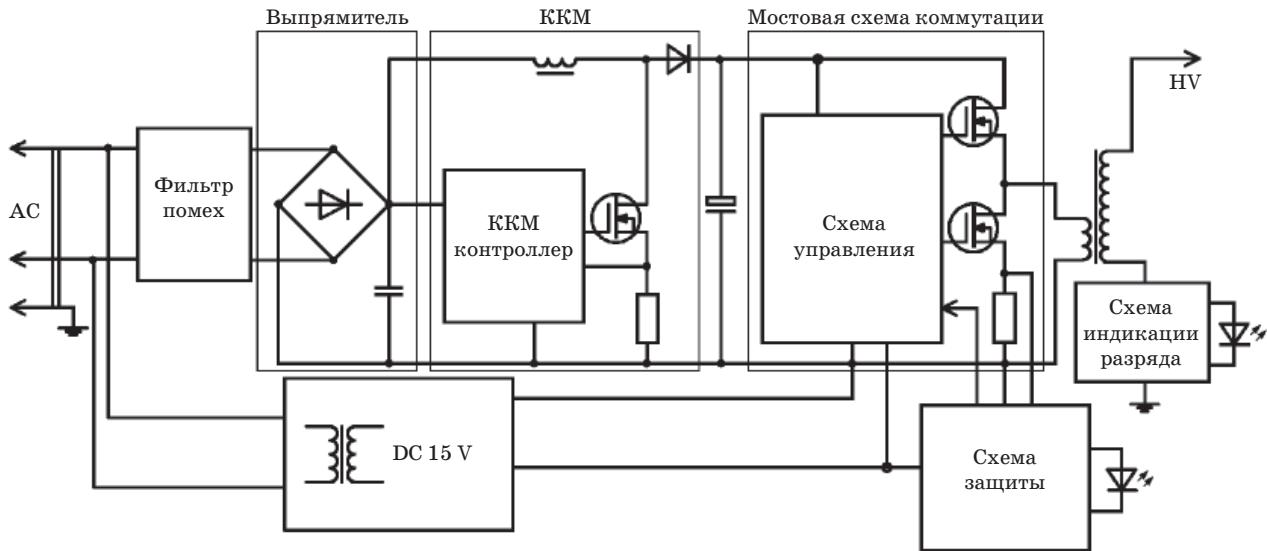


Рис. 1. Блок-схема генератора высоковольтных импульсов.

Экспериментальная аппаратура и образцы эксиламп

Эксилампы на димерах ксенона состоят из излучателя и источника питания (импульсного генератора), которые выполнены в виде двух раздельных блоков. В настоящей работе для возбуждения эксиламп БР использовались генераторы высоковольтных импульсов. Принцип действия генераторов основан на преобразовании напряжения от сети в высоковольтные импульсы напряжения, следующие с частотой десятки–сотни кГц. Блок-схема генератора приведена на рис. 1. В его состав входят: фильтр помех, выпрямитель, корректор коэффициента мощности (ККМ), мостовая схема управления и коммутации, схема защиты, импульсный трансформатор, схема индикации горения разряда. Переменное сетевое напряжение подается на фильтр помех. От выпрямителя постоянное напряжение подается на ККМ, который стабилизирует напряжение на мостовой схеме. Схема управления генерирует сигналы на затворах транзисторов мостовой схемы таким образом, что на первичной обмотке импульсного трансформатора формируются импульсы напряжения длительностью 2 мкс. На вторичной обмотке импульсного трансформатора, собранного на ферритовом сердечнике, возникают импульсы высокого напряжения той же длительности с амплитудой 6 кВ. Схема защиты отключает схему управления при возникновении перегрузки источника. В ряде практических приложений функциони-

рующая лампа находилась вне зоны визуального контроля, что вызвало необходимость установки во вторичную цепь импульсного трансформатора схему индикации для фиксации факта зажигания разряда в излучателе. Частота повторения импульсов напряжения и выходная мощность генератора могли варьироваться в пределах от 1 до 200 кГц и от десятков ватт до 1 кВт, соответственно.

Излучатели, использованные в работе, имели коаксиальную конструкцию, рис. 2. В зависимости от условий эксплуатации и необходимого уровня мощности излучения их изготавливали из кварцевых трубок разного диаметра и применяли различные способы охлаждения колбы излучателя. Для получения повышенной удельной мощности возбуждения и излучения использовали колбы, изготовленные из кварцевых трубок с внешним диаметром

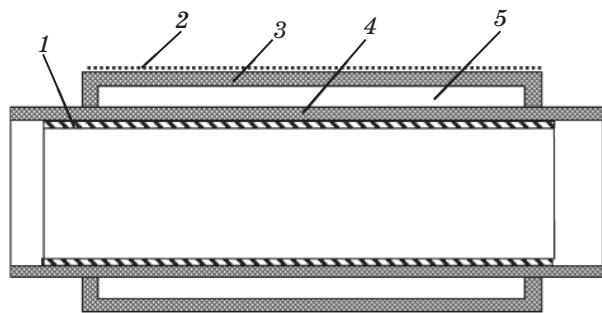


Рис. 2. Конструкция излучателя. 1, 2 – электроды. 3, 4 – кварцевые трубы, 5 – газоразрядный объем.

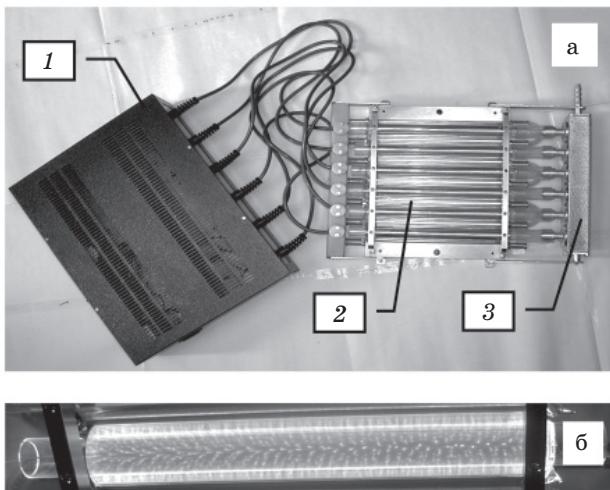


Рис. 3. Фотографии эксимеры (а) и отдельно излучателя в рабочем режиме (б). 1 – генератор, 2 – излучатели, 3 – корпус для прокачки охлаждающего газа.

37 и 23 мм, соответственно для внешней и внутренней трубок. При этом комбинированное водо-воздушное охлаждение колб излучателя [12, 13] обеспечивало возможность возбуждения рабочей среды с удельной мощностью более 1 Вт/см³ при отсутствии перегрева и приемлемом уровне эффективности источника излучения. На рис. 3 приведен внешний вид разработанной лампы. Основным достоинством данной конструкции по отношению к аналогам [14] является существенное упрощение конструкции излучателя.

В случае естественного конвективного охлаждения воздухом излучателя с колбой той же конструкции и размеров допустимая удельная мощность возбуждения без перегрева рабочей среды не превышала 0,8 Вт/см³. Кроме того, были изготовлены и протестированы излучатели коаксиальной конструкции уменьшенных габаритов с внешними диаметрами внешней и внутренней трубок 23 и 10 мм (рис. 4). При длине излучающей части лампы 12 см рабочий объем лампы составил 30 см³, мощность возбуждения 30 Вт.

Методика расчета энергии и мощности возбуждения

Для определения эффективности излучения эксимеры и режимов ее работы необходимо знать мощность и энергию возбуждения. С этой точки зрения особенностью БР является

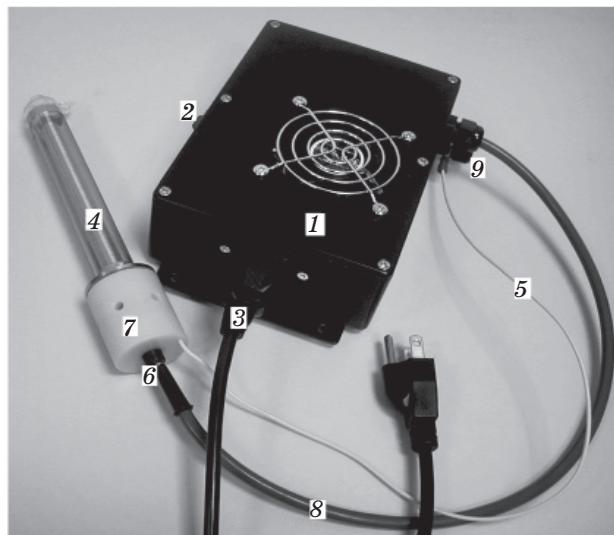


Рис. 4. Фотография малогабаритной эксимеры. 1 – источник питания, 2 – тумблер включения – выключения, 3 – сетевой кабель, 4 – излучатель, 5 – заземленный токопровод, 6 – высоковольтный ввод, 7 – изолятор, 8 – высоковольтный провод, 9 – клемма заземления.

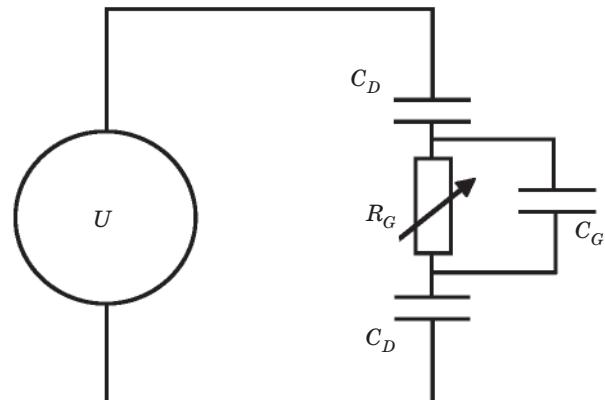


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема эксимеры барьера разряда. U – генератор, C_D – емкость одного диэлектрического барьера, C_G – емкость газового зазора, R_G – активное сопротивление плазмы разряда.

ся емкостно-резистивный характер нагрузки, состоящей из диэлектрического барьера (барьеров) и нелинейного емкостно-резистивного газоразрядного промежутка. Для расчета мощности и энергии возбуждения эксимеры барьера разряда использовалась методика расчета, разработанная в [15]. Она основана на решении уравнений Кирхгофа для эквивалентной электрической цепи эксимеры (рис. 5), возбуждаемой БР. В кратком изложении методика сводится к следующему. Падение напря-

жения на разрядном промежутке $U_G(t)$ предполагалось зависящим от времени в течение активной фазы разряда и изменяющимся от напряжения пробоя до напряжения погасания. До пробоя газового промежутка ячейка подобна емкостному делителю напряжения, состоящему из последовательно включенных емкостей диэлектрического барьера(ов) C_D и газового промежутка C_G . Поскольку в большинстве случаев $C_D \gg C_G$, основная доля напряжения приложена к емкости C_G и газовому промежутку. После пробоя емкость C_G шунтируется сопротивлением разрядного промежутка, при этом имеет место ввод энергии в плазму как в активную нагрузку. Для расчета вводимой в плазму мощности $P(t)$ достаточно знать падение напряжения $U_G(t)$ и величину активной составляющей тока в разрядном промежутке $I_A(t)$

$$P(t) = U_G(t)I_A(t). \quad (1)$$

Величина $U_G(t)$ может быть найдена по второму правилу Кирхгофа с использованием экспериментально измеряемых величин временного хода напряжения на разрядной ячейке $U(t)$, а также падения напряжения на емкости диэлектрика $U_D(t)$

$$U_G(t) = U(t) - U_D(t). \quad (2)$$

Напряжение $U_D(t)$ можно вычислить, зная величины перемещенного заряда $Q(t)$ и емкость C_D

$$U_D(t) = Q(t)/C_D. \quad (3)$$

Перемещенный в цепи заряд можно определить, во-первых, интегрированием тока с учетом начальных условий $Q(t=0) = Q_0$

$$Q(t) = \int_0^t I(t')dt' + Q_0. \quad (4)$$

Во-вторых, $Q(t)$ можно определить, измеряя падение напряжения $U_{ADD}(t)$ на дополнительной емкости C_{ADD} , устанавливаемой в цепь последовательно с разрядной ячейкой

$$Q(t) = U_{ADD}(t)/C_{ADD}. \quad (5)$$

Величина C_D определяется исходя из геометрических размеров ячейки и диэлектрической проницаемости применяемого диэлектрика или по наклону соответствующих участков вольт-кулоновской характеристики разряда [16]. Используя (2), (3), записываем выражение для $U_G(t)$

$$U_G(t) = U(t) - Q(t)/C_D. \quad (6)$$

Величина активной составляющей тока $I_A(t)$ может быть определена с использованием экспериментально регистрируемого полного тока $I(t)$

$$I_A(t) = I(t) \frac{C_G + C_D}{C_D} - C_G \frac{\partial U}{\partial t} = I(t) - C_G \frac{\partial U_G}{\partial t}. \quad (7)$$

Мощность возбуждения $P(t)$ следует из (1), (2) и (7) как

$$P(t) = (U(t) - Q(t)/C_D)I_A(t). \quad (8)$$

Величина введенной в плазму энергии как функция времени $E(t)$ определится интегрированием (8)

$$E(t) = \int_0^t P(t')dt'. \quad (9)$$

Соотношения (6)–(9) использовали в настоящей работе для расчета напряжения на разрядном промежутке, активной составляющей тока разряда, мощности возбуждения и введенной в плазму энергии как функций времени при использовании данных, полученных в эксперименте при исследовании эксиламп БР.

Для оценки корректности определения параметров возбуждения по вышеописанному способу был проведен эксперимент с использованием эксиламп традиционной коаксиальной конструкции с двумя диэлектрическими барьерами. В ходе проверки средняя мощность возбуждения определялась тремя способами: калориметрическим, по вольт-кулоновской характеристике разряда и по соотношениям (6)–(9). Значения величин средней мощности возбуждения, определенные данными способами, отличались не более, чем на 5%, что можно считать экспериментальным доказательством корректности расчета временного хода параметров возбуждения в барьерном разряде. Это подтверждается также тем, что наблюдаемая в эксперименте временная модуляция мощности излучения, определяемая, прежде всего, временным ходом процесса возбуждения среды, совпадает с формой кривой мощности возбуждения, рассчитанной согласно соотношению (8).

Характеристики излучения эксиламп на димерах ксенона, возбуждаемых БР

Как уже отмечалось выше, в случае повышенной мощности возбуждения для охлажде-

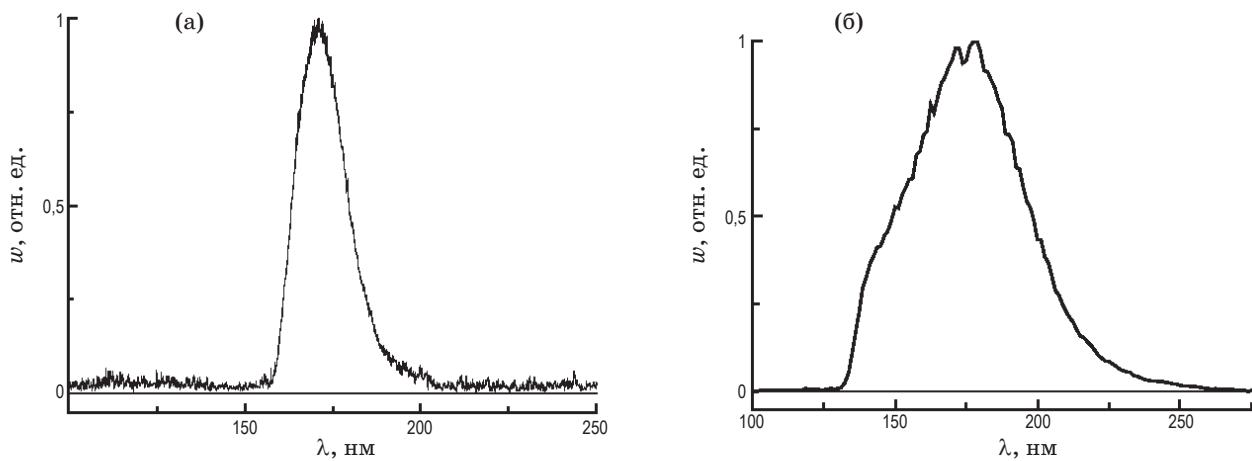


Рис. 6. Спектр излучения эксимерлампы БР при возбуждении ксенона (а) и смеси ксенона (60 Торр) и криптона (150 Торр) (б).

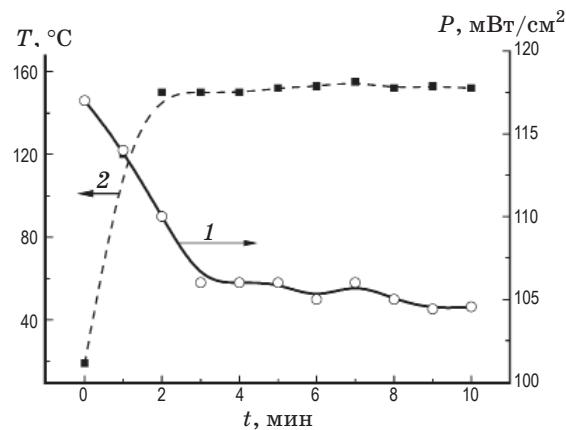


Рис. 7. Зависимость средней плотности мощности излучения P димеров ксенона (1) и температуры колбы излучателя T (2) от времени работы эксимерлампы t при интенсивном газовом охлаждении внутренней трубы излучателя.

ния колбы использовалась комбинированная система охлаждения, включавшая принудительное воздушное охлаждение внутренней трубы колбы, а также охлаждение внешней трубы колбы металлической пластиной – держателем, охлаждаемой водой (рис. 3). На пластине было установлено 6 излучателей. Размер излучающей поверхности составил 20×20 см. Особенностью конструкции был также внешний электрод, выполненный из алюминиево-магниевой фольги в форме полуцилиндра, помещавшийся вдоль внешней трубы и являвшийся одновременно отражателем. Оставшаяся часть боковой поверхности трубы покрывалась металлической сеткой с прозрачностью

более 90%. Возбуждение ксенона, оптимальное давление которого составило 420 Торр, осуществлялось от генератора двухполарных импульсов с амплитудой до 6 кВ и длительностью 2 мкс. Частота следования импульсов варьировалась в диапазоне от 15 до 100 кГц. Мощность возбуждения зависела от амплитуды и частоты следования импульсов напряжения и не превышала 600 Вт на каждый из шести излучателей.

Спектр излучения эксимерлампы, полученный с помощью вакуумного монохроматора VM-502, приведен на рис. 6а. В данных условиях доминирует широкая полоса излучения в диапазоне 155–185 нм с максимумом на длине волны 172 нм. Спектральная полуширина полосы излучения увеличивается при уменьшении давления газа и остается неизменной при варьировании мощности возбуждения. Наибольшая средняя мощность излучения при кратковременных включениях эксимерлампы в режиме без принудительного охлаждения достигала 50 Вт, а плотность мощности излучения 140 mWt/cm^2 . Однако при этом наблюдалось быстрое повышение температуры колб излучателей и падение мощности излучения, что указывало на невозможность функционирования эксимерлампы без принудительного охлаждения. Охлаждение внутренней трубы потоком воздуха позволило обеспечить квазистационарный температурный режим работы эксимерлампы даже при отсутствии принудительного охлаждения пластины-держателя излучателя потоком воды. На рис. 7 приведены зависимости температуры колбы и средней мощности излучения на поверхности излучателей

эксилампы при прокачке воздуха с расходом 300 литров/мин через внутреннюю полость колб от времени работы после включения эксилампы. Из рисунка видно, что через 10 минут после включения реализуется квазистационарный режим, при котором средняя мощность излучения составляет около $100 \text{ мВт}/\text{см}^2$. При этом средняя мощность, излучаемая с поверхности шести излучателей в телесный угол 2π , составила 40 Вт.

При исследовании эксиламп коаксиальной конструкции без принудительного охлаждения внутренней кварцевой трубки (рис. 4) было установлено, что при допустимом уровне мощности возбуждения до $1 \text{ Вт}/\text{см}^3$ удельная мощность излучения составила $60 \text{ мВт}/\text{см}^2$ в случае колб с внешними диаметрами внешней и внутренней трубок, соответственно, 37 и 23 мм. При уменьшении диаметров трубок до, соответственно, 23 и 10 мм, плотность мощности излучения не превышала $15 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Основной причиной снижения плотности мощности излучения явилось низкое пропускание в спектральной области 172 нм кварца внешней трубы. Было установлено, что при уменьшении диаметров кварцевых трубок излучателя эффективность эксилампы уменьшается.

С целью увеличения мощности излучения эксилампы в коротковолновой области были использованы смеси ксенона и криптона. Возбуждение смеси осуществлялось БР в эксилампе коаксиальной конструкции. Полное давление смеси составляло 210 Торр, а парциальные давления ксенона и криптона изменялись от 0 до 210 Торр. На рис. 6б представлен спектр излучения эксилампы при возбуждении смеси, содержащей 60 Торр Xe и 150 Торр Kr. Как видно из рисунка, имеется добавка мощности в коротковолновой части спектра излучения,

определенная излучением второго континуума криптона, молекул KrXe* и пропусканием внешней трубы излучателя. При улучшении оптической прозрачности кварца в коротковолновой области долю излучения с длиной волны короче 160 нм можно будет увеличить.

Заключение

На основе проведенных исследований создана мощная эксилампа с возбуждением барьерным разрядом на димерах ксенона ($\lambda \sim 172 \text{ нм}$) с площадью излучающей поверхности 400 см^2 . В режиме принудительного охлаждения плотность средней мощности излучения с поверхности кварцевой трубы излучателя в квазистационарном режиме составила $100 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Полная мощность в ВУФ области спектра с поверхности шести включенных параллельно излучателей в этом режиме составила 40 Вт. При кратковременном включении эксилампы мощность излучения достигала 50 Вт. Показано, что при увеличении мощности возбуждения основным фактором, уменьшающим мощность эксилампы, является нагрев рабочего газа (ксенона) и колбы излучателя. В режиме внешнего воздушного охлаждения излучателя удельная мощность излучения коаксиальной барьерной лампы в стационарном режиме достигала $60 \text{ мВт}/\text{см}^2$. Получено увеличение мощности излучения эксилампы в коротковолновой области при возбуждении смеси ксенона с криптоном. Разработана методика расчета мощности и энергии возбуждения рабочих сред эксиламп барьерного разряда.

Работа выполнена при поддержке компаний SEN ENGINEERING CO., LTD (контракт JP-8/05), РФФИ (проект № 05-08033621-а) и МНТЦ (проект № 2706).

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Подмошенский И.В., Яковлева А.В. Лампа для облучения в вакуумной ультрафиолетовой области спектра // Бюл. изобр. 1982. № 41. С. 179.
2. Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В. ВУФ-лампы на барьерном разряде в инертных газах // Журнал прикладной спектроскопии. 1984. Т. 41. В. 4. С. 681–695.
3. Eliasson B., Kogelschatz U. UV Excimer Radiation from Dielectric-barrier Discharges // Appl. Phys. B. 1988. V. B46. P. 299–303.
4. Gellert B., Kogelschatz U. Generation of Excimer Emission in Dielectric Barrier Discharges // Appl. Phys. B. 1991. V. 52. P. 14–21.

5. *Esrom H., Kogelschatz U.* Modification of surfaces with new excimer UV Sources // Thin Solid Films. 1992. V. 218. P. 231–246.
 6. *Kogelschatz U.* Excimer lamps: history, discharge physics and industrial applications // Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 272–286.
 7. *Vollkommer F., Hitzschke L.* Dielectric Barrier Discharge // Proc. Of the 8th Internatinal Symposium on the Science and Technology of LIGHT SOURCIES LS-8. Greifswald. Germany, 30 Aug.–3 Sept. 1998. P. 51–60.
 8. *Carman R.J., Mildren R.P.* Computer modeling of a short-pulse excited dielectric barrier discharge xenon excimer lamp ($\lambda \sim 172$ nm) // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 19–33.
 9. *Beleznai Sz., Mihajlik G., Agod A., Maros I., Juhasz R., Nemeth Zs., Jakab L., Richter P.* High-efficiency dielectric barrier Xe discharge lamp: theoretical and experimental investigations // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 3777–3787.
 10. *Akashi H., Oda A., Sakai Y.* Effect of gas heating on excimer distribution in DBD Xe excimer lamp // Proc. of the 28th ICPIG, July 15–20, 2007, Prague, Czech Republic. P. 851–854.
 11. *Marchal F., Lauro R., Ledru G., Jabbour G., Sewraj N.* Formation of xenon excimer between 200 and 300 K following selective excitation of the Xe (6s) metastable state // Proc. of the 28th ICPIG, July 15–20, 2007, Prague, Czech Republic. P. 100–103.
 12. Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитиц Д.В. Мощная эксилампа на димерах ксенона // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 68–73.
 13. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шитиц Д.В., Скакун В.С. Газоразрядный источник излучения // Патент на изобретение № 2310947. Опубликовано: 20.11.2007. БИ № 32.
 14. *Arnold E., Dreiskemper R., Reber S.* High-Power Excimer Sources // Proceedings of the 8th Int. Symp. on Science and Technology of Light Sources (LS-8) (Greifswald, Germany) II12., 90-98. 1998.
 15. Ломаев М.И. Определение энерговвода в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1091–1095.
 16. *Manley T.C.* The electric characteristics of the ozonator discharge // Trans. Electrochem. Soc. 1943. V. 84. P. 83–96.
-