

04;07;12

Оптические характеристики и параметры плазмы эксиплексного излучателя сине-зеленого спектрального диапазона

© А.А. Малинина, Л.Л. Шимон

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина
e-mail: ant.malinina@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 28 марта 2011 г.)

Представлены результаты исследований оптических характеристик и параметров плазмы эксиплексного излучателя сине-зеленого спектрального диапазона. Плазма создана барьерным разрядом атмосферного давления на четырехкомпонентной смеси паров дибромиды ртути, гексафторида серы, азота и гелия. Установлена возможность работы эксиплексного излучателя при повышенных частотах следования импульсов накачки (1–12 kHz) в режиме саморазогрева смеси. Проведена оптимизация мощности излучения от парциального давления азота. Достигнута удельная средняя мощность излучения в сине-зеленой области 480 mW с объема излучения $\sim 1 \text{ cm}^3$ для значений парциального давления паров дибромиды ртути, гексафторида серы, азота и гелия 0,7, 0,07, 4 и 117,2 kPa соответственно. Определены параметры плазмы: функции распределения электронов по энергиям, средняя энергия электронов, транспортные характеристики, концентрация и температура электронов, а также константы скоростей процессов: упругого и неупругого рассеяния электронов на компонентах рабочей смеси в зависимости от величины параметра E/N , где E — напряженность электрического поля, N — общая концентрация молекул дибромиды ртути, гексафторида серы, азота и атомов гелия. Установлено, что молекулы монобромиды ртути, возбужденные и вышележащие энергетические состояния, участвуют в подзаселении эксиплексных молекул HgBr^* ($B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния) в процессе тушения молекулами гексафторида серы и азота.

Введение

Исследования оптических характеристик и параметров плазмы эксиплексных излучателей сине-зеленого спектрального диапазона с длиной волны в максимуме интенсивности (λ_{max}) 502 nm представляют интерес для выяснения возможности повышения их эффективности. Такие источники излучения (когерентного и спонтанного) необходимы для ряда практических применений, таких как мониторинг воздушного и водных бассейнов, дальнометрия морских объектов, подводная связь, обработка материалов электронной техники и другие. Кроме того, они перспективны для решения задачи агрофизики по повышению эффективности возбуждения молекул хлорофилла и тем самым увеличения скорости роста растений, накачки твердотельных лазеров, лазеров на органических красителях, в медицине и биотехнологии. Рабочей средой этих излучателей является газоразрядная плазма на двух- и трехкомпонентных смесях паров дигалогенидов ртути с газами: неоном, аргоном, гелием, ксеноном и азотом [1-13].

В работе [14] было установлено, что добавка гексафторида серы и азота в рабочую смесь активного элемента эксиплексного HgBr -лазера приводит к повышению энергии излучения. Характеристики излучателя исследовались при низких частотах (не более 10 Hz) и с применением внешнего подогрева смеси для создания необходимого парциального давления паров дибромиды ртути. Представляет интерес выяснить возможность работы такой смеси при повышенных частотах следования импульсов накачки (1–12 kHz) в режиме саморазогрева

смеси и установить физику процессов, ведущих к повышению энергетических параметров. Такая задача может быть решена при исследовании оптических характеристик и параметров плазмы, что и было предметом наших исследований, представленных в статье.

Техника и методика исследований

Оптические характеристики плазмы эксиплексного излучателя на рабочих смесях (пары дибромиды ртути, гексафторид серы, молекулярный азот и гелий) исследовались в плазме атмосферного давления барьерного разряда (БР). В качестве барьера служило кварцевое стекло. Необходимо отметить, что барьерный разряд успешно применяется для создания мощных газоразрядных лазеров на других объектах [15].

Плазма эксиплексного излучателя на исследуемых смесях создавалась в межэлектродном пространстве внутри кварцевой трубки толщиной стенки 1 mm, внешним диаметром 8,8 mm и длиной 30 mm (рис. 1). Расстояние между внутренним электродом 4 круглого сечения (диаметром 2 mm) и внешним электродом 3 составляло 3,4 mm. Внутренний электрод, который выполнен из молибдена, расположен по оси трубки, а внешний (перфорированный с коэффициентом пропускания излучения 72%) — на поверхности трубки. Торцы трубки заварены, на одном из них вварен металлический ввод б, который обеспечивает подвод энергии от источника питания на электрод. На противоположной торцевой поверхности расположен патрубок 1 из кварцевого стек-

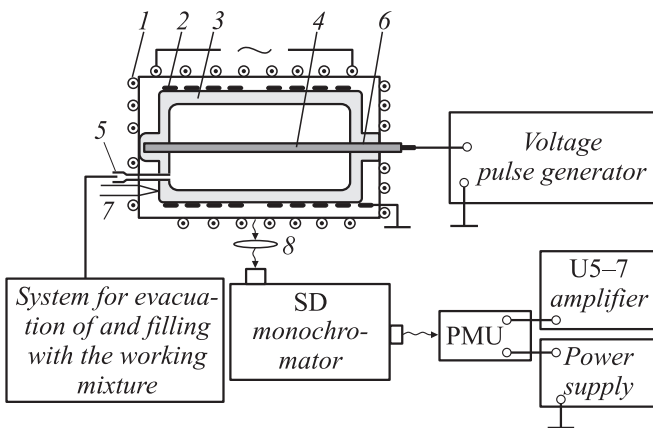


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — электронагреватель, 2 — внешний (сетчатый) электрод, 3 — ювекта, 4 — внутренний электрод, 5 — капилляр, 6 — металлический ввод, 7 — термопара, 8 — линза.

ла с капилляром (диаметр 1 mm, длина 20 mm), через который производилась откачка трубки и ее наполнение (заправка) исследуемыми компонентами смеси.

Питание разряда производилось от генератора наносекундных импульсов. В качестве коммутатора в генераторе использовался тиратрон ТГИ 1–35/3. Накопительная емкость в генераторе набиралась из малоиндуктивных конденсаторов КВИ-3. Перезарядка емкости осуществлялась через первичную обмотку повышающего трансформатора с коэффициентом трансформации 1 : 3. В процессе экспериментов импульсное напряжение и ток (длительность импульсов ~ 400 ns) на электродах излучателя поддерживались на уровне 1–10 kV и 9.1 A соответственно, частота повторения импульсов составляла 1–12 kHz, накопительная емкость — 1.36 nF.

Рабочие смеси готовились непосредственно в объеме излучателя. Порошок дибромиды ртути (HgBr_2) в количестве 20 mg равномерно насыпался внутрь излучателя. В исследованиях оптических характеристик излучения газоразрядной плазмы парциальные давления насыщенных паров дибромиды ртути создавались путем саморазогрева рабочей смеси за счет диссипации энергии разряда, а также путем подогрева ее внешним электронагревателем при создании парциальных давлений паров дибромиды ртути выше 0.1 kPa. После загрузки соли производилось обезвоживание источника излучения путем прогрева при температурах 70°C и откачки в течение 2 h с помощью системы откачки и напуска газов через капилляр 5.

Значения парциального давления насыщенных паров дибромиды ртути определялись по температуре наиболее холодной точки излучателя на основании интерполяции справочных данных работы [16]. В условиях нашего эксперимента они изменялись в пределах 0.1–2 kPa. Парциальные давления гелия, гексафторида серы и азота измерялись образцовыми мембранными манометром и вакуумметром соответственно.

Излучение разряда регистрировалось в направлении, перпендикулярном боковой поверхности кварцевой трубки излучателя, и анализировалось в спектральном диапазоне 380–600 nm. Спектры излучения регистрировались с помощью дифракционного монохроматора (решетка 600 strokes/mm). Спектральное разрешение системы регистрации составляло 2.4 nm. Калибровка системы регистрации проводилась с помощью эталонной вольфрамовой лампы СИ 8-200 при температуре нити накала $T = 2173$ K.

Импульсы напряжения и тока излучателя регистрировались с помощью осциллографа С1-72, сигнал на который подавался с делителя напряжения и интегрирующей цепи калиброванного пояса Роговского.

Средняя мощность излучения источника измерялась с помощью прибора „Кварц-01“. Оптический сигнал после прохождения диафрагмы площадью 0.25 cm² попадал на светофильтр СЗС-16 с максимумом пропускания на длине волны $\lambda = 500$ nm, после чего на измерительную головку прибора. Мощность, излучаемой всей поверхностью источника излучения, определялась из выражения [17]

$$P_{\text{rad}} = \Omega_0 P_{\text{det}} / \Omega_{\text{det}},$$

где P_{det} — мощность, регистрируемая фотоприемником; Ω_0 — эквивалентный телесный угол (для цилиндрической поверхности его значение составляет π^2 [23]); $\Omega_{\text{det}} = S_{\text{det}} / l^2$ — телесный угол фотоприемника; S_{det} — площадь окошка фотоприемника; l — расстояние, на котором расположен фотоприемник от источника излучения.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования проводились в четырехкомпонентной смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He}$. Парциальные давления паров дибромиды ртути, гексафторида серы и гелия составляли 0.1, 0.07 и 117.2 kPa соответственно, а парциальное давление азота изменялось в пределах 0–10.5 kPa. Парциальные давления гелия и гексафторида серы в экспериментах составляли одни и те же значения. При этих значениях наблюдалась максимальная мощность излучения для двухкомпонентной смеси $\text{HgBr}_2 : \text{He}$ и трехкомпонентной $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{He}$ [12,13].

Сразу после инициации барьерного разряда атмосферного давления наблюдался филаментарный режим горения БР, набор микроразрядов конусообразной формы с вершиной на металлическом электроде и основанием на внутренней поверхности кварцевой трубки излучателя. Цвет разряда в начальной стадии (первых 30 s) определяется буферным газом гелием, а именно розовым цветом. В последующее время наблюдалось свечение белого цвета, что связано с излучением гексафторида серы. Через 3, 4 min разряд горел сине-зеленым цветом. При этом наблюдался в основном диффузный и однородный характер разряда, число филаментов резко

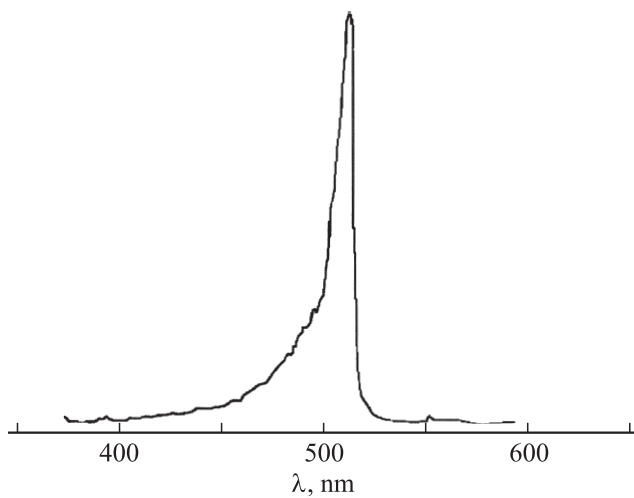


Рис. 2. Спектр излучения барьерного разряда для смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.1 : 0.07 : 4 : 117.2 \text{ kPa}$; общее давление смеси $p = 121.37 \text{ kPa}$. Частота следования импульсов накачки $f = 6 \text{ kHz}$, амплитуда напряжения $U_a = 9.5 \text{ kV}$.

уменьшилось, и их число не превышало трех, заметно сглаживался контраст яркости в объемном разряде (свечение по длине излучателя имеет однородный характер, а по радиусу — более яркое на поверхности внутреннего электрода).

В полученных спектрах в видимом диапазоне существенно выделяется спектральная полоса шириной 10–15 nm с максимумом при длине волны $\lambda = 502 \text{ nm}$ (рис. 2), которая имеет слаборазреженную колебательную структуру и соответствует электронно-колебательному переходу $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ эксиплексной молекулы HgBr^* (эксиплекс HgBr^*) [18]. Основная часть интенсивности излучения сконцентрирована в диапазоне длин волн 512 – 475 nm. Наблюдается крутой рост интенсивности в спектре со стороны участка с большими длинами волн и медленный спад в области меньших длин волн.

На рис. 3 представлены результаты исследований зависимости мощности излучения эксиплекса HgBr^* от парциального давления азота. Наблюдается увеличение мощности излучения эксиплекса HgBr^* от 42 до 48.8 mW при возрастании парциального давления азота от 0 до 4 kPa. Дальнейшее повышение парциального давления азота приводит к падению мощности излучения эксиплекса монобромидом ртути. Подобная зависимость мощности излучения эксиплекса HgBr^* от парциального давления азота наблюдается и для смеси, в которой парциальное давление паров дибромидом ртути выше. Максимальная мощность излучения эксиплекса HgBr^* составляла 480 mW для значений парциального давления паров дибромидом ртути, гексафторида серы, азота и гелия 0.7 kPa, 70 Pa, 4 kPa и 117.2 kPa соответственно (парциальное давление паров дибромидом ртути 0.7 kPa создавалось за счет подогрева излучателя электронагревателем).

На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов напряжения и импульсов тока плазмы барьерного разряда излучателя для соотношения компонент смеси, при котором достигается максимальная мощность излучения. Наблюдается колебательный режим ввода энергии источника накачки в плазму. Максимальные значения амплитуды импульсов напряжения и тока составляют 9.5 kV и 9.1 A соответственно. Колебательная структура импульса тока вызвана многократной разрядкой емкости диэлектрика за время импульса напряжения с амплитудой, достаточной для пробоя разрядного про-

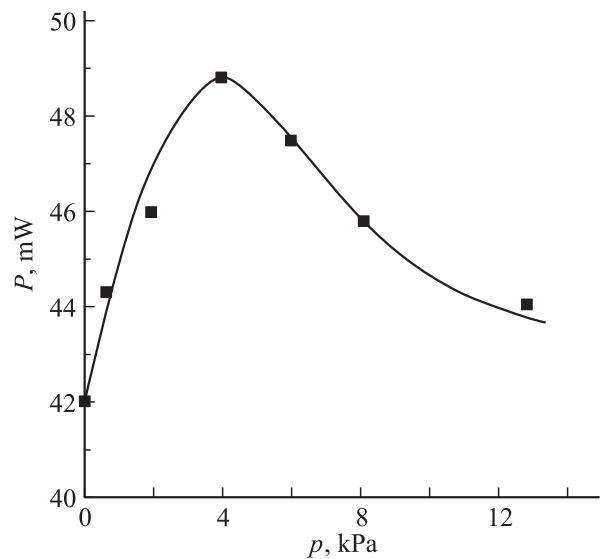


Рис. 3. Зависимость мощности излучения эксиплекса HgBr^* от парциального давления азота для смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He}$; парциальное давление паров дибромидом ртути 0.1 kPa, гексафторида серы 70 Pa, гелия 117.2 kPa. Частота следования импульсов $f = 6 \text{ kHz}$, амплитуда импульса напряжения $U_a = 9.5 \text{ kV}$.

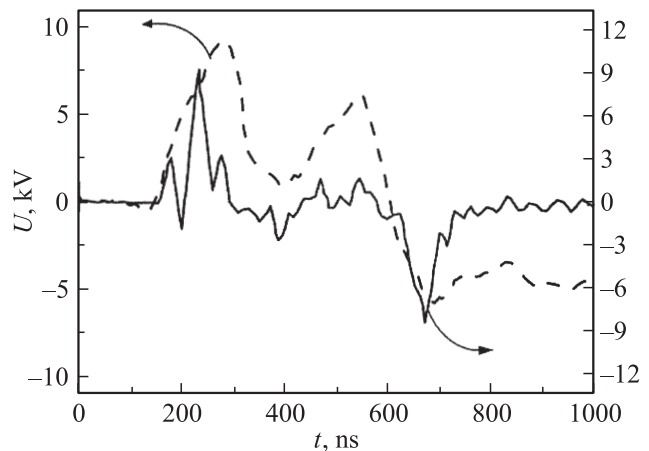


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока и напряжения на электродах излучателя для смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.1 : 0.07 : 4 : 117.2 \text{ kPa}$; общее давление смеси 121.37 kPa. Частота следования импульсов $f = 6 \text{ kHz}$.

межутка [19]. Отличие в колебательной структуре импульсов тока на переднем и заднем фронтах импульса накачки (напряжения) связано с противоположными направлениями прохождения тока через газоразрядный промежуток (2.4 mm) и вследствие этого неодинаковыми условиями рассасывания заряда на внутренней поверхности диэлектрика в условиях однобарьерного разряда, который используется в излучателе.

Параметры плазмы

Параметры плазмы барьерного разряда в излучателе определялись численно и рассчитывались как полные интегралы функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в разряде в оптимальной для получения максимальной мощности излучения смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.7 : 0.07 : 4 : 117.2 \text{ kPa}$. ФРЭЭ находились численно путем решения кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении [20]. Расчеты ФРЭЭ проводились с использованием известной программы „Bolsig⁺“ [21]. На основе полученных ФРЭЭ определены подвижности и скорости дрейфа электронов, средняя энергия электронов. Кроме того, определены константы скоростей упругого и неупругого рассеяния электронов на молекулах дибромида ртути, гексафторида серы, азота и атомов гелия в зависимости от величины отношения напряженности электрического поля (E) к общей концентрации молекул дибромида ртути, гексафторида серы, азота и атомов гелия (N). Параметры плазмы барьерного разряда определялись для диапазона параметра $E/N = 1-100 \text{ Td}$ ($1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15} \text{ V cm}^2$). Диапазон изменений параметра E/N включал величины параметра E/N , которые были реализованы в эксперименте.

В интеграле столкновений электронов с атомами гелия, молекулами гексафторида серы и азота учтены следующие процессы: упругое рассеяние, возбуждение энергетических уровней атома He (2^3S , 2^1S , 2^3P , $3SPD$, $4SPD$, $5SPD$), ионизация атома гелия, упругое рассеяние и возбуждение энергетических уровней молекул SF_6 , возбуждение первого колебательного уровня основного электронного состояния, возбуждение электронных состояний с пороговой энергией, равной 10.0, 11.7, 15.0 и 15.7 eV, ионизация, прилипание электронов к молекулам SF_6 , диссоциативное прилипание электронов к молекулам гексафторида серы с образованием ионов SF_5^- , диссоциативное возбуждение молекулы SF_6 с образованием отрицательных ионов, отличных от SF_5^- ; упругое рассеяние и возбуждение энергетических уровней молекул азота: колебательных $v1-v8$, нижних электронных $A^3\Sigma_u^+ v = 0-4$, $v = 5-9$, $v = 10$, $B^3\Pi_g$, $B^3\Sigma_g^-$, $A^1\Sigma_u^-$, $A^1\Pi_g$, $W^1\Delta_u$, $C^3\Pi_u$, $E^3\Sigma_g^+$, A^1 (порог 12.25 eV), сумма синглетных состояний выше порога 13 eV и ионизация молекулы азота [21]. Из процессов взаимодействия электронов и молекул дибромида ртути учтены: колебательное возбуждение молекул HgBr_2 с энергией

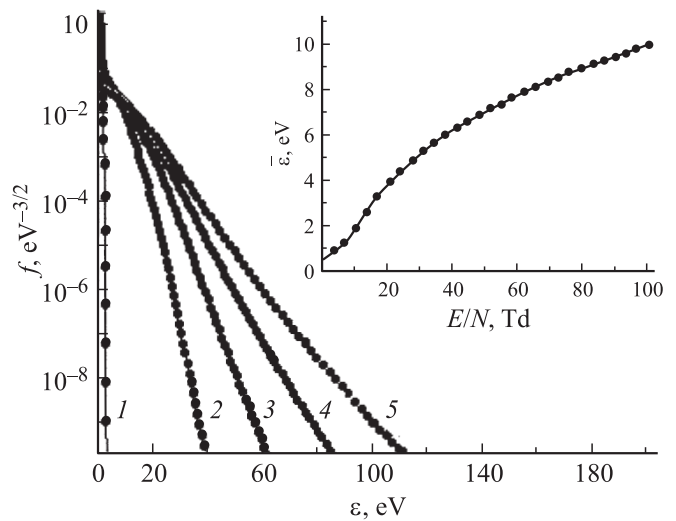


Рис. 5. Функции распределения электронов по энергии в разряде для смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.7 : 0.07 : 4 : 117.2 \text{ kPa}$ при общем давлении смеси $P = 121.97 \text{ kPa}$ для значений параметра E/N : 1 (1), 25.8 (2), 50.5 (3), 75.3 (4), 100 (5) Td; на вставке — зависимость средней энергии электронов от параметра E/N .

рассеянных электронов, равной 0.0035 eV, резонансное колебательное возбуждение молекул HgBr_2 с энергией рассеянных электронов, равной 0.25 eV, диссоциативное возбуждение электронных состояний монобромида ртути ($X^2\Sigma_{1/2}^+$, $B^2\Sigma_{1/2}^+$), возбуждение электронного состояния дибромида ртути ($\text{HgBr}_2(D)$) с пороговой энергией электронов, равной 7.9 eV, прилипание, а также ионизация. Данные по абсолютным величинам эффективных сечений этих процессов, а также их зависимостей от энергий электронов взяты из работ [22–25].

На рис. 5 приведен характерный вид ФРЭЭ при изменении параметра E/N в диапазоне 1–100 Td. Увеличение параметра E/N приводит к росту количества „быстрых“ электронов в разряде и уменьшению плотности электронов в диапазоне работы излучателя ($E/N = 3-30 \text{ Td}$). Средняя энергия электронов разряда (см. вставку рис. 5) наиболее сильно зависит от параметра $E/N = 1-20 \text{ Td}$, при этом она линейно увеличивается от 0.5 до 3.5 eV. В диапазоне параметра $E/N = 20-100 \text{ Td}$ средняя энергия электронов также увеличивается от 3.5 до 10.1 eV, но с меньшей скоростью. Температура электронов растет от 5800 до 117 160 K при изменении параметра E/N от 1 до 100 Td соответственно (температура определялась из формулы $\epsilon = 3/2 \cdot kT$, где ϵ — энергия электронов, k — постоянная Больцмана, T — температура в градусах Кельвина).

Подвижность электронов, как следует из данных численного расчета, изменяется по экспоненте в пределах $4.5 \cdot 10^{24} \cdot N - 2.0 \cdot 10^{24} \cdot N$ ($1/m/V/s$) — при изменении параметра E/N в диапазоне 1–35 Td, а в диапазоне параметра $E/N = 35-100 \text{ Td}$ она незначительно изменяется около значения $2.0 \cdot 10^{24} \cdot N$ ($1/m/V/s$), что

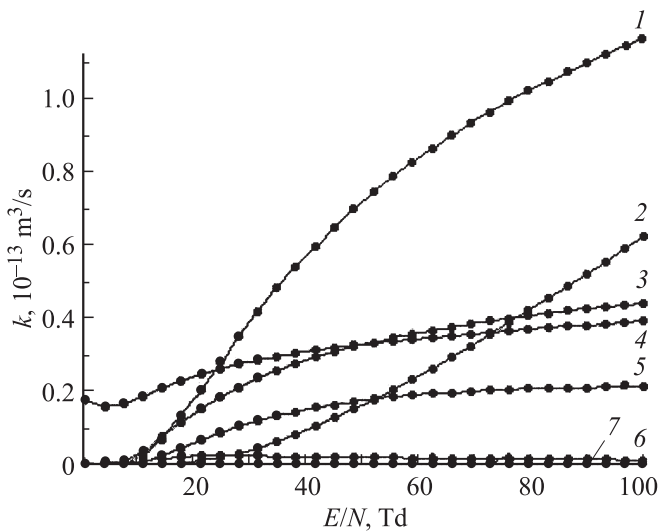


Рис. 6. Зависимости констант скоростей столкновений электронов с молекулами дибромид ртуты от параметра E/N в газоразрядной плазме на смеси $\text{HgBr}_2 : \text{SF}_6 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.7 : 0.07 : 4 : 117.2$ кПа: 1 — возбуждение электронного состояния дибромид ртуты ($\text{HgBr}_2(D)$), 2 — ионизация молекул HgBr_2 электронами, 3 — диссоциативное возбуждение $X^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул HgBr^* , 4 — колебательное возбуждение молекул HgBr_2 , 5 — диссоциативное возбуждение $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул HgBr^* , 6 — резонансное колебательное возбуждение молекул HgBr_2 . 7 — прилипание электронов к молекулам HgBr_2 .

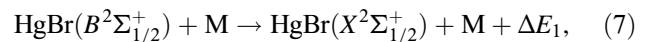
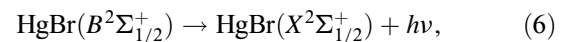
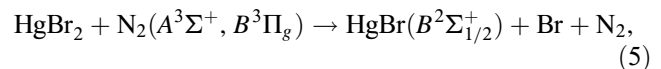
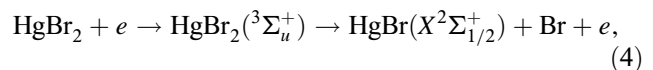
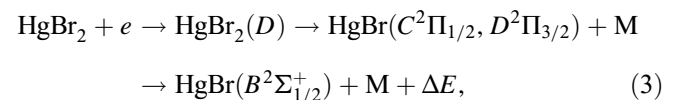
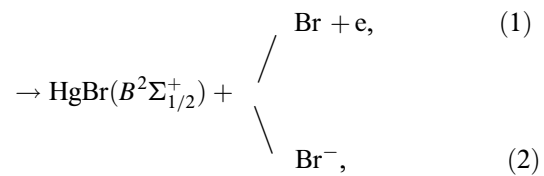
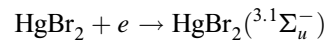
дает значения скорости дрейфа электронов $8.4 \cdot 10^{5m}$ и $3.9 \cdot 10^5$ м/с для $E/N = 1-100$ соответственно при напряженности поля на плазме $35.5 \cdot 10^5$ В/м для момента времени 100 нс от начала импульса напряжения (максимальное значение амплитуды импульса тока (рис. 4)) и значение концентрации электронов $3.7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3} - 8 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при плотности тока 5 А/см^2 на поверхности внутреннего электрода источника (1.8 см^2).

На рис. 6 представлены результаты численного расчета констант скоростей для процессов столкновений электронов с молекулами дибромид ртуты, которые являются количественной мерой эффективности этих процессов [26]. Значения констант скоростей (k) для них находятся в диапазоне $2 \cdot 10^{-17} - 1.2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ при изменении параметра E/N от 10 до 100 Тд. В области параметра $E/N = 1-100$ Тд константы скорости возбуждения электронного состояния дибромид ртуты ($\text{HgBr}_2(D)$) и ионизации дибромид ртуты электронами (зависимости 1 и 2, рис. 6) монотонно возрастают от значений $1 \cdot 10^{-15}$ до $1.2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ и $1 \cdot 10^{-15}$ до $6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Константы скорости процессов колебательного возбуждения молекул дибромид ртуты возрастают от значений $1 \cdot 10^{-17}$ до $4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$. Константы скорости диссоциативного возбуждения $X^2\Sigma_{1/2}^+$ и $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояний молекул монобромид ртуты изменяются в пределах

$1 \cdot 10^{-15} - 4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ и $1 \cdot 10^{-15} - 2.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ в диапазоне параметра $E/N = 1-100$ Тд. Для процесса диссоциативного прилипания электронов к молекулам дибромид ртуты они возрастают от значений $9 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с}$, достигают максимума $1.2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ для значений параметра $E/N = 20-30$ Тд, после чего падают до значений $7.0 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ при возрастании параметра E/N до значений 100 Тд. В области значений параметра $E/N = 10-40$ Тд, в котором работает источник излучения, константа скорости возбуждения $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекулы монобромид ртуты плавно растет от $1 \cdot 10^{-15}$ до $1.4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ (зависимость 5, рис. 6).

Обсуждение результатов исследований

Возникновение эмиссии спектральных полос с максимумом на длине волны $\lambda = 502 \text{ нм}$ электронно-колебательного перехода $B^2\Sigma_{1/2}^+ \rightarrow X^2\Sigma_{1/2}^+$ эксиплексной молекулы HgBr^* в газоразрядной плазме на четырехкомпонентной смеси паров дибромид ртуты, гексафторида серы, азота и гелия происходит вследствие процессов, приводящих к образованию и разрушению $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния монобромид ртуты, основными из которых являются [25–32] и [12,13]:



где $\text{HgBr}(C^2\Pi_{1/2}, D^2\Pi_{3/2})$ — молекулы монобромид ртуты, возбужденные в состояния $C^2\Pi_{1/2}$ и $D^2\Pi_{3/2}$, где $\text{N}_2(A^3\Sigma^+, B^3\Pi_g)$ — молекулы азота, возбужденные в метастабильное состояние $A^3\Sigma_u^+$ и состояние $B^3\Pi_g$, M — частицы, которые тушат состояния $C^2\Pi_{1/2}, D^2\Pi_{3/2}$ и $B^2\Sigma_{1/2}^+$ монобромид ртуты ($\text{HgBr}_2, \text{SF}_6, \text{N}_2, \text{He}$), $\Delta E, \Delta E_1$ — разница энергий в реакциях (4) и (7) соответственно.

Процессы (1) и (7) в основном объясняют зависимости интенсивности излучения эксиплексных молекул монобромид ртуты от парциальных давлений паров дибромид ртуты, азота и гексафторида серы. Вклад

процессов (1)–(7) в интенсивность излучения спектральных полос с максимумом при длине волны $\lambda = 502 \text{ nm}$ зависит от констант скоростей возбуждения и тушения состояния $B^2\Sigma_{1/2}^+$ монобромида ртути и концентраций частиц.

Значение константы скорости возбуждения электронами состояния дибромида ртути ($\text{HgBr}_2(D)$), которое диссоциативно распадается на $C^2\Pi_{1/2}$ и $D^2\Pi_{3/2}$, выше константы скорости возбуждения эксиплекса монобромида ртути на порядок величины (рис. 6, кривые 1 и 5). Высокое значение эффективности возбуждения выше лежащих энергетических состояний ($C^2\Pi_{1/2}$ и $D^2\Pi_{3/2}$) молекул монобромида ртути, а также наши результаты исследований зависимости мощности излучения эксиплексов HgBr^* от парциального давления гексафторида серы [13] (наблюдается многократное увеличение мощности излучения) позволяют сделать вывод, что молекулы, находясь в этих энергетических состояниях, участвуют в подзаселении $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекул HgBr^* в процессе тушения молекулами гексафторида серы и азота.

Характер хода зависимости мощности излучения эксиплекса HgBr^* от парциального давления азота (рис. 3) вызван прежде всего следующими процессами: повышением концентрации электронов при увеличении парциального давления азота в смеси, изменениями доли энергии разряда, которая расходуется на нагревание рабочей смеси, средней энергии электронов и скоростей диссоциативного возбуждения эксиплекса HgBr^* электронами и молекулами азота, возбужденными в метастабильное состояние $A^3\Sigma_u^+$ и $B^3\Pi_g$, увеличением заселенности этих состояний за счет релаксации заселенности с более высоких колебательных уровней при столкновении с компонентами рабочей смеси, а также процессом тушения эксиплекса HgBr^* молекулами дибромида ртути, азота, гексафторида серы и атомами гелия [30–35]. При повышении парциального давления азота уменьшается значение параметра E/N , что приводит к увеличению удельных потерь мощности разряда на упругое рассеяние электронов на атомах и молекулах (нагревание смеси) [36]. Это в свою очередь приводит к повышению парциального давления паров дибромида ртути и мощности излучения эксиплексов HgBr^* . Увеличению мощности излучения с повышением парциального давления азота способствует и повышение концентрации электронов, которая возрастает с увеличением концентрации азота. Наличие максимума и дальнейшее падение мощности излучения эксиплексов HgBr^* при повышении парциального давления азота связаны с уменьшением доли энергии разряда, которая тратится на возбуждение $B^2\Sigma_{1/2}^+$ -состояния молекулы HgBr^* , а также процессом (7) тушения эксиплексов HgBr^* молекулами азота [26]. Константа скорости этого процесса в многокомпонентной смеси неизвестна (для двухкомпонентной смеси ($\text{HgBr}_2 : \text{He}$) она составляет величину $(4.4 \pm 0.5) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{s}$ [34]).

Выше определенного значения парциальных давлений азота процесс тушения (7) будет играть большую роль по сравнению с оптическим каналом (6) в разрушении эксиплекса HgBr^* , в связи с чем и происходит уменьшение мощности излучения.

Заключение

Таким образом, исследование оптических характеристик и параметров плазмы эксиплексного излучателя на четырехкомпонентной смеси паров дибромида ртути, гексафторида серы, азота и гелия установило возможность работы такой смеси при повышенных частотах следования импульсов накачки (1–12 kHz) в режиме саморазогрева смеси. Проведена оптимизация мощности излучения от парциального давления азота. Достигнута удельная средняя мощность излучения в синезеленой области 480 mW с объема излучения $\sim 1 \text{ cm}^3$ для значений парциального давления паров дибромида ртути, гексафторида серы, азота и гелия 0.7, 0.07, 4 и 117.2 kPa соответственно. Результаты численного моделирования процессов в плазме позволило определить функции распределения электронов по энергиям, транспортные характеристики, а также константы скоростей процессов: упругого и неупругого рассеяния электронов на компонентах рабочей смеси в зависимости от величины параметра E/N . Максимальные значения концентрации электронов изменяются в пределах $3.7 \cdot 10^{17} - 8 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$ при изменении величины параметра E/N от 1 до 100 Td. Температура электронов при этом увеличивается от 5800 до 117160 K. Константа скорости возбуждения эксиплекса моногалогенида ртути плавно растет от $1 \cdot 10^{15}$ до $1.4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s}$ в диапазоне изменения параметра $E/N = 10 - 40 \text{ Td}$, в котором проводились экспериментальные исследования эмиссии эксиплекса. Падение мощности излучения при повышении парциального давления азота вызвано процессом тушения эксиплексов HgBr^* молекулами азота.

Список литературы

- [1] Burnham R., Schimitschek E.J. // Laser Focus. 1981. N 6. С. 54–61.
- [2] 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. // Квант. электрон. 1986. Т. 13. № 5. С. 1017–1019.
- [3] Петрухин А.Е., Подсосонный А.С. // Квант. электрон. 1990. Т. 17. С. 535–536.
- [4] Berry A.J., Whitehurst C., King T.A. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1988. Vol. 21. С. 39–44.
- [5] Малинин А.Н. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. С. 243–252.
- [6] Малинин А.Н., Шуайбов А.К., Шевера В.С. // ЖПС. 1980. Т. 32. С. 735–737.
- [7] Furusawa H., Okada S., Obara M. // Appl. Phys. 1995. Vol. 66. С. 1877–1879.

- [8] Малинин А.Н., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л. // Опт. и спектр. 2000. Т. 89. № 6. С. 905–910.
- [9] Малинин А.Н., Поляк А.В., Блонский И.В., Зубрилин Н.Г. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 2. С. 73–74.
- [10] Kogelschatz U. // ABB Corporate Research Ltd, 5405 Baden, Switzerland, 2000. P. 1–7.
- [11] Посудин Ю.И. Лазерная фотобиология. Киев: Вища школа, 1989. 248 с.
- [12] Малинина А.А., Гуйван Н.Н., Шимон Л.Л., Шуайбов А.К. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 9. С. 858–866.
- [13] Малинина А.А., Шуайбов А.К. // Опт. и спектр. 2011. Т. 110. № 2. С. 218–227.
- [14] Sugii M., Sasaki K. // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. P. 1633–1635.
- [15] Takenaka Y., Kuzumoto M., Yusui K., Yagi S., Tagashira M. // IEEE J. Quant. Electron. 1991. Vol. 27. P. 2482–2487.
- [16] Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. Свойства неорганических соединений. Справочник. Л.: Химия, 1983. 392 с.
- [17] Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия. М.: Энергия, 1977. 264 с.
- [18] Pears R.W., Gaydon A.G. The Identification of Molecular Spectra. London: Chapman Holl LT, 1963. 347 p.
- [19] Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Каральник В.Б., Панкин М.В., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 176–183.
- [20] Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 722–733.
- [21] <http://www.siglo-kinema.com/>.
- [22] Nighan W.L., Brown R.T. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 7201–7210.
- [23] Kushner M.J., Pindrof A.L., Fisher C.H., Znotins T.A. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 75. P. 2406–2422.
- [24] Kushawaha V., Mahmood M. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. P. 2173–2177.
- [25] Malinin A.N. // Laser Physics. 1997. Vol. 7. P. 1168–1176.
- [26] Газовые лазеры / Под ред. И. Мак-Даниеля и У. Нигэна. М.: Мир, 1986. 550 с.
- [27] Малинин А.Н., Шимон Л.Л. // Квант. электрон. 1996. Т. 23. № 12. С. 1077–1080.
- [28] Malinin A.N. // Laser Physics. Vol. 7. P. 1177–1188.
- [29] Malinin A.N. // Laser Pphysics. 1997. Vol. 7. P. 1032–1040.
- [30] Helvajian H., Witting C. // Appl. Phys. 1981. Vol. 38. P. 731–733.
- [31] Дацюк В.В., Измайлов И.А., Кочелап В.А. // УФН. 1998. Т. 168. С. 439–462.
- [32] Nighan W.L. // J. Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 173–175.
- [33] Chang R.S.F., Burnham R. // J. Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 397–400.
- [34] Eden J.G., Waynaut R.W. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 34. P. 324–325.
- [35] Малинин А.Н., Шуайбов А.К. // Опт. и спектр. 1982. Т. 52. Вып. 3. С. 487–489.
- [36] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.