

PACS numbers: 51.50.+v, 52.77.-j, 52.80.Tn, 79.60.Jv, 81.15.Gh, 81.16.-c, 82.33.Xj

## Характеристики та параметри плазми газорозрядного реактора з «холодної» синтези біметалевих наночастинок Cu–Zn в аргоні

О. К. Шуаїбов, А. О. Малініна, О. М. Малінін, О. Й. Миня, Р. В. Грицак

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,  
пл. Народна, 3,  
88000 Ужгород, Україна

Наведено характеристики перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді й електродами з цинку в аргоні. В процесі мікро-вибухів неоднорідностей на робочих поверхнях металевих електрод у сильному електричному полі у розрядний проміжок вносилися пари міді та цинку за рахунок утворення ектонів. Це може приводити до синтезу тонких плівок на основі наночастинок цинку, міді та біметалевих наночастинок «цинк–мідь» в умовах опромінювання підкладки з плівкою в процесі її синтезу УФ-випромінюванням плазми розряду в парах міді та цинку. Методом числового моделювання параметрів плазми розряду в газопаровій суміші на основі цинку, міді й аргону, який заснований на розв'язанні Больцманнова кінетичного рівняння для функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ), розраховано параметри плазми (температуру  $T_e$  і густину  $N_e$  електронів; питомі втрати потужності розряду на основні електронні процеси та константи швидкості електронних реакцій) в залежності від величини відношення  $E/N$  (де  $E$  — напруженість електричного поля,  $N$  — повна концентрація частинок розряду), а також із варіюванням парціального тиску аргону та пари цинку і міді.

The characteristics of an overstressed nanosecond discharge between the copper electrode and the zinc electrode in argon are presented. In the process of microexplosions of inhomogeneities on the working surfaces of metal electrodes in a strong electric field, copper and zinc vapours are introduced into the discharge gap due to the formation of ectons. This can lead to the synthesis of thin films based on the zinc and copper nanoparticles and the zinc–copper bimetallic nanoparticles under conditions of irradiation of the substrate with the film during its synthesis by UV radiation from the discharge plasma in the copper and zinc vapours. Based on the solution of the Boltzmann kinetic equation for the electron energy distribution function (EEDF) with using the method of numerical simulation of

the parameters of the discharge plasma in a gas–vapour mixture based on zinc, copper and argon, the plasma parameters (temperature  $T_e$  and density  $N_e$  of electrons, discharge power losses per basic electronic processes and rate constants of electronic reactions) are calculated depending on the ratio  $E/N$  (where  $E$  is the electric field strength,  $N$  is the total concentration of discharge particles) and variations of the partial pressure of argon and the zinc and copper vapour.

**Ключові слова:** перенапружений наносекундний розряд, мідь, цинк, тонкі плівки, УФ-випромінення, параметри плазми.

**Keywords:** overstressed nanosecond discharge, copper, zinc, thin films, UV radiation, plasma parameters.

*(Отримано 13 квітня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Композиційні матеріали на основі металів (Cu, Zn, Ag, ...) широко використовуються для виготовлення електрод і контактів комутувальних приладів (реле, комутаторів і розмикачів). Зокрема, це — контактні матеріали системи срібло–оксид металу [1].

Проблему взаємозв'язку об'ємного зношування та коефіцієнта тертя композитних сполук було досліджено у праці [2], де вивчався вплив вмісту міді на фрикційні властивості спечених порошкових матеріалів систем залізо–мідь, що дало змогу виявити й обґрунтувати зв'язок об'ємного зношування та коефіцієнта тертя спечених порошкових матеріалів залізо–мідь з товщиною вторинних структур на поверхні тертя, а також середнім діаметром залізної складової.

В [3] наведено результати діагностики плазми дугового розряду між електродами з композиційного матеріалу Ag–CuO в повітрі. У припущенні наявності локальної термодинамічної рівноваги в дуговому розряді розраховано концентрації металів у плазмі. Встановлено, що зростання струму до 30 А викликає збільшення вмісту металів у плазмі дугового розряду між електродами з комутаційного матеріалу Ag–CuO майже на порядок з одночасним зменшенням кількісного співвідношення срібла до міді.

Умови синтезу тонких плівок четверного халькопїриту ( $\text{CuAlInSe}_2$ ) з продуктів деструкції електрод з алюмінію та потрійного халькопїриту ( $\text{CuInSe}_2$ ) у повітрі [4] та різних сумішах азоту з киснем [5] і відповідні параметри плазми досліджувалися в перенапруженому наносекундному розряді між електродами з алюмінію та полікристалічної сполуки  $\text{CuInSe}_2$ . Особливістю таких реакторів є те, що вони працюють за температур розрядної камери, близьких до кімнатної; тому синтезу наноструктур мож-

на вважати «холодною» [6].

Для оптимізації синтези плівкових наноструктур і нанопорошків на основі цинку та міді важливо провести оптимізацію роботи подібного газорозрядного реактора з використанням аргону різного тиску.

На даний час відсутні характеристики та параметри плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку та міді в інертних газах високого тиску, що стримує застосування даного типу розряду для одержання тонких плівок і нанопорошків цинку, міді та біметалевих сполук мідь–цинк.

Тонкі наноструктуровані плівки на основі цинку й міді та відповідні нанопорошки характеризуються вираженими бактерицидними властивостями, що важливо для застосування їх у біомедичній інженерії, медицині та харчовій промисловості.

В даній статті наводяться результати дослідження електричних і емісійних характеристик перенапруженого наносекундного розряду в аргоні між електродами з цинку та міді, який може бути застосований для «холодної» синтезу наночастинок або мікро- й нанопорошків цинку, міді та біметалевих наноструктур і порошоків Cu–Zn. Наведено результати моделювання параметрів плазми розряду, яких було одержано в результаті числового розв'язання Больцманнова кінетичного рівняння для функції розподілу електронів за енергіями: енергії та температури електронів, швидкості дрейфу електронів, питомих втрат енергії розряду на основні електронні процеси та констант швидкості електронних процесів у плазмі на основі газопарової суміші цинк–мідь–аргон.

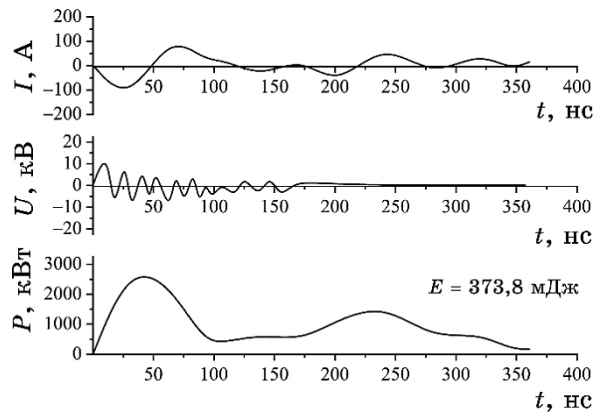
## 2. УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗРЯДУ

Дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду в аргоні проводилося на розрядному модулі, характеристики якого та техніку й методику експерименту наведено в [6]. Розряд між електродами з міді й електродами з цинку запалювався в герметичній камері з оргскла за віддалі між електродами  $d = 2$  мм.

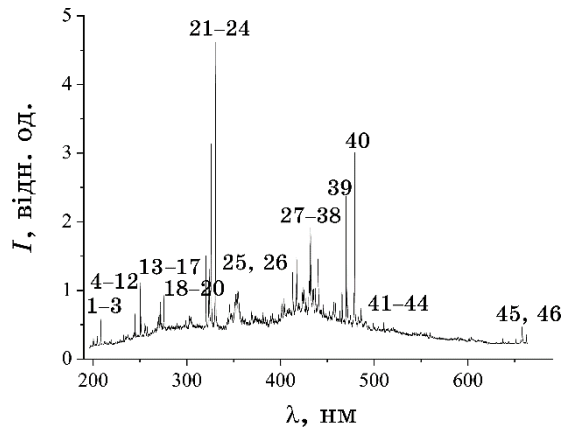
Між кінчиками електрод запалювався однорідний розряд тривалістю близько 100–150 нс із амплітудою імпульсів струму у 50–200 А і об'ємом плазми у 10–500 мм<sup>3</sup>. Об'єм розряду залежав від частоти слідування імпульсів напруги. Режим «точкового розряду» досягався лише за частот імпульсів напруги в діапазоні  $f = 40–150$  Гц.

Розрядний проміжок був перенапружений, що створювало сприятливі умови для формування пучка електронів-втікачів високої енергії та супутнього рентгенівського випромінення [7].

На рисунку 1 наведено осцилограми імпульсів струму, напруги й імпульсну потужність перенапруженого наносекундного розряду в аргоні за тиску у 200 кПа між електродами з міді та цинку із віддалю між ними у 2 мм. За тиску аргону у 200 кПа перепад напруги різної полярності в початковій фазі розряду для  $t = 10\text{--}30$  нс досягав 15 кВ, а струму —  $\pm 80\text{--}100$  А. Максимальна величина електричної імпульсної потужності досягала 2,5 МВт для  $t = 50$  нс. Основний енергетичний внесок у плазму здійснювався протягом перших 100 нс з моменту запалювання перенапруженого наносекундного розряду. Енергія одного розрядного імпульсу



**Рис. 1.** Осцилограми імпульсів струму, напруги й імпульсна потужність перенапруженого наносекундного розряду в аргоні за тиску  $p = 202$  кПа і  $d = 2$  мм (частота розрядних імпульсів  $f = 80$  Гц).<sup>1</sup>



**Рис. 2.** Спектр випромінення перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді та цинку за  $p(\text{Ar}) = 50,5$  кПа.<sup>2</sup>

досягала  $\approx 373,8$  мДж (рис. 1). Із зменшенням тиску аргону до 50,5 кПа внесок енергії в плазму за один розрядний імпульс зменшився приблизно в три рази (до  $E = 123$  мДж).

Спектри випромінення перенапруженого наносекундного розряду для  $p(\text{Ar}) = 50,5$  кПа між електродами з цинку та міді наведено на рис. 2. Результати ідентифікації даного спектру випромінення показали наявність інтенсивних спектральних ліній атомів однозарядних йонів Цинку та Купруму в УФ-діяпазоні спектру 200–330 нм (табл. 1).

Особливістю всіх спектрів випромінення розряду в аргоні є наявність континууму, на фоні якого спостерігалися всі спектральні лінії та смуги. Природа даного континууму в умовах нашого

**ТАБЛИЦЯ 1.** Результати ідентифікації спектрів випромінення плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродом з міді й електродом з цинку для  $p(\text{Ar}) = 50,5$  кПа.<sup>3</sup>

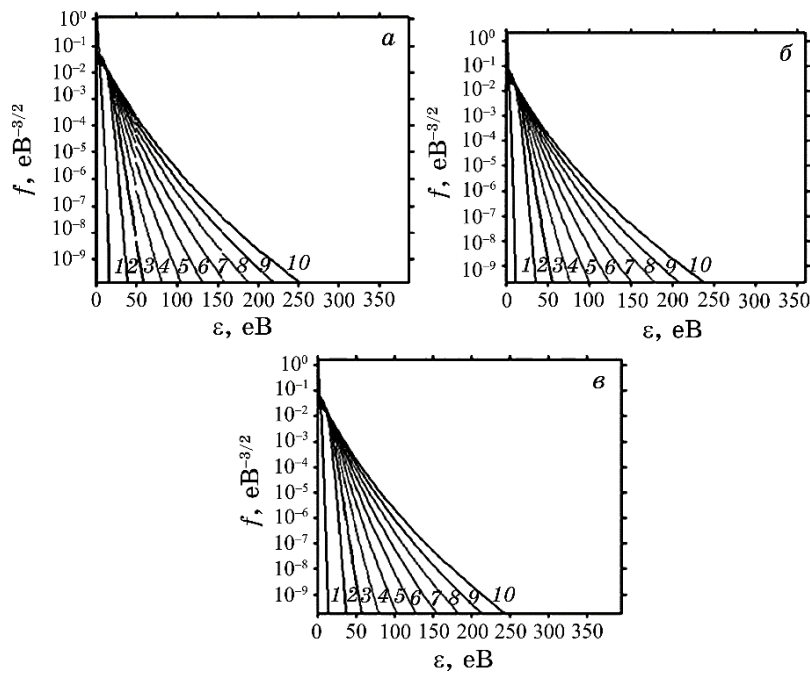
№	$\lambda_{\text{табл}}$ , нм	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}$ , еВ	$E_{\text{верх.}}$ , еВ	Терм <sub>нижн</sub>	Терм <sub>верх</sub>
1	202,54	Zn II	0,00	6,11	$3d^{10}4s^2S_{1/2}$	$3d^{10}4p^2P_{3/2}$
2	203,93	Zn II	7,77	13,85	$3d^94s^2^2D_{5/2}$	$3d^9(^2D)4s4p(^3P)^4D_{5/2}$
3	207,99	Zn II	14,23	20,19	$3d^9(^2D)4s4p(^3P)^2D_{5/2}$	$3d^94s(^3D)5s^4D_{3/2}$
4	213,59	Cu II	2,72	8,52	$4s^3D$	$4p^3F^0$
5	216,50	Cu I	0,00	5,72	$4s^2S$	$4p'^2D^0$
6	217,49	Cu II	8,92	14,61	$4p^1F^0$	$4d^1G$
7	218,17	Cu I	0,00	5,68	$4s^2S$	$4p'^2P^0$
8	226,30	Cu I	1,64	7,12	$4s^2^2D$	$7p^2P^0$
9	229,43	Cu II	2,83	8,23	$4s^3D$	$4p^3P^0$
10	230,31	Cu I	1,64	7,02	$4s^2^2D$	$4p''^2D^0$
11	236,98	Cu II	3,26	8,49	$4s^1D$	$4p^3F^0$
12	244,16	Cu I	0,00	5,08	$4s^2S$	$4p'^4P^0$
13	255,79	Zn II	6,11	10,96	$3d^{10}4p^2P_{3/2}$	$3d^{10}5s^2S_{1/2}$
14	258,24	Zn I	4,02	8,82	$3d^{10}4s4p^3P_1$	$3d^{10}4s6d^3D_2$
15	268,41	Zn I	4,02	8,64	$3d^{10}4s4p^3P_1$	$3d^{10}4s7s^3S_1$
16	271,24	Zn I	4,07	8,64	$3d^{10}4s4p^3P_2$	$3d^{10}4s7s^3S_1$
17	275,64	Zn I	4,00	8,50	$3d^{10}4s4p^3P_0$	$3d^{10}4s5d^3D_1$
18	282,43	Cu I	1,39	5,78	$4s^2^2D$	$4p'^2D^0$
19	299,73	Cu I	1,64	5,78	$4s^2^2D$	$4p'^2D^0$
20	303,61	Cu I	1,64	5,72	$4s^2^2D$	$4p'^2D^0$
21	320,82	Cu I	1,64	5,51	$4s^2^2D$	$4p'^4D^0$
22	324,31	Cu I	0	3,82	$4s^2S$	$4p^2P^0$
23	327,39	Cu I	0	3,39	$4s^2S$	$4p^2P^0$
24	330,25	Zn I	4,02	7,78	$3d^{10}4s4p^3P_1$	$3d^{10}4s4d^3D_2$

експерименту пов'язана з тепловим і рекомбінаційним випромінюваннями плазми.

Наявність випромінювання в спектральному діапазоні 200–330 нм дасть змогу проводити осадження металевих і композитних плівок з автоматичним асистуванням процесу синтезу [9], що уможливило одержати плівки з меншим опором [9].

### 3. ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ

Параметри плазми визначалися та розраховувалися як повні інтеграли від функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ). ФРЕЕ знаходилися шляхом розв'язання Больцманова кінетичного рівняння в двочленному наближенні [10]. Розрахунки ФРЕЕ проводилися з використанням програми [11]. На основі одержаних ФРЕЕ визначено ряд параметрів плазми в залежності від величини зведеного електричного поля (відношення напруженості електричного поля  $E$  до загальної концентрації атомів Аргону та невеликої домішки парів міді  $N$ ). Діапазон зміни параметра  $E/N = 1-1000$  Тд ( $1 \cdot 10^{-17}-10^{-14}$  В·см<sup>2</sup>) включав величини парамет-



**Рис. 3.** Функції розподілу електронів за енергіями у розряді на сумішах: Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па (а), Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па (б), Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па (в).<sup>4</sup>

ра  $E/N$ , які були реалізовані в нашому експерименті. Для розряду в газопаровій суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па за загального тиску  $p = 202\ 850$  Па ці величини параметра  $E/N$  складали 102 Тд і 51 Тд для 10 нс і 25 нс від початку розряду відповідно (рис. 3); для розряду в газопаровій суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па за загального тиску  $p = 204,650$  кПа ці величини параметра  $E/N$  дорівнювали 101 Тд і 50,6 Тд; для розряду в газопаровій суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па за загального тиску  $p = 50\ 863$  Па ці величини параметра  $E/N$  дорівнювали 407 Тд і 203 Тд.

В інтегралі зіткнень електронів з атомами Аргону, Купруму та Цинку враховано наступні процеси: пружне розсіяння електронів на атомах Аргону, Купруму та Цинку, збудження енергетичного рівня атома Аргону (енергія порогу — 11,50 еВ), йонізацію атома Аргону (енергія порогу — 15,80 еВ), збудження енергетичних рівнів атома Купруму (енергії порогу: 1,500, 3,800, 5,100 еВ), йонізацію атома Купруму (енергія порогу — 7,724 еВ), збудження енергетичних рівнів атома Цинку (енергії порогу: 4,01, 4,08, 4,60, 5,02, 8,55, 8,82, 9,00, 9,10, 10,61, 17,00, 17,61, 23,55 еВ), йонізацію атома Цинку (енергія порогу — 9,40 еВ), електрон-електронні й електрон-йонні зіткнення. Ефективні перерізи процесів було взято з бази даних [11–15].

На рисунку 3, а, б, в наведено функції розподілу електронів для десятих значень зведеної напруженості електричного поля ( $E/N$ ) в діапазоні 1–1000 Тд у трьох газопарових сумішах Ar:Cu:Zn; в табл. 2 — значення параметра  $E/N$  та середні енергії електронів; на рис. 4 — залежність середньої енергії від зведеної напруженості електричного поля для суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па (подібна залежність середньої енергії електронів у плазмі від зведеної напруженості електричного поля є й для інших досліджених сумішей).

Збільшення параметра  $E/N$  приводило до росту кількості «швидких» електронів у розряді та зменшення густини електронів у діапазоні  $E/N = 1$ –1000 Тд.

Середня енергія електронів розряду в газопаровій суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па збільшувалася від 1,33 до 15,1 еВ (рис. 4); для суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па вона збільшувалася від 0,92 до 14,71 еВ, а для Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па вона також збільшувалася від 1,07 до 14,9 еВ із зростанням зведеної напруженості електричного поля від 1 до 1000 Тд. При цьому спостерігалася збільшення швидкості її зміни в діапазоні параметра  $E/N = 1$ –70 Тд.

У таблиці 3 наведено результати розрахунку транспортних характеристик електронів: середньої енергії ( $\varepsilon$ , еВ), температури ( $T$ , К) і швидкості дрейфу ( $V_{др}$ ) електронів для розряду в трьох су-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Значення параметра  $E/N$  та середні енергії електронів для функцій розподілу електронів за енергіями у розряді.<sup>5</sup>

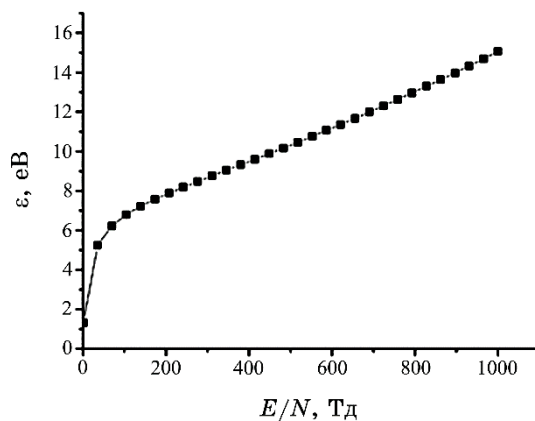
Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E/N, \text{Тд}$	1	112	223	334	445	556	667	778	889	1000
$\varepsilon, \text{eV}$	1,33	6,89	8,02	8,95	9,86	10,8	11,9	12,8	13,9	15,1

Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E/N, \text{Тд}$	1	112	223	334	445	556	667	778	889	1000
$\varepsilon, \text{eV}$	0,92	6,03	7,53	8,58	9,53	10,5	11,5	12,5	13,6	14,7

Суміш Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E/N, \text{Тд}$	1	112	223	334	445	556	667	778	889	1000
$\varepsilon, \text{eV}$	1,07	6,58	7/86	8,82	9,75	10,7	11/7	12,7	13,8	14,9

**Рис. 4.** Залежність середньої енергії електронів у плазмі газопарової суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па за загального тиску  $p = 202\ 850$  Па від зведеної напруженості електричного поля.<sup>6</sup>

мішах парів міді та цинку з аргоном.

Спостерігалися наступні закономірності. Температура електронів максимальна (110 096 К) спостерігалася для суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па.

Вона зменшувалася зі збільшенням загального тиску в сумішах. Величина швидкості дрейфу електронів знаходиться в межах  $10^4$ – $10^5$  м/с для напруженості електричного поля на плазмі,



**ТАБЛИЦЯ 3.** Транспортні характеристики електронів для моментів часу 10 і 25 нс за напруженості електричного поля  $E = 5 \cdot 10^6$  В/м і  $2,5 \cdot 10^6$  В/м для розряду в газопарових сумішах: Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па, Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па і Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па.<sup>7</sup>

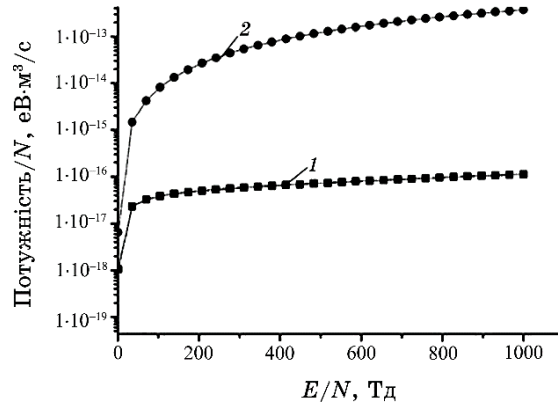
$t$ , нс	$E/N$ , Тд	Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па			
		$\varepsilon$ , еВ	$T$ , К	$V_{др}$ , м/с	$N_e$ , м <sup>-3</sup>
10	102	6,792	78 787	$8,4 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^{20}$
25	51	5,250	60 900	$6,2 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^{20}$
$t$ , нс	$E/N$ , Тд	Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па			
		$\varepsilon$ , еВ	$T$ , К	$V_{др}$ , м/с	$N_e$ , м <sup>-3</sup>
10	101	5,88	68 208	$9,3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{20}$
25	50,6	3,85	44 660	$8,9 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^{20}$
$t$ , нс	$E/N$ , Тд	Суміш Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па			
		$\varepsilon$ , еВ	$T$ , К	$V_{др}$ , м/с	$N_e$ , м <sup>-3</sup>
10	407	9,491	110 096	$2,7 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^{19}$
25	203	7,710	89 436	$1,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^{20}$

яка досягалася в моменти часу  $t = 10$  нс і 25 нс від початку пробою міжелектродного проміжку (значення амплітуди імпульсів напруги знижується до 5 000 В; рис. 1) для розряду в трьох сумішах аргону із парами міді та цинку. Найбільше її значення для суміші з меншим загальним тиском Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па і складає величини  $V_{др} = 2,7 \cdot 10^5$  м/с і  $1,5 \cdot 10^5$  м/с у моменти часу  $t = 10$  нс і 25 нс від початку пробою міжелектродного проміжку відповідно.

Значення максимальної концентрації електронів  $2,6 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> і  $5,1 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> за густини струму у  $3,57 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> і  $5,1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> відповідно на поверхні електроди джерела випромінювання ( $0,196 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>) для зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 102$  Тд, що було на розрядному проміжку на 10-й нс, та для зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 51$  Тд, що було на розрядному проміжку у  $t = 25$  нс, для розряду в суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па.

На рисунку 5 наведено залежності питомих втрат потужності розряду на непружні та пружні процеси зіткнень електронів із компонентами газопарової суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па у газорозрядній плазмі від зведеної напруженості електричного поля. Спостерігалось збільшення потужності втрат із зростанням зведеної напруженості електричного поля, як для пружних процесів (крива 1), так і для непружних процесів (крива 2). Для непружних процесів втрати розряду були більшими приблизно на два порядки. Подібна залежність спостерігалась і для інших досліджених сумішей.

В таблиці 4 наведено значення питомої потужності втрат розряду на пружні та непружні процеси зіткнень електронів із атомами Ar, Cu та Zn в плазмі парогазових сумішей Ar:Cu:Zn =



**Рис. 5.** Залежність питомої потужності втрат розряду на пружні та непружні процеси зіткнень електронів з атомами Ar, Cu та Zn від зведеної напруженості електричного поля в плазмі парогазової суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па за загального тиску  $p = 202\ 850$  Па.<sup>8</sup>

**ТАБЛИЦЯ 4.** Значення питомої потужності втрат розряду на пружні та непружні процеси зіткнень електронів з атомами Аргону, Купруму та Цинку в плазмі газопарових сумішей Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па, 202 650:1000:1000 Па, 50 663:100:100 Па для зведеної напруженості електричного поля на плазмі, яка досягалася в моменти часу  $t = 10$  нс і 25 нс від початку пробую міжелектродного проміжку.<sup>9</sup>

Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па		
$E/N$ , Тд	Пружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с	Непружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с
102	$0,3858 \cdot 10^{-16}$	$0,8211 \cdot 10^{-14}$
51	$0,2311 \cdot 10^{-16}$	$0,1463 \cdot 10^{-14}$
Суміш Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па		
$E/N$ , Тд	Пружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с	Непружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с
101	$0,2932 \cdot 10^{-16}$	$0,9512 \cdot 10^{-14}$
50,6	$0,1113 \cdot 10^{-16}$	$0,2180 \cdot 10^{-14}$
Суміш Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па		
$E/N$ , Тд	Пружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с	Непружні, потужність/ $N$ , eV·м <sup>3</sup> /с
407	$0,6581 \cdot 10^{-16}$	$0,8872 \cdot 10^{-13}$
203	$0,4842 \cdot 10^{-16}$	$0,2730 \cdot 10^{-13}$

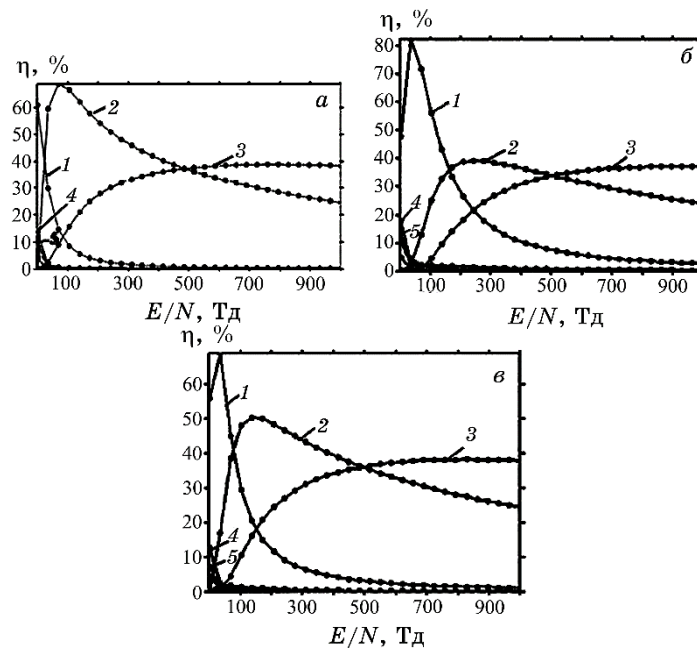
= 202 650:100:100 Па, 202 650:1000:1000 Па, 50 663:100:100 Па для зведеної напруженості електричного поля на плазмі, яка досягалася в моменти часу  $t = 10$  нс і 25 нс від початку пробною мі-  
желектродного проміжку. Спостерігається закономірність — істотне збільшення значень питомої потужності втрат розряду на пружні та непружні процеси у суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па з меншим загальним тиском ( $p = 50,863$  Па).

В суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па питомі втрати потужності розряду є максимальними для збудження електронами енергетичного рівня атома Ar (енергія порогу — 11,50 еВ) (рис. 5, а, крива 2), і вони складають величину 70% для  $E/N = 69,9$  Тд; менше значення (60%) для  $E/N = 1$  Тд у процесі збудження енергетичного рівня атома Cu (енергія порогу — 3,80 еВ). Ще менші значення питомої втрати потужності розряду мають: йонізація атомів Ar (38%) з  $E/N = 1000$  Тд (рис. 5, а, крива 3); пружне розсіяння на атомах Ar (13,9%) з  $E/N = 1$  Тд (рис. 6, а, крива 4); збудження енергетичного рівня атома Zn (10%) з  $E/N = 1$  Тд (енергія порогу — 4,00 еВ) (рис. 6, а, крива 5). Їхні максимальні значення знаходяться в діапазоні зміни зведеної напруженості 1–100 Тд (за виключенням втрати потужності для йонізації Ar, які досягають максимального значення у 38% для  $E/N = 1000$  Тд).

Максимальна втрата потужності розряду спостерігається в суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па для процесу збудження енергетичного рівня атома Купруму (енергія порогу — 3,80 еВ) (рис. 6, б, крива 1), і вона має значення у 82% для зведеної напруженості електричного поля у 51 Тд. Для збудження енергетичного рівня атома Цинку (енергія порогу — 4,00 еВ) (рис. 6, б, крива 5) втрати потужності теж є максимальними по відношенню до інших сумішей і досягають значення у 13%.

Швидкість зростання та спадання втрат потужності розряду на процеси збудження електронних станів і йонізацію і її величина пов'язані з характером залежності ефективних перерізів непружних процесів зіткнень електронів з компонентами суміші від енергій електронів, їхніх абсолютних величин, із залежністю функції розподілу електронів від значень зведеної напруженості поля та величини енергії порогу процесу [7].

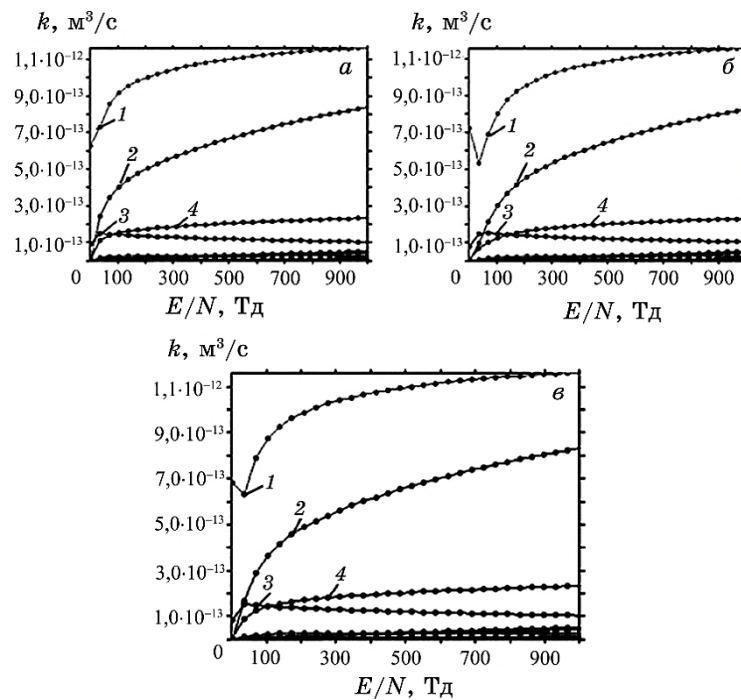
Константи швидкості (рис. 7) зіткнень електронів із атомами Аргону, Купруму та Цинку від параметра  $E/N$  у розряді на газопарових сумішах змінювалися в діапазоні  $k \approx 10^{-12} - 10^{-29}$  м<sup>3</sup>/с, що пов'язане зі значеннями абсолютних ефективних перерізів відповідних процесів [15]. Для атома Zn вони є максимальними для збудження ліній із довжинами хвиль  $\lambda = 271,24$  і 275,64 нм для трьох сумішей (табл. 5) і досягають величин  $1,688 \cdot 10^{-15}$  і  $3,317 \cdot 10^{-15}$  для суміші з більшим значенням парціального тиску



**Рис. 6.** Залежність питомих втрат потужності розряду на процеси зіткнень електронів з атомами Ar, Cu та Zn від параметра  $E/N$  у плазмі для сумішей: *а)* Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па за загального тиску  $p = 202\ 850$  Па: 1 — збудження енергетичного рівня атома Cu (енергія порогу — 3,80 еВ), 2 — збудження енергетичного рівня атома Ar (енергія порогу — 11,50 еВ), 3 — йонізація атомів Ar (енергія порогу — 15,80 еВ), 4 — пружне розсіювання на атомах Ar, 5 — збудження енергетичного рівня атома Zn (енергія порогу — 4,00 еВ); *б)* Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па за загального тиску  $p = 204\ 650$  Па: 1 — збудження енергетичного рівня атома Cu (енергія порогу — 3,80 еВ), 2 — збудження енергетичного рівня атома Ar (енергія порогу — 11,50 еВ), 3 — йонізація атомів Ar (енергія порогу — 15,80 еВ), 4 — збудження енергетичного рівня атома Cu (енергія порогу — 1,50 еВ), 5 — збудження енергетичного рівня атома Zn (енергія порогу — 4,00 еВ); *в)* Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па за загального тиску  $p = 50\ 863$  Па: 1 — збудження енергетичного рівня атома Cu (енергія порогу — 3,80 еВ), 2 — збудження енергетичного рівня атома Ar (енергія порогу — 11,50 еВ), 3 — йонізація атомів Ar (енергія порогу — 15,80 еВ), 4 — збудження енергетичного рівня атома Zn (енергія порогу — 4,00 еВ), 5 — пружне розсіювання на атомах Ar.<sup>10</sup>

атомів Zn та Cu — Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па для значення зведеного електричного поля у 50,6 Тд. Для атомів Cu (рис. 6, в) вони змінюються в діапазоні  $10^{-18}$ – $10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с.

Константи швидкості збудження резонансного стану Cu (енергія порогу — 3,8 еВ) мали максимальні значення  $0,6188 \cdot 10^{-12}$  і



**Рис. 7.** Залежності констант швидкості зіткнень електронів з атомами Ar, Cu та Zn від параметра  $E/N$  в розряді на газопаровій суміші: *а*) Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па за загального тиску  $p = 202\ 850$  Па: 1 — пружне розсіювання на атомі Cu, 2 — збудження резонансного стану атома Cu  $^2P_{3/2, 1/2}$  (енергія порогу — 3,8 eV), 3 — пружне розсіювання на атомі Zn, 4 — пружне розсіювання на атомі Ar; *б*) Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па за загального тиску  $p = 204\ 650$  Па: 1 — пружне розсіювання на атомі Cu, 2 — збудження резонансного стану атома Cu  $^2P_{3/2, 1/2}$  (енергія порогу — 3,8 eV), 3 — пружне розсіювання на атомі Zn, 4 — пружне розсіювання на атомі Ar; *в*) Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па за загального тиску  $p = 50\ 863$  Па: 1 — пружне розсіювання на атомі Cu, 2 — збудження резонансного стану атома Cu  $^2P_{3/2, 1/2}$  (енергія порогу — 3,8 eV), 3 — пружне розсіювання на атомі Zn, 4 — пружне розсіювання на атомі Ar.<sup>11</sup>

$0,4325 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$  для значень зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 407 \text{ Тд}$  і  $E/N = 203 \text{ Тд}$  відповідно у суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па.

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, встановлено, що за атмосферних тисків аргону між електродою з міді й електродою з цинку запалювався однорідний

**ТАБЛИЦЯ 5.** Константи швидкості збудження спектральних ліній атомів Zn та Cu для фіксованих значень зведеної напруженості електричного поля в плазмі на парогазових сумішах аргону з цинком і міддю в моменти часу 10 нс і 25 нс від початку запалювання розряду.  $E_{\text{поріг}}$  — енергія порогу збудження спектральних ліній атома Cu.<sup>12</sup>

$E/N$ , Тд		Суміш: Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па				
102	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,2690 \cdot 10^{-16}$	$0,5529 \cdot 10^{-16}$	$0,7995 \cdot 10^{-16}$	$0,7995 \cdot 10^{-16}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,2480 \cdot 10^{-13}$	$0,1871 \cdot 10^{-13}$	$0,4035 \cdot 10^{-12}$	$0,1080 \cdot 10^{-15}$
51	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,1095 \cdot 10^{-16}$	$0,2251 \cdot 10^{-16}$	$0,3255 \cdot 10^{-16}$	$0,3255 \cdot 10^{-16}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,1742 \cdot 10^{-13}$	$0,1294 \cdot 10^{-13}$	$0,2417 \cdot 10^{-12}$	$0,6626 \cdot 10^{-16}$
$E/N$ , Тд		Суміш: Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па				
101	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,1594 \cdot 10^{-16}$	$0,3160 \cdot 10^{-17}$	$0,4570 \cdot 10^{-17}$	$0,4570 \cdot 10^{-17}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,2047 \cdot 10^{-13}$	$0,1530 \cdot 10^{-13}$	$0,3024 \cdot 10^{-12}$	$0,8235 \cdot 10^{-16}$
50,6	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,1538 \cdot 10^{-17}$	$1,814 \cdot 10^{-15}$	$1,688 \cdot 10^{-15}$	$3,317 \cdot 10^{-15}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,9204 \cdot 10^{-14}$	$0,6655 \cdot 10^{-14}$	$0,9826 \cdot 10^{-13}$	$0,2725 \cdot 10^{-16}$
$E/N$ , Тд		Суміш: Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па				
407	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,5069 \cdot 10^{-16}$	$0,1042 \cdot 10^{-15}$	$0,1507 \cdot 10^{-15}$	$0,1507 \cdot 10^{-15}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,2947 \cdot 10^{-13}$	$0,2276 \cdot 10^{-13}$	$0,6188 \cdot 10^{-12}$	$0,1617 \cdot 10^{-15}$
203	Zn	$\lambda$ , нм	258,24	268,41	271,24	275,64
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,3642 \cdot 10^{-16}$	$0,7486 \cdot 10^{-16}$	$0,1082 \cdot 10^{-15}$	$0,1082 \cdot 10^{-15}$
	Cu	$E_{\text{поріг}}$ , еВ	1,5	1,5	3,8	5,1
		$k$ , м <sup>3</sup> /с	$0,2571 \cdot 10^{-13}$	$0,1946 \cdot 10^{-13}$	$0,4325 \cdot 10^{-12}$	$0,1152 \cdot 10^{-15}$

перенапружений наносекундний розряд з імпульсною електричною потужністю до 2,5 МВт із енергетичним внеском у плазму до 374 мДж за один імпульс.

Дослідження спектральних характеристик розряду показало, що найбільш інтенсивними були резонансні спектральні лінії атома Купруму ( $\lambda = 324,75$  і  $327,39$  нм Cu I); з ліній однозарядного йона Купруму в інтервалі 200–330 нм найінтенсивнішою була лінія  $\lambda = 227,62$  нм Cu II.

Внесення парів цинку в розряд уможливило змістити короткохвильову границю спектру випромінення до 202–207 нм за рахунок інтенсивних йонних ліній Цинку та збагатити спектер УФ-випромінення плазми інтенсивними спектральними лініями 258,24, 268,41, 271,24 і 275,64 нм Zn I.

Наявність у спектрі випромінення плазми на основі парогазових сумішей мідь–цинк–аргон створює необхідні умови для осадження композитних плівок типу Cu–Zn на підкладку за автоматичного ультрафіолетового асистування плазмою розряду.

Моделювання параметрів плазми перенапруженого наносекундного розряду на основі газопарових сумішей аргону, міді та цинку дало змогу встановити певні закономірності.

Збільшення зведеної напруженості електричного поля між електродами приводило до росту кількості «швидких» електронів у розряді та зменшення густини електронів та зростання середньої енергії електронів від 0,92 до 15,1 еВ в діапазоні  $E/N = 1\text{--}1000$  Тд.

Температура електронів була максимальною (110 096 К) і спостерігалася для розряду в суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па. Вона зменшувалася зі збільшенням загального тиску газопарових сумішей.

Величини максимальної концентрації електронів склали  $2,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  і  $5,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  за густин струму у  $3,57 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  і  $5,1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  на поверхні електроди джерела випромінення ( $0,196 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ) для зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 102$  Тд, яке було на розрядному проміжку на 10-й нс, та для зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 51$  Тд, яке було на розрядному проміжку у  $t = 25$  нс, для розряду в суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Па.

Спостерігалось збільшення потужності втрат розряду зі зростанням зведеної напруженості електричного поля, як для пружних процесів, так і для непружних процесів. Для непружних процесів втрати розряду були більшими приблизно на два порядки.

Максимальна втрата потужності розряду спостерігається в суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па для процесу збудження енергетичного рівня атома Купруму (енергія порогу — 3,80 еВ), і вона досягала значення у 82% для зведеної напруженості електричного поля у 51 Тд. Для збудження енергетичного рівня атома Цинку (енергія порогу — 4,00 еВ) втрати потужності розряду були теж значними по відношенню до інших сумішей і досягали 13%.

Константи швидкості зіткнень електронів із атомами Аргону, Купруму та Цинку змінювалися в діапазоні  $k \approx 10^{-12}\text{--}10^{-29} \text{ м}^3/\text{с}$ . Для атома Цинку вони були максимальними для збудження спектральних ліній із довжинами хвиль  $\lambda = 271,24$  і  $275,64$  нм для

трьох сумішей і досягали величин  $1,688 \cdot 10^{-15}$  і  $3,317 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с для суміші з більшим значенням парціального тиску атомів Цинку і Купруму, а саме, суміші Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Па, за значення зведеного електричного поля у 50,6 Тд. Для атомів Купруму вони змінюються в діапазоні  $10^{-18}$ – $10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с. Константи швидкості збудження резонансного стану Купруму ( $E_{\text{поріг}} = 3,8$  еВ) були більшими, ніж для збудження енергетичних рівнів Цинку. Вони досягали максимальної величини  $0,6188 \cdot 10^{-12}$  та  $0,4325 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с для зведеної напруженості електричного поля  $E/N = 407$  Тд і  $E/N = 203$  Тд відповідно для розряду в суміші Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Па.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. M. P. Afonin and M. N. Ovchinnikov, *Elektrychni Kontakty ta Ehlektrody: Pratsi Instytutu problem materialoznavstva im. I. M. Frantsevycha NAN Ukrainy* (Kyiv: 2006), p. 153–160.
2. A. V. Shakina, V. S. Fadeev, and O. V. Shtanov, *Perspektivnyye Materialy*, 5: 54 (2014) (in Ukrainian).
3. I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. N. Veklich, and R. V. Semenyshyn, *Advances in Space Research*, 54, No. 7: 1254 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.10.034>
4. A. K. Shuaibov, A. J. Minja, A. A. Malinina, R. V. Hrytsak, A. N. Malinin, Ju. Ju. Bilak, and M. I. Vatralla, *Electronic Processing of Materials*, 57, No. 5: 34 (2021) (in Russian); <https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.5.34>
5. O. K. Shuaibov, O. Y. Minya, A. O. Malinina, R. V. Hrytsak, O. M. Malinin, M. P. Chuchman, and Z. T. Gomoki, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 19, No. 3: 513 (2021) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/nnn.19.03.513>
6. O. K. Shuaibov and A. O. Malinina, *Progress in Physics of Metals*, 22, No. 3: 382 (2021); <https://doi.org/10.15407/ufm.22.03.382>
7. G. A. Mesyats, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 165, No. 6: 601 (1995) (in Russian); <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>
8. K. Tominaga, N. Umezū, I. Mori, T. Ushiro, T. Moriga, and I. Nakabayashi, *Thin Solid Films*, 316: 85 (1998); [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)00394-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)00394-0)
9. A. Kh. Abduev, A. Sh. Asvarov, A. K. Akhmetov, R. M. Emyrov, and V. V. Beliaev, *JETP Letters*, 43, No. 22: 40 (2017); <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.22.45259.16874>
10. G. J. M. Hagelaar, L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Techn.*, 14: 722 (2005); <https://doi.org/10.1088/0963-0252/14/4/011>
11. BOLSIG+; <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
12. Yu. M. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*, 104, No. 2: 159 (2008); <https://doi.org/10.1134/S0030400X08020021>
13. Y. P. Bohdanova, S. V. Riazantseva, and V. E. Yakhontova, *Optics and Spectroscopy*, 51: 444 (1981) (in Russian).
14. A. Y. Korotkov, *Technical Physics*, 62, No. 7: 142 (1992).
15. *Atomic and Molecular Data Unit*; <https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>



---

*SHEE 'Uzhhorod National University',  
3, Narodna Sq.,  
UA-88000 Uzhhorod, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. Oscillograms of current pulses, voltage and pulse power of overvoltage nanosecond discharge in argon at pressure  $p = 202$  kPa and at  $d = 2$  mm (frequency of discharge pulses  $f = 80$  Hz).

<sup>2</sup> Fig. 2. Radiation spectrum of an overvoltage nanosecond discharge between copper and zinc electrodes at  $p(\text{Ar}) = 50.5$  kPa.

<sup>3</sup> TABLE 1. Results of identification of the radiation spectra of the overvoltage nanosecond discharge plasma between the copper electrode and the zinc electrode at  $p(\text{Ar}) = 50.5$  kPa.

<sup>4</sup> Fig. 3. Electron energy distribution functions in the discharge on mixtures: Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa (a); Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Pa (б); Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Pa (в).

<sup>5</sup> TABLE 2. Values of the  $E/N$  parameter and the average energy of the electrons for the electron-energy distribution functions in the discharge.

<sup>6</sup> Fig. 4. The dependence of the average electron energy in plasma gas-vapour mixture Ag:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa at a total pressure  $p = 202$  850 Pa on the reduced electric field strength.

<sup>7</sup> TABLE 3. Electron transport characteristics at the moments of times of 10 and 25 ns for the electric field strength  $E = 5 \cdot 10^6$  V/m i  $2.5 \cdot 10^6$  V/m for discharges in gas-vapour mixtures: Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa, Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Pa and Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Pa.

<sup>8</sup> Fig. 5. The dependence of the specific power of discharge losses for the elastic and inelastic processes of electron collisions with atoms of argon, copper and zinc on the reduced electric field strength in plasma of the vapour-gas mixture Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa at a total pressure  $p = 202$  850 Pa.

<sup>9</sup> TABLE 4. Value of specific power of discharge losses for the elastic and inelastic processes of collisions of electrons with atoms of argon, copper and zinc in plasma gas-vapour mixtures Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa, 202 650:1000:1000 Pa, 50 663:100:100 Pa for the given electric field strength on the plasma, which is achieved at the moments of time  $t = 10$  ns and 25 ns from the beginning of the breakdown between the electrodes' gap.

<sup>10</sup> Fig. 6. Dependence of specific losses of discharge power on collisions of electrons with argon, copper, and zinc atoms on the  $E/N$  parameter in plasma for mixtures: a) Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa at a total pressure  $p = 202$  850 Pa: 1—excitation of the energy level of the copper atom (threshold energy of 3.80 eV), 2—excitation of the energy level of the argon atom (threshold energy of 11.50 eV), 3—ionization of argon atoms (threshold energy of 15.80 eV), 4—elastic scattering at argon atoms, 5—excitation of the energy level of the zinc atom (threshold energy of 4.00 eV); б) Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Pa at a total pressure  $p = 204$  650 Pa: 1—excitation of the energy level of the copper atom (threshold energy of 3.80 eV), 2—excitation of the energy level of the argon atom (threshold energy of 11.50 eV), 3—ionization of the argon atom (threshold energy of 15.80 eV), 4—excitation of the energy level of the copper atom (threshold energy of 1.50 eV), 5—excitation of the energy level of the zinc atom (threshold energy of 4.00 eV); в) Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Pa at a total pressure  $p = 50$  863 Pa: 1—excitation of the energy level of the copper atom (threshold energy of 3.80 eV), 2—excitation of the energy level of the argon atom (threshold energy of 11.50 eV), 3—ionization of argon atoms (threshold energy of 15.80 eV), 4—excitation of the energy level of the zinc atom (threshold energy of 4.00 eV), 5—elastic scattering on argon atoms.

<sup>11</sup> Fig. 7. Dependence of rate constants of electron collisions with atoms of argon, copper and zinc on the  $E/N$  parameter in the gas-vapour mixture discharge: a) Ar:Cu:Zn = 202 650:100:100 Pa at a total pressure  $p = 202$  850 Pa: 1—elastic scattering at the copper atom, 2—excitation of the resonance state of the copper atom  ${}^2P_{3/2, 1/2}$  (threshold energy of 3.8 eV), 3—elastic scattering on the zinc atom, 4—elastic scattering on the argon atom; б) Ar:Cu:Zn = 202 650:1000:1000 Pa at a total pressure  $p = 204$  650 Pa: 1—elastic scattering at the copper atom, 2—excitation of the resonance state of the copper atom  ${}^2P_{3/2, 1/2}$  (threshold energy of 3.8 eV), 3—elastic scattering on the zinc atom, 4—elastic scattering on the argon atom; в) Ar:Cu:Zn = 50 663:100:100 Pa at a total pressure  $p = 50$  863 Pa: 1—elastic scatter-

---

ing on the copper atom, 2—excitation of the resonance state of the copper atom  ${}^2P_{3/2, 1/2}$  (threshold energy of 3.8 eV), 3—elastic scattering on the zinc atom, 4—elastic scattering on the argon atom.

<sup>12</sup> **TABLE 5.** Excitation rate constants for the spectral lines of the zinc and copper atoms for fixed values of the reduced electric-field strength in plasma on argon vapour–gas mixtures with zinc and copper at moments of time of 10 ns and 25 ns from the start of discharge ignition.  $E_{\text{threshold}}$  is the excitation-threshold energy of the spectral lines of the copper atom.