

УДК 621.373.826.038.823

PACS 52.80.Yr

DOI: <https://doi.org/10.24144/2415-8038.2016.39.113-119>

А.О. Малініна, О.М. Малінін

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

e-mail: ant.malinina@yandex.ua

ПАРАМЕТРИ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ПЛАЗМИ БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ ПАРІВ ДИЙОДИДУ РТУТІ, АЗОТУ ТА ГЕЛІЮ

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 розсіювання електронів на компонентах робочої суміші і їх залежності від величини приведеної напруженості електричного поля в газорозрядній плазмі на сумішах парів дийодиду ртуті, азоту та гелію.

Ключові слова: газорозрядна плазма, випромінювання експлексних молекул, видимий спектральний діапазон, параметри плазми, дийодід ртуті.

Вступ

Газорозрядна плазма на суміші парів дийодиду ртуті з газами є робочим середовищем джерел когерентного і спонтанного випромінювання в фіолетово-синій - спектральній області з довжиною хвилі в максимумі інтенсивності ($\lambda=444$ нм) [1-5].

В наших дослідженнях було встановлено, що в плазмі бар'єрного розряду на суміші парів дийодиду ртуті з гелієм та азотом відбувається утворення експлексних молекул монодиду ртуті [6,7]. Емісія цих молекул відбувається в фіолетово - синьому спектральному діапазоні ($\lambda_{\text{макс.}}=444$ нм). Потужність випромінювання в суміші парів дийодиду ртуті з гелієм при цьому була в 2 рази більшою порівняно з потужністю при застосуванні добавки азоту до суміші. Було зроблено припущення, що підвищення потужності випромінювання в розряді на суміші парів дийодиду ртуті з гелієм порівняно із сумішшю парів дийодиду ртуті, гелію та азоту викликано зміною параметрів плазми. Ця обставина була мотивацією для визначення параметрів плазми на сумішах парів

дийодиду ртуті, гелію та азоту в умовах нашого експерименту, що представлено у статті [7].

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 розсіювання електронів на компонентах робочої суміші залежно від величини приведеного 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 [8]. ФРЕЕ визначалася шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана в двочленному наближенні з використанням відомої програми "Bolsig+" [9]. 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, азоту та атомів гелію 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 0.1 кПа, азоту 1 кПа та гелію 170 кПа, при яких досягалася максимальна величина яскравості випромінювання в експерименті [7].

В інтегралі зіткнень електронів з атомами гелію, молекулами азоту і дийодиду ртуті враховані такі процеси: пружне розсіювання, збудження енергетичних рівнів атома He (2^3S , 2^1S , 2^3P , 2^1P , $3SPD$, $4SPD$, $5SPD$), іонізація атома гелію; пружне розсіювання і збудження енергетичних рівнів молекул азоту: коливальних $v1-v8$, нижніх електронних $A^3\Sigma_u^+$, $v=0-4$, $v=5-9$, $v=10$, $B^3\Pi_g$, $B^3\Sigma_g^-$, $A^1\Sigma_u^-$, $A^1\Pi_g$, $W^1\Delta_u$, $C^3\Pi_u$, $E^3\Sigma_g^+$, A^1 (поріг 12.25 eV), сума синглетних станів вище порога 13 eV, іонізація молекули азоту і дийодиду ртуті, дисоціативне збудження електронного $B^2\Sigma_{1/2}^+$ - стану монойодиду ртуті. Дані за абсолютними величинами ефективних перерізів цих процесів, а також їх залежностей від енергій електронів взяті з робіт [9-11].

Концентрація електронів (N_e) розраховувалася за відомою формулою [12]:

$$N_e = j/e \cdot V_{др.},$$

де j -щільність струму в розряді, e -заряд електрона, $V_{др.}$ - дрейфова швидкість електронів.

Швидкість дрейфу електронів визначалася із виразу [12]:

$$V_{др.} = \mu_e \cdot E,$$

де μ_e - рухливість електронів, E -напруженість електричного поля на плазмі.

Напруженість електричного поля на плазмі E розраховувалася за формулою:

$$E = U_{пл.}/d,$$

де $U_{пл.}$ - напруга на плазмі, d -розрядний проміжок.

Напруга на плазмі визначалася за другим правилом Кірхгофа з використанням експериментально вимірюваних величин часового руху напруги, яка прикладена до електродів газорозрядної кювети U , а також падіння напруги на ємності діелектрика $U_{дл.}$ [13]:

$$U_{пл.} = U - U_{дл.},$$

Напруга $U_{дл.}$ обчислювалася за переміщенням заряду Q і ємності діелектричного бар'єра C_d :

$$U_{дл.} = Q/C_d.$$

Переміщений у колі заряд визначався інтегруванням струму з урахуванням початкових умов:

$$Q(t) = \int_0^t I(t)dt + Q_0,$$

$$\text{де } Q_0 = Q(t=0)$$

Результати моделювання та їх обговорення

На рис.1 наведено характерний вид ФРЕЕ при зміні параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд для суміші HgJ₂- He. 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 $E/N = 1 - 18$ Тд.

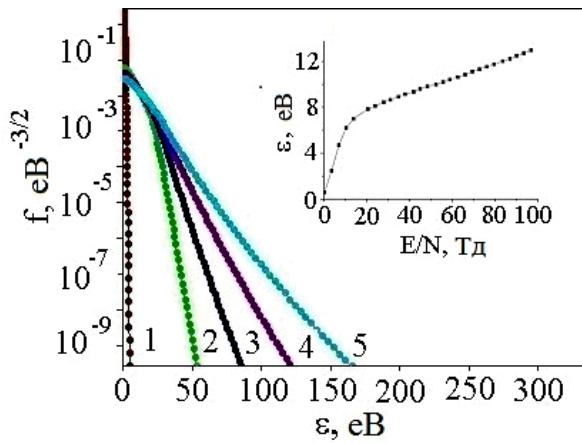


Рис. 1. Функції розподілу електронів за енергіями в розряді на суміші HgJ₂-He для значень параметра E/N: 1 (1), 25.8 (2), 50.5 (3), 75.3 (4), 100 (5) Тд; на вставці - залежність середньої енергії електронів від параметра E/N

при цьому вона лінійно збільшується від 0.6 до 7.5 eV. В діапазоні параметра E/N = 18 - 100 Тд середня енергія електронів також збільшується від 7.5 до 13.25 eV, але з меншою швидкістю.

В суміші HgJ₂-N₂-He середня енергія електронів розряду має подібні закономірності. Вона найбільш сильно залежить від параметра E/N = 1 - 18 Тд, при цьому вона лінійно збільшується від 0.6 до 6.2 eV. В діапазоні параметра E/N = 18 - 100 Тд середня енергія електронів також збільшується від 6.2 до 12.8 eV, але з меншою швидкістю.

Результати чисельного розрахунку середніх енергій електронів дозволяють визначити їх температуру в газорозрядній плазмі випромінювача з відомої формули [26]:

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

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

Вона збільшується від 6960 К до 153700 К при зміні параметра E/N від 1 до 100 Тд відповідно для суміші дийодиду ртуті і гелію і збільшується від 6960 К до 148 480 К при зміні параметра E/N від 1 до 100 Тд відповідно для суміші дийодиду ртуті, азоту і гелію.

Рухливість електронів, як впливає з даних чисельного розрахунку для обох

сумішей, змінюється в межах $4.9 \cdot 10^{24} \cdot N - 2.4 \cdot 10^{24} \cdot N$ (1/м/В/с) при зміні параметра E/N в діапазоні 1-100 Тд, що дає значення швидкості дрейфу електронів $2.9 \cdot 10^6$ м/с та $1.4 \cdot 10^6$ м/с відповідно для напруженості поля на плазмі $17.2 \cdot 10^6$ В/м і значення концентрації електронів $2.2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3} - 4.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ при щільності струму $100 \cdot 10^4$ А/м² на поверхні внутрішнього електрода джерела випромінювання ($2.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

Для процесу дисоціативного збудження молекул моноїодиду ртуті (стан $V^2\Sigma^+_{1/2}$) питомі втрати потужності розряду в суміші HgJ₂- He збільшуються із зростанням параметра E/N, досягають максимуму 12%, для E/N = 9, і при подальшому підвищенні параметра E/N зменшуються (рис.2).

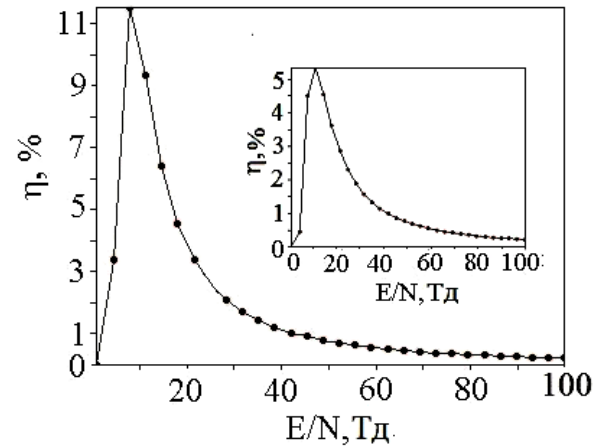


Рис.2. Залежність питомих втрат потужності розряду на дисоціативне збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ -стану молекул моноїодиду ртуті в суміші HgJ₂ - He. На вставці залежність питомих втрат потужності розряду на дисоціативне збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ -стану молекул моноїодиду ртуті електронами від параметра E/N в суміші HgJ₂ - N₂ - He. Загальний тиск суміші P = 171,1 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].

В суміші $\text{HgJ}_2\text{-N}_2\text{-He}$ (рис.2, вставка) питомі втрати потужності розряду для процесу дисоціативного збудження молекул моноїодиду ртуті (стан $V^2\Sigma^+_{1/2}$) збільшуються із зростанням параметра E/N , досягають максимуму 5.5%, для $E/N = 12$ Тд, і при подальшому підвищенні параметра E/N зменшуються в закономірності подібній для суміші дийодиду і гелію і досягає значення 0.25% для параметра $E/N = 100$ Тд.

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

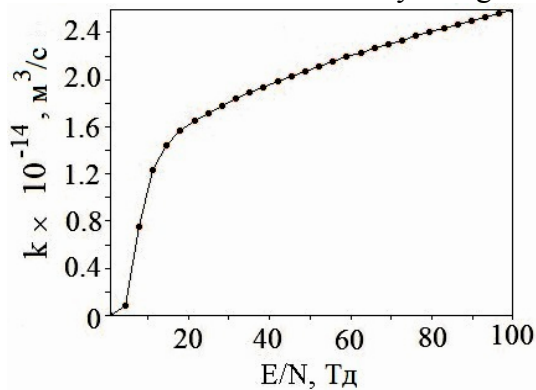


Рис.3. Залежність константи швидкості дисоціативного збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ -стану молекул моноїодиду ртуті електронами від параметра E/N в суміші $\text{HgJ}_2\text{-He}$. Загальний тиск суміші $P = 170.1$ кПа.

Константа швидкості характеризується високим значенням $k \approx 10^{-14}\text{-}10^{-15}$ м³/с, що пов'язано з високими значеннями абсолютних ефективних перерізів відповідного процесу. В області значень параметра $E/N = 25\text{-}75$ Тд, в якій працює джерело випромінювання, для суміші парів дийодиду ртуті і гелію константа швидкості збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ - стану молекули моноїодиду ртуті має значення $(1.6\text{-}2.4) \cdot 10^{-14}$ м³/с, а для суміші парів дийодиду ртуті, азоту і гелію константа швидкості збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ - стану молекули моноїодиду ртуті знаходиться в області значень $(1.4\text{-}2.3) \cdot 10^{-14}$ м³/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. Для суміші парів дийодиду ртуті, гелію та азоту максимальні значення концентрації електронів змінюється в межах $2.2 \cdot 10^{18}$ м⁻³ – $4.5 \cdot 10^{18}$ м⁻³ при зміні величини параметра E/N від 1 Тд до 100 Тд. Температура електронів збільшувалася від 6960 К до 148480 К. Частка потужності розряду, що йде на процес збудження електронами молекул моноїодиду ртуті досягала максимуму 5.5% при значенні параметра E/N рівному 12 Тд для електронного стану $V^2\Sigma^+_{1/2}$. Константа швидкості збудження $V^2\Sigma^+_{1/2}$ стану складає значення $(1.4\text{-}2.3) \cdot 10^{-14}$ м³/с для приведенного електричного поля $E/N = 25\text{-}75$ Тд, при якому в умовах експерименту спостерігалася максимальна потужність випромінювання в фіолетово-синьій спектральній області ($\lambda_{\text{макс.}} = 444$ нм).

Для суміші парів дийодиду ртуті і гелію середні енергії електронів, частки потужності розряду на процеси збудження електронами ексиплексних молекул моноїодиду ртуті, константа швидкості процесу, що призводить до утворення молекул моноїодиду ртуті є вищими, тому потужність випромінювання ексиплексних молекул моноїодиду ртуті в сумішах парів дийодиду ртуті з гелієм, що була виміряна в експериментальних дослідженнях [6], є більшою (у два рази), ніж у суміші парів дийодиду ртуті, гелію з азотом.

Газорозрядне джерело випромінювання фіолетово - синього спектрального діапазону, робочим середовищем якого є плазма бар'єрного розряду на сумішах парів дийодиду ртуті, азоту і гелію, може бути застосовано в наукових дослідженнях в галузі біотехнології, фотоніки, медицини, а також для створення індикаторних газорозрядних панелей.

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 HgI* 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. 32 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, Vol. No. 836, pp.592-597.
8. 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.
9. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
10. Kushawaha, V., Mahmood, M. (1987), "Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I)", J. Appl. Phys., V.62, No 6, pp. 2173-2177.
11. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of the - state of mercury monohalides by electron impact", Laser Physics, V.7, No 6, pp.1168-1176.
12. Raizer Yu. P. (1991), Gas Discharge Physics (Moscow: Nauka).
13. 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 30.06.2016

А.А. Малинина, А. Н. Малинин

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

ПАРАМЕТРЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСИ ПАРОВ ДИЙОДИДА РТУТИ, АЗОТА И ГЕЛИЯ

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 дийодида ртути, азота и гелия.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, излучение эксиплексных молекул, видимый спектральный диапазон, параметры плазмы, дийодид

PACS 52.80.Yr

A.A. Malinina, A.N. Malinin

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

PARAMETERS OF BARRIER DISCHARGE PLASMA BASED ON MERCURY DIODIDE VAPOR, NITROGEN AND HELIUM MIXTURE

Introduction: In our previous studies have been found that in barrier discharge plasma based on mercury diiodide vapor with helium and nitrogen 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 was two times higher than in a mixture with the addition of nitrogen). It has been suggested that the reason of radiation power decrease was due to changing parameters of gas- discharge plasma at the addition to the mixture of nitrogen.

Purpose: The aim of research was to determine the plasma parameters in mixtures as mercury diiodide vapor with helium as well as nitrogen addition 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, helium and nitrogen mixture maximum values of the electron density vary from $2.2 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ to $4.5 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ by changing the value of the parameter E/N from 1 Td to 100 Td. Electron temperature increased from 6960 K to 148,480 K. Portion of discharge power, that is spent on the process of mercury monoiodide molecules excitation reached a maximum of 5.5% at the value of the parameter E/N equal to 12 Td for $B^2\Sigma_{1/2}^+$ electronic state. The rate constant of $B^2\Sigma_{1/2}^+$ –state excitation is equal to $(1.4-2.3) \cdot 10^{-14} \text{ m}^3/\text{c}$ for the reduced electric field $E/N = 25-75$ Td, at which in experimental conditions maximum radiated power in violet - blue spectral region ($\lambda_{\max} = 444$ nm) was observed. For the mixture without nitrogen was significant difference in the portion of discharge power that is spent on the process of excitation of mercury monoiodide molecules by electrons. It reached a maximum of 12% at the value of the parameter E / N equal to 9 Td.

Conclusion: For a mixture of mercury diiodide vapor and helium mean electron energies, portions of discharge power on processes of mercury monoiodide exciplex molecules excitation by electrons, rate constant of the process that leads to the formation of mercury monoiodide molecules are higher because the radiation power of mercury monoiodide exciplex molecules in the mixtures of mercury diiodide vapor with helium, which was measured in experimental studies is higher (twice) than in mercury diiodide vapor , helium and nitrogen mixture.

Gas- discharge radiation source of violet-blue spectral range, the working medium of which is barrier discharge plasma based on mercury diiodide vapor, nitrogen and helium mixture can be used in scientific researches in biotechnology, photonics, medicine, as well as for discharge indicator panels creation.

Keywords: gas-discharge plasma, radiation of exciplex molecules, visible spectral range, plasma parameters, diiodide.

PACS NUMBER: 52.80.Yr

REFERENCE

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. 836, pp.592-597.
8. 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.
9. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
10. Kushawaha, V., Mahmood, M. (1987), "Electron impact dissociation of HgX₂ (X=Cl, Br, I)", J. Appl. Phys., V.62, No 6, pp. 2173-2177.
11. Malinin, A.N. (1997), "Excitation of the - state of mercury monohalides by electron impact", Laser Physics, V.7, No 6, pp.1168-1176.
12. Raizer Yu. P. (1991), Gas Discharge Physics (Moscow: Nauka).
13. Ломаев, М.И. (2001), "Определение энерговвода в эксилампах с возбуждением барьерным разрядом", Оптика атмосферы и океана, Т. 14, № 11, сс. 1091-1095.

© Ужгородський національний університет