

Коаксиальные HgI-эксилампы

А.Н.Малинин*, А.В.Поляк*, Н.Н.Гуйван*, Н.Г.Зубрилин**, Л.Л.Шимон*

Экспериментально исследовано излучение коаксиальных HgI-эксиламп, накачка которых осуществлялась импульсно-периодическим барьерным разрядом. Продемонстрирована устойчивая работа эксиламп при частотах повторения импульсов накачки 0.5–12 кГц, получена средняя мощность излучения 0.6 Вт на $\lambda = 444$ нм. Установлено, что при добавлении 0.8 % ксенона к смеси диодида ртути с гелием импульсная и средняя мощности увеличиваются на 30 %. Падение мощности излучения после воздействия 2.5×10^6 импульсов составляет 5 %. Дана интерпретация результатов оптимизации характеристик эксиламп.

Ключевые слова: эксилампа, барьерный разряд, газоразрядная плазма, компоненты смеси, диодид ртути, инертные газы.

1. Введение

Интерес к эксимерным источникам спонтанного излучения видимого, УФ и ВУФ диапазонов (эксилампам) обусловлен рядом обстоятельств, связанных с их практическим применением [1–6]. Так, для многих приложений достаточно иметь некогерентный мощный источник с большой площадью излучения (свыше 100 см²), излучающий в относительно широком интервале длин волн. Кроме того, эксилампы просты в изготовлении и не критичны к мощности накачки и геометрии активной области. Это позволяет говорить о перспективности использования эксиламп видимого диапазона для решения задач агрофизики по повышению эффективности возбуждения молекул хлорофилла и тем самым увеличения скорости роста растений, для накачки лазеров на органических красителях, а также в медицине и биотехнологии.

К настоящему времени созданы и исследованы эксимерные источники спонтанного видимого излучения нескольких типов, в которых для возбуждения рабочей смеси используется барьерный или другие разряды [6–8]. В большей части этих работ основное внимание уделяется эксимерной молекуле HgBr* (монобромид ртути).

В настоящей работе экспериментально исследуется влияние состава рабочей смеси, напряжения на эксилампе и частоты повторения импульсов на спектральные, энергетические и временные характеристики излучения коаксиальной HgI-эксилампы.

2. Экспериментальная установка и методика измерений

Исследование характеристик излучения проводилось в смесях HgI₂ – He, HgI₂ – N₂(Xe) – He при использовании

цилиндрических эксиламп двух типов, обеспечивающих накачку рабочих смесей барьерным импульсно-периодическим разрядом. На рис. 1 представлена конструкция коаксиальных эксиламп. Лампы изготовлены из кварцевых трубок диаметром 34 мм и длиной 20 см. Внутри них по оси расположен электрод 4 круглого сечения диаметром 4 мм, изготовленный из вольфрама (рис. 1,а), или два электрода, смещенных симметрично относительно оси, расстояние между которыми равно 20 мм (рис. 1,б). Второй электрод 3 у обеих ламп – перфорированный (с коэффициентом пропускания излучения 72 %) и находится на внешней поверхности кварцевой трубки по всей ее длине. В качестве вводов 6 использованы электроды кварцевых ламп типа ДРТ-240, сваренные в торцевые поверхности таким образом, чтобы обеспечивался контакт с рабочим электродом 4. На противоположной торцевой поверхности располагается патрубков 1 из кварцевого стекла, внутри которого имеется капилляр диаметром 1 мм, служащий для уменьшения выноса паров диодида ртути из лампы в систему откачки.

Возбуждение эксиламп осуществлялось от генератора наносекундных импульсов (рис. 2). В качестве коммутатора К использовался тиратрон ТГИ2-130/10, накопительный конденсатор С набирался из малоиндуктивных

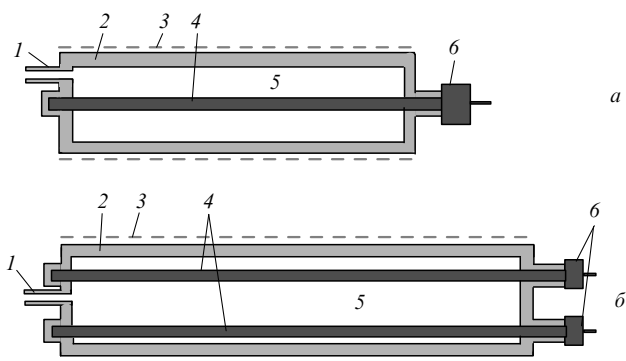


Рис. 1. Конструкция коаксиальных эксимерных ламп: 1 – патрубок откачки и напуска газов; 2 – кварцевая трубка; 3 – перфорированный электрод; 4 – электрод; 5 – разрядная область; 6 – высоковольтный ввод.

*Ужгородский национальный университет, Украина, 88000 Ужгород, ул. Пидгирна, 46; e-mail: mal@univ.uzhgorod.ua

**Институт физики НАНУ, Украина, 03028 Киев, просп. Науки, 46; e-mail: zubrilin@iop.kiev.ua

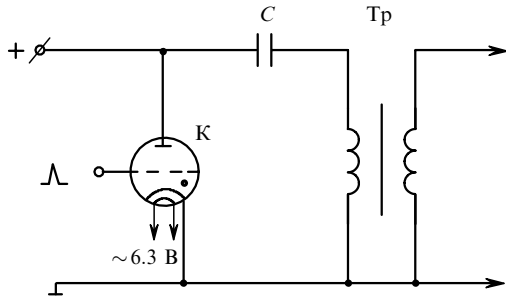


Рис.2. Электрическая схема генератора накачки: К – коммутатор; С – накопительная емкость; Тр – повышающий трансформатор.

конденсаторов КВИ-3. Перезарядка конденсатора С осуществлялась через первичную обмотку повышающего трансформатора Тр с коэффициентом трансформации 1:3. В процессе экспериментов напряжение на конденсаторе изменялось от 4 до 9 кВ, частота повторения импульсов – от 0.5 до 12 кГц, $C = 1.36$ или 3.4 нФ. Регистрация импульсов напряжения и разрядного тока эксилампы производилась с помощью двухлучевого осциллографа С8-2, сигнал на который подавался с делителя напряжения и интегрирующей цепи калиброванного пояса Роговского соответственно. Амплитудно-временные характеристики излучения в диапазоне 400–450 нм, выделяемого светофильтром типа СЗС 8, определялись при помощи фотоэлемента ФЭК-22СПУ, сигнал с которого регистрировался осциллографом С8-2. На входе фотоэлемента устанавливалась диафрагма площадью 1 см². Средняя мощность излучения в этом диапазоне измерялась прибором «Кварц-01».

При исследовании спектральных характеристик излучения газоразрядной плазмы оптический сигнал после прохождения диафрагмы площадью 1 см² и линзы попадал на входную щель призматического монохроматора ЗМР-3, регистрировался фотоэлектронным умножителем ФЭУ-79, усилителем У1-2 и записывался самописцем КСП-4 (система регистрации была подобна применяемой нами в работе [6]). Обратная линейная дисперсия ЗМР-3 составляла 44 Å/мм на $\lambda = 434$ нм. Размеры щелей монохроматора при проведении спектральных измерений составляли 0.1 мм, а при исследовании интегральных характеристик (зависимости интенсивностей излучения спектральных полос от компонентного состава смесей) – 1.5 мм. Калибровка системы регистрации проводилась с помощью эталонной ленточной вольфрамовой лампы СИ8-200 при температуре нити накала 2173 К.

Рабочие смеси готовились непосредственно в газоразрядной кювете при последовательном напуске тяжелого инертного газа ксенона или азота и легкого буферного газа гелия. Диодид ртути HgI₂ в количестве 60 мг предварительно загружался в эксилампу. Обезгаживание лампы производилось путем прогрева при температуре 50 °С и откачки в течение двух часов. Парциальное давление паров HgI₂ в рабочих смесях создавалось за счет нагрева рабочей смеси при диссипации энергии высокочастотного разряда и определялось по температуре наиболее холодной части лампы на основании линейной интерполяции справочных данных [9]. В отличие от наших исследований [6], в эксилампах применялась теплоизоляция с целью увеличения температуры нагрева эксилампы и, тем самым, повышения парциального давления паров диодидида ртути до оптимального [7]. Теплоизо-

ляция осуществлялась слоем фторопластовой пленки толщиной ~ 0.2 мм, расположенной на поверхности эксилампы. Парциальные давления газов измерялись мембранным образцовым вакуумметром или манометром.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Спектральные и интегральные характеристики излучения

Спектры излучения HgI-эксиламп исследовались в разных по компонентному составу рабочих смесях HgI₂-He, HgI₂-N₂(Xe)-He в области парциальных давлений гелия 100–180 кПа, азота 0.5–3.5 кПа, ксенона 0.5–7 кПа и диодидида ртути до 65 Па. Напряжение, ток и частота повторения импульсов накачки f составляли 12–27 кВ, 350 А и 0.5–2 кГц соответственно.

Характерные спектры излучения HgI-эксилампы с двумя внутренними электродами (см. рис.1,б) для рабочей смеси HgI₂-He при $f = 2$ кГц приведены на рис.3,а, а для смеси HgI₂-Xe-He при $f = 0.5$ кГц – на рис.3,б. В первом случае наблюдается только излучение системы электронно-колебательных полос перехода $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ ($v' = 0 - 5$, $v'' = 9 - 19$) молекул HgI* [10, 11] с максимумом излучения на длине волны $\lambda = 444$ нм, крутым ростом интенсивности со стороны длинноволнового участка и медленным спадом в коротковолновой области (рис.3,а). Подобные закономерности присутствуют в спектрах смесей с ксеноном и молекулярным азотом. Для смеси с ксеноном при пониженных частотах повторения импульсов накачки (500 Гц, рис.3,б) вместе с системой полос перехода $B \rightarrow X$ наблюдаются линия ксенона $\lambda = 823$ нм, переход $6s[3/2]_2^0 - 6p[3/2]_2$, а также слабо разрешенные пики, которые соответствуют линиям ксенона $6s[3/2]_2^0 - 7p[3/2]_2$ (462 нм) и $6s[3/2]_2^0 - 7p[5/2]_2$ (467 нм). Для смеси с азотом при $f = 500$ Гц характерно наличие полос второй положительной системы (переход $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$; 337, 357 и 380 нм) и линий гелия (переходы $2p^3P_{2,1,0}^0 - 3s^3S_1$ и $2p^3P_0^0 - 3d^3D_{3,2,1}$; 706 и 587 нм), как это имеет место в HgBr/HgCl-эксилампе [6]. Расшифровка спектров излучения проводилась по данным справочников [11, 12].

Результаты исследований интегральных характеристик (зависимости средней мощности излучения от пар-

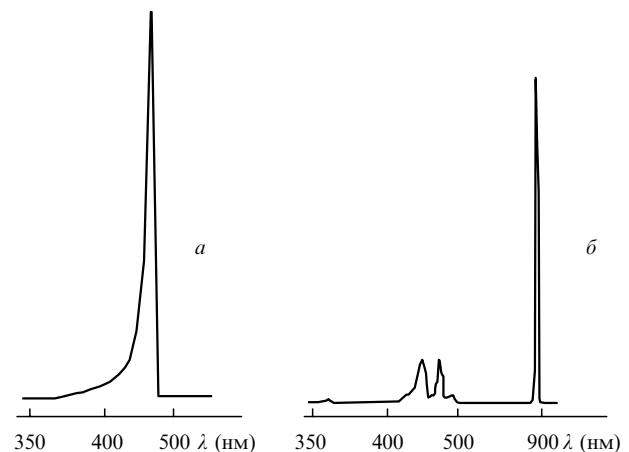


Рис.3. Спектры излучения HgI-эксилампы с двумя внутренними электродами для смесей HgI₂:He = 2.6 Па: 162 кПа, $f = 2$ кГц (а) и HgI₂:Xe:He = 0.08 Па: 1 кПа: 161 кПа, $f = 500$ Гц (б) при напряжении на эксилампе 22.5 кВ и токе 350 А.

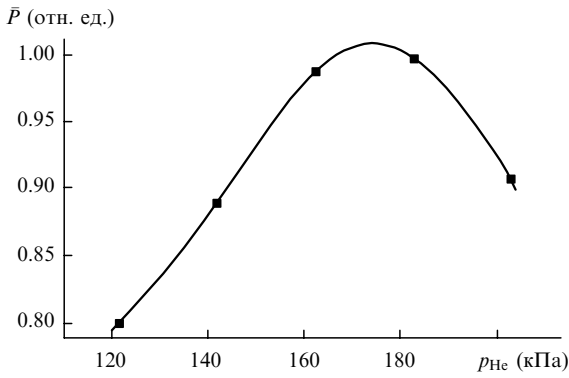


Рис.4. Зависимость средней мощности излучения от парциального давления гелия при $f = 2$ кГц и напряжении на эксилампе 22.5 кВ.

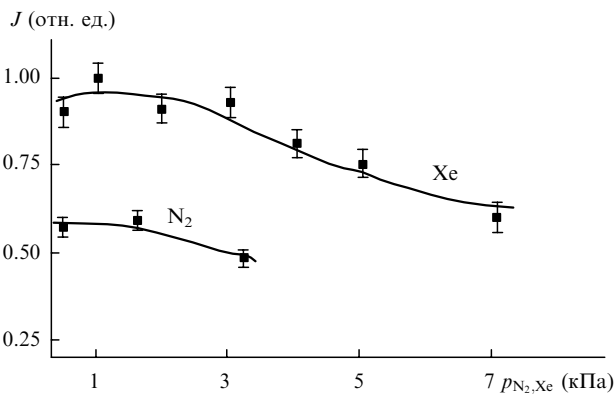


Рис.5. Зависимость интенсивности излучения молекул HgI* от парциального давления азота и ксенона при общем давлении смеси 162 кПа.

циальных давлений буферного газа гелия, молекулярного азота и ксенона), а также времени работы HgI-эксилампы на одной порции рабочей смеси при оптимальных парциальных давлениях компонентов смесей представлены на рис.4–6. Максимальная мощность излучения достигается при парциальном давлении гелия 160–

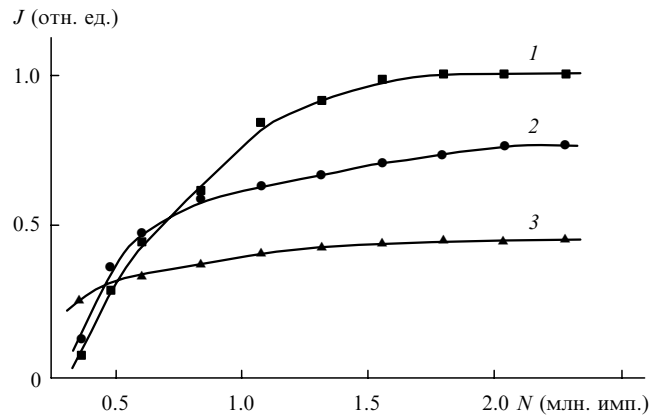


Рис.6. Зависимость интенсивности излучения от общего числа импульсов для смесей HgI₂:Xe:He = 30 Па:1 кПа:161 кПа (1), HgI₂:He = 30 Па:162 кПа (2) и HgI₂:N₂:He = 30 Па:1 кПа:161 кПа (3).

180 кПа, азота – 1.5 кПа и ксенона – 1 кПа. Падение мощности излучения после воздействия 2.5×10^6 импульсов составило не более 5% для всех исследуемых смесей.

3.2. Временные и энергетические характеристики излучения

Временные и энергетические характеристики излучения HgI-эксилампы приведены на рис.7–9. Лампы работали стабильно в диапазонах изменений параметров, указанных на рисунках. На рис.7 представлены осциллограммы тока разряда и импульсов излучения в смесях дииодида ртути с гелием, ксеноном и азотом для эксилампы с одним внутренним электродом (рис.1,а) при оптимальных по мощности излучения экспериментальных условиях. Погрешность и воспроизводимость результатов осциллографических измерений составляли 10 и 90% соответственно. Импульсы тока имели разную полярность, амплитуду ~ 350 А и длительность ~ 150 нс, а их сложная форма была вызвана перезарядкой цепи диэлектрик – плазма. Для смесей HgI₂–He, HgI₂–Xe–He и

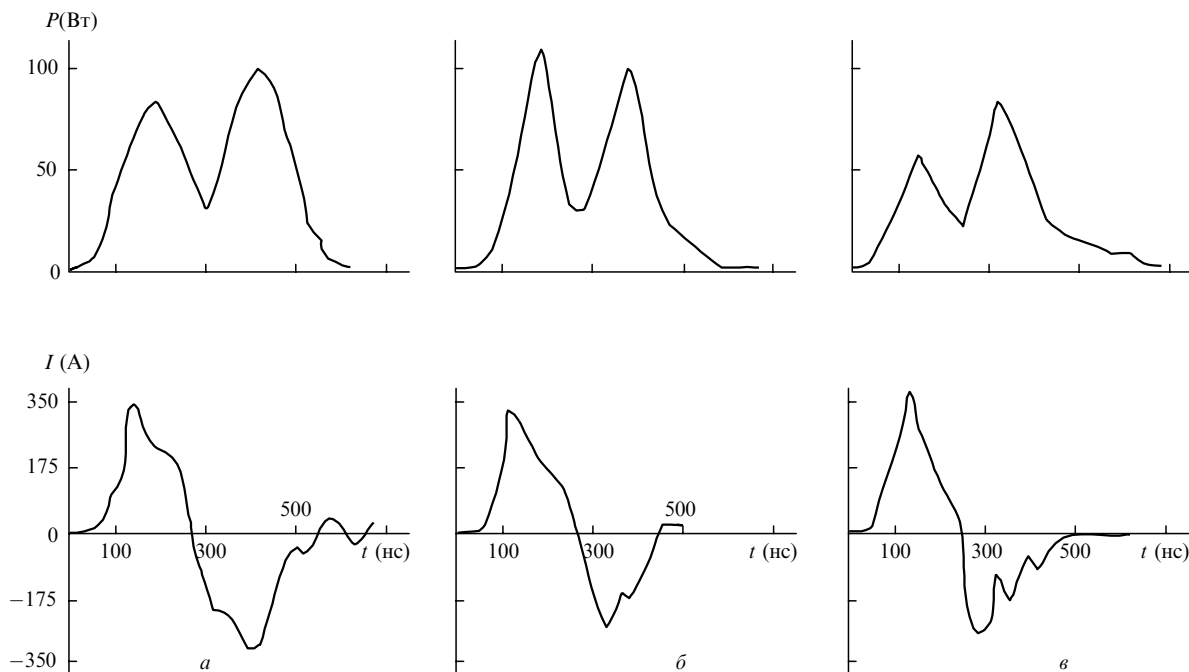


Рис.7. Осциллограммы импульсов мощности излучения P и тока разряда I в смесях HgI₂:He = 0.24 Па:162 кПа (а), HgI₂:Xe:He = 0.24 Па:1 кПа:161 кПа (б) и HgI₂:N₂:He = 0.24 Па:0.5 кПа:161.5 кПа (в) при $C = 1.36$ нФ, $U = 22.5$ кВ, $f = 2$ кГц.

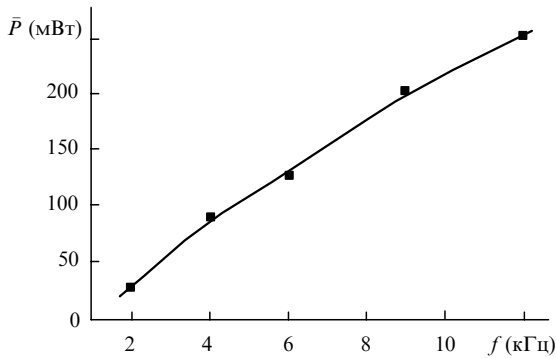


Рис.8. Зависимость средней мощности излучения от частоты повторения импульсов в смеси HgI_2 – Ne при общем давлении смеси 162 кПа, $U = 22.5$ кВ, $C = 1.36$ нФ.

HgI_2 – N_2 – Ne длительности импульсов на полувысоте составляли ~ 150 , ~ 120 и ~ 150 нс соответственно. Обращает на себя внимание соотношение амплитуд первого и второго импульсов излучения в смесях разного состава: амплитуда второго импульса в смеси HgI_2 – Xe – Ne меньше амплитуды первого, в то время как в смесях HgI_2 – Ne и HgI_2 – N_2 – Ne она больше.

Максимальная импульсная мощность излучения 130 Вт достигается в смеси диоксида ртути с гелием и ксеноном. Эксилампа с двумя внутренними электродами, в отличие от эксилампы с одним электродом, имела неоднородное распределение мощности излучения по поверхности – мощность излучения в плоскости, проходящей через два электрода в симметричных направлениях, была в 1.5 раза выше мощности излучения в направлении, проходящем перпендикулярно этой плоскости. С ростом частоты повторения импульсов средняя мощность излучения эксилампы росла линейно вплоть до частот 12 кГц (рис.8).

Увеличение емкости накопительного конденсатора C от 1.36 до 3.4 нФ приводит к возрастанию средней мощности в 4.7 раза (рис.9). Это обусловлено лучшим согласованием выходного сопротивления генератора с нагрузкой (лампой). Наибольшая средняя мощность была получена в смеси состава HgI_2 : Xe : $\text{Ne} = 1:15:2388$ при общем давлении 162 кПа, частоте повторения импульсов накачки 12 кГц ($C = 3.4$ нФ) и составляла 0.6 Вт.

Характер разряда во всех исследуемых смесях был похож на типичный для барьерного разряда [2, 7, 13, 14].

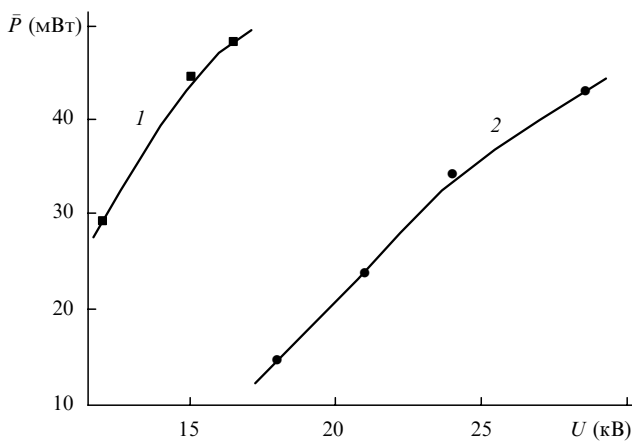


Рис.9. Зависимость средней мощности излучения от напряжения на эксилампе в смеси HgI_2 – Ne при $C = 3.4$ (1), 1.36 нФ (2); общее давление смеси 162 кПа, $f = 2$ кГц.

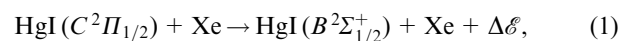
С увеличением частоты повторения импульсов накачки интенсивность излучения однородного разряда возрастала, тогда как интенсивность в нитевидных каналах падала. Толщина разрядной области и длина горения разряда составляли 13 мм и 20 см соответственно.

Изменения в спектрах излучения HgI -эксилампы при частотах 500 Гц (см. рис.3,б) вызваны уменьшением температуры нагрева рабочей смеси эксилампы, что приводит к снижению парциального давления насыщенных паров диоксида ртути и, соответственно, к уменьшению концентрации молекул HgI_2 . Это, в свою очередь, вызывает ослабление интенсивности излучения в полосах с максимумом на $\lambda = 444$ нм [7]. Линии ксенона и гелия, а также полосы азота наблюдаются при повышении чувствительности системы регистрации излучения.

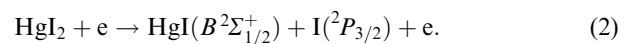
Наличие оптимального парциального давления для буферного газа гелия (см. рис.4) связано с долей энергии разряда, которая расходуется на нагрев рабочей смеси. Как показали наши исследования [7], при создании парциального давления паров дигалогенидов ртути за счет нагрева эксилампы внешним электронагревателем имеется парциальное давление диоксида ртути, оптимальное по мощности излучения молекул HgI^* . И в нашем случае (при частотах повторения импульсов накачки ~ 2 кГц) оптимальная область парциальных давлений гелия обеспечивает такой вклад энергии в разряд, что температура нагрева эксилампы ~ 130 °С создает парциальное давление насыщенных паров 65 Па, близкое к оптимальному [7].

Добавление азота (зависимость 1 на рис.5, зависимость 3 на рис.6) приводит к уменьшению мощности излучения по сравнению с двухкомпонентной смесью, т. к. энергия разряда расходуется на дополнительные каналы колебательного возбуждения молекулярного азота [15].

Повышение мощности излучения в смесях с ксеноном (зависимость 2 на рис.5, зависимость 1 на рис.6) может быть вызвано тушением состояния $C^2\Pi_{1/2}$ с передачей населенности на состояние $B^2\Sigma_{1/2}^+$:



где $\Delta\mathcal{E}$ – разность энергий между состояниями $C^2\Pi_{1/2}$ и $B^2\Sigma_{1/2}^+$ молекул HgI . Этот процесс был впервые обнаружен в экспериментах по фотодиссоциации диоксида ртути [16, 17]. Аргументами в пользу этого предположения могут служить изменения соотношения амплитуд импульсов излучения и уменьшение их длительности (рис.7,б) на $\lambda = 444$ нм (система полос перехода $B \rightarrow X$ эксимерных молекул HgI) в смеси HgI_2 – Xe – Ne , а также данные по $k_q\tau = 4.5 \times 10^{-18}$ см³ [16] (k_q – константа скорости тушения C -состояния молекул монооксида ртути ксеноном, τ – время жизни молекул $\text{HgI}(C^2\Pi_{1/2})$). Это тушение дополняет основной процесс – возбуждение молекул $\text{HgI}(B^2\Sigma_{1/2}^+)$ [7, 18, 19]:



Изменение однородности излучения для эксилампы с двумя внутренними электродами вызвано увеличением параметра E/p (E – напряженность электрического поля, p – общее давление смеси), которое происходит вследствие уменьшения расстояния между электродами 4 и сеткой 3 (см. рис.1,б). При большем параметре E/p на-

селенность B -состояния выше [20] и поэтому мощность излучения эксилампы возрастает.

4. Заключение

Исследование спектральных, интегральных и временных характеристик коаксиальных ламп двух типов, накачиваемых барьерным разрядом, выявило, что на $\lambda = 444$ нм в лампе с одним внутренним электродом наблюдается однородное по интенсивности излучение по всей поверхности лампы. Для лампы с двумя внутренними электродами интенсивность излучения в направлении плоскости, проходящей через эти электроды, в 1.5 раза больше, чем в направлении нормали к плоскости. В смеси состава HgI₂:Xe:He = 1:15:2388 при общем давлении 162 кПа мощность излучения максимальна. Средняя и импульсная мощность для этой смеси достигают 0.6 и 130 Вт соответственно. Имеет место устойчивая работа HgI-эксиламп при частотах повторения импульсов накачки до 12 кГц.

1. Борисов В.М., Водчиц В.А., Ельцов А.В., Христофоров О.В. *Квантовая электроника*, **25**, 308 (1998).
2. Визирь В.А., Скаун В.С., Смородов Г.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Червяков В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 519 (1995).
3. Kumagai H., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2619 (1989).
4. Kumagai H., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 1583 (1989).
5. Kumagai H., Toyoda K. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2811 (1991).
6. Малинин А.Н., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л. *Оптика и спектроскопия*, **89**, 905 (2000).
7. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **7**, 1032 (1997).
8. Furusawa H., Okada S., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1877 (1995).
9. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. *Свойства неорганических соединений (справочник)* (Л.: Химия, 1983).
10. Wieland K. *Zs. Elektron.*, **64**, 761 (1980).
11. Pearse R.W., Gaydon A.G. *The identification of molecular spectra* (Ldn: Choptman Holl LTD, 1963), p.347.
12. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. *Таблицы спектральных линий* (М.: Наука, 1977).
13. Волкова Г.А., Кирилова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В. *ЖПС*, **41**, 691 (1984).
14. Ищенко В.И., Лисицин В.Н., Сорокин А.Р. *Оптика и спектроскопия*, **39**, 190 (1975).
15. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987).
16. Roxlo C., Mandl A. *J. Chem. Phys.*, **72**, 541 (1980).
17. Бажулин С.П., Басов Н.Г., Бугримов С.Н., Зуев В.С., Камруков А.С., Кашников Г.Н., Козлов Н.П., Овчинников П.А., Опекан А.Г., Орлов В.К., Протасов Ю.С. *Квантовая электроника*, **13**, 1017 (1986).
18. Малинин А.Н., Шуайбов А.К., Шевера В.С. *Квантовая электроника*, **10**, 1495 (1983).
19. Kushawaha V., Mahmood M. *J. Appl. Phys.*, **62**, 2173 (1987).
20. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **7**, 1177 (1998).