

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ХеСІ ЭКСИПЛЕКСНОЙ ЛАМПЫ

© 2013 г. С. В. Автаева*, Э. А. Соснин**,****, Б. Саги***, В. А. Панарин**, Б. Рахмани***

* Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызская Республика

** Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

*** Факультет электроники университета науки и технологии Мохаммеда Бодиафа, Оран, Алжир

**** Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: s_avtaeva@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2012 г.
Окончательный вариант получен 08.01.2013 г.

Экспериментально и теоретически изучено влияние концентрации хлора на эффективность излучения коаксиальной эксиплексной лампы (эксилампы) барьерного разряда в бинарных смесях Хе-Cl₂ при давлении рабочей смеси 240–250 Торр. Экспериментальные исследования проведены в диапазоне концентраций Cl₂ 0.01–1%. Расчеты характеристик барьерного разряда выполнены в рамках одномерной гидродинамической модели в диапазоне концентраций Cl₂ 0.1–5%. Показано, что при концентрации хлора в смеси 0.01–0.1% интенсивности излучения полос Хе₂* (172 нм) и ХеСІ* (308 нм) сопоставимы, причем с ростом концентрации Cl₂ в смеси интенсивность излучения молекулы Хе₂* быстро падает и при концентрации хлора ≥0.2% излучение полосы В → Х молекул ХеСІ* с максимумом интенсивности на длине волны 308 нм доминирует в потоке излучения разряда. Максимальная эффективность излучения этой полосы наблюдается при концентрациях хлора 0.4–0.5%. Рассчитанные значения эффективности излучения барьерного разряда превышают экспериментально измеренные, что связано с ограничениями одномерной модели, рассматривающей разряд однородным в поперечном направлении, в то время как реальный разряд в эксилампах является сильно неоднородным. Численно изучено влияние концентрации хлора на свойства плазмы барьерного разряда в бинарных смесях Хе-Cl₂. Показано, что увеличение концентрации Cl₂ в смеси приводит к прилипанию электронов к атомам хлора и уменьшению концентрации электронов и проводимости разряда. Это вызывает рост электрического поля и увеличение падения потенциала на разрядном промежутке, что в свою очередь обуславливает рост средней энергии электронов, и, как следствие, увеличение вероятности диссоциации молекул Cl₂ и ионизации атомов Хе и молекул Cl₂. Полная мощность, вкладываемая в разряд, увеличивается с ростом концентрации хлора вследствие роста мощности, расходуемой на нагрев положительных и отрицательных ионов; мощность, рассеиваемая электронами, уменьшается с ростом концентрации хлора в рабочих смесях. Даны рекомендации по выбору величины содержания хлора в смеси для снижения интенсивности вакуумного ультрафиолетового излучения второго континуума эксимера Хе₂* при незначительном уменьшении эффективности эксилампы.

DOI: 10.7868/S0367292113080027

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксилампы относятся к сравнительно новому семейству источников спонтанного УФ-излучения, основанных на неравновесном излучении эксимерных и эксиплексных молекул [1, 2]. Одной из наиболее востребованных сегодня является эксилампа на основе газовой среды Хе-Cl₂ [2]. Эта лампа представляет большой интерес для осуществления фотохимических и фотобиологических процессов [2–7]. При условиях, типичных для ХеСІ-эксиламп барьерного разряда (короткий разрядный промежуток и относительно высокое давление) считается, что в спектре излучения до-

минирует интенсивная В → Х полоса ХеСІ* с максимумом интенсивности на длине волны 308 нм [1, 8–10]. Интенсивность D → Х и С → А полос молекулы ХеСІ*, а так же молекулярных полос Cl₂* в спектре излучения ХеСІ-эксилампы при возбуждении барьерным разрядом сравнительно мала [9]. В [10] показано, что оптимальные характеристики эксиламп наблюдались при давлении 120 Торр в смеси Хе:Cl₂ ~ 120:(1–0.5). Наш опыт эксплуатации ХеСІ-эксиламп в этих условиях выявил, что в процессе работы помимо излучения такая лампа формирует в окружающем воздухе озон. И это, несмотря на то, что используются

марки кварца, которые почти не пропускают вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение. Таким образом, есть основания предполагать, что при указанных величинах давления и соотношении $\text{Xe}:\text{Cl}_2$ заметный вклад в лучистый поток эксилампы, помимо молекулы XeCl^* , вносит 2-й

континуум молекул Xe_2^* (континуум имеет максимум на длине волны $\lambda = 172$ нм и основание – несколько десятком нм). Известно, что концентрация хлора в бинарной смеси $\text{Xe}:\text{Cl}_2$ сильно влияет на характеристики XeCl -эксиламп [2, 10]. В связи с этим логична постановка задачи на исследование вклада обеих указанных молекул в излучение этой распространенной эксилампы при изменении концентрации хлора в бинарной смеси.

Проведенный анализ литературных данных показал, что механизмы влияния концентрации хлора на характеристики барьерного разряда в смеси $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ подробно не исследованы, и вопрос о полной эффективности излучения XeCl -эксиламп барьерного разряда остается открытым [2].

В [11] разработана гидродинамическая модель плазмы барьерного разряда (БР) в смеси $\text{Xe}-\text{Cl}_2$, предназначенная для расчета электрических и оптических характеристик разряда и исследования физико-химических процессов в различных фазах разряда. В настоящей работе эта модель использована для исследования влияния концентрации хлора в смеси $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ на электрические характеристики и эффективность излучения эксилампы БР на различных длинах волн. Исследовано влияние добавок хлора на диссипацию электрической энергии электронами и ионами в плазме барьерного разряда в смесях $\text{Xe}-\text{Cl}_2$. Наряду с численными исследованиями проведены измерения мощности и эффективности излучения молекул XeCl^* и Xe_2^* в потоке излучения двубарьерной коаксиальной XeCl -эксилампы барьерного разряда при различном содержании хлора в смеси. Данные моделирования сравниваются с результатами экспериментальных исследований эффективности излучения XeCl -эксилампы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ

Для эксперимента использовалась колба, выполненная из двух коаксиальных кварцевых трубок 1, 2, имеющих толщину 1.5 мм и герметично запаянных на концах (рис. 1). Внешние диаметры трубок 1 и 2 составляли 11 и 21 см, соответственно. Кварцевые трубки образуют разрядный промежуток 3 длиной 4 мм. Колба была изготовлена в ООО “Технокварц” из кварца, имеющего при указанной толщине пропускание 65% на длине волны 172 нм.

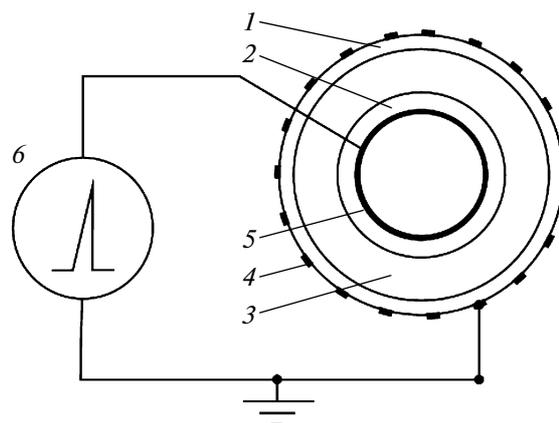


Рис. 1. Конструкция коаксиальной эксилампы барьерного разряда: 1, 2 – внешняя и внутренняя кварцевые трубки колбы, 3 – разрядный промежуток, 4 – внешний перфорированный электрод, 5 – внутренний электрод-отражатель, 6 – импульсный источник питания.

Сплошной металлический электрод 5 был размещен на оси трубок, внутри трубки меньшего диаметра. Внешний электрод 4 был перфорированным и имел пропускание 86%. Этот электрод был заземлен. Длина разрядной зоны, которую образуют электроды, составляла 12 см.

Давление смеси в разрядном промежутке было фиксировано и составляло 240 Торр, а концентрация Cl_2 варьировалась в диапазоне от 0.01 до 1%. Барьерный разряд зажигался при подаче от источника питания 6 на электроды импульсов напряжения с амплитудой 5 кВ и частотой повторения 55.8 кГц.

Осциллограммы импульсов напряжения и тока на эксилампе регистрировались с помощью осциллографа TDS-224, делителя напряжения и токового шунта. Полная (активная) мощность, вкладываемая в лампу, определялась как

$$P_{\text{in}} = f \int_0^T I(t)U(t)dt, \quad (1)$$

где f – частота следования импульсов; $U(t)$, $I(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока; T – период.

Кроме того, в нескольких случаях были проведены измерения активной мощности, вкладываемой в лампу, по термодинамической методике, описанной нами в [12]. Получено хорошее согласие измеряемых таким образом величин мощности P_{in} со значениями мощности, рассчитанными по мгновенным значениям напряжения и тока согласно (1).

Для измерения энергетической светимости использовали фотодетектор С8026 фирмы Hamamatsu с двумя головками, чувствительными

Таблица 1. Мощность излучения эксилампы в УФ и ВУФ-диапазонах, вводимая мощность и эффективность излучения при различных концентрациях хлора в смеси

Cl ₂ , %	Мощность излучения, Вт		Вводимая мощность, Вт	η, %
	XeCl* (308 нм)	Xe ₂ * (172 нм)		
1	0.52	9.7 × 10 ⁻⁴	31.3	1.7
0.4	0.63	2.6 × 10 ⁻³	32.1	2
0.2	0.71	10.3 × 10 ⁻³	39.6	1.8
0.01	0.37	0.24	37.9	1.6

в диапазоне 160–350 нм (H8025-222) и в диапазоне 150–220 нм (H8025-172). Головки использовались одновременно, располагаясь на кассете, в которой можно было быстро заменять одну головку другой.

Поскольку спектральная чувствительность обоих головок была известна, можно было точно измерять долю излучения, которая приходится на молекулу XeCl* и излучаемую молекулой Xe₂* в ВУФ-диапазоне спектра. Поскольку оба детектора обладают спектральной чувствительностью в диапазоне λ ~ 150–220 нм, то для определения вклада ВУФ-излучения в энергетическую светимость, измеряемую головкой H8025-172, использовался стеклянный светофильтр БС-3. Аналогично определялся вклад УФ-излучения молекулы XeCl* в энергетическую светимость, измеряемую головкой H8025-222.

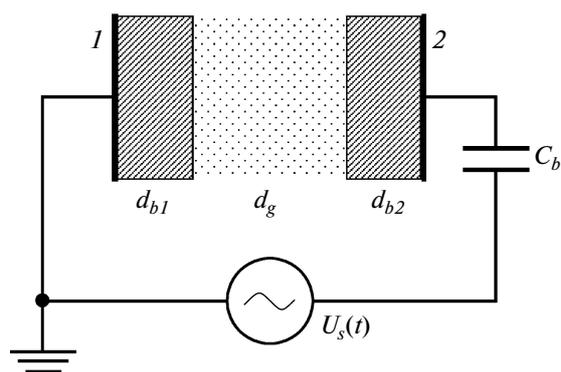


Рис. 2. Конфигурации барьерного разряда, используемая при моделировании. 1 – левый заземленный электрод, 2 – правый нагруженный электрод, d_{b1} , d_{b2} – толщина диэлектриков, d_g – ширина разрядного промежутка, C_b – емкость диэлектриков, $U_s(t)$ – источник напряжения. На рисунке левый (заземленный) электрод соответствует внешнему электроду эксилампы (рис. 1), правый (нагруженный) электрод – внутреннему электроду эксилампы.

Мощность излучения лампы в диапазоне λ = 200–350 нм определялась фотоприемником 10 HAMAMATSU H8025-222 (с максимумом спектральной чувствительности на 222 нм), расположенным вплотную к поверхности колбы, по формуле

$$P_{\text{rad}} = ES, \quad (2)$$

где E – энергетическая освещенность, которую излучение лампы создает на фотоприемнике с учетом спектральной чувствительности; S – площадь излучающей поверхности лампы.

В литературе мощность излучения определяют также по формуле Кайтца [13]

$$P_{\text{rad}} = \frac{2\pi DL}{2\alpha + \sin(2\alpha)} E, \quad (3)$$

где D – расстояние от фотоприемника до центра лампы; L – длина светящейся части лампы ($D \geq 2L$); α – половина угла, под которым видна лампа из центра фотоприемника.

Расчет мощности УФ-излучения эксилампы (в случае, когда регистрация проводится только головкой H8025-222 с установленным на ее входе светофильтром БС-3) для нашей геометрии, проведенный по формулам (2) и (3), показывает, что полученные по (2) величины всего на 1% меньше величин, полученных по формуле (3).

Во время измерения между головкой фотодетектора и поверхностью колбы осуществлялась продувка аргоном, чтобы исключить поглощение ВУФ-излучения воздухом.

Обзорный спектр излучения разряда в диапазоне 200–850 нм получали с помощью спектрометра StellarNet EPP2000-C25 (StellarNet Inc.).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данные измерений мощности и эффективности излучения эксилампы, а также вводимой мощности, полученные экспериментально, при концентрациях хлора в смеси Xe-Cl₂ 0.001–1% представлены в табл. 1. Значения в таблице учитывают как спектральную чувствительность фотодетекторов, так и спектр пропускания кварца. Видно, что с уменьшением доли хлора в смеси мощность ВУФ-излучения молекул Xe₂* увеличивается, а УФ-излучения молекул XeCl* падает. Максимальная эффективность излучения достигнута в условиях, близких к отмеченным в [10] для XeCl-эксилампы.

Характеристики плазмы БР в смесях Xe-Cl₂ с концентрациями Cl₂ 0.1, 0.5, 1 и 5% были рассчитаны в рамках одномерной гидродинамической модели барьерного разряда между плоскопараллельными электродами, покрытыми слоем диэлектрика (рис. 2). Детальное описание модели можно найти в работе [11]. Расчеты проведены

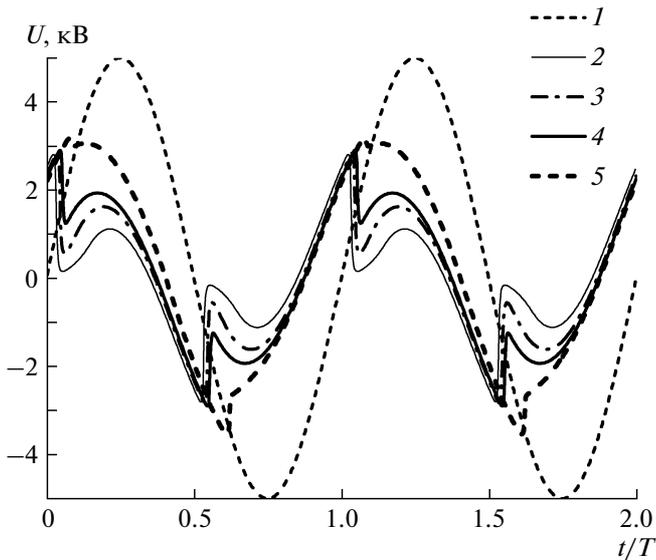


Рис. 3. Временной ход напряжения источника питания U_s (1), и падения напряжения на разрядном (газовом) промежутке U_g (2–5) при различных концентрациях хлора в смесях Xe-Cl₂: 2 – 0.1%, 3 – 0.5%, 4 – 1% Cl₂, 5 – 5% Cl₂; $U_0 = 5.0$ кВ, $T = 10$ мкс.

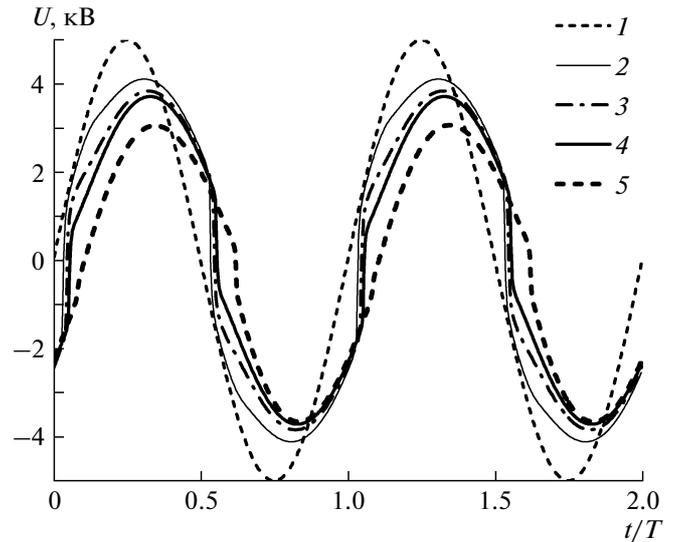


Рис. 4. Временной ход напряжения источника питания U_s (1), и падения напряжения на диэлектриках U_m (2–5) при различных концентрациях хлора в смесях Xe-Cl₂: 2 – 0.1%, 3 – 0.5%, 4 – 1% Cl₂, 5 – 5% Cl₂; $U_0 = 5.0$ кВ, $T = 10$ мкс.

для следующих параметров разряда: давление смеси – 250 Торр, величина газового промежутка – 4 мм, толщина диэлектрических слоев с относительной диэлектрической проницаемостью 4–2 мм. К электродам прикладывалось напряжение $U_s = U_0 \sin 2\pi ft$ с частотой 100 кГц и амплитудой 4.25 или 5 кВ. При концентрации хлора в смеси 5% напряжение U_s с амплитудой 4.25 кВ было недостаточным для пробоя газового промежутка.

На рис. 3–5 показаны рассчитанные зависимости падения потенциала на газовом промежутке U_g (рис. 3), суммарного падения потенциала на диэлектриках (рис. 4) и плотности тока разряда J (рис. 5) от времени при различных концентрациях хлора в смесях Xe-Cl₂.

Падение потенциала на разрядном промежутке возрастает с увеличением концентрации хлора в смеси (рис. 3). В момент пробоя напряжение на газовом промежутке составляет 2.7–2.8 кВ при концентрациях хлора 0.1–1% и 3.15–3.5 кВ при концентрациях хлора 5%. После прохождения импульса тока падение потенциала на разрядном промежутке уменьшается тем сильнее, чем меньше содержание хлора в смеси. Падение потенциала на диэлектрических слоях и величина импульса тока уменьшаются с увеличением концентрации хлора в смеси (рис. 4, 5). При концентрации хлора в смеси 5% разряд становится асимметричным во времени относительно середины периода. Импульс тока в первой половине периода примерно в три раза слабее, чем во второй половине периода (рис. 5б).

На рис. 6 показаны рассчитанные зависимости от времени плотности поверхностного заряда на поверхности диэлектриков, прилегающих к левому (заземленному) электроду и к правому (нагруженному) электроду при концентрации хлора в смеси Xe-Cl₂ 0.1–5%. Заряд, накапливающийся на поверхности диэлектриков, уменьшается с ростом концентрации хлора в смеси. При содержании хлора в смеси 0.1–1% в течение первого полупериода изменения напряжения на поверхности диэлектрика осаждается положительный заряд, и в течение следующего полупериода – отрицательный заряд примерно той же величины. При концентрации хлора в смеси 5% примерно равенство положительного и отрицательного заряда, осаждающегося на поверхности диэлектриков в течение двух соседних полупериодов изменения напряжения, нарушается.

При всех концентрациях хлора в смесях Xe-Cl₂ наиболее распространенной отрицательно заряженной частицей является ион Cl⁻, наиболее распространенным положительным ионом является ион Xe₂⁺ в течение всего периода изменения напряжения. Из-за превращения ионов Xe₂⁺ в ионы Xe₃⁺ при их столкновениях с атомами ксенона ($2\text{Xe} + \text{Xe}_2^+ \rightarrow \text{Xe}_3^+ + \text{Xe}$) в плазме также имеется значительное число ионов Xe₃⁺. Во время импульса тока концентрации электронов и ионов Xe⁺ вблизи диэлектрического барьера, к которому направлена волна ионизации, сильно возрастают

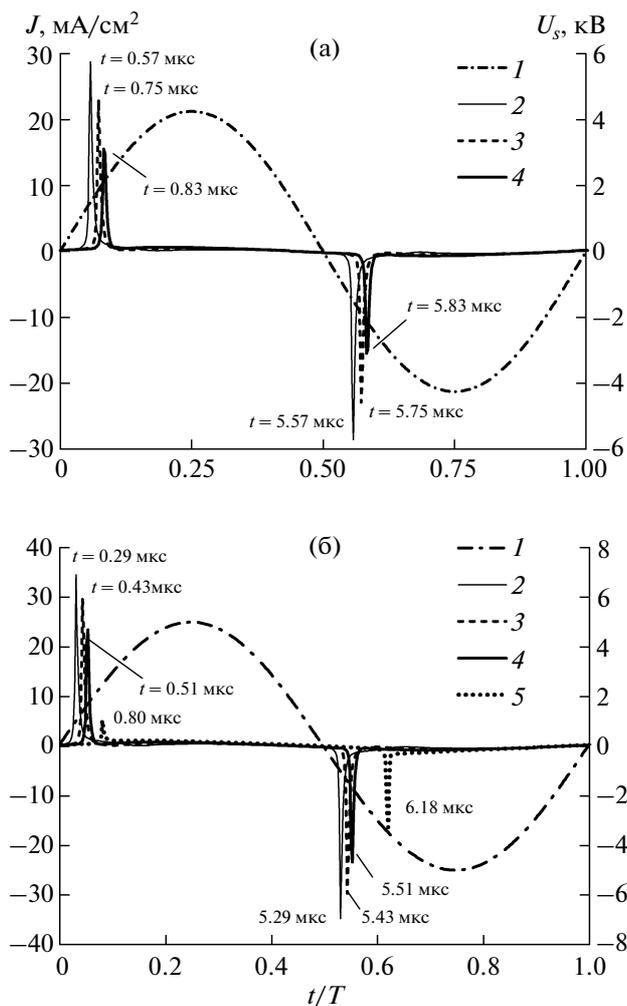


Рис. 5. Временной ход напряжения источника питания U_s (I), и плотности полного тока разряда J (2–5) при различных концентрациях хлора в смесях Xe-Cl₂: 2 – 0.1%, 3 – 0.5%, 4 – 1% Cl₂, 5 – 5% Cl₂; $T = 10$ мкс. а) $U_0 = 4.25$ кВ, б) $U_0 = 5.0$ кВ.

(рис. 7). Концентрация молекул XeCl* в этой области также резко возрастает во время импульса тока. Во время послесвечения, концентрации ионов Xe⁺ и электронов по всей длине разрядного промежутка на несколько порядков величины меньше, чем концентрации ионов Cl⁻ и Xe₂⁺. Концентрации ионов Cl₂⁺ и Cl⁺ в разряде малы, причем концентрация ионов Cl₂⁺ выше концентрации ионов Cl⁺.

Концентрации электронов (рис. 8а) и большинства возбужденных компонент уменьшаются с ростом концентрации хлора в смесях. Средняя энергия электронов в центральной части разряда сначала увеличивается с увеличением концентрации хлора от 0.1 до 0.5% и потом уменьшается (рис. 8б). Вблизи поверхности диэлектриков

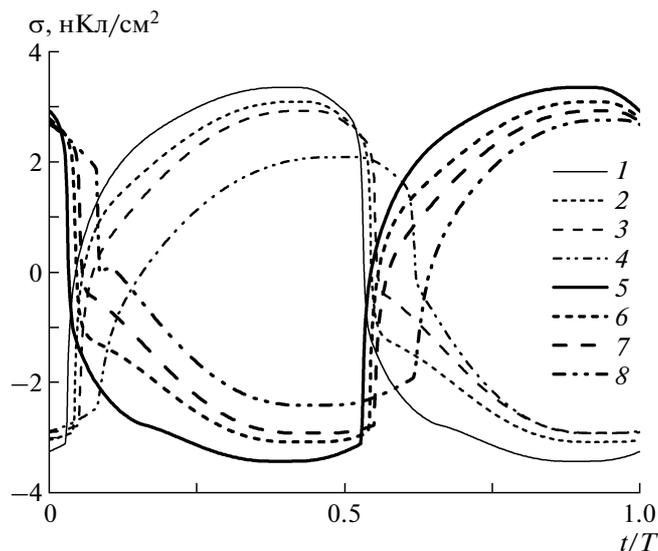


Рис. 6. Изменение плотности поверхностного заряда на поверхности диэлектриков прилежащих к левому (заземленному) электроду 1–4 и к правому (нагруженному) электроду 5–8 в течение периода изменения напряжения в зависимости от концентрации хлора в смеси Xe-Cl₂: 1, 5 – 0.1%; 2, 6 – 0.5%; 3, 7 – 1% Cl₂; 4, 8 – 5% Cl₂; $U_0 = 5.0$ кВ, $T = 10$ мкс.

средняя энергия электронов растет с увеличением концентрации хлора. На расстоянии 0.2–0.45 мм от поверхности диэлектрических слоев имеется минимум средней энергии электронов. Существование этого минимума средней энергии электронов связано с большими потерями энергии электронами на ионизацию, диссоциацию и возбуждение частиц плазмы в областях вблизи диэлектрических барьеров при прохождении волны ионизации [14, 15].

Расчеты позволяют оценить диссипацию электрической энергии электронами и ионами [16]. Удельная мощность, вкладываемая в разряд, рассчитывалась согласно соотношению

$$P_{in} = \frac{1}{T} \frac{1}{d} \int_0^T \int_0^d j_c(z, t) E(z, t) dz dt. \quad (4)$$

Здесь $j_c(z, t)$ – плотность тока проводимости, $E(z, t)$ – напряженность электрического поля, t – время, T – период изменения напряжения, z – пространственная координата, d – длина газового промежутка.

Удельные мощности, вкладываемые в электроны, отрицательные и положительные ионы, рассчитывалась по формуле:

$$P_k = \frac{1}{T} \frac{1}{d} \int_0^T \int_0^d e E(z, t) \Gamma_k(z, t) dz dt. \quad (5)$$

Здесь e – элементарный заряд и $\Gamma_k(z, t)$ – поток заряженных частиц сорта k .

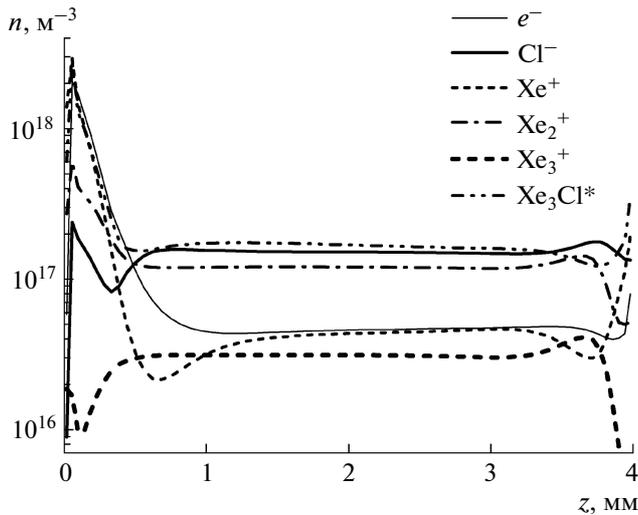


Рис. 7. Пространственные распределения концентрации электронов, основных ионов и молекул XeCl^* во время импульса тока ($t = 0.75$ мкс, см. рис. 4); концентрация хлора в смеси $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ 0.5%, $U_0 = 4.25$ кВ.

Удельные мощности, диссипируемые электронами при упругих столкновениях с атомами и молекулами, рассчитывались в соответствии с соотношением:

$$P_{el,k} = \frac{1}{T} \frac{1}{d} \int_0^T \int_0^d \frac{2m_e}{M_k} \bar{\epsilon} k_{el,k}(z,t) N_e(z,t) N_k(z,t) dz dt. \quad (6)$$

Здесь $k_{el,k}(z,t)$ – константа скорости упругих столкновений электронов с нейтральными частицами сорта k ; $\bar{\epsilon}$ – средняя энергия электронов; $N_e(z,t)$ и $N_k(z,t)$ – концентрации электронов и

нейтральных частиц сорта k соответственно; m_e и M_k – их массы.

Поглощение мощности (на единицу объема), связанное с неупругими столкновениями электронов с атомами и молекулами, рассчитывалось согласно формуле:

$$P_{inel,k} = \frac{1}{T} \frac{1}{d} \int_0^T \int_0^d k_{inel,k}(z,t) N_e(z,t) N_k(z,t) \Delta E_{inel,k} dz dt. \quad (7)$$

Здесь $k_{inel,k}(z,t)$ – константа скорости неупругих столкновений электронов с нейтральными частицами сорта k , $\Delta E_{inel,k}$ – пороговая энергия процесса.

Результаты расчета удельной мощности, вложенной в разряд, и ее распределения между электронами и положительными и отрицательными ионами в зависимости от концентрации хлора в смесях $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ показаны на рис. 9. Диссипируемая в разряде энергия возрастает с ростом концентрации хлора и с увеличением амплитуды напряжения. При этом увеличение амплитуды напряжения источника питания приводит главным образом к увеличению мощности вкладываемой в положительные и отрицательные ионы. Так, при концентрации хлора 1% и амплитуде напряжения 4.25 кВ 50% мощности поглощается за счет электронов и 50% идет на нагревание положительных и отрицательных ионов, в то время как при той же концентрации хлора и амплитуде напряжения 5 кВ только 42% мощности разряда поглощается за счет электронов. Мощность, затраченная на нагревание положительных и отрицательных ионов, растет с увеличением концентрации хлора; мощность, поглощаемая за счет электронов,

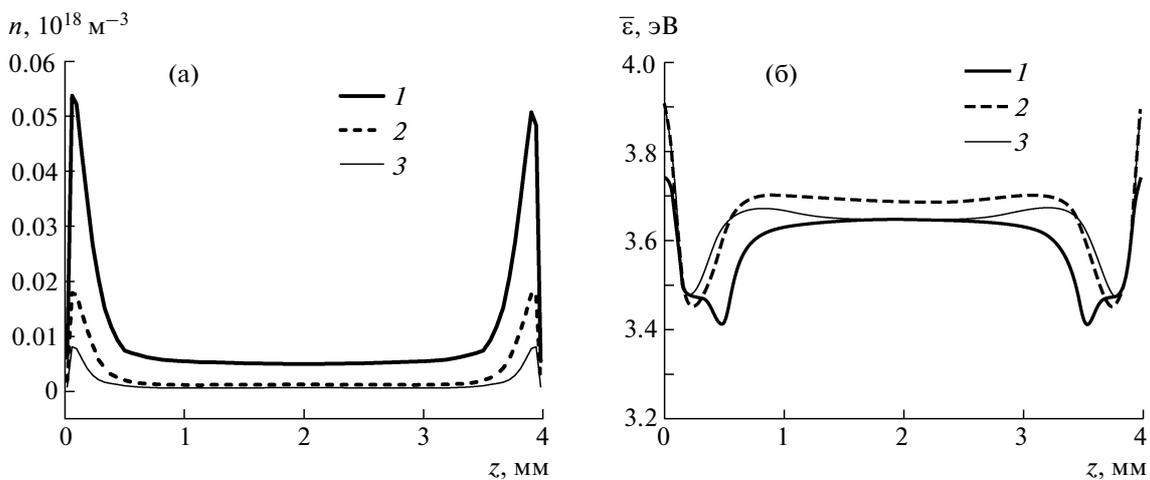


Рис. 8. Усредненные (за период изменения напряжения) концентрация (а) и средняя энергия (б) электронов при различных концентрациях хлора в смесях $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ при амплитуде напряжения источника 4.25 кВ: 1 – 0.1%, 2 – 0.5%, 3 – 1% Cl_2 .

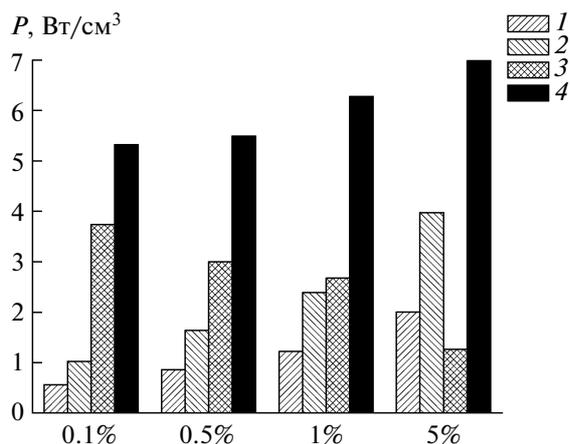


Рис. 9. Мощность, затраченная на нагрев электронов, положительных и отрицательных ионов, и полная мощность, вложенная в разряд, при различных концентрациях хлора в Хе-Cl₂ смесях при амплитуде напряжения источника 5 кВ. 1 – положительные ионы, 2 – отрицательные ионы, 3 – электроны, 4 – полная мощность.

в основном уменьшается с ростом концентрации хлора в смеси.

Расчеты показывают, что электроны тратят основную часть поглощаемой энергии на прямое возбуждение состояний Хе_m^{*}, Хе_r^{*}, Хе^{**} и Cl₂^{*} и ступенчатое возбуждение Хе^{**} при столкновениях с атомами ксенона и молекулами хлора в основном состоянии. Здесь Хе_m^{*} метастабильное состояние, Хе_r^{*} резонансное состояние и Хе^{**} – комбинация 6s', 6p и выше лежащих состояний атомов ксенона. Заметная часть энергии, поглощаемой электронами, передается при упругих столкновениях атомам ксенона, при столкновительной диссоциации молекулам Cl₂ и при ионизации атомам Хе и молекулам Cl₂ и ХеCl^{*}. Рост концентрации хлора в смесях Хе-Cl₂ приводит к увеличению передачи энергии электронов на диссоциацию Cl₂, ионизацию Хе и Cl₂, и возбуждение Cl₂^{*} и Хе^{**}, в то время как передача энергии электронов через упругие столкновения с атома-

ми Хе, прямое возбуждение Хе_m^{*}, Хе_r^{*}, ступенчатое возбуждение Хе^{**} и ионизацию ХеCl^{*} уменьшается.

Результаты расчета эффективности излучения η_i линий атомов ксенона и полос эксимеров и суммарная эффективность излучения при различных концентрациях Cl₂ в смесях Хе-Cl₂ представлены в табл. 2 и на рис. 10. Эффективность излучения η_i для возбужденных частиц сорта *i* рассчитывалась как отношение мощности их излучения P_{out, i} к вкладываемой в разряд мощности P_{in} в течение периода изменения напряжения по формуле

$$\eta_i = \frac{P_{out, i}}{P_{in}} = \frac{\int_0^T \int_0^d \frac{h\nu_i}{\tau_i} N_i(z, t) dz dt}{\int_0^T \int_0^d j_c(z, t) E(z, t) dz dt}. \quad (8)$$

Здесь N_i(z, t), ν_i и τ_i – концентрация, частота излучения и время жизни возбужденных частиц сорта *i*; h – постоянная Планка.

При концентрации хлора 0.1% величины η_i для полос Хе₂^{*} и ХеCl^{*} сравнимы. При увеличении концентрации хлора эффективность излучения Хе₂^{*} (λ = 172 нм) быстро падает, причем тем сильнее, чем больше концентрация хлора в смеси. Эффективность излучения на других длинах волн (147, 152, и 490 нм) мала при всех концентрациях хлора в смеси. Нет заметной разницы в эффективности излучения разряда на различных длинах волн в случаях амплитуды напряжения 4.25 и 5 кВ. При концентрации хлора в смеси 0.1% примерно 46% излучения разряда приходится на излучение ХеCl^{*}, 52% – на излучение Хе₂^{*}, и 2% на излучение других излучающих компонент плазмы. При концентрации хлора 0.5% около 80.8% излучения разряда приходится на излучение ХеCl^{*}, 18% – на излучение Хе₂^{*}, и 1.2% на излучение других излучающих компонент. При концентрации хлора 1% примерно 90% излучения разряда приходится на излучение ХеCl^{*}, 9.1% – на из-

Таблица 2. Эффективность излучения (в %) на различных длинах волн и суммарная эффективность излучения БР в смесях Хе-Cl₂ при амплитуде напряжения источника питания 5.0 кВ

Cl ₂ , %	Хе _r 147 нм	Хе ₂ [*] 172 нм	Хе ₂ ^{**} 152 нм	ХеCl [*] 308 нм	Хе ₂ Cl [*] 490 нм	Суммарная η _i
0.1	0.36	15.90	0.0012	13.98	0.0013	30.23
0.5	0.15	4.44	0.05	15.84	0.10	20.58
1	0.05	1.17	1.7 × 10 ⁻⁴	11.63	5.5 × 10 ⁻⁴	12.85
5	0.005	0.04	1 × 10 ⁻⁵	3.49	5 × 10 ⁻⁵	3.54

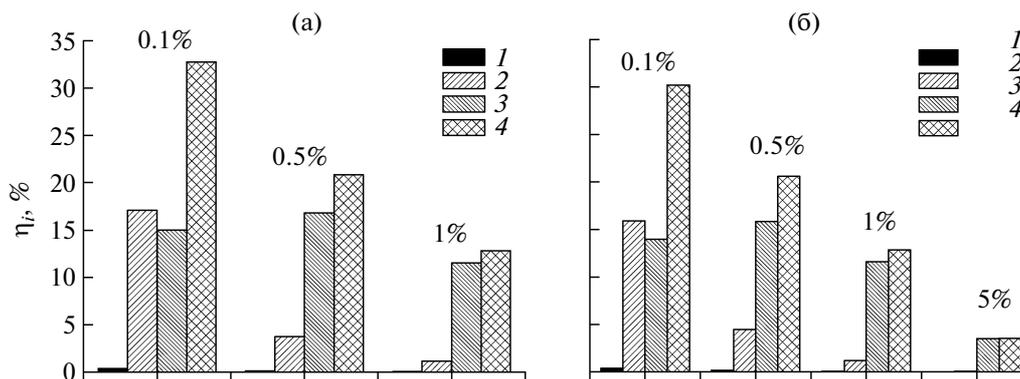


Рис. 10. Рассчитанная эффективность излучения барьерного разряда на различных длинах волн и суммарная эффективность излучения в смесях Хе-Cl₂ при различных концентрациях хлора и амплитуде напряжения 4.25 (а) и 5 кВ (б).

1 – 147 (Хе₂), 2 – 172 (Хе₂^{*}), 3 – 308 нм (ХеCl^{*}) и 4 – суммарная эффективность излучения.

лучение Хе₂^{*} и 0.9% на излучение других излучающих компонент. Наконец, примерно 98.6% излучения разряда приходится на излучение ХеCl^{*}, 1.1% – на излучение Хе₂^{*}, и 0.3% на излучение других излучающих компонент при концентрации хлора 5%. Таким образом, при концентрациях хлора 0.5–5% разряд излучает в основном в полосе В → Х молекул ХеCl^{*}. Максимальная эффективность излучения наблюдается при концентрации хлора 0.5%, как это следует из результатов экспериментов (табл. 1). Следует отметить, что хотя при концентрациях хлора в смеси 0.5–1% излучение полосы В → Х молекул ХеCl^{*} преобладает в излучении БР в Хе-Cl₂, тем не менее на

ВУФ-излучение молекул Хе₂^{*} приходится заметная доля излучения разряда порядка 9–18%. Часть этого излучения, которая пропускается кварцевой оболочкой лампы, инициирует формирование озона в окружающем воздухе.

На рис. 11 показаны рассчитанные плотности мощности излучения в полосе В → Х эксимера ХеCl^{*} в зависимости от концентрации хлора в смеси. Как видно из рисунка, максимальная плотность мощности излучения в этой полосе, как и максимальная эффективность излучения, наблюдается при концентрации хлора в смеси 0.5%.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментально и теоретически показано, что при низких концентрациях хлора 0.01–0.1% интенсивности излучения полос излучения Хе₂^{*} и ХеCl^{*} сравнимы, а с увеличением концентрации хлора в смеси происходит резкое уменьшение интенсивности излучения 2-го континуума Хе₂^{*} и увеличение интенсивности излучения в полосе

В → Х молекулы ХеCl^{*}. Уже при концентрации хлора 0.2% излучение в полосе В → Х молекул ХеCl^{*} доминирует. Рост интенсивности полосы В → Х молекул ХеCl^{*} с увеличением концентрации хлора в смеси наблюдается только при малых концентрациях хлора в смеси ≤1%. Дальнейшее увеличение содержания хлора в смеси приводит к быстрому падению как интенсивности излучения в полосе В → Х молекул ХеCl^{*}, так и суммарной интенсивности излучения разряда. Экспериментальные измерения и расчеты дают качественно близкие зависимости эффективности излучения ХеCl-эксилламп от концентрации хлора в смеси. Согласно экспериментальным измерениям содержание хлора в эксилламп, оптимальное для формирования излучения полосы В → Х молекулы ХеCl^{*}, составляет 0.4%, а согласно расчетам 0.5%.

Как показали расчеты, с увеличением концентрации хлора в смеси падение потенциала на раз-

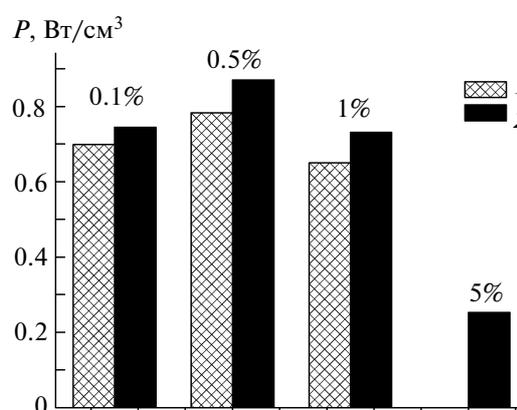


Рис. 11. Рассчитанная плотность мощности излучения эксимера ХеCl^{*} в полосе В → Х (308 нм) в зависимости от концентрации хлора в смеси Хе-Cl₂ для двух напряжений: 1 – U₀ = 4.25 кВ, 2 – 5 кВ.

рядном промежутке возрастает, а величина импульса тока уменьшается. Напряжение пробоя газового промежутка для концентрации хлора 0.1–1% остается примерно постоянным. При дальнейшем увеличении концентрации хлора в смеси напряжение пробоя растет. После прохождения импульса тока напряжение на разрядном промежутке уменьшается тем сильнее, чем меньше концентрация хлора в смеси. Заряд, накапливающийся на поверхности диэлектрических барьеров, уменьшается с ростом концентрации хлора в смеси.

Эти эффекты могут быть объяснены прилипанием электронов к атомам хлора:



Частота прилипания электронов растет с увеличением концентрации хлора. Пробой разрядного промежутка имеет место, когда электрическое поле вблизи диэлектрических слоев, где поле максимально, становится выше критического значения и прямая ионизация ксенона в этой области оказывается более важной по сравнению с прилипанием электронов.

Заметим, что в смеси Хе-Cl₂ во время импульса тока в области вблизи поверхности диэлектрика, где электрическое поле, средняя энергия и концентрация электронов велики, значительный вклад в гибель электронов вносит диссоциативная рекомбинация электронов с ионами Хе₃⁺, константа скорости которой велика (порядка 10⁻¹¹ м³/с). Хотя концентрация ионов Хе₃⁺ примерно на 6 порядков меньше концентрации молекул Cl₂, согласно оценкам при концентрации хлора в смеси 0.1% скорости процессов прилипания с участием хлора и диссоциативной рекомбинации на ионах Хе₃⁺ примерно одинаковы. При увеличении концентрации хлора в смеси концентрация ионов Хе₃⁺ и константа скорости диссоциативной рекомбинации меняются незначительно, поэтому диссоциативная рекомбинация электронов с ионами Хе₃⁺ не оказывает существенного влияния на изменение свойств барьерного разряда.

При концентрациях хлора ≥1% критическое поле возрастает с ростом концентрации хлора в смеси и, следовательно, напряжение пробоя растет. Поскольку концентрация электронов падает с ростом концентрации хлора (рис. 8) и подвижность отрицательных ионов хлора много меньше подвижности электронов, проводимость разрядного промежутка уменьшается. Вследствие этого плотность тока разряда падает (рис. 5) и поверхности диэлектриков заряжаются меньше (рис. 6).

При прохождении импульса тока падение напряжения на разрядном промежутке U_g быстро уменьшается (рис. 3), тем сильнее, чем большей величины достигает плотность тока в импульсе.

Это связано с тем, что заряд, пришедший на поверхность диэлектрика во время импульса тока, нейтрализует поверхностный заряд диэлектрика (рис. 6) и электрическое поле в слое у диэлектрика быстро падает. Поскольку уменьшение проводимости разрядного промежутка с ростом концентрации хлора в смеси сопровождается уменьшением величины импульса тока (рис. 5), падение напряжения на разрядном промежутке U_g при прохождении импульса тока уменьшается тем меньше, чем больше концентрация хлора в смеси.

Мощность, вложенная в разряд, возрастает с ростом концентрации хлора в смеси (рис. 9). Увеличение концентрации хлора в смеси приводит прежде всего к росту затрат мощности на нагрев положительных и отрицательных ионов. В то же время мощность, поглощаемая электронами, наоборот, уменьшается с ростом концентрации хлора вследствие уменьшения их концентрации за счет прилипания (9): мощность, поглощаемая электронами, при концентрации хлора в смеси 0.1% составляет 70% от мощности разряда, при концентрации 0.5–55%, при концентрации 1–42% и при концентрации 5–18%. С ростом концентрации хлора в смеси для формирования импульса тока необходимы более высокие электрическое поле и энергия электронов. В более высоком электрическом поле положительные и отрицательные ионы приобретают большее ускорение, в итоге мощность, затраченная на нагрев ионов, возрастает. Более легкие ионы хлора (в сравнении с тяжелыми ионами Хе⁺, Хе₂⁺ и Хе₃⁺) приобретают в электрическом поле большее ускорение и, как следствие, большую кинетическую энергию. Поэтому на нагрев отрицательных ионов расходуется больше мощности, чем на нагрев положительных ионов. Следует отметить, что максимальные эффективность и мощность излучения эксимера ХеCl* наблюдаются при концентрации хлора в смеси 0.5%, когда электроны поглощают 55% мощности разряда. В случаях когда основная доля мощности разряда расходуется на нагрев ионов (1 и 5% хлора в смеси) эффективность и мощность излучения резко падают.

На рис. 12 представлены зависимости экспериментально измеренных и рассчитанных эффективностей излучения, нормированных на их максимальные значения, от концентрации хлора в смеси Хе-Cl₂. Как видно, между этими зависимостями имеется хорошее согласие. Максимум эффективности излучения наблюдается при концентрации хлора в смеси 0.4–0.5%.

В то же время эффективности излучения барьерного разряда, рассчитанные в рамках гидродинамической модели, значительно превышают эффективности излучения, измеренные экспериментально. Причин этому несколько.

Во-первых, конструкция лампы приводит к потерям излучения, которые не учитываются при моделировании в рамках одномерной гидродинамической модели. Большая доля излучения лампы поглощается сплошным металлическим электродом, размещенным на оси трубки. Как показано в работе [17] использование отражателей позволяет повысить эффективность эксиламп на ~30%.

Во-вторых, при одинаковой величине амплитуд напряжения источника питания эксилампы и гармонического напряжения, используемого в модели, мощности, вкладываемые в единицу объема в этих двух случаях, сильно отличаются. Действительно, в модели мощность, вкладываемая в 1 см^3 однородного в поперечном направлении разряда, составляет несколько Ватт (см. рис. 9), а мощность, вкладываемая в 1 см^3 эксилампы ~0.03–0.04 Вт (вводимая мощность 30–40 Вт (табл. 1), объем 980 см^3). Известно, что эффективность излучения ХеСл-эксиламп сильно зависит от мощности, вкладываемой в единицу объема: с увеличением мощности эффективность излучения растет и достигает величины порядка 10% при удельных мощностях порядка десятых долей Вт/см³ [18]. Поэтому при моделировании, когда мощность, вкладываемая в 1 см^3 , составляет несколько Ватт, эффективность излучения молекул ХеСл* превышает 10%. В то же время мощность, вкладываемая в 1 см^3 эксилампы, на два порядка меньше 0.03–0.04 Вт. При такой удельной мощности эффективность излучения молекул ХеСл* низкая: 1.6–2%.

Разница в удельных мощностях, связана с тем, что разряд в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом в рабочих условиях эксплуатации неоднороден и состоит из множества микрозарядов [1–3]. Занимаемый микрозарядами объем много меньше объема эксилампы и в общем случае определяется условиями в разряде. В то же время в гидродинамической модели разряд в поперечном направлении предполагается однородным [14, 16]. Так же разница в удельных мощностях связана с различием формы периодического напряжения, используемого для возбуждения барьерного разряда в модели (гармоническое напряжение) и в эксилампе (импульсное напряжение).

Приводимые в [18] максимальные значения эффективности излучения ХеСл-эксиламп составляют 12%, что близко к значениям эффективности излучения молекулы ХеСл*, полученным нами при моделировании (табл. 2).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально и теоретически изучено влияние концентрации хлора в бинарной смеси

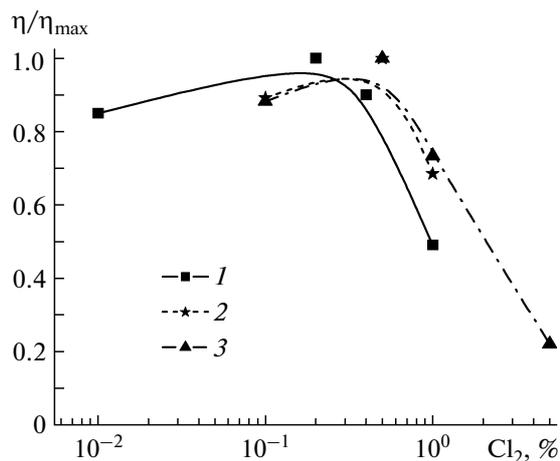


Рис. 12. Нормированные на максимальные значения экспериментально измеренная и рассчитанная эффективность излучения БР в смеси Хе-Сл₂ в зависимости от концентрации хлора в смеси: 1 – эксперимент; 2 – расчет при $U_0 = 4.25 \text{ кВ}$, 3 – расчет при $U_0 = 5 \text{ кВ}$.

Хе-Сл₂ на электрические характеристики и эффективность излучения плазмы в коаксиальной эксилампе барьерного разряда.

Показано, что при концентрации хлора в смеси 0.2% и выше излучение полосы В-Х молекул ХеСл* с максимумом интенсивности на длине волны 308 нм доминирует в потоке излучения эксилампы. Максимальная эффективность излучения эксилампы в этой полосе наблюдается при концентрации хлора в смеси 0.4–0.5%. При концентрации хлора в смеси 0.01–0.1% мощность излучения молекул Хе₂* (172 нм) и ХеСл* (308 нм) сопоставимы. С увеличением концентрации хлора в смеси мощность излучения 2-го континуума молекулы Хе₂* быстро падает.

В рамках одномерной гидродинамической модели показано, что добавка хлора к ксенону приводит к прилипанию электронов к атомам хлора и уменьшению концентрации электронов и проводимости разряда. Это ведет к росту электрического поля необходимого для развития импульса тока и к увеличению падения потенциала на разрядном промежутке. При этом средняя энергия электронов повышается, что ведет к увеличению вероятностей диссоциации молекул Сл₂, ионизации атомов Хе и молекул Сл₂ и возбуждения состояний Сл₂* и Хе** при столкновениях электронов с газом. В то же время вероятности упругих столкновений электронов с атомами Хе и прямого возбуждения электронным ударом метастабильного и резонансного состояний атомов ксенона Хе_m* и Хе_r* уменьшаются. Полная мощность, вкладываемая в разряд, увеличивается с ростом

концентрации хлора, прежде всего из-за роста мощности, расходуемой на нагрев положительных и отрицательных ионов; мощность, рассеиваемая электронами, уменьшается с ростом концентрации хлора в рабочих смесях.

Экспериментально наблюдаемое и моделируемое в рамках гидродинамической модели влияние концентрации хлора на эффективность излучения хорошо согласуются. Согласно расчетам, величина максимальной эффективности излучения наблюдается при концентрации хлора 0.5%, согласно измерениям – 0.4%. В то же время рассчитанные абсолютные значения эффективности излучения в несколько раз превышают экспериментально измеренные. Во-первых, это связано с тем, что большая доля излучения лампы поглощается сплошным металлическим электродом, размещенным на оси трубки, что не учитывается при моделировании. Во-вторых, неоднородность барьерного разряда в эксилампе (филаментарный разряд) и импульсный ввод энергии приводят к тому, что мощность, вкладываемая в единицу объема эксилампы, значительно меньше мощности, вкладываемой в единицу объема барьерного разряда в модели. Эффективность же излучения ХеСl-эксиламп растет с увеличением мощности, вкладываемой в единицу объема.

В заключение отметим, что для уменьшения выхода ВУФ-излучения эксимера Хе₂* можно повышать содержание хлора в смеси Хе-Сl₂. Например, согласно расчетам при увеличении концентрации хлора с 0.5 до 1% эффективность излучения эксимера Хе₂* уменьшается в два раза, в то время как эффективность излучения эксиплекса ХеСl* уменьшается всего на 9% по отношению к максимальной эффективности.

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку проведенных исследований (проект РФФИ № 12-08-00020-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gellert B., Kogelschatz U. // Appl. Phys. B. 1991. V. 52. P. 14.
2. Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. Томск: СГТ, 2011.
3. Kogelschatz U., Esrom H., Zhang J.-Y., Boyd I.W. // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 168. P. 29.
4. Shimizu A., Shimizu N., Tanaka A. et al. // J. General Virology. 2004. V. 85. P. 2397.
5. Oppenländer T. // J. Environ. Eng. Sci. 2007. V. 6. P. 253.
6. Tsuji M., Kamo N., Senda M. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2009. V. 48. P. 046002.
7. Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. // J. Photochem. Photobiol. C: Rev. 2006. V. 7. P. 145.
8. Bussiahn R., Kindel E., Pipa A. // Contributions to plasma physics. 2010. V. 50. № 2. P. 182.
9. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 3609.
10. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 6. С. 129.
11. Avtaeva S.V., Saghi B., Rahmani B. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. P. 1814.
12. Sosnin E.A., Avdeev S.M., Panarin V.A. et al. // Eur. Phys. J. D. 2011. V. 62. P. 405.
13. Keitz H.A.E. Light Calculations and Measurements. London: Macmillan & Co. Ltd. 1971.
14. Автаева С.В., Кулумбаев Э.Б. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 6. С. 497.
15. Автаева С.В. Барьерный разряд. Исследование и применение. Germany. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011.
16. Avtaeva S. Horizons in World Physics. V. 279 / Ed.: Kenneth R. Carter and George E. Murphy, New York: Nova Publishers. P. 1.
17. Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 1.
18. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А. и др. // УФН. 2003. Т.173. № 2. С. 201.