

УДК 621.373.826.038.823

А.А. Малинина

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54
e-mail: ant.malinina@yandex.ru

ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСИ ПАРОВ ДИБРОМИДА РТУТИ, ГЕЛИЯ И КРИПТОНА

Приведены результаты исследований параметров газоразрядной плазмы на смеси паров дибромида ртути, гелия и криптона в зависимости от приведенной напряженности электрического поля (E/N). Величина средней энергии, скорости дрейфа, концентрации и температуры электронов находится в пределах: 0.6 эВ - 9.4 эВ, $5.3 \cdot 10^5$ м/с - $1.89 \cdot 10^5$ м/с, $1.79 \cdot 10^{18}$ м⁻³ - $5 \cdot 10^{18}$ м⁻³, 6960 К - 109040 К при изменении параметра E/N от 1 до 100 Тд. Константы скоростей процессов упругого и неупругого рассеяния электронов на атомах гелия, криптона и молекулах дибромида ртути находятся в диапазоне величин $2 \cdot 10^{-17}$ - $1.2 \cdot 10^{-13}$ м³/с. Потери мощности барьерного разряда на возбуждение электронных состояний $X^2\Sigma_{1/2}^+$, $V^2\Sigma_{1/2}^+$, эксиплексной молекулы монобромид ртути и электронного состояния $HgBr_2(D)$ молекулы дибромида ртути достигают максимальных значений: 0.24 %, 0.47 % и 0.69 %, соответственно, для $E/N = 8$ Тд. Даны рекомендации по повышению энергетических характеристик газоразрядных излучателей на основе смеси паров дибромида ртути, гелия и криптона.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, пары дибромида ртути, эксиплексные молекулы, параметры плазмы.

Введение

Данные по параметрам газоразрядной плазмы барьерного разряда на смесях паров дибромида ртути, гелия и криптона необходимы для выявления возможности увеличения эффективности работы эксиплексной лампы, которая одновременно излучает спектральные полосы в ультрафиолетовом ($\lambda_{\text{макс.}} = 207$ нм) и видимом спектральных диапазонах ($\lambda_{\text{макс.}} = 502$ нм) [1].

Измерение параметров плазмы при атмосферном давлении смеси, которое применялось в наших исследованиях, представляет сложную в методическом и техническом плане задачу [1, 2]. В связи с этим, нами использовался теоретический метод, который успешно апробирован в разрядах на других смесях паров дигалогенидов ртути с газами [3-6]. В соответствии с этим методом, параметры и характеристики плазмы газового разряда определялись на основании известной функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Для определения ФРЭЭ применялось кинетическое уравнение Больцмана для квазистационарной функ-

ции распределения электронов по энергиям [6-8]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f - \frac{e}{m} \cdot \mathbf{E} \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = C[f], \quad (1)$$

где f – функция распределения электронов в шестимерном фазовом пространстве, \mathbf{v} – координаты скоростей, e – элементарный заряд, m – масса электрона, \mathbf{E} – напряженность электрического поля, $\nabla_{\mathbf{r}}$ – оператор градиента координат, $\nabla_{\mathbf{v}}$ – оператор градиента скорости, C – представляет скорость изменения ФРЭЭ вследствие столкновений.

Кинетическое уравнение Больцмана (1) для квазистационарной функции распределения электронов по энергиям применялось для экспериментальных условий, при которых плазменная среда является пространственно однородной, характеризуется постоянством состава компонент и находится в электрическом поле, напряженность которого не изменяется за время установления функции распределения электронов по энергиям. Эти экспериментальные условия обеспечивались в нашем эксперименте [1].

Параметры плазмы определялись как общие интегралы функции распределения электронов по энергии в разряде на смеси HgBr₂/Kr/He. ФРЭЭ находилась путем решения кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении [6]. Вычисления были сделаны с использованием программы “Bolsig+” [9]. На основе ФРЭЭ были определены следующие параметры: подвижность электронов, средняя энергия электронов, а также потери мощности разряда на различные электронные процессы. Кроме того, определялись константы скоростей упругого и неупругого рассеяния электронов на молекулах и атомах (компонентах смеси) в зависимости от величины параметра E/N (отношения напряженности электрического поля (E) к общей концентрации компонент смесей (N)) в диапазоне изменений параметра E/N = 1-100 Тд (1·10⁻¹⁷ - 1·10⁻¹⁵ В·см²). Диапазон изменений параметра E/N включал величину параметра, который был реализован в эксперименте (100 Тд) [1].

В интеграле столкновений электронов с атомами криптона и гелия данные по эффективности процессов упругого рассеяния электронов, возбуждения энергетических уровней и ионизации атомов криптона и гелия были взяты из базы данных программы Bolsig+ [9]. В интеграле столкновений электронов с молекулами дибромида ртути были учтены процессы колебательного возбуждения электронных состояний HgBr₂(D) (с энергией рассеяния электронов с порогом 7.9 эВ), прилипания, а также ионизации молекул дибромида ртути диссоциативного возбуждения X²Σ⁺_{1/2}, B²Σ⁺_{1/2} – электронных состояний молекул монобромида ртути. Данные по абсолютным сечениям этих процессов, а также их зависимости от энергий электронов были взяты из [3-5].

Результаты численного расчета средних энергий электронов позволили определить их температуру в газоразрядной плазме из известной формулы [7]:

$$\varepsilon = 3/2 \cdot kT, \quad (2)$$

где ε – энергия электронов, k – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина.

Концентрация электронов (N_e) рассчитывалась по формуле [1]:

$$N_e = j/e \cdot V_{др.}, \quad (3)$$

где j – плотность тока в разряде, e – заряд электрона, $V_{др.}$ – скорость дрейфа электронов.

Скорость дрейфа электронов определялась из выражения [1]:

$$V_{др.} = \mu_e E, \quad (4)$$

где μ_e – подвижность электронов, E – напряженность поля на плазме.

Напряженность поля на плазме E рассчитывалась по формуле:

$$E = U_{пл.}/d, \quad (5)$$

$U_{пл.}$ – напряжение на плазме, d – разрядный промежуток.

В свою очередь напряжение на плазме оценивалось из выражения:

$$U_{пл.} = U \cdot C_{дл.}/(C_{пл.} + C_{дл.}), \quad (6)$$

где U – амплитуда импульса напряжения приложенного к электродам излучателя, $C_{дл.}$ – ёмкость диэлектрика, $C_{пл.}$ – ёмкость плазменного промежутка.

Результаты расчета и их обсуждение

На рис. 1 приведен характерный вид ФРЭЭ при разной величине параметра E/N в диапазоне 1–100 Тд. Увеличение параметра E/N приводило к росту количества «быстрых» электронов в разряде и уменьшению плотности электронов в области низких значений приведенной напряженности электрического поля. Средняя энергия электронов разряда (вставка рис. 1) наиболее сильно зависела от параметра E/N в диапазоне 1–8 Тд, при этом, она линейно увеличивалась от 0.6 до 3.9 эВ. В диапазоне изменения параметра E/N = 8 – 100 Тд средняя энергия электронов также увеличивалась от 3.9 до 9.4 эВ, но с меньшей скоростью. Более медленный рост средней энергии электронов в этой области изменения E/N вызван потерями энергии «быстрых» электронов на возбуждение электронных уровней энергии молекулы дибромида ртути, ато-

мов криптона и гелия. Температура электронов увеличивалась от 6960 К до 109040 К при изменении параметра E/N от 1 до 100 Тд, соответственно.

Приведенная подвижность электронов на рис. 2 изменялась в диапазоне $5.1 \cdot 10^{24} \cdot N - 1.8 \cdot 10^{24} \cdot N$ (1/м/В/с) при увеличении параметра E/N в диапазоне 1-100 Тд, что приводило к величине скорости дрейфа электронов: $5.3 \cdot 10^5$ м/с и $1.89 \cdot 10^5$ м/с, соответственно, при напряженности электрического поля на плазме $2.7 \cdot 10^6$ В/м. Величина концентрации электронов при росте параметра E/N в диапазоне 1–100 Тд увеличивалась от $1.79 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ (плотность тока 15.2 А/см^2 на поверхности

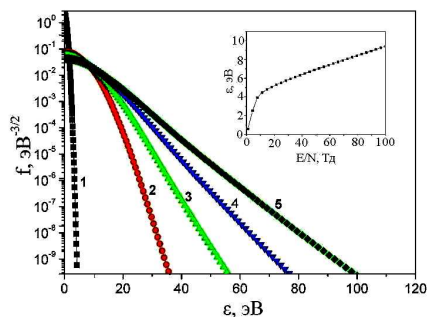


Рис. 1. Функции распределения электронов по энергии для разряда в смеси $\text{HgBr}_2 - \text{Kr} - \text{He}$ (0.0009 – 8.3999 – 91.5992)% при общем давлении 120 кПа для значений приведенной напряженности поля E/N : 1 (1), 25.8 (2), 50.5 (3), 75.3 (4), 100(5) Тд; вставка: зависимость средней энергии электронов от параметра E/N для разряда в той же смеси.

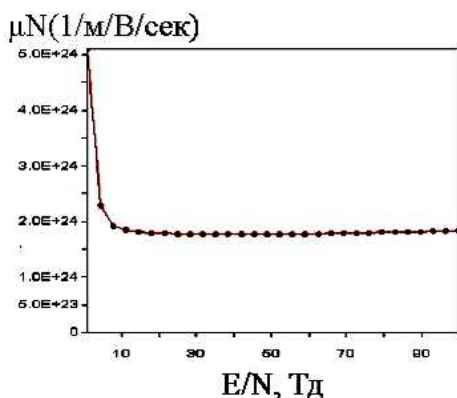


Рис. 2. Зависимость приведенной подвижности электронов от величины параметра E/N для разряда в смеси $\text{HgBr}_2 - \text{Kr} - \text{He}$ (0.0009–8.3999 – 91.5992)% при общем давлении 120 кПа.

внутреннего электрода источника излучения). Средняя энергия электронов при $E/N=100$ Тд составляла ~ 9.4 эВ, что

соответствовало электронной температуре 109040 К.

Распределение удельных потерь мощности разряда на основные процессы при изменении величины параметра E/N в диапазоне 1–100 Тд представлено на рис. 3. Для процессов диссоциативного возбуждения молекул монобромида ртути потери мощности разряда увеличивались с возрастанием параметра E/N . Они достигали максимума 0.24 %, 0.47 %, 0.69 % при значениях параметра E/N равных 8 Тд для электронных состояний монобромида ртути $\text{V}^2\Sigma^+_{1/2}$, $\text{X}^2\Sigma^+_{1/2}$ и электронного состояния $\text{HgBr}_2(\text{D})$ дибромида ртути, соответственно, а при дальнейшем повышении параметра E/N они уменьшались. Для процесса возбуждения электронного состояния $5s[3/2]_2^0$ атома криптона потери мощности разряда увеличивались от $E/N=5$ Тд, достигали насыщения 3.4 % при $E/N=18$ Тд, а в дальнейшем монотонно спадали до 1.4 % (при $E/N=100$ Тд). Для процесса возбуждения электронного состояния 2^3S_1 атома гелия потери мощности разряда монотонно увеличивались от $E/N=18$ Тд и достигали максимума 3.9 % при $E/N=100$ Тд.

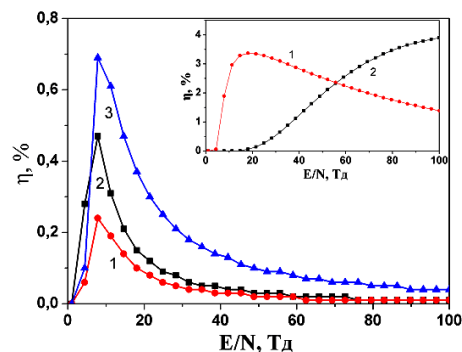


Рис. 3. Зависимость удельных потерь мощности разряда на процессы столкновений электронов с молекулами дибромида ртути от параметра E/N в плазме на смеси $\text{HgBr}_2 - \text{Kr} - \text{He}$ (0.0009–8.3999 – 91.5992)% при общем давлении 120 кПа: 1, 2 – диссоциативное возбуждение электронных состояний $\text{V}^2\Sigma^+_{1/2}$, $\text{X}^2\Sigma^+_{1/2}$ молекул HgBr^* , 3 – возбуждение электронного состояния дибромида ртути ($\text{HgBr}_2(\text{D})$); на вставке: 1 – возбуждение электронного состояния $5s[3/2]_2^0$ атома криптона, 2 – возбуждение электронного состояния 2^3S_1 атома гелия.

Скорости роста и падения потерь мощности разряда на эти процессы и их

величины связаны с характером зависимости эффективных сечений возбуждения конкретных состояний, от энергий электронов, их абсолютных величин, зависимости функции распределения электронов для разных значений параметра E/N от величины пороговой энергии диссоциативного возбуждения электронных состояний молекулы монобромид ртуты $X^2\Sigma^+_{1/2}$, $V^2\Sigma^+_{1/2}$ состояний, возбуждения электронных состояний молекулы дибромид ртуты $HgBr_2(D)$, возбуждения электронных состояний атомов криптона $5s[3/2]^0_2$ и гелия 2^3S_1 .

Низкие потери мощности разряда на процессы неупругого столкновения электронов с молекулами дибромид ртуты по сравнению с потерями на процессы неупругого столкновения электронов с атомами криптона и гелия связаны с достаточно малой концентрацией молекул дибромид ртуты ($2.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в исследуемой смеси.

На рис. 4 представлены результаты расчета констант скоростей процессов столкновений электронов с молекулами дибромид ртуты и атомами криптона. Эффективность процессов столкновений электронов с молекулами дибромид ртуты выше более, чем на два и четыре порядка

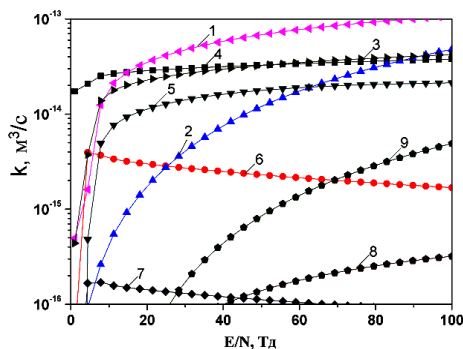


Рис. 4. Зависимости констант скорости столкновений электронов с молекулами дибромид ртуты от величины параметра E/N в плазме на смеси $HgBr_2$ – Kr – He (0.0009–8.3999 – 91.5992)% при общем давлении 120 кПа: 1 – возбуждение электронного состояния дибромид ртуты ($HgBr_2(D)$), 2 – ионизация молекул $HgBr_2$ электронами, 3 – диссоциативное возбуждение $X^2\Sigma^+_{1/2}$ -состояния молекул $HgBr^*$, 4 – колебательное возбуждение молекул $HgBr_2$, 5 – диссоциативное возбуждение $V^2\Sigma^+_{1/2}$ -состояния молекул $HgBr^*$, 6 – резонансное колебательное возбуждение молекул $HgBr_2$, 7 – прилипание электронов к молекуле $HgBr_2$, 8 – возбуждение электронного состояния $5s[3/2]^0_2$ атомов криптона, 9 – ионизация атомов криптона.

по сравнению с эффективностями процессов столкновений электронов с атомами криптона и гелия. Это вызвано более высокими значениями их абсолютных эффективных сечений, а также более низкими порогами возбуждения [3-5]. Значения констант скорости (k) столкновений электронов с молекулами $HgBr_2$ и атомами криптона увеличивались в диапазоне от $1 \cdot 10^{-16}$ до $1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ при увеличении параметра E/N от 1 до 100 Тд. В области параметра $E/N = 1-100$ Тд константы скорости возбуждения электронного состояния дибромид ртуты $HgBr_2(D)$ и ионизации дибромид ртуты электронами (зависимости 1 и 2, рис. 4) возрастали от значений $4.4 \cdot 10^{-17}$ до $4.8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ и $4.96 \cdot 10^{-16}$ до $1.1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно. Константы скорости процессов колебательного возбуждения молекулы дибромид ртуты возрастали от $4.2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ до $3.8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$. Значения констант скоростей диссоциативного возбуждения $X^2\Sigma^+_{1/2}$ и $V^2\Sigma^+_{1/2}$ – состояний молекул монобромид ртуты увеличивались в пределах значений $4.4 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$ и $4.7 \cdot 10^{-29}$ до $2.1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$. Для процесса диссоциативного прилипания электронов к молекулам дибромид ртуты они увеличивались от $3.4 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с}$, достигали насыщения $2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ при $E/N = 6$ Тд, а после чего спадали до $8.5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ (при возрастании параметра E/N до значений 100 Тд). В области значений параметра $E/N = 100$ Тд, при котором проводились исследования, константа скорости возбуждения эксиплексной молекулы $HgBr^*$ составляла величину $\approx 2.1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$.

Заключение

На основании данных по параметрам плазмы барьерного разряда на смеси $HgBr_2$ – Kr – He может быть сделан вывод о возможности улучшения выходных характеристик (мощности излучения и эффективности) эксиплексной лампы в сине-зеленом $\lambda=502$ нм и ультрафиолетовом $\lambda=207$ нм спектральных диапазонах посредством уменьшения параметра E/N

до величини 8 Тд и 18 Тд. Возможными путями достижения таких величин параметра E/N является увеличение

межэлектродного расстояния, и повышение концентрации компонент смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malinina A.A., Starikovskaya S.M. and Shuaibov A.K. Proceedings of the VIII International conference "Electron and applied physics". – Kyiv., 24-27, October. – 2012. – P. 150 – 151.
2. Диагностика плазмы / Под редакцией Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. – М.: Мир, 1967. – 515 с.
3. Nighan W.L. Brown R.T. Kinetic process in the HgBr(B →X) HgBr dissociation laser // J.Appl.Phys. – 1982. – V.53, N11. – P. 7201-7210.
4. Kushner M.J., Pindrof A.L., Fisher C.H., T.A. Znotins Multidimensional modelling of transverse avalanche laser discharges: application to the HgBr laser // J.Appl.Phys. – 1985 – V.75. – P. 2406-2422.
5. Malinin A.N. The Main Characteristics of the Plasma of Pulse Glow Discharge in Mixtures of Mercury Dihalide and Rare Gases // Laser Physics. – 1998. – V.8, N2 – P. 395-406.
6. Hagelaar G. J. M., Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // Plasma Sources Sci. Techn. – 2005. – Vol. 14. – P. 722 – 733.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Москва: Наука, 1987. – 592 с.
8. Газовые лазеры / Под редакцией И Мак-Даниеля и У. Нигэна. – М.: Мир, 1986. – 550 с.
9. <http://www.siglo-kinema.com/>

Стаття надійшла до редакції 23.01.13

A.A. Malinina

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Pidhirna Str., 46, Ukraine

PARAMETERS OF DBD PLASMA ON MIXTURE OF MERCURY DEBROMIDE VAPOR, HELIUM AND KRYPTON

The results of studies of gas discharge plasma on mercury dibromide vapor, helium and krypton mixture in dependence from reduced electric field (E/N) are presented. Mean energy value, drift velocity, electron density and temperature are in the range: 0.6 эВ -9.4 eV, $5.3 \cdot 10^5$ m/s - $1.89 \cdot 10^5$ m/s, $1.79 \cdot 10^{18}$ m⁻³ – $5 \cdot 10^{18}$ m⁻³, 6960 K - 109040 K under E/N change from 1 to 100 Td. Rate constants of elastic and inelastic process of electrons scattering on helium, krypton atoms and mercury dibromide molecules are in the range $2 \cdot 10^{-17}$ - $1.2 \cdot 10^{-13}$ m³/s. Barrier discharge power losses on X²Σ⁺_{1/2}, B²Σ⁺_{1/2} electronic states of mercury monobromide exciplex molecule and HgBr₂ (D) electronic state of mercury dibromide molecule reach maximum values 0.24 %, 0.47 % and 0.69 % respectively for E/N=8 Td. Recommendations to increase energy characteristics of gas discharge radiators on the basis of mercury dibromide vapor, helium and krypton are presented.

Keywords: low temperature plasma, mercury debromide vapor, exciplex molecules, plasma parameters.

А.О. Малініна

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Підгірна, 46

ПАРАМЕТРИ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ПЛАЗМИ БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШІ ПАРІВ ДИБРОМІДУ РТУТІ, ГЕЛІЮ ТА КРИПТОНУ

Наведено результати досліджень параметрів газорозрядної плазми на суміші парів диброміду ртуті, гелію та криптону в залежності від приведеної напруженості електричного поля (E/N). Величина середньої енергії, швидкості дрейфу, концентрації та температури електронів знаходиться в межах: 0.6 eV - 9.4 eV, $5.3 \cdot 10^5$ м/с - $1.89 \cdot 10^5$ м/с, $1.79 \cdot 10^{18}$ м⁻³ - $5 \cdot 10^{18}$ м⁻³, 6960 К - 109040 К при зміні параметра E/N від 1 до 100 Тд. Константи швидкостей процесів пружного та непружного розсіяння електронів на атомах гелію, криптону та молекулах диброміду ртуті знаходяться у діапазоні величин $2 \cdot 10^{-17}$ - $1.2 \cdot 10^{-13}$ м³/с. Втрати потужності бар'єрного розряду на збудження електронних станів $X^2\Sigma^+_{1/2}$, $V^2\Sigma^+_{1/2}$, ексиплексної молекули монобромиду ртуті і електронного стану $HgBr_2(D)$ молекули диброміду ртуті досягають максимальних значень: 0.24%, 0.47% та 0.69%, відповідно, для $E / N = 8$ Тд. Дано рекомендації з підвищення енергетичних характеристик газорозрядних випромінювачів на основі суміші парів диброміду ртуті, гелію і криптону.

Ключові слова: низькотемпературна плазма, пари диброміду ртуті, ексиплексні молекули, параметри плазми.