

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Эксилампы — эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения

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

Приведены результаты исследования мощных и эффективных эксиламп на галогенидах благородных газов с возбуждением тлеющим, емкостным и барьерным разрядами. Наибольшие средние мощности излучения с наименьшими затратами достигаются при использовании тлеющего разряда. Создана эксилампа со средней мощностью на молекулах  $KrCl^*$  ( $\lambda \sim 222$  нм) 1,6 кВт и на молекулах  $XeCl^*$  ( $\lambda \sim 308$  нм) 1,1 кВт при эффективности более 10 %. Использование емкостного безэлектродного разряда позволяет создавать отпаянные эксилампы с простой конструкцией излучателей при мощности 1–10 Вт и ресурсом до  $\sim 2500$  ч и более. Эксилампы барьерного разряда обладают как высокими энергетическими параметрами ( $> 100$  Вт м $^{-1}$ ), так и большим ресурсом работы. Эксилампы как новые источники мощного УФ- и ВУФ-излучения могут найти широкое практическое применение.

PACS numbers: 07.60.-j, 42.72.Bj, 52.80.-s

## Содержание

1. Введение (201).
  2. Оптические среды и оптические переходы, используемые в эксилампах (202).
  3. Типы разрядов, применяемых при возбуждении эксиламп (203).
  4. Экспериментальная аппаратура и методики (203).
  5. Определение параметров возбуждения в эксилампах (204).
  6. Эксилампы с возбуждением тлеющим разрядом (205).
    - 6.1. Оптимизация состава и давления смеси  $KrCl$ - и  $XeCl$ -эксиламп.
    - 6.2. Эффективность эксилампы тлеющего разряда.
    - 6.3. Эксилампа тлеющего разряда с мощностью излучения больше 1,0 кВт.
  7. Эксилампы с возбуждением емкостным разрядом (207).
    - 7.1. Оптимизация рабочих смесей  $XeCl$ -,  $XeBr$ - и  $KrCl$ -эксиламп.
    - 7.2. Влияние режима возбуждения.
  8. Эксилампы с возбуждением барьерным разрядом (208).
    - 8.1. Влияние формы импульса возбуждения.
    - 8.2. Влияние давления смеси.
    - 8.3. Влияние частоты повторения импульсов возбуждения на эффективность и формирование разряда.
  9. Спектры излучения эксиламп (212).
  10. Время жизни рабочей смеси и ресурс работы эксиламп (213).
  11. Особенности эксиламп по сравнению с другими источниками излучения УФ- и ВУФ-диапазонов (214).
  12. Заключение (216).
- Список литературы (216).

М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев. Институт сильноточной электроники РАН СО, 634055 г. Томск, просп. Академический 4, Российская Федерация  
Тел. (3822) 25-86-85, 25-93-92  
E-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила 23 августа 2002 г.,  
после доработки 13 ноября 2002 г.

## 1. Введение

Эксилампы (источники УФ- и ВУФ-излучения) — относительно недавно появившийся класс источников спонтанного излучения, в которых используется неравновесное излучение эксимерных или эксиплексных молекул [1–9]. Особенностью этих молекул является их устойчивость в электронновозбужденном состоянии и отсутствие прочной связи в основном. Ряд таких молекул имеет интенсивный В-Х переход в УФ- или ВУФ-диапазонах спектра, что позволяет с высокой эффективностью трансформировать введенную в среду энергию в оптическое излучение. Основное отличие эксиламп от имеющихся люминесцентных, а также тепловых источников спонтанного излучения УФ- и ВУФ-диапазонов — спектр излучения. До 80 % и более общей мощности излучения может быть сосредоточено в относительно узкой (не более 10 нм на полувысоте) полосе соответствующей молекулы. При этом удельные мощности излучения превышают величины, характерные для ламп низкого давления на резонансных переходах атомов. Кроме того, при возбуждении многокомпонентных газовых смесей одновременно можно получить излучение с соизмеримой интенсивностью на двух и более молекулах [10–13].

Достоинства эксиламп с точки зрения их применения составляют большая энергия фотона (3,5–10 эВ), узкая полоса излучения, относительно высокая удельная мощность излучения, возможность масштабирования и выбора произвольной геометрии излучающей поверхности. Отдельно следует отметить отсутствие ртути в эксилампах. Это обеспечивает им преимущество по сравнению с широко распространенными, но экологически небезопасными ртутьсодержащими лампами. В настоящее время эксилампы начинают использовать в фотохимии, микроэлектронике, для очистки и модифи-

© М.И. Ломаев, В.С. Скакун, Э.А. Соснин,  
В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц, М.В. Ерофеев 2003

кации свойств поверхности, для полимеризации лаков и красок, в технологиях обеззараживания промышленных отходов, воды, воздуха, биологии, медицине и других применениях. Это стало возможным благодаря большим успехам в понимании процессов, происходящих в оптических средах эксилламп, и в создании образцов, пригодных для практического использования [14, 15].

В данной работе приведены новые результаты, полученные при исследовании и создании мощных и эффективных эксиплексных ламп. Основное внимание уделено эксиллампам на галогенидах благородных газов с возбуждением тлеющим, емкостным и барьерным разрядами.

## 2. Оптические среды и оптические переходы, используемые в эксиллампах

В эксиллампах используются рабочие среды, состоящие из инертных газов или их смесей с галогенами. Особенностью данных сред является характер релаксации энергии по электронным состояниям эксимерных или эксиплексных молекул, образуемых в среде в процессе ее возбуждения, и относительно большая энергия фотона, излучаемого при переходе молекулы в основное состояние [2]. Наличие ионизованных и возбужденных состояний, связанных между собой многочисленными пересечениями кривых потенциальной энергии, приводит к тому, что в процессе релаксации среды последовательно безызлучательно заселяются состояния с верхних возбужденных к нижним состояниям. Дальнейший переход с нижних возбужденных состояний для эксиплексных молекул (B, C, D, рис. 1) к основному (разлетное A и слабосвязанное или разлетное X состояния) осуществляется за счет излучения, при этом энергетический зазор между нижним возбужденным и основным состояниями молекулы весьма большой. Этим объясняются, во-первых, высокая эффективность преобразования вводимой в среду энергии в излучение, во-вторых, наличие в

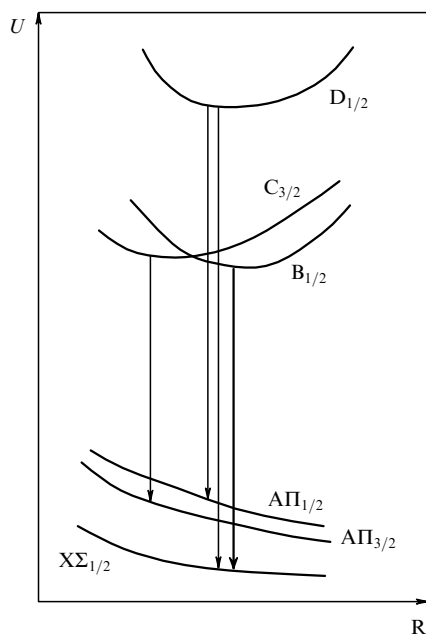


Рис. 1. Нижние термы молекулы, составленной из атома инертного газа и атома галогена, и интенсивные излучательные переходы между ними [2].

Таблица 1. Длины волн основных переходов эксиплексных молекул [16]

Атом инертного газа (R)	Атом галогена (Y)	Длина волны на различных переходах молекулы $RY^*$ , нм			
		$D_{1/2} \rightarrow X_{1/2}$	$B_{1/2} \rightarrow X_{1/2}$	$C_{3/2} \rightarrow A_{3/2}$	$B_{1/2} \rightarrow A_{1/2}$
Ne	F	106	108	110	111
Ar	F	185	193	203	204
Ar	Cl		175		195
Ar	Br		165	172	183
Kr	F	220	248	275	272
Kr	Cl	200	222	240	235
Kr	Br		207	222	228
Kr	I		190	195	225
Xe	F	264	351	460	410
Xe	Cl	236	308	345	340
Xe	Br	221	282	300	325
Xe	I	203	253	265	320

Таблица 2. Длины волн переходов эксимерных молекул и гомоядерных молекул галогенов [17]

$R_2^*, Y_2^*$	Длина волны, нм
$Ar_2^*$	126
$Kr_2^*$	146
$Xe_2^*$	172
$F_2^*$	158
$Cl_2^*$	259
$Br_2^*$	289
$I_2^*$	342

эмиссионном спектре лишь указанной группы переходов, относящихся к УФ- или ВУФ-диапазонам. При этом наиболее интенсивным является B-X переход. В спектре могут присутствовать более слабые полосы D-X, D-A, C-A переходов, а также полосы молекул галогенов (табл. 1 и 2).

Образование эксимерных и эксиплексных молекул в рабочей среде происходит по разным каналам [2]. Эксимерные молекулы возникают в реакции ассоциации



где  $R^*$ ,  $R$  — атомы инертного газа в возбужденном и основном состояниях соответственно. Скорость реакции (1) пропорциональна квадрату концентрации атомов в основном состоянии. Этим объясняется сильная зависимость интенсивности и вида спектра излучения инертного газа от давления. На рисунке 2 показано изменение спектра излучения ксенона при различных давлениях, возбуждаемого барьерным разрядом. Резонансная линия доминирует при низком давлении. При увеличении давления в спектре наблюдаются две широкие полосы, условно называемые первым и вторым континуумами. К первому относят переходы с высоко лежащих колебательных уровней. Данный континуум прилегает к длинноволновой стороне резонансной линии. Второй континуум формируется переходами из нижних колебательных уровней возбужденного состояния и соответственно располагается на большем удалении от резонансной линии в длинноволновую область. При давлении 100 торр и более в спектре доминирует излучение второго континуума.

Эксиплексные молекулы формируются за счет так называемых гарпунных реакций с участием возбужден-

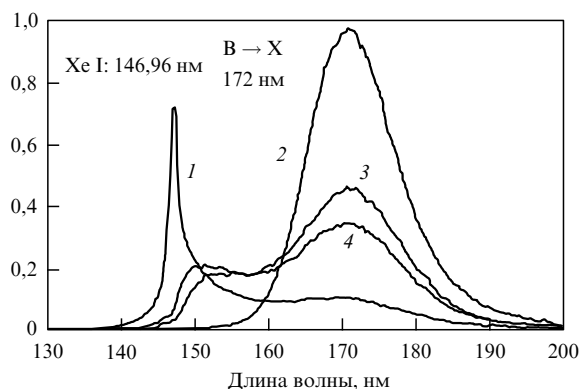
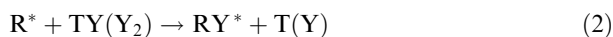
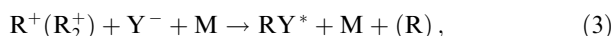


Рис. 2. Спектр излучения ксенона при различных давлениях в случае возбуждения барьерным разрядом [6]: 1 — 37 торр, 2 — 510 торр, 3 — 75 торр, 4 — 52 торр.

ного атома инертного газа и галогеносодержащей молекулы



или в процессе ион-ионной рекомбинации положительного атомарного или молекулярного ионов инертного газа ( $R^+$ ,  $R_2^+$ ) с отрицательным ионом галогена  $Y^-$



где  $TY$ ,  $Y_2$  — галогеносодержащие молекулы,  $Y$  — атом галогена,  $M$  — третья частица, уносящая избыток энергии. В качестве частицы  $M$  могут выступать атомы рабочего или "буферного" инертных газов.

Наиболее эффективными оптическими средами являются ксенон (эффективность излучения  $\eta$  молекул  $Xe_2^*$  — до 60 %, длина волны  $\lambda = 172$  нм [18, 19]), смеси  $Kr-Cl_2$ ,  $Xe-Cl_2$  (молекулы  $KrCl^*$ ,  $\lambda = 222$  нм;  $XeCl^*$ ,  $\lambda = 308$  нм,  $\eta \sim 25$  % [16, 20, 21]),  $Xe-Br_2$  ( $XeBr^*$ ,  $\lambda = 282$  нм,  $\eta \sim 15$  % [22, 23]),  $Xe-I_2$  ( $XeI^*$ ,  $\lambda = 253$  нм,  $\eta \sim 20$  % [24]). Излучение на этих длинах волн хорошо пропускается кварцем, в том числе и на  $\lambda = 172$  нм (кварц типа GE 021 SUPER), что позволяет создавать отпаянные излучатели с большим сроком службы и обеспечивает их широкое применение.

### 3. Типы разрядов, применяемых при возбуждении эксилламп

Рабочая среда в эксиллампах может возбуждаться различными способами. В стационарных и квазистационарных плазмодинамических источниках света для создания плазмы, излучающей на переходах эксиплексных молекул, равновесный плазменный поток смешивается со специальными добавками, содержащими галогены [25, 26]. В импульсных и импульсно-периодических источниках света возбуждение осуществляется широкополосным (тепловым) излучением плазмы мощного электрического разряда [27], электронным пучком [8, 10], разрядом, инициируемым или контролируемым внешним ионизатором [28, 29], а также самостоятельным разрядом [1, 4–6, 8, 9, 11–24 и др.]. Последний способ, как наиболее простой и доступный, получил наибольшее распространение, в том числе и для стационарного режима возбуждения.

Принцип действия электроразрядных эксилламп основан на возбуждении рабочей среды, содержащейся в кварцевой колбе лампы, при прохождении электрического тока. Далее в разрядной плазме образуются эксимерные или эксиплексные молекулы, которые излучают в УФ- или ВУФ-области спектра. Высокая эффективность определяется тем, что энергия электрического поля посредством возбуждения и ионизации частиц преобразуется в оптическое излучение без существенных потерь, а поглощение компонентами рабочей среды и возбужденными молекулами и ионами в источниках спонтанного излучения оказывает очень малое влияние по сравнению с поглощением в активных средах лазеров.

Существует несколько типов самостоятельного разряда, используемого для возбуждения эксилламп. К ним следует отнести, прежде всего, емкостный [30–32] и барьерный разряды [1, 4–6 и др.], объемный разряд высокого давления с УФ-предыонизацией [33–35 и др.], нормальный и поднормальный тлеющие разряды низкого давления [21, 36–43], распределенный искровой [44, 45], микроволновый [46–49] разряды, а также микроканальный разряд [50, 51]. Отметим, что барьерный разряд является разновидностью емкостного разряда. Для эксилламп с рабочими средами на основе смесей инертных газов с галогенами существенно с точки зрения ресурса работы эксилламп наличие или отсутствие контакта рабочей смеси с металлической поверхностью электродов. Ограничение ресурса имеет место вследствие взаимодействия галогена с металлом электрода, что ведет к деградации рабочей среды. Для увеличения ресурса, как правило, используются безэлектродные разряды — емкостный, барьерный или микроволновый. При этом рабочая смесь находится в замкнутой кварцевой полости, форма которой зависит от типа разряда. Плазма разряда не контактирует с электродами, что обеспечивает большой ресурс смеси. Потенциально востребован также и индукционный разряд, как один из безэлектродных типов разряда, но в настоящее время он широко не применяется для возбуждения эксилламп из-за более высокого рабочего напряжения и более сложной конструкции генератора возбуждения.

Разряды с присутствием электродов в разрядной зоне — тлеющий, импульсный объемный высокого давления с УФ-предыонизацией и искровой разряды, несмотря на ограничение ресурса, также используются для возбуждения эксилламп. Для первого характерны простота источника питания (используется постоянный или переменный ток от промышленной сети с частотой 50–60 Гц), возможность возбуждения больших объемов рабочей среды и, соответственно, получения высоких энергетических параметров устройства. В случае объемного разряда с УФ-предыонизацией оказывается возможным возбуждать среду при высоком давлении, что позволяет получать наибольшие удельные энергетические параметры — плотность мощности и удельную энергию излучения.

### 4. Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты проводились с эксиллампами, изготовленными из кварцевых труб (кварц типа GE 214 SUPER) с толщиной стенки 1,5–2,5 мм. Перед заполнением рабочей смесью излучатели отжигались в муфельной печи, откачивались и пассивировались используемым в даль-

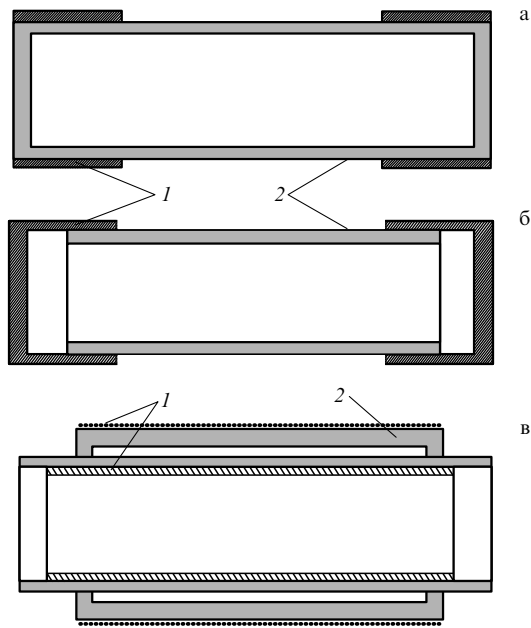


Рис. 3. Конструкции эксимерных ламп емкостного (а), тлеющего (б) и барьерного (в) разрядов: 1 — электроды, 2 — стенки колб ламп.

нейшем галогеном. На рисунке 3 приведены наиболее распространенные конструкции излучателей эксимерных ламп емкостного, тлеющего и барьерного разрядов. Electroдами в случае емкостного разряда служили размещенные на концах кварцевой трубы металлические цилиндры, плотно прилегающие к ее внешней поверхности. Как правило, при долговременной работе эксимерной лампы применялось воздушное принудительное охлаждение. Охлаждение эксимерных ламп барьерного разряда коаксиальной конструкции осуществлялось за счет протока воды через внутреннюю трубу. Electroды при этом располагались на внешней поверхности внешней трубы и на внутренней поверхности внутренней трубы. Один или оба электрода для пропуска излучения в нужном направлении изготавливались из металлической сетки. Возбуждение эксимерных ламп барьерного и емкостного разрядов осуществлялось одно- или двухполярными импульсами напряжения с варьируемыми длительностью (0,2–2 мкс) и частотой повторения (10–100 кГц). Мощность генераторов изменялась от 10 до 1500 Вт. Эксимерные лампы тлеющего разряда могли быть коаксиальными [21] или цилиндрическими (см. рис. 3). Преимуществом первой конструкции является возможность эффективного охлаждения лампы протоком воды через внутреннюю трубу. В то же время цилиндрическая лампа наиболее проста и позволяет легко увеличивать длину конструкции и, соответственно, мощность излучения. Именно такая конструкция эксимерной лампы тлеющего разряда была использована в настоящей работе для получения мощности излучения на уровне 1,5 кВт. Для данной эксимерной лампы применялось воздушное охлаждение. Замена воздушного охлаждения водяным уменьшает габариты эксимерной лампы, но существенно усложняет конструкцию излучателя. Источники питания состояли из повышающего сетевого трансформатора мощностью до 7 кВт, напряжением до 15 кВ и регулятора напряжения. Данная конструкция излучателя и система питания, по-видимому, наиболее просты для достижения средней мощности излучения 1 кВт и более.

Мощность излучения определялась калиброванным фотоприемником ФЭК-22 СПУ по традиционной методике [52]. Регистрация импульсов тока, напряжения, а также временного хода импульсов излучения осуществлялась соответственно с помощью токовых шунтов, делителей напряжения, ФЭК-22 СПУ и осциллографа TDS-224. Свечение разряда фиксировалось с помощью цифрового фотоаппарата. Рабочие смеси, состоявшие из рабочего инертного газа (криптона или ксенона), галогена ( $\text{Cl}_2$ , или  $\text{Br}_2$ , или  $\text{I}_2$ ) и в случае применения добавок буферного инертного газа (гелия или неона) готовились непосредственно в излучателе эксимерной лампы или в специальном смесителе.

## 5. Определение параметров возбуждения в эксимерных лампах

Для адекватного представления о динамике различных процессов, протекающих в газоразрядной плазме эксимерных ламп, необходимо определять мощность накачки и напряжение на разрядном промежутке. При использовании тлеющего или импульсного объемного разряда это можно сделать относительно просто — по осциллограммам тока и напряжения. В этом случае падение напряжения на электродах эксимерной лампы  $U$  и экспериментально регистрируемый ток во внешней цепи  $I$  совпадают соответственно с напряжением на плазме разряда  $U_a$  и током проводимости  $I_a$ . Однако при возбуждении безэлектродными разрядами (барьерным и емкостным) измерения напряжения на электродах и тока во внешней цепи недостаточны для определения  $I_a$  и  $U_a$ . Поэтому для выявления оптимальных условий возбуждения и причин зависимости эффективности от режима возбуждения важно определение таких параметров возбуждения, как активные составляющие тока  $I_a$  и падения напряжения  $U_a$  на газоразрядном промежутке, мгновенное значение активной мощности  $P_a$  и введенной к текущему моменту времени энергии. Кроме того, как показывают оценки, в случае барьерного разряда имеет место заметное влияние тока смещения через емкостной газоразрядный промежуток  $C_T$ . Отметим, что величина  $C_T$  может достигать 10% и более относительно емкости диэлектрических барьеров. При этом индуктивность газоразрядного промежутка не оказывает заметного влияния как в случае барьерного, так и емкостного разрядов. Алгоритм расчета величин  $P_a$ ,  $U_a$  и  $I_a$  для случая барьерного разряда приведен в [53]:

$$P_a = I_a U_a. \quad (4)$$

Напряжение  $U_a$  может быть найдено по второму правилу Кирхгофа с использованием экспериментально измеряемых величин временного хода напряжения на разрядной ячейке  $U$ , а также падения напряжения на емкости диэлектрика  $U_d$ :

$$U_a = U - U_d. \quad (5)$$

Напряжение  $U_d$  можно вычислить, зная перемещенный заряд  $Q$  и емкость диэлектрических барьеров  $C_d$ :

$$U_d = \frac{Q}{C_d}. \quad (6)$$

Перемещенный в цепи заряд можно определить интегрированием тока с учетом начальных условий

$$Q(t=0) = Q_0:$$

$$Q(t) = \int_0^t I(t') dt' + Q_0. \quad (7)$$

Активная составляющая тока  $I_a$  может быть получена с использованием экспериментально регистрируемого полного тока  $I$ :

$$I_a = I - C_T \frac{\partial U_a}{\partial t}. \quad (8)$$

Величины  $C_d$  и  $C_T$  определяются исходя из геометрических размеров ячейки и диэлектрической проницаемости применяемого диэлектрика или по наклону соответствующих участков вольт-кулоновской характеристики разряда [54–56]. Введенная в плазму энергия как функция времени  $E(t)$  находится в результате интегрирования выражения (4):

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

Для емкостных эксилламп в силу малости величины  $C_T$  можно положить  $I_a \approx I$ . Учет влияния емкости газоразрядного промежутка наиболее значим при короткоимпульсном возбуждении и позволяет получать более полную информацию о параметрах отдельного импульса и средней мощности возбуждения.

## 6. Эксилламп с возбуждением тлеющим разрядом

Классический тлеющий разряд широко используется в источниках спонтанного излучения при малых давлениях рабочей среды. При этом электроды располагаются в рабочем объеме. Источником питания может служить трансформатор, подключенный к промышленной сети, или трансформатор и выпрямитель. При проведении исследований перед трансформатором обычно устанавливается регулятор напряжения. Конструкция излучателя эксилламп тлеющего разряда состоит из кварцевой трубы и электродов, расположенных по ее торцам, или из двух коаксиально расположенных кварцевых трубок, внутренняя из которых обычно охлаждается водой [40, 41]. Эксилламп тлеющего разряда наиболее легко позволяют увеличить возбуждаемый объем рабочей среды и соответственно среднюю мощность излучения.

### 6.1. Оптимизация состава и давления смеси KrCl- и XeCl-эксилламп

Импульсный тлеющий разряд был впервые использован для возбуждения эксилламп в работе [36]. Эффективность излучения при этом не превышала 1%. В [37, 38] при возбуждении стационарным тлеющим разрядом в трубке диаметром 14 мм и длиной 28 см мощность излучения в смесях Xe(Kr)-Cl<sub>2</sub> составила ~ 8 Вт при эффективности до ~ 12%. Было обнаружено наличие двух стадий разряда — слаботорочной, характеризующейся малым значением тока (до нескольких миллиампер), высоким напряжением, однородным слабым свечением и эффективностью до 10–15%, и сильноторочной, когда при увеличении тока разряд переходил в фазу (нормальный тлеющий разряд) с существенно большими проводимостью и интенсивностью излучения. Более подробно

характеристики Xe(Kr)Cl-эксилламп с возбуждением слаботорочным тлеющим разрядом исследованы в работе [43], где были получены эффективность и удельная мощность излучения соответственно 30% и 50 мВт см<sup>-3</sup>. Столь большое значение эффективности имеет место благодаря относительно малому падению напряжения в катодном слое слаботорочного тлеющего разряда из-за высокого сопротивления плазмы положительного столба. Кроме того, в слаботорочном тлеющем разряде фотоэмиссия под действием излучения разряда уменьшает катодное падение напряжения. Слаботорочный тлеющий разряд более легко получать в трубках малого диаметра или в коаксиальных излучателях при малых зазорах между внешней и внутренней трубкой.

В отличие от слаботорочного тлеющего разряда, однородно заполняющего всю поверхность трубки, сильноторочный разряд (нормальный тлеющий разряд) в оптимальных режимах занимает лишь часть поперечного сечения трубки. Увеличение общего давления или содержания галогенонесителя приводит к стягиванию разряда в узкий яркий канал. И, наоборот, при уменьшении общего давления или парциального давления галогенонесителя разряд становится все более однородным и занимает все больший объем. Максимальная мощность излучения получена (в зависимости от условий возбуждения) в диапазоне давлений от долей до десятка торр при соотношении давлений компонентов смеси инертный газ/галоген от 1/3 до 1/10. Рабочая смесь может включать также буферный газ, в качестве которого используются легкие инертные газы гелий или неон. Это обеспечивает, во-первых, снижение напряжения пробоя и, соответственно, позволяет применять источники питания меньшего выходного напряжения. Во-вторых, при увеличении удельной мощности возбуждения в тройной смеси повышается эффективность и мощность излучения [57]. Максимальная эффективность излучения эксиплексных молекул при возбуждении тлеющим разрядом реализуется при давлении 0,5–2 торр. На рисунке 4 приведена зависимость эффективности излучения молекул XeCl\* в нормальном тлеющем разряде от мощности возбуждения. Оценка удельной мощности возбуждения, при которой достигается максимальная эффективность, дает значение ~ 0,3 Вт (см<sup>3</sup> торр)<sup>-1</sup>, что составляет

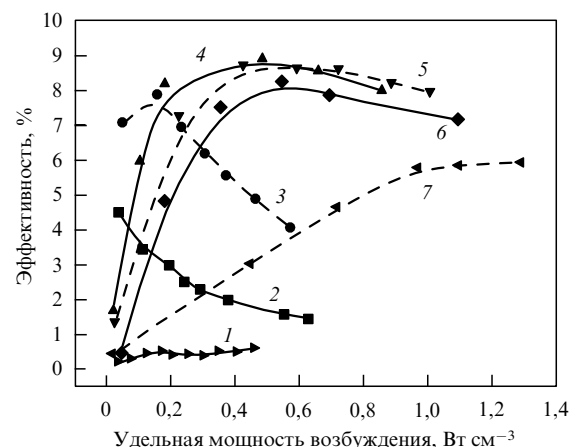


Рис. 4. Зависимость эффективности излучения молекул XeCl\* от мощности возбуждения для смеси Xe/Cl<sub>2</sub> = 3/1 при давлениях менее 0,25 торр (1), 0,25 торр (2), 0,5 торр (3), 1 торр (4), 2 торр (5), 4 торр (6), 6 торр (7).

$\sim 7 \times 10^{-18}$  Вт на частицу. Следует отметить, что эффективность  $\sim 25\%$  регистрируется только в положительном столбе сильноточного тлеющего разряда без учета падения напряжения в катодном слое, которое может составлять до половины полного напряжения на эксилampe [21]. В [21, 41, 42] мы сообщали о создании коаксиальных и цилиндрических KгCl- и ХеCl-эксилamp, возбуждаемых стационарным тлеющим разрядом, со средней мощностью излучения в УФ-области спектра 100–200 Вт.

### 6.2. Эффективность эксилampы тлеющего разряда

Анализ процессов образования эксиплексных молекул в условиях сильноточного тлеющего разряда показывает [42], что из двух возможных каналов их формирования — ион-ионной рекомбинации и гарпунной реакции основным является второй процесс (см. (2)). Оценить скорость образования, например, молекул ХеCl\* для условий квазистационарного режима в случае рабочей среды Хе-Cl<sub>2</sub> эксилampы можно следующим образом. Концентрацию электронов  $N_e$  находим по соотношению  $j = -eN_e V_{др}$  [30], используя экспериментальные значения тока разряда, диаметр канала разряда и падение напряжения на электродах разрядной трубки. Скорость дрейфа электронов  $V_{др}$  определяется величиной приведенного электрического поля  $E/N$  ( $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — плотность рабочей смеси) для данного момента времени [58]. Для концентрации электронов получаем  $N_e \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Концентрацию метастабильных атомов ксенона  $N_{Xe^*}$  оцениваем из соотношения

$$N_{Xe^*} \sim \frac{K_B N_e N_{Хе}}{K_T N_{Cl_2}} \sim 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}, \quad (10)$$

где  $N_{Хе}$ ,  $N_{Cl_2}$  — концентрации ксенона и хлора,  $K_B$  и  $K_T$  — константы скоростей возбуждения и гарпунной реакции. Для данных условий скорость образования молекул ХеCl\* в процессе гарпунной реакции составляет

$$\frac{d[ХеCl^*]}{dt} = K_T N_{Xe^*} N_{Cl_2} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}. \quad (11)$$

В то же время удельная мощность излучения при этом достигает  $\sim 1 \text{ Вт см}^{-3}$ , что соответствует высвечиванию  $\sim 10^{18}$  молекул в 1 с из 1 см<sup>3</sup> плазмы. Это означает, что скорость безызлучательного распада молекул ХеCl\* в плазме тлеющего разряда низка. Следовательно, высокую эффективность излучения в данных условиях можно объяснить высокой эффективностью образования эксиплексных молекул в гарпунной реакции и малой скоростью их безызлучательного распада.

### 6.3. Эксилampа тлеющего разряда с мощностью излучения больше 1,0 кВт

Простота конструкции эксилampы тлеющего разряда и источника питания позволяют легко масштабировать устройство и получать большие мощности излучения. Нами была создана цилиндрическая эксилampа с мощностью излучения на молекулах KгCl\* 1,6 кВт и на молекулах ХеCl\* 1,1 кВт. Излучатель многосекционной эксилampы представлял собой три параллельно включенные ветви, образованные четырьмя отдельными секциями, включенными последовательно (рис. 5). Полная длина ветви составляла  $\sim 4$  м. Внешний диаметр кварцевых труб с толщиной стенки  $\sim 2$  мм, использованных при изготовлении эксилampы, был равен 56 мм для

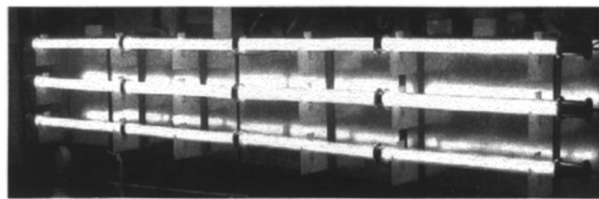


Рис. 5. Внешний вид эксилampы тлеющего разряда мощностью 1,5 кВт.

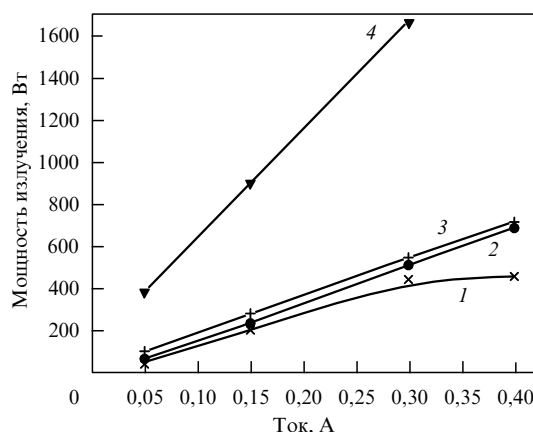


Рис. 6. Зависимости средней мощности излучения молекул KгCl\* от тока разряда для ветвей эксилampы, изготовленных из кварцевых трубок диаметром 52 мм (1) и 56 мм (2, 3), а также при включении всего излучателя (4). Смесь He/Kг/Cl<sub>2</sub> = 2/5/1 при давлении 0,3 торр.

двух ветвей и 52 мм для третьей ветви. Рабочая смесь приготавливалась в смесителе, а затем при нужном давлении напускалась в полость лампы. Для возбуждения применялись три независимых регулируемых от 0 до 15 кВ источника переменного напряжения, подключенных к промышленной сети. Были проведены исследования работы отдельной секции, отдельных ветвей эксилampы и эксилampы в целом. Оптимальное давление для трубок диаметром 52–56 мм при напряжении до 15 кВ составило 0,3 торр. На рисунке 6 приведены зависимости мощности излучения от разрядного тока при работе каждой ветви KгCl-эксилampы, а также полной мощности излучения. Более высокие мощности излучения достигались при использовании кварцевых трубок с внешним диаметром 56 мм. При испытании отдельной ветви из четырех секций на длине волны  $\sim 222$  нм была получена средняя мощность излучения 0,7 кВт при эффективности  $\sim 12\%$  (диаметр трубок равнялся 56 мм). При одновременном включении всех трех ветвей средняя мощность излучения составила 1,6 кВт, а эффективность — более 10%.

При замене криптона на ксенон пробивное напряжение и сопротивление газоразрядной плазмы увеличивались, что уменьшало среднюю мощность возбуждения. Это происходило из-за сравнительно малого максимального напряжения источников питания. Поэтому максимальная средняя мощность излучения на молекулах ХеCl\* была меньше, чем на молекулах KгCl\*, и составила 1,1 кВт, средняя мощность излучения одной ветви с кварцевыми трубками диаметром 56 мм — 0,4 кВт, а с трубками диаметром 52 мм — 0,3 кВт.

Максимальная эффективность излучения достигалась при сравнительно небольших токах разряда как в двойных, так и в тройных смесях и составила для  $KrCl$ -эксилампы  $\sim 20\%$  и для  $XeCl$ -эксилампы  $\sim 15\%$ . Рабочие давления смесей данной эксилампы были меньше по сравнению с используемыми в работах [21, 42]. Причина — более низкие напряжения источников питания на единицу длины излучателя. При повышении плотности тока разряда максимальные средние мощности излучения на обеих молекулах достигались в случае использования тройных смесей с добавками легких инертных газов [57]. Полученные значения параметров для данного излучателя не являются предельными и могут быть увеличены при использовании более мощных и высоковольтных источников питания, росте рабочего давления смеси, а также при более интенсивном охлаждении кварцевых трубок и электродов. Отметим, что катодное и анодное падения потенциала регистрировались только на концах отдельных ветвей в крайних секциях, а в центральных секциях наблюдался положительный столб тлеющего разряда.

На рисунке 7 приведены осциллограммы мощности излучения, тока и напряжения для одной ветви, а также расчетная кривая мощности возбуждения. Как мы отметили, для возбуждения использовалось переменное напряжение от трансформатора, подключенного к промышленной сети. Видно, что импульсы излучения соответствуют по длительности импульсам тока, не зависят от полярности импульсов тока и практически повторяют

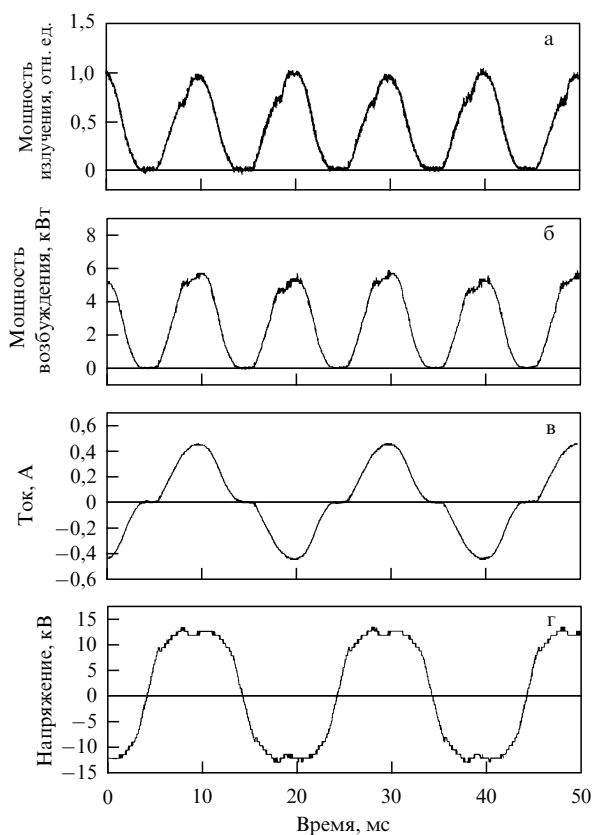


Рис. 7. Типичные осциллограммы мощности излучения молекул  $KrCl^*$  (а), тока разряда (в), напряжения (г) и расчетная кривая мощности возбуждения для одной ветви эксилампы (б). Смесь  $He/Kr/Cl_2 = 2/5/1$  при давлении 0,3 торр.

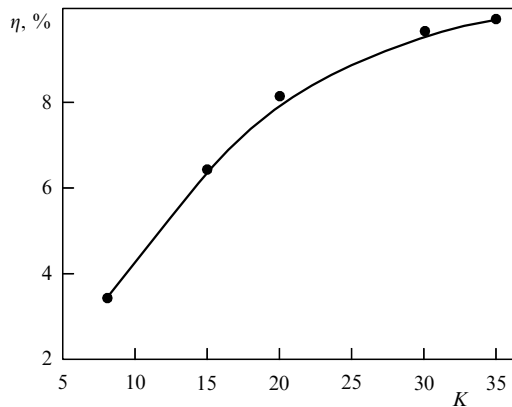
временной ход кривой мощности возбуждения. Спектр излучения эксилампы является типичным для эксиламп, возбуждаемых тлеющим разрядом. Основная мощность сосредоточена в полосе В-Х (более 70 % мощности).

## 7. Эксилампы с возбуждением емкостным разрядом

В общем случае высокочастотный разряд емкостного типа может быть электродным или безэлектродным — в зависимости от того, соприкасается плазма разряда с поверхностью электродов или отделена от них слоями диэлектрика. С точки зрения применения разряда данного типа для возбуждения эксиламп целесообразно использовать безэлектродный емкостный разряд, поскольку в данном случае обеспечивается больший ресурс рабочей смеси. Основные отличия емкостного разряда от барьерного (эксилампы с таким возбуждением рассмотрены в следующем разделе) — относительно низкое давление рабочей смеси (до десятков торр) и большое межэлектродное расстояние (десятки сантиметров). Безэлектродный емкостный разряд для возбуждения эксиламп был впервые применен в работе [32]. Для безэлектродного емкостного и барьерного разрядов принципиально наличие диэлектрического барьера и, соответственно, ограничение энергии, вводимой в плазму в течение отдельного импульса возбуждения. Эквивалентные электрические схемы безэлектродного емкостного и барьерного разрядов одинаковы, за исключением того, что во втором случае, как указывалось выше, заметную роль при протекании тока может играть емкость межэлектродного промежутка  $C_1$ . Однако плазма в эксилампах емкостного разряда по своим характеристикам более близка к плазме эксиламп тлеющего разряда. Таким образом, эксилампы с возбуждением емкостным разрядом обладают рядом свойств, характерных для эксиламп как барьерного, так и тлеющего разрядов.

### 7.1. Оптимизация рабочих смесей $XeCl$ -, $XeBr$ - и $KrCl$ -эксиламп

Оптимизация рабочей среды в случае эксиламп емкостного разряда проводилась для бинарных смесей  $Kr(Xe)Cl_2$ ,  $Xe-Br_2$ . Для всех указанных смесей полное оптимальное давление не превышало  $\sim 15$  торр для характерного межэлектродного расстояния  $\sim 20$  см при соотношении давлений компонентов инертный газ/галоген от 7/1 до 35/1. При снижении давления и (или) дальнейшем уменьшении содержания галогена разряд становился все более однородным (диффузным). Однако мощность излучения при этом падала. На рисунке 8 приведена зависимость эффективности излучения  $KrCl$ -эксилампы при полном давлении 7 торр и мощности излучения до 7 Вт от соотношения парциальных давлений  $Kr$  и  $Cl_2$ . Из рисунка видно, что оптимальное содержание  $Cl_2$  в смеси составляет  $\sim 3\%$ . Дальнейшее уменьшение доли  $Cl_2$  не дает заметного роста эффективности излучения. Кроме того, при этом существенно сокращается ресурс рабочей смеси. Поэтому при создании отпаянных образцов эксиламп более выгодно использовать смеси с концентрацией хлора на 10–20 % выше оптимальной. Отметим, что небольшие (до 30 %) добавки буферного газа  $He$  ( $Ne$ ) так же, как и для эксиламп тлеющего разряда, приводили к увеличению мощности и эффективности излучения.

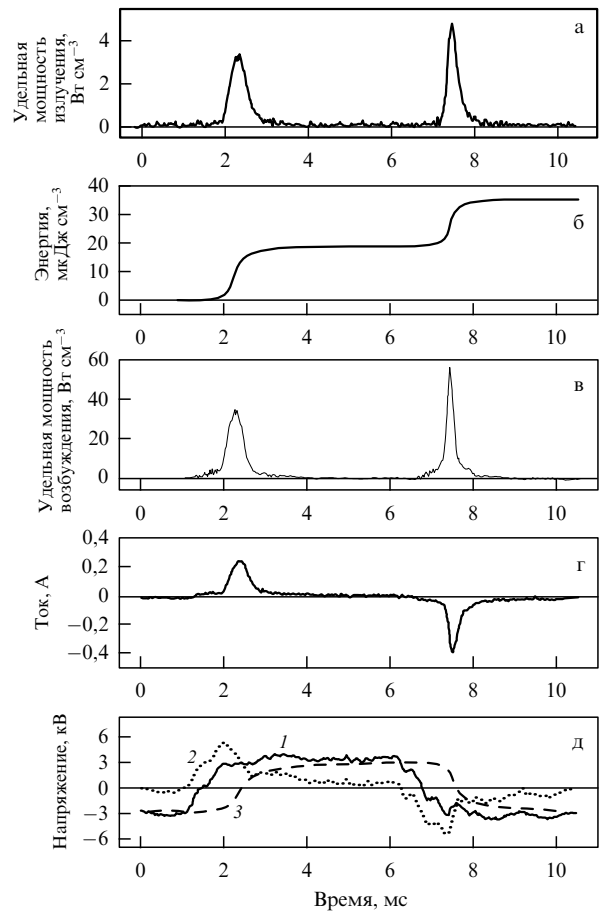


**Рис. 8.** Зависимость эффективности эксилампы емкостного разряда  $\eta$  от соотношения  $K$  парциальных давлений криптона и хлора:  $K = p_{Kr}/p_{Cl_2}$ . Полное давление смеси 7 торр, максимальная мощность излучения 7 Вт.

## 7.2. Влияние режима возбуждения

Режим возбуждения, определяемый в случае разрядов с ограничением тока диэлектрическими барьерами скоростью нарастания и спада напряжения на электродах устройства, влияет не только на выходную мощность и эффективность, но и на внешний вид разряда. При возбуждении эксилампы емкостного разряда генератором с крутыми передним и задним фронтами (длительностью не более 200–250 нс) формировался узкий, ярко светящийся токовый канал. Эффективность и мощность излучения эксилампы снижались относительно максимальных значений. Лучшие результаты были получены при использовании двуполярных импульсов возбуждения с длительностью переднего и заднего фронтов  $\sim 1$ – $1,5$  мкс и частотой следования до  $\sim 100$  кГц. Токовый канал при этом становился диффузным и расширялся до характерного диаметра  $\sim 1$ – $1,5$  см. Внешне он был похож на положительный столб тлеющего разряда. Величина эффективности, как и в случае барьерного и тлеющего разрядов, зависела от удельной мощности возбуждения и достигала  $\sim 15\%$  для молекул  $\text{XeBr}^*$ .

На рисунке 9 представлены характерные осциллограммы импульсов излучения, тока, напряжения на электродах, а также расчетные кривые напряжения на газоразрядном промежутке и емкости диэлектрических барьеров, мощности и энергии возбуждения для  $\text{XeBr}$ -эксилампы. Для возбуждения использовался генератор двуполярных импульсов с частотой повторения  $\sim 100$  кГц и длительностью переднего и заднего фронтов импульсов напряжения  $\sim 1$  мкс. Из рисунка видно, что импульс излучения коррелирует с кривой мощности возбуждения, а эффективность излучения приблизительно одинакова для положительного и отрицательного полупериодов импульса возбуждения. Сопротивление плазмы при протекании тока составляет от 10 до 100 кОм, что близко к сопротивлению плазмы в эксилампах тлеющего разряда и заметно выше по сравнению с тем, что имеет место при возбуждении барьерным разрядом. При относительно небольших размерах электродов и большом межэлектродном расстоянии емкость межэлектродного промежутка эксилампы не превышает  $\sim 1,5$  пФ. Соответственно величина полного тока, регистрируемого экспериментально, практически совпадает с активной составляющей тока в газоразрядном промежутке.



**Рис. 9.** Осциллограммы импульсов удельной мощности излучения ( $\lambda = 282$  нм) (а), тока (г) и падения напряжения (д) ( $I$  — на электродах, 2 — расчетное падение напряжения на газоразрядном промежутке, 3 — то же на емкости диэлектрических барьеров), мощности (в) и энергии (б) возбуждения для  $\text{XeBr}$ -эксилампы емкостного разряда. Рабочая смесь  $\text{Xe}/\text{Br}_2 = 3/1$ , полное давление 3,5 торр.

Оценка величины концентрации электронов  $N_e$  в плазме столба разряда при условии пренебрежения ионным током относительно электронного по соотношению  $j = -eN_e V_{др}$  дает следующий результат. Если плотность тока  $j$  составляет  $\sim 0,3$  А см $^{-2}$ , а дрейфовая скорость  $V_{др} \sim 7 \times 10^6$  см с $^{-1}$ , то концентрация электронов  $N_e$  равна  $\sim 2,7 \times 10^{11}$  см $^{-3}$  и близка к тому, что наблюдается в условиях тлеющего разряда.

## 8. Эксилампы с возбуждением барьерным разрядом

Барьерным называют разряд, протекание тока в котором ограничено, по крайней мере, одним слоем диэлектрика, а характерные размеры электродов существенно превышают величину межэлектродного промежутка. Это предопределяет необходимость использования источника питания (генератора) с переменным во времени напряжением  $U$ , поскольку в силу закона сохранения суммы токов проводимости и смещения во всей цепи ток проводимости в газоразрядной плазме  $I_a$  определяется током смещения через диэлектрический барьер  $I_{см, бар}$ :

$$I_a = I_{см, бар} - I_{см, пр}, \quad (12)$$



где  $I_{см, пр}$  — ток смещения через емкость газоразрядного промежутка. В свою очередь, величина  $I_{см, бар}$  пропорциональна скорости изменения напряжения на диэлектрическом барьере:

$$I_{см, бар} = \frac{\partial C_d U}{\partial t} = C_d \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial C_d}{\partial t}. \quad (13)$$

Барьерный разряд для получения континуумов инертных газов одними из первых использовали авторы работы [4]. Значительный прогресс в исследовании и создании Хе<sub>2</sub>-эксилламп достигнут в работах [18, 19, 59–61 и др.]. На основе ксеноновых барьерных эксилламп разрабатывается целое семейство источников спонтанного излучения в ВУФ-области спектра, а также безртутных линейных и плоских люминесцентных ламп.

Плазма барьерного разряда имеет ряд характерных особенностей, а именно:

- высокое давление (сотни торр и выше);
- пространственная неоднородность и малая длительность протекания различных физико-химических процессов. Как правило, наряду с объемным разрядом в плазме наблюдаются хаотически расположенные микро-разряды (филаменты), длительность протекания тока в которых не превышает 10–50 нс;

- сильная неравновесность плазмы. При этом средние температуры электронов могут достигать нескольких электронвольт, в то время как температура газа остается близкой к температуре диэлектрических барьеров;

- возможность вариации приведенной напряженности электрического поля  $E/p$  ( $E$  — напряженность электрического поля,  $p$  — давление) в плазме изменением таких внешних параметров, как напряжение питания, давление рабочей смеси, толщина газоразрядного промежутка (ее величина, как правило, не превышает единиц – десятков миллиметров);

- возможность масштабирования и задание произвольной геометрии излучающей поверхности лампы.

Все это, наряду с отсутствием контакта рабочей среды с поверхностью металла и, соответственно, большим ресурсом смеси, предопределило широкое использование барьерного разряда для возбуждения эксилламп.

Одним из параметров, влияющих на эффективность работы и ресурс эксилламп, является ее температурный режим. Из результатов многих экспериментов следует, что повышение температуры колбы лампы приводит к снижению как эффективности, так и ресурса. Это вызывает необходимость принудительного охлаждения колбы. На практике часто используется одно- или двустороннее водяное охлаждение. В этом случае для КrCl- и ХеCl-эксилламп удается довести уровень средней по времени и по объему удельной мощности возбуждения примерно до 1 Вт см<sup>-3</sup> при удельной мощности излучения до 0,1 Вт см<sup>-3</sup>.

### 8.1. Влияние формы импульса возбуждения

В качестве источника возбуждения для эксилламп барьерного разряда традиционно используются генераторы с синусоидальной формой импульса напряжения. При этом характерные значения эффективности преобразования вводимой в рабочую среду мощности в оптическое излучение достигают 10–15 % [5, 16]. Ранее в работе [62] отмечалось преимущество использования синусоидальной формы импульса напряжения по сравнению с

коротким высоковольтным импульсом длительностью 50–100 нс для возбуждения Хе<sub>2</sub>-, Кr<sub>2</sub>-, КrCl- и ХеCl-эксилламп барьерным разрядом. Основной причиной низкой эффективности в случае применения для возбуждения коротких высоковольтных импульсов напряжения, формируемых в генераторе на основе тиратрона ТГИ 10000/25, является, во-первых, снижение доли энергии, вкладываемой в газоразрядную плазму, относительно запасаемой в накопителе. Во-вторых, при этом имеют место существенные перенапряжения на газоразрядном промежутке, что приводит к неоптимальным с точки зрения формирования эксиплексных молекул значениям приведенной напряженности электрического поля  $E/p$  в газоразрядной плазме. Наряду с этим в недавних работах [18, 19] было продемонстрировано увеличение эффективности барьерной Хе<sub>2</sub>-эксилламп при короткоимпульсном (длительность фронта импульса напряжения ~ 250–750 нс) возбуждении по сравнению с импульсами возбуждения синусоидальной формы. По мнению авторов [18], наблюдаемый рост эффективности обусловлен формированием оптимальной функции распределения электронов по энергии и минимизацией упругих и неупругих потерь энергии электронов в процессах, не приводящих к образованию эксимерных молекул Хе<sub>2</sub>\*. В работе [19] отмечается, что для повышения эффективности Хе<sub>2</sub>-эксилламп необходимо формировать однородный (диффузный) разряд с существенно меньшей плотностью электронов по сравнению с плотностью электронов, характерной для филаментов. Однородность разряда при этом обеспечивается вследствие крутого фронта импульса напряжения.

Поскольку образование эксиплексных и эксимерных молекул происходит по-разному, есть основания предположить, что и условия, соответствующие получению максимальной эффективности, например, Хе<sub>2</sub>- и КrCl-эксилламп могут отличаться.

Для проверки влияния формы импульса возбуждения на параметры эксилламп использовались два генератора, один из которых обеспечивал получение напряжения синусоидальной формы с частотой 17 кГц, а второй — одно- или двуполярных импульсов напряжения с длительностью по основанию 2 мкс, длительностью переднего и заднего фронтов ~ 250 нс или ~ 1 мкс при частоте следования импульсов 10–100 кГц. В экспериментах предварительно была осуществлена оптимизация давления и состава смеси, состоявшей из Кr и Cl<sub>2</sub>. Лучшие результаты были получены для смеси Кr/Cl<sub>2</sub> = 200/(1–0,5) при полном давлении ~ 200 торр. С уменьшением полного давления или содержания Cl<sub>2</sub> в смеси наблюдается все более однородный объемный разряд, однако мощность излучения при этом снижается. Повышение давления или содержания Cl<sub>2</sub> в смеси приводит к контрагированию разряда, вследствие чего также уменьшается мощность излучения.

Зависимости эффективности работы лампы и удельной мощности излучения от удельной мощности возбуждения для оптимальной рабочей смеси при синусоидальной форме импульсов возбуждения приведены на рис. 10. Абсолютные значения эффективности и тенденция ее зависимости от мощности возбуждения хорошо совпадают с результатами, полученными в работе [16]. Визуально при функционировании лампы наблюдается достаточно однородный разряд с диффузными филаментами. На рисунке 11 представлены соответствующие

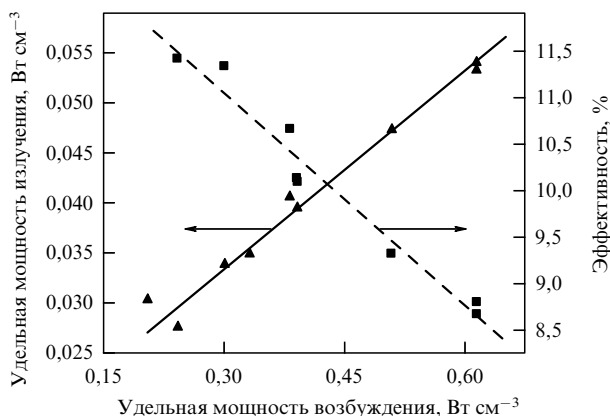


Рис. 10. Зависимости эффективности работы барьерной эксилампы и удельной мощности излучения от удельной мощности возбуждения при синусоидальной форме импульсов возбуждения.

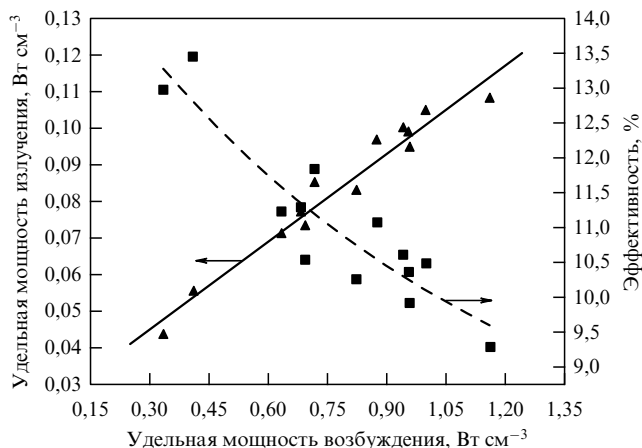


Рис. 12. Зависимости эффективности работы лампы и удельной мощности излучения от удельной мощности возбуждения при частоте 93 кГц и однополярной форме импульсов возбуждения.

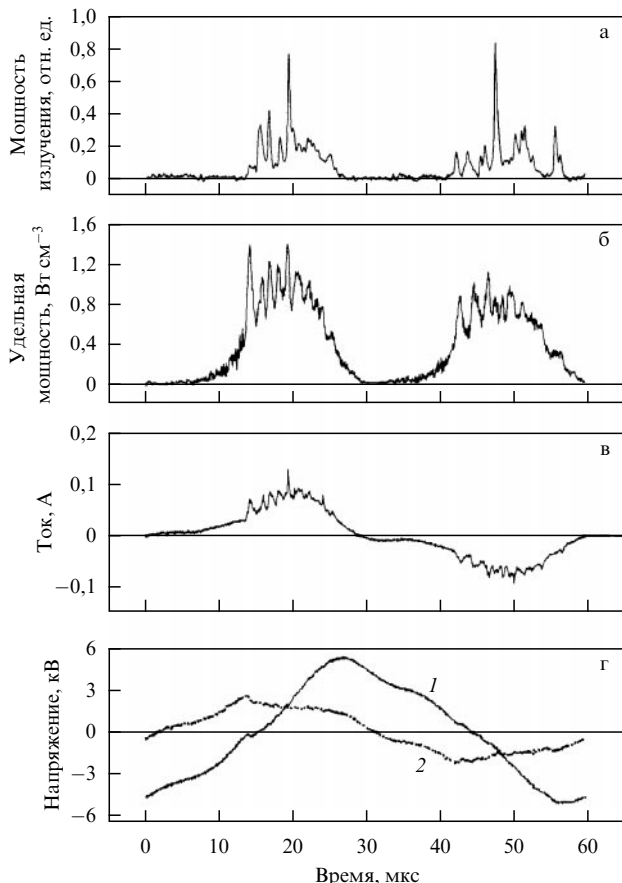


Рис. 11. Осциллограммы импульсов мощности излучения (а), тока (в), напряжения на электродах барьерной эксилампы (г, кривая 1), расчетные кривые удельной мощности возбуждения (б) и падения напряжения на газоразрядном промежутке (г, кривая 2) при синусоидальной форме импульсов возбуждения.

условиям рис. 10 осциллограммы импульсов тока, напряжения на электродах лампы, импульс излучения на В-Х переходе молекулы  $\text{KrCl}^*$ , расчетные кривые мощности возбуждения и падения напряжения на газоразрядном промежутке. Видно, что излучение имеет место в течение большей части активной фазы разряда (после резкого уменьшения напряжения на разрядном промежутке). Следует также отметить модуляцию

интенсивности излучения, наличие задержки ( $\sim 2-2,5$  мкс) импульса излучения относительно начала импульса возбуждения и корреляцию мощности излучения и возбуждения в последующие моменты времени. Характерно относительно постоянное падение напряжения на газоразрядной плазме.

При использовании одно- и двуполярных импульсов возбуждения длительностью по основанию 2 мкс при частотах повторения 17, 33, 60, 93 кГц визуально наблюдается более неоднородное горение разряда с явно выраженными по интенсивности свечения филаментами. На рисунке 12 представлены зависимости эффективности и удельной мощности излучения от удельной мощности возбуждения для случая однополярных импульсов возбуждения при частоте 93 кГц. Для других частот следования и двуполярных импульсов возбуждения результаты близки к приведенным на рис. 12. Необходимо отметить, что удельные характеристики определялись с учетом всего разрядного объема, хотя очевидно, что при наличии явно выраженных филаментов как возбуждение, так и излучение резко неоднородны по объему. Поэтому указанные выше характеристики при наличии филаментов следует рассматривать как средние по разрядному объему. Сравнение рис. 10 и рис. 12 позволяет заключить, что, во-первых, при увеличении вводимой мощности в обоих случаях наблюдается уменьшение эффективности, что можно связать с перевозбуждением и нагревом среды. Во-вторых, при возбуждении короткими импульсами имеет место некоторое преимущество (на  $\sim 20\%$  для одинаковых величин удельной мощности возбуждения).

## 8.2. Влияние давления смеси

Давление газа — один из основных факторов, определяющих характер разряда. Как указывалось выше, при уменьшении давления смеси наблюдается все более однородный разряд. Для проверки возможного влияния степени однородности разряда на эффективность работы  $\text{KrCl}$ -эксилампы был проведен эксперимент при отсутствии визуально наблюдаемых филаментов в газоразрядной плазме, что было реализовано в смеси с соотношением  $\text{Kr}/\text{Cl}_2 = 200/0,5$  при полном давлении 100 торр и короткоимпульсном возбуждении. На

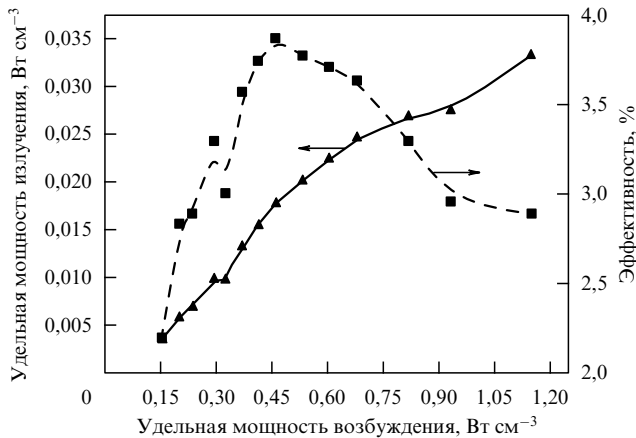


Рис. 13. Зависимости эффективности и удельной мощности излучения от удельной мощности возбуждения в разряде без визуально регистрируемых филаментов при короткоимпульсном возбуждении (смесь  $Kr/Cl_2 = 200/0,5$  при полном давлении 100 торр).

рисунке 13 приведены результаты проверки. Основным отличием от ранее обсуждавшихся данных является, во-первых, немонотонный ход кривой эффективности с максимумом при удельной мощности возбуждения  $\sim 0,45$  Вт см<sup>-3</sup>. Во-вторых, наибольшая эффективность в данном случае оказывается в 2–3 раза ниже по сравнению с полученными для условий рис. 12 при тех же удельных мощностях возбуждения. Кроме того, в отсутствие филаментов, как и в случае возбуждения импульсами синусоидальной формы, наблюдается задержка ( $\sim 0,5$  мкс) импульса излучения относительно начала импульса возбуждения. В то же время при наличии филаментов такая задержка практически отсутствует. Основной причиной данного отличия, вероятно, является большая удельная мощность возбуждения в объеме, занимаемом филаментами. Эта разница может достигать двух порядков и более, так как объем, занимаемый филаментами, по оценкам, во столько же раз меньше полного газоразрядного объема, принимаемого в расчет при определении удельной мощности возбуждения. Сопоставление приведенной напряженности электрического поля  $E/p$ , удельной мощности возбуждения на единицу объема и на одну частицу, эффективности для условий проводившегося эксперимента, а также тлеющего разряда [41] приводит к следующим результатам. Во-первых, в случае сравнимых значений эффективности  $\sim 10\%$  в тлеющем и барьерном с наличием филаментов разрядах имеют место близкие значения  $E/p \sim 10$  В (см торр)<sup>-1</sup>, удельной мощности возбуждения на единицу объема примерно десятки–сотни Вт см<sup>-3</sup>,  $\sim (1-50) \times 10^{-17}$  Вт на одну частицу. При этом для барьерного разряда в расчет принимается объем, занимаемый филаментами. Во-вторых, для существенно более низкой эффективности (2–4%) при однородном горении барьерного разряда без визуально регистрируемых филаментов удельные мощности возбуждения равны  $\sim 10-15$  Вт см<sup>-3</sup> и  $\sim (2-20) \times 10^{-18}$  Вт на одну частицу. Приведенная напряженность  $E/p$  при этом составляет  $\geq 15$  В (см торр)<sup>-1</sup>.

Величина энергии  $W_{уд}$ , вложенной за один период в единицу объема плазмы в барьерном разряде, определяется удельной емкостью диэлектрических слоев лампы  $C_d$  (характерные значения  $C_d \sim 1-1,5$  пФ см<sup>-2</sup>), зазором

газового промежутка  $d$  и амплитудой напряжения питания  $U_{max}$ :

$$W_{уд} \leq \frac{C_d U_{max}^2}{d} \quad (14)$$

Если  $U_{max} \sim 5$  кВ,  $d \sim 5$  мм, то величина  $W_{уд} \approx 20-40$  мкДж см<sup>-3</sup>. При длительностях протекания тока около 50 нс средняя мощность в течение отдельного импульса возбуждения составляет 400–800 Вт см<sup>-3</sup> для условий равномерного распределения вводимой по объему энергии. Однако в случае наличия филаментов, что характерно для барьерного разряда, энерговод осуществляется преимущественно в объеме, занимаемом филаментами. Соответственно, в зоне филаментов значения удельной мощности возбуждения могут достигать единиц–десятков киловатт на кубический сантиметр. Полагаем, что в объеме, занимаемом филаментами, реализуются условия возбуждения, близкие к тем, которые имеют место при возбуждении объемным поперечным разрядом.

Увеличение энергии, вложенной в единицу объема плазмы за один период в случае барьерного разряда, в том числе в режиме однородного горения, возможно при увеличении напряжения питания, использовании диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости. Однако при этом возникают очевидные технические осложнения, такие как недостаточная высокая электрическая прочность диэлектрика, трудности работы с высоким напряжением и т.д.

Таким образом, можно заключить, что наличие филаментов — пространственных зон с высокой удельной мощностью возбуждения — в барьерном разряде является необходимым условием получения высокой эффективности работы  $KrCl$ -эксилампы на основе барьерного разряда. Равномерное распределение той же вводимой мощности возбуждения по объему в условиях однородного разряда приводит к снижению эффективности.

### 8.3. Влияние частоты повторения импульсов возбуждения на эффективность и формирование разряда

Один из факторов, влияющих на условия формирования отдельного филамента, разряда в целом, эффективность и мощность излучения эксилампы, — частота следования импульсов  $\nu$ . Для выяснения влияния данного фактора частота повторения однополярных импульсов при возбуждении  $HeCl$ -эксилампы варьировалась от 10 Гц до 200 кГц. На рисунке 14 представлены фотографии разряда в эксилампе для различных  $\nu$ . Как видно из рисунка, явно выделенные филаменты появляются в плазме разряда при частоте следования импульсов возбуждения  $\nu_0 \sim 1$  кГц. При  $\nu < \nu_0$  в газоразрядной плазме наблюдаются хаотично распределенные по объему диффузные каналы с относительно низкой яркостью свечения (кадр а на рис. 14). При  $\nu \geq \nu_0$  по мере нарастания  $\nu$  увеличивается плотность филаментов, размеры подошвы филаментов и их яркость. При этом растет мощность возбуждения и, соответственно, мощность излучения. Интересной особенностью является отсутствие перекрытия подошв филаментов, что особенно явно наблюдается при  $\nu = 200$  кГц. Причиной формирования ярко светящего отдельного филамента, который обычно остается на одном месте, при  $\nu_0 \sim 1$  кГц

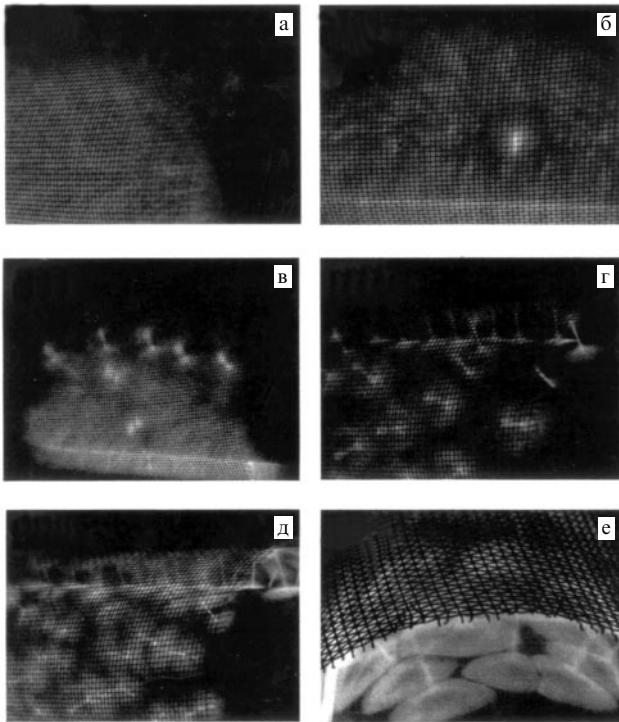


Рис. 14. Внешний вид разряда барьерной эксилампы при частотах повторения импульсов возбуждения 500 Гц (а), 1,1 кГц (б), 1,3 кГц (в), 5 кГц (г), 20 кГц (д), 200 кГц (е).

(кадр б на рис. 14) можно, вероятно, считать влияние остаточной концентрации электронов. При данной частоте и временном интервале между импульсами возбуждения  $\sim 1$  мс остаточная концентрация электронов в зоне филамента достаточна для того, чтобы очередной пробой газового промежутка с последующим формированием филамента осуществлялся вновь в этой зоне.

Изменение внешнего вида, плотности филаментов, интенсивности свечения отдельного филамента и изменение удельной мощности возбуждения при варьировании  $\nu$  может влиять на эффективность работы эксилампы. На рисунке 15 представлены зависимости мощности возбуждения, излучения и эффективности от  $\nu$  для XeCl-эксилампы. Важным фактом является сохранение эффективности для  $\nu < \nu_0$  на уровне, близком к максимальному. Для этого диапазона частоты следования импульсов возбуждения наблюдается разряд с диффузными каналами, хаотично расположенными в разрядном промежутке (см. рис. 14). Характерно отсутствие визуально наблюдаемых подошв филаментов. Это может указывать на то, что необходимый для эффективного образования эксиплексных молекул уровень возбуждения может достигаться как в случае формирования явно выделенных филаментов, так и в разряде с диффузными каналами при низких частотах следования импульсов возбуждения. Однако во втором случае средняя мощность излучения эксилампы мала.

### 9. Спектры излучения эксиламп

Как отмечалось выше, спектр излучения наряду с ресурсом и энергетическими параметрами является одной из основных характеристик источника излучения. Особен-

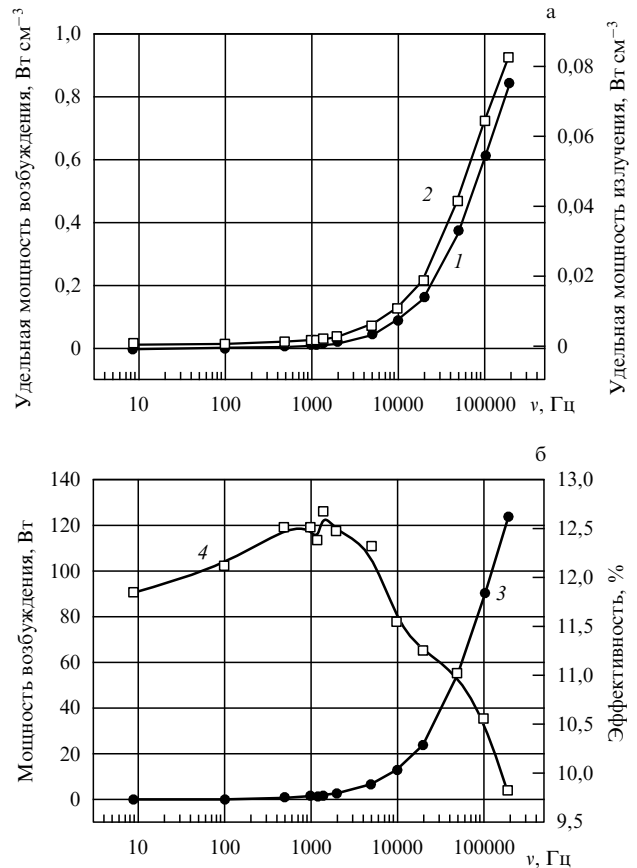


Рис. 15. Зависимости мощности возбуждения (1, 3), излучения (2) и эффективности (4) от частоты  $\nu$  следования импульсов возбуждения для XeCl-эксилампы барьерного разряда.

ность эксиламп с этой точки зрения представляет наличие в эмиссионном спектре лишь отдельных узких полос соответствующих молекул в УФ- или ВУФ-области спектра. На рисунках 16–18 приведены спектры излучения эксиламп емкостного, тлеющего и барьерного разря-

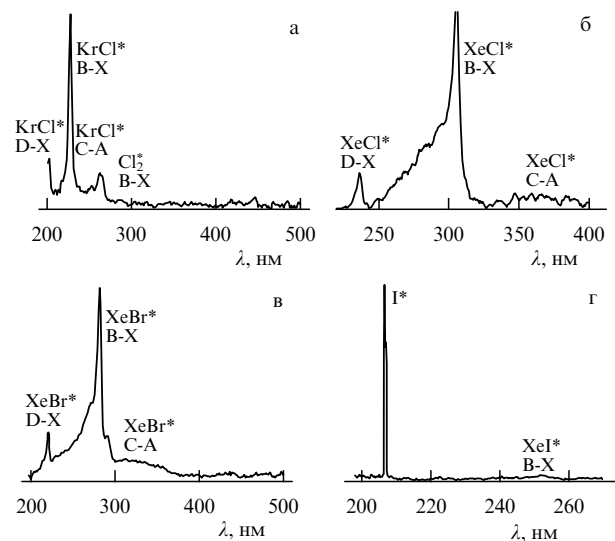


Рис. 16. Спектры излучения эксиламп емкостного разряда для смесей: Kr-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (а), Xe-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (б), Xe-Br<sub>2</sub> при давлении 4,4 торр (в), Xe-I<sub>2</sub> при давлении 1,5 торр (г).

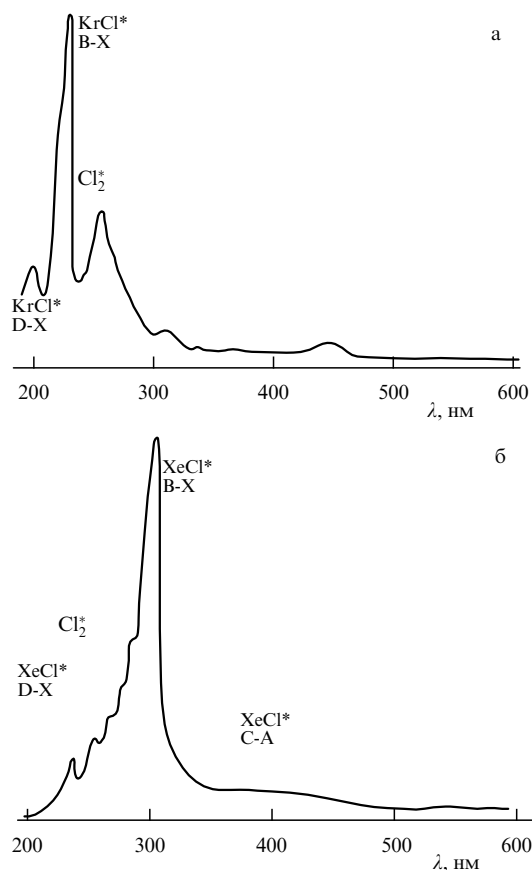


Рис. 17. Спектры излучения эксилламп тлеющего разряда для смеси Kr-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (а), для смеси Xe-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (б).

дов для условий, указанных в табл. 3. Как видно из рис. 16, при возбуждении емкостным разрядом спектральная полуширина наиболее интенсивного В-Х перехода молекул KrCl\* ( $\lambda \sim 222$  нм), XeCl\* ( $\lambda \sim 308$  нм), XeBr\* ( $\lambda \sim 282$  нм) составляет  $\sim 4, 5, 8$  и  $7$  нм соответственно. Для спектров в данных условиях характерно, во-первых, наличие явно выраженных D-X и C-A переходов указанных молекул. Во-вторых, в случае молекул XeBr\* и XeCl\* наблюдается широкое и интенсивное синее крыло полосы В-Х перехода. В спектре ХеI-эксилламп при низком давлении смеси (1,5 торр и менее) наиболее интенсивной оказалась атомная линия йода  $\lambda = 206$  нм (рис. 16 г). При этом интенсивность полосы В-Х перехода молекулы ХеI\* ( $\lambda \sim 253$  нм) существенно ниже. По мере увеличения давления соотношение интенсивностей указанных линии и полосы изменяется, и при давлении 10 торр они становятся соизмеримыми по амплитуде.

Таблица 3. Характеристики эксилламп емкостного, барьерного и тлеющего разрядов, для которых проводилась регистрация спектров

Характеристика	Тип разряда							
	Емкостный				Барьерный		Тлеющий	
Рабочая смесь	Xe-Cl <sub>2</sub>	Kr-Cl <sub>2</sub>	Xe-Br <sub>2</sub>	Xe-I <sub>2</sub>	Xe-Cl <sub>2</sub>	Kr-Cl <sub>2</sub>	Xe-Cl <sub>2</sub>	Kr-Cl <sub>2</sub>
Давление рабочей смеси, торр	6	6	4,5	1,5	120	200	6–9	6–9
Межэлектродный зазор, см	20	20	20	50	0,8	0,8	20–80	20–80
Внешний диаметр трубки, см	3,8	4,2	4,2	3,5	6,5	6,5	1–6	1–6
Длина волны максимума спектрального распределения, нм	308	222	282	206	308	222	308	222

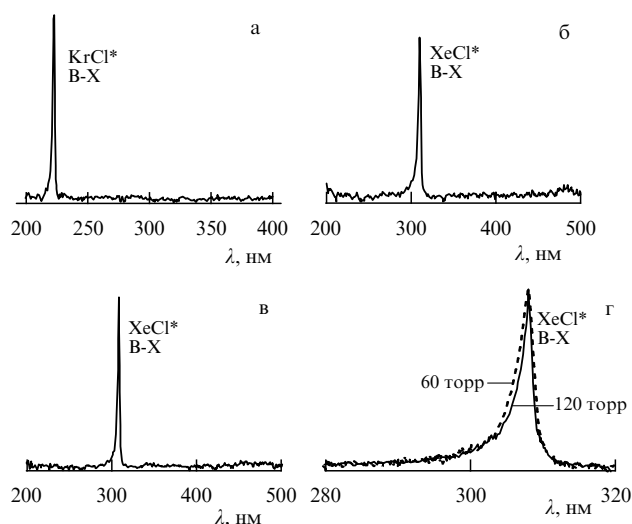


Рис. 18. Спектры излучения KrCl-эксилламп барьерного разряда при давлении смеси 200 торр (а), XeCl-эксилламп барьерного разряда при давлении смеси 60 торр (б) и 120 торр (в). Спектры для двух последних случаев в области максимума совмещены на рис. г.

На рисунке 17 приведены спектры излучения KrCl-, XeCl-эксилламп в случае возбуждения тлеющим разрядом. Сравнение рис. 16 и 17 позволяет заключить, что спектральное распределение излучения в обоих случаях практически одинаково.

Характерной особенностью эксилламп, возбуждаемых барьерным разрядом, является малый зазор и сравнительно высокие давления рабочей среды. На рисунке 18 представлены спектры излучения KrCl-, XeCl-эксилламп при данном способе возбуждения. В этих условиях, как видно из рисунка, в спектре излучения наблюдаются лишь полосы В-Х переходов. Спектральная полуширина перехода В-Х молекулы KrCl\* составляет  $\sim 2$  нм. Полосы D-X, C-A переходов молекулы KrCl\*, а также полоса молекулы Cl<sub>2</sub>\*, присутствовавшие в спектре излучения при возбуждении емкостным и тлеющим разрядами, в случае барьерного разряда практически отсутствуют. Стабильность спектра излучения была проверена в случае отпаянных эксилламп емкостного разряда, ресурс которых составляет не менее 1000 ч [32]. Было получено, что кривые спектрального распределения KrCl-эксилламп при наработке 250 и 850 ч практически одинаковы.

## 10. Время жизни рабочей смеси и ресурс работы эксилламп

Один из важных эксплуатационных параметров источников излучения, в том числе эксилламп, — ресурс работы.

Основным фактором, ограничивающим продолжительность функционирования УФ эксиплексных ламп, является деградация рабочей среды вследствие протекания химической реакции галогена с электродами или(и) с кварцем колбы лампы. С повышением температуры рабочей среды скорость протекания реакций растет, поэтому при увеличении удельной мощности возбуждения применяют воздушное или водяное охлаждение. Срок службы остальных элементов обычно составляет десятки – сотни тысяч часов.

Наименьший ресурс рабочей смеси, который может не превышать нескольких минут, имеют эксилампы тлеющего разряда. Это их основной недостаток. Ограниченный ресурс эксиламп тлеющего разряда обусловлен контактом плазмы с металлическими электродами. Но он может быть увеличен, если использовать электроды из слабо корродирующих материалов, буферный объем, непрерывную прокачку и регенерацию рабочей смеси, что, однако, усложняет конструкцию и повышает стоимость эксилампы. За счет более интенсивного охлаждения также можно уменьшить скорость спада мощности излучения в процессе работы.

Обычно в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом отсутствует контакт плазмы с металлическими электродами, что облегчает создание отпаянных эксиламп и повышает срок службы рабочей смеси. Для увеличения продолжительности работы смеси применяется глубокое обезгаживание при нагревании в муфельной печи с последующей пассивацией внутренней поверхности колбы лампы используемым галогеном. По данной технологии была изготовлена KrCl-эксилампа со следующими размерами: длина 60 см, внешний диаметр 65 мм, толщина газоразрядного промежутка 10 мм. Охлаждение эксилампы осуществлялось протоком воды по внутренней полости внутренней трубки, а также внешним воздушным обдувом. Для возбуждения использовался генератор двуполярных импульсов напряжения длительностью по основанию  $\sim 2$  мкс с частотой повторения 93 кГц и мощностью до 1,5 кВт. Максимальная мощность излучения эксилампы составила  $\sim 115$  Вт, удельные мощности излучения  $\sim 100$  мВт см $^{-2}$ ,  $\sim 0,2$  Вт см $^{-3}$ . Эффективность в данном режиме достигала  $\sim 15\%$ . За 100 ч мощность излучения эксилампы уменьшилась менее чем на 10%.

Эксилампы с возбуждением безэлектродным емкостным разрядом имеют определенное преимущество и относительно эксиламп барьерного разряда, поскольку удельная мощность возбуждения и, соответственно, тепловая нагрузка в этом случае меньше, что приводит к увеличению ресурса работы излучателя. На рисунке 19

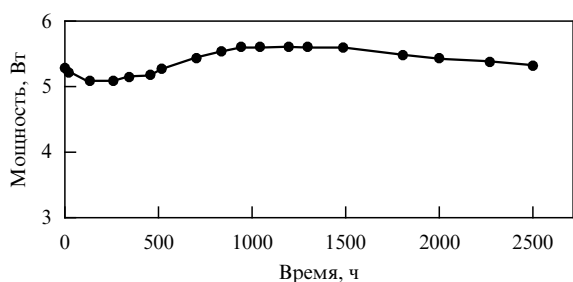


Рис. 19. Зависимость средней мощности KrCl-эксилампы емкостного разряда от времени работы.

представлен результат ресурсных испытаний KrCl-эксилампы. Давление и соотношение компонентов смеси были равны 11 торр и 5/1. Средняя мощность излучения при этом составляла не менее 5 Вт, эффективность —  $\sim 7\%$ . Срок службы данного излучателя превысил 2500 ч, что приемлемо для многих практических приложений.

## 11. Особенности эксиламп по сравнению с другими источниками излучения УФ- и ВУФ-диапазонов

Сравнение эксиламп с другими источниками излучения можно провести по ряду физических, технических и эксплуатационных параметров. Это спектр излучения и его стабильность, энергетические характеристики — полная и удельная мощность излучения, характер работы, ресурс, области применения, характерные размеры излучающей поверхности, что влияет на условия и возможности передачи излучения, конструктивные и технологические особенности, стоимость и др. Проведем сопоставление по основным из данных параметров.

В настоящее время кроме эксиламп доступен широкий набор источников спонтанного и вынужденного (лазеры) излучения в УФ- и ВУФ-областях спектра. Наиболее распространены ртутные (высокого и низкого давления, с добавками других газов и без них), водородные, дейтериевые, металлгалогенные и ксеноновые (импульсные и непрерывного действия) лампы. Среди лазеров УФ- и ВУФ-диапазонов необходимо отметить, прежде всего, эксиплексные и эксимерные лазеры — на данный момент наиболее мощные и эффективные импульсные источники стимулированного излучения в указанном диапазоне длин волн. Кроме того, имеются азотный ( $N_2$ ), гелий-кадмиевый (He-Cd), фторный ( $F_2$ ), аргоновый ионный (Ar II) и другие лазеры.

Использование источников вынужденного излучения предпочтительнее в тех практических приложениях, где необходима высокая плотность мощности излучения (от единиц киловатт до единиц гигаватт на квадратный сантиметр) или высокое пространственное разрешение в процессе облучения (порядка длины волны лазерного излучения) [63]. Как правило, воздействие лазерным излучением на обрабатываемый материал носит локальный характер (абляция, резка, сварка, упрочнение, маркировка деталей). Лазеры УФ- и ВУФ-диапазонов успешно применяются для нанесения тонких пленок при создании элементов микроэлектроники, для обработки полупроводниковых материалов, в том числе в УФ- и ВУФ-микролитографии, медицине и многих других практических приложениях [63–65].

Однако в ряде применений оказывается необходимым равномерное облучение больших объемов или поверхностей большого размера излучением с достаточным уровнем плотности мощности и длиной волны в УФ- или ВУФ-диапазонах спектра. Это обеспечивает возможность возбуждения или разрыва химических связей и протекание необходимых в конкретном приложении фотоиндуцированных химических реакций. На рисунке 20 приведены значения энергии диссоциации ряда химических связей и соответствующие им по величине энергии кванта излучения длины волн В-Х переходов эксимерных и эксиплексных молекул, а также димеров галогенов. Во многом данным требованиям удовлетворяют эксилампы, поскольку они обеспечивают более высокий уровень мощности излучения в указанном диапазоне длин волн по сравнению, например, с ртутными, ксеноновыми дуговыми непрерывными или импульсными лампами, а также дейтериевыми лампами,

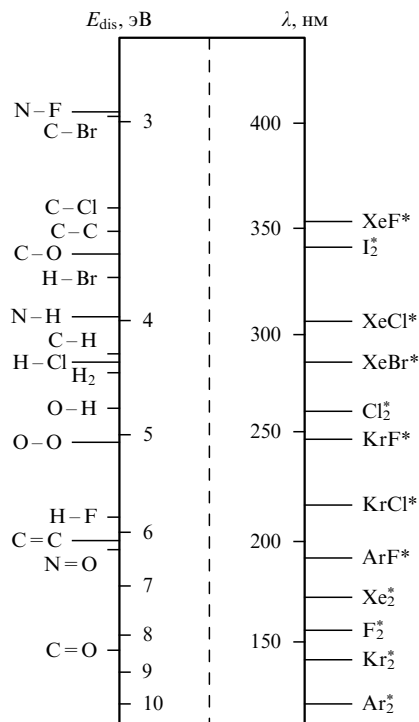


Рис. 20. Энергии диссоциации ряда химических связей и длины волн В-Х переходов эксимерных и эксиплексных молекул, а также димеров галогенов.

имеющими непрерывный или линейчатый спектр. Кроме того, эксилампы позволяют в ряде случаев получать наибольшую эффективность фотохимического процесса вследствие совпадения их узкополосного спектра излучения со спектром поглощения облучаемого вещества.

В настоящее время эксилампы широко используются в качестве линейных флуоресцентных ламп в копировальных аппаратах, сканерах; излучение барьерного разряда в микрочайках в смесях инертных газов нашло применение при создании плазменных дисплеев. Кроме того, эксилампы успешно используются в технологиях фотоиндуцированной очистки поверхности, осаждения тонких пленок и формирования покрытий с заданными свойствами. При этом скорости фотохимических процессов вследствие большей плотности мощности излучения эксиламп (от 1 до 50 мВт см<sup>-2</sup>) оказываются выше, чем, например, в случае использования ртутных ламп низкого давления. Немаловажным оказывается и то, что данные процессы происходят при относительно низких температурах (250–400 °С) и в отсутствие факторов, приводящих к дефектам и повреждениям, что обеспечивает высокие оптические и электрические параметры формируемых пленок и покрытий [66–73].

Заметным преимуществом по сравнению с традиционными источниками УФ-излучения (ртутными лампами среднего и высокого давления) эксилампы, как узкополосные источники УФ-излучения, обладают при отверждении термочувствительных пленок и покрытий [66, 67]. В случае широкополосного эмиссионного спектра лампы используется лишь незначительная доля излучения, приводя к отверждению. Оставшаяся часть излучения тратится на бесполезный разогрев облучаемой поверхности. При этом эффект отверждения в случае использования эксиламп и традиционных широкополосных источников излучения имеет место при существенно разных уровнях плотности энергии излучения (соответственно несколько миллиджоулей и джоулей на квадратный сантиметр). К тому же в

эксилампах, в отличие от многих ламп, рабочей средой которых является парогазовая смесь, рабочий режим устанавливается сразу же после включения, пусковые и излучательные характеристики эксилампы не критичны к температуре.

Можно указать также другие области применений, где получены первые результаты с использованием эксиламп: фотобиология, фотомедицина, фотохимия растворов, разложение вредных отходов в твердой и жидкой фазах, дезинфекция и очистка питьевой воды и др. Так, например, в недавней работе [74] приведены сравнительные результаты исследований фотолиза водных растворов фенола и параклорфенола при возбуждении КгСл-лазером и КгСл-эксилампой. Показано, что в случае облучения растворов излучением эксилампы с длиной волны 222 нм и длительностью импульса ~ 1 мкс фотопревращения идут гораздо эффективнее, чем при облучении эксиплексным лазером на такой же длине волны и длительностью импульса 10 нс.

В процессе облучения энергия света расходуется не только на возбуждение химических связей, но и на образование радикалов, и на разрыв химических связей, что было использовано в работе [75] для окисления растворов, содержащих токсичную органику. Ксеноновая эксимерная лампа ( $\lambda \sim 172$  нм) барьерного разряда применялась для минерализации фенола и спирта в фотохимическом реакторе в водных растворах. В комбинации с дистилляцией была получена очищенная вода, а сам процесс было предложено назвать фотореактивной дистилляцией.

К настоящему времени в системах УФ-дезинфекции применяются, главным образом, ртутные лампы. Не исключено, однако, что в дальнейшем их можно будет заменить эксилампами, не содержащими ртути. О первом опыте использования ХеВг-, ХеСл- и КгСл-эксиламп емкостного разряда для дезинфекции сообщается в работах [76, 77]. Преимущества эксиламп, как относительно безопасных узкополосных источников УФ-излучения, могут быть использованы также в целях УФ-фототерапии, фотоиммунотерапии, при разработке и использовании новых фотосенсибилизаторов для лечения кожных заболеваний и в других областях медицины [78].

Одна из характерных особенностей эксиламп, влияющих на условия эксплуатации и выбор областей применения, — большие размеры и объем газоразрядной плазмы разряда, являющейся источником излучения. В ряде применений это составляет преимущество эксиламп, например в случае необходимости равномерного освещения больших площадей или объемов. В то же время очевидны и технические трудности, возникающие при передаче излучения эксиламп на расстояние, фокусировке или концентрации излучения на поверхности или элементе объема. В этом отношении эксилампы принципиально отличаются от ламп с малыми размерами излучающего объема, а также лазеров, излучение которых значительно проще передать на расстояние и сконцентрировать. Для концентрации светового потока эксиламп, конструкции которых приведены на рис. 3, целесообразно применять зеркальный параболический отражатель [79] для отдельной лампы или их комбинацию для нескольких эксиламп. Кроме того, имеются конструкции эксиламп барьерного разряда с плоской поверхностью излучения, удачные с точки зрения возможности получения и использования однородного плоского потока излучения [70]. На рисунке 21 представлены две из них. Но наиболее часто применяется коаксиальная конструкция (рис. 3в), позволяющая получать аксиально-симметричный поток излучения, направленный наружу или внутрь при использовании соответственно внутреннего или наружного зеркальных электродов. Внеш-

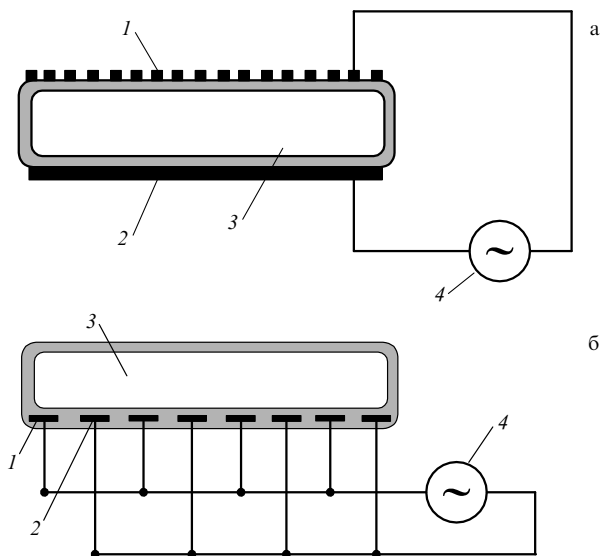


Рис. 21. Конструкции эксимерных барьерного (а) и поверхностного (б) разряда с плоской поверхностью излучения с зеркальным и перфорированным электродами (а) и секционированными электродами, расположенными в одной плоскости (б): 1, 2 — электроды, 3 — газоразрядный объем, 4 — источник питания.

няя и (или) внутренняя трубки могут охлаждаться потоком жидкости или воздуха. Охлаждающей жидкостью может служить и облучаемый раствор.

В работах [8, 80, 81] теоретически и экспериментально исследованы пространственные характеристики выходя-

щего светового пучка цилиндрических и планарных эксимерных ламп. В обоих случаях отмечается быстрое падение интенсивности с увеличением расстояния до излучающей поверхности. Распределение интенсивности излучения на оси  $z$  планарной эксимерной лампы и по радиусу  $r$  в плоскости, перпендикулярной оси  $z$ , показано на рис. 22 [80]. Излучающая область имела форму цилиндра с высотой  $h = 2$  см и радиусом  $R = 4$  см. Для повышения однородности плотности мощности по радиусу необходимо увеличивать расстояние от излучающей поверхности до облучаемой. Однако плотность мощности при этом быстро уменьшается. В случае планарной эксимерной лампы толщину плазменного слоя целесообразно выбирать приблизительно равной расстоянию от плоскости выходного окна эксимерной лампы до облучаемой поверхности.

## 12. Заключение

На основании изложенного выше можно заключить, что в настоящее время эксимерные лампы являются наиболее эффективными узкополосными источниками спонтанного излучения в УФ- и ВУФ-областях спектра. Спектр излучения эксимерных молекул состоит в основном из одной интенсивной полосы В-Х перехода. Данные источники найдут широкое практическое применение, начиная с замещения традиционно используемых ртутных ламп и заканчивая использованием селективного поглощения узкополосного УФ- и ВУФ-излучения.

Наибольшие средние мощности излучения с наименьшими затратами достигаются при использовании для возбуждения тлеющего разряда. Нами создана эксимерная со средней мощностью излучения на молекулах  $\text{KrCl}^*$  1,6 кВт и на молекулах  $\text{XeCl}^*$  1,1 кВт при эффективности более 10%.

Применение емкостного безэлектродного разряда позволяет создавать эксимерные лампы с простой конструкцией излучателей при мощности излучения 1–10 Вт на длинах волн  $\sim 222$  нм ( $\text{KrCl}^*$ ),  $\sim 308$  нм ( $\text{XeCl}^*$ ),  $\sim 282$  нм ( $\text{XeBr}^*$ ),  $\sim 253$  нм ( $\text{XeI}^*$ ),  $\sim 206$  нм ( $\text{I}^*$ ) при эффективности  $\sim 10\%$  и выше. При этом достигается наибольший ресурс работы рабочей смеси в отпаянных образцах (более 2500 ч). Спектр излучения в эксимерных тлеющего и емкостного разрядов кроме полосы В-Х перехода с полушириной до 10 нм включает полосы D-X и C-A переходов, а также полосы молекул галогенов.

Эксимерные лампы с возбуждением барьерным разрядом обладают как высокими энергетическими параметрами (более 100 Вт на 1 м длины), так и большим ресурсом работы. Нами создана отпаянная  $\text{KrCl}$ -эксимерная лампы длиной 60 см и внешним диаметром 65 мм со средней мощностью излучения 116 Вт. Излучение эксимерных молекул при возбуждении барьерным разрядом в основном сосредоточено в полосе В-Х перехода и имеет наименьшую полуширину  $\sim 2$  нм.

Весьма перспективны для практического применения лампы на основе йода, которые позволяют получать мощное излучение на длине волны 206 нм, одновременно излучение на 206 и 253 нм, а также излучение в ВУФ-области спектра.

Авторы благодарны LLNL (контракт В5066095) и МНТЦ (проект № 1270) за поддержку данной работы.

## Список литературы

1. Tanaka Y *J. Opt. Soc. Am.* **45** 710 (1955)
2. Мак-Каскер М, Брау Ч, в кн. *Эксимерные лазеры* (Под ред. Ч Роудза) (М.: Мир, 1981)
3. Смирнов Б М *УФН* **139** 53 (1983)
4. Волкова Г А и др. *ЖПС* **41** 691 (1984)

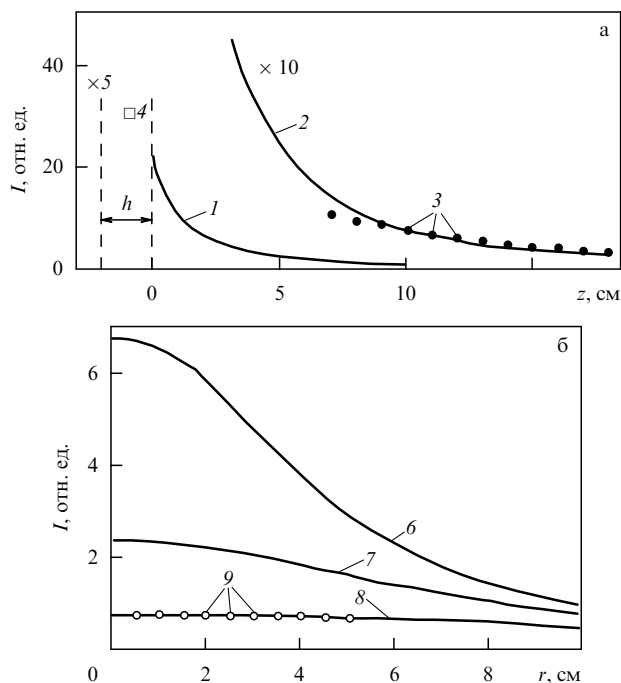


Рис. 22. Пространственное распределение интенсивности излучения эксимерной лампы на оси цилиндра  $z$  (а) и по радиусу  $r$  в плоскости, перпендикулярной оси  $z$  (б): 1, 2, 4–8 — расчет, 3, 9 — эксперимент; экспериментальные и расчетные значения для кривых 2 и 3 взяты равными при  $z = 10$  см; 4, 5 — интенсивности на оси цилиндра в центре излучающего слоя при  $h = 2$  см (точка  $\square$ ) и 4 см (точка  $\times$ ); 6–9 — распределения интенсивности по радиусу при  $z = 2$  см (кривая 6), 5 см (кривая 7) и 10 см (кривые 8, 9) (кривые 1 и 2 различаются масштабом).



5. Eliasson B, Kogelschatz U *Appl. Phys. B* **46** 299 (1988)
6. Obara M, in *Proc. of the 7th Intern. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, Kyoto, Japan, Aug. 27–31, 1995*, p. 149
7. Герасимов Г Н и др. *УФН* **162** (5) 123 (1992)
8. Бойченко А М и др. *Квант. электрон.* **20** 7 (1993)
9. Ломаев М И и др. *Газоразрядные источники спонтанного ультрафиолетового излучения: Физика процессов и экспериментальная техника. Эксилампы* (Под ред. В Ф Тарасенко) (Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1999)
10. Коновалов И Н, Тарасенко В Ф *ЖПС* **34** 177 (1981)
11. Шуайбов А К, Шимон Л Л, Шевера И В *ПТЭ* (3) 142 (1998)
12. Шуайбов А К, Дашенко А И *Квант. электрон.* **30** 279 (2000)
13. Sasaki W, Kubodera S, Kawanaka J, in *XI Intern. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conf., Edinburgh, UK, Aug. 25–30, 1996* (Proc. SPIE, Vol. 3092, Eds D R Hall, H J Baker) (Bellingham, WA: SPIE, 1997) p. 378
14. *Proc. of the 8th Intern. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, LS-8, Greifswald, Germany, 30 Aug.–3 Sept., 1998* (Ed. G Babucke) (Greifswald: INP, 1998)
15. *Proc. of the 9th Intern. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, LS-9, Ithaca, NY, USA, 12–16 Aug., 2001* (Ed. R Bergman) (Ithaca, NY, 2001)
16. Zhang J-Y, Boyd I W *J. Appl. Phys.* **80** 633 (1996)
17. Esrom H, Kogelschatz U *Thin Solid Films* **218** 231 (1992)
18. Vollkommer F, Hitzschke L, in *Proc. of the 8th Intern. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, LS-8, Greifswald, Germany, 30 Aug.–3 Sept., 1998* (Ed. G Babucke) (Greifswald: INP, 1998) p. 51
19. Mildren R P, Carman R J *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** L1 (2001)
20. Gellert B, Kogelschatz U *Appl. Phys. B* **52** 14 (1991)
21. Panchenko A N, Sosnin E A, Tarasenko V F *Opt. Commun.* **161** 249 (1999)
22. Falkenstein Z, Coogan J J *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 2704 (1997)
23. Ерофеев М В и др. *Оптика атмосферы и океана* **13** 862 (2000)
24. Zhang J-Y, Boyd I W *J. Appl. Phys.* **84** 1174 (1998)
25. Алехин А А и др. *ЖТФ* **65** (5) 9 (1995)
26. Алехин А А и др. *Непрерывные плазмохимические источники света: Физические исследования* (Под ред. Ф Н Любченко) (М.: "БИОР", 1997)
27. Протасов Ю С, в кн. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы Вводный том, Кн. IV* (Под ред. В Е Фортова) (М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2000) с. 232
28. Долгих В А и др. *Письма в ЖТФ* **14** 1049 (1988)
29. Капустин В В, Рудой И Г, Сорока А М *Физика плазмы* **14** 1374 (1988)
30. Райзер Ю П *Физика газового разряда* (М.: Наука. Физматлит, 1987)
31. Райзер Ю П, Шнейдер М Н, Яценко Н А *Высокочастотный емкостной разряд* (М.: Изд-во МФТИ, Наука. Физматлит, 1995)
32. Ломаев М И и др. *Письма в ЖТФ* **25** (21) 27 (1999)
33. Коваль Б А и др. *ПТЭ* (4) 244 (1992)
34. Кузнецов А А и др. *Письма в ЖТФ* **19** (5) 1 (1993)
35. Бойченко А М и др. *Квант. электрон.* **23** 344 (1996)
36. Taylor R S, Leopold K E, Tan K O *Appl. Phys. Lett.* **59** 525 (1991)
37. Головицкий А П *Письма в ЖТФ* **18** (8) 73 (1992)
38. Головицкий А П, Кан С Н *Оптика и спектроскоп.* **75** 604 (1993)
39. Voichenko A M et al. *Laser Phys.* **5** 1112 (1995)
40. Панченко А Н и др. *Письма в ЖТФ* **21** (20) 77 (1995)
41. Ломаев М И et al. *Laser Part. Beams* **15** 339 (1997)
42. Ломаев М И и др. *ЖТФ* **68** (2) 64 (1998)
43. Панченко А Н, Тарасенко В Ф *Оптика и спектроскоп.* **84** 389 (1998)
44. Рулев Г Б, Саенко В Б *Письма в ЖТФ* **19** (21) 53 (1993)
45. Иванов В В, Саенко В Б, Рулев Г Б *Письма в ЖТФ* **21** (7) 65 (1995)
46. Kumagai H, Obara M *Appl. Phys. Lett.* **54** 2619 (1989)
47. Nakamura I, Kannari F, Obara M *Appl. Phys. Lett.* **57** 2057 (1990)
48. Furusawa H, Okada S, Obara M *Appl. Phys. Lett.* **66** 1877 (1995)
49. He Z et al. *Laser Part. Beams* **16** 509 (1998)
50. El-Habachi A, Schoenbach K H *Appl. Phys. Lett.* **72** 22 (1998)
51. Schoenbach K H et al. *Phys. Plasmas* **7** 2186 (2000)
52. Гуревич М М *Фотометрия: теория, методы и приборы* 2-е изд. (Л.: Энергоатомиздат, 1983)
53. Ломаев М И *Оптика атмосферы и океана* **14** 1091 (2001)
54. Manley T C *Trans. Electrochem. Soc.* **84** 83 (1943)
55. Самойлович В Г, Гибалов В И, Козлов К В *Физическая химия барьерного разряда* (М.: Изд-во МГУ, 1989)
56. Falkenstein Z, Coogan J J *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 817 (1997)
57. Панченко А Н, Sosnin E A, Tarasenko V F "Рабочая среда лампы тлеющего разряда низкого давления", Патент RU 2089962 С1, приоритет от 26.12.1995; *Бюлл. изобр.* (25) 350 (1997)
58. Елецкий А В, в кн. *Физические величины* Справочник (Под ред. И С Григорьева, Е З Мейлихова) (М.: Энергоатомиздат, 1991) с. 431
59. Voichenko A M, Yakovlenko S I, Tarasenko V F *Laser Part. Beams* **18** 655 (2000)
60. Зверева Г Н, Герасимов Г Н *Оптика и спектроскоп.* **90** 376 (2001)
61. Arnold E et al. *Laser Phys.* **12** 1227 (2002)
62. Voichenko A M et al. *Laser Phys.* **10** 540 (2000)
63. Рыкалин Н Н и др. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов* Справочник (М.: Машиностроение, 1985)
64. Коваленко В С *Лазерная технология* (Киев: Выща школа, 1989)
65. Elliott D J *Ultraviolet Laser Technology and Applications* (San Diego: Academic Press, 1995)
66. Kogelschatz U *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** A1 (2002)
67. Falkenstein Z *Photon. Spectra* **35** (11) 108 (2001)
68. Kogelschatz U, Eliasson B, Egli W *Pure Appl. Chem.* **71** 1819 (1999)
69. Esrom H *Appl. Surf. Sci.* **168** 1 (2000)
70. Kogelschatz U et al. *Appl. Surf. Sci.* **168** 29 (2000)
71. Boyd I W, Zhang J Y *Nucl. Instrum. Meth. B* **121** 349 (1997)
72. Xu X *Thin Solid Films* **390** 237 (2001)
73. Tarasenko V F et al. *Proc. SPIE* **3274** 323 (1998)
74. Соколова И В и др. *Химия высоких энергий* **36** 307 (2002)
75. Oppenländer T, in *Book of Abstracts of XVIII IUPAC Symp. on Photochemistry, Dresden, Germany, July 22–27, 2000*, p. 479
76. Sosnin E A et al., in *Proc. of the 2nd Intern. Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Rhodes, Greece, Oct. 7–11, 2002*, p. 953
77. Лаврентьева Л В и др., в сб. *II объединенная научная сессия СО РАН и СО РАМН "Новые технологии в медицине"*, Новосибирск, Россия, 18–19 июня, 2002 (Новосибирск, 2002); [http://caty.catalysis.nsk.su/chem/medicina/\\_3/3\\_16.html](http://caty.catalysis.nsk.su/chem/medicina/_3/3_16.html)
78. Sosnin E A, в сб. *Труды 3-й Международной научной конф. "Актуальные проблемы современной науки"*, Самара, Россия, 30 сент.–2 окт., 2002 (Самара, 2002) Ч. 10, с. 48
79. *Справочная книга по светотехнике* (Под ред. Ю Б Айзенберга) (М.: Энергоатомиздат, 1983)
80. Voichenko A M et al. *Laser Phys.* **3** 838 (1993)
81. Voichenko A M et al. *Laser Phys.* **4** 635 (1994)

### Excilamps: efficient sources of spontaneous UV and VUV radiation

M.I. Lomaev, V.S. Skakun, É.A. Sosnin, V.F. Tarasenko, D.V. Shitts, M.V. Erofeev  
 High Current Electronics Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
 prosp. Akademicheskii 4, 634055 Tomsk, Russian Federation  
 Tel. (7-3822) 25-8685, 25-9392  
 E-mail: vfi@loi.hcei.tsc.ru

The results of research into high-power, high-efficiency, noble gas halide excilamps using glow, capacitor, and barrier discharges are presented. The maximum radiating power-to-production cost ratio is achieved with glow discharge lamps. An excilamp with an average power of 1.6 kW on KrCl\* molecules ( $\lambda = 222$  nm) and 1.1 kW on XeCl\* molecules ( $\lambda = 308$  nm) is developed, whose efficiency exceeds 10%. The use of an electrodeless capacitor discharge leads to sealed off excilamps with a simple emitter design which have a power of 1 to 10 W and service life of  $\sim 2500$  h and more. Barrier discharge excilamps have both high energy parameters ( $> 100$  W m<sup>-1</sup>) and a long service life. Excilamps can find broad practical applications as new powerful sources of UV and VUV radiation.

PACS numbers: **07.60.-j**, **42.72.Bj**, **52.80.-s**

Bibliography — 81 references

Received 23 August 2002, revised 13 November 2002