

PACS numbers: 51.50.+v, 52.80.-s, 52.80.Mg, 52.80.Tn, 52.90.+z, 79.60.Jv, 81.40.Wx

**Умови синтезу наноструктур оксиду Цинку з продуктів  
деструкції перенапруженого наносекундного розряду між  
електродами з цинку в кисні під опромінюванням  
підкладинки ультрафіолетовим випромінюванням**

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

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

Наведено характеристики та параметри плазми перенапруженого наносекундного розряду, який запалювався між електродами з цинку в кисні ( $p = 13,3$  і  $101,3$  кПа). Пари Цинку вносилися у розряд за рахунок мікробухів природніх неоднорідностей на поверхнях цинкових електрод у сильному електричному полі. Це створює передумови для синтезу тонких наноструктурованих плівок оксиду Цинку, які можуть бути осажені на твердій діелектричній підкладці, встановленій біля системи електрод. Представлено результати дослідження оптичних характеристик перенапруженого наносекундного розряду із величиною розрядного проміжку  $d = 2$  мм. Ідентифікація спектрів випромінювання плазми дала змогу встановити основні збуджені продукти плазми, які формують спектр УФ-випромінювання плазми та виступають одночасно імпульсним джерелом кластерів і малих наночастинок оксиду Цинку. Методом числового моделювання параметрів плазми розряду на парах Цинку та кисню, яке ґрунтується на розв'язку Больцманового кінетичного рівняння для функції розподілу електронів за енергіями, розраховано параметри плазми:  $T_e$  (температуру),  $N_e$  (густину 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).

The characteristics and parameters of the plasma of the overstressed nanosecond discharge, which was ignited between the electrodes of zinc in oxygen ( $p = 13.3$  and  $101.3$  kPa), are presented. Zinc vapours were introduced into the discharge due to microexplosions of natural inhomogeneities on the surfaces of zinc electrodes in a strong electric field. This creates the preconditions for the synthesis of nanostructured thin zinc oxide

films, which can be deposited on a solid dielectric substrate installed near the electrode system. The results of the study of the optical characteristics of the overstressed nanosecond discharge at the value of the discharge interval  $d = 2$  mm are presented. Identification of plasma radiation spectra allows establishing the main excited plasma products, which form the spectrum of UV radiation of plasma and act simultaneously as a pulsed source of clusters and small particles of zinc oxide. The method of numerical modelling of plasma parameters of the zinc and oxygen vapour discharge, which is based on the solution of the Boltzmann kinetic equation for the electron-energy distribution function, is used to calculate the plasma parameters ( $T_e$ —temperature,  $N_e$ —electron density, rate constants of electronic reactions) depending on the value of the  $E/N$  ratio (where  $E$ —electric field strength,  $N$ —total concentration of discharge particles).

**Ключові слова:** перенапружений наносекундний розряд, оксид Цинку, кисень, тонкі плівки, УФ-випромінення, параметри плазми.

**Key words:** overvoltage nanosecond discharge, zinc oxide, oxygen, thin films, UV radiation, plasma parameters.

*(Отримано 30 травня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

Оксид цинку — це прямозонний напівпровідник з шириною забороненої зони близько 3,37 eV та енергією зв'язку екситону  $\cong 60$  meV). Він є перспективним для використання як матеріал для виготовлення прозорих контактів і деяких інших важливих застосувань [1–3], фотоприймачів [4], світлодіод [5]. Зокрема, в [2] було встановлено придатність наноструктурованих тонких плівок оксиду Цинку для захисту від земної ультрафіолетової частини сонячного спектру, одержаних хемічним методом на недорогих гнучких підкладках, а у праці [3] наведено результати дослідження наночастинок оксиду Цинку, активованих гамма випроміненням, які показали, що в структурі ZnO відсутні істотні зміни, і вони можуть бути використані для лікування раку.

Крім хемічних методів синтезу наноструктурованих тонких плівок оксиду Цинку, достатньо широко використовуються і різні фізичні методи одержання таких матеріалів. Так, у [6] тонкі плівки ZnO:Al осаджувалися на тверді підкладки методом пошарового осадження у високочастотному магнетроні; у праці [7] наведено результати дослідження будови, морфології та люмінесценції наноструктур ZnO, які були синтезовані методами електротермічного й електророзрядного розпорощень у газах і рідинах; в значній кількості випадків використовують метод імпульсного лазерного осадження [8]. За останній час значно підсилюється інтерес і до одновимірних наноструктур оксиду Цинку (нанострижні,

нанодроти), оскільки в них проявляються розмірні квантові ефекти; вони мають високу поверхневу площу, що важливо для реалізації великої абсорбційної здатності матеріялу, а також вони перспективні для розробки лазерів [9].

Менш дослідженим на даний час є спосіб синтезу наноструктурованих тонких плівок оксиду Цинку, коли осадження їх відбувається з продуктів розпорошення цинкових електрод в імпульсному розряді атмосферного тиску та продуктів дисоціації буферного газу (переважно повітря) [10]. Утворення пари матеріялу електрод відбувається за невеликої середньої температури розрядного пристрою ( $T \leq 100^\circ\text{C}$ ) за рахунок мікровибухів природніх неоднорідностей електрод у сильному електричному полі (ектонний механізм) [11]. Синтеза плівки за цих умов відбувається за автоматичного асистування УФ-випроміненням плазми імпульсного розряду [12]. Близький спосіб синтезу з використанням для УФ-підсвічування підкладинки з плівкою в процесі її осадження окремої ртутної лампи був застосований у [13] під час синтезу наноструктур оксиду Цинку у вигляді набору наностовпчиків, що уможливило зменшити опір плівкових наноструктур відносно тих, які були осаджені без асистування УФ-променями.

Експериментальні результати та характеристики наноструктурованих плівок оксиду Цинку в повітрі атмосферного тиску та суміші повітря з парою води наведено в [14–16]. Результати дослідження емісійних характеристик плазми перенапруженого наносекундного розряду в кисні (за тиску  $p = 13,3$  кПа) наведено в [17]. Розрахунки параметрів плазми перенапруженого наносекундного розряду в сумішах пари Цинку з повітрям або киснем, який би був проведений для типового робочого режиму синтезу плівкових наноструктур оксиду Цинку, на даний час відсутні. В [18] наведено результати дослідження впливу довжини іскрового проміжку ( $d = 1–20$  мм) на внесення енергії у розрядний канал, одержані шляхом чисельного моделювання процесу розвитку іскрового розряду в азоті атмосферного тиску за різних параметрів  $RLC$ -кола. Встановлено, що збільшення довжини проміжку збільшує опір іскри; у розрядному колі із накопиченою енергією понад десятки джоулів спостерігається лінійна залежність між довжиною проміжку й енергією, що виділяється у ньому, а із накопиченням енергії до одного джоуля ця залежність стає нелінійною.

Для оптимізації синтезу плівкових наноструктур на основі оксиду Цинку важливо провести оптимізацію роботи подібного газорозрядного реактора з використанням не лише повітря атмосферного тиску, але і в кисні за різних його тисків. Дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку в кисні атмосферного тиску та числове моделювання параметрів плазми в газопарових сумішах «кисень–

Цинк» для умов, близьких до реалізованих в експерименті, раніше не проводилися.

В даній статті наведено результати дослідження емісійних характеристик перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку в кисні; в результаті розпорошення цинкових електрод і деструкції молекул Оксигену в плазмі такі розряди виступають джерелом як УФ-випромінення, так і потоку кластерів і наночастинок оксиду Цинку, які можуть бути осаджені на тверду підкладку, встановлену біля системи електрод, що є перспективним для синтезу плівок оксиду Цинку в полі УФ-випромінення; також наведено параметри плазми розряду, одержані в результаті числового моделювання транспортних параметрів плазми, питомих втрат енергії розряду на основні електронні процеси та констант швидкості електронних процесів у розряді в газопаровій суміші «кисень–Цинк» шляхом розв'язання Больцманнова кінетичного рівняння для функції розподілу електронів за енергіями.

## 2. ТЕХНІКА І УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Перенапружений наносекундний розряд запалювався між циліндричними електродами з цинку, яких було встановлено у діелектричній камері. Блок-схему експериментального пристрою та системи для осадження тонких плівок з плазми розряду наведено в [16]. Віддаль між електродами складала 2 мм. Розрядна камера відкачувалася форвакуумною помпою до залишкового тиску у 10 Па, а після в камеру напускали кисень. Діаметер циліндричних електрод дорівнював 5 мм; радіус закруглення їхньої робочої торцевої поверхні для обох електрод дорівнював 3 мм.

Запалювання перенапруженого наносекундного розряду в кисні відбувалося за допомогою високовольтного модулятора біполярних імпульсів напруги із загальною тривалістю імпульсів напруги у 50–150 нс за амплітуди додатніх і від'ємних складових у  $\pm 20$ –40 кВ. Частота повторення імпульсів напруги — 100 Гц. Для реєстрації спектрів випромінення плазми використовувався монохроматор МДР-2 та фотопомножувач (ФЭУ-106). Сигнал з фотопомножувача надходив на підсилювач і фіксувався з використанням амплітудно-цифрового перетворювача в автоматизованій системі вимірювання спектрів на дисплеї персонального комп'ютера. Випромінення розряду досліджувалося у спектральній області 200–650 нм.

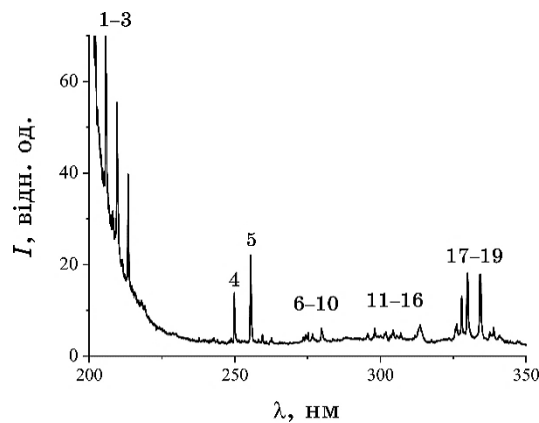
## 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРУЖЕНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ

За тисків кисню в діапазоні від 13,3 до 101,3 кПа наносекундний

розряд був однорідним, що завдячує передіонізації газового середовища від супутнього рентгенівського випромінювання та від пучка електронів-втікачів [19]. Режим «точкового розряду» досягався лише за частот повторення імпульсів напруги в діапазоні  $f = 40\text{--}150$  Гц, а із збільшенням частоти до 1000 Гц об'єм плазми газорозрядного випромінювача зростає до  $100\text{ мм}^3$ .

Характерні осцилограми імпульсів напруги та струму для перенапружених наносекундних розрядів між електродами в кисні атмосферного тиску були близькими до аналогічного розряду в повітрі між електродами з цинку або міді [14–16]. Осцилограми напруги та струму були у формі згасаючих у часі осциляцій тривалістю близько 7–10 нс, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору високовольтного модулятора з опором навантаження. Осциляції електричних характеристик найбільше проявлялися на осцилограмах напруги, оскільки осцилограми розрядного струму були в значній мірі проінтегровані за часом внаслідок великої сталої часу поясу за Роговським. Максимальна величина спаду напруги на розрядному проміжку складала 30–50 кВ, враховуючи додатню та від'ємну амплітуди напруги. Максимальна амплітуда струму сягала 350 А. Найбільша величина імпульсної потужності розряду досягалася в перші 100–120 нс з моменту його запалювання та сягала 4–5 МВт. Максимальна енергія окремого електричного імпульсу складала 100 мДж.

На рисунку 1 наведено ультрафіолетову частину спектру випромінювання перенапруженого поперечного розряду, яка є основною у випромінненні між електродами з цинку за тиску кисню у 101,3 кПа, а повний спектр випроміннювання такого розряду та результати його ідентифікації за тиску кисню у 13,3 кПа ( $d = 2$  мм)



**Рис. 1.** Спектр випроміннювання перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку за тиску кисню у 101,3 кПа.<sup>1</sup>

наведено у [17]. Спектри за атмосферного тиску та  $p = 13,3$  кПа подібні і відрізнялися лише інтенсивностями спектральних ліній.

Результати ідентифікації спектру випромінення, наведеного на рис. 1, наведено у табл. Задля ідентифікації окремих спектральних ліній і смуг у спектрах випромінення розряду використовувалися довідники [20, 21].

В спектральному інтервалі 206–280 нм випромінення перенапруженого наносекундного розряду на основі газопарової суміші «кисень–Цинк» реєструвалися переважно спектральні лінії Цинку (Zn I, Zn II). Із йонних ліній Цинку виділялися за інтенсивністю: 206,20, 2209,99 нм Zn II, а з атомових спектральних ліній — 213,85 нм Zn I. Подібний розподіл інтенсивності випромінення плазми парів Цинку спостерігався в газорозрядній лампі [22].

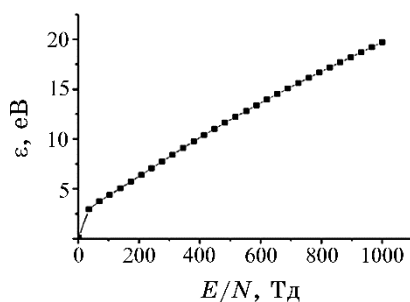
В спектрах випромінення плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку (із  $d = 1$  мм) у повітрі з малою домішкою парів води за тиску суміші у 103,3 кПа основними в УФ-діяпазоні спектру були йонні лінії: 202,6, 206,2 нм Zn II, а в другій групі лінії атома Цинку — 250,2, 255,8 нм Zn I [15], що не корелює із відповідними результатами для розряду в кисні (рис. 2. і табл.). Це може бути спричинено зміною роду бу-

**ТАБЛИЦЯ.** Результати розшифрування спектрів випромінення перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку за тисків кисню у 13,3 і 101,3 кПа.<sup>2</sup>

№	$\lambda_{\text{табл.}}, \text{ нм}$	$I_{\text{експ.}}, \text{ відн. од.}$ $p(\text{O}_2) = 13,3 \text{ кПа}$	$I_{\text{експ.}}, \text{ відн. од.}$ $p(\text{O}_2) = 101,3 \text{ кПа}$	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}, \text{ еВ}$	$E_{\text{верх.}}, \text{ еВ}$	Терм. <sub>нижн.</sub>	Терм. <sub>верх.</sub>
1	206,20	34,23	72,52	Zn II	0	6,01	$3d^{10}4s \ ^2S_{1/2}$	$3d^{10}4p \ ^2P^0_{1/2}$
2	209,99	35,78	55,72	Zn II	6,11	12,02	$3d^{10}4p \ ^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}4d \ ^2D_{5/2}$
3	213,85	23,93	39,54	Zn I	0	5,79	$3d^{10}4s^2 \ ^1S_0$	$3d^{10}4s4p \ ^2P^0_1$
4	250,19	10,57	14,38	Zn I	6,01	10,96	$3d^{10}4p \ ^2P^0_{1/2}$	$3d^{10}5s \ ^2S_{1/2}$
5	255,79	18,40	22,59	Zn II	6,11	10,96	$3d^{10}4p \ ^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}5s \ ^2S_{1/2}$
6	258,24	2,47	5,22	Zn I	4,02	8,82	$3d^{10}4s4p \ ^3P^0_1$	$3d^{10}4s6d \ ^3D_2$
7	267,05	0,81	3,33	Zn I	4,00	8,64	$3d^{10}4s4p \ ^3P^0_0$	$3d^{10}4s7s \ ^3S_1$
8	273,32	1,36	4,19	O II	25,28	29,82	$2s^22p^2(^3P)3p \ ^2S_{1/2}$	$2s^22p^2(^3P)4s \ ^2P_{3/2}$
9	277,09	2,4	4,54	Zn I	4,02	8,50	$3d^{10}4s4p \ ^3P^0_1$	$3d^{10}4s5d \ ^3D_1$
10	280,08	3,4	6,46	Zn I	4,07	8,50	$3d^{10}4s4p \ ^3P^0_2$	$3d^{10}4s5d \ ^3D_3$

Продовження ТАБЛИЦІ.

№	$\lambda_{\text{табл.}}, \text{нм}$	$I_{\text{експ.}}, \text{відн. од.}$ $p(\text{O}_2) - 13,3 \text{ кПа}$	$I_{\text{експ.}}, \text{відн. од.}$ $p(\text{O}_2) - 101,3 \text{ кПа}$	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}, \text{еВ}$	$E_{\text{верх.}}, \text{еВ}$	Терм <sub>нижн.</sub>	Терм <sub>верх.</sub>
11	298,04	3,31	6,13	O II	28,82	32,98	$2s^2 2p^2(^3P) 3d^4 P_{5/2}$	$2s^2 2p^2(^3P) 5f$ $F^2[4]_{7/2}^0$
12	302,01	2,26	5,33	O II	28,83	32,93	$2s^2 2p^2(^3P) 3d^4 P_{3/2}$	$2s^2 2p^2(^3P) 5f$ $D^2[3]_{5/2}^0$
13	304,71	2,82	5,67	O II	28,88	32,95	$2s^2 2p^2(^3P) 3d^2 F_{7/2}$	$2s^2 2p^2(^3P) 5f$ $D^2[2]_{5/2}$
14	307,206	1,42	5,22	Zn I	4,07	8,11	$3d^{10} 4s 4p^3 P_2^0$	$3d^{10} 4s 6s^3 S_1$
15	313,60	4,71	7,36	N <sub>2</sub>	Друга додатня система		$C^3 \Pi_u^+ - B^3 \Pi_g^+ (2;1)$	
16	327,75	5,62	13,49	O II	25,83	29,61	$2s^2 2p^2(^3P) 3p^4 P_{3/2}^0$	$2s^2 2p^2(^3P) 4s^4 P_{5/2}$
17	329,49	12,89	18,12	O II	25,83	29,59	$2s^2 2p^2(^3P) 3p^4 P_{3/2}$	$2s^2 2p^2(^3P) 4s^4 P_{3/2}$
18	334,50	15,89	18,01	Zn I	4,07	7,78	$3d^{10} 4s 4p^3 P_2$	$3d^{10} 4s 4d^3 D_3$
19	339,02	3,57	6,13	O II	25,28	28,94	$2s^2 2p^2(^3P) 3p^2 S_{1/2}^0$	$2s^2 2p^2(^3P) 3d^2 P_{3/2}$



**Рис. 2.** Залежність середньої енергії електронів у плазмі розряду на суміші  $\text{Zn}:\text{O}_2 = 100:101300 \text{ Па}$  від зведеної напруженості електричного поля за загального тиску робочої суміші у  $101400 \text{ Па}$ .<sup>3</sup>

ферного газу, а також умовами формування ектонів за цих умов.

В спектральній області 300–500 нм основним джерелом випромінювання плазми були йони Оксигену. Найбільш інтенсивними спектральними лініями однозарядного йона Оксигену були лінії: 407,58, 411,92, 433,68, 441,48, 464,18, 464,91 і 470,53 нм O II. Енергії верхніх енергетичних станів у цих йонах Оксигену сяга-

ли 25–29 еВ, що вказує на високу температуру електронів у перенапруженому наносекундному розряді.

Порівняння співвідношення ефективних перерізів спектральних ліній атома Цинку:  $\lambda = 258,24$  і  $267,05$  нм, взятих з [23], з даними експерименту для обох газопарових сумішей «кисень–Цинк» показало, що відношення перерізів прямого електронного збудження цих ліній за енергії електронів  $E = 30$  еВ не відповідало відношенням інтенсивності цих спектральних ліній, одержаних в експерименті. З цього випливає, що прямий електронний удар в даному експерименті не є основним механізмом заселення верхніх енергетичних рівнів для спектральних ліній атома Цинку. Тому найбільш ймовірні механізми утворення збуджених атомів Цинку, йонів Цинку та Оксигену в перенапруженому наносекундному розряді зумовлені процесами збудження їх та йонізації електронами з метастабільних рівнів, з основного стану відповідного йона та процесами діелектронної рекомбінації [16].

### 3. ПАРАМЕТРИ ПЛАЗМИ

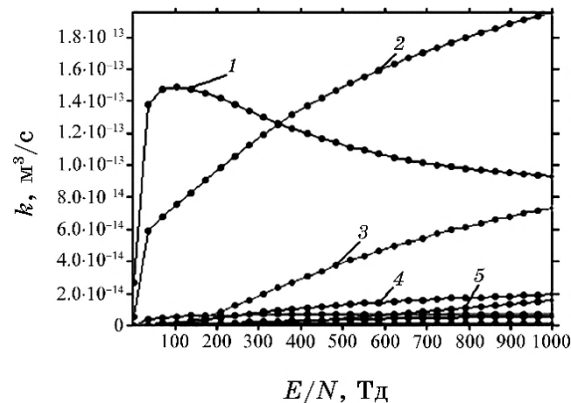
Параметри плазми газового розряду в газопаровій суміші Цинку з киснем із співвідношення компонент 100 Па–101,3 кПа визначалися внаслідок числового моделювання як повні інтеграли функції розподілу електронів за енергіями (ФРЕЕ) в розряді. ФРЕЕ знаходилися через числове розв’язання Больцманнова кінетичного рівняння в двочленному наближенні. Розрахунки ФРЕЕ проводилися з використанням програми авторів [24]. На основі розрахованих ФРЕЕ були визначені середні енергії електронів розряду, рухливість електронів, температури електронів, питомі втрати потужності електричного розряду на непружні та пружні електронні процеси, розсіяння електронів на атомах Цинку, молекулах кисню в залежності від величини зведеного електричного поля (відношення напруженості електричного поля ( $E$ ) до повної концентрації суміші парів Цинку та кисню ( $N$ )). Діапазон зміни величини параметра  $E/N = 1\text{--}1000$  Тд ( $1 \cdot 10^{-21}\text{--}1 \cdot 10^{-18}$  В·м<sup>2</sup>). Він включав також величини параметра  $E/N$ , які були реалізовані в експерименті. В інтегралі зіткнень електронів з атомами та молекулами були враховані наступні процеси: пружне розсіяння електронів на атомах Цинку і молекулах Оксигену, збудження енергетичних рівнів атома Цинку (з енергіями порогу у 3,89, 4,00, 4,60, 5,02, 5,64, 8,55, 8,82, 9,00, 9,10, 9,40, 10,61, 17,00, 17,61, 23,55 еВ), йонізація атома Цинку (енергія порогу — 9,40 еВ), збудження енергетичних рівнів молекули Оксигену: коливних (енергії порогу: 0,190, 0,380, 0,570, 0,750 еВ), електронних (енергії порогу: 0,977, 1,627, 4,500, 6,000, 8,400, 9,970 еВ), дисоціативного прилипання електрона (енергія порогу — 4,40



еВ), йонізації (енергія порогу — 12,06 еВ). Ефективні перерізи збудження й іонізації атомів Цинку електронами взято з праць [25, 26].

Середня енергія електронів розряду лінійно збільшувалася від 0,1075 до 2,935 еВ із збільшенням величини параметра  $E/N$  в діапазоні 1–35,45 Тд (рис. 2). За подальшого зростання величини параметра до 1000 Тд також спостерігалось лінійне збільшення середньої енергії електронів, проте з меншою швидкістю зростання. Для діапазону зведеної напруженості електричного поля 300 Тд і 510 Тд, за якого були проведені експериментальні дослідження електричних і оптичних характеристик розряду, середні енергії електронів мали значення у 8,431 і 12,22 еВ відповідно. А їхні найбільші енергії сягали величин у 98,68 і 156,4 еВ відповідно. Температура електронів складала: 97799,6 К і 141752 К, а швидкості дрейфу електронів —  $3,5 \cdot 10^5$  м/с та  $6,2 \cdot 10^6$  м/с за значень параметра  $E/N$  300 Тд і 510 Тд відповідно. Значення концентрації електронів за цих параметрів були наступними:  $1,18 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> і  $0,77 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> для густини струму у  $6,63 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> і  $7,65 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> на поверхні електроди джерела випромінювання ( $0,196 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>).

На рисунку 3 представлено результати числового моделювання залежності найбільших за значенням констант швидкості зіткнень електрона з атомом Цинку та молекулою Оксигену від величини параметра  $E/N$  у розряді на суміші пари Цинку та кисню



**Рис. 3.** Залежності констант швидкості зіткнень електронів з атомами Цинку і молекулами Оксигену від величини параметра  $E/N$  в розряді на суміші  $\text{Zn}-\text{O}_2 = 100:101300$  Па із загальним тиском у 101400 Па: 1 — пружне розсіяння на атомі Цинку; 2 — пружне розсіяння на молекулі Оксигену, 3 — йонізація атома Цинку (енергія порогу — 9,4 еВ); 4 — збудження стану молекули Оксигену (енергія порогу — 8,4 еВ); 5 — йонізація молекул Оксигену (енергія порогу — 12,06 еВ).<sup>4</sup>

за співвідношення парціальних тисків складових парогазової суміші 100:101300 Па із її загальним тиском  $p = 101400$  Па. Дані константи електронних швидкостей характеризувалися високими абсолютними величинами, які знаходилися в діапазоні  $k \approx 1,9 \cdot 10^{-13} - 1,6 \cdot 10^{-20}$  м<sup>3</sup>/с, що, в першу чергу, зумовлено значними величинами абсолютних ефективних перерізів відповідних електронних процесів. У діапазоні зведених напруженостей електричного поля 300–510 Тд, за якого були проведені експериментальні дослідження електричних та оптичних характеристик розряду константи швидкості пружного розсіяння електронів: на атомах Цинку мали значення  $1,265 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с і  $1,1 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с; на молекулах Оксигену —  $1,194 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с і  $1,512 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>/с. Константи швидкості: йонізації атомів Цинку —  $1,964 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/с і  $4,061 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/с, збудження електронного стану молекули Оксигену (з пороговою енергією у 8,4 еВ) —  $8,236 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/с і  $1,322 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/с, йонізації молекул Оксигену (енергія порогоу — 12,06 еВ) —  $1,298 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с і  $4,622 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>/с.

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, встановлено, що перенапружений наносекундний розряд у кисні ( $p = 13,3 - 101,3$  кПа) між електродами з цинку ( $d = 2$  мм) є достатньо однорідним плазмоутворенням з імпульсною електричною потужністю до 5 МВт та енергетичним внеском у плазму до 100 мДж.

Дослідження випромінювання розряду в газопарових сумішах «кисень–Цинк» показало, що в спектрах випромінювання плазми у діапазоні довжин хвиль 200–650 нм превалювало випромінювання однозарядних йонів Цинку й Оксигену, а найбільш інтенсивними були резонансні спектральні лінії атома ( $\lambda = 213,85$  нм) і однозарядного йона Цинку ( $\lambda = 206,20$  нм), а також лінія з  $\lambda = 209,99$  нм Zn I; інтенсивність випромінювання спектральних ліній Цинку й Оксигену збільшувалася із зростанням тиску кисню; тому розряд за атмосферних тисків кисню буде найбільш перспективним для застосування за автоматичного асистування синтезі тонких плівок на основі наноструктур оксиду Цинку, що є також перспективним для впливу на електричні характеристики синтезованих плівок (зменшення їхнього опору). Виходячи з одержаного спектрального розподілу випромінювання плазми, найбільш ймовірними процесами утворення збуджених атомів і однозарядних йонів у даному розряді можуть бути реакції збудження йонів Цинку й Оксигену електронами та процеси діелектронної рекомбінації.

Числове моделювання розряду в суміші атмосферного тиску (для  $p(\text{Zn}) = 100$  Па) показало, що для діапазону зведеної напруженості електричного поля 300–510 Тд, за якого проводилися

експериментальні дослідження характеристик розряду: середні енергії електронів знаходилися в діапазоні 8,431–12,22 еВ; температура електронів змінювалася в діапазоні 97799,6–141752 К; швидкості дрейфу електронів мали значення  $3,5 \cdot 10^5$  м/с та  $6,2 \cdot 10^6$  м/с; концентрації електронів складали  $1,18 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> та  $0,77 \cdot 10^{20}$  м<sup>-33</sup> за величини параметра  $E/N = 300$  і 510 Тд відповідно. Константи швидкості зіткнень електронів із атомами Цинку та молекулами Оксигену були значними:  $k \approx 1,9 \cdot 10^{-13} - 1,6 \cdot 10^{-20}$  м<sup>3</sup>/с, що зумовлено великими абсолютними ефективними перерізами відповідних процесів. Вони сягали максимальної величини в діапазоні зведеної напруженості електричного поля у 300–510 Тд.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. Mridha and D. Basak, *Journal of Applied Physics*, **101**: 08102 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2724808>
2. N. P. Klochko, K. S. Klepikova, D. O. Zhadan, V. R. Kopach, I. V. Khrypunova, S. I. Petrushenko, S. V. Dukarov, V. M. Lyubov, and A. L. Khrypunova, *J. Nano- Electron. Phys.*, **12**, No. 3: 03007 (2020); [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(3\).03007](https://doi.org/10.21272/jnep.12(3).03007)
3. І. Д. Федорец, Н. Л. Хлапова, Н. П. Дикий, А. Н. Довбня, Е. П. Медведева, Ю. В. Ляшко, Н. С. Луцай, Д. В. Медведев, В. Л. Уваров, *Вісник Харківського університету. Серія фізична*, **916**: 100 (2010).
4. D. K. Hwang, M. S. Oh, J. H. Lim, and S. J. Park, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**: 387 (2007); <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/R01>
5. C. P. Chen, P. H. Lin, L. Y. Chen, M. Y. Ke, Y. W. Cheng, and J. J. Huang, *Nanotechnology*, **20**: 245204 (2009); <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/24/245204>
6. В. І. Попович, А. І. Євтушенко, О. С. Литвин, В. Р. Романюк, В. М. Ткач, В. А. Батурін, О. Є. Карпенко, М. В. Дранчук, Л. О. Клочков, М. Г. Душейко, В. А. Карпина, Г. В. Лашкар'єв, *Укр. фіз. журн.*, **61**, No. 4: 325 (2016); <https://doi.org/10.15407/ujpe61.04.0325>
7. В. С. Бураков, Н. В. Тарасенко, Е. А. Невар, М. И. Неделько, *ЖТФ*, **81**, No. 2: 89 (2011).
8. І. В. Курило, І. О. Рудий, І. Є. Лопатинський, М. С. Фружинський, І. С. Вірт, П. Потера, Г. Лука, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроніка*, **708**: 24 (2011).
9. A. M. Opolchentsev, L. A. Zadorozhnaya, Ch. M. Briskina, V. M. Markushev, A. P. Tarasov, A. E. Muslimov, and V. M. Kanevskii, *Optics and Spectroscopy*, **125**, No. 4: 501 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0030400X1810017X>
10. O. K. Shuaibov, O. 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); <https://doi.org/10.15407/ujpe63.9.790>
11. G. A. Mesyats, *Usp. Fizich. Nauk*, **165**, No. 6: 601 (1995); <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>

12. A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, Z. T. Gomoki, A. A. Malinina, and A. N. Malinin, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **56**, No. 4: 510 (2020); <https://doi.org/10.3103/S106837552004016X>
13. А. Х. Абдуев, А. Ш. Асваров, А. К. Ахметов, Р. М. Эмиров, В. В. Беляев, *Письма в ЖТФ*, **43**, № 22: 40 (2017); <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.22.45259.16874>
14. О. Й. Миня, О. К. Шуайбов, З. Т. Гомоки, В. В. Данило, М. М. Чаварга, Л. Е. Кукри, *Вісник Ужгородського університету. Фізика*, **39**: 93 (2016).
15. В. В. Данило, О. Й. Миня, О. К. Шуайбов, І. В. Шевера, З. Т. Гомоки, М. В. Дудич, *Науковий вісник Ужгородського університету. Фізика*, **42**: 128 (2017); <https://doi.org/10.24144/2415-8038>
16. 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>
17. М. І. Ваграла, Р. В. Грицак, А. О. Малініна, О. О. Кудін, О. К. Шуайбов, *International Conference of Young Scientists and Post-Graduate Students (May 26–28, 2021, Uzhhorod): Book of Abstracts*, p. 148.
18. K. Korytchenko, O. Shypul, D. Samoilenko, I. Varshamova, A. Lisniak, S. Harbuz, and K. Ostapov, *Electrical Engineering & Electromechanics*, **1**: 35 (2021); <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.1.06>
19. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
20. A. R. Striganov, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms* (New York: Springer: 1968).
21. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*; [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
22. С. И. Максимов, А. В. Кретинина, Н. С. Фомина, Л. Н. Галль, *Научное приборостроение*, **25**, № 1: 36 (2015).
23. Yu. M. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*, **104**, No. 2: 159 (2008); <https://doi.org/10.1134/S0030400X08020021>
24. BOLSIG+ <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
25. Y. P. Bohdanova, S. V. Riazantseva, and V. E. Yakhontova, *Optics and Spectroscopy*, **51**: 444 (1981) (in Russian).
26. A. Y. Korotkov, *Technical Physics*, **62**, No. 7: 142 (1992).

## REFERENCES

1. S. Mridha and D. Basak, *Journal of Applied Physics*, **101**: 08102 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2724808>
2. N. P. Klochko, K. S. Klepikova, D. O. Zhadan, V. R. Kopach, I. V. Khrypunova, S. I. Petrushenko, S. V. Dukarov, V. M. Lyubov, and A. L. Khrypunova, *J. Nano-Electron. Phys.*, **12**, No. 3: 03007 (2020); [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(3\).03007](https://doi.org/10.21272/jnep.12(3).03007)
3. I. D. Fedorets, N. L. Glapova, N. P. Dikiy, A. N. Dovbnya, E. P. Medvedeva, Yu. V. Lyashko, N. S. Lutsay, D. V. Medvedev, and V. L. Uvarov, *Bulletin of Kharkiv University. Physical Series*, **916**: 100 (2010) (in Russian).
4. D. K. Hwang, M. S. Oh, J. H. Lim, and S. J. Park, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**: 387 (2007); <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/R01>

5. C. P. Chen, P. H. Lin, L. Y. Chen, M. Y. Ke, Y. W. Cheng, and J. J. Huang, *Nanotechnology*, **20**: 245204 (2009); <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/24/245204>
6. V. I. Popovych, A. I. Ievtushenko, O. S. Lytvyn, V. R. Romanjuk, V. M. Tkach, V. A. Baturyn, O. Y. Karpenko, M. V. Dranchuk, L. O. Klochkov, M. G. Dushejko, V. A. Karpyna, and G. V. Lashkarov, *Ukr. J. Phys.*, **61**, No. 4: 325 (2016) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/ujpe61.04.0325>
7. V. S. Burakov, N. V. Tarasenko, E. A. Nevar, and M. I. Nedel'ko, *Technical Physics*, **81**, No. 2: 89 (2011) (in Russian).
8. I. V. Kurylo, I. O. Rudyi, I. Ye. Lopatynskiy, M. S. Fruzhynskiy, I. S. Virt, P. Potera, and H. Luka, *Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Electronics*, **708**: 24 (2011) (in Ukrainian).
9. A. M. Opolchentsev, L. A. Zadorozhnaya, Ch. M. Briskina, V. M. Markushev, A. P. Tarasov, A. E. Muslimov, and V. M. Kanevskii, *Optics and Spectroscopy*, **125**, No. 4: 501 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0030400X1810017X>
10. O. K. Shuaibov, O. 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); <https://doi.org/10.15407/ujpe63.9.790>
11. G. A. Mesyats, *Usp. Fizich. Nauk*, **165**, No. 6: 601 (1995); <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>
12. A. K. Shuaibov, A. Y. Minya, Z. T. Gomoki, A. A. Malinina, and A. N. Malinin, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **56**, No. 4: 510 (2020); <https://doi.org/10.3103/S106837552004016X>
13. A. H. Abduev, A. Sh. Asvarov, A. K. Ahmetov, R. M. Jemirov, and V. V. Beljaev, *Pisma v ZhTF*, **43**, No. 22: 40 (2017) (in Russian); <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.22.45259.16874>
14. O. Y. Mynia, O. K. Shuaibov, Z. T. Homoki, V. V. Danylo, M. M. Chavarha, and L. E. Kukri, *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series 'Physics'*, **39**: 93 (2016) (in Ukrainian).
15. V. V. Danylo, O. Y. Mynia, O. K. Shuaibov, I. V. Shevera, Z. T. Homoki, and M. V. Dudych, *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series 'Physics'*, **42**: 128 (2017) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.24144/2415-8038>
16. 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>
17. M. I. Vatralla, R. V. Hrytsak, A. O. Malinina, O. O. Kudin, and O. K. Shuaibov, *International Conference of Young Scientists and Post-Graduate Students (May 26–28, 2021, Uzhhorod): Book of Abstracts*, p. 148.
18. K. Korytchenko, O. Shypul, D. Samoilenko, I. Varshamova, A. Lisniak, S. Harbuz, and K. Ostapov, *Electrical Engineering & Electromechanics*, **1**: 35 (2021); <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.1.06>
19. V. F. Tarasenko, *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharge* (New York: Nova Science Publishers Inc.: 2014).
20. A. R. Striganov, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms* (New York: Springer: 1968).
21. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*; [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
22. S. I. Maksimov, A. V. Kretinina, N. S. Fomina, L. N. Gall', *Nauchnoye*

- Priborostroenie*, **25**, No. 1: 36 (2015) (in Russian).
23. Yu. M. Smirnov, *Optics and Spectroscopy*, **104**, No. 2: 159 (2008);  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X08020021>
24. BOLSIG+ <http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/>
25. Y. P. Bogdanova, S. V. Ryazantseva, and V. E. Yakhontova, *Optics and Spectroscopy*, **51**: 444 (1981) (in Russian).
26. A. Y. Korotkov, *Technical Physics*, **62**, No. 7: 142 (1992).

---

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

<sup>1</sup> Fig. 1. The emission spectrum of the overstressed nanosecond discharge between the zinc electrodes at an oxygen pressure of 101.3 kPa.

<sup>2</sup> TABLE. The results of decoding the emission spectra of the overstressed nanosecond discharge between the electrodes of zinc at oxygen pressures of 13.3 and 101.3 kPa.

<sup>3</sup> Fig. 2. The dependence of mean energy of electrons in the discharge plasma on the mixture Zn:O<sub>2</sub> = 100:101300 Pa on the reduced electric field strength at the total pressure of the working mixture of 101400 Pa.

<sup>4</sup> Fig. 3. Dependences of electron rate constants with zinc atoms and oxygen molecules on the value of the parameter  $E/N$  in the discharge on a mixture of Zn-O<sub>2</sub> = 100:101300 Pa at a total pressure of 101400 Pa: 1—elastic scattering on a zinc atom; 2—elastic scattering on an oxygen molecule; 3—ionization of the zinc atom (threshold energy of 9.4 eV); 4—excitation of the oxygen molecule (threshold energy of 8.4 eV); 5—ionization of oxygen molecules (threshold energy of 12.06 eV).