

УДК 621.373.826.038.823

PACS 52.20.-j

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.120-125

А.О. Малініна

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

e-mail: ant.malinina2018@gmail.com

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ПЛАЗМИ НА СУМІШІ ПАРІВ ДИЙОДИДУ РТУТІ ТА АРГОНУ

Чисельним моделюванням визначені функції розподілу та середні енергії електронів, 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 приведеної напруженості електричного поля в газорозрядній плазмі на суміші парів дейодиду ртуті та аргону. Встановлено значення приведеної напруженості електричного поля при якому питома потужність розряду досягає максимального значення при збудженні ексиплексної молекули моноїодиду ртуті.

Ключові слова: газорозрядна плазма, випромінювання ексиплексних молекул, видимий спектральний діапазон.

Вступ

Газорозрядна плазма на суміші парів дейодиду ртуті з газами є робочим середовищем джерел когерентного (лазери) і спонтанного випромінювання (ексилампи) в фіолетово - синій спектральній області з довжиною хвилі в максимумі інтенсивності ($\lambda=443, 444$ нм) [1-7].

В наших дослідженнях було встановлено, що в плазмі бар'єрного розряду на суміші парів дейодиду ртуті з гелієм і неоном відбувається утворення ексиплексних молекул моноїоду ртуті і визначені параметри плазми бар'єрного розряду при яких спостерігається випромінювання спектральної смуги в фіолетово - синьому спектральному діапазоні ($\lambda_{\text{макс.}}=444$ нм) [8,9]. В зв'язку з потребою створення ексиплексних джерел випромінювання з максимально можливим ресурсом їх роботи виникає необхідність проведення досліджень газорозрядної плазми на сумішах парів дейодиду ртуті з більш важким буферним газом, так як проникливість такого газу через стінки менша [10], що і дозволить збільшити ресурс роботи відповідного джерела. Ця обставина послужила метою наших досліджень, а саме за рахунок чисельного моделювання визначити

функції розподілу та середні енергії електронів, 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 приведеної напруженості електричного поля в газорозрядній плазмі на суміші парів дейодиду ртуті та аргону. Данні таких параметрів газорозрядної плазми бар'єрного розряду на сумішах парів дейодиду ртуті з аргонем є важливими для створення більш ефективних ексиплексних ламп, що випромінюють смугу в фіолетово-синій спектральній області з максимальною інтенсивністю на довжині хвилі 444 нм.

Методика визначення параметрів плазми

Чисельне моделювання основних параметрів газорозрядної плазми на суміші парів дейодиду ртуті та аргону проводилось на основі функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) в розряді [11]. ФРЕЕ визначалася шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана в двочленному наближенні з використанням відомої програми "Bolsig+" [11,12]. На основі

ФРЕЕ були визначені: середня енергія електронів, питомі втрати потужності електричного розряду на процеси пружного та не пружного зіткнення електронів з молекулами дийодиду ртуті і атомами аргону, а також константи швидкостей пружного і не пружного розсіяння електронів на молекулах дийодиду ртуті і атомів аргону в залежності від приведеної напруженості електричного поля E/N (величини відношення напруженості електричного поля (E) до загальної концентрації молекул дийодиду ртуті і атомів аргону (N)). Діапазон змін параметра $E/N = 1 - 100$ Тд ($1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15}$ В · см²).

Всі розрахунки проводилися для парціального тиску дийодиду ртуті 0.6 кПа і аргону 110 кПа, при яких проводилися експериментальні дослідження спектральних характеристик випромінювання газорозрядної плазми на суміші парів дийодиду ртуті з неонам [13].

В інтегралі зіткнень електронів з атомами аргону і молекулами дийодиду ртуті в кінетичному рівнянні Больцмана були враховані такі процеси: пружне розсіяння, збудження енергетичних рівнів атома Аг з енергією порогу рівною 11.623 еВ, 12.906 еВ 11.273 еВ і іонізація атома аргону з енергією порогу рівною 15.700 еВ, іонізація молекули дийодиду ртуті, дисоціативне збудження електронного $V^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану монойодиду ртуті. Дані з абсолютних величин ефективних перерізів цих процесів, а також їх залежностей від енергій електронів взяті з робіт [12,14,15].

Результати модулювання та їх обговорення

На рис. 1 приведений характерний вид ФРЕЕ при зміні параметру E/N в діапазоні 1 – 100 Тд. Збільшення E/N приводить до зростання кількості “швидких” електронів в розряді і до зменшення щільності електронів в діапазоні роботи ексіплексних ламп ($E/N = 20 - 30$ Тд). Середня енергія електронів розряду (рис. 2) найсильніше залежить від параметру $E/N = 1 - 9$ Тд, при цьому вона лінійно збільшується від 1,9 до 2,9 еВ. В діапазоні параметру $E/N = 9 - 100$ Тд середня енергія електронів також збільшується від 2,9 до 5.8 еВ,

але з меншою швидкістю. Більш повільне зростання середньої енергії електронів в діапазоні параметру $E/N = 9 - 100$ Тд пояснюється втратами енергії електронів при збудженні енергетичних рівнів енергії атомів аргону.

$f, eV(-3/2)$

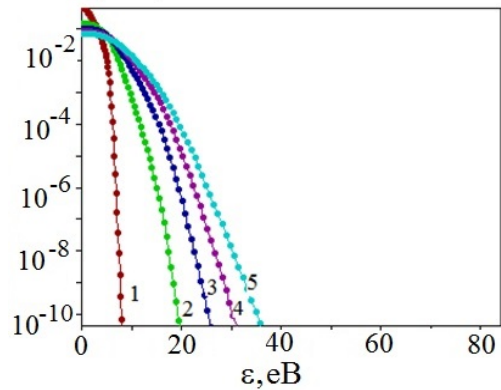


Рис. 1. Функції розподілу електронів за енергіями в розряді на суміші $HgI_2 : Ar = (0.09 : 0.91)$ при загальному тиску 110.6 кПа для значень параметру E/N : 1 – 1 Тд, 2 – 25.8 Тд, 3 – 50,5 Тд, 4 – 75,3 Тд, 5 – 100 Тд.

$\bar{\epsilon}, eV$

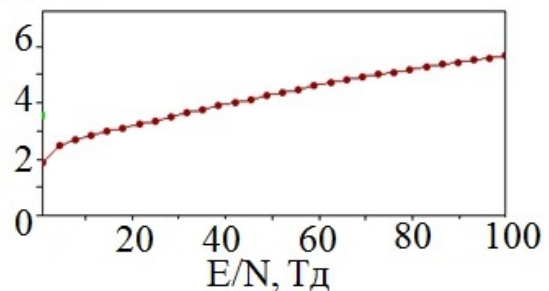


Рис. 2. Залежність середньої енергії електронів від параметру E/N для суміші $HgI_2 : Ar = (0.09 : 0.91)$ при загальному тиску 110.6 кПа.

Розподіл питомих втрат потужності розряду на основні процеси при зміні величини параметру E/N в діапазоні 1 – 100 Тд представлено на рис. 3. Для процесу дисоціативного збудження молекул монойодиду ртуті втрати потужності розряду збільшуються із зростанням параметру E/N , досягають максимуму 99 % при значеннях E/N рівних 15 Тд для електронного стану монобромиду ртуті $V^2\Sigma_{1/2}^+$ і при подальшому підвищенні E/N зменшуються. Швидкості зростання і падіння втрат потужності розряду і його величина пов'язані з характером залежності ефективного перерізу від енергії електронів, його абсолютної величини, і з залежністю функції

розподілу електронів для різних значень параметра E/N . Втрати потужності розряду на не пружні процеси для аргону стають помітними для $E/N > 30$ Тд, і їх значення для збудження не перевищують 10 % при значенні параметру $E/N=100$ Тд. Низькі втрати потужності розряду на процеси не пружного зіткнення електронів з атомами аргону в порівнянні з втратами на процеси не пружного зіткнення електронів з молекулами дийодиду ртуті пов'язані з нижчими абсолютними значеннями ефективних перерізів цих процесів і великими значеннями енергій і їх порогів.

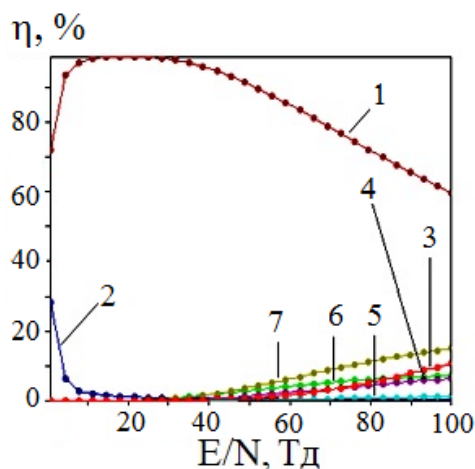


Рис. 3. Залежність питомих втрат потужності розряду на основні електронні процеси від параметру E/N для суміші $\text{HgI}_2 : \text{Ar} = (0.09 : 0.91)$ при загальному тиску 110.6 кПа: 1 – дисоціативне збудження $V^2\Sigma_{1/2}^+$ – стану молекул моноіодиду ртуті, 2 – пружне розсіювання електронів на атомах аргону, 3 – іонізація атомів аргону електронами з порогом 15.70 eV, 4 – збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 11.62 eV, 5 – збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 12.91 eV, 6 – іонізація дийодиду ртуті електронами, 7 – збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 11.27 eV.

На рис. 4 представлені результати чисельного розрахунку констант швидкостей процесів зіткнень електронів з компонентами суміші, які являються кількісною мірою ефективності цих процесів[16]. Ефективність цих процесів для молекул дийодиду ртуті вищі. Значення констант швидкостей (k) для них знаходяться в діапазоні $1 \cdot 10^{-16} - 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ при зміні параметру E/N від 15 до 100 Тд. Константи швидкостей зіткнень електронів для атомів

аргону знаходяться в діапазоні $1 \cdot 10^{-24} - 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ при зміні параметру E/N від 15 до 100 Тд.

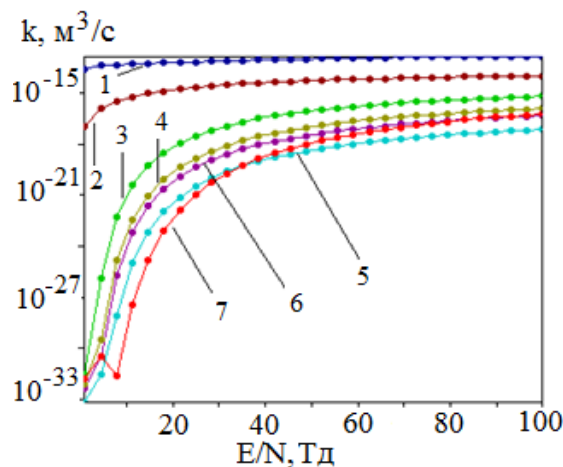


Рис. 4. Константи швидкостей зіткнень електронів з компонентами суміші в газорозрядній плазмі на суміші $\text{HgI}_2 : \text{Ar} = (0.09 : 0.91)$ від параметру E/N при загальному тиску 110.6 кПа: 1 – пружне розсіювання електронів на атомах аргону, 2- збудження ексиплексної молекули моноіодиду ртуті, 3 – іонізація дийодиду ртуті електронами, 4–збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 11.27 eV, 5–збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 12.91 eV, 6 –збудження енергетичного рівня атому аргону електронами з порогом 11.62 eV, 7 – іонізація атомів аргону електронами з порогом 15.70 eV.

Висновки

Таким чином в результаті проведення досліджень з чисельного моделювання параметрів газорозрядної плазми на суміші парів дийодиду ртуті та аргону було виявлено, що середня енергія електронів збільшується від 1.9 до 2.9 eV в діапазоні параметру $E/N = 1 - 9$ Тд, а в діапазоні параметру $E/N = 9 - 100$ Тд середня енергія електронів також збільшується, але з меншою швидкістю і досягає значення 5.8 eV. Встановлено, що питомі втрати потужності максимальні для збудження $V^2\Sigma_{1/2}^+$ – стану дийодиду ртуті в суміші з аргонном і складають значення 99 % для значення приведеної напруженості електричного поля рівного 15 Тд. Визначена ефективність збудження $V^2\Sigma_{1/2}^+$ – стану молекул ексиплексних молекул моно йодиду ртуті, що складає значення $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ для парамет-

ра $E/N = 15$ Тд, в той же час ефективність збудження енергетичних рівнів аргону нижча і знаходиться в діапазоні значень $1 \cdot 10^{24} - 1.6 \cdot 10^{17}$ м³/с при зміні параметру E/N від 15 до 100 Тд.

На основі встановлених даних з параметрів газорозрядної плазми на суміші

парів дийодиду ртуті та аргону у випадку застосування її в якості робочого середовища для експлексної лампи фіолетово-синього спектрального діапазону для найбільш ефективного її випромінювання необхідно забезпечити значення приведеної напруженості електричного поля 15 Тд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Burnham R. Discharge pumped mercuric halide dissociation lasers // *Appl. Phys. Lett.* – 1978. – V. 33. – No 2. – P. 152-156.
2. Gavrilova Yu.E., Zrodnikov V.S., Klenentov A.D. and Podsosonnyi, A.S., Excimer HgJ* Laser Excited by an Electric Discharge // *Quant. Electron.* – 1980. – No. 7. – P. 2495-2497.
3. Konoplev A.N., Kelman V.A. and Shevera V.S. Investigation into Pulse Discharge Emission in ZnI₂, CdI₂ and HgI₂ Mixtures with Helium and Neon // *Journal of Applied Spectroscopy.* – 1983. – No. 39. – P. 315-317.
4. Malinin A.N. Excitation of Mercury Monohalides in the Plasma of Pulse-Periodic Discharge in Mixtures of Mercury Dihalides and Rare Gases // *Laser Physics.* – 1997. – V.7. – No 5. – P. 1032-1040.
5. Malinin A.N., Polyak A.V., Guivan N.N., Zubrilin N.G. and Shimon L.L. Coaxial HgI excimer lamps // *Quantum Electronics.* – 2002. – V. 32. – No. 2. – P. 155-159.
6. Malinina A. Diagnostics of Optical Characteristics and Parameters of Gas-Discharge Plasma Based on Mercury Diiodide and Helium Mixture // *Open Journal of Applied Science.* – 2015. – No 5. – P. 826-832.
7. Malinina A.A., Malinin A.N. Optical Characteristics of a Gas Discharge Plasma Based on a Mixture of Mercury Diiodide Vapor, Nitrogen, and Helium // *Journal of Applied Spectroscopy.* – 2016. – V. 83. – No. 4. – P. 592-597.
8. Kogelschatz U. Fundamentals and Applications of Dielectric-barrier Discharges. ABB Corporate Research Ltd, 5405 Dfden, Switzerland, 2000. – P. 1-7.
9. Hagelaar J.M. and Pitchford L.C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2005. – V. 14. – P. 722-733.
10. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
11. Malinina A.A., Malinin A.N. Spectral Characteristics of High Frequency Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge based on Mercury Diiodide Vapor with Neon Mixture // *Journal of Applied Spectroscopy.* – 2017 (to be published).
12. Kushawaha V., Mahmood M. Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I) // *J. Appl. Phys.* – 1987. – V. 62. – No 6. – P. 2173-2177.
13. Malinin A.N. Excitation of the π - state of mercury monohalides by electron impact // *Laser Physics.* – 1997. – V.7. – No 6. – P. 1168-1176.
14. Raizer Yu. P. *Gas Discharge Physics.* – Nauka: Moscow, 1991. – 592 p.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2017

А.А. Малинина

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

e-mail: ant.malinina2018@gmail.com

ЧИСЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СМЕСИ ПАРОВ ДИЙОДИДА РТУТИ И АРГОНА

Численным моделированием определены функции распределения и средние энергии электронов, удельные потери мощности разряда на электронные процессы, а также константы скоростей процессов упругого и не упругого рассеяния электронов на компонентах рабочей смеси в зависимости от величины приведенной напряженности электрического поля в газоразрядной плазме на смеси паров дийодида ртути и аргона. Установлено значение приведенной напряженности электрического поля при котором удельная мощность разряда достигает максимального значения при возбуждении эксиплексных молекул моноидида ртути.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, излучение эксиплексных молекул, видимый спектральный диапазон.

PACS 52.20.-j

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.120-125

A.A. Malinina

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

e-mail: ant.malinina2018@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF THE BASIC PARAMETERS OF A DISCHARGE PLASMA BASED ON A MIXTURE OF MERCURY DIIODIDE VAPOR AND ARGON

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 argon.

Methods: 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, specific power losses of electrical discharge and rate constants of elastic and inelastic scattering of electrons on mercury diiodide and argon atoms as a function of the reduced electric field were identified.

Results: Established: electron energy distribution functions, mean electron energies, 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 argon mixture portion of discharge power, that is spent on the process of mercury monoiodide molecules excitation reached a maximum of 99% at the value of the parameter E/N equal to 15 Td for $B^2\Sigma^+_{1/2}$ electronic state. The rate constant of $B^2\Sigma^+_{1/2}$ – state excitation is equal to $1 \cdot 10^{-24} - 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3/\text{c}$ for the reduced electric field $E/N = 15 - 100 \text{ Td}$.

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 exciplex lamp based on a mixture of the mercury diiodide vapours and argon by means of the reduction of the parameter E/N to the value of 15 Td.

Keywords: gas discharge plasma, radiation of exciplex molecules, plasma parameters, mercuric diiodide, argon.

PACS NUMBER: 52.20.-j

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 Podsonny, A.S. (1980), “Excimer HgJ* Laser Excited by an Electric Discharge”, *Quant. Electron.*, 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*, 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, L.L. (2002), “Coaxial HgI excimer lamps”, *Quantum Electronics*, V. 32, No. 2, pp.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*, V. 83, No. 4, pp. 592-597.
8. Kogelschatz, U. (2000), *Fundamentals and Applications of Dielectric-barrier Discharges*, ABB Corporate Research Ltd, 5405 Dfden, Switzerland, pp. 1-7.
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. 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* (to be published).
12. Kushawaha, V., Mahmood, M. (1987), “Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I)”, *J. Appl. Phys.*, V.62, No 6, pp. 2173-2177.
13. Malinin, A.N. (1997), “Excitation of the - state of mercury monohalides by electron impact”, *Laser Physics*, V.7, No 6, pp. 1168-1176.
14. Raizer, Yu. P. (1991), *Gas Discharge Physics*, Nauka, Moscow, 592 p.