

УДК 537.534

М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

ЭКСИЛАМПЫ С НАКАЧКОЙ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований коаксиальных и планарных эксиламп с накачкой барьерным разрядом. На ХеСl- эксилампе получена средняя мощность излучения более 2 Вт при КПД от вложенной энергии 2,6%. Показано, что эффективность излучения эксиламп с накачкой барьерным разрядом увеличивается при использовании синусоидальных импульсов длительностью десятки микросекунд. Апробированы эксилампы с двумя излучателями, работающими на различных длинах волн при накачке от одного генератора.

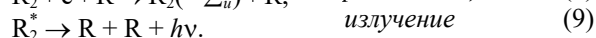
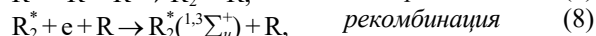
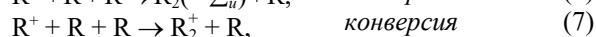
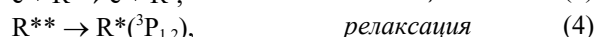
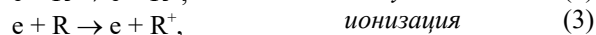
1. Введение

Фотоны с энергиями 5–10 эВ (УФ- и ВУФ-диапазоны спектра) могут инициировать и поддерживать различные химические, физические и биологические процессы [1, 2]. Традиционно для их получения используют дуговые разряды среднего и высокого давления в ксеноне, криптоне и смесях ртути с инертными газами. Спектр излучения подобных источников простирается от 200 нм до ИК. Между тем для ряда процессов требуется интенсивное излучение в относительно узком спектральном интервале. В этом случае можно использовать УФ-лазеры (например, эксиплексный или азотный) или появившиеся сравнительно недавно эксимерные и эксиплексные лампы (коротко, эксилампы) [3–19].

Использование эксиламп в случаях, где не требуется когерентность излучения, может давать значительные преимущества. Для получения спонтанного излучения эксимерных и эксиплексных молекул применяются различные типы импульсных, импульсно-периодических и непрерывных разрядов – тлеющий [3, 4], искровой [5], микроволновой [6], самостоятельный импульсный с УФ-предыонизацией [7, 8]. Согласно обзору по УФ-эксимерным источникам спонтанного излучения [9] наиболее пригодны для промышленного применения эксилампы с накачкой барьерным и СВЧ-разрядами.

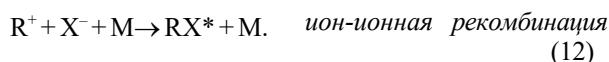
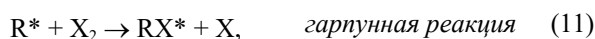
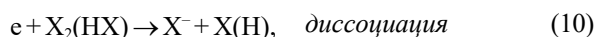
Барьерный разряд (БР) между электродами, к которым прикладывается импульсное высоковольтное напряжение, формируется при помещении в разрядный промежуток слоя диэлектрика (иногда данный тип разряда еще называют «тихим» – от англ. «silent discharge»). При этом для плотных газовых сред (давление ~1 атм и выше) в межэлектродном пространстве осуществляется специфическая форма разряда, состоящая из множества искр (микрочаналов, филаментов), имеющих псевдоцилиндрическую форму с плотностями тока в них от нескольких ампер до ~1 кА/см². Типичные диаметры цилиндрической части микроканала составляют несколько сот микрометров при длительностях разряда, меньших 100 нс. За счет диэлектрика ограничивается энергия

в одном микроузоре и осуществляется их равномерное распределение по всей поверхности электрода. Средние энергии электронов в отдельных микроузорах лежат в области 1–10 эВ, а концентрация электронов при этом составляет 10¹⁴–10¹⁵ см³ [14]. Эти условия подобны реализуемым в эксимерных и эксиплексных лазерах, поэтому эксимерные и эксиплексные молекулы «отрабатывают» вкладываемую в среду энергию: столкновения между электронами и атомами в канале приводят к возбуждению и ионизации атомов, которые при повышенных давлениях образуют эксимеры и эксиплексы прежде, чем происходит их безызлучательное девозбуждение или рекомбинация в «паразитных» процессах. Общая схема использования эксимерных молекул для получения УФ- и ВУФ-излучения такова:



В итоге (9) разница энергии связанного молекулярного состояния ^{1,3}Σ_u⁺ и энергии основного разлетного состояния ¹Σ_g⁺ вкладывается в первый и второй континуумы излучения благородных газов.

Образование гетероатомных комплексов (эксиплексов), например моногалогидов инертных газов RX*, происходит иначе. Кроме процессов (1)–(9) происходит наработка отрицательных ионов атомарного галогена (например, при диссоциации колебательно возбужденных молекул HCl* нарабатываются отрицательные ионы хлора), а эксиплексы образуются в реакциях ион-ионной рекомбинации и гарпунной реакции, причем долевым вклад этих механизмов может меняться в зависимости от условий в оптической среде:



Идея использовать БР для получения излучения континуумов инертных газов опубликована впервые, по-видимому, в [10], где в разряде с керамическими электродами возбуждался водородный континуум. В 1978 г. авторам [10] удалось получить указанные континуумы в приборе типа озонатора [11], а позже провести серию исследований двух конструкций ламп с выводом излучения поперек направления разряда между двумя протяженными электродами, ограниченными диэлектриками [12].

Широкие спектральные исследования образующихся в БР эксимеров были проведены группой авторов под руководством Когельшатца [1, 13–16]. Ими экспериментально показано, что БР позволяет получать узкополосные спектры многих эксимерных и эксиплексных молекул простыми методами, что является одним из главных преимуществ накачки барьерного разрядом. Другое преимущество барьерного разряда состоит в том, что условия разряда в микрозазорах – энергия электронов и их

концентрация – поддаются оптимизации изменением внешних параметров, таких как геометрия разрядного промежутка, тип используемого генератора накачки и диэлектрика. Кроме того, получив БР в отпаянной камере и поместив при этом электроды снаружи, можно достичь как чистоты спектра, так и большого времени жизни рабочей смеси [11].

Необходимо отметить, что в большинстве работ по БР [1, 2, 13–16] нет информации об энергетике и/или отсутствуют зависимости, иллюстрирующие оптимальные условия работы таких источников. Континуумы аргона и криптона в конструкции с керамическим электродом в плоской геометрии БР также исследовались в [18].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию амплитудно-временных характеристик излучения коаксиальных и планарных эксиламп, накачиваемых барьерным разрядом.

2. Экспериментальные установки и методики измерений

Использование БР позволяет конструировать сферические, планарные и коаксиальные эксилампы. Сферические эксилампы нами не исследовались. Коаксиальная эксилампа, которая использовалась в экспериментах, показана на рис. 1.

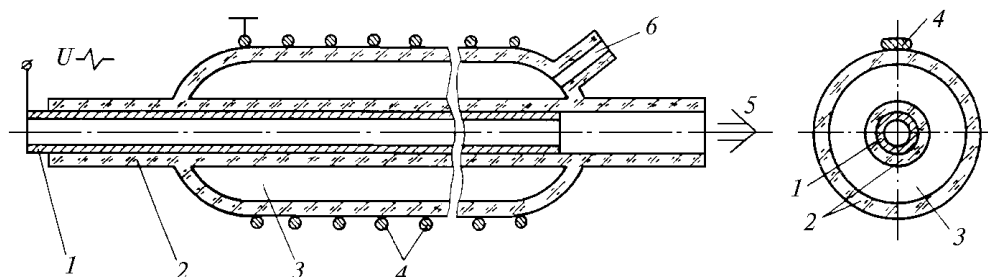


Рис. 1. Конструкция коаксиальной эксилампы с накачкой барьерным разрядом: 1 – металлическая трубка (отражатель и потенциальный электрод); 2 – кварцевая оболочка лампы; 3 – газовый объем; 4 – внешний сетчатый электрод; 5 – направление течения воды; 6 – газовый ввод

Полый металлический потенциальный электрод размещается при этом во внутренней трубке, а на внешней трубке располагается сетчатый электрод с пропусканием 82% (либо 66%). Использовались кварцевые трубки двух типов, высокого качества, с пропусканием в УФ-области спектра более 80% и с относительно небольшим пропусканием на длинах волн, меньших 260 нм (от 10 до 60%).

Конструктивные параметры коаксиальных эксиламп

Лампа	Количество диэлектрических барьеров	Толщина разрядного промежутка, мм	Объем активной области, см ³	Площадь излучающей поверхности, см ²	Охлаждение
Л1	2	9	193	~ 250	водяное
Л2	2	7	147	264	водяное
Л3	2	5	530	~ 1300	водяное
Л4	1	7	82	164	естественное

Во втором случае мощность излучения ArF^* и $KrCl^*$ молекул, выводимая из разрядного объема, была ограничена поглощением кварца. Для удобства дальнейшего изложения конструктивные параметры коаксиальных эксиламп собраны в таблицу.

На рис. 2 приведена конструкция планарной эксилампы. В качестве диэлектрика использовалась керамика с относительно высокой диэлектрической проницаемостью от конденсатора КВИ-3, одна из металлических обкладок которого была сточена.

Возбуждение эксиламп осуществлялось от четырех различных генераторов импульсов. Первый генератор (Г1) (см. рис. 2) состоял из управляемого искрового разрядника и накопительного конденсатора К15-10 емкостью 4,7 нФ, последовательно с которыми подключались электроды эксилампы [7]. Данный генератор использовался для накачки как планарной, так и коаксиальной эксилампы.

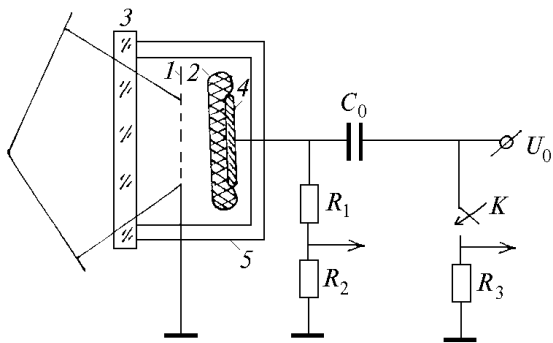


Рис. 2. Конструкция планарной эксимерной лампы с накачкой барьерным разрядом: 1 – сетчатый электрод; 2 – электрод из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью; 3 – окно из кварца; 4 – металлическая пластина; 5 – корпус эксимерной лампы

Второй генератор (Г2) имел подобную схему, но в качестве коммутатора использовался тиратрон типа ТГИ1-10000/25, что позволяло коммутировать токи до 10 кА и работать с частотами повторения импульсов от 10 до 4000 Гц при зарядных напряжениях 10–28 кВ (рис. 3).

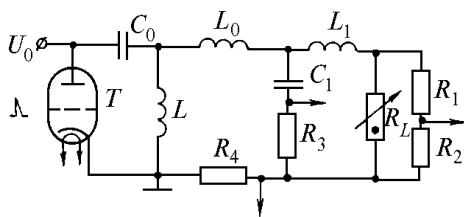


Рис. 3. Схема тиратронного генератора импульсной накачки Г2: T – тиратрон; C_0 – накопительный конденсатор (0,5–10 нФ); C_1 – обострительный конденсатор (0,02–6,6 нФ); L – зарядная индуктивность; L_0 – индуктивность разрядного контура (~30 нГн); L_1 – индуктивность контура разрядки обострительного конденсатора на нагрузку (< 10 нГн); R_L – эксимерная лампа; R_1 – R_4 – сопротивления делителя напряжения и шунтов; U_0 – подвод высокого напряжения

Кроме того, зарядка накопительного конденсатора в этой схеме при частотах более 100 Гц осуществлялась от специального источника, выдающего заряжающие импульсы с частотой ~10 кГц. При этом после срабатывания тиратрона автоматически выставлялась пауза в зарядке накопителя C_0 длительносью около 500 мкс.

Третий генератор (Г3) был подобен генератору, описанному в [17]. Данная схема (рис. 4) позволяла получать частоты повторения импульсов накачки от 500 Гц до 12 кГц, но при этом выдавала меньшую энергию импульса накачки и имела чередующуюся от импульса к импульсу полярность. Входное звено генератора представляет собой последовательный инвентор на тиристорах D_1 и D_2 с трансформаторным выходом Tr_1 . При поочередном включении тиристоров происходит передача энергии из конденсатора фильтра C_Φ в конденсатор первого звена магнитного генератора C_1 , причем полярность импульсов чере-

дуется. Далее импульс укорачивается магнитными звеньями сжатия на дросселях L_1 – L_3 и обмотке Tr_1 с общим коэффициентом сжатия ~100. На выходе генератора устанавливается повышающий трансформатор Tr_2 с коэффициентом трансформации 2. Генератор соединялся с эксимерной лампой 10-метровым кабелем, а параллельно лампе устанавливалось балластное сопротивление $R_4 = 150$ Ом. Форма импульса напряжения на нагрузке была близка к колоколообразной с длительностью на полувысоте ~50 нс, а амплитуду импульса напряжения устанавливали в пределах 5–16 кВ.

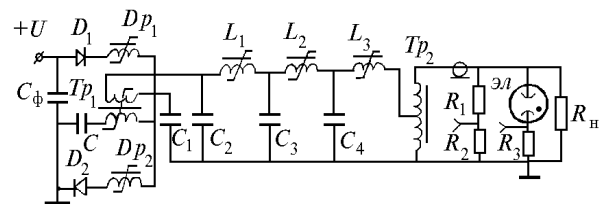


Рис. 4. Схема тиристорно-магнитного генератора импульсов накачки Г3

В экспериментах также использовался генератор импульсов напряжения синусоидальной формы (Г4), амплитуды которых могли варьироваться в диапазоне от 1 до 10 кВ, а длительность импульсов составляла десятки микросекунд.

Для регистрации электрических параметров во всех случаях использовались омический шунт R_3 и делитель (R_1, R_2). Амплитудно-временные характеристики излучения определялись при помощи вакуумного фотодиода ФЭК-22СПУ, сигнал с которого подавался на осциллограф С8-14. Входное окно фотодиода ограничивалось диафрагмой площадью 1 см². Интегральную мощность в заданном интервале длин волн оценивали калориметром ИМО-2Н с площадью входного окна 1,5 см².

Чтобы исключить тепловую компоненту излучения изучаемых смесей, перед входным окном ИМО-2Н размещали оптические фильтры с известным пропусканием. При этом, учитывая, что время отклика калориметра на видимое и УФ-излучение заметно меньше времени нагрева стекла от источника излучения, можно считать тепловую компоненту в измерениях исключенной. Интегральные спектры излучения снимали при помощи спектрографа ИСП-30 на фотопленке РФ-3.

Рабочие смеси, состоящие из инертных газов и галогенов, готовили в эксимерных лампах, а в экспериментах с лампой ЛЗ – в отдельном смесителе. Перед напуском рабочей смеси из лампы откачивали газ, продували гелием или неоном и тренировали разрядом при давлении ниже 1 Торр. Поскольку длина ламп значительно превышала их поперечные размеры, то при первом включении лампы сразу после приготовления смеси вначале наблюдался рост мощности излучения за счет перемешивания смеси.

3. Результаты и их обсуждение

Изученные эксилампы содержали, как правило, тройные смеси рабочего, буферного и дополнительного газов в соотношении, близком к используемому в лазерах на моногалоидах инертных газов. Общее давление смесей в экспериментах p_{Σ} обычно не превышало 1,5 атм ($N < 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Необходимая плотность среды достигалась введением буферных газов Ar, He, Ne, используемых для увеличения удельной поглощенной энергии и инициирования таких полезных реакций, как ион-ионная рекомбинация в присутствии третьей частицы (например, при образовании KrCl^* с участием $\text{He}(\text{Ne})$) (12)). Исследовались характеристики излучения в $\text{Ne}(\text{He})\text{-Kr-HCl}$, $\text{Ne}(\text{He})\text{-Xe-HCl}$, $\text{Ne}(\text{He})\text{-Kr-NF}_3(\text{F}_2)$, $\text{Ne}(\text{He})\text{-Ar-NF}_3(\text{F}_2)$ смесях. Некоторые из полученных результатов приведены на рис. 5–13.

На рис. 5 представлены зависимости импульсной мощности излучения KrCl - и KrF -эксиламп от величин накопительной емкости C_0 и зарядного напряжения U_0 . Их увеличение ведет к линейному росту мощности, однако эффективность эксилампы при этом не увеличивается, и, как правило, максимальные эффективности достигаются при малых C_0 и малых зарядных напряжениях. Это можно связать со снижением доли вкладываемой в плазму энергии относительно запасаемой в накопителе C_0 .

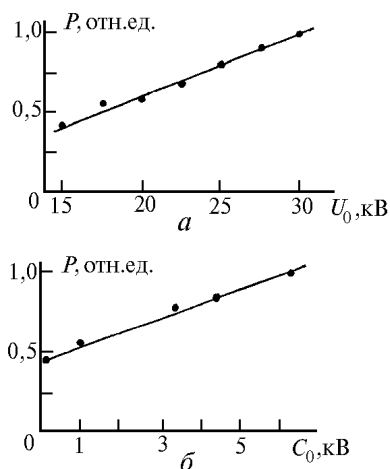


Рис. 5. Зависимости импульсной мощности эксилампы от величин накопительной емкости C_0 и зарядного напряжения U_0 . Общее давление смесей 1 атм. Лампа Л3: а – смесь Ne-Kr-F_2 , $C_0 = 1,1 \text{ нФ}$; б – смесь Ne-Kr-HCl , $U_0 = 20 \text{ кВ}$

Рис. 6 и 7 демонстрируют отличия в работе лампы с одним (Л4) и двумя (Л2) диэлектрическими барьерами. При $p > (1-1,2) \text{ атм}$ мощность излучения однобарьерной лампы снижается (оптимальное давление в ней ограничивается 0,8–1,2 атм для различных смесей), что обусловлено преобладанием в разряде отдельных и интенсивных микроканалов. Между тем экранирование диэлектриком обоих электродов позволяет более равномерно распределять под-

водимый к барьеру заряд, что обеспечивает однородность энерговода при повышенных давлениях $p > 1 \text{ атм}$ (см. рис. 6).

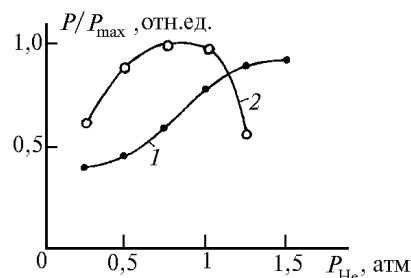


Рис. 6. Зависимости мощности излучения в смеси $\text{Ne:Kr:HCl} = P_{\text{He}}:45 \text{ Torr}:3 \text{ Torr}$ от давления гелия при $U_0 = 30 \text{ кВ}$. Генератор Г1: 1 – лампа Л1; 2 – лампа Л4

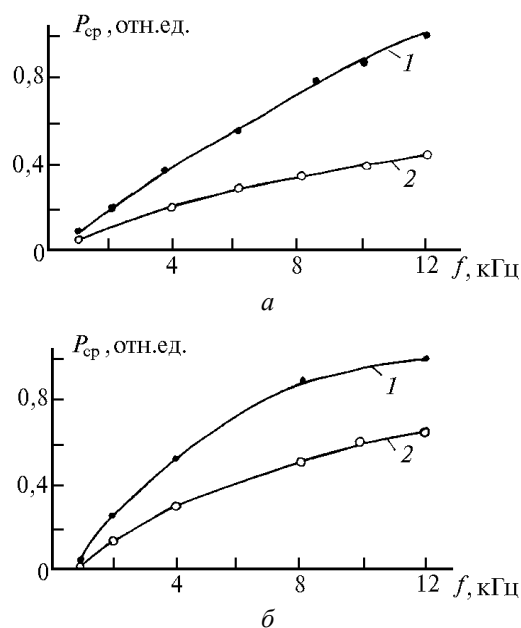


Рис. 7. Зависимости средней мощности излучения эксилампы от частоты следования импульсов накачки в лампах Л4 (1) и Л2 (2): $C_0 = 1,4 \text{ нФ}$, $U_0 = 14 \text{ кВ}$; а – смесь $\text{Ne:Kr:HCl} = 1,25 \text{ атм}:45 \text{ Torr}:3 \text{ Torr}$; б – смесь $\text{Ne:Kr:HCl} = 1 \text{ атм}:9 \text{ Torr}:3 \text{ Torr}$

Почти двукратное превышение мощности в лампе Л4 с одним барьером по сравнению с лампой Л2 сохраняется как при росте частоты следования импульсов накачки, так и при замене буферного газа Ne на Ne (см. рис. 7). Главным недостатком однобарьерной лампы в этих условиях является открытый контакт металлического электрода с разрядом, что приводит к постепенному распылению материала электрода и может влиять на качество излучения даже в средах, содержащих только чистые инертные газы, без добавок таких активных галогенов, как хлор или фтор.

Так, в [2] для однобарьерного разряда в смесях Хе с аргоном и неонем было достигнуто время жизни смесей $\sim 40 \text{ ч}$. Очевидно, что в системе с двумя барьерами это время для указанных сред можно было бы значительно увеличить.

Рис. 7 иллюстрирует влияние частоты повторения импульсов накачки на среднюю мощность излучения. Видно, что при увеличении частоты повторения средняя мощность почти линейно увеличивается. Однако при недостаточности охлаждения эксилампы указанная зависимость может нарушаться, так как в каждом импульсе более 60% энергии накачки идет на нагрев эксилампы.

На рис. 8–10 показаны характерные осциллограммы импульсов напряжения на эксилампе, разрядного тока и излучения в разных условиях накачки. Накачка от генератора Г3 наносекундных импульсов (см. рис. 9) отличается от накачки генератором Г2 меньшей энергией импульса накачки и, соответственно, меньшим энерговкладом в активную среду эксилампы. Достаточно медленный спад напряжения на нагрузке (см. рис. 8), характерный для использования генератора Г2, приводит к удлинению импульса излучения.

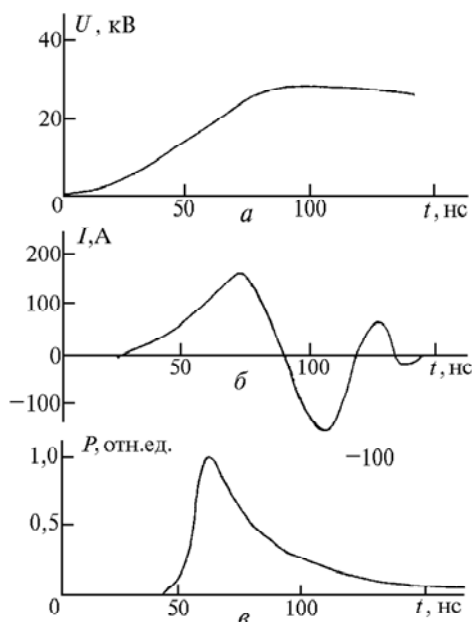


Рис. 8. Осциллограммы импульсов напряжения (а), тока (б) и излучения (в) на $\lambda \sim 222$ нм в эксилампе ЛЗ в смеси Ne-Xe-HCl при $C_0 = 1,1$ нФ, $U_0 = 20$ кВ и накачке генератором Г2

Данные осциллограммы получены без обострительного конденсатора C_1 . Его включение могло привести к увеличению мощности спонтанного излучения, но энергия в импульсе при этом не увеличивалась. Согласно формуле коаксиального конденсатора емкость эксилампы ЛЗ при заполнении ее плазмой не может превышать ~ 400 пФ. Поскольку величина накопителя C_0 в большинстве экспериментов была ≥ 1 нФ, напряжение на эксилампе могло превышать зарядное в 1,5–2 раз (рис. 8, а).

В случае накачки от генераторов наносекундных импульсов типичные длительности импульсов тока не превышали 200 нс, а длительность импульса излучения на полувысоте изменялась от 20 до 300 нс.

Длинный (в сравнении с приведенным на рис. 9) «хвост» импульса излучения на рис. 8, в можно связать с медленным спадом импульса напряжения от генератора Г2. Можно ожидать, что еще большее увеличение длительности импульса напряжения способно и далее приводить к дальнейшему удлинению «хвоста» импульса излучения, что подтверждает рис. 10, отражающий процесс накачки от генератора микросекундных импульсов Г4.

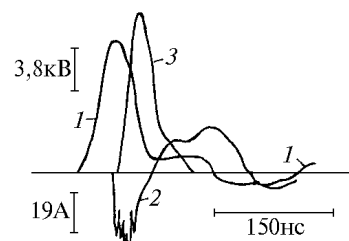


Рис. 9. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и излучения (3) на $\lambda \sim 222$ нм в эксилампе Л2 в смеси Ne:Kr:HCl = 1 атм : 45 Torr : 3 Torr, при $C_0 = 1,4$ нФ, $U_0 = 14$ кВ и накачке генератором Г3

Видно, что излучение в этом случае имеет длинный «хвост», что говорит об удлинённом времени ввода энергии в оптическую среду. Об этом свидетельствует и визуальное наблюдение за разрядом, так как картины свечения при возбуждении активных сред от генераторов Г1, Г3 и от генератора Г4 отличаются: в первом случае визуально ярко выраженной является стримерная фаза разряда (филаменты с хорошо различимой границей, особенно ясно заметной при $p_{\Sigma} > 1$ атм), а во втором – наблюдается более однородное свечение по всему объему.

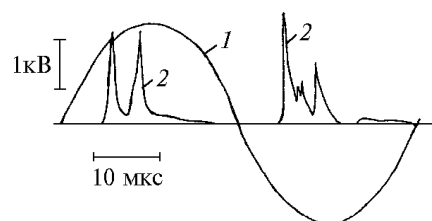


Рис. 10. Осциллограммы импульсов напряжения (1) и излучения (2) на $\lambda \sim 308$ нм в эксилампе Л3 в смеси Ne-Xe-HCl; $U_{\max} = 2$ кВ, накачка генератором Г4

Оптимизация смесей, проведенная на эксилампах Л2 и Л3, выявила следующее. Повышение давления буферного газа всегда сначала ведет к росту интенсивности излучения, а затем к насыщению, которое в большинстве смесей не претерпевает значительного спада при последующем увеличении давления, вплоть до 1,5–2,0 атм (рис. 11, 12). Повышение давления галогена приводит к сдвигу значения давления буферного газа, на котором происходит выход интенсивности излучения на насыщение, в сторону меньших давлений.

Максимальная мощность излучения молекул ArF* при прочих равных условиях во всех эксилам-

пах достигалась при работе с He, а не с Ne (см. рис. 11). Между тем в эксиплексных XeCl- и KrCl-лазерах с подобным составом среды обычно интенсивнее излучают смеси с неоном. Это можно объяснить тем, что в Ne происходит лучшая наработка электронов и ионов, чем в гелии, а молекулы XeCl* и KrCl* в смесях с HCl образуются за счет ион-ионной рекомбинации. Образование молекул ArF* происходит как за счет ион-ионной рекомбинации, так и за счет гарпунной реакции.

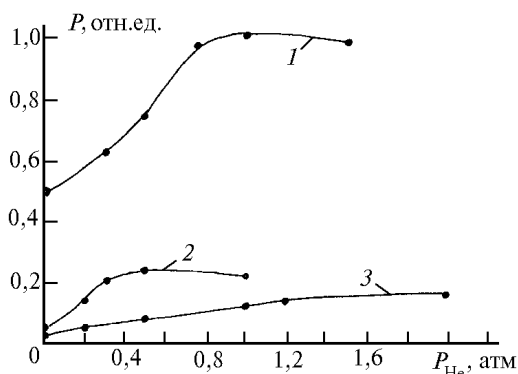


Рис. 11. Зависимости импульсной мощности излучения от давления гелия в разных смесях при $U_0 = 20$ кВ, $C_0 = 1,1$ нФ (генератор Г2, лампа ЛЗ).

Кривая 1 – He : Kr : F₂ = P_{He} : 100 Торр : 5 Торр;
2 – He : Kr : NF₃ = P_{He} : 100 Торр : 5 Торр;
3 – He : Kr : HCl = P_{He} : 80 Торр : 4 Торр

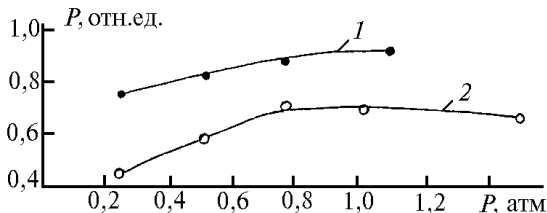


Рис. 12. Зависимость импульсной мощности излучения в смесях He(1) (Ne(2)) : Ar : F₂ = p : 100 Торр : 3 Торр от давления при $U_0 = 20$ кВ, $C_0 = 1,1$ нФ (генератор Г2, лампа ЛЗ)

Как отмечается в [13], в большинстве случаев для получения эксиплексных молекул в барьерном разряде основной реакцией является трехчастичная реакция (12) при типичных давлениях смесей > 1 атм, а гарпунный канал (11) играет второстепенную роль. Можно оценить и то, насколько это справедливо для процесса образования эксиплексов в данных экспериментальных условиях.

Предполагаем, что основной вклад в образование эксиплексов вносят реакции (11) и (12). В наших экспериментах по накачке эксилламп от генераторов наносекундных импульсов (и общих давлениях смесей ≥ 1 атм) концентрации HCl, F₂, NF₃ составляли $4 \cdot 10^{16}$ – $3,5 \cdot 10^{17}$, $9 \cdot 10^{16}$ – $2,2 \cdot 10^{17}$ и $9 \cdot 10^{16}$ – $2,2 \cdot 10^{17}$ см⁻³ соответственно. Возбуждаемые в процессе (1)–(3) атомы инертного газа входят в гарпунную реакцию с галогеносодержащей молекулой

(11), если при этом плотность галогенида достаточно высока:

$$V_g[X_2(HX)] > V_{as}N_2 \text{ и } > A, \quad (13)$$

где V_g – константа скорости гарпунной реакции ($\sim 10^{-10}$ см³/с для Xe*(Kr*) + HCl-реакции и $\sim 10^{-9}$ см³/с для Xe*(Kr*) + HF₃-реакции); $[X_2(HX)]$ – концентрация молекул галогенонесителя; V_{as} – скорость реакции (12); N – полная плотность нейтралов (в наших условиях 1 атм используем значение $3,1 \cdot 10^{18}$ см⁻³); $A \sim 10^5(10^6)$ с⁻¹ – скорость радиационного распада возбужденного атома инертного газа. Отсюда следует, что концентрации HCl и HF₃ в наших экспериментах заведомо лежали в пределах, соответствующих гарпунной реакции.

Однако на концентрацию галогенонесителя имеется ограничение сверху:

$$V[X_2(HX)] < A, \quad (14)$$

где V – константа скорости тушения эксиплекса галогенидом; A – скорость радиационного распада эксиплекса. Применим критерий (14) к некоторым смесям, исследованным на опыте: He–Xe–HCl, He–Kr–HCl, He–Kr–HF₃. Здесь V составляет $1,4 \cdot 10^{-9}$, $\sim 10^{-9}$, $52 \cdot 10^{-12}$ см⁻³/с [20] соответственно, а скорость $A = 2,5 \cdot 10^7$, $\sim 10^8$, $1,43 \cdot 10^8$ с⁻¹ [21]. Отсюда получаем, что концентрация галогенонесителя не должна превышать $1,8 \cdot 10^{16}$, $\sim 10^{17}$ и $2,7 \cdot 10^{18}$ см⁻³ в указанных трех случаях.

Между тем полученные на опыте оптимальные значения [HCl] в смесях с хлороводородом в 2–5 раз выше этой оценки. Увеличение начальной концентрации HCl в объемном разряде приводит к уменьшению средней энергии электронов в разряде и в конечном счете к ограничению количества эксиплексных молекул, возникающих за счет гарпунной реакции [19].

В условиях барьерного разряда при повышенных давлениях, когда основными являются ион-ионные реакции, плазмохимические реакции происходят преимущественно в малых объемах, занимаемых микроразрядами. Поэтому удельная мощность накачки, приходящаяся на элемент объема, занимаемый нитью микроразряда, значительно выше, чем в случае объемного разряда. Большая часть галогенонесителя остается вне области накачки и не успевает во время импульса попасть в область, занимаемую микроразрядами, а, как известно, при больших мощностях накачки в оптимальных смесях необходимо увеличивать содержание галогенонесителя. Соответственно и ограничение (14) срабатывает при повышенных [HCl] из-за быстрого выгорания галогенонесителя в микроканалах.

Максимальная средняя мощность при накачке от генераторов Г1–Г3 коаксиальной эксилламп ЛЗ составила 0,6 и 1,0 Вт при работе на молекулах KrCl*

и KrF^* соответственно. Смеси с F_2 и NF_3 , хотя и более энергетичны (см. рис. 12), имеют меньший ресурс работы, и, напротив, использование HCl , у которого, как показывают исследования, наилучшая способность к регенерации, дало наибольшее время работы на одной порции смеси (рис. 13).

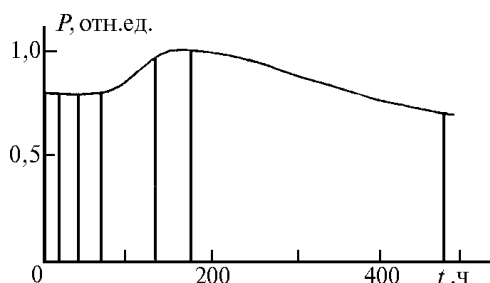


Рис. 13. Зависимость импульсной мощности излучения на $\lambda \sim 222$ нм от времени жизни одной порции рабочей смеси в режиме кратковременных включений. Смесь $He:Kr:HCl = 1$ атм:60 Торр:8 Торр, $U_0 = 20$ кВ, $C_0 = 1,1$ нФ, количество импульсов $\sim 10^6$

Увеличения средней мощности излучения удалось достичь при накачке от генератора Г4. В этом случае, как указывалось выше, излучение имело место почти все время действия импульса напряжения (см. рис. 10), как во время коротких микроразрядов, так и во время объемной стадии разряда. Так, для смеси $He-HCl$ на $\lambda \sim 308$ нм в лампе ЛЗ была получена плотность мощности излучения $1,7$ мВт/см² ($f \sim 20$ кГц), средняя мощность ультрафиолетового излучения $2,2$ Вт и эффективность по вкладываемой мощности $2,6\%$, между тем на генераторе Г3 ($f = 12$ кГц) в тех же условиях была получена плотность мощности $\sim 0,4$ мВт/см² при эффективности $\sim 0,1\%$.

Отметим также, что при работе с генератором Г2, мощность которого в несколько раз превосходила мощность, потребляемую одной эксилампой, мы могли одновременно подключать две эксилампы и работать на двух длинах волн без уменьшения средней мощности излучения каждой из эксиламп. Это позволяет создавать эксилампы с одним генератором накачки, а также двумя, тремя и большим количеством излучателей, которые работают на различных длинах волн.

4. Заключение

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований коаксиальных и планар-

ных эксиламп с накачкой барьерным разрядом. На $HeCl$ -эксилампе получена средняя мощность излучения более 2 Вт при КПД от вложенной энергии $2,6\%$. Показано, что эффективность излучения эксиламп с накачкой барьерным разрядом увеличивается при использовании синусоидальных импульсов длительностью десятки микросекунд. Апробированы эксилампы с двумя излучателями, работающими на различных длинах волн при накачке от одного генератора.

Авторы благодарят А.Н. Панченко за рекомендации по измерению средней мощности излучения.

Данная работа была подготовлена к публикации за счет средств, выделенных по проекту РФФИ № 96-02-16668а.

1. *Esrom H., Kogelschatz U.* // *Thin Sol. Fil.* 1992. V. 218. P. 231–246.
2. *Kessler F., Bauer H.* // *Appl. Surface Science.* 1992. V. 54. P. 430–434.
3. *Головицкий А.П., Кан В.С.* // *Оптика и спектроскопия.* 1993. Т. 75. В. 3. С. 604–609.
4. *Панченко А.Н., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Ломаев М.И.* // *Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21. В. 20. С. 77–80.
5. *Иванов В.В., Саенко В.Б., Рулев Г.В.* // *Письма в ЖТФ.* 1995. Т. 21. В. 7. С. 65–68.
6. *Kitagai H., Obara M.* // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55. № 15. P. 1583–1584.
7. *Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Янкевич Е.Б.* // *ПТЭ.* 1992. № 4. С. 244–245.
8. *Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А.* // *Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 19. Вып. 5. С. 1–5.
9. *Obara M.* // *Proc. of the 7th Intern. Symp. on the Science & Technology of Light Sources.* Kyoto, 1995. P. 149–156.
10. *Павловская Е.Н., Подмошенский И.В., Яковлева А.В.* // *ЖПС.* 1974. Т. 20. В. 3. С. 504–506.
11. *Павловская Е.Н. и Яковлева А.В.* // *Оптика и спектроскопия.* 1983. Т. 54. В. 2. С. 226–231.
12. *Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В.* // *ЖПС.* 1984. Т. 41. В. 4. С. 681–695.
13. *Kogelschatz U.* // *Pure and Appl. Chem.* 1990. V. 62. N 9. P. 1667–1674.
14. *Kogelschatz U.* // *Appl. Surface Science.* 1992. V. 54. P. 410–423.
15. *Gellert B. and Kogelschatz U.* // *Appl. Phys.* 1991. V. 52. N 1. P. 14–21.
16. *Kogelschatz U. and Esrom H.* // *Laser and Optoelektronik.* 1990. V. 22. P. 55–59.
17. *Шубкин Н.Г., Сычев С.П., Визирь В.А.* // *ПТЭ.* 1990. № 3. С. 96.
18. *Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Кузнецов А.А.* // *ЖТФ.* 1994. Т. 64. В. 10. С. 146–150.
19. *Бойченко А.М., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // *Квантовая электроника.* 1996. Т. 23. № 4. С. 344–348.
20. *Смирнов Б.М.* // *УФН.* 1983. Т. 139. № 1. С. 53–89.
21. *Obara M.* // *Encyclopedia of Physics Science and Technology.* Academic Press, Inc. 1997. V. 7. P. 190–209.

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
7 октября 1997 г.

M.I. Lomaev, V.S. Skakun, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. **Barrier Discharge-Pumped Excilamps.**

The results of experimental investigations of planar and coaxial barrier discharge excilamps are presented. The $HeCl$ -excilamp average radiation power more than 2 W and the efficiency with respect to the pumping power up to $2,6\%$ were obtained. It is shown that the use of sine-shaped pumping pulses with duration of several tens microsecond leads to an increase of excilamps efficiency. The excilamp with two types of emitters radiating at different wave-lengths under one pumping generator have been tested.