

STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOSCALE AND MESOSCOPIC MATERIALS

PACS numbers: 51.50.+v, 52.80.Mg, 52.80.Tn, 52.90.+z, 79.60.Jv

Характеристики і параметри плазми перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами в аргоні

О. К. Шуаїбов, А. О. Малініна, Р. В. Грицак, О. М. Малінін,
Ю. Ю. Білак, З. Т. Гомокі, М. І. Ватрала

*Ужгородський національний університет,
пл. Народна, 3,
88000 Ужгород, Україна*

Приведено характеристики і параметри перенапруженого біполярного розряду наносекундної тривалості між мідними електродами в аргоні за тиску 6,7 кПа. У процесі мікрровибхів неоднорідностей на робочих поверхнях мідних електродів у сильному електричному полі в проміжок між електродами вносили пари міді. Це створювало передумови для синтезу тонких наноструктурованих плівок міді, які можуть осаджуватись на діелектричній підкладці (кварц, скло, кераміка), встановленій поблизу від центра розрядного проміжку. Досліджено просторові характеристики розряду, імпульси напруги на розрядному проміжку величиною $d = 2$ і 7 мм, імпульси розрядного струму, імпульсну потужність розряду і енергетичний внесок у розряд за один імпульс. Методом емісійної спектроскопії з високим часовим розділенням досліджено спектри випромінювання плазми і осцилограми випромінювання найінтенсивніших спектральних ліній та смуг, що дозволило встановити основні збуджені продукти, які утворюються в плазмі. Проведено оптимізацію усередненого за часом УФ-випромінювання точкового випромінювача залежно від напруги живлення високовольтного модулятора і частоти повторення розрядних імпульс-

Corresponding author: Oleksandr Kamilovych Shuaibov
E-mail: alexsander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

*Uzhhorod National University,
3 Narodna Sqr., UA-88000 Uzhhorod, Ukraine*

Citation: O. K. Shuaibov, A. O. Malinina, R. V. Hrytsak, O. M. Malinin, Yu. Yu. Bilak, Z. T. Gomoki, and M. I. Vatralla, Characteristics and Parameters of Overstressed Nanosecond Discharge Plasma Between Copper Electrodes in Argon, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 12: 1683–1706 (2021) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.12.1683.

сів. Методом числового моделювання параметрів плазми наносекундного розряду на основі парів міді в аргоні середнього тиску шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана для функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) розраховано рухливість, температуру і густину електронів в плазмі, питомі втрати потужності розряду на основні електронні процеси і їхні константи швидкості залежно від величини параметру E/N для плазми, яку досліджували експериментально.

Ключові слова: перенапружений наносекундний розряд, наноструктури, мідь, аргон, характеристики плазми, параметри плазми.

The characteristics and parameters of the overvoltage bipolar discharge of nanosecond duration between copper electrodes in argon at a pressure of 6.7 kPa are given. In the process of microexplosions of inhomogeneities on the working surfaces of copper electrodes in a strong electric field in the gap between the electrodes are made of copper vapour. This creates the preconditions for the synthesis of thin nanostructured copper films, which can be deposited on a dielectric substrate (quartz, glass, ceramics) installed near the center of the discharge gap. The spatial characteristics of the discharge, voltage pulses on the discharge interval of $d = 2$ and 7 mm, pulses of the discharge current, pulse power of the discharge and energy contribution to the discharge per pulse are studied. Plasma radiation spectra and oscillograms of radiation of the most intense spectral lines and bands are studied by the method of emission spectroscopy with high time separation, which allowed to establish the main excited products formed in plasma. The optimization of the time-averaged UV-radiation of the point emitter depending on the supply voltage of the high-voltage modulator and the repetition frequency of the discharge pulses is carried out. Using the method of numerical modeling of nanosecond discharge plasma parameters based on copper vapour in medium pressure argon by solving the Boltzmann kinetic equation for the electron energy distribution function (FREE), we calculated the mobility, temperature and density of electrons in plasma, and their rate constants depending on the value of the E/N parameter for the plasma studied experimentally.

Key words: overvoltage nanosecond discharge, nanostructures, Copper, Argon, plasma characteristics, plasma parameters.

(Отримано 26 березня 2021 р.; остаточн. варіант — 15 вересня 2021 р.)

1. ВСТУП

Дослідження перенапружених наносекундних розрядів у газах, коли віддаль між металевими електродами мала, показали, що на їх основі можуть бути розроблені селективні «точкові» УФ-лампи на парах металів, а також можливо проводити осадження на діелектричну підкладку плівкових наноструктур оксидів міді, цинку і заліза в умовах інтенсивного опромінення підкладки і плівки бактерицидним УФ-випромінюванням [1–3].

У випадку наносекундного розряду в повітрі в коротких розряд-

них проміжках спостерігається утворення ектонів, яке супроводжується мікровибухами природних неоднорідностей на металевій поверхні і викидом парів матеріалу електродів в міжелектродний простір [4]. Це дозволяє для розряду в інертних газах між електродами з перехідних металів (Cu, Zn, Fe, Al) синтезувати тонкі металеві плівки.

Дані про дослідження умов синтезу плівкових наноструктур на основі перехідних металів з продуктів деструкції металевих електродів перенапруженого наносекундного розряду практично відсутні, тому актуальною є задача дослідження умов синтезу та основних характеристик таких наноструктур в інертних газах, яке можливе без застосування коштовного лазерного чи високовакуумного обладнання.

Процес синтезу наноструктур, які одержують з використанням перенапруженого розряду в газах між мідними електродами завжди супроводжується інтенсивним опроміненням підкладки плазмою наносекундного розряду у спектральному інтервалі 200–300 нм [5], що важливо для покращення їхніх електричних характеристик.

Так, в [6] вказували, що асистування процесу росту прозорих провідних шарів на основі наноструктур оксиду цинку УФ-випромінюванням ртутної лампи сприяє покращенню їхніх електричних характеристик за рахунок створення додаткових донорних центрів і зменшенню розсіювання носіїв заряду на міжзеренних границях нановіскерів. У разі синтезу тонких металевих плівок з продуктів розпорошення мідних електродів у перенапруженому наносекундному розряді відпадає необхідність застосування зовнішнього джерела УФ-випромінювання, оскільки сама досліджувана плазма є джерелом випромінювання у спектральному діапазоні $\lambda = 200\text{--}250$ нм.

Дрібнодисперсні порошки і тонкі плівки міді нині знаходять застосування у змащувальних композиціях, які застосовують у різних вузлах тертя [7]. Мідні порошки різних розмірів використовують як наповнювачі до поліетилену, що сприяє збільшенню напруги його руйнування і модуля пружності на згин [8]. Ультрадисперсні мідні порошки знаходять застосування в мікробіології і медицині [9]. Тому важливо і надалі розробляти нові фізичні методи синтезу тонких плівок міді та одержання ультрадисперсних часток міді.

У статті наведено результати дослідження просторових, електричних і оптичних характеристик та параметрів плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді в аргоні середнього тиску, а також умов синтезу тонких плівок міді за автоматичної УФ-підсвітки підкладки у процесі осадження матеріалу електродів.

2. ТЕХНІКА І УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду проводили на розрядному модулі, схема якого приведена на рис. 1. Перенапружений наносекундний розряд між електродами з міді запалювався у герметичній камері з оргскла. Віддаль між мідними електродами складала $d = 2$ і 7 мм.

Експериментальна установка містила розрядний модуль (рис. 1), який живився від імпульсно-періодичного високовольтного джерела, систему реєстрації оптичного випромінювання на основі монохроматора МДР-2 і систему реєстрації імпульсних електричних та оптичних характеристик (сили струму, напруги і осцилограми на найінтенсивніших спектральних лініях і смугах) в часі на основі багатоканального широкосмугового осцилографа 6-ЛОР.

Розрядний модуль за допомогою металевих трубок було під'єднано

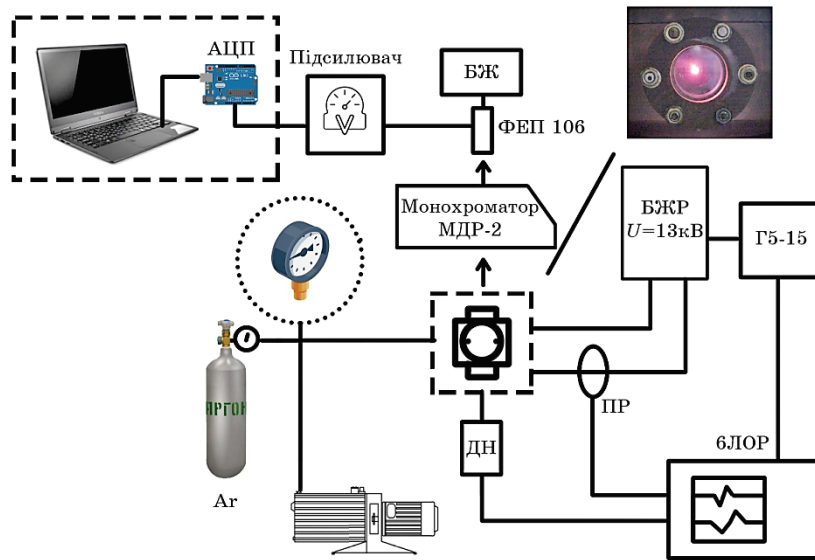


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження перенапруженого наносекундного розряду: БЖР — блок живлення розряду; ФЕП 106 — фотоелектричний помножувач; БЖ — блок живлення ФЕП; АЦП — аналогово-цифровий перетворювач сигналу; ПР — пояс Роговського; ДН — дільник напруги для визначення спаду напруги в колі; Г5-15 — генератор імпульсів; 6ЛОР — широкосмуговий осцилограф.

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for the study of overstressed nanosecond discharge: BJR—power supply discharge; FEP 106—photoelectric multiplier; BZ—power supply FEP; ADC—analog-to-digital signal converter; PR—Rogovsky coil; DN—voltage divider to determine the voltage drop in the circuit; G5-15—pulse generator; 6LOR—broadband oscilloscope.

до вакуумної системи, яка забезпечувала діапазон робочих тисків аргону від 1–200 кПа, але переважну більшість результатів експериментальних досліджень одержано за $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа.

Для запалювання розряду на електроди розрядної комірки подавали біполярні імпульси високої напруги тривалістю 50–100 нс, амплітудою $\pm(20\text{--}40)$ кВ. Частоту повторювання імпульсів напруги вибрали рівною 80–100 Гц, оскільки на більших частотах відбувалось значне нагрівання розрядного модуля. Осцилограми імпульсів напруги на розрядному проміжку і осцилограми імпульсів струму реєстрували за допомогою широкосмугового ємнісного дільника напруги, поясу Роговського та широкосмугового осцилографа 6ЛОР-04 з часовим розділенням на рівні 2–3 нс.

Між кінчиками мідних електродів запалювався досить однорідний розряд тривалістю близько 100–200 нс з амплітудою імпульсів струму 50–200 А і об'ємом плазми 10–500 мм³. За міжелектродної віддалі 2 і 7 мм розрядний проміжок був перенапруженим, що створювало сприятливі умови для формування пучка втікаючих електронів високої енергії і супутнього рентгенівського випромінювання [10].

Випромінювання плазми, яке реєстрували у спектральному діапазоні $\lambda = 196\text{--}663$ нм, надходило на вхідну щілину спектрометра з дифракційною ґратницею 1200 штрих/мм. На виході спектрометра для детектування випромінювання використовували фотоелектронний помножувач ФЕП-106, підключений до підсилювача постійного струму. Сигнал з підсилювача поступав на аналогово-цифровий перетворювач і далі подавався для обробки на персональний комп'ютер.

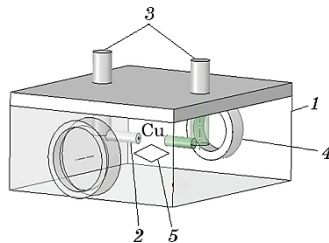


Рис. 2. Будова модуля з системою електродів перенапруженого наносекундного розряду в газах: 1 — корпус розрядної камери, 2 — електроди, 3 — високовольтні вводи, 4 — кварцові вікна для спостережень за розрядом і реєстрації спектрів випромінювання, 5 — підкладка для осадження тонких плівок.

Fig. 2. The structure of the module with a system of electrodes of overstressed nanosecond discharge in gases: 1—discharge chamber housing, 2—electrodes, 3—high-voltage inputs, 4—quartz windows for discharge monitoring and registration of radiation spectra, 5—substrate for deposition of thin films.

Вимірювання потужності випромінювання плазми розряду відбувалось за допомогою ультрафіолетового вимірювача абсолютної потужності випромінювання «ТКА-ПКМ», який дозволяв вести виміри у спектральному діапазоні 200–400 нм.

Розрядну камеру відкачували форвакуумною помпою до залишкового тиску 10 Па, а після в камеру напускали аргон до тиску 6,7 кПа. Діаметр мідних циліндричних електродів складав 5 мм, а радіус закруглення їхньої робочої торцевої поверхні був однаковим і рівним 3 мм. Схему розрядного модуля наведено на рис. 2.

Об'єм розряду залежав від частоти слідування імпульсів напруги. Режим «точкового розряду» досягався лише за частот повторення імпульсів напруги у діапазоні $f = 40\text{--}150$ Гц. З короткочасним збільшенням частоти до 1000 Гц об'єм плазми газорозрядного випромінювача зростав до 100 мм^3 .

3. ПРОСТОРОВІ І ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рисунку 3 приведені усереднені за часом світлини перенапруже-

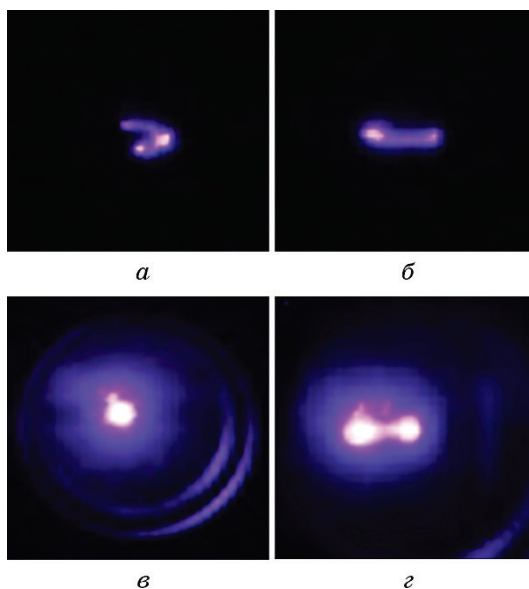


Рис. 3. Світлини перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами в аргоні за $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа $d = 2$ мм (а) і $d = 7$ мм (б); за $p(\text{Ar}) = 101$ кПа $d = 2$ мм (в) і $d = 7$ мм (г).

Fig. 3. Images of overstressed nanosecond discharge between copper electrodes in argon at $p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa $d = 2$ mm (a) and $d = 7$ mm (б); at $p(\text{Ar}) = 101$ kPa $d = 2$ mm (в) and $d = 7$ mm (г).

ного наносекундного розряду за тисків $p(\text{Ar}) = 6,7$ і 101 кПа, які одержані з часовою витримкою ≈ 1 с на різних віддаль між електродами і за різних тисків аргону.

У разі середнього тиску аргону і $d = 2$ мм розряд мав вигляд яскравої центральної частини діаметром близько 2 мм, рівним міжелектродній віддалі і низки більш слабких струменів плазми, що відходили від центральної частини. У разі збільшення віддалі між електродами до 7 мм, найяскравіша частина розрядної плазми концентрувалась біля вістря голок, які перекривались тонким менш яскравим плазмовим каналом. Зі збільшенням тиску аргону до 101 кПа об'єм плазми і яскравість світіння зростали, проте загальний вигляд світіння плазми в основному повторював його вигляд за $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа.

На рисунку 4 приведено осцилограми напруги, струму й імпульсна потужність для перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді ($p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа).

Осцилограми напруги і струму були у формі загасних осциляцій тривалістю близько $7\text{--}10$ нс, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору високовольтного модулятора з опором навантаження. Повна тривалість осциляцій напруги на проміжку та розрядного струму досягала 450 нс у разі тривалості окремих осциляцій напруги $7\text{--}10$ нс, а осциляції струму мали тривалість ≈ 70 нс. Короткотривалі осциляції найкраще проявлялись на осцилограмах напруги. На осцилограмах струму вони згладжені (були частково проінтегровані за часом) внаслідок великої сталої часу поясу Роговського,

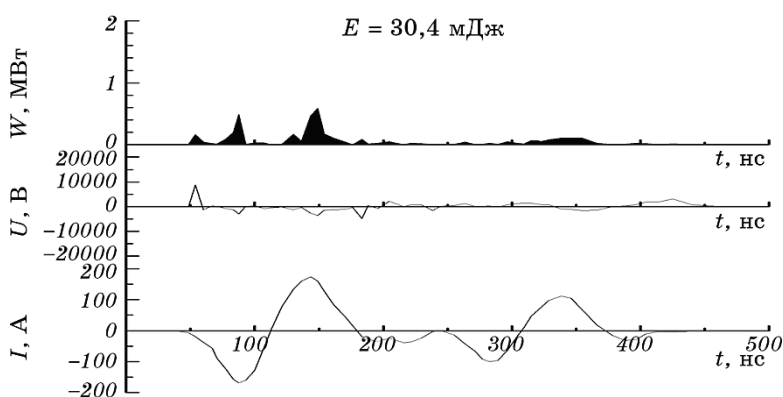


Рис. 4. Часові залежності імпульсної електричної потужності розряду, напруги між електродами з міді і струму наносекундного розряду за міжелектродній віддалі $d = 2$ мм і $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа.

Fig. 4. Temporal dependences of the pulsed electric power of the discharge, the voltage between the copper electrodes and the current of the nanosecond discharge at the interelectrode distance $d = 2$ mm and $p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa.

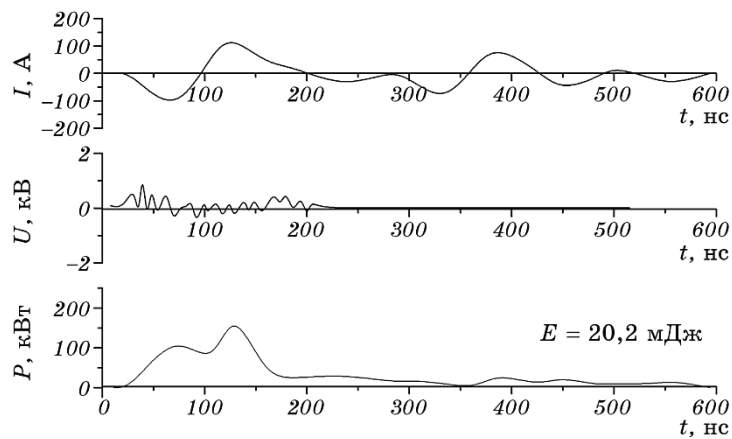


Рис. 5. Часові залежності імпульсної електричної потужності розряду, напруги між електродами з міді і струму наносекундного розряду за міжелектродної віддалі $d = 7$ мм і $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа.

Fig. 5. Temporal dependences of the pulsed electric power of the discharge, the voltage between the electrodes made of copper and the current of the nanosecond discharge at the interelectrode distance $d = 7$ mm and $p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa.

який використовували у цих дослідженнях.

Для розряду в аргоні за $d = 2$ мм амплітуда найбільшого спаду напруги на електродах досягала у початковій стадії розряду і складала $\approx +8$ кВ, струму ± 160 А, а імпульсної потужності — $0,6$ МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс у плазму на рівні $30,4$ мДж (рис. 4), а зі збільшенням міжелектродної віддалі до 7 мм (рис. 5) спад напруги на електродах і величина струму зменшувались до $+0,8$ кВ і ± 100 А відповідно. Імпульсна потужність за $d = 7$ мм зменшувалась до $0,15$ МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс в плазму на рівні $20,2$ мДж (рис. 5).

4. ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рисунку 6 приведено спектри випромінювання розряду між мідними електродами, який запалювався за $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа на різних відстанях між електродами. Для ідентифікації спектральних ліній у спектрах використовували довідники [11–13].

Спектри випромінювання розряду за різної віддалі між електродами мали близький вигляд, включали одні і ті лінії та смуги, а відрізнялися між собою переважно інтенсивністю спектральних ліній і смуг, які приведені у табл. 1. Другою відмінністю в цих спектрах була наявність більш яскраво вираженого континууму, на фоні

якого спостерігались всі спектральні лінії і смуги. Природа даного континууму в умовах нашого експерименту може бути пов'язана з тепловим і рекомбінаційним випромінюванням плазми.

У спектрах випромінювання розряду (рис. 6) на суміші аргону з парами міді в УФ-діапазоні довжин хвиль 214–306 нм (лінії 1–17; табл. 1) спостерігалось випромінювання на переходах атома і однозарядного йона Купруму. Найінтенсивнішою йонною спектральною лінією була лінія $\lambda = 224,70$ нм Cu II, а з атомарних найінтенсивнішою була лінія з $\lambda = 226,20$ нм Cu I. Найвищою енергією верхнього рівня для ліній Cu II була $E_{\text{верх}} = 14,70$ еВ, а для атомарних ліній максимальна енергія верхнього рівня складала $E_{\text{верх}} = 7,18$ еВ. Найінтенсивнішими в УФ-частині спектра були резонансні спектральні лінії з $\lambda = 324,75$ і $327,39$ нм Cu I, у яких нижнім енергетичним рів-

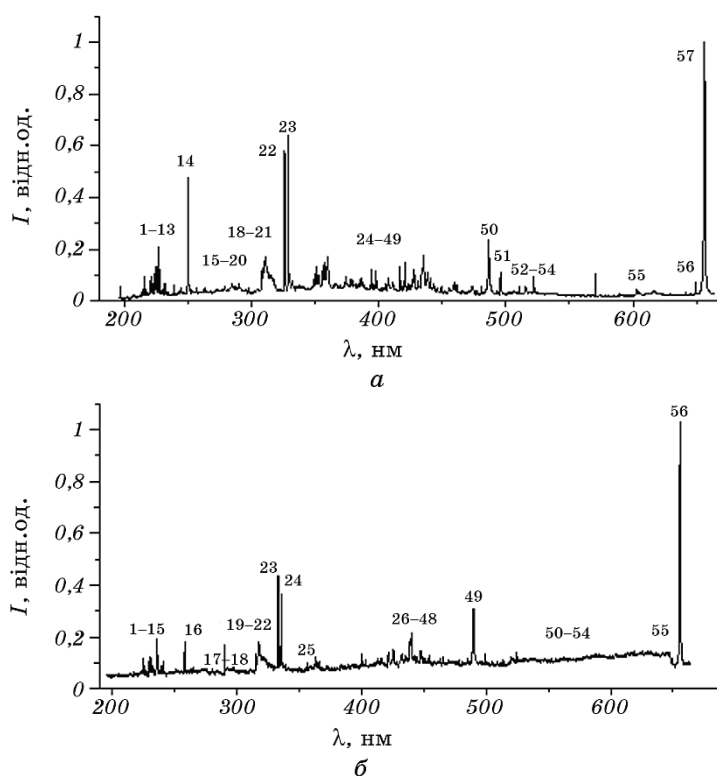


Рис. 6. Спектр випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами за міжелектродних віддалей $d = 2$ мм (а) і 7 мм (б) ($p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа).

Fig. 6. The emission spectrum of the overstressed nanosecond discharge between the copper electrodes at the interelectrode distances $d = 2$ mm (a) and 7 mm (б) ($p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa).

нем є основний рівень. В УФ-спектрі також спостерігались смуги другої додатної системи молекули Нітрогену, оскільки в даних експериментах відкачування розрядної камери відбувалось лише до залишкового тиску повітря ≈ 10 Па.

У діапазоні довжин хвиль 360–659 нм спостерігалось випромінювання переважно на переходах Ar I; Ar II, а також інтенсивна спектральна лінія атома Гідрогену ($\lambda = 656,29$ нм), яка зумовлена залишковим тиском повітря у камері після її відкачування форвакуумною помпою. Інтенсивність всіх спектральних ліній і смуг випромінювання розряду, що запалювався за $d = 7$ мм, була приблизно у 10–20 разів більшою за інтенсивність випромінювання розряду за $d = 2$ мм, що зумовлено, переважно, більшим об'ємом плазми у разі більшої віддалі між електродами.

Густина електронів у плазмі перенапружених розрядів наносекундної тривалості з ектонним механізмом розпорошення електро-

ТАБЛИЦЯ 1. Результати ідентифікації спектрів випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами ($p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа).

TABLE 1. The results of identification of plasma emission spectra of overpressed nanosecond discharge between copper electrodes ($p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa).

№	$\lambda_{\text{табл}}$, нм	$I_{\text{експ}}$, відн. од.		Об'єкт	$E_{\text{нижн}}$, еВ	$E_{\text{верх}}$, еВ	Терм _{нижн}	Терм _{верх}
		$d = 2$ мм	$d = 7$ мм					
1	214,89	0,23	4,28	Cu II	1,39	7,18	$4s^2 2D$	$5f^2 F^o$
2	216,50	0,48	4,28	Cu I	0,00	5,72	$4s^2 S$	$4p^2 D^o$
3	217,49	0,19	4,32	Cu II	8,92	14,61	$4p^1 F^o$	$4d^1 G$
4	220,05	0,38	4,30	Cu II	9,06	14,70	$4p^3 D^o$	$4d^3 F$
5	221,45	0,47	4,30	Cu I	1,39	6,98	$4s^2 2D$	$4p''^2 P^o$
6	223,84	0,68	4,34	Cu I	1,64	7,18	$4s^2 2D$	$5f^2 F^o$
7	224,70	0,67	4,38	Cu II	2,72	8,23	$4s^3 D$	$4p^3 P^o$
8	226,30	1,06	4,60	Cu I	1,64	7,12	$4s^2 2D$	$7p^2 P^o$
9	229,43	0,23	4,54	Cu II	2,83	8,23	$4s^3 D$	$4p^3 P^o$
10	230,31	0,35	4,64	Cu I	1,64	7,02	$4s^2 2D$	$4p''^2 D^o$
11	236,98	0,17	4,94	Cu II	3,26	8,49	$4s^1 D$	$4p^3 F^o$
12	239,26	0,30	4,44	Cu I	1,64	6,82	$4s^2 2D$	$6p^2 P^o$
13	244,16	0,26	4,30	Cu I	0,00	5,08	$4s^2 S$	$4p'^4 P^o$
14	249,21	2,41	4,34	Cu I	0,00	4,97	$4s^2 S$	$4p'^4 P^o$
15	261,83	0,24	4,90	Cu I	1,39	6,12	$4s^2 2D$	$5p^2 P^o$
16	282,43	0,34	4,34	Cu I	1,39	5,78	$4s^2 2D$	$4p'^2 D^o$
17	306,34	0,65	4,66	Cu I	1,64	5,68	$4s^2 2D$	$4p'^2 P^o$
18	310,40	0,87	4,64	N ₂	Друга додатня система C ³ Π _u ⁺ –B ³ Π _g ⁺ (4;3)			
19	311,67	0,50	4,88	N ₂	Друга додатня система C ³ Π _u ⁺ –B ³ Π _g ⁺ (3;2)			
20	313,60	0,54	4,72	N ₂	Друга додатня система C ³ Π _u ⁺ –B ³ Π _g ⁺ (2;1)			
21	315,93	0,51	4,64	N ₂	Друга додатня система C ³ Π _u ⁺ –B ³ Π _g ⁺ (1;0)			

Продовження табл. 1.

Continuation of Table 1.

№	$\lambda_{\text{табл.}}$ нм	$I_{\text{експ.}}$ Відн. од.		Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}$ еВ	$E_{\text{верх.}}$ еВ	Терм _{нижн}	Терм _{верх}
		$d = 2 \text{ мм}$	$d = 2 \text{ мм}$					
22	324,75	1,42	6,18	Cu I	0	3,82	$4s^2S$	$4p^2P^o$
23	327,39	1,43	5,84	Cu I	0	3,39	$4s^2S$	$4p^2P^o$
24	354,89	0,57	5,84	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (3;2)			
25	357,69	0,76	4,50	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (0;1)			
26	360,65	0,85	4,62	Ar I	11,62	15,06	$4s [1 1/2]^o$	$6p [1/2]$
27	373,78	0,48	4,44	Ar II	21,50	24,81	$4p'^2D^o$	$4d'^2F$
28	377,05	0,41	4,40	Ar II	19,30	22,59	$4p^4P^o$	$5s^4P$
29	378,63	0,42	4,40	Ar II	16,41	19,68	$3d^4D$	$4p^2D^o$
30	385,05	0,43	4,44	Ar II	16,75	19,97	$4s^4P$	$4p^4S_0$
31	386,85	0,45	4,44	Ar II	19,97	23,17	$4p^4S_0$	$4d^4P$
32	387,52	0,35	4,44	Ar II	16,44	19,64	$3d^4D$	$4p^4D^o$
33	394,30	0,61	4,46	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (2;5)			
34	397,93	0,58	4,46	Ar II	19,97	23,08	$4p^4S_0$	$4d^4P$
35	402,26	0,28	4,52	Cu I	3,79	6,87	$4p^2P^o$	$5d^2D$
36	405,29	0,34	4,54	Ar II	20,74	23,80	$4s''^2S$	$4p''^2P^o$
37	407,95	0,44	4,48	Ar II	18,45	21,49	$4s'^2D$	$4p'^2D^o$
38	411,28	0,37	5,02	Ar II	16,75	19,76	$4s^4P$	$4p^2D^o$
39	415,85	0,66	4,60	Ar I	11,55	14,53	$4s [1/2]^o$	$5p [1 1/2]$
40	420,06	0,75	4,72	Ar I	11,55	14,50	$4s [1/2]^o$	$5p [2 1/2]$
41	425,93	0,41	4,76	Ar I	11,83	14,74	$4s' [1/2]^o$	$5p' [1/2]$
42	427,81	0,62	4,66	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (0;1)			
43	433,35	0,81	4,54	Ar I	11,83	14,69	$4s' [1/2]^o$	$5p' [1 1/2]$
44	435,50	0,90	4,64	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (4;9)			
45	441,67	0,44	5,08	N ₂	Друга додатня система $C^3\Pi_u^+ - B^3\Pi_g^+$ (3;8)			
46	442,39	0,33	4,64	Ar I	11,72	14,52	$4s' [1/2]^o$	$5p' [1 1/2]$
47	459,60	0,38	5,04	Ar I	11,83	14,52	$4s' [1/2]^o$	$5p' [1 1/2]$
48	460,95	0,33	4,58	Ar II	18,45	21,14	$4s'^2D$	$4p'^2F^o$
49	470,23	0,20	5,06	Ar I	11,83	14,46	$4s' [1/2]^o$	$5p' [1 1/2]$
50	487,62	1,21	5,54	Ar I	12,91	15,45	$4p [1/2]$	$7d [1 1/2]$
51	495,67	0,57	4,68	Ar I	13,08	15,58	$4p [2 1/2]$	$9d [3 1/2]$
52	511,82	0,28	4,52	Ar I	13,09	15,52	$4p [2 1/2]$	$6d' [2 1/2]^o$
53	516,22	0,27	4,62	Ar I	12,91	15,31	$4p [1/2]$	$6d [1/2]$
54	521,82	0,46	4,70	Cu I	3,82	6,19	$4p^2P^o$	$4d^2D$
55	570,02	0,52	5,06	Cu I	1,64	3,82	$4s^2^2D$	$4p^2P^o$
56	653,81	0,37	4,06	Ar I	13,08	14,95	$4p [2 1/2]$	$4d' [1/2]^o$
57	656,29 + + 659,61	5	9,08	H _{α} Ar I +	13,08	14,95	$4p [2 1/2]$	$4d' [1/2]^o$

дів може досягати $10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ [14]. Тому, механізм утворення збуджених йонів Купруму в плазмі може визначатися процесами їх збудження електронами з основного стану відповідного йона.

Після цього в післясвітінні розряду починають проявлятися про-

цеси електрон-йонної рекомбінації. Так, для йонів Цинку відповідні ефективні перерізи збудження електронами йонів Цинку основного йонного стану значні і досягають 10^{-16} см² [15].

На рисунку 7 приведено осцилограми випромінювання на переходах найінтенсивніших спектральних (резонансних) ліній атома Купруму та смуг другої додатної системи молекули Нітрогену.

За тиску аргону 6,7 кПа (рис. 7) максимум світіння на переході з $\lambda = 327,39$ нм Cu I спостерігався, коли $t \approx 60$ нс, а для лінії з $\lambda = 324,75$ нм Cu I, коли $t \approx 80$ нс. Максимуми світіння для смуг молекули Нітрогену спостерігались за часу $t \approx 70$ нс. Для наносекундних розрядів у сумішах аргону з малими домішками азоту чи повітря характерним є ефективний процес передачі енергії від метастабільних атомів Аргону молекулі Нітрогену [16]. Це може призводити до затримки в часі з висвічуванням смуг другої додатної системи молекули Нітрогену відносно імпульсного енергетичного внеску або імпульсу струму.

Основні (перші за часом від початку запалювання розряду) максимуми світіння на резонансних переходах атома Купруму корелювалися з першими двома максимумами імпульсної потужності електричного розряду ($t = 50$ і 80 нс). За середніх тисків аргону більш імовірними механізмами заселення верхніх енергетичних рівнів для спектральних ліній з $\lambda = 324,75$ і $327,39$ нм Cu I можуть бути процеси прямого і ступінчатого збудження електронним ударом. Для осцилограми лінії атома Купруму з $\lambda = 324,75$ нм Cu I другий

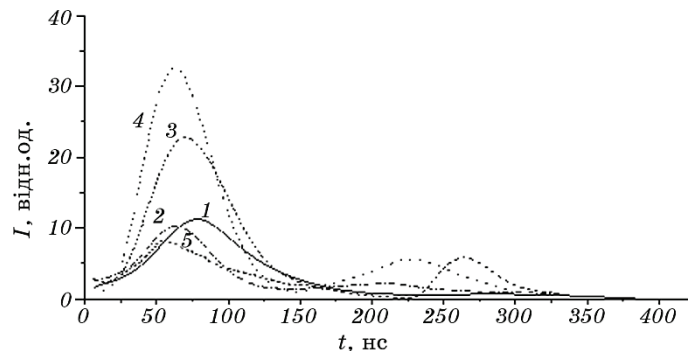


Рис. 7. Осцилограми світіння на переходах атома Купруму і молекули Нітрогену: 1 — 324,75 нм Cu I, 2 — 327,39 нм Cu I, 3 — 357,69 нм N₂, 4 — 441,67 нм N₂, 5 — імпульсна потужність у розряді за тиску аргону 6,7 кПа ($d = 2$ мм).

Fig. 7. Oscillograms of the glow at the transitions of the copper atom and the nitrogen molecule: 1—324.75 nm Cu I, 2—327.39 nm Cu I, 3—357.69 nm N₂, 4—441.67 nm N₂, 5—pulsed power in the discharge at an argon pressure of 6,7 kPa ($d = 2$ mm).

максимум інтенсивності світіння був практично відсутнім, а для лінії з $\lambda = 327,39$ нм Cu I він мав малу інтенсивність. Це може бути зумовлено сильним самопоглинанням випромінювання на пізніх стадіях просторово-однорідної стадії розряду, внаслідок того, що для цих ліній Купруму нижній енергетичний рівень — основний (див. табл. 1) і накопичення парів міді у розрядному проміжку. Більш інтенсивними були другі максимуми для випромінювання на смугах молекули Нітрогену ($t = 230, 270$ нс), які спостерігались в післясвітінні від основного максимуму імпульсної потужності ($t_{\text{ін}} = 150$ нс, рис. 7).

За середніх тисків аргону тривалість світіння смуг Нітрогену за рахунок другого максимуму інтенсивності на відповідних осцилограмах досягала 300–350 нс, що наближено відповідало часу існування просторово-однорідного розряду [17, 18].

На рисунках 8 і 9 наведено результати оптимізації середньої інтенсивності УФ-випромінювання розряду залежно від частоти повторення імпульсів (рис. 8) і від величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора (рис. 9).

У разі збільшення частоти повторення імпульсів від 40 до 1000 Гц найбільше зростала інтенсивність випромінювання розряду в УФ-А (315–400 нм) діапазоні, зокрема, в діапазоні частот $\Delta f = 350$ –1000 Гц, вона збільшувалась від 1 до 5 мВт/м². У діапазонах УФ-В, УФ-С ріст густини потужності випромінювання був меншим і спостерігався в діапазоні 0,5–2,0 мВт/м². Проте збільшення інтенсивності УФ-

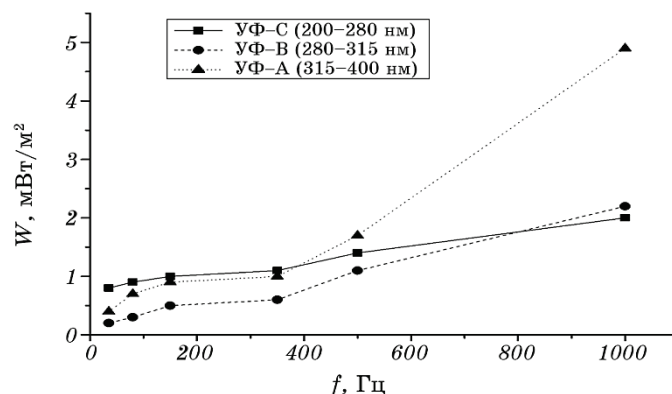


Рис. 8. Залежність інтенсивності УФ-випромінювання УФ-С, УФ-В, УФ-А діапазонів перенапруженого наносекундного розряду від частоти повторення імпульсів напруги за зарядної напруги $U = 13$ кВ ($f = 80$ Гц, $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа, $d = 2$ мм).

Fig. 8. The dependency of the intensity of UV radiation UV-C, UV-B, UV-A ranges of overstressed nanosecond discharge on the frequency of repetition of voltage pulses at charging voltage $U = 13$ kV ($f = 80$ Hz, $p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa, $d = 2$ mm).

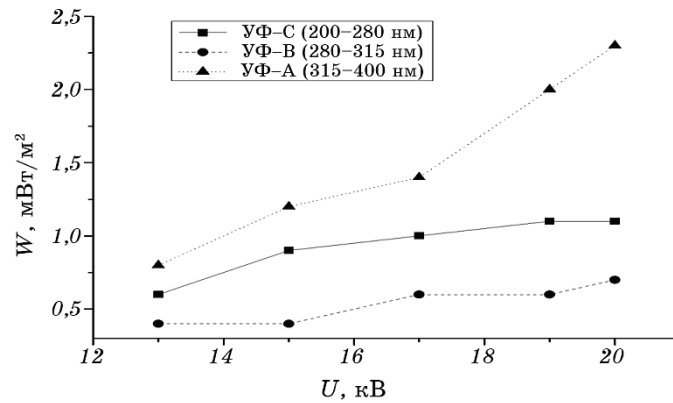


Рис. 9. Залежність інтенсивності УФ-випромінювання УФ-С, УФ-В, УФ-А діапазонів перенапруженого наносекундного розряду від величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора ($f = 80$ Гц, $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа, $d = 2$ мм).

Fig. 9. The dependency of the intensity of UV radiation UV-C, UV-B, UV-A ranges of overstressed nanosecond discharge on the value of the charging voltage on the operating capacitor of the high-voltage modulator ($f = 80$ Hz, $p(\text{Ar}) = 6.7$ kPa, $d = 2$ mm).

випромінювання розряду залежно від величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора за фіксованої частоти повторень було менш ефективним і було в межах $0,2$ – $2,2$ мВт/м². Водночас відносні співвідношення між інтенсивностями випромінювання у діапазонах УФ-С, УФ-В, УФ-А були такими самими, як і для відповідних залежностей від частоти (рис. 8).

5. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ

Параметри плазми розряду для суміші аргону і парів міді (співвідношення компонент 6700 Па і 100 Па відповідно) визначали чисельно і розраховували як повні інтеграли функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) в розряді. ФРЕЕ знаходили чисельно шляхом розв'язку кінетичного рівняння Больцмана у двочленному наближенні [19]. Розрахунки ФРЕЕ проводили з використанням програми [20]. На основі одержаних ФРЕЕ визначені середня енергія електронів, рухливість електронів, питомі втрати потужності електричного розряду і константи швидкостей пружного і непружного розсіювання електронів на атомах Аргону і Купруму залежно від величини приведенного електричного поля (відношення напруженості електричного поля E до загальної концентрації атомів Аргону і Купруму N). Відстані між електродами склали значення 2 і

7 мм. Діапазон змін параметра $E/N = 1-2500$ Тд ($1 \cdot 10^{-17} - 2,5 \cdot 10^{-14}$ В·см²) і включав величини параметра E/N , які були реалізовані в експерименті. В інтегралі зіткнень електронів з атомами і молекулами враховано такі процеси: пружне розсіяння електронів на атомах Аргону, збудження енергетичного рівня атомів Аргону (енергія порога 11,5 еВ), йонізація атомів Аргону; пружне розсіяння і збудження енергетичних рівнів атомів Купруму (енергії порога: 1,5 еВ; 1,5 еВ; 3,8 еВ; 5,1 еВ), йонізація атомів Купруму. Дані за абсолютними величинами ефективних перетинів цих процесів, а також їхніх залежностей від енергій електронів взято з бази даних [20].

Концентрація електронів N_e розраховували за формулою, наведеною в [20]:

$$N_e = j/eV_{др},$$

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

Швидкість дрейфу електронів визначали із виразу згідно [21]:

$$V_{др} = \mu_e E,$$

де μ_e — рухливість електронів, E — напруженість поля на плазмі.

Напруженість поля на плазмі E розраховували за формулою:

$$E = U_{пл}/d,$$

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

Температура електронів у газорозрядній плазмі випромінювача визначали за формулою, наведеною в [21]:

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

де ε — середня енергія електронів, k — стала Больцмана, T — температура в градусах Кельвіна.

Розглянемо результати визначення параметрів плазми для відстані між електродами рівним 2 мм.

На рисунку 10 представлено залежності середньої енергії електронів у плазмі парогазової суміші Ar:Cu = 6700:100 Па за загального тиску $p = 6800$ кПа від приведеної напруженості електричного поля. Середня енергія електронів розряду майже лінійно збільшується від 0,7763 до 32,89 еВ у разі зростання параметра E/N від 1 до 2500 Тд (рис. 10).

У таблиці 2 приведено результати розрахунку транспортних характеристик електронів: середні енергії (ε , еВ), температура (T , К), швидкість дрейфу ($V_{др}$, м/с) і концентрація електронів (N_e , м⁻³) у

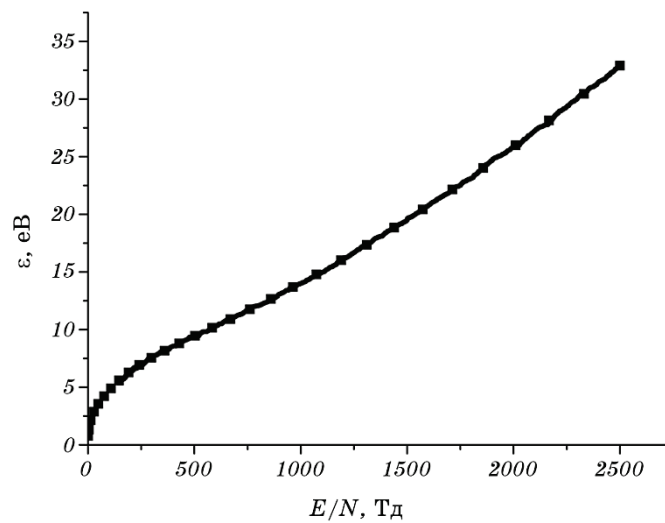


Рис. 10. Залежності середньої енергії електронів у плазмі парогазової суміші Ar:Cu = 6700:100 Па за загального тиску $p = 6800$ Па у приведеній напруженості електричного поля.

Fig. 10. Dependences of the mean electron energy in the plasma of a vapour-gas mixture Ar:Cu = 6700:100 Pa at a total pressure of $p = 6800$ Pa on the reduced electric field strength.

суміші парів аргону з міддю для міжелектродного проміжку 2 мм.

Для значень приведені напруженості електричного поля 2435 і 1218 Тд, які мають місце за 60 і 150 нс від початку пробую міжелектродного проміжку (значення амплітуди імпульсних напруг зменшуються від 8000 до 4000 В, а амплітуда струму збільшується від 20 до 170 А (рис. 4), середні енергії електронів склали величини 32,89 і 16,02 еВ відповідно, їхні найбільші енергії відповідали величинам 1289,0 і 443,8 еВ, температура електронів 381524 і 185832 К, концентрація електронів — $5,6 \cdot 10^{18}$ і $8,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ за густини

ТАБЛИЦЯ 2. Транспортні характеристики електронів у розряді в суміші аргону з парама міді за співвідношення складових 6700:100 Па.

TABLE 2. Transport characteristics of electrons in the discharge in the mixture of argon with vapour of copper at the component ratio 6700:100 Pa.

t , нс	E/N , Тд	Суміш: Ar:Cu = 6700:100 Па			
		ϵ , eV	T , К	$V_{др}$, м/с	N_e , м^{-3}
60	2435	32,89	381524	$1,1 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^{18}$
150	1218	16,02	185832	$6,4 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^{19}$

струму $1,02 \cdot 10^6$ і $8,67 \cdot 10^6$ А/м² на поверхні електрода джерела площею $0,196 \cdot 10^{-4}$ м²). Значення швидкості руху дрейфа електронів $1,1 \cdot 10^6$ і $6,4 \cdot 10^5$ м/с відповідно для напруженості поля на плазмі $4 \cdot 10^6$ і $2 \cdot 10^6$ В/м, яка досягається за 60 та 150 нс з початку пробую міжелектродного проміжку (табл. 2).

На рисунку 11 приведено залежність питомих потужностей втрат розряду на непружні (2) та пружні (1) від приведеної напруженості електричного поля для суміші аргон, мідь за міжелектродного проміжку 2 мм. Спостерігається збільшення потужності зі зростанням значень приведенного електричного поля як для непружних процесів, так і для пружних. Питомі потужності для приведених напруженостей електричного поля, за яких ми проводили експерименти, склали такі величини: $0,1300 \cdot 10^{-15}$ і $0,4710 \cdot 10^{-12}$ еВ·м³/с для значення приведенної напруженості електричного поля, рівній 1218 Тд, а також $0,2792 \cdot 10^{-15}$ і $0,1190 \cdot 10^{-11}$ еВ·м³/с для значення приведенної напруженості електричного поля, рівній 2435 Тд (табл. 3).

Розглянемо, результати досліджень параметрів плазми для відстані між електродами рівній 7 мм. На рисунку 12 представлено залежності середньої енергії електронів у плазмі парогазової суміші Ar:Cu = 6700:100 Па за загального тиску $p = 6800$ Па від приведеної напруженості електричного поля.

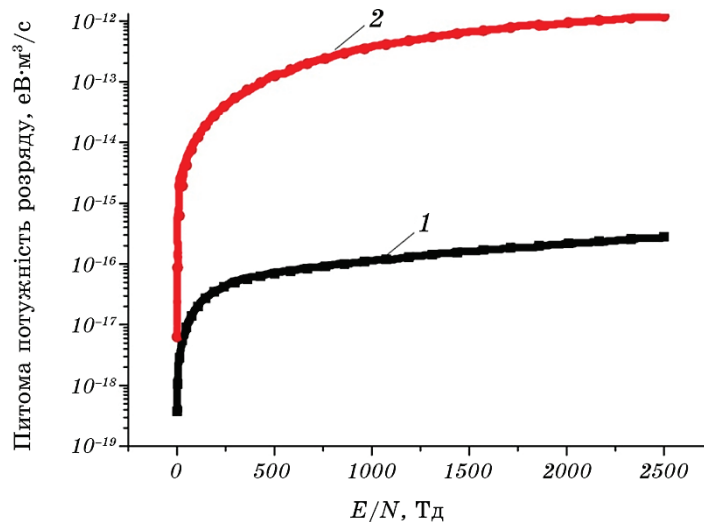


Рис. 11. Залежність питомої потужності розряду на пружні (1) і непружні (2) процеси від приведеної напруженості електричного поля для суміші аргон, мідь за міжелектродного проміжку 2 мм.

Fig. 11. The dependency of the specific power of the discharge on the elastic (1) and inelastic (2) processes on the reduced electric field for a mixture of argon, copper at an interelectrode gap of 2 mm.

Середня енергія електронів розряду лінійно збільшується від 0,7763 до 4,735 еВ зі зростанням приведеної напруженості електричного поля від 1 до 100 Тд (рис. 12). Для значень приведеної напруженості електричного поля 52 і 18 Тд, які були за 60 і 150 нс від початку пробую міжелектродного проміжку (рис. 5), вони мали значення 3,677 і 2,439 еВ (табл. 4). Їхні найбільші енергії відповідали величинам 23,64 і 17,16 еВ відповідно.

Температура і швидкості дрейфу електронів зменшували свої величини від 42653,2 до 28292,4 К і від $8,9 \cdot 10^4$ до $5,6 \cdot 10^4$ м/с зі зміною параметра E/N від 52 до 18 Тд. Значення концентрації електронів незначно збільшувалися від $3,6 \cdot 10^{20}$ до $4,0 \cdot 10^{20}$ м⁻³ (табл. 4).

ТАБЛИЦЯ 3. Питомі потужності втрати розряду на пружні й непружні процеси для суміші аргон, мідь 6700:100 Па за міжелектродного проміжку 2 мм.

TABLE 3. Specific power losses on processes of elastic and inelastic processes of the mixture argon, copper 6700:100 Pa at an interelectrode gap of 2 mm.

E/N , Тд	Пружні, потужність/ N , еВ·м ³ /с	Непружні, потужність/ N , еВ·м ³ /с
1218	$0,1300 \cdot 10^{-15}$	$0,4710 \cdot 10^{-12}$
2435	$0,2792 \cdot 10^{-15}$	$0,1190 \cdot 10^{-11}$

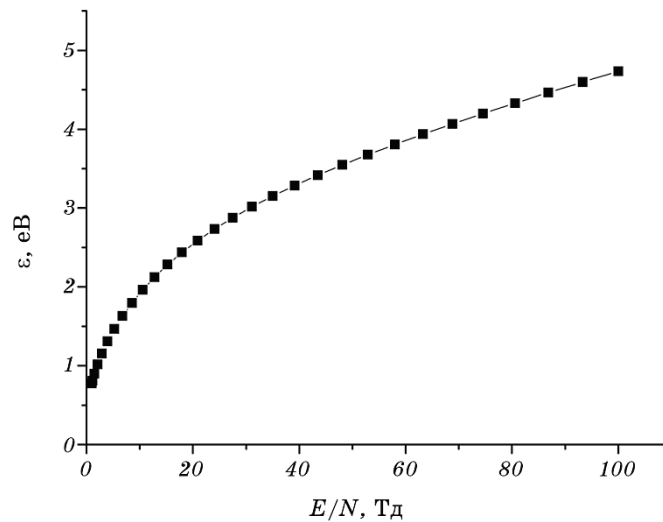


Рис. 12. Залежності середньої енергії електронів у плазмі парогазової суміші Ar:Cu = 6700:100 Па за загального тиску $p = 6800$ Па від приведеної напруженості електричного поля за міжелектродного проміжку 7 мм.

Fig. 12. Dependences of the mean energy of electrons in the plasma of a vapour-gas mixture Ar:Cu = 6700:100 Pa at a total pressure $p = 6800$ Pa on the reduced electric field strength at an interelectrode gap of 7 mm.

На рисунку 13 приведено залежність питомих потужностей втрат розряду на пружні (1) і непружні (2) процеси зіткнень електронів з компонентами суміші у газорозрядній плазмі від приведеної напруженості електричного поля. Спостерігається збільшення потужностей зі зростанням значень приведенного електричного поля як для непружних процесів, так і для пружних.

Питомі потужності для приведених напруженостей електричного поля за 60 і 150 нс від початку пробую міжелектродного проміжку

ТАБЛИЦЯ 4. Транспортні характеристики електронів у розряді в суміші аргону з парами міді за співвідношення складових 6700:100 Па і міжелектродного проміжку 7 мм.

TABLE 4. Transport characteristics of electrons in the discharge in a mixture of argon with copper vapour at a ratio of 6700:100 Pa and interelectrode gap of 7 mm.

t , нс	E/N , Тд	Суміш Ar:Cu = 6700:100 Па			
		ϵ , еВ	T , К	$V_{др}$, м/с	N_e , м ⁻³
60	52	3,677	42653,2	$8,9 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{20}$
150	18	2,439	28292,4	$5,6 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^{20}$

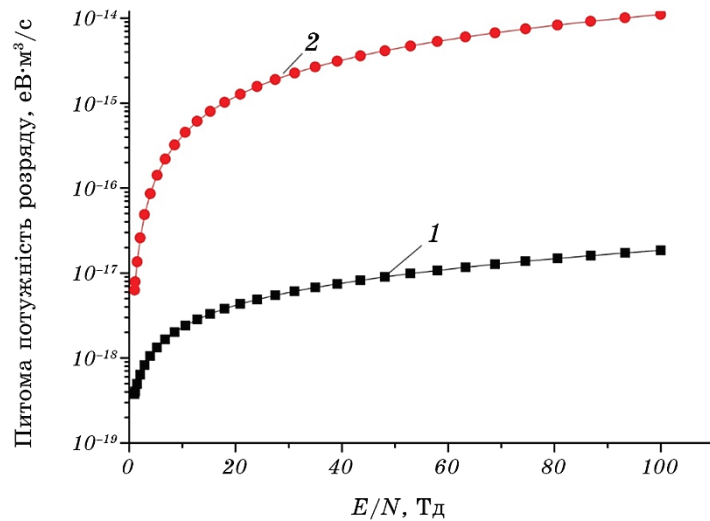


Рис. 13. Залежність питомої потужності розряду на пружні (1) і непружні (2) процеси від приведеної напруженості електричного поля для суміші аргон, мідь за міжелектродного проміжку 7 мм.

Fig. 13. Dependency of the specific power of the discharge on elastic (1) and inelastic (2) processes on the reduced electric field strength for an argon-copper mixture with an interelectrode gap of 7 mm.

ТАБЛИЦЯ 5. Питомі потужності втрати розряду на пружні й непружні процеси для суміші аргон, мідь = 6700:100 Па за міжелектродного проміжку 7 мм.

TABLE 5. Specific losses of the discharge power on elastic and inelastic processes on mixture of argon and copper = 6700:100 Pa at an interelectrode gap of 7 mm.

t , нс	E/N , Тд	Пружні, потужність/ N , еВ·м ³ /с	Непружні, потужність/ N , еВ·м ³ /с
60	52	$0,9839 \cdot 10^{-17}$	$0,4696 \cdot 10^{-14}$
150	18	$0,3801 \cdot 10^{-17}$	$0,1022 \cdot 10^{-14}$

мали такі величини: $0,9839 \cdot 10^{-17}$ і $0,4696 \cdot 10^{-14}$ еВ·м³/с для значення приведеної напруженості електричного поля, рівній 52 Тд, і $0,3801 \cdot 10^{-17}$ і $0,1022 \cdot 10^{-14}$ еВ·м³/с для приведеної напруженості електричного поля, рівній 18 Тд (табл. 5).

Для констант швидкостей збудження енергетичних рівнів атомів Аргону і Купруму з енергіями порога $E_{\text{пор}}$: 11,5 еВ (Ar), 1,5 еВ (Cu), 1,5 еВ (Cu), 3,8 еВ (Cu), 5,1 еВ (Cu) спостерігається наступна закономірність — більші значення для меншого міжелектродного проміжку (2 мм), ніж для більшого міжелектродного проміжку (7 мм) (табл. 6). Окрім того, константи швидкості в основному є більшими для значень приведеної напруженості електричного поля, які були за 60 нс з початку пробою міжелектродного проміжку.

Такі закономірності пов'язані з функціями розподілу електронів та ефективними перерізами збудження електронних рівнів атомів, які є більшими для приведеної напруженості електричного поля, що спостерігається за 60 нс з початку пробою міжелектродного проміжку в умовах нашого експерименту.

ТАБЛИЦЯ 6. Константи швидкостей збудження атомів аргону і міді за міжелектродного проміжку 2 і 7 мм у суміші аргон, мідь = 6700:100 Па.

TABLE 6. Rate constants of excitation of argon and copper atoms at an interelectrode gap of 2 and 7 mm in a mixture of argon, copper = 6700 Pa:100 Pa.

t , нс	E/N , Тд	$E_{\text{пор}}(\text{Ar}) =$ $= 11,5 \text{ eV}$	$E_{\text{пор}}(\text{Cu}) =$ $= 1,5 \text{ eV}$	$E_{\text{пор}}(\text{Cu}) =$ $= 1,5 \text{ eV}$	$E_{\text{пор}}(\text{Cu}) =$ $= 3,8 \text{ eV}$	$E_{\text{пор}}(\text{Cu}) =$ $= 5,1 \text{ eV}$
Міжелектродний проміжок 2 мм						
60	2435	$0,2771 \cdot 10^{-13}$	$0,2284 \cdot 10^{-13}$	$0,1811 \cdot 10^{-13}$	$0,9721 \cdot 10^{-12}$	$0,2852 \cdot 10^{-15}$
150	1218	$0,1380 \cdot 10^{-13}$	$0,2889 \cdot 10^{-13}$	$0,2283 \cdot 10^{-13}$	$0,8540 \cdot 10^{-12}$	$0,2265 \cdot 10^{-15}$
Міжелектродний проміжок 7 мм						
60	52	$0,1099 \cdot 10^{-17}$	$0,7973 \cdot 10^{-14}$	$0,5711 \cdot 10^{-14}$	$0,7729 \cdot 10^{-13}$	$0,2127 \cdot 10^{-16}$
150	18	$0,1067 \cdot 10^{-20}$	$0,2869 \cdot 10^{-14}$	$0,1938 \cdot 10^{-14}$	$0,1634 \cdot 10^{-13}$	$0,3648 \cdot 10^{-17}$

6. ВИСНОВКИ

Таким чином, встановлено, що за тиску аргону 6,7 кПа між електродами з міді за міжелектродних відстаней 2 і 7 мм запалювався досить однорідний у просторі перенапружений наносекундний розряд з імпульсною електричною потужністю до 0,6 МВт, а енергетичний внесок у плазму за один імпульс досягав 30 мДж.

Дослідження спектральних характеристик плазми на основі паро-газових сумішей мідь-аргон показало, що найінтенсивнішими були спектральні лінії атома і однозарядного йона Купруму в інтервалі 200–225 нм, спектральні лінії атомів і однозарядних йонів Алюмінію в інтервалі довжин хвиль 225–310 нм. З йонних спектральних ліній у спектрі виділялась лінія 618,86 нм Cu II . Автоматичне опромінення піккладки і зародків плівки на підкладці інтенсивним УФ-випромінюванням атомів і йонів Цинку, Купруму і Феруму плазми наносекундного розряду [3] перспективне для впливу на електричні характеристики синтезованих плівок на основі оксидів перехідних металів, зокрема, на зменшення їхнього опору [6].

Із розгляду динаміки випромінювання на резонансних переходах атома Купруму впливає пріоритетність електронних процесів заселення верхніх енергетичних рівнів для цих спектральних ліній, а також важливість процесів самопоглинання у післясвітінні високовольтного наносекундного розряду, який досліджували.

Максимальне значення середньої потужності УФ-випромінювання за $p(\text{Ar}) = 6,7$ кПа спостерігалось для діапазону УФ-А, а абсолютні густини випромінювання у різних УФ-діапазонах досягали: УФ-С (200–280 нм) — 6,1 мВт/м², УФ-В (280–315 нм) — 3,8 мВт/м², УФ-А (315–400 нм) — 7,1 мВт/м² ($U = 20$ кВ, $f = 1$ кГц). Найефективнішим було збільшення частоти повторення імпульсів до 1000 Гц, а не збільшення величини зарядної напруги на робочому конденсаторі високовольтного модулятора. Проте під час роботи джерела УФ-випромінювання у діапазоні частот 300–1000 Гц, необхідно використовувати примусове охолодження розрядного пристрою.

Дослідження параметрів плазми для умов експерименту дало можливість встановити, що за міжелектродних проміжків 2 і 7 мм спостерігається зменшення значень як транспортних характеристик, так і потужностей втрат на пружні і непружні процеси, а також константи збудження електронних рівнів атомів Купруму і Аргону для міжелектродного проміжку 7 мм. Окрім того, встановлено, що для менших часів (60 нс) від початку пробою міжелектродного проміжку значення параметрів плазми були вищими по відношенню до більших часів (150 нс). Такі закономірності пов'язані зі зміною функцій розподілу електронів і значень ефективних перезів взаємодії електронів з атомами Аргону і Купруму для плазми з різними міжелектродними проміжками, за яких діє різна приведена на-

пруженість електричного поля.

Параметри плазми в паро-газових сумішах аргону і міді можуть бути застосовані для уточнення механізму збудження атомів і йонів металів, а також удосконалення теоретичних моделей та розрахунків перетворення енергії зовнішнього джерела у випромінювання газо-парових компонент у перенапруженому розряді.

Автори висловлюють подяку О. Й. Міні за допомогу в постановці експериментів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, A. A. Malinina, A. N. Malinin, V. V. Danilo, M. Yu. Sichka, and I. V. Shevera, *American J. Mechanical Mater. Engineering*, **2**, No. 1: 8 (2018).
2. Alexander Shuaibov, Alexander Minya, Antonina Malinina, Alexander Malinin, Roman Golomd, Igor Shevera, Zoltan Gomoki, and Vladislav Danilo, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, **9**: 035018 (2018).
3. О. К. Шуайбов, А. Й. Міня, М. П. Чучман, А. О. Малініна, О. М. Малінін, В. В. Данило, З. Т. Гомокі, *Укр. фіз. журн.*, **63**, № 9: 790 (2018).
4. Г. А. Месяц, *Усп. физических наук*, **165**, № 6: 601 (1995).
5. А. К. Шуайбов, Г. Є. Ласлов, Я. Я. Козак, *Оптика та спектроскопія*, **116**, № 4: 552 (2014).
6. А. Х. Абдуев, А. Ш. Асваров, А. К. Ахметов, Р. М. Эмиров, *Письма в ЖТФ*, **43**, вып. 22: 40 (2017).
7. В. Г. Мельников, *Защита металлов*, **41**, № 2: 168 (2005).
8. Х. В. Аллахвердиева, *Изв. высш. учебн. заведений. Хим. технологии*, **63**, № 10: 71 (2020).
9. Л. Ф. Абаева, В. И. Шумский, Е. Петрицкая, Д. А. Рогаткин, П. Любченко, *Алманах клинической медицины*, № 22: 10 (2010).
10. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
11. А. Стриганов, Н. С. Свентицкий, *Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов* (Москва: Атомиздат: 1966).
12. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*.
13. Р. Пирс, А. Хайдон, *Идентификация молекулярных спектров* (Москва: Из-во ИЛ: 1949).
14. Dmitry Levko and Laxminarayan L. Raja, *Physics of Plasmas*, **22**: 123518 (2016).
15. А. Н. Гомонай, *Журнал прикладной спектроскопии*, **82**, № 1: 17 (2018).
16. В. М. Герман, Т. Абдулин, *Вестник СПбГУ*, **4**, № 1: 166 (2014).
17. Д. В. Белоplotov, В. Ломаев, Д. А. Сорокин, В. Ф. Тарасенко, *Физический журнал. Серия конференций*, **652**: 012012 (2015).
18. M. Lomaev, D. Beloplotov, D. Sorokin, and V. Tarasenko, *32nd ICPIIC (July 26–31, 2015)* (Romania, Jasi: 2015).
19. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **14**:

- 722 (2005).
20. *BOLSIG+ Software*.
21. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (Москва: Наука: 1987).

REFERENCES

1. A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, A. A. Malinina, A. N. Malinin, V. V. Danilo, M. Yu. Sichka, and I. V. Shevera, *American J. Mechanical Mater. Engineering*, **2**, No. 1: 8 (2018).
2. Alexander Shuaibov, Alexander Minya, Antonina Malinina, Alexander Malinin, Roman Golomd, Igor Shevera, Zoltan Gomoki, and Vladislav Danilo, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, **9**: 035018 (2018).
3. O. K. Shuaibov, A. Y. Minya, M. P. Chuchman, A. O. Malinina, O. M. Malinin, V. V. Danilo, and Z. T. Gomoki, *Ukrainian Journal of Physics*, **63**, No. 9: 790 (2018) (in Ukrainian).
4. G. A. Mesyats, *Physics-Uspexhi*, **38**, No. 6: 567 (1995).
5. A. K. Shuaibov, G. E. Laslov, and Y. Y. Kozak, *Opt. Spectrosc.*, **116**, No. 4: 552 (2014).
6. A. K. Abduev, A. S. Asvarov, A. K. Akhmetov, R. M. Emirov, and V. V. Belyaev, *Tech. Phys. Lett.*, **43**, No. 22: 1016 (2017).
7. V. G. Melnikov, *Zashchita Metallov* [Protection of Metals], **41**, No. 2: 168 (2005) (in Russian).
8. Kh. V. Allakhverdieva, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.*, **63**, No. 10: 71 (2020) (in Russian).
9. L. F. Abayeva, V. I. Shumsky, E. N. Petrickaya, D. A. Rogatkin, and P. N. Lyubchenko, *Almanakh Klinicheskoy Meditsiny* [Almanac of Clinical Medicine], No. 22: 10 (2010) (in Russian).
10. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
11. A. R. Striganov and N. S. Sventitsky, *Tablitsy Spektalnykh Liniy Neytralnykh i Ionizovannykh Atomov* [Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms] (Moscow: Atomizdat: 1966) (in Russian).
12. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*.
13. R. Pierce and A. Haydon, *Identifikatsiya Molekulyarnykh Spektrov* [Identification of Molecular Spectra] (Moscow: Iz-vo IL: 1949) (in Russian).
14. Dmitry Levko and Laxminarayan L. Raja, *Physics of Plasmas*, **22**: 123518 (2016).
15. A. N. Gomonai, *Zhurnal Prikladnoy Spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], **82**, No. 1: 17 (2018) (in Russian).
16. V. M. Nemeč and T. G. Abdulin, *Vestnik SPbGU*, **4**, No. 1: 166 (2014) (in Russian).
17. D. V. Beloplotov, V. I. Lomaev, D. A. Sorokin, and V. F. Tarasenko, *Fizicheskii Zhurnal. Seriya Konferentsiy* [Journal of Physics. Conference Series], **652**: 012012 (2015) (in Russian).
18. M. Lomaev, D. Beloplotov, D. Sorokin, and V. Tarasenko, *32nd ICPIC (July 26–31, 2015)* (Romania, Jasi: 2015).

1706 О. К. ШУАЙБОВ, А. О. МАЛІНІНА, Р. В. ГРИЦАК, О. М. МАЛІНІН та ін.

19. G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **14**: 722 (2005).
20. *BOLSIG+ Software*.
21. Yu. P. Raiser, *Fizika Gazovogo Razryada* [Physics of Gas Discharge] (Moscow: Nauka: 1987) (in Russian).