

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

## **Умови осадження поверхневих мікро-наноструктур срібла та цинку з плазми перенапруженого наносекундного розряду в аргоні**

О. К. Шуаїбов, Р. В. Грицак, О. Й. Миня, З. Т. Гомокі, М. І. Ватрала

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

Наведено просторові, електричні та спектральні характеристики перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла та цинку в аргоні атмосферного тиску. В процесі мікробухів природніх неоднорідностей на поверхнях металевих електрод у сильному електричному полі в проміжок між електродами в процесі формування ектонів вносяться пари срібла та цинку. Це створює передумови для утворення збуджених атомів і йонів Аргентуму, Цинку й Аргону. Під час осадження продуктів плазми на підкладку з кварцу, встановлену біля системи електрод, можлива синтеза поверхневих структур на основі срібла та цинку, які перспективні для використання в мікро-наоелектроніці, медицині та біомедичній інженерії. Встановлено просторові характеристики розряду й імпульси напруги та струму на розрядному проміжку, що дало змогу одержати імпульсну потужність розряду й енергетичний внесок за один імпульс. Спектральні характеристики розряду досліджувалися з центральної частини розрядного проміжку величиною у 2 мм. Встановлено основні збуджені складові плазми газопарових сумішей на основі парів срібла та цинку з аргонем за високих значень параметра  $E/N$  ( $E$  — напруженість електричного поля;  $N$  — сумарна концентрація частинок у плазмі).

---

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, R. V. Hrytsak, O. I. Minya, Z. T. Gomoki, and M. I. Vatralla, Conditions for the Deposition of Surface Micro-Nanostructures of Silver and Zinc from the Plasma of an Overvoltage Nanosecond Discharge in Argon, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1509–1521 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.11.1509](https://doi.org/10.15407/mfint.44.11.1509)

**Ключові слова:** перенапружений наносекундний розряд, срібло, цинк, аргон, ектони, плазма.

The spatial, electrical, and spectral characteristics of an overvoltage nanosecond discharge between silver and zinc electrodes in atmospheric pressure argon are presented. In the process of microexplosions of natural inhomogeneities on the surfaces of metal electrodes in a strong electric field, silver and zinc vapours are introduced into the gap between the electrodes during the formation of ectons. This creates prerequisites for the formation of excited atoms and ions of silver, zinc, and argon. When plasma products are deposited on a quartz substrate installed near the electrode system, it is possible to synthesize surface structures based on silver and zinc, which are promising for use in micronanoelectronics, medicine, and biomedical engineering. The spatial characteristics of the discharge and the voltage and current pulses across the discharge gap are established, which made it possible to obtain the discharge pulse power and the energy contribution per pulse. The spectral characteristics of the discharge are studied from the central part of the 2 mm discharge gap. The main excited components of the plasma of gas-vapour mixtures based on silver and zinc vapours with argon at high values of the parameter  $E/N$  ( $E$  is the electric field strength and  $N$  is the total concentration of particles in the plasma) are established.

**Key words:** overvoltage nanosecond discharge, silver, zinc, argon, ectons, plasma.

*(Отримано 8 серпня 2022 р.; остаточн. варіант — 13 серпня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

При віддалі між металевими електродами 1–3 мм і атмосферному тиску повітря ( $p = 101$  кПа) в спектрах випромінювання наносекундного розряду реєструються переважно спектральні лінії атомів та йонів металу електрод (Купруму, Феруму, Цинку та ін.) [1]. При перенарузі міжелектродного проміжку в плазмі генеруються «електрони-втікачі», які переходять в режим неперервного прискорення з енергіями на рівні десятків, сотень кіловольт [2]. Під дією пучка електронів-втікачів відбувається передйонізація газу в міжелектродному проміжку, тому навіть при неоднорідному розподілі напруженості електричного поля формується досить однорідний розряд, який може бути використаний для розробок нових УФ-ламп з малим об'ємом плазмового середовища або плазмохемічного реактора з синтези тонких плівок, які можуть бути осаджені (за межами плазми) на твердій діелектричній підкладинці [3]. При цьому, в таких реакторах важлива наявність УФ-випромінювання. Так, в [4] під час синтези плівкових наноструктур оксиду цинку в вигляді набору наностовпчиків за неперервної підсвітки підкладинки в процесі синтезу УФ-випромінюванням ртутної лампи одержано

зменшення опору плівкових наноструктур.

При запалюванні перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді його плазма виступає не лише джерелом бактерицидного УФ-випромінення ( $\Delta\lambda = 200\text{--}330$  нм), але і потоком наночастинок оксиду міді або цинку, які володіють сильними антибактеріальними властивостями [5].

На значний інтерес до наночастинок чистих металів та на їх важливі практичні застосування вказує праця [6], де приведені результати дослідження характеристик композитних плівок на основі наночастинок міді, які були синтезовані методом електричного вибуху провідників. Вони характеризувались значними антибактеріальними властивостями відносно золотистого стафілококу і виявились перспективними як захисні матеріали від радіаційних випромінювань.

Зацікавленість в синтезі поверхневих структур і дрібнодисперсного порошку срібла зумовлена високою ефективністю знищення бактерій препаратами срібла. Він в 1750 разів сильніше діє в порівнянні з тією ж концентрацією карболової кислоти. Вже при концентрації 0,1 мг/л срібло має виражену фунгіцидну дію. Розчини срібла є найефективнішим засобом при безпосередньому зіткненні з поверхнями гнійними і запаленими внаслідок бактеріального зараження [7].

У загальних рисах механізм боротьби срібла з одноклітинними (бактеріями) і безклітинними мікроорганізмами (вірусами) представляє наступне: срібло реагує з клітинною мембраною бактерії, яка є структурою з особливих білків (пептидогліканів), з'єднаних амінокислотами для забезпечення механічної міцності і стабільності. Срібло взаємодіє з зовнішніми пептидогліканами, блокуючи їх здатність передавати кисень всередину клітини бактерії, що приводить до «задухи» мікроорганізму і його загибелі.

Дія срібла специфічна не по інфекції (як у антибіотиків), а по клітинній структурі. Будь-яка клітина без хемічно стійкої стінки (таку клітинну будову мають бактерії та інші організми без клітинної стінки, наприклад, позаклітинні віруси) піддається впливу срібла. Оскільки клітини ссавців мають мембрану абсолютно іншого типу, що не містить пептидогліканів, срібло ніяким чином не діє на них [8].

Серед нових метод формування поверхневих наноструктур важливе місце належить методам на основі газового розряду. До переваг цієї методи можна віднести можливість налаштування параметрів синтезованих частинок шляхом зміни схеми розряду, високу продуктивність і можливість масштабування процесу синтезу, відносно просту конструкцію реактора і простий процес приготування вихідного матеріалу.

Результати дослідження характеристик і параметрів плазми пе-

ренапруженого наносекундного розряду між електродами з міді в аргоні низького тиску ( $p = 6,7$  кПа) приведені в [9]. Проте характеристики такого розряду між електродами з міді або срібла при атмосферному тиску аргону не досліджувались, тому відсутні дані, які б дали змогу оптимізувати роботу плазмохемічного реактора з синтези поверхневих мікро-наноструктур міді чи цинку, а також одержанню дрібнодисперсного порошку цих металів.

В статті приводяться результати дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла і цинку в аргоні атмосферного тиску, який може бути застосований в якості точкової ультрафіолетової лампи на переходах атома і йона Аргентуму або Цинку, а також для синтези плівкових мікронаноструктур на основі срібла або цинку при автоматичному опроміненні підкладинки ультрафіолетовим випромінюванням плазми.

## 2. ТЕХНІКА І УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду використовувалась експериментальна установка, схема якої приведена в праці [1].

Дослідження перенапруженого наносекундного розряду проводилось в газорозрядному модулі виготовленому з органічного скла з двома боковими герметично під'єднаними фланцями з вмонтованими віконцями для виводу випромінювання розряду (рис. 1).

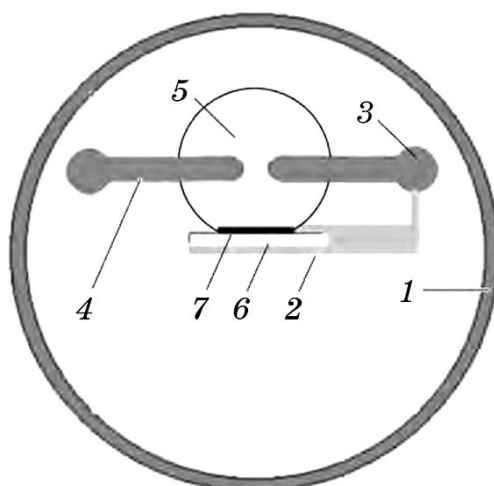
Діаметр циліндричних електрод, виготовлених з срібла або цинку, складав 5 мм, а радіус заокруглення робочої торцевої частини електрод був рівним 3 мм.

Розряд між срібними або цинковими електродами запалювався з допомогою генератора біполярних високовольтних імпульсів напруги тривалістю 50–100 нс амплітудою  $\pm(20-60)$  кВ. Амплітуда імпульсів струму могла досягати 300 А, а об'єм плазми розряду був в діапазоні 5–20 мм<sup>3</sup>.

Осцилограми імпульсів напруги на розрядному проміжку і осцилограми імпульсів струму реєструвались за допомогою широкопугового емнісного дільника напруги, поясу Роговського та широкопугового осцилографа 6ЛОР-04. Часове розділення цієї системи вимірювання характеристик електричних імпульсів складало 2–3 нс.

Для реєстрації спектрів випромінювання плазми використовувалась цифровий двоканальний спектрометр з компенсацією астигматизму «SL-40-2-1024USB». Робочий діапазон спектрометра — 200–1200 нм.

За міжелектродної віддалі у 2 мм розрядний проміжок був перенапруженим, що створювало сприятливі умови для формування пучка електронів-втікачів високої енергії, які вступають в режим неперервного прискорення і залишають розрядний проміжок [2].



**Рис. 1.** Схема розрядної камери: 1 — корпус діелектричної розрядної камери; 2 — система фіксації підкладки для напорошення тонких плівок; 3 — система регулювання міжелектродної відстані; 4 — металеві електроди; 5 — зона осадження плівок; 6 — підкладка зі скла; 7 — плівкова структура.

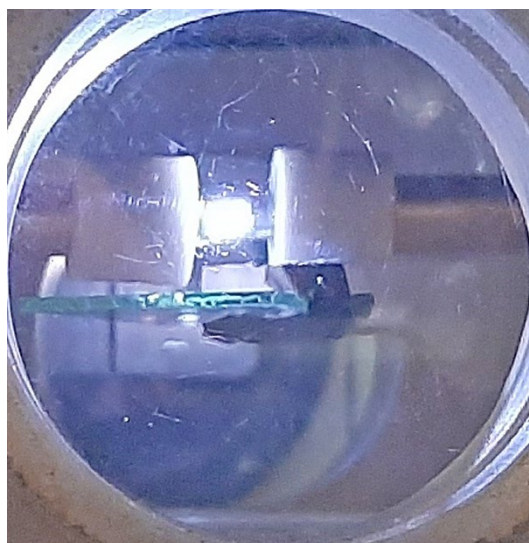
**Fig. 1.** Scheme of the discharge chamber: 1—housing of the dielectric discharge chamber; 2—substrate fixation system for deposition of thin films; 3—system for regulating the interelectrode distance; 4—metal electrodes; 5—film deposition zone; 6—glass lining; 7—film structure.

Під дією пучка електронів-втікачів і супутнього йому рентгенівського випромінювання, які виконують роль передіонізації, в розрядних проміжках навіть з неоднорідним розподілом напруженості електричного поля формується досить однорідний розряд. Що і проявилось в наших експериментах з перенапруженим наносекундним розрядом атмосферного тиску в аргоні (рис. 2).

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРУЖЕНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ

На рисунку 3 наведені характерні осцилограми напруги і струму на прикладі перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла. Для розряду між електродами з цинку вигляд електричних осцилограм був подібним, вони відрізнялись лише абсолютними величинами напруги, струму, імпульсної потужності і енергетичним внеском в плазму.

Повна тривалість імпульсів напруги досягала 400–450 нс, а сам імпульс напруги складався з згасних у часі осциляцій. Максималь-



**Рис. 2.** Світлина перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла при віддалі між електродами 2 мм і тиску повітря 101 кПа при частоті слідування розрядних імпульсів  $f = 1000$  Гц.

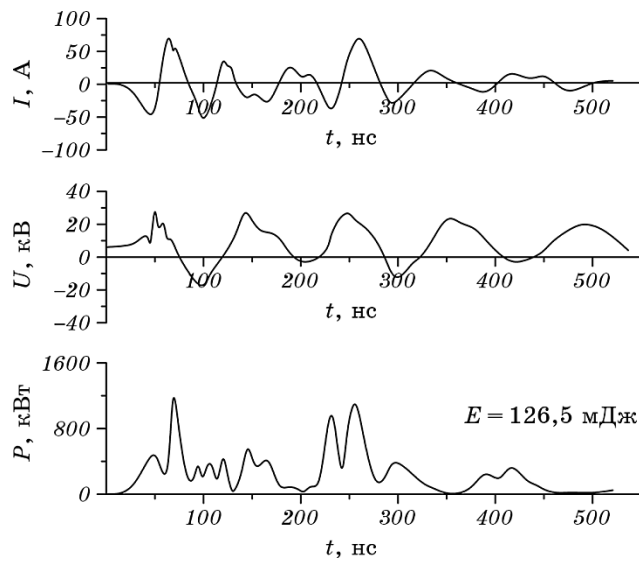
**Fig. 2.** A photo of an overvoltage nanosecond discharge between silver electrodes at a distance of 2 mm between the electrodes and air pressure of 101 kPa at a discharge pulse repetition rate of  $f = 1000$  Hz.

на величина спаду напруги в повітрі на розрядному проміжку складала 45 кВ, враховуючи додатну та від'ємну складові амплітуди імпульсу.

Максимальна імпульсна потужність досягала 1200 кВт в часових проміжках 60–80 нс та 240–260 нс, а енергетичний внесок за один імпульс був рівним 126,5 мДж. Відповідні характеристики в аргоні були наступними: 40 кВ, 140 А, 1500 кВт, 134,6 мДж. Максимальна імпульсна потужність в аргоні спостерігалась в часових проміжках 30–60 нс і 200–240 нс.

Для перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку в аргоні при тиску 101 кПа (при  $d = 2$  мм) амплітуда найбільшого спаду напруги одної полярності між електродами складала  $\approx \pm 7$ –8 кВ, струму  $\pm 100$  А, а імпульсної потужності — 1,2 МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс в плазму  $\approx 167$  мДж.

Спектральні характеристики ультрафіолетового випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду в газопаровій суміші аргон–срібло приведені на рис. 4, а результати ідентифікації спектральних ліній в цьому спектрі представлені в табл. 1. При розшифровці спектрів випромінювання плазми були використані до-



**Рис. 3.** Осцилограми струму, напруги та імпульсної потужності перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла при віддалі  $d = 2$  мм при тиску повітря 101,3 кПа і частоті  $f = 1000$  Гц.

**Fig. 3.** Oscillograms of current, voltage and pulsed power of an overvoltage nanosecond discharge between silver electrodes at a distance of  $d = 2$  mm at an air pressure of 101.3 kPa and a frequency of  $f = 1000$  Hz.

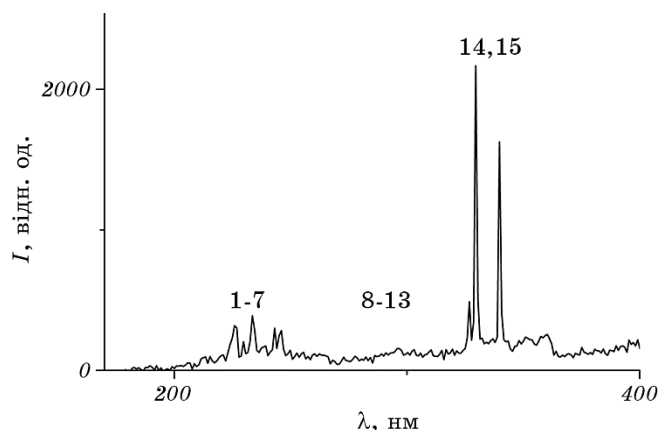
відники з спектроскопії [10, 11].

Випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду на основі аргону і парів срібла було представлено спектральними лініями, які спостерігались на фоні неперервного випромінювання (континууму) в спектральному діапазоні  $\Delta\lambda = 200\text{--}1000$  нм (рис. 4). Природа континууму, який так сильно проявлявся в умовах нашого експерименту, пов'язана з тепловим і рекомбінаційним випромінюванням плазми.

Як впливає з таблиці 1, в ультрафіолетовій частині спектру випромінювання розряду в газопарових сумішах парів срібла з аргонном, атмосферного тиску спостерігались найбільш інтенсивні спектральні лінії однозарядних йонів та атомів Аргентуму.

Пари срібла вносились в плазму в результаті мікрровибухів природних неоднорідностей поверхні металевих електродів в сильному електричному полі розряду «ектонний механізм випаровування електрод» [12].

Такий спосіб внесення парів матеріалу електродів може реалізовуватись в імпульсно-періодичному режимі роботи ( $f = 80\text{--}1000$  Гц), практично за кімнатних температур розрядної камери і для імпульсів наносекундної тривалості. Це значно відрізняється від методи



**Рис. 4.** Спектр випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла при  $p(\text{Ar}) = 103$  кПа;  $f = 1000$  Гц,  $d = 2$  мм.

**Fig. 4.** Emission spectrum of an overvoltage nanosecond discharge between silver electrodes at  $p(\text{Ar}) = 103$  kPa;  $f = 1000$  Hz,  $d = 2$  mm.

вибухів тонких дротин чи пластин металу при пропусканні через них великих струмів, який характерний для переважно одноразового режиму запалювання розряду за його тривалості у 10–1000 мкс.

Збільшення частоти слідування розрядних імпульсів з 80 до 1000 Гц (в 12,5 разів) приводило до збільшення густини парів срібла в розряді і до значного збільшення інтенсивності спектральних ліній атомів та йонів Аргентуму. Так, із збільшенням частоти в 12,5 разів інтенсивності найбільш характеристичних спектральних ліній одностарядного йона Аргентуму 224,64 і 243,77 нм збільшилися, відповідно, в 5,3 і 6,0 разів, інтенсивності ліній атома Аргентуму 328,06 і 338,28 зросли в 5,5 і 5,6 рази відповідно, а інтенсивність лінії атома Аргону 763,55 нм — в 4,0 рази. Як впливає з приведених результатів впливу частоти на інтенсивність спектральних ліній, збільшення частоти не привело до прямопропорційного росту інтенсивності цих ліній випромінювання. Це може бути зумовлено процесами гасіння верхніх енергетичних рівнів атомів та йонів Аргентуму у міжімпульсний проміжок часу атомами Аргону.

Спектр УФ-випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду в суміші аргону з парами цинку приведено на рис. 5, а результати ідентифікації спектральних ліній та відносні інтенсивності випромінювання ліній зведені в табл. 2.

Основними в УФ-спектрі випромінювання плазми на основі парів цинку (рис. 5) були спектральні лінії атома й одностарядного йона Цинку, які розташовані в спектральних інтервалах 206–280 нм та в 330–335 нм (лінії Zn I).



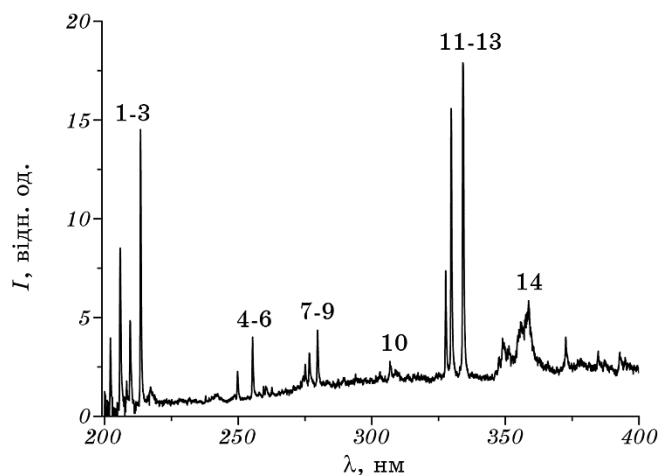
**ТАБЛИЦЯ 1.** Результати ідентифікації спектрів УФ-випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродами з срібла при тиску аргону 101 кПа,  $d = 2$  мм;  $f = 80; 1000$  Гц.

**TABLE 1.** Results of the identification of UV spectra-plasma radiation of an overvoltage nanosecond discharge between silver electrodes at an argon pressure of 101 kPa,  $d = 2$  mm;  $f = 80; 1000$  Hz.

№	$\lambda_{\text{табл.}}$ нм	$I_{\text{експ.}}$ відн. од. $f = 80$ Гц	$I_{\text{експ.}}$ відн. од. $f = 1000$ Гц	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}$ еВ	$E_{\text{верх.}}$ еВ	Терм <sub>нижн</sub>	Терм <sub>верх</sub>
1	224,64	318	1677	Ag II	4,85	10,37	$4d^9(^2D_{5/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{5/2})$
2	227,99	203	1059	Ag II	5,70	11,05	$4d^9(^2D_{3/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{3/2})$
3	232,02	206	1157	Ag II	5,05	10,36	$4d^9(^2D_{5/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{5/2})$
4	233,13	388	2018	Ag II	5,05	10,36	$4d^9(^2D_{5/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{5/2})$
5	241,13	147	969	Ag II	5,42	10,56	$4d^9(^2D_{3/2})$	$4d^9(^2D_{5/2})$
6	243,77	300	1781	Ag II	4,85	9,94	$4d^9(^2D_{5/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{5/2})$
7	244,78	282	1435	Ag II	5,70	10,77	$4d^9(^2D_{3/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{3/2})$
8	260,59	116	784	Ag II	10,18	14,94	$4d^9(^2D_{5/2}) 5p$	$4d^9(^2D_{5/2})$
9	261,43	116	793	Ag II	10,77	15,51	$4d^9(^2D_{3/2}) 5p$	$4d^9(^2D_{3/2})$
10	266,04	96	553	Ag II	12,14	16,78	$4d^8 5s^2 \text{}^3F_3$	$4d^8(^3F) 5s$
11	271,17	93	508	Ag II	10,37	14,94	$4d^9(^2D_{5/2}) 5p$	$4d^9(^2D_{5/2})$
12	276,75	100	639	Ag II	5,70	10,18	$4d^9(^2D_{3/2}) 5s$	$4d^9(^2D_{5/2})$
13	293,83	132	1086	Ag II	10,77	14,99	$4d^9(^2D_{3/2}) 5p$	$4d^9(^2D_{5/2})$
14	328,06	2167	11271	Ag I	0,00	3,77	$4d^{10} 5s^2 S_{1/2}$	$4d^{10} 5p$
15	338,28	1625	9045	Ag I	0,00	3,66	$4d^{10} 5s^2 S_{1/2}$	$4d^{10} 5p$

Найбільш інтенсивними з йонних спектральних ліній Цинку були 206,20; 209,99 нм Zn II, а з атомарних ліній — 213,85; 330,25; 334,50 нм Zn I, що корелюється з спектральними характеристиками лампи на парах цинку, характеристики якої наведені в [13].

Порівняння співвідношення ефективних перерізів спектральних ліній атома Цинку:  $\lambda = 275,64$  і  $258,24$  нм, взятих з [14], з даними



**Рис. 5.** Спектер випромінення перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку при тиску аргону 101 кПа.

**Fig. 5.** The emission spectrum of an overvoltage nanosecond discharge between zinc electrodes at an argon pressure of 101 kPa.

експерименту показало, відношення перерізів прямого електронного збудження цих ліній при енергії електронів  $E = 30$  еВ складало 0,5, а відношення інтенсивності цих спектральних ліній з нашого експерименту — 1,1. Для відношень відповідних перерізів спектральних ліній атома Цинку 328,23 і 307,20 нм одержано 1,0, а для відношення інтенсивності цих ліній з плазми перенапруженого наносекундного розряду — 2,4. Внаслідок такої значної відмінності між даними експерименту і відношення ефективних перерізів збудження відповідних спектральних ліній Zn I впливає, що прямий електронний удар в даному експерименті не є основним механізмом заселення верхніх енергетичних рівнів для цих спектральних ліній атома Цинку.

При зменшенні тиску аргону від 101 до 6,7 кПа погіршувалося узгодження виходу високовольтного модулятора з плазмою розряду, що приводило до зменшення енергетичного внеску в плазму і зменшенню інтенсивності випромінювання спектральних ліній Цинку. Проте відносний розподіл інтенсивності спектральних ліній та інші закономірності залишалися близькими до випадку, коли тиск аргону складав 6,7 кПа.

Основна частина енергії перенапруженого наносекундного розряду вноситься на плазмовій фазі спочатку в електронну складову, а після цього енергія передається від електронів до атомів в збуджених енергетичних станах та до йонів. Тому, найбільш імовірні механізми утворення збуджених атомів і йонів Цинку в даному ро-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Результати ідентифікації спектру випромінювання наносекундного розряду між електродами з цинку ( $d = 2$  мм;  $p(\text{Ar}) = 101$  кПа).**TABLE 2.** Results of identifying the radiation spectrum of a nanosecond discharge between zinc electrodes ( $d = 2$  mm;  $p(\text{Ar}) = 101$  kPa).

№	$\lambda_{\text{табл}}$ , нм	$I_{\text{експ}}$ , відн. од.	Об'єкт	$E_{\text{нижн}}$ , еВ	$E_{\text{верх}}$ , еВ	Терм <sub>нижн</sub>	Терм <sub>верх</sub>
1	206,20	8,74	Zn II	0	6,01	$3d^{10}4s^2S_{1/2}$	$3d^{10}4p^2P^0_{1/2}$
2	209,99	4,85	Zn II	6,11	12,02	$3d^{10}4p^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}4d^2D_{5/2}$
3	213,85	13,08	Zn I	0	5,79	$3d^{10}4s^2^1S_0$	$3d^{10}4s4p^2P^0_1$
4	250,19	2,35	Zn I	6,01	10,96	$3d^{10}4p^2P^0_{1/2}$	$3d^{10}5s^2S_{1/2}$
5	255,79	3,97	Zn II	6,11	10,96	$3d^{10}4p^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}5s^2S_{1/2}$
6	258,24	1,12	Zn I	4,02	8,82	$3d^{10}4s4p^3P^0_1$	$3d^{10}4s6d^3D_2$
7	275,64	2,65	Zn I	4,00	8,50	$3d^{10}4s4p^3P^0_0$	$3d^{10}4s5d^3D_1$
8	277,08	3,16	Zn I	4,02	8,50	$3d^{10}4s4p^3P^0_1$	$3d^{10}4s5d^3D_2$
9	280,08	4,11	Zn I	4,07	8,50	$3d^{10}4s4p^3P^0_2$	$3d^{10}4s5d^3D_3$
10	307,206	2,49	Zn I	4,07	8,11	$3d^{10}4s4p^3P^0_2$	$3d^{10}4s6s^3S_1$
11	328,23	7,43	Zn I	4,00	7,78	$3d^{10}4s4p^3P^0_0$	$3d^{10}4s4d^3D_1$
12	330,25	15,57	Zn I	4,02	7,78	$3d^{10}4s4p^3P^0_1$	$3d^{10}4s4d^3D_2$
13	334,50	17,89	Zn I	4,07	7,78	$3d^{10}4s4p^3P^0_2$	$3d^{10}4s4d^3D_3$
14	357,69	5,08	N <sub>2</sub>	Друга додатна система C <sup>3</sup> Π <sub>u</sub> <sup>+</sup> –B <sup>3</sup> Π <sub>g</sub> <sup>+</sup> (0;1)			

зряді можуть визначатися процесами їх збудження і йонізації електронами з метастабільних рівнів, з основного стану відповідного йона та процесами діелектронної рекомбінації [15]. Ефективні перерізи збудження йонів перехідних металів електронним ударом є великими і для йонів Цинку і досягають  $10^{-16}$  см<sup>2</sup> [16]. Передумовою протікання таких процесів виступає висока концентрація електронів в плазмі перенапруженого розряду на каналній стадії, яка досягає  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> [17].

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, експериментальні дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду в сумішах аргону з парами срібла і цинку, які вносяться в плазму за електронним механізмом показано, що при атмосферних тисках аргону між двома електродами з срібла або цинку, за міжелектродної віддалі у 2 мм в газопаровій суміші аргон–срібло запалювався достатньо однорідний розряд з імпульсною електричною потужністю до 1,5 МВт і енергетичним

внеском в плазму за один імпульс — 134,6 мДж; в газопаровій суміші аргон–цинк ці величини склали 1,2 МВт і 167 мДж, відповідно.

Дослідження спектральних характеристик плазми на основі газопарових сумішей і аргон–срібло і аргон–цинк показало, що найбільш інтенсивними в ультрафіолетовій ділянці спектру були спектральні лінії атомів і однозарядних йонів Аргентуму або Цинку. Інтенсивність спектральних ліній атомів і йонів Аргентуму або Цинку зростала із збільшенням частоти слідування імпульсів не прямопропорційно зміні частоти, що вказує на значний вплив процесів гасіння верхніх енергетичних рівнів атомів та йонів цих металів буферним газом — аргоном у міжімпульсний проміжок часу.

Наявність у плазмі, що досліджувалась, інтенсивного УФ-випромінювання в спектральному діапазоні 200–350 нм важливо для використання в плазмохімічних реакторах синтезу поверхневих мікро-наноструктур срібла або цинку з автоматичним асистуванням зародків плівки на підкладинці УФ-випромінюванням атомів і йонів Аргентуму або Цинку, що перспективно для впливу на електричні характеристики синтезованих плівок (можливо зменшення їх опору). При встановленні підкладинки з кварцу біля системи електрод і роботі з частотою 1000 Гц протягом 30–50 хвилин на ній формувалися достатньо однорідні плівки срібла або цинку площею біля 1 см<sup>2</sup>.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. O. K. Shuaibov and A. O. Malinina, *Progress in Physics of Metals*, **22**, No. 3: 382 (2021).
2. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
3. 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).
4. A. Kh. Abduev, A. Sh. Asvarov, A. K. Akhmedov, R. M. Emirov, and V. V. Belyaev, *Tech. Phys. Lett.*, **43**, No. 11: 1016 (2017).
5. 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).
6. G. Palani, K. Kannan, D. Radhika, P. Vijayakumar, and K. Pakiyaraj, *Phys. Chem. Solid State*, **21**, No. 4: 571 (2020).
7. C. Marambio-Jones and E. M. Hoek, *J. Nanoparticle Res.*, **12**: 1531 (2010).
8. A. B. G. Lansdown, *Curr. Probl. Dermatol.*, **33**: 17 (2006).
9. O. K. Shuaibov, A. O. Malinina, R. V. Hrytsak, O. M. Malinin, Yu. Yu. Bilak, Z. T. Gomoki, and M. I. Vatralla, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 12: 1683 (2021).
10. A. R. Striganov, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms* (New York: Springer New York: 1968).

11. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form.*
12. С. И. Максимов, А. В. Кретинина, Н. С. Фомина, Л. Н. Галль, *Научное приборостроение*, **25**, № 1: 36 (2015).
13. Г. А. Месяц, *Усп. физических наук*, **165**, № 6: 601 (1995).
14. Yu. M. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*, **104**, No. 2: 159 (2008).
15. R. Shyker, Y. Binur, and A. Szoke, *Phys. Rev. A*, **12**, No. 2: 512 (1975).
16. A. N. Gomonai, *J. Appl. Spectroscopy*, **82**, No. 1: 17 (2015).
17. D. Levko and L. R. Laxminarayan, *Physics of Plasmas*, **22**: 123518 (2015).

## REFERENCES

1. O. K. Shuaibov and A. O. Malinina, *Progress in Physics of Metals*, **22**, No. 3: 382 (2021).
2. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
3. 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).
4. A. Kh. Abduev, A. Sh. Asvarov, A. K. Akhmedov, R. M. Emirov, and V. V. Belyaev, *Tech. Phys. Lett.*, **43**, No. 11: 1016 (2017).
5. 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).
6. G. Palani, K. Kannan, D. Radhika, P. Vijayakumar, and K. Pakiyaraj, *Phys. Chem. Solid State*, **21**, No. 4: 571 (2020).
7. C. Marambio-Jones and E. M. Hoek, *J. Nanoparticle Res.*, **12**: 1531 (2010).
8. A. B. G. Lansdown, *Curr. Probl. Dermatol.*, **33**: 17 (2006).
9. O. K. Shuaibov, A. O. Malinina, R. V. Hrytsak, O. M. Malinin, Yu. Yu. Bilak, Z. T. Gomoki, and M. I. Vatralla, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 12: 1683 (2021).
10. A. R. Striganov, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms* (New York: Springer New York: 1968).
11. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form.*
12. S. I. Maksimov, A. V. Kretinina, N. S. Fomina, and L. N. Gall, *Nauchnoye Priborostroenie*, **25**, No. 1: 36 (2015) (in Russian).
13. G. A. Mesyats, *Physics-Uspokhi*, **38**, No. 6: 567 (1995).
14. Yu. M. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*, **104**, No. 2: 159 (2008).
15. R. Shyker, Y. Binur, and A. Szoke, *Phys. Rev. A*, **12**, No. 2: 512 (1975).
16. A. N. Gomonai, *J. Appl. Spectroscopy*, **82**, No. 1: 17 (2015).
17. D. Levko and L. R. Laxminarayan, *Physics of Plasmas*, **22**: 123518 (2015).