

УДК 537.52:621.327

PACS 52-25, 52. 80 Yr

DOI 10.24144/2415-8038.2018.43.89-95

А.О. Малініна, О.М. Малінін, О.К. Шуаїбов, В.В. Данило

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

e-mail: antonina.malinina@uzhnu.edu.ua, alex.malinin@uzhnu.edu.ua,

alexsander.shuaibov@uzhnu.edu.ua, bandzigel@gmail.com

## ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ СИЛЬНОСТРУМОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ З МАЛИМИ ДОМІШКАМИ ПАРІВ МІДІ

Наведено емісійні характеристики наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску з малими домішками парів міді. Віддаль між електродами рівна  $d = 10^{-3}$  м. Встановлено, що плазма такого розряду є селективним «точковим» випромінювачем на переходах однозарядного іона міді у спектральному інтервалі 200-250 нм. Представлено результати моделювання плазми повітря з малими домішками парів міді, зокрема: рухливості та середньої енергії електронів, густини електронів, питомих втрат потужності розряду на основні електронні процеси та констант швидкості електронних процесів в залежності від величини відношення  $E/N$  (де:  $E$  – напруженість електричного поля,  $N$  – концентрація повітря і парів міді).

**Ключові слова:** наносекундний розряд, мідь, повітря, спектр випромінювання, ультрафіолет, температура і густина електронів, питомі втрати потужності розряду, константи швидкості електронних процесів.

### Вступ

Для деяких застосувань в спектроскопії використовують «точкові» лампи досить інтенсивного ультрафіолетового (УФ)– випромінювання, в яких об'єм плазми розряду не переважає 3-5 мм<sup>3</sup>. Такі лампи складно виготовити, якщо джерелом збудження плазми служить бар'єрний чи емісійний розряди [1, 2]. Тому вони розробляються на основі перенапружених розрядів наносекундної або субнаносекундної тривалості на парах металів [3,4]. Пари металів у плазму вносять за рахунок мікровибухів вістрь, кромок фольги або природних неоднорідностей на робочих поверхнях металевих електродів в сильному електричному полі (тобто при умовах формування ектонів) [5]. Застосування такого типу розряду в повітрі атмосферного тиску відкриває можливість розробки безвіконних УФ-ламп [6], які перспективні до застосувань при значних механічних переваженнях в різних естремальних умовах, оскільки вони не містять ніяких кварцових елементів

(віконець або колб) і можуть працювати на повітрі атмосферного тиску. Вихідні характеристики таких «точкових» ламп сильно залежать від параметрів плазми наносекундного розряду з малими домішками парів металів, з яких виготовлено електроди. На даний час дані про параметри плазми повітря з малими домішками парів міді, при умовах роботи «точкової» лампи, відсутні, що стримує встановлення механізмів заселення збуджених рівнів атомів та іонів міді в такій плазмі. Це, в свою чергу, не дозволяє проводити дальнішу оптимізацію вихідних характеристик «точкових» джерел УФ-випромінювання.

В статті наведено емісійні характеристики в спектральному діапазоні 200-250 нм плазми наносекундного розряду між електродами з міді в повітрі атмосферного тиску при умовах сильного перенапруження розрядного проміжку та результати числового моделювання параметрів плазми повітря з малими домішками міді при умовах, близьких до реалізованих в експерименті.

### 1. Умови експерименту та емісійні характеристики плазми

Система мідних електродів, між якими запалювався наносекундний розряд в повітрі атмосферного тиску, була встановлена в відкриту розрядну комірку, виготовлену з діелектрика. Конструкція комірки і параметри електродів наведені в праці [7]. Віддаль між мідними електродами складала 1 мм, що приводило до запалювання в повітрі атмосферного тиску «точкового» дифузного розряду кулястої форми діаметром 1 мм.

Система живлення розряду та реєстрації його характеристик описана в статтях [7,8]. Частота слідування імпульсів напруги складала 40 Гц. Тривалість основної частини цугу імпульсів напруги досягала 50-100 нс. Біполярні пічки імпульсу напруги мали амплітуду позитивної та негативної складових до 30-40 кВ. Імпульси струму наносекундного розряду представляли собою послідовність біполярних імпульсів струму з амплітудою позитивних і негативних імпульсів 100-250 А. Величина імпульсної потужності розряду не переважала 4 МВт, а енергетичний внесок в плазму досягав 0,1 Дж.

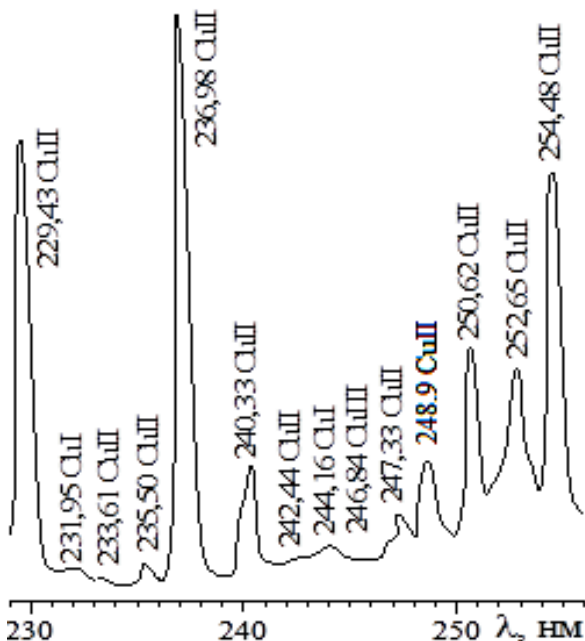


Рис.1. Ділянка спектру випромінювання в діапазоні довжин хвиль 230-260 нм плазми перенапруженого наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску між електродами з міді.

випромінювання плазми припадає на УФ діапазон довжин хвиль 200-390 нм. В спектрі випромінювання розряду найбільш інтенсивною була група спектральних ліній в інтервалі 200-230 нм, більшість з яких належить однозарядним іонам міді [7]. Емісійні характеристики плазми в спектральному інтервалі 230-250 нм приведені на рис.1. В цьому спектрі присутні спектральні лінії однозарядного іона міді, які перспективні для оцінок середньої температури плазми: 248.9 і 254.4 нм Cu II [9]. Енергії верхніх рівнів для цих спектральних переходів рівні, відповідно, 8.23 і 13.38 еВ. Вони досить сильно відрізняються між собою, що важливо для коректної оцінки середньої температури електронів.

### 2. Параметри плазми

Пари міді вносились в плазму за рахунок ерозії електродів (в формі мікробухів неоднорідностей на їх робочих поверхнях). Як і в праці [9], де досліджувалась плазма повітря атмосферного тиску з домішками парів мідного електроду і де парціальний тиск пари міді оцінювався на рівні десятих частин відсотка, для наших оцінок було вибрано парціальний тиск парів міді на рівні 3 торр.

В умовах даних експериментів максимальна величина параметра  $E/P$  досягала близько  $530 \text{ В см}^{-1}\text{торр}^{-1}$ , що менше критичної величини  $E/P$  для азоту згідно локальному критерію втечі електронів –  $590 \text{ В см}^{-1}\text{торр}^{-1}$  [10]. Тому для моделювання параметрів плазми повітря атмосферного тиску з малими домішками парів міді нами була вибрана стандартна програма розв'язку кінетичного рівняння Больцмана для функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) [11].

На основі отриманих ФРЕЕ були визначені середня енергія електронів, рухливість електронів, питомі втрати потужності електричного розряду і константи швидкостей пружного і непружного розсіювання електронів на атомах міді, аргону і молекулах вуглекислого газу, кисню та азоту,

Більше як 90 відсотків потужності

співвідношення, яких становило 3: 7.098: 0.266: 159.157 : 593.438 в залежності від величини приведенного електричного поля  $E / N = 1-1300$  Тд ( $1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15}$  В · см<sup>2</sup>) і включав величини параметра  $E / N$ , які були реалізовані в експерименті (610-810) Тд.

Середня енергія електронів розряду майже лінійно збільшується від 0.19 еВ до 28.54 еВ при зростанні параметра  $E/N$  від 1 Тд до 1300 Тд. Для діапазону приведенної напруженості електричного поля 610 Тд - 810 Тд середні енергії електронів змінювалися в діапазоні 12.2-15.6 еВ. Температура електронів збільшувалась від 141 520 К до 180 960 К при зростанні параметра  $E / N$  від 610 Тд до 810 Тд, відповідно. Добуток рухливості електронів на загальну концентрацію атомів і молекул газової суміші змінювалось в межах  $0.7331 \cdot 10^{24} \cdot N - 0.6777 \cdot 10^{24} \cdot N$  (1 / м / В / с) при зміні параметра  $E / N$  в діапазоні 610 Тд - 810 Тд, що дає значення швидкості дрейфу електронів  $4.47 \cdot 10^5$  м / с і  $5.51 \cdot 10^5$  м / с, відповідно, для напруженості поля на плазмі  $15.0 \cdot 10^6$  В / м і  $20.0 \cdot 10^6$  В / м, значення концентрації електронів становило  $(10.7 \cdot 10^{21} - 8.7 \cdot 10^{21})$  м<sup>-3</sup> при щільності струму  $765 \cdot 10^6$  А / м<sup>2</sup> на поверхні електрода джерела випромінювання ( $0.196 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>). Результати чисельного моделювання залежності констант швидкостей зіткнень електронів з атомами міді представлені на рис.2.

В діапазоні наведеної напруженості електричного поля 610 Тд - 810 Тд константи швидкості збудження електронних станів молекули азоту знаходились в межах ( $5.4 \cdot 10^{-17} - 0.81 \cdot 10^{-14}$ ) м<sup>3</sup>/с. Максимальне значення константи швидкості ( $1.4 \cdot 10^{-14}$ ) м<sup>3</sup>/с спостерігалось для збудження суми синглет-синглетних станів молекули азоту з енергією порогу 13 еВ для приведенної напруженості електричного поля 810 Тд.

Питомі втрати потужності розряду в суміші на непружні процеси зіткнення електронів з компонентами суміші максимальні для молекули азоту (рис.3) і досягали 32 % для збудження суми синглетних станів молекули азоту при

наведеної напруженості електричного поля 810 Тд (крива 2, рис.3), а для атомів міді вони досягали максимальної величини 10 % для збудження резонансного стану  $^2P_{3/2}$ ,  $^1/2$  при  $E/N=135$  Тд.

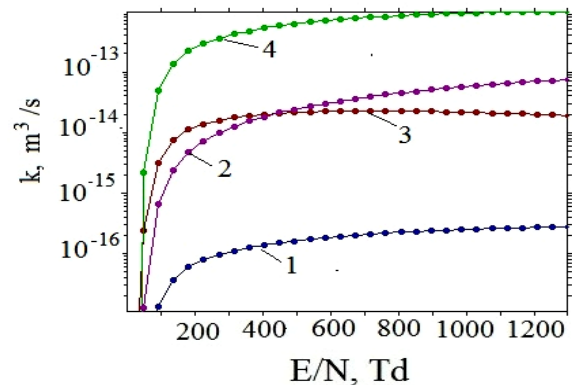


Рис.2. Залежності констант швидкостей зіткнень електронів з атомами міді від параметра  $E / N$  в плазмі на суміші парів міді і повітря: 3: 760 мм.рт.ст. при загальному тиску суміші  $P = 763$ : 1 - збудження стану атома міді  $^4F_{7/2,2}$  - іонізація атомів міді, 3 - збудження метастабільного стану атома міді ( $^2D_{5/2}$ ), 4 - збудження резонансного стану атома міді ( $^2P_{3/2}$ ).

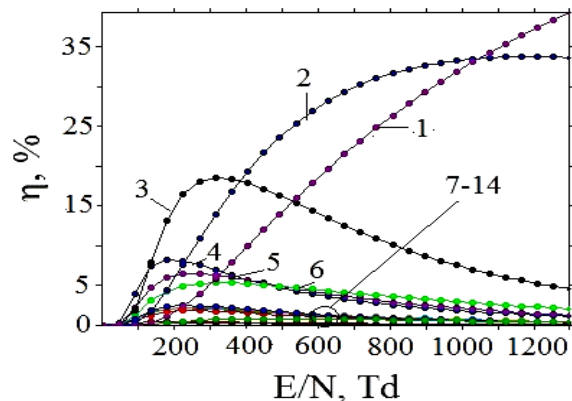


Рис.3. Залежності питомих втрат потужності розряду на процеси зіткнень електронів з молекулою азоту від величини параметра  $E / N$  в плазмі на суміші Cu: повітря = 3: 760 при загальному тиску  $P = 763$  мм рт. ст.: 1- іонізація молекул  $N_2$  електронами, збудження  $E^3$ -рівня, 2- збудження суми синглетних станів молекули азоту, 3- збудження  $S^3$ -стану, 4- збудження  $V^3$ -стану, 5- збудження  $W^3$ -стану, 6- збудження  $A^3, v=5-9$ -стану, 7-14 - збудження:  $A^3, v=0-4, V^3, a^{n1}, a^{l1}, a^1, w^1$ -станів.

Для наведеної напруженості електричного поля 610 Тд вони складали 3.8 %, а для наведеної напруженості поля 810 Тд вони були рівними 2.9 %. При зростанні параметра  $E/N$  до величини 1300 Тд питомі втрати потужності розряду в суміші

досягали максимуму 39% для процесу іонізації молекул азоту електронами. Швидкість зростання та спаду втрат потужності розряду на процеси збудження електронних станів та іонізацію і його величина пов'язані з характером залежності ефективних перерізів непружних процесів зіткнень електронів з компонентами суміші від енергії електронів, їх абсолютних величин, та із залежністю ФРЕЕ від значень параметра  $E/N$  і величини порогової енергії процесу.

### Висновки

Аналіз емісійних характеристик сильноточкового наносекундного розряду в повітрі атмосферного тиску з малими домішками парів міді показав, що при імпульсній потужності розряду (2- 4) МВт, і енергетичному внеску в плазму на рівні  $\sim 0,1$  Дж, що випромінювання плазми зосереджено у вузькому спектральному інтервалі діапазоні 200-250 нм і є перспективним для застосування в якості «точкової» УФ-лампи; спектральні лінії 248.9 і 254.4 нм Cu II перспективні для оцінок температури електронів в плазмі.

Чисельне моделювання параметрів

плазми встановило, що для діапазону наведеної напруженості електричного поля 610 Тд - 810 Тд, при якому проводились експериментальні дослідження характеристик «точкового» наносекундного розряду середні енергії електронів змінювалися в межах 12.2 -15.6 еВ; значення концентрації електронів становили  $10.7 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  –  $8.7 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  при щільності струму  $765 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  на поверхні мідного електрода. Константи швидкості збудження  $^2P_{3/2, 1/2}$ ,  $^2D_{3/2}$ ,  $^2D_{5/2}$ ,  $^4F_{7/2}$ , - станів атома міді та його іонізації знаходились в діапазоні  $(7.3 - 8.5) 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(0.29 - 0.28) 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(0.22 - 0.22) 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $(0.19 - 0.22) 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$  і  $(0.33 - 0.45) 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ , відповідно. Максимальна константи швидкості збудження для молекул азоту була для суми синглетних станів: вони становили  $(1.4 \cdot 10^{-14}) \text{ м}^3/\text{с}$  при напруженості електричного поля 810 Тд. Пігомів втрати потужності розряду в плазмі на непружні процеси зіткнення електронів з компонентами газової суміші були максимальними для молекул азоту і досягали величини 32% для збудження суми синглетних станів азоту.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shuaibov A.K., Minya A.Yo, Gomoki Z.T, Grizak R.V., Laslov G E., Shevera I.V. The Formation of Excited Molecules Chloride Argon, Chlorine and Hydroxy 1 Radicals in the Nanosecond Barrier Discharge // Journal of Electrical Engineering. - 2014, - V.2, - N 2, - P. 96-100.
2. Shuaibov A.K, Grizak R.V. Optical characteristics of UV-VUV lamps on the electronic-vibrational transition of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge // High. Volt. – 2017, - V.2, N2, -P.78-81.
3. Shuaibov A.K., Laslov GE., Kozak Ya. Yu. Emission Characteristics of the Cathode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air // Optics and Spectroscopy. – 2014,- V.116, -№.4, - P.552-556.
4. S.V., Zhdanova O.S., Pikulev A.A., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. New Direction in Scientific Research and Application of Excilams, STT, Publishing Tomsk, 2013. - 246 p. [in Russian].
5. Mesyats G.A. Ecton – Electron Avalanche from metal // Usp. Fizich. Nauk. – 1995, - V.165, -N 6, P. 601 - 626.
6. Шуайбов О.К., Миня О.Й., Гомоки З.Т., Данило В.В. *Безвіконна, точкова, ультрафіолетова лампа*. Україна патент на корисну модель. U 2016 04596. 10.11.2016. Бюлетень № 21.
7. Шуайбов А.К., Миня А.Й., Гомоки З.Т., Данило В.В., Пинзеник Р.В. Характеристики сильноточкового імпульсного розряду в повітрі з електронним механізмом інжекції паров міді в разрядний проміжок // Електронная обработка материалов. – 2018,- Т.54, -№ 1, - С.46 - 50.
8. Миня О.Й., Шуайбов О.К., Гомоки З.Т., Данило В.В., Чаварга М.М., Кукрі Л.Е.

- Оптичні характеристики наносекундного розряду на суміші повітря з парами цинку // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика.- 2016, Вип.39, - С.93-99.
9. Пасина А.С., Ефимов А.В., Чиннов В.Ф. Оптические исследования многокомпонентной плазмы капиллярного разряда. Сверхзвуковой режим истечения. // Теплофизика высоких температур. -2017, - Т.55, - № 5, - С.669-684.
10. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков // Успехи физических наук. – 2004, - Т.174, - № 9, - С.953-971.
11. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr>.

Стаття надійшла до редакції 30.04.2018.

А.О. Малинина, А.Н. Малинин, А.К. Шуайбов, В.В. Данило  
Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Украина,  
e-mail:antonina.malinina@uzhnu.edu.ua, alex.malinin@uzhnu.edu.ua,  
alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua, bandzigel@gmail.com

## ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОКОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ С МАЛЫМИ ПРИМЕСЯМИ ПАРОВ МЕДИ

Приведены эмиссионные характеристики наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления с малыми примесями паров меди. Расстояние между электродами равно  $d = 10^{-3}$  м. Установлено, что плазма такого разряда является селективным «точечным» излучателем на переходах однозарядного иона меди в спектральном интервале 200-250 нм. Представлены результаты моделирования плазмы воздуха с малыми примесями паров меди, в частности: подвижности и средней энергии электронов, плотности электронов, удельных потерь мощности разряда на основные электронные процессы и констант скорости электронных процессов в зависимости от величины отношения  $E / N$  (где:  $E$  - напряженность электрического поля,  $N$  - концентрация воздуха и паров меди).

**Ключевые слова:** наносекундный разряд, медь, воздух, спектр излучения, ультрафиолет, температура и плотность электронов, удельные потери мощности разряда, константы скорости электронных процессов

A.A. Malinina, A.N. Malinin, A.K.Shuaibov, V.V.Danylo  
Uzhgorod National University, Voloshin Str, 54, Uzhgorod, 88000,  
e-mail:antonina.malinina@uzhnu.edu.ua, alex.malinin@uzhnu.edu.ua,  
alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua, bandzigel@gmail.com

## PARAMETERS OF PLASMA OF HIGH-CURRENT NANOSECOND DISCHARGE IN AIR WITH SMALL ADMIXTURES OF COPPER VAPOR

**Introduction.** The use of a discharge in air of atmospheric pressure opens the possibility of developing windowless UV lamps that are promising for applications

with significant mechanical overloads under various extreme conditions, since they do not contain any quartz elements (windows or bulbs). The output characteristics of such "point" lamps strongly depend on the plasma parameters of the nanosecond discharge with small admixtures of the vapor metal from which the electrodes are made. At present, there are no data on the parameters of air plasma with small admixtures of copper vapor under the operating conditions of a "point" lamp, which inhibits the establishment of mechanisms for populating the excited levels of atoms and copper ions in such a plasma. This in turn inhibits the long-range optimization of the output characteristics of such "point" sources of UV radiation.

**Purpose.** The purpose of the study was to determine the emission characteristics in the spectral range of 200-250 nm of the plasma of high-current nanosecond discharge, between copper electrodes in air at atmospheric pressure under conditions of strong overstress of the discharge gap and to carry out a numerical simulation of the parameters of the plasma of air with small copper impurities under conditions close to those realized in the experiment.

**Methods.** The nanosecond discharge in air of atmospheric pressure between copper electrodes was ignited. The distance between the copper electrodes was 1 mm, which led to the ignition at atmospheric pressure air of a "point" diffuse discharge of a spherical shape with a diameter of 1 mm. The standard program was used to solve the Boltzmann kinetic equation for the electron energy distribution function (EEDF) for modeling air plasma atmospheric pressure parameters with small copper vapor admixtures, since under the experimental conditions the maximum value of the E/P parameter reached about  $530 \text{ V cm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ , which is less than the critical value of E/P for nitrogen according to the local electron runaway criterion –  $590 \text{ V cm}^{-1} \text{ torr}^{-1}$ .

**Results.** Numerical simulation of the plasma parameters established that for the range of reduced electric field strength 610 Td-810 Td, at which experimental studies of the characteristics of a "point" nanosecond discharge were carried out, mean electron energies varied within the range of 12.2 -15.6 eV; the value of the electron concentration was  $10.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} - 8.7 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$  at a current density of  $765 \cdot 10^6 \text{ A / m}^2$  on the surface of the copper electrode. The excitation constants of the  $^2\text{P}_{3/2, 1/2}$ ,  $^2\text{D}_{3/2}$ ,  $^2\text{D}_{5/2}$ ,  $^4\text{F}_{7/2}$ , - states of the copper atom and its ionization were in the range  $(7.3 - 8.5) \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$ ,  $(0.29 - 0.28) \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$ ,  $(0.22 - 0.22) \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$ ,  $(0.19 - 0.22) \cdot 10^{-15} \text{ m}^3/\text{c}$  and  $(0.33 - 0.45) \cdot 10^{-13} \text{ m}^3/\text{c}$ , respectively. The maximum excitation rate constant for nitrogen molecules was for the sum of the singlet states: they were  $(1.4 \cdot 10^{-14}) \text{ m}^3 / \text{s}$  for an electric field strength of 810 Td. The specific losses of the discharge power in the plasma on inelastic collisions of electrons with the components of the gas mixture were maximal for nitrogen molecules and reached 32% for excitation of the sum of singlet nitrogen states.

**Conclusion.** Radiation of the plasma is concentrated in a narrow spectral interval of 200-250 nm, is promising for use as a "point" UV lamp; the spectral lines 248.9 and 254.4 nm Cu II are promising for estimating the electron temperature in a plasma. Mean electron energy, electron mobility, specific electric power losses and the rate constants of elastic and inelastic scattering of electrons by copper, argon and carbon dioxide, oxygen and nitrogen molecules, the ratio of which was 3: 7.098: 0.266: 159.157: 593.438, depending on the magnitude of the reduced electric field (ratio of the electric field strength (E) to the total concentration of atoms and gas molecules (N)). The range of changes in the parameter  $E/N = 1-1300 \text{ Td} (1 \cdot 10^{-17} - 1 \cdot 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{cm}^2)$  and included the values of the parameter E / N, which were realized in the experiment (610-810) Td.

**Keywords:** nanosecond discharge, copper, air, emission spectrum, ultraviolet, electron temperature and density, specific losses of discharge power, rate constants of electronic processes

## REFERENCE

1. Shuaibov A.K., Minya A.Yo, Gomoki Z.T, Gritzak R.V., Laslov G.E., Shevera I.V. (2014), "The Formation of Excited Molecules Chloride Argon, Chlorine and Hydroxyl Radicals in the Nanosecond Barrier Discharge", Journal of Electrical Engineering, V.2, N 2, pp.96 -100.
2. Shuaibov A.K., Grizak R.V. (2017), "Optical characteristics of UV-VUV lamps on the electronic-vibrational

- transition of the hydroxyl radical pumped by a nanosecond capacitive discharge”, *High. Volt.*, V.2 N2, pp.78-81.
3. Shuaibov A.K., Laslov G.E., and Kozak Ya. Yu. (2014), “Emission Characteristics of the Cathode Region of nanosecond Discharge in Atmospheric-Pressure Air Optics and Spektroskopy”, V.116, N.4, pp.552-556.
  4. Avtaeva S.V., Zhdanova O.S., Pikulev A.A., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. (2013), *New Direction in Scientific Research and Application of Excilams*, STT, Publishing Tomsk., 246 p. . [in Russian].
  5. Mesyats G.A. (1995), “ Ecton – Electron Avalanche from metal”, *Usp. Fizich. Nauk*, V.165, N 6, pp.601-626.
  6. Shuiabov O.K., Minya O.Y., Homoki Z.T., Danilo V.V. Windowless, spot, ultraviolet lamp. Ukraine patent for utility model. U 2016 04596. 10.11.2016. Bulletin No. 21.
  7. Shuaibov, A.K., Minya, A.Y., Gomoki, Z.T., Danilo, V.V., Pinzenik, R.B. (2018), “Characteristics of a high-current pulsed discharge in the air with an ectonic mechanism of injection of copper vapor into a discharge gap”, *Elektronnaya obrabotka materialov*, V. 54, N. 1, pp. 46-50.
  8. Minya, O.Y., Shuaibov, O.K., Gomoki, Z.T., Danylo, V.V., Chavarga, M.M. Kukri, L.E. (2016), “Optical characteristics of nanosecond discharge on a mixture of air with zinc vapor”, *Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series Physics*, N.39, pp. 93-99.
  9. Pashchina, A.S., Efimov, A. V. , Chinnov, V. F. (2017), “Optical investigations of multicomponent plasma of capillary discharge. Supersonic outflow regime”, *High Temperature*, V. 55, N. 5, pp. 650–664.
  10. Tarasenko, V. F., Yakovlenko, S.I. (2004), "The electron runaway mechanism in dense gases and the production of high-power subnanosecond electron beams", *Phys. Usp.*, V. 47, N.2, pp. 887–905.
  11. <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr>.