

ЭКСИЛАМПЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА: ИСТОРИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2012 г. В. Ф. Тарасенко, доктор физ.-мат. наук; Э. А. Соснин, доктор физ.-мат. наук

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск

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

Описан принцип работы современных источников спонтанного ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучений на основе эксимерных и эксиплексных молекул – эксиламп. Даны ссылки на пионерские работы, в которых для возбуждения излучения эксиламп используется барьерный разряд. Рассмотрены конструкции эксиламп барьерного разряда и облучающих модулей на их основе, эффективные режимы работы, спектры излучения наиболее перспективных эксиламп. Приведены примеры применения эксиламп барьерного разряда в науке и технике.

Ключевые слова: барьерный разряд, эксимер, эксиплекс, эксилампа.

Коды OCIS: 260.7210, 230.6080, 240.6670, 350.3850, 350.5130, 160.4670, 310.0310

Поступила в редакцию 26.12.2011

Светлой памяти

Галины Аркадьевны Волковой (1935–2011)

Введение

Исследования условий формирования ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучений эксимерных R_2^* и эксиплексных RX^* молекул (где R – атом инертного газа, X – атом галогена) были начаты в середине прошлого века. Слово “эксимер” (сокращение от англ. *excited dimer* – возбужденный димер, т. е. молекула, состоящая из одинаковых атомов, например, Ar_2^*) было впервые предложено в 1960 г. [1]. Так были названы возбужденные молекулы, состоящие из двух одинаковых атомов, образующих устойчивую химическую связь только в возбужденном состоянии (нижнее состояние является несвязанным или слабосвязанным). Спонтанный распад эксимера на отдельные атомы сопровождается высвечиванием характерной для данной молекулы спектральной полосы.

С 1973 г. было достоверно установлено, что помимо эксимеров в указанном выше смысле этого слова, можно создать условия, в которых образуются гетероядерные возбужденные молекулы, которые были названы эксиплексами [2] (от англ. *excited complex (exciplex)* – возбужденный комплекс, например, XeF^*). Позд-

нее для единого обозначения всех источников спонтанного излучения на эксимерных и эксиплексных молекулах было предложено обобщенное название – эксилампы [3].

Сегодня наибольшее практическое применение получили так называемые эксилампы барьерного разряда (БР). Первое авторское свидетельство на изобретение оптического прибора такого типа было получено Г.А. Волковой с коллегами из Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ФГУП ВНИЦ ГОИ), Санкт-Петербург, РФ [4]. Эксилампа состояла из отпаянной колбы с окном для вывода ВУФ излучения и импульсного источника питания, отличалась конструктивной простотой и стабильностью потока излучения, а излучение формировалось от многочисленных микрозарядов между диэлектрическими барьерами [5].

Работы [4, 5] привлекли внимание У. Когельшатца с коллегами (компания *ASEA Brown Boveri*), которыми за несколько лет были проведены широкие исследования эксиламп БР [6–8] и получена серия патентов.

Сегодня самыми известными производителями эксиламп за рубежом являются компании *Heraeus Noblelight GmbH* (Германия), *Philips*

(Нидерланды), *Ushio, Inc.* (Япония), *M.D. Com, Inc* и ее дочерняя компания *M.D. Excimer, Inc* (Япония), *Quarktechnology Co., Ltd* (Япония).

В Российской Федерации эксилампы для научных исследований разрабатываются и производятся в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) [9–12] и в ФГУП НПК ГОИ [13]. Следует отметить и научный вклад группы Ужгородского национального университета (Украина) [14].

Цель настоящей работы показать, к чему привело появление пионерских работ [4, 5] по созданию нового класса оптических приборов – эксиламп БР, представить их основные характеристики и примеры применения в науке и технике.

Конструкции излучателей эксиламп барьерного разряда

Замечательным свойством БР в сравнении с разрядами других типов является возможность управления средней энергией электронов и их концентрацией в широком диапазоне изменением внешних параметров, таких как геометрия разрядного промежутка, тип используемого диэлектрика. Тем самым, меняя давление газа, диэлектрическую проницаемость барьера и межэлектродный промежуток, можно влиять на энергетические и спектральные характеристики излучения, приведенную напряженность электрического поля E/p (E – напряженность электрического поля, p – давление). Кроме того, зажигая БР в отпаянной

колбе из диэлектрического материала (кварца, стекла, керамики) и помещая электроды снаружи колбы, можно достичь как чистоты спектра, так и большого срока службы эксилампы, который в зависимости от условий эксплуатации может достигать 1,5–30 тыс. ч [15].

Эксилампы БР имеют различное конструктивное исполнение (рис. 1). На рис. 1а приведена конструкция излучателя первой отпаянной эксилампы БР, созданной и исследованной в ФГУП ВНЦ ГОИ Г.А. Волковой с коллегами. Излучатель представляет собой заполненную инертным газом трубку прямоугольного сечения с внешними электродами, плотно прилегающими к противоположным граням трубки. Вывод излучения в одном варианте трубки осуществлялся через торцевое окно (рис. 1а), а во втором – через окно, которое являлось боковой стенкой трубки. Окна изготовлялись из пластин фтористого магния. Во втором случае размер бокового окна и возбуждаемой области достигал 35 мм. Расстояние между электродами составляло 5–15 мм. В работе [5] были описаны коаксиальный (рис. 1в) и плоский излучатели, в которых используется вывод излучения через сетчатые электроды.

Сегодня для получения мощного излучения на димерах инертных газов применяются однобарьерные коаксиальные эксилампы, в которых внутренний электрод выполнен не сплошным (рис. 1б), а в форме спирали. Конструктивно эксилампа однобарьерного разряда представляет собой заполненную ксеноном герметичную кварцевую трубку, имеющую

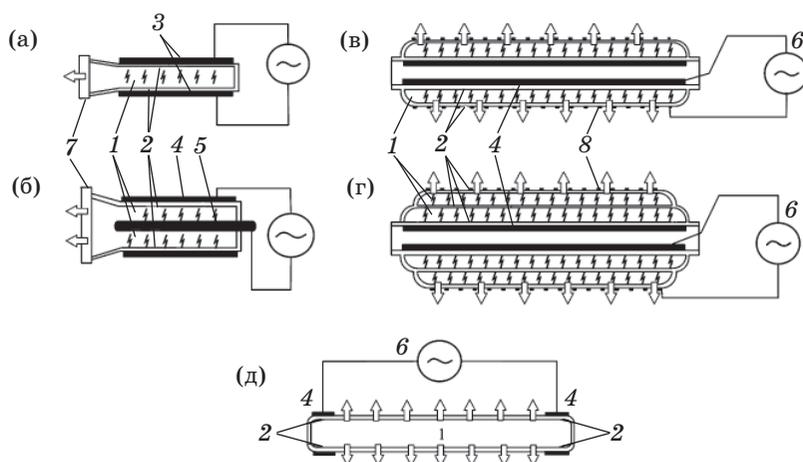


Рис. 1. Конструкции эксиламп барьерного разряда. 1 – разрядный промежуток, 2 – диэлектрические барьеры, 3 – плоские электроды, 4 – цилиндрические электроды, 5 – штыревой электрод, 6 – источник питания эксилампы, 7 – выходные окна, 8 – металлический электрод с малым радиусом кривизны (например, спиральный). Пояснения в тексте.

внутренний потенциальный электрод, а также перфорированный электрод, устанавливаемый на внешней боковой поверхности кварцевой трубки. В качестве потенциального электрода используется металлический стержень или спираль, устанавливаемые коаксиально с кварцевой трубкой, а заземленным электродом, как правило, служит металлическая сетка на внешней поверхности трубки. Прозрачность сетки при изготовлении ее из проволоки диаметром около 0,1 мм может достигать примерно 90%.

Г.А. Волковой также был создан излучатель с тремя диэлектрическими барьерами (рис. 1г). В данном излучателе от каждого импульса напряжения происходит одновременный пробой обоих промежутков, что позволяет возбуждать различные газовые смеси. Результаты испытаний такого излучателя приведены в работе [16].

Для уменьшения рабочего давления смеси газов (что приводит к уширению спектральных полос излучения и увеличению их числа) в работе [17] была предложена конструкция излучателя, приведенная на рис. 1д, а лампы такого типа было предложено называть эксилампами емкостного разряда.

Оптимальные условия возбуждения эксиламп барьерного разряда

Энергетические параметры эксиламп во многом определяются удельной мощностью и энергией возбуждения. С этой точки зрения БР имеет свои особенности. Использование одного или двух диэлектрических барьеров, отделяющих электроды от газовой среды, приводит к ограничению удельной энергии возбуждения $E_{уд}$, вкладываемой в плазму за один цикл (период) возбуждения. За счет применения диэлектрических барьеров удается формировать диффузный разряд при повышенных давлениях различных газов. Это очень важно для получения высокой средней мощности излучения и эффективности эксиламп.

Величину $E_{уд}$ можно оценить исходя из следующего модельного представления. Энерговыделение в плазме разряда как в активной нагрузке происходит одновременно с зарядкой емкостей барьеров, поскольку они образуют последовательную цепь. Известно, что энерговыделение в активном сопротивлении при протекании тока зарядки конденсатора, установленного последовательно с сопротивлением, равно

энергии электрического поля, накопленной в конденсаторе. Энергозапас в конденсаторе определяется емкостью и напряжением. Таким образом, величина $E_{уд}$ не превышает

$$E_{уд} \leq \frac{C_{уд} U_{\max}^2}{2d}, \quad (1)$$

где $C_{уд}$ – удельная емкость одного или двух диэлектрических барьеров, U_{\max} – амплитуда прикладываемого напряжения, d – расстояние между внутренними поверхностями барьеров. При характерных значениях $C_{уд}$ порядка единицы пФ/см², $U_{\max} \approx 5$ кВ, $d \approx 0,5$ –1 см имеем энергозапас примерно десятки мкДж/см³. Соответственно, для обеспечения приемлемого уровня средней мощности возбуждения в БР необходимо использовать генераторы с высокими частотами повторения импульсов f . При $f \approx 100$ кГц характерное значение составляет доли единицы – единицы Вт/см³.

Величина $C_{уд}$ определяется как диэлектрической проницаемостью используемого диэлектрика ϵ , так и его толщиной. С точки зрения увеличения $C_{уд}$ целесообразно использовать диэлектрики с большим значением ϵ и возможно меньшей толщиной. Ограничения на толщину слоя возникают вследствие уменьшения электрической прочности диэлектрика. В то же время, необходимо обеспечить выход излучения из газоразрядного объема. Поэтому чаще всего в качестве диэлектрика используется кварц, некоторые сорта которого обладают как хорошим оптическим пропусканием в УФ и ВУФ областях спектра, так и высокой электрической прочностью. Тем не менее, возможны конструкции эксиламп из диэлектриков с бóльшим ϵ , например, сегнетокерамики. В этом случае можно существенно увеличить как удельный энерговыклад, так и мощность излучения.

Для возбуждения излучения эксиламп с двумя барьерами наиболее выгодно использовать генераторы, формирующие двухполярные импульсы длительностью 1–2 мкс при фронте и спаде импульса напряжения около 100 нс. Характерные осциллограммы приведены на рис. 2.

При увеличении длительности импульса напряжения, а также его фронта и спада размеры диффузных микрозарядов, заполняющих колбу эксилампы, уменьшаются и частично или полностью преобразуются в нити (филаменты). Это ведет к падению эффективности и средней мощности излучения. При сокра-

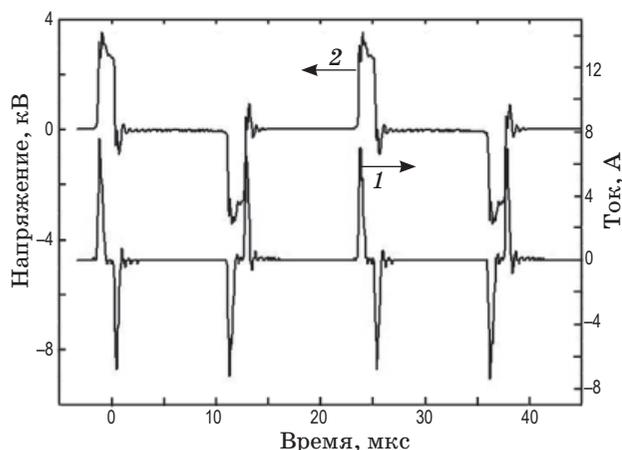


Рис. 2. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) KгCl-эксилампы.

щении длительности импульса напряжения и его фронта увеличивается пробойное напряжение и возбуждение эксимерных или эксиплексных молекул происходит при высоких значениях параметра E/p , превышающих оптимальные. Это также снижает эффективность излучения эксилламп БР. С другой стороны следует отметить, что при увеличении E/p и сохранении энергии возбуждения в импульсе улучшается однородность разряда, и в этих условиях можно увеличивать мощность излучения в импульсе и сокращать его длительность.

Для возбуждения излучения в эксиллампах с одним барьером (рис. 16) более выгодно использовать генераторы, формирующие однополярные импульсы. В этом случае на внутренний металлический электрод следует подавать импульсы напряжения отрицательной полярности. Это приводит к формированию диффузных микрозарядов при повышенных давлениях.

Спектральные и энергетические характеристики излучения

Наибольшее практическое значение в настоящее время имеют эксиллампы на димерах ксенона Xe_2^* (172 нм), что связано с высокой (7,2 эВ) энергией кванта, соответствующего указанной длине волны, достаточной для разрыва химических связей многих молекул. Спектральная ширина полосы излучения молекул Xe_2^* на полувысоте не превышает 15 нм. Эффективность излучения, согласно результатам ряда работ, в зависимости от условий воз-

буждения может достигать 60% [18]. Немаловажно и то, что имеются промышленно выпускаемые сорта кварца, имеющего высокую оптическую прозрачность для спектра Xe_2^* -эксилламп [19]. Эксиллампы на основе димеров криптона и аргона, несмотря на большую энергию кванта (8,5 эВ, $\lambda = 146$ нм — для Kr_2^* и 9,8 эВ, $\lambda = 126$ нм — для Ar_2^*) используются значительно реже, поскольку пока нет качественных материалов для изготовления колб, прозрачных в области 120–150 нм. Кристаллы флюорита и фториды магния и лития, прозрачные в данной области спектра, используются только для изготовления выходных окон.

Характерные значения удельной мощности излучения в однобарьерных лампах составляют 10–30 мВт/см², а эффективность излучения может достигать, в зависимости от уровня удельной мощности возбуждения, 60% [20]. В эксиллампах двухбарьерного разряда удельные мощности возбуждения достигают 10 Вт/см³, а удельные мощности излучения — 100 мВт/см². Эффективность формирования излучения в этих лампах, как правило, не превышает 10% [12].

В УФ и видимой областях спектра наиболее мощными источниками спонтанного излучения являются системы на основе галогенидов инертных газов (элементы периодической таблицы Менделеева VII и VIII групп). В этом случае наиболее интенсивной является полоса, соответствующая переходу $B \rightarrow X$ эксиплексной молекулы (в нем сосредоточено более 70% энергии излучения), а полосы переходов $D \rightarrow X$, $C \rightarrow A$ и $B \rightarrow A$ менее интенсивны и проявляются в спектрах излучения при пониженных давлениях рабочих сред. Для большинства эксиплексных молекул излучательное время жизни B - и D -состояний не превышает примерно 20 нс, а для C -состояния — около 120 нс [21]. Спектры излучения наиболее распространенных на практике эксиплексных ламп барьерного и емкостного разрядов приведены на рис. 3 и 4 соответственно.

Представляют научный интерес эксиллампы на дигалогенах: в этом случае спектр излучения содержит интенсивные полосы $D' \rightarrow A'$ молекул Br_2^* , Cl_2^* и I_2^* [22]. Кроме того отметим, что получают развитие исследования рабочих сред эксилламп БР, излучающих одновременно несколько молекулярных полос разных эксиплексных и/или эксимерных молекул (см., например [16]).

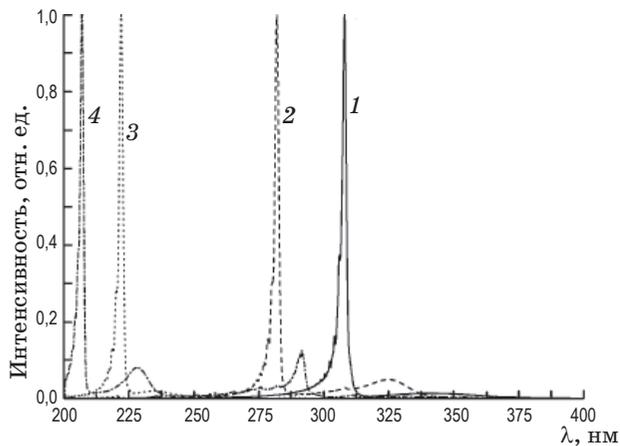


Рис. 3. Спектры эксиламп БР на основе галогенидов инертных газов. 1 – XeCl^* , 2 – XeBr^* , 3 – KrCl^* , 4 – KrBr^* .

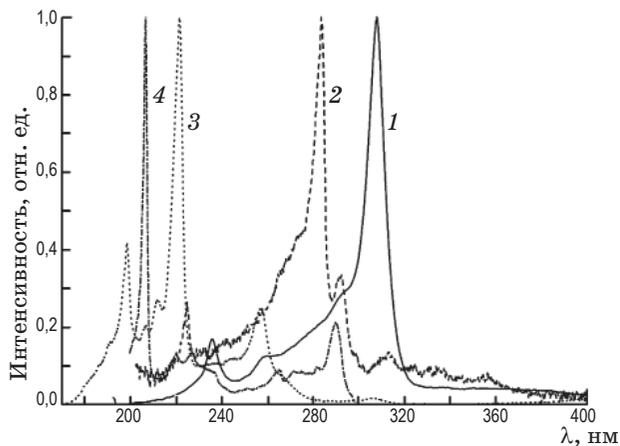


Рис. 4. Спектры эксиламп емкостного разряда на основе галогенидов инертных газов. 1 – XeCl^* , 2 – XeBr^* , 3 – KrCl^* , 4 – KrBr^* .

Конструкции облучающих модулей на основе эксиламп барьерного разряда

Конструкции облучающих модулей на основе эксиламп барьерного разряда многообразны. Приведем пример конструкций мощных облучающих модулей на основе эксиламп, разработанных в ИСЭ СО РАН (рис. 5). Источник питания, излучатель и система его охлаждения помещены в одном корпусе. Такая компоновка позволяет отказаться от использования сложного водяного охлаждения, применяемого для возбуждения мощных эксиламп, и заменить его на простое воздушное охлаждение.

Колба модуля BD_EL имеет коаксиальную конструкцию (рис. 1в) и выполнена из трубок

кварца марки GE214 (*General Electrics*) с диаметрами 65 и 40 мм и общей длиной 820 мм. На внутренней стенке колбы размещен высоковольтный электрод-отражатель из фольги, а на внешней поверхности колбы расположен заземленный спиральный электрод с пропусканием не менее 80%. Излучение выводится через фланец, имеющий размеры 85×10 см. Отпаянная колба является сменной. Она может быть заполнена различными смесями газов и обеспечивать работу на рабочих молекулах I_2^* (342 нм), Br_2^* (289 нм), Cl_2^* (259 нм), KrBr^* (207 нм), KrCl^* (222 нм), KrI^* (190 нм), XeBr^* (283 нм), XeCl^* (308 нм), XeI^* (253 нм).

Масштабируя описанный модуль, был создан модуль BD_7EL (рис. 5б), который содержит семь коаксиальных ламп, помещенных в кожух и снабженных воздушным охлаждением и отражателем. Излучение выводится через фланец, имеющий размеры 20×20 см. Например, подобный модуль с выходным окном 30×30 см на рабочей молекуле Xe_2^* обеспечивает энергетическую светимость до 100 мВт/см², а эффективность устройства в целом составляет 5%.

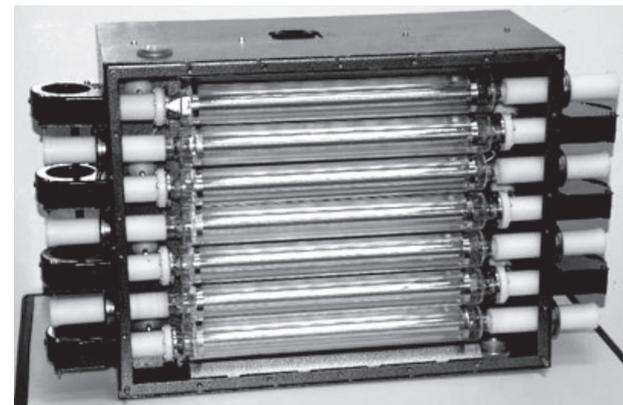
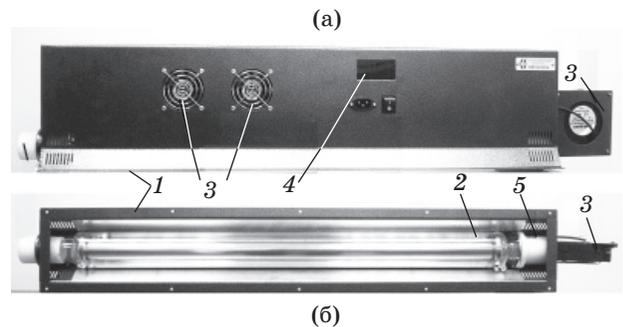


Рис. 5. Конструкции облучающих модулей BD_EL (*barrier discharge, extra large*) (а) и BD_7EL (б). 1 – корпус, 2 – излучатель, 3 – система воздушного охлаждения, 4 – таймер, 5 – фиксаторы колбы.

Области применения эксиламп

Появление первых лабораторных образцов эксиламп стало поводом для изучения их потенциала в фотохимии и фотобиологии. Эксилампы как сравнительно узкополосные источники спонтанного излучения оказались относительно недорогими: цена эксилампы, по крайней мере, на порядок меньше цены эксимерных лазеров. Кроме того, в сравнении с лазерами появилась возможность облучения протяженных объектов. Как источник фотонов с энергиями от 3 до 10,5 эВ эксилампы оказались практически применимы во многих фотопроцессах, для проведения которых необходимо воздействие УФ и/или ВУФ излучений.

В таблице представлены основные области применения эксиламп БР в научных и производственных задачах. Приведем несколько примеров.

Для фотохимии облучение эксилампами позволило существенно расширить знания о спектрально-люминесцентных свойствах органических веществ. Здесь сыграли свою роль узкополосный спектр излучения эксиламп (что важно для проведения селективных фотопревращений) и характерная для них длительность импульса излучения.

Например, в работе [23] был сделан анализ спектров флуоресценции водных растворов фенола, экспонированных 10-нс импульсом KrCl-лазера и 1-мкс импульсом KrCl-эксилампы БР, и найдено, что при одной и той же дозе облучения эксилампа обеспечивает большую эффективность фотопревращения, чем лазер. Обнаруженный эффект был связан с процессами

релаксации энергии в молекуле фенола. При облучении на $\lambda = 222$ нм ($45\ 000\ \text{см}^{-1}$) молекула переходит в синглетное состояние S_2 и далее за 0,1 нс релаксирует на нижележащие триплеты и синглеты с большим временем жизни. Поэтому облучение фенола импульсами, имеющими большую длительность, увеличивает вероятность перепоглощения в канале возбужденных состояний и заселения высоколежащих фотодиссоциативных состояний, что увеличивает вероятность инициирования радикальных механизмов фотолиза.

Используя эксилампы БР и анализ флуоресцентных спектров, удалось выявить условия эффективной фотодеградации метилфенолов (2-МФ, 4-МФ, 2-А-4-МФ), нейтральных и ионных форм крезола, а также изучить влияние гуминовых веществ на фотодеградацию метилфенолов. По результатам исследований этого цикла был сделан вывод о перспективности использования эксиламп для проведения научных исследований в области флуоресцентного анализа [23].

Эксилампы БР также оказались эффективным инструментом для изучения процессов минерализации органических веществ в газовой и жидкой фазах [24]. А при разработке биотехнологии разложения производных фенола повышенных концентраций было показано, что предварительное облучение эксилампами БР растворов с органическими загрязнителями облегчает их последующую биодеградацию [25].

Использование KrCl-эксилампы БР дает несколько преимуществ по сравнению с традиционной ртутной лампой низкого давления.

Области применения эксиламп

Области применения	Примеры применения
Микро- и оптоэлектроника	фототравление поверхностей фотоосаждение пленок изменение физических и химических свойств поверхностей, пленок
Фотохимия: управление фотохимическими реакциями	изучение веществ, фотостабильных к ВУФ технологии очистки вод реакции фотосинтеза актинометрия
Аналитическая химия	очистка электродов излучением разложение аналитических проб приборы для спектрального и химического анализа
Фотобиология	фоторегуляция жизнедеятельности микроорганизмов, вирусов, живых клеток и растений
Фотомедицина	лечение кожных заболеваний косметические операции

Эксилампа почти сразу выходит на режим при включениях, что делает возможным проводить измерения без задержек, а импульсный режим работы позволяет в некоторых случаях исключить фоновый сигнал при измерениях. Миниатюризация эксилампы увеличивает легкость и компактность прибора.

Эти и другие многочисленные примеры (см., например, [7, 8, 10–12]) красноречиво свидетельствуют, что сегодня эксилампы БР являются не только инструментом для проведения научных исследований, но и элементами оптических устройств, и имеют широкий диапазон применения.

Заключение

Эта работа посвящена памяти сотрудника ФГУП НПК ГОИ Галины Аркадьевны Волковой, которая, прожив 76 лет, в 2011 г. ушла из жизни. Работы Галины Аркадьевны [4, 5] с коллегами положили начало новому направлению в создании источников спонтанного из-

лучения. Мы много раз встречались с Галиной Аркадьевной и обсуждали проблемы развития эксиламп, а также испытывали образцы двух- и трехбарьерных эксиламп коаксиального типа, которые были разработаны в ФГУП НПК ГОИ. В настоящее время сотрудничество между ФГУП НПК ГОИ и ИСЭ СО РАН успешно продолжается [27, 28].

В статье приведены характеристики излучения и конструкции эксиламп барьерного разряда, излучающих на УФ и ВУФ переходах эксимерных и эксиплексных молекул. Отпаянные излучатели данных источников спонтанного излучения позволяют получать излучение с плотностью средней мощности в десятки мВт/см², а на длине волны 172 нм – более 100 мВт/см². Обсуждаются области применения эксиламп.

Авторы благодарят своих коллег С.М. Авдеева, М.В. Ерофеева, М.И. Ломаева, В.С. Скакуна и Д.В. Шитца, вместе с которыми были получены представленные в статье оригинальные результаты.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Stevens P., Hutton S. Radiation life-time of the pyren dimer and the possible role of excited dimer in energy transfer processes // Nature. 1960. V. 186. June 25. P. 1045–1046.
2. Birks J.V. The exciplex. N.Y., San-Francisco: Acad. Press, 1975. P. 39–74.
3. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. Широкополосные континуумы в инертных газах и их смесях с галогенидами // Квант. электрон. 1993. Т. 20. № 1. С. 7–30.
4. Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Подмошенский И.В., Яковлева А.В. Лампа для облучения в вакуумной ультрафиолетовой области спектра // А. с. № 972249. Бюллетень изобретений. 1982. № 41. С. 179–180.
5. Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В. ВУФ лампы на барьерном разряде в инертных газах // ЖПС. 1984. Т. 41. В. 4. С. 681–695.
6. Eliasson B., Kogelschatz U. UV excimer radiation from dielectric-barrier discharges // Appl. Phys. B. 1988. V. B46. P. 299–303.
7. Esrom H., Kogelschatz U. Modification of surfaces with new excimer UV sources // Thin Solid Films. 1992. V. 218. P. 231–246.
8. Boyd I.W., Zhang J.-Y., Kogelschatz U. Development and applications of UV excimer lamps / In book Photo-Excited processes, diagnostics and applications / Ed. by Peled A. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 161–199.
9. Ломаев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ и ВУФ излучения // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
10. Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. Applications of capacitive and barrier discharge excilamps in photoscience // Journal Photochemistry and Photobiology C: Reviews. 2006. V. 7. P. 145–163.
11. Sosnin E.A., Sokolova I.V., Tarasenko V.F. Development and applications of novel UV and VUV excimer and exciplex lamps for the experiments in photochemistry / In Book Photochemistry Research Progress / Ed. by Sanchez A., Gutierrez S.J. Nova Science Publishers, 2008. P. 225–269.

12. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. Томск: STT, 2001. 512 с. ISBN 978-5-93629-433-4.
13. Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Логинов А.В., Щукин С.А. Ультрафиолетовое излучение возбужденных молекул инертных газов // УФН. 1992. Т. 162. № 5. С. 123–159.
14. Шуайбов О.К., Шевера Г.В., Шимон Л.Л., Соснин Э.А. Сучасні джерела ультрафіолетового випромінювання: розробка та застосування. Ужгород–Томск, Ужгородський національний університет, Томський державний університет, 2006. 224 с.
15. Arnold E., Driskemper R., Reber S. High power excimer sources // Proc. 8th Int. Symp. Sci. and Technol. of Light Sources (LS-8). Greifswald, Germany, 30 Aug.–3 Sept. 1998. IL12. P. 90–98.
16. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Источник двухполосного излучения на основе трехбарьерной KrCl-XeBr-эксилампы // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 17. С. 1–6.
17. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Отпаянные эффективные эксилампы, возбуждаемые емкостным разрядом // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 21. С. 27–32.
18. 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.
19. Schreiber A., Kuhn B., Arnold E., Schilling F.-J., Witzke H.-D. Radiation resistance of quartz glass for VUV discharge lamps // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2005. V. 38 (17). P. 3242–3250.
20. Vollkommer F., Hitzschke L. Dielectric barrier discharge // Proc. 8th Int. Symp. Sci. and Technol. of Light Sources (LS-8). Germany, Greifswald, 1998. P. 51–60.
21. Смирнов Б.М. Эксимерные молекулы // УФН. 1983. Т. 139. В. 1. С. 53–81.
22. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Оптические характеристики плазмы эксиламп барьерного разряда на димерах галогенов I_2^* , Cl_2^* , Br_2^* // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 4. С. 554–560.
23. Чайковская О.Н. Спектрально-люминесцентные свойства, фотофизические и фотохимические процессы в гидроксисоединениях при возбуждении ультрафиолетовым излучением // Автореф. докт. дис. Томск: ТГУ, 2007. 48 с.
24. Oppenländer T. Photochemical purification of water and air. Weinheim: Wiley-Vch Verlag, 2003. 368 p.
25. Matafonova G.G., Christofi N., Batoev V.B., Sosnin E.A. Degradation of chlorophenols in aqueous media using UV XeBr excilamp in a flow reactor // Chemosphere. 2008. V. 70. P. 1124–1127.
26. Real-time monitor for polycyclic aromatic hydrocarbons (ПАН) ecochem PAS 2000 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecochem.biz/ПАН/PAS2000.htm>.
27. Герасимов Г.Е., Крылов Б.Е., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Излучение в аргоне и криптоне на длине волны ~ 147 нм при возбуждении диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 3. С. 241–245.
28. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А. Исследование условий эффективной люминесценции I_2^* (342 нм) в барьерном разряде в смеси Kr-I₂ // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 6. С. 946–955.