

09

Моделирование лампового источника УФ-излучения в продольном импульсно-периодическом разряде в смеси Хе—СsCl

© А.М. Бойченко,¹ М.С. Кленовский²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

e-mail: boichen@kapella.gpi.ru

² Институт электронной физики НАН Украины,
88017, Ужгород, Украина

e-mail: mironkle@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 14 июня 2012 г.)

На основе созданной кинетической модели проводится моделирование характеристик ХеСl эксиплексного источника УФ-излучения на смеси Хе с парами СsCl с возбуждением продольным импульсно-периодическим разрядом. Получены зависимости мощности и эффективности возбуждения излучения эксиплексных молекул ХеСl от концентрации ксенона, концентрации молекул СsCl и частоты следования импульсов возбуждения. Результаты расчетов сравниваются с известными экспериментальными данными. Обсуждаются причины ограничения выходных мощностей излучения исследуемой рабочей среды.

Введение

Газоразрядные лампы на эксимерных и эксиплексных молекулах (эксилампы) являются относительно новым классом источников спонтанного излучения. Они характеризуются узкополосным излучением с высокой спектральной плотностью мощности, максимумы полос которого лежат в УФ-области спектра, а энергии фотонов, в зависимости от вида излучающей молекулы лежат в диапазоне от 3.5 до 10 eV [1–3]. Уже сейчас имеются многочисленные применения этих ламп [1,2].

Подробному исследованию ламповых источников излучения на эксимерных и эксиплексных молекулах предшествовало длительное изучение лазерных активных сред на этих молекулах [4–11]. Донорами хлора служили молекулы Сl₂, ССl₄ (см., например, [12]), в более поздних исследованиях преимущественно использовались молекулы НСl.

В настоящей работе рассматривается излучение эксиплексных молекул ХеСl, возбуждаемое продольным импульсно-периодическим разрядом в смеси ксенона с парами хлорида цезия. Пары СsCl поставлялись в смесь за счет испарения солей СsCl в твердой фазе. Содержание молекул донора галогена в рабочей смеси варьировалось посредством изменения температуры печи.

Интерес к солям галогенидов щелочных металлов как донора галогена возник после работ [13–16], в которых излучение эксиплексных молекул ХеСl (308 nm) наблюдалось при использовании нетрадиционной смеси: эффективная люминесценция возникла при инъекции солей NaCl в сверхзвуковой поток плазмы. При этом заселение излучающего состояния происходило в основном за счет бинарной реакции замещения натрия из молекулы NaCl атомом или ионом ксенона. Данный

механизм являлся новым механизмом накачки возбужденного состояния молекулы ХеСl, отличающимся от ранее известных реакций ион-ионной и гарпунной реакций. Возможные характеристики ХеСl-лампы, к которым может привести данный механизм, при возбуждении смеси Хе—NaCl жестким ионизатором (электронный, ионный пучок и т.д.) рассматривались в работе [17].

Дальнейшее развитие работ по использованию паров солей щелочных металлов в качестве доноров хлора проводилось в [18–21], в которых были использованы смеси ксенона и криптона с парами NaCl, KCl, СsCl. Для возбуждения применялся продольный высоковольтный импульсно-периодический разряд. Наибольшая мощность излучения эксиплексных молекул ХеСl была достигнута при возбуждении смеси ксенона с хлоридом цезия [21]. Использование хлорида цезия позволяет также поддерживать меньшую температуру печи, что диктует более мягкие требования к условиям получения интенсивного УФ-излучения.

Кинетика процессов, происходящих при возбуждении смесей инертных газов с галогенидами щелочных металлов, еще плохо изучена. В работе [17] проведено расчетное моделирование излучательных характеристик смеси Хе—NaCl, возбуждаемой жестким ионизатором, работы по моделированию смесей с парами СsCl не проводились. В работе [22] моделировалось излучение ХеСs⁺ в смеси Ar—Хе—Сs в связи с поиском условий генерации на ионных эксиплексах [23–26]. Целью настоящей работы является выявление возможных характеристик излучения смеси Хе—СsCl в импульсно-периодическом продольном разряде. Использование возбуждения в разряде может иметь существенные преимущества как над пучковым, так и над плазменным методами в плане практического применения.

Реакции с участием частиц Cs и значения их констант скоростей, используемые в моделировании, T — температура газа (eV), T_e — температура электронов (eV). Константы скоростей конверсии ионов и ассоциации молекул в трехчастичных реакциях оценивались на основе теории Томсона

Реакция	Константа скорости, cm^{3n}/s	Литература
$\text{Xe}^+ + \text{CsCl} \rightarrow \text{Cs}^+ + \text{XeCl}^*$	$5 \cdot 10^{-10}$	
$\text{Xe}^* + \text{CsCl} \rightarrow \text{Cs} + \text{XeCl}^*$	$2 \cdot 10^{-10}$	
$\text{Cs}^* + \text{Cs} \rightarrow 2\text{Cs}$	$0.54 \cdot 10^{-8} T^{1/2}$	[32]
$\text{Cs} + e \rightarrow \text{Cs}^* + e$	$1.15 \cdot 10^{-6} T_e^{1/2} \exp\left(\frac{-1.43}{T_e}\right)$	[32]
$\text{Cs}^* + e \rightarrow \text{Cs} + e$	$0.57 \cdot 10^{-6} T_e^{1/2}$	
$\text{Cs}^* + e \rightarrow \text{Cs}^+ + 2e$	$5 \cdot 10^{-7} T_e^{1/2} \exp\left(\frac{-2.46}{T_e}\right)$	
$\text{Cs} + e \rightarrow \text{Cs}^+ + 2e$	$6.9 \cdot 10^{-8} T_e^{1/2} \exp\left(\frac{-3.89}{T_e}\right)$	[32]
$\text{Cs}^+ + 2e \rightarrow \text{Cs}^* + e$	$5.4 \cdot 10^{-27} T_e^{-9/2}$	
$\text{Cs}_2^+ + 2e \rightarrow \text{Cs}^* + \text{Cs} + e$	$5.4 \cdot 10^{-27} T_e^{-9/2}$	
$\text{Cs}_2^+ + e \rightarrow \text{Cs}^* + \text{Cs}$	$2.93 \cdot 10^{-8} T_e^{-1/2}$	[32]
$\text{Cs}^* + \text{Cs}^* \rightarrow \text{Cs}_2^+ + e$	$1.55 \cdot 10^{-9} \exp\left(\frac{-0.33}{T}\right)$	[32]
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cs}^* + \text{Cl}$	$1.61 \cdot 10^{-8} T^{-1/2}$	[32]
$\text{Xe}^* + \text{Cs} \rightarrow \text{Cs}^+ + \text{Xe} + e$	$3 \cdot 10^{-10}$	[32]
$\text{Cs}^+ + 2\text{Cs} \rightarrow \text{Cs}_2^+ + \text{Cs}$	$3 \cdot 10^{-29} \left(\frac{0.026 \cdot 7.2}{3T}\right)^3$	[32]
$\text{Cs}^+ + \text{Xe} + \text{Cs} \rightarrow \text{XeCs}^+ + \text{Cs}$	$3 \cdot 10^{-29} \left(\frac{0.026 \cdot 7.2}{3T}\right)^3$	
$\text{Cs}^* + 2\text{Cs} \rightarrow \text{Cs}_2^* + \text{Cs}$	$5 \cdot 10^{-32}$	
$\text{Cs}_2^* \rightarrow \text{Cs} + \text{Cs}$	$3.5 \cdot 10^7$	
$\text{Cs}_2^* + e \rightarrow 2\text{Cs} + e$	$1 \cdot 10^{-6}$	
$\text{XeCs}^+ + 2e \rightarrow \text{Cs}^* + \text{Xe} + e$	$5.4 \cdot 10^{-27} T_e^{-9/2}$	
$\text{XeCs}^+ + e \rightarrow \text{Cs}^* + \text{Xe}$	$2.93 \cdot 10^{-8} T_e^{-1/2}$	
$\text{Cl}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs}^+ \rightarrow \text{Cl}_2^* + \text{Cs}^+$	$2.4 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Cl}^+ + \text{Cl}^- + \text{CsCl} \rightarrow \text{Cl}_2^* + \text{CsCl}$	$7 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cl}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs} \rightarrow \text{Cl}_2^* + \text{Cs}$	$8 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl} \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}$	$5 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Xe} \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe}$	$5 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs} \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cs}$	$5 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{CsCl} \rightarrow \text{CsCl} + \text{CsCl}$	$5 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs}^+ \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cs}^+$	$2 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}^-$	$2.5 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl}^+ \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}^+$	$2.5 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Cs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Xe}^+ \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe}^+$	$2 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Xe}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Cs}$	$5 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Xe}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs}^+ \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Cs}^+$	$2 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe}$	$1 \cdot 10^{-8}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl} \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl} + \text{Xe}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Xe} \rightarrow \text{CsCl} + 2\text{Xe}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs} \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe} + \text{Cs}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{CsCl} \rightarrow 2\text{CsCl} + \text{Xe}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe} + \text{Cl}^-$	$2.4 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Cl}^+ \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe} + \text{Cl}^+$	$1.7 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{XeCs}^+ + \text{Cl}^- + \text{Xe}^+ \rightarrow \text{CsCl} + \text{Xe} + \text{Xe}^+$	$1.7 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe} + \text{Cs}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- + \text{CsCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe} + \text{CsCl}$	$5.3 \cdot 10^{-31} T^{-3}$	
$\text{Xe}_2^+ + \text{Cl}^- + \text{Cs}^+ \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Xe} + \text{Cs}^+$	$1.7 \cdot 10^{-29} T^{-9/2}$	
$\text{Cs} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}$	$1 \cdot 10^{-9}$	[44]
$\text{Cs}^* + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}$	$1 \cdot 10^{-10}$	
$\text{Cs}_2^* + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl} + \text{Cs}$	$1 \cdot 10^{-10}$	
$\text{Cs}^* + \text{Cl}_2^* \rightarrow \text{CsCl} + \text{Cl}$	$1 \cdot 10^{-10}$	
$\text{Cs}^* + \text{Xe} \rightarrow \text{Cs} + \text{Xe}$	$1 \cdot 10^{-11}$	
$\text{XeCl} + \text{Cs} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{Cs}$	$1 \cdot 10^{-11}$	
$\text{XeCl}^* + \text{Cs} \rightarrow \text{XeCl} + \text{Cs}$	$1 \cdot 10^{-11}$	
$\text{XeCl}^* + \text{CsCl} \rightarrow \text{XeCl} + \text{CsCl}$	$5 \cdot 10^{-10}$	
$\text{XeCl} + \text{CsCl} \rightarrow \text{Xe} + \text{Cl} + \text{CsCl}$	$2 \cdot 10^{-11}$	

Продолжение таблицы

Реакция	Константа скорости, см ³ⁿ /с	Литература
Cl* + CsCl → Cl ₂ * + Cs	4.9 · 10 ⁻¹⁰	[45]
CsCl + e → CsCl ⁺ + 2e	7.4 · 10 ⁻⁹ T _e ^{1/2} exp(-8.3/T _e)	
CsCl + e → Cl ⁻ + Cs	3.6 · 10 ⁻⁸ T _e ^{-3/2} exp(-4.58/T _e)	[46]
CsCl ⁺ + e → Cs* + Cl	2.93 · 10 ⁻⁸ T _e ^{-1/2}	
CsCl ⁺ + 2e → Cs* + Cl + e	5.4 · 10 ⁻²⁷ T _e ^{-9/2}	
Cs ⁺ + Xe + Cs → Cs ₂ ⁺ + Xe	3 · 10 ⁻²⁹ (0.026·7.2/3T) ³	
Xe ₂ ⁺ + Cs → Cs ⁺ + 2Xe	1 · 10 ⁻¹⁰	
Xe ₂ * + Cs → Cs ⁺ + 2Xe + e	3 · 10 ⁻¹⁰	
Cs + Cl + Cl → CsCl + Cl	1 · 10 ⁻³³	
Cs + Cl + Xe → CsCl + Xe	1 · 10 ⁻³³	
Cs + Cl + Cs → CsCl + Cs	1 · 10 ⁻³³	
Cs + Cl → CsCl	1 · 10 ⁻¹¹	

1. Кинетическая модель

У авторов имеется большой опыт моделирования ксенон- и хлорсодержащих смесей. Построение моделей проводилось в связи с различными вопросами: моделирование лазеров [9,10], задержки рекомбинации [27], ламп емкостного [28], барьерного, тлеющего разрядов, ламп с накачкой жестким ионизатором [1,3,29,30]. При составлении модели Xe–CsCl-смеси учитывался опыт создания модели Xe–NaCl-смеси [17]. В основном константы скоростей реакций с участием ксенона и хлора взяты из [17,31]. Преимущественная часть констант скоростей реакций с участием цезия либо взята из [32], либо оценивалась на основе информации, содержащейся в этой монографии, либо оценивалась исходя из характерных значений для подобного рода реакций. Константы скоростей конверсии ионов и ассоциации молекул в трехчастичных реакциях оценивались на основе теории Томсона (см., например, [33]). Реакции с участием частиц цезия и значения их констант скоростей, используемые в модели, приведены в таблице.

Система жестких дифференциальных уравнений, включающая уравнения для концентраций различных реагентов активной среды в основном и возбужденном состояниях — Xe, Xe*, Xe**, Xe₂⁺, Cl, CsCl, Cs, Cs*, Cs₂⁺, Cl*, Cl₂, XeCl*, XeCl(X), Xe₂Cl*, ионов Xe⁺, Xe₂⁺, XeCs⁺, CsCl⁺, Cs⁺, Cs₂⁺, Cl₂⁺, Cl⁺, Cl⁻ (обозначения в [17,31]) и электронов, а также уравнение теплового баланса температуры электронов, решалась с использованием пакета программ ПЛАЗЕР (PLASER) [8–11,34]. Уравнение баланса для температуры газа не учитывалось. Как показали предварительные оценки, в течение межимпульсного интервала ее значение существенно не изменяется. Всего в модели учитывалось около 170 кинетических реакций.

При моделировании использовалась временная зависимость экспериментального тока через газоразрядную трубку. Такой подход успешно использовался при моделировании лазеров на парах меди [35]. Поскольку

разряд импульсно-периодический, то вычисления проводились итерациями. Задавались начальные концентрации реагентов, после чего рассчитывались их значения к концу межимпульсного периода. Итерации прекращались, когда отличие значений энергий в импульсе излучения оксиплексных молекул XeCl* между соседними итерациями составляло менее 0.1%. Предымпulseвая концентрация молекул CsCl (в пристеночной области газоразрядной трубки (ГРТ)) задавалась в соответствии с температурой ГРТ. Задавалась также концентрация атомов ксенона, предымпulseвые значения остальных реагентов рассчитывались в модели.

Уравнение теплового баланса электронов составлялось по аналогии с [35,36]. Мощность, вкладываемая в единицу объема, описывалась слагаемым ρj(t)², где j(t) — плотность тока, ρ — удельное сопротивление плазмы,

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e v_e}{e^2 N_e} \approx \frac{6.7 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{T_e}} \left[\frac{1.1 \cdot 10^3}{T_e} + 115 \frac{[CsCl]}{N_e} T_e + \frac{[Xe]}{N_e} T_e \left(2 \exp(-8T_e) + \frac{T_e^{2.4}}{4 + T_e^{2.75}} \right) \right] \text{ Ohm} \cdot \text{cm}.$$

Здесь v_e — частота электронных столкновений, e, m_e, T_e, N_e — соответственно заряд, масса, температура и концентрация электронов, [CsCl], [Xe] — концентрации молекул CsCl и атомов Xe. В приведенном выражении температура электронов выражена в электрон-вольтах, концентрация реагентов — в см⁻³. Первое слагаемое в скобках учитывает частоту электрон-ионных столкновений, второе — частоту столкновений электронов с молекулами CsCl, третье — с атомами Xe. Для вычисления частоты столкновений ν_{Xe} = k_{Xe}[Xe] электронов с атомами Xe константа скорости k_{Xe} рассчитывалась усреднением сечения упругого взаимодействия σ(v), взятого из [37], с функцией распределения Максвелла f(v)

$$k_{Xe} = \int \sigma(v) v f(v) d^3 v$$

и аппроксимировалась выражением

$$k_{Xe} \approx 1.9 \cdot 10^{-8} \sqrt{T_e} \left(2 \exp(-8T_e) + \frac{T_e^{2.4}}{4 + T_e^{2.75}} \right) \text{cm}^3/\text{s} \quad (1)$$

(рис. 1). Зависимость тока от времени бралась из эксперимента [21].

Сечение рассеяния молекулы CsCl не имеет особенностей, как, например, атом ксенона (минимум Рамзауэра), поэтому вклад CsCl в частоту электронных столкнове-

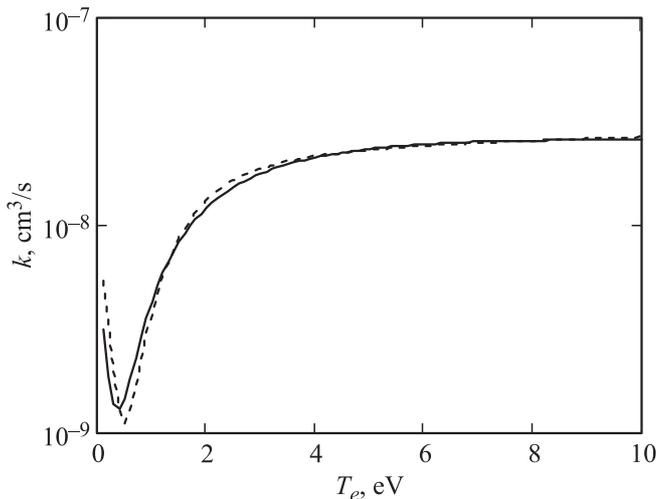


Рис. 1. Зависимость константы упругих столкновений электронов с атомами Хе от температуры электронов. Сплошная линия — расчет, штриховая — используемая аппроксимация (1).

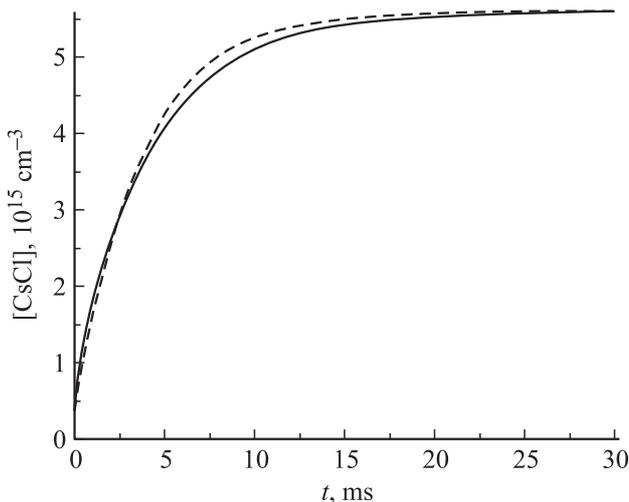


Рис. 2. Установление концентрации молекул CsCl в объеме ГРТ во времени за счет диффузии молекул со стенки ГРТ согласно уравнению (2) — штриховая линия и приблизительно посередине между стенкой и центром согласно уравнению (3) — сплошная линия ($[CsCl]_{st} = 5.6 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $p(\text{Xe}) = 30 \text{Torr}$ ($[Xe] = 3 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$), $T = 971 \text{K}$). Начальный профиль для решения уравнения (3) выбирался в виде $[CsCl](\rho, t = 0) = [CsCl]_{st}(\rho/r)^4$.

ний оценивался выражением $\nu_{CsCl} = k_{CsCl}[CsCl]$, где

$$k_{CsCl} = \sigma \sqrt{\frac{3T_e}{m_e}},$$

$\sigma \approx 300 \text{\AA}^2$ — характерное сечение рассеяния электронов на молекуле CsCl [38].

Диффузия молекул CsCl. Концентрация молекул $[CsCl]_{st}$ на стенке разрядной трубки фиксировалась в соответствии с давлением насыщенных паров солей CsCl при заданной температуре стенки. Концентрация молекул в объеме, устанавливающаяся за счет диффузии, вычислялась в соответствии с уравнением

$$\frac{d[CsCl]}{dt} = k([CsCl]_{st} - [CsCl]),$$

где $k = \frac{5.76\langle v \rangle}{3\sigma[Xe]r^2}$, $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3T}{2\mu}}$, $\sigma = \pi r_{CsCl}^2$, $r_{CsCl} = 2.9 \text{\AA}$. Здесь r — радиус разрядной трубки, r_{CsCl} — размер молекулы CsCl, μ — приведенная масса молекулы CsCl и атома Хе, T — температура газа. В итоге уравнение примет вид

$$\frac{d[CsCl]}{dt} = \frac{2.8 \cdot 10^{20} \sqrt{T}}{[Xe]} ([CsCl]_{st} - [CsCl]), \quad (2)$$

где T в eV.

Данный подход описания диффузии успешно применялся при моделировании характеристик лазера CuBr [39,40]. Для сравнения на рис. 2 представлены результаты расчетов установления концентрации CsCl во времени по уравнению (2) и уравнению диффузии

$$\frac{\partial [CsCl]}{\partial t} = D \frac{\partial^2 [CsCl]}{\partial \rho^2}, \quad (3)$$

где ρ ($0 < \rho < r$) — цилиндрическая координата, D — коэффициент взаимной диффузии молекул CsCl в ксеноне

$$D = \frac{\langle v \rangle}{3\sigma[Xe]}.$$

2. Результаты расчетов и обсуждение

Зависимость мощности излучения от концентрации ксенона. Расчетная мощность излучения достаточно медленно выходит на максимальное значение (рис. 3). Максимальная же экспериментальная мощность излучения достигается при давлении ксенона 30 Torr. Отметим, что в эксперименте наблюдалось контрагирование разряда при повышении давления ксенона выше 60–80 Torr. В данной модели учет контрагирования не предусмотрен. По-видимому, рост концентрации ксенона в рабочей зоне ГРТ выше значения, соответствующего 30 Torr, происходить не будет, так как при развитии процессов, ведущих к контракции, происходит перегрев излучающей области и вытеснение из нее ксенона.

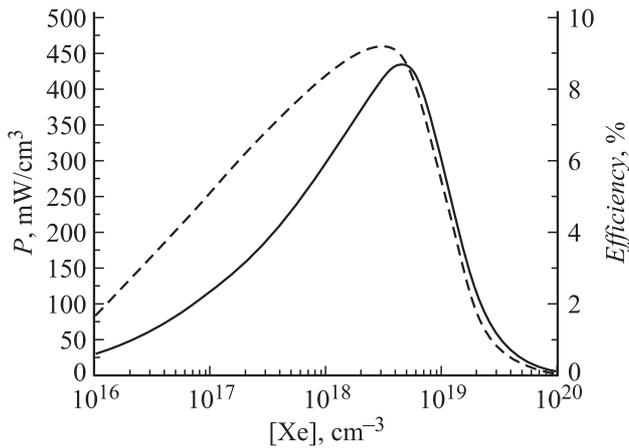


Рис. 3. Зависимость расчетных средней удельной мощности излучения (сплошная линия) и КПД по вводимой в среду энергии (штриховая линия) от концентрации ксенона ($[CsCl]_{st} = 5.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $f = 4 \text{ kHz}$, $T = 950 \text{ K}$).

В связи с этим в отличие от расчетной кривой (рис.3) реальная оптимальная концентрация ксенона в ГРТ, используемой в эксперименте [21], действительно соответствует давлению, не превосходящему 30–40 Торр ($[Xe] = 3 \cdot 10^{17} - 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 950 \text{ K}$).

Зависимость мощности излучения от концентрации CsCl. Расчетный оптимум по концентрации CsCl сдвинут примерно на 2 порядка по сравнению с экспериментальным значением (рис. 4). Отметим, что изменение температуры в области 950 К на величину 150 К приводит примерно к 10-кратному изменению давления насыщенных паров CsCl [41]. Различию экспериментальных и расчетных значений могут способствовать три различных фактора.

Во-первых, диффузия молекул CsCl в более холодные ($T_0 < T$) области разряда (обычно области вблизи электродов) (см., например, [42,43]) будет приводить к снижению концентрации молекул CsCl. Во-вторых, дополнительное снижение концентрации

$$[CsCl](T) = \frac{D(T_0)}{D(T)} [CsCl](T_0)$$

будет происходить за счет зависимости коэффициента диффузии от температуры, имеющей для большинства веществ вид $D \propto T^{1.7-1.79}$. Отметим, что температура среды по сечению обычно неоднородна. На оси разрядной трубки температура может в 1.5–2 раза превышать температуру стенок ГРТ. В-третьих, в случае преимущественного саморазогрева газа разрядом температура на внутренней поверхности стенки газоразрядной камеры будет превышать температуру на внешней поверхности стенки ГРТ. Поскольку термопара была установлена на внешней поверхности кварцевой стенки трубки, а порошок CsCl располагался внутри, то это могло сказаться на занижении показаний термопары от реальной температуры нагрева порошка CsCl.

Таким образом, различие расчетной и экспериментальной оптимальной концентрации на два порядка вполне объяснимо и зависит от мощности, вкладываемой в среду, и особенностей теплоизоляции разряда.

Зависимость мощности излучения от частоты следования импульсов возбуждения. Расчетные и экспериментальные зависимости мощности излучения от частоты следования импульсов хорошо согласуются при выборе в расчетах концентрации молекул хлорида цезия в пристеночной области ГРТ, равной $[CsCl]_{st} = 5.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (рис. 5). В экспериментальной работе определен только общий КПД, значение которого

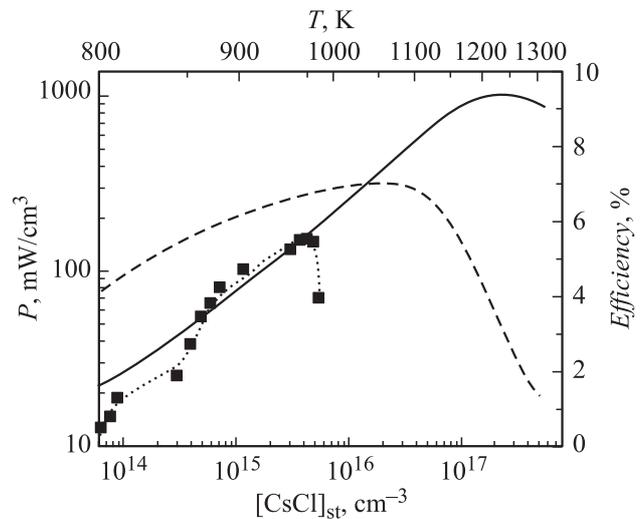


Рис. 4. Зависимость средней удельной мощности излучения (сплошная линия — расчет, ■ — эксперимент) и расчетного КПД по вводимой в среду энергии (штриховая линия) от концентрации молекул $[CsCl]_{st}$ на стенке ГРТ ($[Xe] = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $f = 4 \text{ kHz}$, $T = 950 \text{ K}$). Вверху указана температура насыщенных паров CsCl, соответствующая данной концентрации.

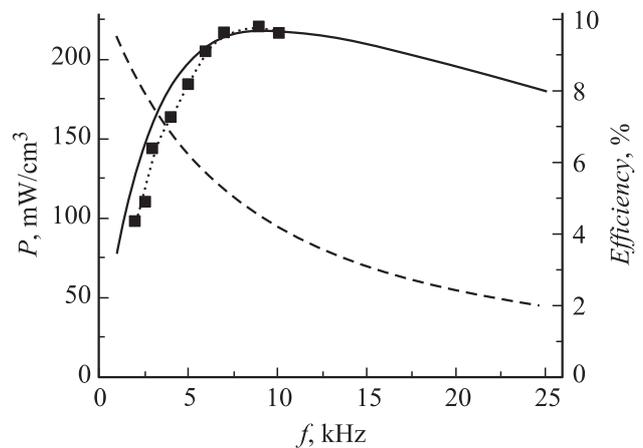


Рис. 5. Зависимость средней удельной мощности излучения (сплошная линия — расчет, ■ — эксперимент) и расчетного КПД по вводимой в среду энергии (штриховая линия) от частоты следования импульсов возбуждения ($[Xe] = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $[CsCl]_{st} = 5.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $T = 950 \text{ K}$).

составляло около 1% [21]. Расчетное значение КПД по вводимой в среду энергии при низких частотах (порядка 1 kHz) не превышает 10% и в оптимуме по мощности излучения составляет примерно 4–5%.

Выводы

Построена модель ХеСl эксиплексной лампы на смеси Хе–СsСl, возбуждаемой продольным импульсно-периодическим разрядом. Проведена расчетная оптимизация работы лампы. При возбуждении среды продольным разрядом в импульсно-периодическом режиме возможно получение мощности излучения на уровне нескольких десятых ватт с кубического сантиметра излучающей среды (с общим КПД порядка 1%), что превосходит мощность излучения этой же лампы с парами NaСl в 20 раз и с парами КСl в 1.2 раза. Расчетный КПД по вводимой в среду энергии при низких частотах (порядка 1 kHz) не превышает 10% и в оптимуме по мощности излучения составляет примерно 4–5%. Ограничение дальнейшего роста мощности излучения парогазовой смеси Хе–СsСl, возбуждаемой продольным импульсно-периодическим разрядом, связано с развивающимися процессами контрагирования разряда. Использование, например, возбуждения жестким ионизатором может существенно повысить энергию излучения в импульсе, но сопряжено с трудностями реализации импульсно-периодического режима.

Список литературы

- [1] Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. Томск: STT Publishing (Scientific and Technical Translations), 2011. 512 с.
- [2] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин А.Э., Тарасенко В.Ф., Шутц Д.В., Ерофеев М.И. // УФН. 2003. Т. 173. Вып. 2. С. 201–217.
- [3] Бойченко А.М., Яковленко С.И. Моделирование ламповых источников излучения. С. 569–608. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных. Том XI-4: Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005. 822 с.
- [4] Эксимерные лазеры. Пер. с англ. / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981. 246 с.
- [5] Газовые лазеры. Пер. с англ. / Под ред. И. Мак-Даниэля и У. Нигена. М.: Мир, 1986. 552 с.
- [6] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электро-разрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
- [7] Молчанов А.Г. // Труды ФИАН. 1986. Т. 171. С. 54–127.
- [8] Плазменные лазеры видимого и ближнего УФ-диапазонов / Под ред. С.И. Яковленко. Труды ИОФАН. М.: Наука, 1989. Т. 21. 144 с.
- [9] Boichenko A.M., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2000. Vol. 10. N 6. P. 1159–1187.
- [10] Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Лазеры на эксиплексных и эксимерных молекулах. С. 471–503. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных. Том XI-4: Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005. 822 с.
- [11] Yakovlenko S.I. Excimer and exciplex lasers. P. 369–411. In: Gas Lasers / Ed. M. Endo, R.F. Walter. NY: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 556 p.
- [12] Бойченко А.М., Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. // Краткие сообщения по физике. 1990. Вып. 9. С. 9–11.
- [13] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф., Любченко Ф.Н., Тюкавкин А.В. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 43–51.
- [14] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф., Любченко Ф.Н., Тюкавкин А.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 9–20.
- [15] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф., Любченко Ф.Н., Тюкавкин А.В., Шалашков В.И. Непрерывные плазмохимические источники света. М.: БИОР, 1997. 160 с.
- [16] Костенко О.Ф. // Исследовано в России. 2001. С. 715–731. (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/065.pdf>)
- [17] Бойченко А.М. // Квант. электрон. 1999. Т. 29. Вып. 2. С. 163–167.
- [18] Рийвес Р.Б., Светличный Е.А., Жменяк Ю.В., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 90–93.
- [19] Рийвес Р.Б., Жменяк Ю.В., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 102–105.
- [20] Кленовский М.С., Рийвес Р.Б., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 7. С. 81–84.
- [21] Кленовский М.С., Кельман В.А., Жменяк Ю.В., Шпеник Ю.О. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 5. С. 117–122.
- [22] Lawless J.L., Lo D. // Appl. Phys. B. 1995. Vol. 60. P. 391–403.
- [23] Басов Н.Г., Войтик М.Г., Зуев В.С., Кутахов В.П. // Квант. электрон. 1985. Т. 12. Вып. 11. С. 2204–2212.
- [24] Басов Н.Г., Войтик М.Г., Зуев В.С., Кутахов В.П. // Квант. электрон. 1985. Т. 12. Вып. 11. С. 2213–2225.
- [25] Sauerbrey R., Langhoff H. // IEEE J. Quant. Electr. 1985. Vol. QE-21. N 3. P. 179–181.
- [26] Бойченко А.М., Яковленко С.И. // Квант. электрон. 2000. Т. 30. Вып. 8. С. 681–686.
- [27] Бойченко А.М., Яковленко С.И. // Квант. электрон. 1994. Т. 21. Вып. 3. С. 253–260.
- [28] Boichenko A.M., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2003. Vol. 13. N 12. P. 1461–1466.
- [29] Boichenko A.M., Erofeev M.V., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2007. Vol. 17. N 6. P. 798–806.
- [30] Boichenko A.M., Lomaev M.I., Tarasenko V.F. // Laser Physics. 2008. Vol. 18. N 6. P. 738–748.
- [31] Boichenko A.M., Yakovlenko S.I., Tarasenko V.F. // Laser and Particle Beams. 2000. Vol. 18. P. 655–660.
- [32] Ключарев А.Н., Янсон М.Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
- [33] Квливидзе В.А., Красильников С.С. Введение в физику атомных столкновений. М.: МГУ, 1985. 224 с.

- [34] *Yakovlenko S.I.* // Laser Physics. 1991. Vol. 1. N 6. P. 565–589.
- [35] *Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И.* Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов-2. Т. 1. М.: Физматлит, 2009. 544 с.
- [36] *Boichenko A.M., Yakovlenko S.I.* // Laser Physics. 2002. Vol. 12. N 7. P. 1007–1021.
- [37] *Яковленко С.И.* Релаксация за счет упругих столкновений. С. 40–62. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. Серия Б: справочные приложения, базы и базы данных. Том XI-4: Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005. 822 с.
- [38] *Jaduszliwer B., Tino A., Bederson B.* // Phys. Rev. A. 1984. Vol. 30. N 3. P. 1269–1276.
- [39] *Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Torgaev S.N.* // Laser Physics. 2008. Vol. 18. N 12. P. 1522–1525.
- [40] *Торгаев С.Н., Губарев Ф.А., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В.* // Известия вузов: Физика. 2011. Т. 201. Вып. 2. С. 81–84.
- [41] *Игнатъев В.В., Криворучко В.А., Мигачев А.И.* Давление насыщенных паров. В кн.: Физические величины: справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [42] *Mildren R.P.* // J. Quant. Electr. 2000. Vol. 36. N 10. P. 1145–1150.
- [43] *Mildren R.P.* // J. Quant. Electr. 2003. Vol. 39. N 14. P. 592–599.
- [44] *Maya J., Davidovits P.* // J. Chem. Phys. 1974. Vol. 61. N 3. P. 1082–1085.
- [45] *Kubodera S., Wisoff P.J., Sauerbrey R.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1992. Vol. 9. N 1. P. 10–21.
- [46] *Смирнов Б.М.* Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1982. 320 с.