

Оптические характеристики газоразрядной плазмы на рабочих смесях эксимерного HgBr/HgI-излучателя

А.Н.Малинин

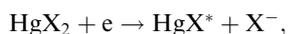
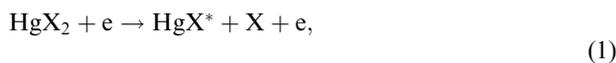
Установлены состав и парциальные давления компонентов газовых смесей, дающих максимальный выход излучения одновременно на двух длинах волн $\lambda_{\max} = 502$ нм и 444 нм в режиме саморазогрева эксимерного HgBr/HgI-излучателя при возбуждении барьерным разрядом. Выявлены условия долговременной (не менее 4×10^6 импульсов) стабильной работы при повышенных (0.5–10 кГц) частотах следования импульсов f . Достигнуты импульсная и средняя (при $f = 5$ кГц) плотности мощности излучения 270 Вт/см³ и 65 мВт/см³ соответственно и КПД преобразования мощности накачки в мощность излучения $\sim 30\%$. Обсуждаются процессы, повышающие населенность верхнего $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния моногалогенидов ртути.

Ключевые слова: эксимерный лазер, видимый спектральный диапазон, рабочие смеси, газоразрядная плазма барьерного разряда.

1. Введение

Несмотря на то что эксимерные лазеры существуют уже 30 лет, до сих пор не созданы мощные газоразрядные импульсно-периодические лазеры, генерирующие излучение в видимом спектральном диапазоне в режиме высокой частоты следования импульсов. Для ряда практических применений, таких как мониторинг воздушного и водных бассейнов, дальнометрия морских объектов, подводная связь, обработка материалов электронной техники и др., требуется создание мощных импульсно-периодических лазеров, которые генерируют излучение в зелено-синей области спектра.

Возможным инструментом для решения указанных задач может служить эксимерный HgBr/HgI-лазер, спектральный диапазон которого имеет два участка (502 ± 20 нм и 444 ± 5 нм) [1–4], излучающих одновременно. Для проектирования и создания мощных лазеров необходимы данные по оптическим характеристикам излучения эксимерных молекул HgBr* и HgI* в рабочих смесях активной среды (газоразрядной плазмы) при высоких частотах следования импульсов накачки. Возбуждение этих молекул в газоразрядной плазме происходит в результате столкновения электронов плазмы с молекулами дигалогенидов ртути [5–9] в процессах



где X – атом галогена (Cl, Br, I).

При добавлении в рабочие смеси примесей паров дигалогенидов ртути и газов было выявлено существенное изменение энергетических и спектральных характеристик

газоразрядной плазмы [1, 10–12]. Эти результаты дали основание для комплексных исследований оптических характеристик рабочих смесей эксимерного HgBr/HgI-лазера с целью оптимизации энергетических характеристик этих смесей в зависимости от компонентного состава и парциальных давлений, частоты следования импульсов накачки и энерговыклада, что и представлено в настоящей статье.

2. Техника и методика исследований

Оптические характеристики излучения эксимерных молекул HgBr* и HgI* в рабочих смесях (пары дигалогенидов ртути, инертные газы и молекулярный азот) HgBr/HgI-излучателя исследовались в газоразрядной плазме барьерного разряда при атмосферном давлении. Барьером служило кварцевое стекло. Необходимо отметить, что барьерный разряд успешно применялся для создания мощных газоразрядных лазеров на других смесях [13]. Плазма барьерного разряда в исследуемых смесях создавалась в межэлектродном пространстве внутри кварцевой трубки с толщиной стенки 2 мм, внешним диаметром 34 мм и длиной 200 мм (рис. 1).

Расстояние между внутренним электродом 4 круглого сечения (диаметром 4 мм) и внешним электродом 3 составляло 15 мм. Внутренний электрод расположен на оси трубки, а внешний (перфорированный с коэффициентом пропускания излучения 72%) – на поверхности трубки. Торцы трубки заварены, на одном из них вварен металлический ввод 6, который обеспечивает подвод энергии от источника питания к электроду. На противоположной торцевой поверхности расположен патрубок 5 из кварцевого стекла с капилляром (диаметром 1 мм и длиной 20 мм), через который проводилась откачка трубки и ее наполнение (заправка) исследуемыми компонентами смеси.

Питание разряда производилось от генератора наносекундных импульсов. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ 2-130/10. Накопительная емкость набиралась из малоиндуктивных конденсаторов КВИ-3.

А.Н.Малинин, Ужгородский национальный университет, Украина, 88000 Ужгород, ул. Пидгирна, 46; e-mail: mal@univ.uzhorod.ua

Поступила в редакцию 20 сентября 2004 г.

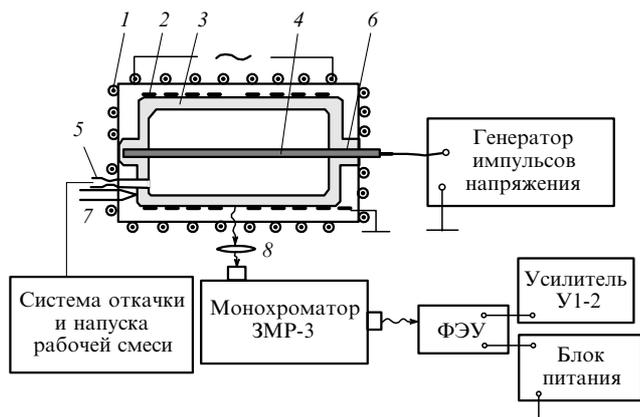


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки:

1 – электронагреватель; 2 – внешний (сетчатый) электрод; 3 – кювета; 4 – внутренний электрод; 5 – капилляр; 6 – металлический ввод; 7 – термопара; 8 – линза.

Перезарядка емкости осуществлялась через первичную обмотку повышающего трансформатора с коэффициентом трансформации 1 : 3. В процессе экспериментов импульсное напряжение и ток (длительность импульсов ~ 150 нс) на электродах кюветы поддерживались примерно равными 22–30 кВ и 265 А соответственно, частота следования импульсов составляла 0.5–5 кГц, а накопительная емкость – 1.36 нФ.

Излучение выводилось из центральной области межэлектродного пространства и анализировалось в видимой и ближней УФ областях спектра с помощью оптической системы экспериментальной установки – монохроматора ЗМР-3 и фотоумножителя ФЭУ-79 (рис.1). При исследовании амплитудно-временных характеристик излучения в системе регистрации вместо ФЭУ-79 применялся электронный линейный умножитель 14ЭЛУ-ФС. Спектральное разрешение монохроматора ЗМР-3 составляло 44 \AA на длине волны $\lambda = 434 \text{ нм}$. Калибровка оптической системы проводилась по излучению эталонной ленточной вольфрамовой лампы СИ8-200 при температуре нити накала $T = 2173 \text{ К}$.

Регистрация импульсов напряжения и разрядного тока источника излучения проводилась с помощью двухлучевого осциллографа С8-2, сигналы на который подавались с делителя напряжения и интегрирующей цепи калиброванного пояса Роговского. Амплитудно-временные характеристики излучения в диапазоне 400–510 нм, выделяемого светофильтром типа СЗС 8, определялись с помощью фотоэлемента ФЭК-22СПУ. На его входе размещалась диафрагма площадью 1 см^2 . Средняя мощность излучения измерялась прибором «Кварц-01».

Мощность, излучаемая всей поверхностью источника излучения, определялась из выражения: $P_{\text{рад}} = \Omega_0 P_{\text{rec}} \times \Omega_{\text{rec}}^{-1}$, где P_{rec} – мощность в ваттах, регистрируемая фотоприемником; Ω_0 – эквивалентный телесный угол; $\Omega_{\text{rec}} = S_{\text{rec}}/l_0^2$ – телесный угол фотоприемника; S_{rec} – площадь окошка фотоприемника; l_0 – расстояние от источника излучения, на котором расположен фотоприемник. Эквивалентный телесный угол брался равным π^2 (для цилиндрической поверхности) [14].

Исследуемые смеси готовились непосредственно в межэлектродном пространстве при последовательном напуске тяжелого инертного газа ксенона или азота и легкого буферного газа гелия. Дигалогениды ртути (60 мг дибромиды HgBr_2 и 60 мг диiodиды ртути HgI_2) пред-

варительно загружались в межэлектродное пространство. Обезгаживание поверхностей элементов внутреннего объема трубки проводилось путем прогрева ее при температуре 50°C и откачке до давления остаточных газов 10^{-3} Тор в течение 2 ч. Парциальное давление паров HgBr_2 и HgI_2 в рабочих смесях создавалось за счет нагрева смеси при диссипации энергии импульсно-периодического разряда, а в отдельных экспериментах применялся нагрев смеси электронагревателем (рис.1). Давление насыщенных паров дигалогенидов ртути определялось по температуре наиболее холодной части трубки на основании линейной интерполяции справочных данных работы [15]. Парциальные давления газов измерялись с помощью образцового мембранного вакуумметра или манометра.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Характеристики излучения газоразрядной плазмы исследовались в следующих многокомпонентных смесях: $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{He}$, $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{Xe} - \text{He}$, $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$.

На рис.2 представлены спектры излучения плазмы барьерного разряда в смеси паров диiodида и дибромиды ртути с гелием при частотах следования импульсов накачки 0.5, 2 и 4 кГц, амплитудах напряжения на электродах и тока через газоразрядный промежутки 25.5 кВ и 265 А соответственно. Общее давление смеси составляло 162 кПа.

Характерным для этой смеси является наличие систем спектральных полос электронно-колебательного перехода $\text{B}^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow \text{X}^2\Sigma_{1/2}^+$ эксимерных молекул HgBr^* и HgI^* с максимумами излучения на длинах волн $\lambda_{\text{max}} = 502$ и 444 нм соответственно [16], крутым ростом интенсивности на длинноволновом участке и медленным спадом на коротковолновом. Канты спектральных полос перекрывают диапазон длин волн 370–510 нм. С изменением частоты следования импульсов накачки в пределах 0.5–4 кГц форма, диапазон и положение максимумов излучения спектральных полос не меняются, изменяется лишь их интенсивность и соотношение интенсивностей в

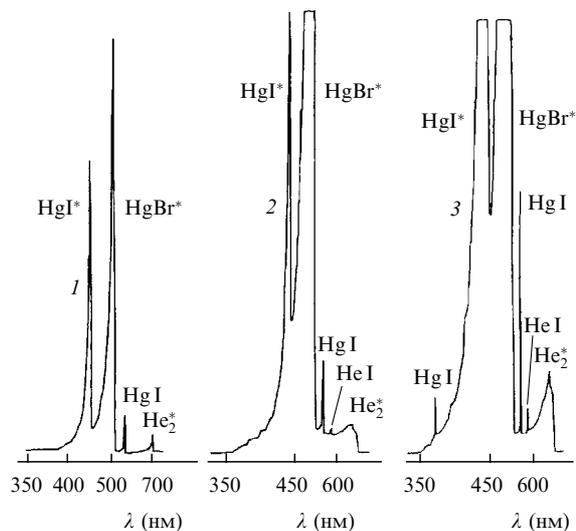


Рис.2. Спектры излучения плазмы барьерного разряда в смеси $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{He}$ при частоте следования импульсов 500 (1), 2000 (2) и 4000 Гц (3), амплитудах напряжения и тока 25.5 кВ и 265 А соответственно и общем давлении смеси 162 кПа.

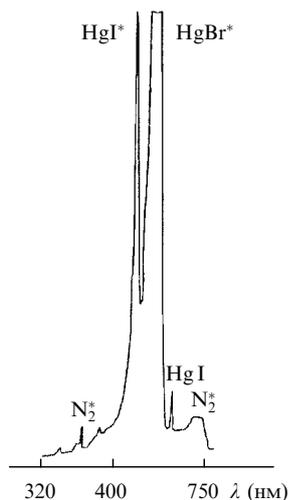


Рис.3. Спектр излучения смеси HgI₂ – HgBr₂ – N₂ – He при парциальных давлениях диоксида ртути 1.8 Па, дибромиды ртути 7.6 Па, азота 1.5 кПа, гелия 162 кПа, частоте следования импульсов 2000 Гц, амплитудах напряжения и тока 22 кВ и 265 А соответственно.

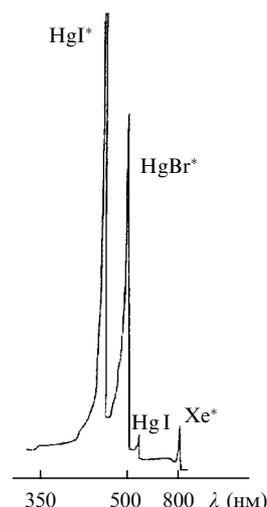


Рис.4. Спектр излучения смеси HgI₂ – HgBr₂ – Xe – He при парциальных давлениях диоксида ртути 7.5 Па, дибромиды ртути 24.3 Па, ксенона 7 кПа, гелия 162 кПа, частоте следования импульсов 2000 Гц, амплитудах напряжения и тока 22 кВ и 265 А соответственно.

кантах полос. Кроме этих полос наблюдаются также излучение на линиях атомов ртути с $\lambda = 365$ и 546 нм (переходы $6p^3P_2^o - 6d^3D_3$ и $7s^3S_1 - 6p^3P_2^o$ [17, 18]), на линии атомов гелия с $\lambda = 587$ нм (переход $2p^3P_{2,1} - 3d^3D_{3,2,1}$) и полосы излучения молекулы гелия (верхние уровни переходов – квазисвязанные или свободные состояния $A^1\Sigma_u^+$ [19]) в длинноволновой области ($\lambda_{max} = 600 - 750$ нм). С изменением частоты следования импульсов накачки от 500 до 4000 Гц интенсивность излучения в спектральных полосах и линиях возрастает.

При добавке в смесь паров дибромиды и диоксида ртути молекулярного азота (парциальное давление 1.52 кПа) и гелия (160.4 кПа) на частоте 2000 Гц имеет место максимум интенсивности излучения молекул моногалогенидов ртути. При этом в спектре излучения газоразрядной плазмы (рис.3) наблюдаются системы спектральных полос электронно-колебательного перехода $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ эксимерных молекул HgBr* и HgI* ($\lambda_{max} = 502$ и 444 нм), линии ртути с $\lambda = 546$ нм, а также спектральные полосы молекулярного азота (N₂^{*}) с максимумами излучения на $\lambda = 337, 357, 375$ и 654 нм, которые отвечают переходу $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ (вторая положительная система) [16].

Для смеси с ксеноном HgI₂–HgBr₂–Xe–He (парциальное давление ксенона составляло 1 кПа, гелия – 160.9 кПа) характерно, что в спектре излучения плазмы (рис.4) присутствуют системы спектральных полос переходов $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ молекул HgI* ($\lambda_{max} = 444$ нм) и молекул HgBr* ($\lambda_{max} = 502$ нм), линии атомов Hg с $\lambda = 546$ нм

и атомов Xe с $\lambda = 823$ нм (переход $6s[3/2]_2^o - 6p[3/2]_2$) [16–18]. Кроме того, в этой смеси наблюдается увеличение интенсивности излучения системы полос с максимумом на $\lambda_{max} = 444$ нм по сравнению с ее интенсивностью в спектре разряда в рабочей смеси HgI₂–HgBr₂–He.

С ростом частоты следования импульсов накачки до 4000 Гц (в данных экспериментах) интенсивности излучения спектральных полос молекулярного азота, атомарных линий ртути и ксенона в исследованных смесях увеличивались.

Спектральные полосы и линии излучения плазмы барьерного разряда в смеси паров дибромиды и диоксида ртути с гелием, ксеноном и молекулярным азотом при частоте следования импульсов накачки 2000 Гц, их относительные интенсивности I/k_λ с учетом спектральной чувствительности системы регистрации k_λ , а также энергии возбуждения приведены в табл.1.

Для выяснения изменений в соотношениях интенсивностей наиболее сильных спектральных полос излучения плазмы барьерного разряда на рабочей смеси с максимумами на $\lambda_{max} = 502$ и 444 нм при вариации парциальных давлений дигалогенидов ртути были проведены исследования, результаты которых представлены на рис.5 и 6. В этих экспериментах изменение парциальных давлений при постоянной частоте следования импульсов осуществлялось путем изменения температуры наиболее холодной точки трубки внешним электронагревателем и соответствующим пересчетом температурных данных в парциальные давления насыщенных паров дигалогенидов

Табл.1. Спектральные полосы и линии излучения рабочих смесей HgBr/HgI-излучателя.

λ (нм)	Молекула, атом	k _λ (отн.ед.)	I/k _λ (отн. ед.)			E _{ex} (эВ)	Литература
			HgI ₂ –HgBr ₂ –He	HgI ₂ –HgBr ₂ –Xe–He	HgI ₂ –HgBr ₂ –N ₂ –He		
337	N ₂	1.7	–	–	0.07	11.05	[16]
357	N ₂	1.9	–	–	0.34	11.05	[16]
375	N ₂	2.6	–	–	0.23	11.05	[16]
444	Hg I	6	15	15.9	0.6	7.00	[6]
502	HgBr	16	6	4.6	1.8	6.00	[6]
546	Hg I	32.5	0.15	0.17	0.04	7.73	[17, 18]
654	N ₂	67.5	–	–	0.001	9.14	[16]
823	Xe I	21	–	0.35	–	9.82	[17, 18]

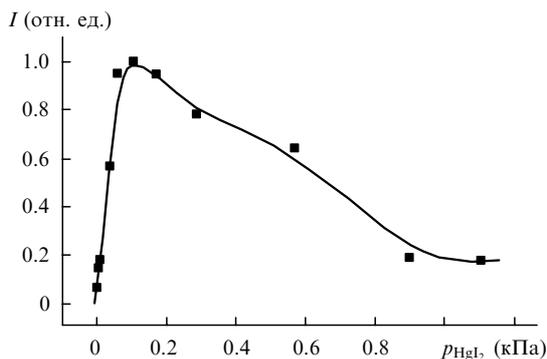


Рис.5. Зависимость интенсивности излучения I молекул моноиодида ртути от парциального давления диодида ртути p_{HgI_2} для смеси $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{He}$ при амплитудах напряжения и тока 25.5 кВ и 265 А соответственно, частоте следования импульсов накачки 500 Гц и общем давлении смеси 162 кПа.

ртути по справочным данным работы [15]. При увеличении парциального давления дигалогенидов ртути интенсивность излучения молекул моноиодида и монобромида ртути повышается, достигает максимума и падает (рис.5 и 6). Парциальные давления паров дигалогенидов ртути, при которых наблюдается максимум интенсивности излучения моногалогенидов ртути, различны. Для молекул HgI^* и HgBr^* они составляют 0.1 и 0.3 кПа соответственно. Максимальная интенсивность излучения для молекул моноиодида ртути выше на 10 %. При больших парциальных давлениях дигалогенидов ртути скорость уменьшения интенсивности излучения снижается: для молекул HgI^* – начиная с парциальных давлений паров диодида ртути 0.9 кПа, а для молекул HgBr^* – начиная с больших парциальных давлений паров дибромида ртути (2.5 кПа).

На рис.7 приведены зависимости интенсивности излучения эксимерных молекул моноиодида и монобромида ртути рабочей смеси HgBr/HgI -излучателя от парциальных давлений ксенона и молекулярного азота. Пределы изменения парциальных давлений газовых компонентов смесей определялись устойчивостью однородного горения разряда. Наиболее интенсивное излучение этих молекул происходит при парциальном давлении ксенона в области 1 кПа. Для смесей с молекулярным азотом зависимость интенсивности излучения молекул HgI^* и HgBr^* от парциального давления молекул N_2 слабо вы-

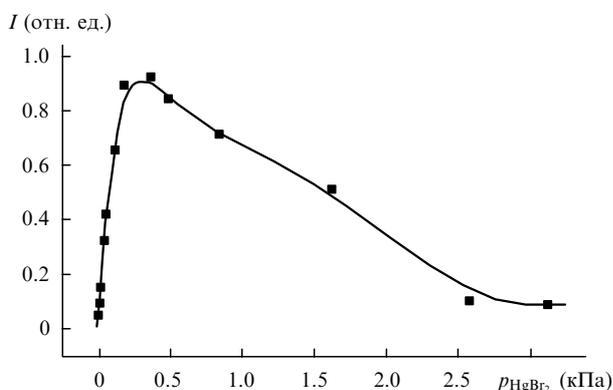


Рис.6. Зависимость интенсивности излучения I молекул монобромида ртути от парциального давления дибромида ртути p_{HgBr_2} для смеси $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{He}$ при амплитудах напряжения и тока 25.5 кВ и 265 А соответственно, частоте следования импульсов накачки 500 Гц и общем давлении смеси 162 кПа.

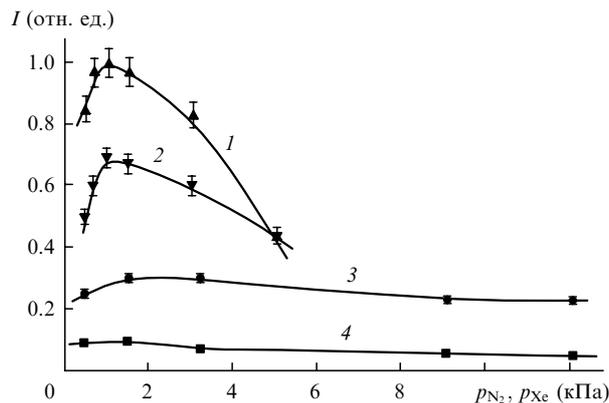


Рис.7. Зависимости интенсивности излучения I молекул HgI^* (1, 3) и HgBr^* (2, 4) от парциальных давлений ксенона в смеси $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{Xe} - \text{He}$ (1, 2) и азота в смеси $\text{HgI}_2 - \text{HgBr}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ (4, 3) при общем давлении смеси 162 кПа.

ражена. В смесях с ксеноном более интенсивно излучают молекулы моноиодида ртути, в отличие от смесей с азотом, где интенсивность излучения монобромида ртути выше.

Зависимости интенсивности излучения моногалогенидов ртути от числа импульсов накачки для смесей разного компонентного состава (соотношения газовых компонентов выбирались оптимальными, т.е. такими, при которых интенсивности излучения молекул HgI^* и HgBr^* максимальны) представлены на рис.8. Для них характерно, что в смесях с ксеноном насыщение интенсивности в зависимости от числа импульсов накачки для молекул HgI^* и HgBr^* наступает позже (кривые 1 и 2 на рис.8), чем в смесях с молекулярным азотом (кривые 4 и 6). Для смеси паров дигалогенидов ртути только с гелием насыщение интенсивности излучения эксимерных молекул происходит еще позже (кривые 3 и 5). Кроме того, существует следующая закономерность: в смесях с ксеноном интенсивность излучения эксимерных молекул HgI^* и HgBr^* выше, причем вклад излучения моноиодида ртути является преобладающим (кривая 1). Для

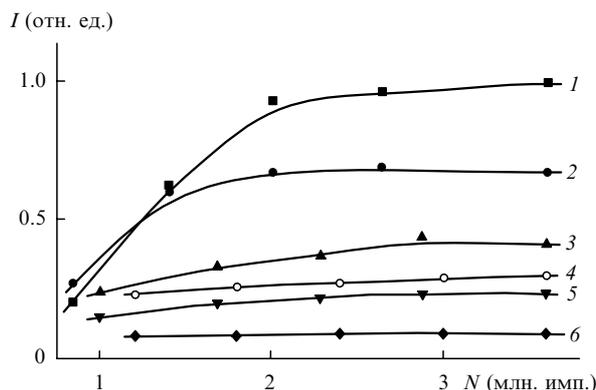


Рис.8. Зависимости от общего числа импульсов N интенсивности излучения I моногалогенидов ртути: молекулы HgI^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{Xe} : \text{He} = 14.6 \text{ Па} : 45.2 \text{ Па} : 1 \text{ кПа} : 160.9 \text{ кПа}$ (1), молекулы HgBr^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{Xe} : \text{He} = 14.6 \text{ Па} : 45.2 \text{ Па} : 1 \text{ кПа} : 160.9 \text{ кПа}$ (2), молекулы HgI^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{He} = 12.9 \text{ Па} : 39.8 \text{ Па} : 161.9 \text{ кПа}$ (3), молекулы HgBr^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 6.3 \text{ Па} : 21 \text{ Па} : 1.52 \text{ кПа} : 160.4 \text{ кПа}$ (4), молекулы HgBr^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{He} = 12.9 \text{ Па} : 39.8 \text{ Па} : 161.9 \text{ кПа}$ (5), молекулы HgI^* для смеси $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 6.3 \text{ Па} : 21 \text{ Па} : 1.52 \text{ кПа} : 160.4 \text{ кПа}$ (6). Общее давление смеси 162 кПа, частота следования импульсов накачки 2000 Гц.

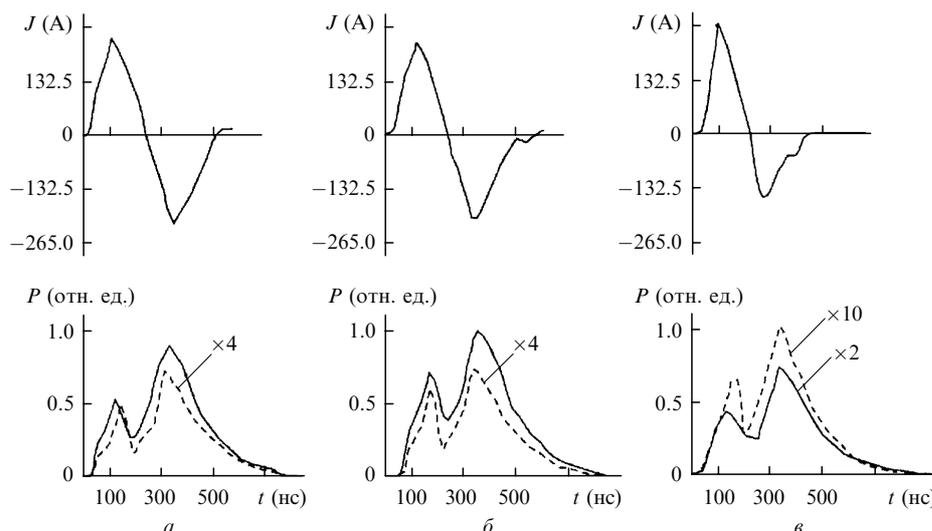


Рис.9. Осциллограммы импульсов тока J и мощности излучения P для молекул HgI^* (штриховые кривые) и $HgBr^*$ (сплошные кривые) для смесей $HgI_2:HgBr_2:He = 13.1 \text{ Па} : 45.2 \text{ Па} : 142 \text{ кПа}$ (а), $HgI_2:HgBr_2:Xe:He = 13.1 \text{ Па} : 45.3 \text{ Па} : 3.04 \text{ кПа} : 159.9 \text{ кПа}$ (б) и $HgI_2:HgBr_2:N_2:He = 5.5 \text{ Па} : 23.4 \text{ Па} : 9.1 \text{ кПа} : 152.9 \text{ кПа}$ (в).

смесей с азотом, наоборот, преобладающим является вклад излучения монобромида ртути (кривые 4 и 6, табл.1).

Для выяснения влияния состава и парциальных давлений компонентов смеси на форму и длительность импульса излучения рабочих смесей HgBr/HgI-лазера нами были проведены исследования амплитудно-временных характеристик излучения эксимерных молекул HgI^* и $HgBr^*$ в отдельности, результаты которых представлены на рис.9 и в табл.2. Погрешность и воспроизводимость результатов осциллографических измерений составляли 10% и 90% соответственно. Импульсы разрядного тока для каждой смеси имели двуполярный характер, амплитуду 265 А и длительность 150 нс.

Для интенсивности излучения эксимерных молекул HgI^* и $HgBr^*$ наблюдается двугорбая временная зависимость. Максимумы абсолютных значений тока и мощности излучения по времени совпадают. Амплитуда второго импульса излучения для этих молекул выше амплитуды первого как в смесях дигалогенидов ртути с гелием, так и в смесях с добавками ксенона и молекулярного азота (рис.9, табл.2). Для всех смесей характерно также увеличение длительности (Δt) второго импульса излучения по сравнению с длительностью первого импульса. В смеси дигалогенидов ртути с ксеноном и гелием для молекул HgI^* изменяется соотношение амплитуд излу-

чения первого и второго импульсов. Разность амплитуд этих импульсов становится меньше, кроме того, увеличивается длительность заднего фронта τ . В смеси дигалогенидов ртути с азотом и гелием наблюдается уменьшение амплитуд обоих импульсов (при этом соблюдается закономерность, согласно которой второй импульс выше первого), а также увеличение длительности заднего фронта второго импульса. Для амплитудно-временных характеристик излучения эксимерной молекулы $HgBr^*$ характерна такая же, как и для эксимерной молекулы HgI^* , зависимость амплитуд и длительностей импульсов от компонентного состава смеси за исключением смеси с добавкой ксенона (соотношение амплитуд первого и второго импульсов не изменяется).

Результаты исследований зависимости средней мощности излучения от давления гелия в спектральном диапазоне 400–510 нм, выделяемого светофильтром типа СЗС 8, для смеси $HgI_2 - HgBr_2 - He$ приведены на рис.10. При увеличении парциального давления гелия от 140 до 200 кПа наблюдается рост средней мощности, максимум которой достигается при 180 кПа, а затем ее падение. С увеличением напряжения на электродах и частоты следования импульсов накачки происходит линейный рост средней мощности излучения (рис.11 и 12). При напряжении 30 кВ она достигает 11 Вт для частоты следования импульсов 2 кГц и 22.5 Вт для частоты 5 кГц. Мощность

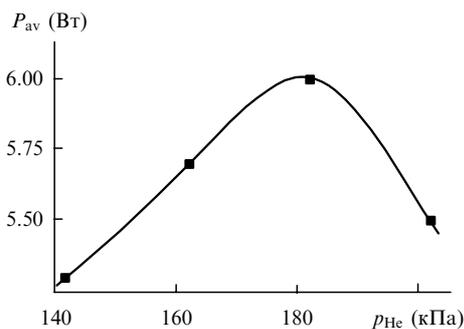


Рис.10. Зависимость средней мощности излучения P_{av} от парциального давления гелия p_{He} при частоте следования импульсов накачки 2000 Гц и амплитуде напряжения 22.5 кВ.

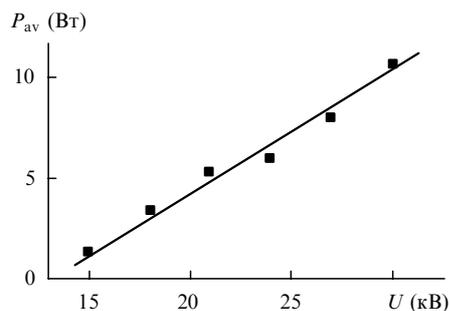


Рис.11. Зависимость средней мощности излучения P_{av} от амплитуды напряжения U при частоте следования импульсов 2000 Гц и общем давлении смеси 162 кПа.

Табл.2. Амплитудно-временные характеристики излучения эксимерных молекул HgI* и HgBr* в рабочих смесях HgBr/HgI-излучателя при частоте следования импульсов накачки 2 кГц.

Смесь	Парциальное давление газовых компонентов (кПа)	Температура источника (°C)	Молекула	Парциальные давления дигалогенидов (Па)	τ (нс)	$\Delta\tau$ (нс)	Амплитуды интенсивности двух импульсов (отн. ед.)
HgI ₂ -HgBr ₂ -He	122	116.5	HgI	10.8	238	150	1.3
						163	1.7
			HgBr	37.4	225	163	3.8
						213	5.5
	142	119	HgI	13.1	325	100	1
						186	1.4
			HgBr	45.2	325	150	3.9
						212	5.6
	162	117	HgI	12.1	425	88	2.4
						181	3.3
			HgBr	37.4	225	193	4
						175	6.5
182	120	HgI	14.6	238	75	0.81	
					200	0.95	
		HgBr	45.3	188	100	3.3	
					150	4.6	
HgI ₂ -HgBr ₂ -N ₂ -He (общее давление 162 кПа)	0.5	119.5	HgI	13.1	300	94	0.48
						200	0.75
			HgBr	45.3	300	164	1.58
						188	2.75
	1.52	118.5	HgI	12.2	388	94	0.35
						213	0.56
			HgBr	40.7	413	88	1.16
						275	2.5
	3.24	116.5	HgI	10.8	413	88	0.33
						175	0.55
			HgBr	33.6	500	88	1.1
						250	2.7
9.1	109	HgI	5.5	513	88	0.21	
					375	0.41	
		HgBr	23.4	563	88	1.1	
					312	2.83	
HgI ₂ -HgBr ₂ -Xe-He (общее давление 162 кПа)	0.5	129.5	HgI	28.3	288	81	0.95
						238	1.16
			HgBr	87.5	250	164	3.9
						188	5.16
	1.01	121.5	HgI	14.6	288	138	0.98
						175	1
			HgBr	54.8	263	63	3.6
						200	5
	3.04	120	HgI	13.1	275	63	1.13
						213	1.16
			HgBr	45.3	288	113	4.3
						225	5.6
5.06	124	HgI	17.3	288	75	0.64	
					150	0.66	
		HgBr	65	275	100	2.41	
					194	3.16	

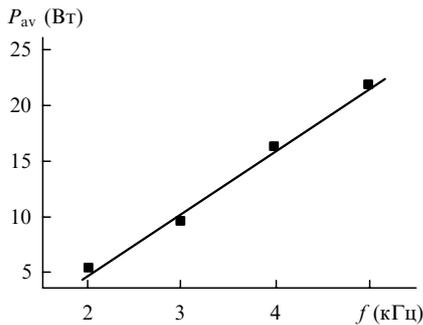
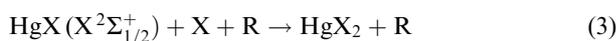
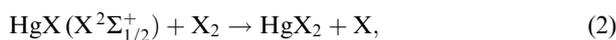


Рис.12. Зависимость средней мощности излучения P_{av} от частоты следования импульсов f при общем давлении смеси 162 кПа и амплитуде напряжения 22.5 кВ.

излучения в одном импульсе составляет 93 кВт (удельная мощность 270 Вт/см³) при общем давлении смеси 162 кПа, амплитудах тока и напряжения 22.5 кВ и 265 А соответственно и частоте следования импульсов 2 кГц. КПД преобразования вкладываемой в рабочую среду мощности в излучение составляет 30 %.

Изменения интенсивностей спектральных полос излучения эксимерных молекул HgBr* и HgI* и средней мощности излучения газоразрядной плазмы рабочей смеси HgBr/HgI-излучателя в зависимости от частоты следования импульсов накачки (рис.2 и 12) вызваны увеличением числа актов возбуждения электронами плазмы ее молекулярных и атомных компонентов и соответственно числа импульсов излучения в единицу времени, которые попадают в систему регистрации. Кроме того, эти изменения связаны с изменением температуры рабочей смеси (мощность диссипации энергии разряда при повышении частоты следования импульсов накачки увеличивается [20] и соответственно увеличиваются парциальные давления дигалогенидов ртути [15]). Соотношения парциальных давлений компонентов изменяются и для смеси HgI₂ : HgBr₂ : He при частотах следования импульсов 500, 2000 и 4000 Гц составляют 0.6 Па : 2.7 Па : 162 кПа, 6.8 Па : 23.4 Па : 162 кПа и 14.6 Па : 49.2 Па : 162 кПа соответственно. А это, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации паров дигалогенидов ртути и в конечном итоге – к разным концентрациям возбужденных молекул HgI* и HgBr* в В²Σ_{1/2}⁺-состоянии, что и изменяет интенсивности излучения в спектральных полосах и среднюю мощность излучения в спектральном диапазоне 400–510 нм (рис.12).

Наличие в спектрах излучения (рис.2–4) линии атомов Hg с λ = 546 нм может быть обусловлено процессом деградации рабочих смесей. Молекулы моноиодида и монобромиды ртути не успевают ассоциировать в процессах



(где X = I, Br, R – буферный газ гелий) и диссоциируют на атомы ртути и галогена при столкновениях с электронами в газоразрядной плазме [21]. Атомы галогенов успевают уйти на поверхность электрода излучателя и образовать галогениды металлов [22]. Атомы ртути накапливаются и при столкновениях с электронами возбуждаются и излучают на λ = 546 нм.

Ход зависимостей интенсивности излучения молекул

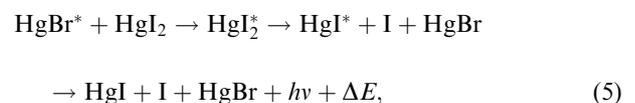
HgI* и HgBr* от парциальных давлений диiodида (рис.5) и дибромиды (рис.6) ртути и оптимальные парциальные давления диiodида и дибромиды ртути определяются кинетикой процессов, ведущих к возбуждению и тушению В²Σ_{1/2}⁺-состояния этих молекул, а также константами скоростей процессов возбуждения и процесса тушения



где M – совокупность тушащих молекул (диiodида и дибромиды ртути); ΔE – разность энергий в реакции.

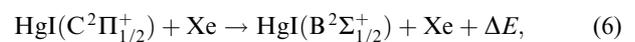
При парциальных давлениях дигалогенидов ртути выше определенного значения большую роль будет играть процесс тушения (4), в результате которого и происходит уменьшение интенсивности излучения. Разные парциальные давления дигалогенидов ртути, при которых достигаются максимальные интенсивности излучения моногалогенидов ртути, определяются константами скоростей тушения, данных по которым для многокомпонентных смесей нет. Причина уменьшения скорости падения интенсивности излучения для больших парциальных давлений (рис.5 и 6) дигалогенидов ртути (0.9 кПа для молекул HgI* и 2.5 кПа для молекул HgBr*) не может быть объяснена на основании данных эксперимента. Она может быть установлена по результатам численного расчета удельных потерь мощности разряда в разных каналах в зависимости от концентрации компонентов плазмы, что будет являться предметом дальнейших исследований.

Интенсивность излучения молекул HgI* выше интенсивности излучения молекул HgBr* (табл.1, рис.7 и 8, смеси HgI₂–HgBr₂–He и HgI₂–HgBr₂–Xe–He). В то же время соотношения констант скоростей возбуждения В²Σ_{1/2}⁺-состояний этих молекул электронами плазмы в двойных смесях HgBr₂–He и HgI₂–He различны (для молекул HgI* константа скорости приблизительно на порядок меньше [9]). Это может быть объяснено наличием дополнительного по отношению к основному (1) механизма возбуждения молекул HgI*. Таким дополнительным механизмом может служить процесс передачи населенности от находящихся на более высоких уровнях молекул HgBr* [10, 23], в результате столкновений с молекулами диiodида ртути (разность энергий молекул монобромиды и моноиодида ртути в В²Σ_{1/2}⁺-состояниях составляет ~0.2 эВ):



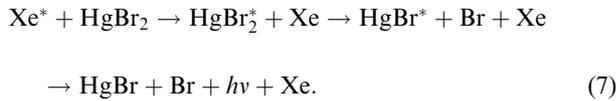
где ΔE – разность энергий молекул HgBr* и HgI* в В²Σ_{1/2}⁺-состояниях.

В смесях диiodида и дибромиды ртути с ксеноном и гелием интенсивность излучения молекул HgI* еще выше (рис.7 и 8, табл.1). Это обусловлено процессом тушения С²Π_{1/2}⁺-состояния моноиодида ртути ксеноном с передачей населенности на В²Σ_{1/2}⁺-состояние:

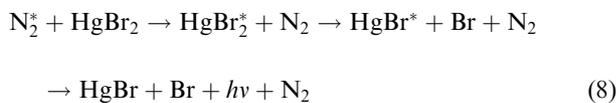


где ΔE – разность энергий возбуждения С²Π_{1/2}⁺- и В²Σ_{1/2}⁺-состояний молекулы HgI*. Данный процесс был обнаружен в экспериментах по фотодиссоциации диiodида ртути [24, 25]. Процесс тушения (6) является дополнительным к основному (1) процессу заселения состояний молекулы HgI*.

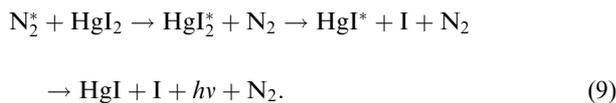
В смесях дигалогенидов ртути с гелием и ксеноном интенсивность излучения молекул HgBr^* выше их интенсивности в смесях без ксенона (рис.7 и 8 (кривые 2), табл.1). Это может быть объяснено наличием дополнительного к основному (1) механизма возбуждения молекул HgBr^* в данных смесях, а именно передачей населенности от метастабильного $^3\text{P}_2$ -состояния атома ксенона в процессе [26]



Более высокая по сравнению с молекулами HgI^* интенсивность излучения эксимерных молекул HgBr^* в смеси $\text{HgBr}_2 - \text{HgI}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ обусловлена тем, что константа скорости передачи населенности от молекулы азота в метастабильном состоянии $\text{N}_2 (\text{A}^3\Sigma_u^+)$ в процессе [26]



больше, чем в процессе

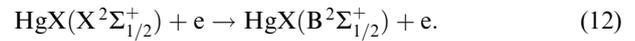
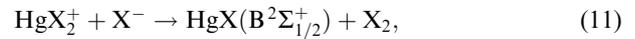
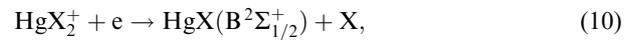


Ход зависимости интенсивности излучения молекул HgI^* и HgBr^* от парциальных давлений ксенона и молекулярного азота (рис.7) определяется эффективностью ряда процессов, ведущих к возбуждению и тушению $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояний этих молекул в газоразрядной плазме барьерного разряда [20]. Более резкий спад интенсивности излучения при увеличении парциального давления ксенона по сравнению с давлением молекулярного азота может быть вызван более высокой константой скорости тушения молекул HgI^* и HgBr^* атомами ксенона, чем молекулярным азотом. Константа скорости тушения молекул HgI^* и HgBr^* ксеноном составляет 2.2×10^{-13} и 3.8×10^{-14} cm^3/c , а азотом – 2.9×10^{-14} и менее 3.4×10^{-14} cm^3/c соответственно [24].

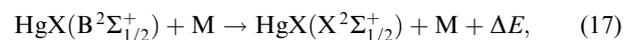
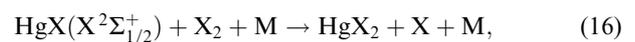
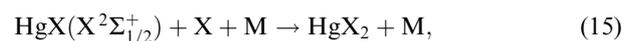
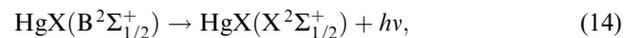
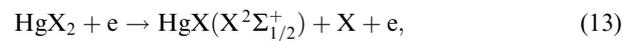
Более раннее насыщение зависимости интенсивности излучения молекул HgI^* и HgBr^* от числа импульсов для смесей с молекулярным азотом и ксеноном (рис.8, кривые 1, 2, 4, 6), чем для смесей с тремя компонентами (кривые 3, 5) обусловлено разной скоростью диссипации энергии разряда для многокомпонентной плазмы. Эта скорость зависит, прежде всего, от вероятности упругих столкновений электронов с компонентами плазмы [9, 20]. Вероятности таких столкновений электронов с атомами ксенона и молекулами азота выше, что в первом приближении объясняет полученные закономерности. Для определения количественных характеристик этих закономерностей необходимо проведение численных расчетов кинетики процесса диссипации энергии разряда в многокомпонентных смесях.

Временная зависимость импульсов тока (рис.9) обусловлена перезарядкой цепи диэлектрик – плазма. Повышенные по сравнению с первым импульсом (рис.9, табл. 2) амплитуды второго импульса излучения, его длительности и длительности заднего фронта связаны с процессами увеличения населенности $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул

HgI^* и HgBr^* , которые происходят после основного процесса (диссоциативного возбуждения этих молекул электронами в столкновениях с молекулами дигалогенидов ртути):



Рекомбинация положительных ионов дигалогенидов ртути с электронами (10), как считают авторы работы [1], может играть существенную роль при плотностях тока ~ 1000 A/cm^2 , что в условиях нашего эксперимента не наблюдается. Расчетная константа скорости процесса рекомбинации (11) положительного иона с отрицательным высока (для молекулы HgBr_2 она составляет $\sim 3 \times 10^{-7}$ cm^3/c), однако в газоразрядных условиях из-за малых концентраций атомарного иона (константа процесса образования отрицательного иона Br^- равна $\sim 10^{-10}$ cm^3/c [5]) роль этого процесса незначительна. Возбуждение радикалов $\text{HgX}(\text{X}^2\Sigma_{1/2}^+)$ электронами в $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояние (12) возможно в наших экспериментальных условиях. Концентрация радикалов в момент действия импульса тока (электронов) определяется скоростями процессов диссоциативного развала дигалогенидов ртути в $\text{X}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояние моногалогенидов ртути, процесса излучения при переходе $\text{V} \rightarrow \text{X}$, процессов восстановления дигалогенидов ртути и тушения $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния моногалогенидов ртути соответственно:



где M – атом или молекула (He , HgI_2 , HgBr_2) [9, 21, 27].

В трехкомпонентной смеси временное уширение второго импульса и его заднего фронта вызвано уменьшением скорости ассоциации двухатомных молекул моногалогенидов ртути в процессах (2), (3) и соответственно накоплением моногалогенидов ртути в основном энергетическом состоянии. Это и приводит в конечном итоге к изменению временного поведения второго импульса за счет увеличения населенности $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния моногалогенидов ртути в результате возбуждения из состояния $\text{X}^2\Sigma_{1/2}^+$ электронами.

Наличие оптимального парциального давления для буферного газа гелия (рис.10) связано с динамикой затрат энергии разряда на нагрев смеси паров двух дигалогенидов ртути и гелия и тушения $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния моногалогенидов ртути [20]. Рост средней мощности в зависимости от амплитуды напряжения импульсов накачки (рис.11) обусловлен повышением мощности разряда, вкладываемой в диссоциативное возбуждение моногалогенидов ртути, при увеличении параметра E/p [9].

4. Заключение

Таким образом, в результате комплексных исследований оптических характеристик рабочих смесей эксимерного HgBr/HgI-излучателя найдены компонентный состав и количественные соотношения парциальных давлений компонентов, при которых выход излучения на $\lambda_{\max} = 502$ и 444 нм максимален. Такой смесью является смесь паров диодида и дибромида ртути с гелием и ксеноном $\text{HgI}_2 : \text{HgBr}_2 : \text{Xe} : \text{He} = 14.6 \text{ Па} : 45.2 \text{ Па} : 1 \text{ кПа} : 160.9 \text{ кПа}$.

Достигнуты удельные мощность излучения в одном импульсе 270 Вт/см^3 и средняя мощность 65 мВт/см^3 при частоте следования импульсов накачки 5 кГц, КПД преобразования мощности накачки в мощность излучения составляет $\sim 30\%$. Впервые осуществлен режим саморазогрева рабочих смесей эксимерного HgBr/HgI-излучателя. Выявлены условия долговременной (не менее 10^6 импульсов) стабильной работы исследуемых смесей при повышенных (0.5–10 кГц) частотах следования импульсов накачки. Обсуждаются дополнительные процессы, повышающие населенность верхнего $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния моногалогенидов ртути в газоразрядной плазме рабочих смесей HgBr/HgI-излучателя, а именно: возбуждение молекул моноиодида ртути ($\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояние); передача населенности от $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул монобромидов ртути и тушение $\text{C}^2\Pi_{1/2}$ -состояния ксеноном с передачей населенности на его $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояние, а также возбуждение $\text{V}^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул монобромидов ртути посредством передачи населенности от метастабильного $^3\text{P}_2$ -состояния атома ксенона.

Автор выражает благодарность А.В.Поляку за помощь, оказанную в подготовке материалов статьи.

1. Burnham R., Schimitschek E.J. *Laser Focus*, No. 6, 54 (1981).
2. Berry A.J., Whitehurst C., King T.A. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 39 (1988).
3. Петрухин А.Е., Подсосонный А.С. *Квантовая электроника*, **17**, 535 (1990).
4. Бажулин С.П., Басов Н.Г., Бугримов С.Н., Зуев В.С., Камруков

- А.С., Кашников Г.Н., Козлов Н.П., Овчинников П.А. и др. *Квантовая электроника*, **13**, 1515 (1986).
5. Малинин А.Н., Шимон Л.Л. *Квантовая электроника*, **23**, 1077 (1996).
6. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **7**, 1032 (1997).
7. Малинин А.Н., Шуайбов А.К., Шевера В.С. *Квантовая электроника*, **10**, 1495 (1983).
8. Kushawaha V., Mahmood M. *J. Appl. Phys.*, **57**, 2173 (1987).
9. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **8**, 395 (1998).
10. Малинин А.Н., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л. *Оптика и спектроскопия*, **89**, 905 (2000).
11. Малинин А.Н., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л., Поляк А.В., Зубрилин Н.Г., Щедрин А.И. *Оптика и спектроскопия*, **91**, 922 (2001).
12. Малинин А.Н., Поляк А.В., Гуйван Н.Н., Зубрилин Н.Г., Шимон Л.Л. *Квантовая электроника*, **32**, 155 (2002).
13. Takenaka Y., Kuzumoto M., Yusui K., Yagi S., Tagashira M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2482 (1991).
14. Сапожников Р.А. *Теоретическая фотометрия* (М.: Энергия, 1977, с. 264).
15. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. *Свойства неорганических соединений. Справочник* (Л.: Химия, 1983, с. 392).
16. Pears R.W., Gaydon A.G. *The Identification of Molecular Spectra* (London: Choptman Hall LTD, 1963, p. 347).
17. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. *Таблицы спектральных линий* (М.: Наука, 1977, с. 800).
18. Прокопьев В.Е., Яценко А.С. *Препринт ИАЭ СО АН СССР № 161* (Новосибирск, 1981, с. 52).
19. *Эксимерные лазеры*. Под ред. Ч.Роудза (М.: Мир, 1981, с. 245).
20. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1987, с. 592).
21. Erlason A.C., Cool T.A. *Chem. Phys. Lett.*, **96**, 685 (1983).
22. Liu C.S., Liberman I. *Quantum Electron.*, **23**, 245 (1987).
23. Поляк А.В., Гуйван М.М., Малинин О.М. *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика*, **7**, 131 (2000).
24. Roxlo C., Mandl A. *J. Chem. Phys.*, **72**, 541 (1980).
25. 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).
26. Chang R.S.T., Burnham R. *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 397 (1980).
27. Malinin A.N. *Laser Phys.*, **7**, 1177 (1997).