

УДК 621.373.826.038.823

PACS 52.80.Yr

DOI: 10.24144/2415-8038.2016.40.142-147

А.О. Малініна

Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

e-mail: ant.malinina2018@gmail.com

ПАРАМЕТРИ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ПЛАЗМИ БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ ПАРІВ ДИЙОДИДУ РТУТІ ТА НЕОНУ

Чисельним моделюванням визначено функції розподілу електронів за енергіями, транспортні характеристики, питомі втрати потужності розряду на електронні процеси, концентрація і температура електронів, а також константи швидкостей процесів пружного і не пружного розсіяння електронів на компонентах робочої суміші і їх залежності від величини приведеної напруженості електричного поля в газорозрядній плазмі на сумішах парів дийодиду ртуті та неону

Ключові слова: газорозрядна плазма, випромінювання ексиплексних молекул, параметри плазми, дийодид ртуті, неон

Вступ

Газорозрядна плазма на суміші парів дийодиду ртуті з газами є робочим середовищем джерел когерентного і спонтанного випромінювання ексиплексної молекули моноіодиду ртуті в фіолетово-синій - спектральній області з довжиною хвилі в максимумі інтенсивності ($\lambda=444$ нм) в [1-7]. Разом з тим в плазмі на суміші парів дийодиду ртуті з неоном виявлено і випромінювання систем спектральних смуг ($C \rightarrow X$) ексиплексних молекул моноіодиду ртуті, випромінювання продуктів розпаду дийодиду ртуті – спектральну смугу молекулярного йоду $I_2(D' \rightarrow A')$ з максимумом інтенсивності при $\lambda = 342$ нм і атомарні лінії ртуті в УФ и видимому діапазонах. Було встановлено, що найбільш яскраве випромінювання спостерігається у спектральній смузі ($B \rightarrow X$) с максимумом потужності на $\lambda = 443$ нм [8].

Представляє інтерес як науковий так і прикладний встановлення параметрів плазми при яких проведено експериментальні дослідження і значення оптимальних параметрів при яких може спостерігатись максимальна потужність випромінювання в фіолетово синій спектральній смузі. Ця обставина була

мотивацією для визначення параметрів плазми на сумішах парів дийодиду ртуті, та неону в умовах нашого експерименту, що представлено у статті [8].

Визначалися наступні параметри: функція розподілу електронів за енергіями, транспортні та енергетичні характеристики, частки потужності розряду на електронні процеси, концентрація і температура електронів, а також константи швидкостей процесів пружного і не пружного розсіяння електронів на компонентах робочої суміші залежно від величини приведенного електричного поля (E/N - відношення напруженості електричного поля до загальної концентрації компонент робочої суміші), а також встановлювались закономірності в параметрах плазми і значення E/N при якому спостерігалася максимальна потужність випромінювання в експерименті.

Методика визначення параметрів плазми

Через те, що експериментальна фізика не має задовільних методів діагностики щільної газорозрядної плазми, параметри плазми бар'єрного розряду

визначалися чисельно на основі функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) в розряді [9]. ФРЕЕ визначалася шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана в двочленному наближенні з використанням відомої програми "Bolsig+" [10]. На основі ФРЕЕ були визначені: середня енергія електронів, рухливість електронів, питомі втрати потужності електричного розряду та константи швидкостей пружного та не пружного розсіювання електронів на молекулах дийодиду ртуті та атомів неону в залежності від величини приведенного електричного поля. Діапазон змін параметру $E/N=1-100$ Тд ($1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15}$ В·см²) та включав величини параметру E/N , які були реалізовані в експерименті.

Всі розрахунки проводилися для парціального тиску дийодиду ртуті 0.6 кПа, та неону 110 кПа, при яких досягалася максимальна величина яскравості випромінювання в експерименті [8].

В інтегралі зіткнень електронів з атомами неону і молекулами дийодиду ртуті враховані такі процеси: пружне розсіювання, збудження енергетичних рівнів атома Ne з енергією порогу рівною 16.62 eV, 16.67 eV (1s4), 16.84 eV (1s2), 18.72 eV (2p), 20.0 eV (2s + 3d), 20.65 eV (3p), 4.9 eV, іонізація атома неону; іонізація молекули дийодиду ртуті, дисоціативне збудження електронного $V^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану монойодиду ртуті. Дані за абсолютними величинами ефективних перерізів цих процесів, а також їх залежностей від енергій електронів взяті з робіт [10-12].

Концентрація електронів (N_e) і швидкість дрейфу електронів розраховувалася за відомими формулами [13]:

Напруженість електричного поля на плазмі визначалася за методикою, що представлена в статті. [14].

Результати моделювання та їх обговорення

На рис.1 наведено характерний вид ФРЕЕ при зміні параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд для суміші HgI_2 - Ne. Збільшення

параметра E/N приводить до зростання кількості «швидких» електронів в розряді і зменшення щільності електронів в діапазоні роботи випромінювача. Середня енергія електронів розряду найбільш сильно залежить від параметра $E/N = 1 - 14.7$ Тд. При цьому вона лінійно збільшується від 2.1 до 6.8 eV. В діапазоні параметра $E/N = 14.7 - 100$ Тд середня енергія електронів

$f, eV (-3/2)$

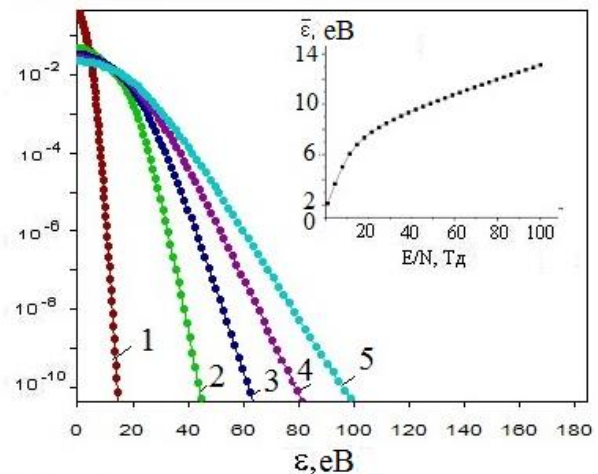


Рис. 1. Функції розподілу електронів за енергіями в розряді на суміші HgI_2 -Ne для значень параметра E/N : 1 (1), 25.8 (2), 50.5 (3), 75.3 (4), 100 (5) Тд; на вставці - залежність середньої енергії електронів від параметра E/N

також збільшується від 6.8 до 13.1 eV, але з меншою швидкістю. Зменшений ріст середньої енергії електронів в цьому діапазоні параметра E/N пов'язаний з втратою енергії швидких електронів на збудження енергетичних рівнів молекул дийодиду ртуті і атомів неону.

Результати чисельного розрахунку середніх енергій електронів дозволяють визначити їх температуру в газорозрядній плазмі випромінювача з відомої формули [13]:

$$\varepsilon = 3/2 \cdot kT,$$

де ε - енергія електронів, k -постійна Больцмана, T -температура в градусах Кельвіна.

Вона збільшується від 16239 К до 101302 К при зміні параметра E/N від 1 до 100 Тд.

Рухливість електронів, як впливає з даних чисельного розрахунку змінюється в межах $9.6 \cdot 10^{24} \cdot N - 1.8 \cdot 10^{24} \cdot N$ (1/м/В/с) при зміні параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд, що дає значення швидкості дрейфу електронів $4.3 \cdot 10^5$ м/с та $1.4 \cdot 10^5$ м/с відповідно для напруженості поля на плазмі $8.3 \cdot 10^5$ В/м і значення концентрації електронів $7.7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3} - 3.0 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при щільності струму 531 А/м^2 на поверхні внутрішнього електрода джерела випромінювання ($9.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$).

Для процесу дисоціативного збудження молекул моноїодиду ртуті (стан $V^2\Sigma^{+1/2}$) питомі втрати потужності розряду в суміші $\text{HgI}_2 - \text{Ne}$ збільшуються із зростанням параметра E/N , досягають максимуму 92%, для $E/N = 4.4$ Тд, і при подальшому підвищенні параметра E/N зменшуються (рис.2).

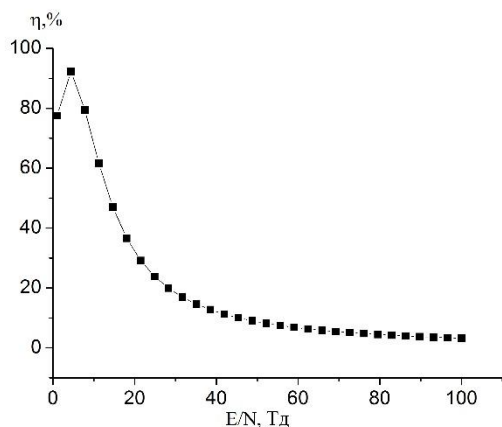


Рис.2. Залежність питомих втрат потужності розряду на дисоціативне збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ -стану молекул моноїодиду ртуті в суміші $\text{HgI}_2 - \text{Ne}$. Загальний тиск суміші $P = 116$ кПа.

Швидкість зростання і падіння втрат потужності розряду на цей процес і його величина пов'язана з характером залежності ефективного перерізу збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ -стану, від енергій електронів, їх абсолютних величин, із залежністю функції розподілу електронів для різних значень параметра E/N і величини порогової енергії дисоціативного збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ стану молекули моноїодиду ртуті [12]. Втрати потужності розряду в області значень параметра $E/N = 46$ Тд, в якій працює джерело випромінювання складають величину 10%.

На рис. 3 представлені результати чисельного розрахунку константи швидкості процесу дисоціативного збудження молекул моноїодиду ртуті в суміші $\text{HgI}_2 - \text{Ne}$ для співвідношення парціальних тисків в суміші, при яких спостерігається максимальна потужність випромінювання спектральної смуги $\lambda_{\text{макс}} = 444$ нм ексиплексної молекули HgI^* .

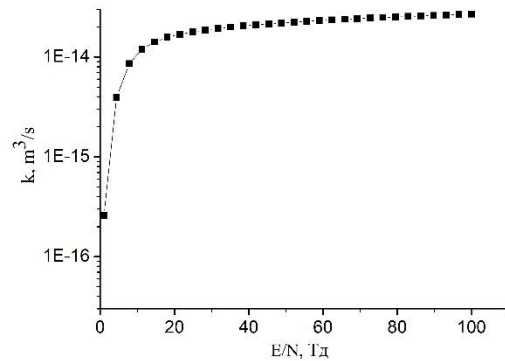


Рис.3. Залежність константи швидкості дисоціативного збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ -стану молекул моноїодиду ртуті електронами від параметра E/N в суміші $\text{HgI}_2 - \text{Ne}$. Загальний тиск суміші $P = 116$ кПа.

Константа швидкості характеризується високим значенням $1 \cdot 10^{-16} - 3.5 \cdot 10^{-14}$ що пов'язано з високими значеннями абсолютних ефективних перерізів відповідного процесу. В області значень параметра $E/N = 46$ Тд, в якій працює джерело випромінювання, для суміші парів діїодиду ртуті і неону константа швидкості збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ -стану молекули моноїодиду ртуті має значення $2.2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3/\text{с}$

Висновок

Встановлені: функції розподілу електронів за енергіями, транспортні характеристики, питомі втрати потужності розряду на електронні процеси, а також константи швидкостей процесів: пружного і не пружного розсіяння електронів на компонентах робочої суміші в залежності від величини приведенного електричного поля. Максимальні значення концентрації електронів змінюється в межах $7.7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3} - 3.0 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ при зміні величини параметра E/N від 1 Тд до 100 Тд. Температура електронів збільшувалася від 16239 К до

101302 К. Частка потужності розряду, що йде на процес збудження електронами молекул моноїодиду ртуті досягала максимуму 10% при значенні параметра E/N рівному 46 Тд для електронного стану $V^2\Sigma^{+1/2}$. Константа швидкості збудження $V^2\Sigma^{+1/2}$ стану складає значення $(2.2) \cdot 10^{-14}$ м³/с для приведеного електричного поля $E/N = 46$ Тд, при якому в умовах експерименту спостерігалася максимальна потужність випромінювання в фіолетово-синьї спектральної області ($\lambda_{\text{макс.}} = 444$ нм).

Результати чисельного моделювання параметрів плазми на суміші парів дийодиду ртуті та неону встановили значення приведеної напруженості поля (4.4 Тд) при якій питома втрата енергії розряду на збудження фіолетово-сине випромінювання ексиплексних молекул моноїодиду ртуті максимальна, що дає змогу оптимізувати форму імпульсів накачки для створення більш ефективної ексиплексної лампи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Burnham, R. (1978), "Discharge pumped mercuric halide dissociation lasers", Appl. Phys.Lett., V.33, No 2, pp. 152-156.
2. Gavrilova, Yu E, Zrodnikov, V S, Klenentov, A D and Podsonny, A S. (1980) "Excimer HgJ* Laser Excited by an Electric Discharge", Quant. Electron, Vol. No. 7, pp. 2495-2497.
3. Konoplev, A N, Kelman, V A and Shevera, V S. (1983), "Investigation into Pulse Discharge Emission in ZnI₂, CdI₂ and HgI₂ Mixtures with Helium and Neon", Journal of Applied Spectroscopy, Vol. No. 39, pp. 315-317.
4. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of Mercury Monohalides in the Plasma of Pulse-Periodic Discharge in Mixtures of Mercury Dihalides and Rare Gases", Laser Physics, V.7, No 5, pp. 1032-1040.
5. Malinin, A N, Polyak A V, Guivan, N N, Zubrilin, N G and Shimon, Lyudvik L. (2002), "Coaxial HgI excimer lamps", Quantum Electronics, Vol. No. 32pp.155-159.
6. Malinina, Antonina (2015), "Diagnostics of Optical Characteristics and Parameters of Gas-Discharge Plasma Based on Mercury Diiodide and Helium Mixture", Open Journal of Applied Science, No 5, pp. 826-832.
7. Malinina, A.A., Malinin, A.N. (2016), "Optical Characteristics of a Gas Discharge Plasma Based on a Mixture of Mercury Diiodide Vapor, Nitrogen, and Helium", Journal of Applied Spectroscopy, Vol. No. 83б, pp.592-597.
8. Malinina, A.A., Malinin, A.N. (2017), "Spectral Characteristics of High Frequency Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge based on Mercury Diiodide Vapor with Neon Mixture", Journal of Applied Spectroscopy (will be published).
9. Hagelaar, J.M. and Pitchford, L.C. (2005), "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models", Plasma Sources Sci. Technol., V. 14, pp. 722-733.
10. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
11. Kushawaha, V., Mahmood, M. (1987), "Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I)", J. Appl. Phys., V.62, No 6, pp. 2173-2177.
12. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of the -state of mercury monohalides by electron impact", Laser Physics, V.7, No 6, pp.1168-1176.
13. Raizer Yu. P. (1991), Gas Discharge Physics (Moscow: Nauka).
14. Ломаев, М.И. (2001), "Определение энерговвода в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом", Оптика атмосферы и океана, Т. 14, № 11, сс. 1091-1095.

Стаття надійшла до редакції 16.09.2016

А.А. Малинина

Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСИ ПАРОВ ДИОДИДА РТУТИ И НЕОНА

Численным моделированием определены функции распределения электронов по энергиям, транспортные характеристики, удельные потери мощности разряда на электронные процессы, концентрация и температура электронов, а также константы скоростей процессов упругого и не упругого рассеяния электронов на компонентах рабочей смеси и их зависимости от величины приведенной напряженности электрического поля в газоразрядной плазме на смесях паров диодида ртути, и неона.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, излучение эксиплексных молекул, параметры плазмы, диодид ртути, неон

A.A. Malinina

Uzhgorod National University, Voloshin Str, 54, Uzhgorod, 88000

e-mail: ant.malinina2018@gmail.com

PARAMETERS OF BARRIER DISCHARGE PLASMA BASED ON MERCURY DIODIDE VAPOR AND NEON MIXTURE

Introduction: In our previous studies have been found that in barrier discharge plasma based on mercury diiodide vapor with neon mixture mercury monoiodide exciplex molecules are formed. Emission of these molecules is occurring in violet - blue spectral range ($\lambda_{\max.} = 444$ nm) and have been revealed that only a mixture of mercury diiodide vapor with helium is more efficient (radiation power in spectral band with a peak wavelength 444 nm).

Purpose: The aim of research was to determine the plasma parameters in mixtures as mercury diiodide vapor with neon for the values of mixture components partial pressures at which in the experiment the maximum value of the radiation power was obtained.

Methods: Barrier discharge plasma parameters were determined numerically based on the electron energy distribution function (EEDF) in discharge. EEDF was determined by solving the kinetic Boltzmann equation in two-terms approximation using well-known program "Bolsig +". Based on EEDF: mean electron energies, electron mobility, specific power losses of electrical discharge and rate constants of elastic and inelastic scattering of electrons on mercury diiodide, nitrogen molecules and helium atoms as a function of the reduced electric field were identified.

Results: Established: electron energy distribution functions, transport characteristics, specific losses of discharge power on electronic processes and rate constants of processes: elastic and inelastic scattering of electrons on the components of the mixture depending on the value of the reduced electric field. For mercury diiodide vapor and neon mixture maximum values of the electron density vary from $7.7 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ to $3.0 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ by changing the value of the parameter E/N from 1 Td to 100 Td. Electron temperature increased from 16239 K to 101302 K. Portion of discharge power, that is spent on the process of mercury monoiodide molecules excitation reached a maximum of 92% at the value of the parameter E/N equal to 4.4 Td for $B^2\Sigma^+_{1/2}$ electronic state. The rate constant of $B^2\Sigma^+_{1/2}$ -state excitation is equal to $2.2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3/\text{c}$ for the reduced electric field E/N = 46 Td, at which in experimental conditions maximum radiated power in violet - blue spectral region ($\lambda_{\max.} = 444$ nm) was observed..

Conclusion: The numerical simulation results give the reason to conclude about the possibility to increase the radiation power in the violet-blue spectral range of the multi-wavelength DBD-driven excimer lamp based on a mixture of the mercury diiodide vapours, xenon and neon by means of the reduction of the parameter E/N to the value of 4.4 Td. To achieve this value of the parameter can be a combination of a high electric field pulse on discharge front and low field behind the front.

Keywords: gas discharge plasma, radiation of excimer molecules, plasma parameters, mercuric diiodide, neon

REFERENCES

1. Burnham, R. (1978), "Discharge pumped mercuric halide dissociation lasers", *Appl. Phys. Lett.*, V.33, No 2, pp. 152-156.
2. Gavrilova, Yu E, Zrodnikov, V S, Klenentov, A D and Podsonnyi, A S. (1980) "Excimer HgJ* Laser Excited by an Electric Discharge", *Quant. Electron.*, Vol. No. 7, pp. 2495-2497.
3. Konoplev, A N, Kelman, V A and Shevera, V S. (1983), "Investigation into Pulse Discharge Emission in ZnI₂, CdI₂ and HgI₂ Mixtures with Helium and Neon", *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. No. 39, pp. 315-317.
4. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of Mercury Monohalides in the Plasma of Pulse-Periodic Discharge in Mixtures of Mercury Dihalides and Rare Gases", *Laser Physics*, V.7, No 5, pp. 1032-1040.
5. Malinin, A N, Polyak A V, Guivan, N N, Zubrilin, N G and Shimon, Lyudvik L. (2002), "Coaxial HgI excimer lamps", *Quantum Electronics*, Vol. No. 32pp.155-159.
6. Malinina, Antonina (2015), "Diagnostics of Optical Characteristics and Parameters of Gas-Discharge Plasma Based on Mercury Diiodide and Helium Mixture", *Open Journal of Applied Science*, No 5, pp. 826-832.
7. Malinina, A.A., Malinin, A.N. (2016), "Optical Characteristics of a Gas Discharge Plasma Based on a Mixture of Mercury Diiodide Vapor, Nitrogen, and Helium", *Journal of Applied Spectroscopy*, Vol. No. 836, pp.592-597.
8. Malinina, A.A., Malinin, A.N. (2017), "Spectral Characteristics of High Frequency Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge based on Mercury Diiodide Vapor with Neon Mixture", *Journal of Applied Spectroscopy* (will be published).
9. Hagelaar, J.M. and Pitchford, L.C. (2005), "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models", *Plasma Sources Sci. Technol.*, V. 14, pp. 722-733.
10. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
11. Kushawaha, V., Mahmood, M. (1987), "Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I)", *J. Appl. Phys.*, V.62, No 6, pp. 2173-2177.
12. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of the - state of mercury monohalides by electron impact", *Laser Physics*, V.7, No 6, pp.1168-1176.
13. Raizer Yu. P. (1991), *Gas Discharge Physics* (Moscow: Nauka).
14. Lomaev M.I. (2001), "Opredelenie energovklada v eksilampax s vzbuzhdeniem bar'ernym razryadom", *Optika atmosfery i okeana*, T. 14, № 11, ss. 1091-1095.