

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

Дослідження умов газорозрядного синтезу наноструктур оксиду цинку при автоматичному УФ - опроміненні підкладки плазмою

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Ужгород, Україна, alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

Приведено спектроскопічні характеристики біполярного, перенапруженого розряду наносекундної тривалості між електродами з цинку в кисні при тиску $p(\text{O}_2) = 13.3$ кПа. В процесі мікробухів неоднорідностей на робочих поверхнях електродів в сильному електричному полі в розрядний проміжок вносяться пари цинку. Це створює передумови для утворення молекул і кластерів оксиду цинку в плазмі та синтезу тонких острівкових плівок оксиду цинку, які можуть осаджувались на діелектричній підкладці, встановленій поблизу від центру розрядного проміжку.

Спектральні характеристики розряду досліджувались з центральної частини розрядного проміжку величиною 2 мм. Встановлено основні збуджені складові плазми парогазової суміші на основі цинку і кисню при високих значеннях параметра E/N (де E – напруженість електричного поля; N – сумарна концентрація часток в плазмі), які при осадженні за межами розрядної плазми можуть приводити до утворення тонких наноструктурованих плівок на основі оксиду цинку.

Ключові слова: перенапружений наносекундний розряд, кисень, цинк, спектр випромінювання, плазма.

Подано до редакції 9.07.2021; подано до друку 13.11.2021.

Вступ

Оптичні характеристики наносекундного розряду у повітрі атмосферного тиску при відстані між металевими $d = 1-2$ см визначаються в УФ діапазоні спектру випромінюванням смуг другої додатної системи молекули азоту (280-390 нм), радикалів гідроксилу (ОН), окислів азоту (NO), смугами нітриду вуглецю (CN), а також окремими спектральними лініями атомів і однозарядних іонів азоту та кисню [1]. При зменшенні віддалі між електродами до 0.5-2.0 мм в спектрах випромінювання плазми таких наносекундних розрядів появляються спектральні лінії атомів та іонів матеріалу електродів (міді, заліза, цинку та інших) [2]. При роботі в режимі перенапруги міжелектродного проміжку в такій плазмі фіксуються електрони-втікачі, які переходять в режим

неперервного прискорення з енергіями на рівні амплітуди імпульсу напруги, що прикладена до розрядного проміжку [3,4]. Під дією пучка електронів-втікачів і супутнього йому рентгенівського випромінювання, які виконують роль передіонізації, в розрядних проміжках типу «сфера – сфера» з неоднорідним розподілом напруженості електричного поля формується просторово однорідний розряд, який може бути використаний для розробок нових УФ-ламп з малим об'ємом плазмового середовища ($V < 10$ мм³). Такі «точкові» УФ-лампи з короткими імпульсами випромінювання необхідні для застосувань в спектроскопії, фотохімії і фотобіології.

Деякі оптичні та енергетичні характеристики «точкових» УФ-ламп на парах металів, з яких виготовлено електроди перенапруженого уніполярного наносекундного розряду, приведені в

[5], а для відповідного біполярного розряду в праці [6]. Використання біполярного розряду дозволяє зменшити імпульсну напругу відносно заземлених частин розрядного пристрою в два рази, а також більш рівномірно використовувати матеріал електродів, який витрачається на утворення ектонів і супроводжується викидами парів матеріалу електродів в плазму [7].

Оскільки цей розряд відбувався в парах матеріалу електродів і продуктів деструкції молекул повітря, то тут спостерігався синтез острівкових плівкових наноструктур на основі оксидів міді і цинку, які можуть бути синтезованими (за межами плазми) на діелектричній підкладці [8-10].

Окремої уваги заслуговує синтез таких наноструктур в полі УФ випромінювання. Так, в [11] при синтезі плівкових наноструктур оксиду цинку в вигляді набору наностовпчиків при неперервній підсвітці підкладки в процесі синтезу УФ-випромінюванням ртутної лампи, одержано зменшення опору плівкових наноструктур. Дослідження емісійних характеристик перенапруженого біполярного розряду в повітрі і гелії атмосферного тиску між двома електродами з цинку показало, що він є селективним джерелом випромінювання в спектральному інтервалі 200-230 нм [12,13], який може бути використано для автоматичного підсвічування плівки наноструктур оксиду цинку в процесі її синтезу.

При запалюванні перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді або цинку його плазма виступає не лише джерелом бактерицидного УФ- випромінювання ($\Delta\lambda = 200-280$ нм) [14], але і потоку наночастинок оксиду міді або цинку, які володіють сильними антибактеріальними властивостями [15].

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 інших кисневмісних газів, особливо при зменшенні тиску робочого газу, що дозволить збільшити ступінь перенапруження розрядного проміжку.

В статті наведено результати спектроскопічного дослідження перенапруженого біполярного розряду наносекундної тривалості між електродами з цинку в кисні середнього тиску, який може бути застосований як в якості УФ бактерицидного випромінювання, так і для синтезу плівкових наноструктур оксиду цинку при автоматичному опроміненні підкладки з плівкою УФ-випромінюванням.

I. Методика і техніка експерименту

Дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду проводилось на експериментальному стенді, описаному в [13]. Блок-схема розрядного модуля приведена на рис.1. Схема розрядної комірки приведена в [16]. Перенапружений наносекундний розряд між електродами з цинку запалювався в герметичній камері з оргскла. Віддаль між електродами складала $d = 2$ або 7 мм.

Для запалювання розряду на електроди розрядної комірки подавались біполярні імпульси високої напруги тривалістю 50-150 нс, амплітудою $\pm(20-40)$ кВ. Частота слідування імпульсів напруги була вибрана рівною 80-150 Гц, оскільки при більших частотах відбувалось значне нагрівання системи електродів і розрядної камери. Осцилограми імпульсів напруги на розрядному проміжку і осцилограми імпульсів струму реєструвались за допомогою широкосмугового емнісного дільника

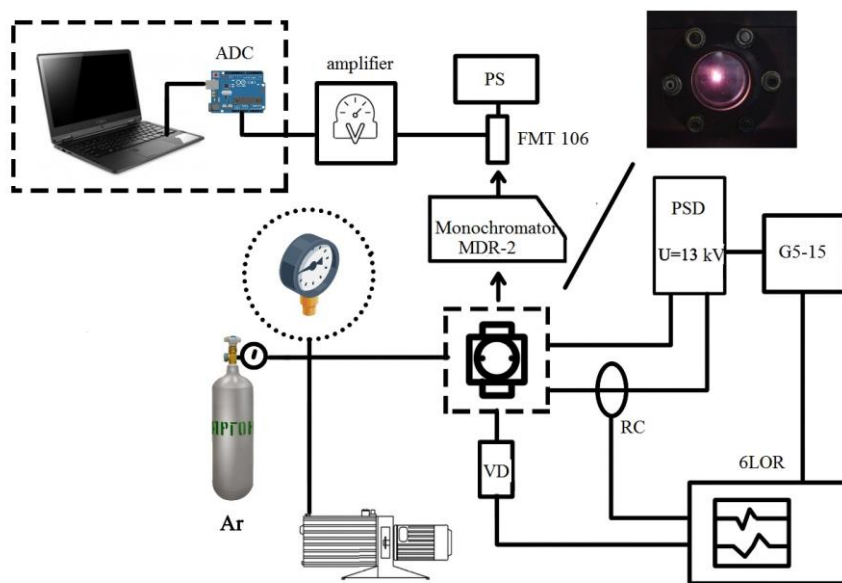


Рис.1. Схема експериментальної установки для дослідження перенапруженого наносекундного розряду в газах: БЖР – блок живлення розряду; ФЕП-106 – фотоелектричний помножувач; БЖ – блок живлення ФЕП; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач сигналу; ПР – пояс Роговського; ДН – дільник напруги для визначення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

напруги, поясу Роговського та широкосмугового осцилографа БЛОР-04.

Розрядний проміжок був перенапружений, що створювало сприятливі умови для формування пучка «електронів-втікачів» високої енергії і супутнього рентгенівського випромінювання [3,4].

Випромінювання плазми, що реєструвалося в спектральному діапазоні $\lambda=196-663$ нм, надходило на вхідну щілину спектрометра з дифракційною решіткою 1200 штрих./мм. На виході спектрометра для детектування випромінювання використовувався фотоелектронний помножувач ФЕП-106, підімкнений до підсилювача постійного струму. Сигнал з підсилювача поступав на аналогово-цифровий перетворювач і далі подавався для обробки на персональний комп'ютер.

Розрядна камера відкачувалась форвакуумною помпою до залишкового тиску 10 Па, а після в камеру напускали кисень до тиску 13.3 кПа. Діаметр циліндричних металевих електродів складав 5 мм, а радіус закруглення їх робочої торцевої поверхні був однаковим і рівним 3 мм. Об'єм розряду залежав від частоти слідування імпульсів напруги. Режим «точкового розряду» досягався лише при частотах повторення імпульсів напруги в діапазоні $f = 40-150$ Гц.

II. Просторові, електричні і спектральні характеристики

На рис.2 приведені усереднені за часом світліни біполярного перенапруженого наносекундного розряду в кисні при різних віддаль між електродами, які були одержані з часовою витримкою ≈ 1 с.

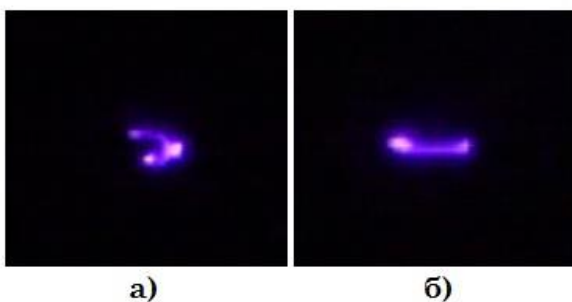


Рис.2. Усереднені за часом ($t = 1$ с) світліни перенапруженого наносекундного розряду в кисні ($p = 13.3$ кПа) при відстані між електродами $d = 2$ (а) і 7 (б) мм.

При тиску кисню 13.3 кПа і $d=2$ мм розряд, який досліджувався, мав вигляд яскравої центральної частини діаметром близько 2 мм, який був рівним міжелектродній віддалі і ряду більш слабких струменів плазми, що відходили від центральної частини. При збільшенні віддалі між електродами до 7 мм, найбільш яскрава частина розрядної плазми концентрувалась біля заокругленої робочої поверхні цинкових електродів, які перемивались тонким менш яскравим плазмовим каналом. Основними причинами появи дифузного свічення розряду між електродами ($d = 2$ мм) та біля поверхні електродів

при значній віддалі між ними ($d = 7$ мм) можуть бути пучки «електронів-втікачів» і супутнє рентгенівське випромінювання [3,4].

Осцилограми напруги, струму та імпульсна потужність для перенапруженого наносекундного розряду між електродами з цинку або міді (при $p(O_2) = 13.3$ кПа; $d = 2$ мм) мали такий же вигляд як і в такому ж розряді у повітрі між електродами з цинку, міді або халькопіриту [13,16].

Осцилограми напруги і струму були в формі затухаючих в часі осциляцій тривалістю близько 7-10 нс, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору високовольтного модулятора з опором навантаження. Повна тривалість осциляцій напруги на проміжку та розрядного струму досягала 400 нс при тривалості окремих осциляцій напруги 7-10 нс, а осциляції струму мали тривалість ≈ 70 нс. Для наносекундного розряду, що досліджувався, амплітуда найбільшого спаду напруги на електродах досягала в початковій стадії розряду і складала $\approx +7-8$ кВ, а струму $\pm 140-160$ А. Шляхом графічного множення осцилограм імпульсу струму і напруги, було одержано імпульсну потужність розряду, інтеграл від якої за часом в межах тривалості наносекундного розряду дозволив встановити енергетичний внесок в плазму за один розрядний імпульс. Величина імпульсної потужності розряду досягала (0.5-0.6) МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс в плазму на рівні до 30 мДж. При збільшенні міжелектродної віддалі до 7 мм спад напруги на електродах і величина струму складала, відповідно, до $+ (0.7-0.8)$ кВ і $\pm (90-100)$ А. Імпульсна потужність при $d=7$ мм досягала 0.15 МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс в плазму на рівні до 20 мДж.

Спектр випромінювання перенапруженого наносекундного розряду в кисні приведений на рис.3., а результати ідентифікації спектральних ліній і смуг зведені в таблицю. При розшифровці спектру випромінювання використані довідники [17, 18].

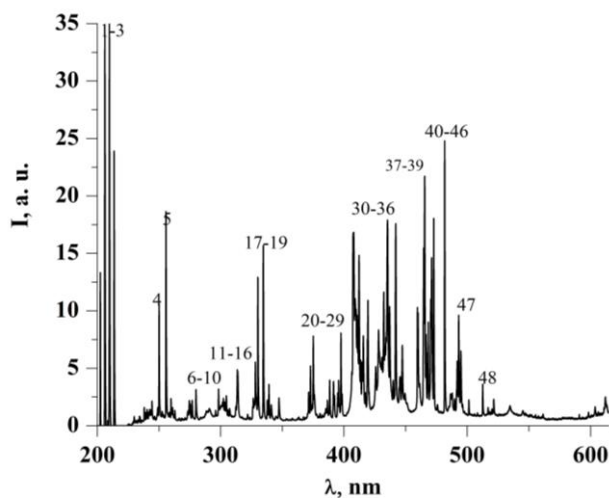


Рис.3. Спектр випромінювання плазми біполярного, перенапруженого розряду в кисні наносекундної тривалості ($p(O_2) = 13.33$ кПа; $d=2$ мм).

Таблиця 1.

Результати ідентифікації спектру (рис.3) випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду в кисні.

№	$\lambda_{\text{tab.}}, \text{nm}$	$I_{\text{exp.}}, \text{a.u.}$	Object	$E_{\text{low.}}, \text{eV}$	$E_{\text{up.}}, \text{eV}$	Lower _{term}	Upper _{term}
1	206.20	34.23	Zn II	0	6.01	$3d^{10}4s^2S_{1/2}$	$3d^{10}4p^2P^0_{1/2}$
2	209.99	35.78	Zn II	6.11	12.02	$3d^{10}4p^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}4d^2D_{5/2}$
3	213.85	23.93	Zn I	0	5.79	$3d^{10}4s^2^1S_0$	$3d^{10}4s4p^2P^0_1$
4	250.19	10.57	Zn I	6.01	10.96	$3d^{10}4p^2P^0_{1/2}$	$3d^{10}5s^2S_{1/2}$
5	255.79	18.40	Zn II	6.11	10.96	$3d^{10}4p^2P^0_{3/2}$	$3d^{10}5s^2S_{1/2}$
6	258.24	2.47	Zn I	4.02	8.82	$3d^{10}4s4p^3P^0_1$	$3d^{10}4s6d^3D_2$
7	267.05	0.81	Zn I	4.00	8.64	$3d^{10}4s4p^3P^0_0$	$3d^{10}4s7s^3S_1$
8	273.32	1.36	O II	25.28	29.82	$2s^22p^2(^3P)3p^2S^{\circ}_{1/2}$	$2s^22p^2(^3P)4s^2P_{3/2}$
9	277.09	2.4	Zn I	4.02	8.50	$3d^{10}4s4p^3P^0_1$	$3d^{10}4s5d^3D_1$
10	280.08	3.4	Zn I	4.07	8.50	$3d^{10}4s4p^3P^0_2$	$3d^{10}4s5d^3D_3$
11	298.04	3.31	O II	28.82	32.98	$2s^22p^2(^3P)3d^4P_{5/2}$	$2s^22p^2(^3P)5f^2F^{\circ}[4]_{7/2}$
12	302.01	2.26	O II	28.83	32.93	$2s^22p^2(^3P)3d^4P_{3/2}$	$2s^22p^2(^3P)5f^2D^{\circ}[3]_{5/2}$
13	304.71	2.82	O II	28.88	32.95	$2s^22p^2(^3P)3d^2F_{7/2}$	$2s^22p^2(^3P)5f^2D^{\circ}[2]_{5/2}$
14	307.206	1.42	Zn I	4.07	8.11	$3d^{10}4s4p^3P^0_2$	$3d^{10}4s6s^3S_1$
15	313.60	4.71	N ₂	Second positive system C ³ Π _u ⁺ -B ³ Π _g ⁺ (2;1)			
16	327.75	5.62	O II	25.83	29.61	$2s^22p^2(^3P)3p^4P^0_{3/2}$	$2s^22p^2(^3P)4s^4P_{5/2}$
17	329.49	12.89	O II	25.83	29.59	$2s^22p^2(^3P)3p^4P^{\circ}_{3/2}$	$2s^22p^2(^3P)4s^4P_{3/2}$
18	334.50	15.89	Zn I	4.07	7.78	$3d^{10}4s4p^3P^{\circ}_2$	$3d^{10}4s4d^3D_3$
19	339.02	3.57	O II	25.28	28.94	$2s^22p^2(^3P)3p^2S^{\circ}_{1/2}$	$2s^22p^2(^3P)3d^2P_{3/2}$
20	340.72	1.95	O II	28.50	32.14	$2s^22p^2(^1D)3p^2D^0_{5/2}$	$2s^22p^2(^1D)4s^2D_{3/2}$
21	347.49	2.40	O II	25.28	28.85	$2s^22p^2(^3P)3p^2S^{\circ}_{1/2}$	$2s^22p^2(^3P)3d^4D_{1/2}$
22	371.27	2.98	O II	22.96	26.30	$2s^22p^2(^3P)3s^4P_{1/2}$	$2s^22p^2(^3P)3p^4S^{\circ}_{3/2}$
23	374.94	7.90	O II	23.00	26.30	$3s^4P_{5/2}$	$3p^4S_0$
24	386.34	2.21	O II	25.64	28.85	$2s^22p^2(^3P)3p^4D^0_{5/2}$	$2s^22p^2(^3P)3d^4D_{7/2}$
25	388.21	4.07	O II	25.66	28.85	$2s^22p^2(^3P)3p^4D^0_{7/2}$	$2s^22p^2(^3P)3d^4D_{7/2}$
26	391.21	3.93	O II	25.66	28.82	$2s^22p^2(^1D)3s^2D_{3/2}$	$2s^22p^2(^1D)3p^2P^0_{3/2}$
27	395.46	3.97	O I	10.98	14.12	$2s^22p^3(^4S^{\circ})3p^3P_2$	$2s^22p^3(^2P^{\circ})3s^3P^{\circ}_2$
28	397.32	8.22	O II	23.44	26.56	$3s^2P_{3/2}$	$3p^2P^0_{1/2}$
29	407.58	16.84	O II	25.65	28.69	$3p^4D^0_{5/2}$	$3d^4F_{7/2}$
30	411.92	14.9	O II	25.85	28.86	$3p^4P^0_{5/2}$	$3d^4D_{7/2}$
31	413.28	5.83	O II	25.83	28.83	$3p^4P^0_{1/2}$	$3d^4P_{3/2}$
32	418.97	10.96	O II	28.36	31.32	$3p^2F^{\circ}$	$3d^2G$
33	431.98	11.70	O II	28.82	31.69	$2s^22p^2(^1D)3p^2P^{\circ}_{1/2}$	$2s^22p^2(^1D)3d^2S_{1/2}$
34	433.68	17.92	O II	22.98	25.84	$3s^4P_{3/2}$	$3p^4P^0_{3/2}$
35	436.92	10.57	O II	26.22	29.06	$3p^2D^0_{5/2}$	$3d^2D$
36	441.48	17.58	O II	23.44	26.24	$2s^22p^2(^3P)3s^2P_{3/2}$	$2s^22p^2(^3P)3p^2D^0_{5/2}$
37	444.81	3.27	O II	28.36	31.14	$2s^22p^2(^1D)3p^2F^{\circ}_{7/2}$	$2s^22p^2(^1D)3d^2F_{7/2}$
38	446.62	7.03	O II	28.94	31.73	$3d^2P_{3/2}$	$4f^4D^0_{3/2}$
39	459.09	10.39	O II	25.66	28.36	$3s^2D_{5/2}$	$3p^2F^{\circ}$
40	464.18	15.43	O II	22.98	25.65	$3s^4P_{3/2}$	$3p^4D^0_{5/2}$
41	464.91	21.13	O II	23.00	25.66	$3s^4P_{5/2}$	$3p^4D^0_{7/2}$
42	468.01	9.06	Zn I	4.00	6.65	$3d^{10}4s4p^3P^{\circ}_0$	$3d^{10}4s5s^3S_1$
43	470.53	14.54	O II	26.25	28.88	$3p^2D^0_{5/2}$	$3d^2F_{7/2}$
44	472.21	18.28	Zn I	4.02	6.65	$3d^{10}4s4p^3P^{\circ}_1$	$3d^{10}4s5s^3S_1$
45	481.05	21.35	Zn I	4.07	6.65	$3d^{10}4s4p^3P^{\circ}_2$	$3d^{10}4s5s^3S_1$

Таблиця 1. Продовження .

46	491.16	5.60	Zn II	12.01	14.53	$3d^{10}4d^2D_{3/2}$	$3d^{10}4f^2F_{5/2}^{\circ}$
47	492.40	10	Zn II	12.02	14.53	$3d^{10}4d^2D_{5/2}$	$3d^{10}4f^2F_{7/2}^{\circ}$
48	513.11	3.64	O I	10.98	13.40	$2s^22p^3(^4S^{\circ})3p^3P_1$	$2s^22p^3(^4S^{\circ})8d^3D^{\circ}_2$

Основними в спектрі випромінювання плазми були спектральні лінії атома і однозарядного іона цинку, які розташовані в спектральному інтервалі 206 - 280 нм. Найбільш інтенсивними з іонних спектральних ліній цинку були: 206.20; 209.99 нм Zn II, а з атомарних ліній – 213.85 нм Zn I, що корелюється з спектральними характеристиками лампи [19]. В порівнянні з даними праці [19], УФ спектр випромінювання в цих ділянках включав значно більше інтенсивних спектральних ліній атома і однозарядного іону цинку.

В спектрах випромінювання плазми біполярного, перенапруженого наносекундного розряду в повітрі та суміші повітря з малою домішкою парів води при загальному тиску сумішей $p = 103.3$ кПа ($d = 1$ мм), основними в УФ-діапазоні спектру були дві групи інтенсивних ліній атома та іона цинку в спектральному інтервалі 200-280 нм. Найбільш інтенсивними в першій групі спектральних ліній були іонні лінії: 202.6; 206.2 нм Zn II, а в другій групі лінії атома цинку – 250.2; 255.8 нм Zn I [13], що не відповідає даним для розряду в кисні при його тиску $p = 13.3$ кПа (рис.3. і таблиця). Це, імовірно, зумовлено зміною роду і тиску буферного газу, а також умовами формування ектонів в цих розрядах

Для перенапруженого наносекундного розряду у кисні в спектральному діапазоні 273-465 основним джерелом випромінювання були однозарядні іони кисню. Найбільш інтенсивними спектральними лініями іона кисню тут були лінії: 407.58; 411.92; 433.68; 441.48; 464.18; 464.91 і 470.53 нм O II. Енергії верхніх енергетичних рівнів для цих спектральних ліній знаходяться в діапазоні 25-29 еВ, що вказує на високу температуру електронів в плазмі, яка досліджувалась.

Порівняння співвідношення ефективних перерізів спектральних ліній атома цинку: $\lambda = 258.24$ і 267.05 нм, взятих з [20], з даними експерименту показало, відношення перерізів прямого електронного збудження цих ліній при енергії електронів $E = 30$ еВ складало – 5.6, а відношення інтенсивності цих спектральних ліній з нашого експерименту складало – 3.0. Для відношень відповідних перерізів спектральних ліній атома цинку 481.05 і 472.21 нм одержано – 1.8, а для відношення інтенсивності цих ліній з плазми перенапруженого наносекундного розряду – 1.1. Із співпадіння цих співвідношень випливає, що прямий електронний удар в даному експерименті не є основним механізмом заселення верхніх енергетичних рівнів для спектральних ліній атома цинку.

Основна частина енергії перенапруженого наносекундного розряду вноситься в катодну пляму на плазмовій фазі, тому в плазмовому згустку, що розлітається, енергія вноситься спочатку в

електронну складову з наступною передачею цієї енергії від електронів до іонів. Тому, імовірно механізми утворення збуджених атомів цинку, іонів цинку та кисню в плазмі, яка досліджувалась, можуть визначитися процесами їх збудження і іонізації електронами з метастабільних рівнів, з основного стану відповідного іона та процесами діелектронної рекомбінації [21]. Ефективні перерізи збудження іонів перехідних металів електронним ударом є великими і, наприклад, для іонів цинку досягають 10^{-16} см² [22]. Передумовою протікання таких процесів виступає висока концентрація електронів в плазмі перенапружених розрядів наносекундної тривалості з ектонним механізмом розпилення електродів, яка досягає 10^{17} см⁻³ [23].

Висновки

Таким чином, встановлено, що при тиску кисню 13.3 кПа між електродами з цинку, при міжелектродних віддальх 2 і 7 мм запалювався досить однорідний в просторі перенапружений наносекундний розряд з імпульсною електричною потужністю до 0.6 МВт і енергетичним внеском в плазму за один імпульс до – 30 мДж .

Дослідження спектральних характеристик плазми на основі парогазових сумішей «цинк - кисень» показало, що найбільш інтенсивними були спектральні лінії однозарядних іонів цинку і кисню. Найбільш імовірними процесами утворення збуджених атомів і іонів в даному розряді можуть бути реакції збудження іонів цинку і кисню електронами та процеси діелектронної рекомбінації. Автоматичне опромінення підкладки і зародків плівки на підкладці інтенсивним УФ випромінюванням атомів і іонів цинку та кисню з плазми наносекундного розряду перспективно для впливу на електричні характеристики синтезованих плівок на основі оксиду цинку.

Шуайбов О.К. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри квантової електроніки;

Миня О.Й. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник кафедри квантової електроніки;

Грицак Р.В. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник кафедри квантової електроніки;

Малініна А.О. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник кафедри квантової електроніки;

Ватрала М.І. – аспірант кафедри квантової електроніки.

- [1] D.Z. Pai, D.L. Lacoste, C.O. Laux, Plasma Sources Sci. Technol. 19, 065015 (2010) <https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/6/065015>.
- [2] [О.К. Shuaibov, A.A. Malinina, A.N. Malinin, New gas-discharge methods for obtaining selective ultraviolet and visible radiation and synthesis of nanostructures of transition metal oxides. Monograph (Publishing house UzhNU "Hoverla" Uzhhorod 2019).
- [3] V.F. Tarasenko, Runaway electrons preionized diffuse discharge (Nova Science Publishers Inc., New York, 2014).
- [4] H.A. Mesiats, M.Y. Yalandyn, Advances in Physical Sciences 189(7), 747 (2019). <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038354>.
- [5] E.Kh. Bakst, V.F. Tarasenko, Yu. V. Shut'ko, M.V. Erofeev, Quantum Electronics 42(2), 153 (2012) <https://doi.org/10.1070/QE2012v042n02ABEH014795>.
- [6] A.K. Shuaibov, A.Y. Minya, Z.T. Gomoki, A.A. Malinina, A.N. Malinin, Surface Engineering and Applied Electrochemistry 56(4), 510 (2020) <https://doi.org/10.3103/S106837552004016X>.
- [7] G.A. Mesyats, Usp. Fizich. Nauk. 165(6) 601 (1995) <https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH0000>.
- [8] [T.E. Itina, A. Voloshko, Appl. Phys. B. 113, 473 (2013) <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5490-6>.
- [9] A. Shuaibov, A. Minya, A. Malinina, A. Malinin, R. Golomd, I. Shevera, Z. Gomoki, V. Danilo, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology 9, 035018 (2018) <https://doi.org/10.1088/2043-6254>.
- [10] A.K. Shuaibov, A.Y. Minya, A.A. Malinina, A.N. Malinin, V. V. Danilo, M.Yu. Sichka, I.V. Shevera, American Journal of Mechanical and Materials Engineering 2(1), 8 (2018) <https://doi.org/10.11648.j.ajmme.20180201.12>.
- [11] A.Kh. Abduev, A.Sh. Asvarov, A.K. Akhmetov, R.M. Əmyrov, V.V. Beliaev, Technical Physics Letters 43(22), 40 (2017) <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.22.45259.16874>.
- [12] V.V. Danilo, O. Y. Minya, O.K. Shuaibov, I.V. Shevera, Z.T. Gomoki, M.V. Dudich, Scientific herald of Uzhhorod University. Physics 42, 128 (2017) http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuufiz_2017_42_17.
- [13] [OK. Shuaibov, A.I. Minya, M.P. Chuchman, A.A. Malinin, V.V. Daniil, Z.T. Gomoku, Ukrainian Journal of Physics 63 (9), 790 (2018) <https://doi.org/10.15407/ujpe63.9.790>.
- [14] A.K. Shuaibov, A.Y. Minya, Z.T. Gomoki, A.A. Malinina, A.N. Malinin, V.V. Danilo, Yu.Yu. Bilak, Ya.Ch. Kolozhvari HSOA Journal of Biotech Research & Biochemistry 3(1), 100005 (2020) <https://doi.org/10.24966/BRB-0019/100005>.
- [15] G. Palani, K. Kannan, D. Radhika, P. Vijayakumar, K. Pakiyaraj, Physics and Chemistry of Solid State 21(4), 571 (2020) <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.571-583>.
- [16] O.K. Shuaibov, O. I. Nalima, R.V. Hrytsak, A.A. Malinina, I.V. Shevera, M.I. Vatrала, Z.T. Gomoki, Physics and Chemistry of Solids 21 (4), 669 (2020) <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.669-679>.
- [17] A.R. Striganov, N.S. Sventitsky, Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms (Atomizdat, Moscow, 1966).
- [18] NIST Atomic Spectra Database Lines Form https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.
- [19] S.I. Maksimov, A.V. Kretinina, N.S. Fomina, L.N. Gall, Scientific Instrumentation 25 (1), 36 (2015).
- [20] Yu. M. Smirnov, Optics and Spectroscopy 104(2), 159 (2008) <https://doi.org/10.1134/S0030400X08020021>.
- [21] R. Shyker, Y. Binur, A. Szokem Phys. Rev.A. 12(2), 512 (1975) <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.12.515>.
- [22] A.N. Gomonai, Journal of Applied Spectroscopy 82(1), 17 (2015) <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0057-4>.
- [23] D. Levko, L.L. Raja, Physics of Plasmas 22, 123518 (2016) <https://doi.org/10.1063/1.4939022>.

O.K. Shuaibov, O.Y. Minya, R.V. Hrytsak, A.O. Malinina, M.I. Vatrana

Study of conditions of gas- discharge synthesis of Zinc oxide nanostructures under automatic UV-irradiation of the substrate by plasma

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine, alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

The spectroscopic characteristics of a bipolar, overstressed discharge of nanosecond duration between zinc electrodes in oxygen at a pressure $p(\text{O}_2) = 13.3$ kPa are presented. In the process of microexplosions of inhomogeneities on the working surfaces of the electrodes in a strong electric field, zinc vapor is introduced into the discharge gap. This creates the prerequisites for the formation of zinc oxide molecules and clusters in the plasma and the synthesis of thin island zinc oxide films, which can be deposited on a dielectric substrate installed near the center of the discharge gap.

The spectral characteristics of the discharge were investigated from the central part of the discharge gap 2 mm in size. The main excited components of the plasma of a vapor-gas mixture based on zinc and oxygen were established at high values of the parameter E/N (where E is the electric field strength; N is the total concentration of particles in the plasma), which, when deposited outside the discharge plasma, can lead to the formation of fine nanostructured films based on zinc oxide.

Key words: intense nanosecond discharge, oxygen, zinc, radiation spectrum, plasma.