

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

ISSN 1729-4428 (Print)  
ISSN 2309-8589 (Online)

О.К. Шуайбов, Р.В. Грицак, О.Й. Миня, А.О. Малініна, І.В. Шевера, Ю.Ю. Білак,  
З.Т. Гомокі

## Умови імпульсного газорозрядного синтезу тонких плівок оксиду вольфраму з плазми на суміші повітря з парами вольфраму

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Ужгород, Україна, [alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua](mailto:alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua)

Наведено характеристики високовольтного наносекундного розряду в газопарових сумішах «Air – W» при тисках повітря  $p = 101; 13.3$  кПа. Розряд запалювався між електродами з вольфраму. Утворення кластерів оксиду вольфраму в плазмі відбувалось в процесі внесення парів вольфраму в розрядний проміжок за ектонним механізмом, що створювало передумови для синтезу тонких плівок оксиду вольфраму ( $WO_3$ ), які осаджувались на скляній підкладці.

Досліджені оптичні властивості розряду з центральної області проміжку завширшки 2 мм. Виявлено основні компоненти, що викликають збудження у плазмі парогазової суміші на основі вольфраму і повітря. Дослідження спектрів раманівського розсіювання лазерного випромінювання синтезованими в експерименті тонкими плівками показало, що це острівкові плівки оксиду вольфраму ( $WO_3$ ).

**Ключові слова:** перенапружений наносекундний розряд, вольфрам, повітря, тонкі плівки, спектр випромінювання, плазма.

Подано до редакції 29.04.2024; прийнято до друку 10.10. 2024.

### Вступ

При запалюванні високовольтного наносекундного розряду (ВНР) газів атмосферного тиску між металевими електродами при малій віддалі між електродами ( $d = 1-3$  мм) проявляється розпорощення матеріалу електродів [1], навіть для таких тугоплавких металів як вольфрам [2]. Для даного типу розряду (при значній перенарузі в розрядному проміжку) характерним є поява ектонів [2,3] та «електронів-втікачів», які переходять в режим неперервного прискорення [4]. При цих умовах існування розряду «електрони-втікачі» та супутнє ім рентгенівське випромінювання виконують роль системи передіонізації, в розрядному проміжку. Це приводить до формування однорідного розряду атмосферного тиску, який може бути використаний для наплення тонких плівок з продуктів розпорощення матеріалу електродів та відповідного

газового середовища [5].

Оксиди вольфраму і молібдену ( $WO_3$ ,  $MoO_3$ ) застосовуються для оборотної зміни кольору тонких плівок в процесі окисно-відновних реакцій, якщо до них прикласти зовнішню напругу (явище електрохімізму) [6]. Синтез тонких плівок оксидів вольфраму і молібдену проводиться в значній мірі хімічними методами або методом вибуху тонких дротин. В [7] методом електричного вибуху вольфрамового провідника в повітрі синтезовані оксид в вигляді мікро- і нанорозмірних порошоків. Аналіз продуктів вибуху показав, що єдиним продуктом руйнування провідника, виготовленого з вольфраму, була суміш порошоків  $WO_3 + W_2O_7$ , в якій переважало утворення вольфрамового ангідриду –  $WO_3$ .

В [8] приведенні результати хімічного синтезу нанопластин оксиду вольфраму ( $WO_3$ ) на скляних підкладках із легованого фтором оксиду олова з використанням гідротермальної техніки. Про синтез

плівок оксиду вольфраму товщиною 36-180 нм мікрохвильовим способом повідомлялось в [9], де також приведені їх спектри пропускання у видимій та близькій інфрачервоній ділянці довжин хвиль коли плівки знаходились в стані забарвлення і без нього. Результати синтезу плівок оксиду вольфраму товщиною 42-131 нм методом реактивного напылення приведені в [10], де встановлено, що після їх відпалювання при температурі 500°C вони перетворювались на стабільні кристалічні структури.

На даний час результати синтезу тонких плівок оксиду вольфраму, при осадженні їх з плазми газопарової суміші «Air – W» (при ектонному механізмі ерозії вольфрамових електродів) відсутні. Така технологія синтезу тонких плівок оксидів вольфраму не вимагає застосування вакуумної техніки і коштовних буферних газів. Слід також відмітити, що при напыленні плівок оксиду вольфраму на вольфрам збільшується його мікротвердість.

В статті наведено результати дослідження характеристик високовольтного наносекундного розряду між електродами з вольфраму в повітрі, який може бути застосований для синтезу тонких плівок оксиду вольфраму.

## I. Техніка і умови експерименту

Дослідження характеристик ВНР в повітрі проводилось з використанням експериментального стенда, схема, основні характеристики якого приведені в [1]. Розмір відстані між електродами становив  $d = 2$  мм. Електроди були виготовлені з вольфраму у вигляді стрижнів діаметром 5 мм і довжиною 50 мм з радіусами заокруглення робочої частини 3 мм і встановлені в розрядну камеру, виготовлену з діелектрика.

Для ініціювання розряду на електродах використовували біполярні імпульси високої напруги, що тривали 100-150 нс і мали амплітуду в межах від  $\pm 20$  до  $\pm 40$  кВ.

Частота послідовності імпульсів напруги знаходилась у діапазоні від 80 до 1000 Гц. Тиск повітря складав 101.2; 13.3 кПа.

Перенапружений розряд створював умови, що сприяли формуванню пучка "електронів-втікачів" з високою енергією і рентгенівського випромінювання [4].

Для відкачування камери до залишкового тиску 5-10 Па використовувалась форвакуумна помпа. Після відкачування в камеру напускалось повітря при тиску 13.3 кПа.

## II. Характеристика розряду

При відстані між електродами  $d = 2$  мм та атмосферному тиску повітря ( $p = 101$  кПа) ВНР представляв собою інтенсивну центральну область з діаметром приблизно 2-3 мм, оточеним рядом менш яскравих струменів плазми, які відходили від центральної частини.

На рис.1 приведені осцилограми струму, напруги та імпульсної потужності для розряду між електродами з вольфраму при різних тисках повітря та при величині напруги на аноді тиратрона високовольтного модулятора імпульсів – 13 кВ.

Осцилограми струму і напруги відображали затухаючі в часі осциляції з тривалістю приблизно 80-100 нс, які виникли через невідповідність між вихідним опором високовольтного модулятора та опором навантаження. Тривалість повних осциляцій напруги та розрядного струму складала 450-500 нс.

Для ВНР атмосферного тиску в повітрі амплітуда напруги додатної полярності на електродах досягала близько 30 кВ на початковій стадії розряду, а струм становив приблизно 100 А. Максимальна імпульсна потужність ПНР досягала 3 МВт при часі  $t = 30$  нс, а енергетичний внесок в плазму складав – 312.6 мДж. При зменшенні тиску повітря до 13.3 кПа максимальна амплітуда напруги додатної полярності зменшувалась до 12 кВ, а найбільша амплітуда півхвилі струму досягала 125 А. Імпульсна потужність розряду досягала 1.25 МВт при  $t = 90$  нс. Енергетичний внесок в плазму на основі повітря атмосферного тиску був рівним – 176.9 мДж.

Для контрольного експерименту, який був проведений з розрядом на суміші парів вольфраму з буферним газом – киснем при тиску  $p = 103$  кПа, вигляд осцилограм напруги і струму не мінявся,

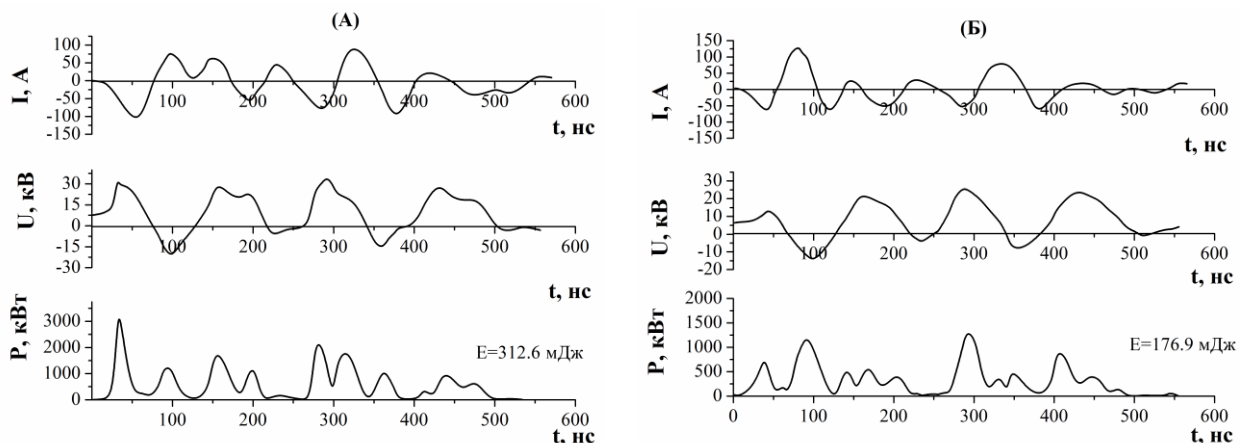


Рис. 1. Осцилограми струму, напруги і імпульсна потужність розряду між електродами з вольфраму при тисках повітря 101 (А) і 13.3 (Б) кПа.

енергетичні характеристики ВНР зменшувались: імпульсна потужність – 2.4 МВт і енергетичний внесок в плазму за імпульс – 245.4 мДж. Це може бути зумовлено різними потенціалами східчастої іонізації молекул кисню та азоту. Аналогічна ж картина спостерігалась для розряду з буферними газами – He, Kr: у важкому інертному газі енергетичні характеристики ВНР переважали відповідні характеристики легкого інертного газу (He) з більшим потенціалом східчастої іонізації. Для наносекундних розрядів підвищеного тиску характерно переважання східчастих процесів іонізації над прямою іонізацією [11].

Спектр випромінювання ВНР на суміші повітря з парами вольфраму приведено на рис. 2, а результати ідентифікації спектральних ліній атомів і іонів – в таблиці 1. Розшифровка спектрів випромінювання плазми проводилась за допомогою довідників [12,13].

Для плазми, яка утворюється в результаті перенапружених наносекундних розрядів у повітрі атмосферного тиску (з відстанню між електродами 10 мм), випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні спектру переважно визначалося смугами другої додатної системи молекули N<sub>2</sub>, смугами нітриду вуглецю, радикалу OH, NO, а також лініями однозарядних іонів і атомів кисню та азоту [14]. Для нашого випадку в спектрах випромінювання плазми ВНР молекулярна складова випромінювання плазми була відсутня, що зумовлено швидкою іонізацією молекул в сильному електричному полі.

Аналогічна закономірність спостерігалась і для плазми газопарової суміші «O<sub>2</sub> - W» [15]. В спектрах випромінювання ВНР на основі газопарової суміші «кисень-вольфрам» спостерігались переважно

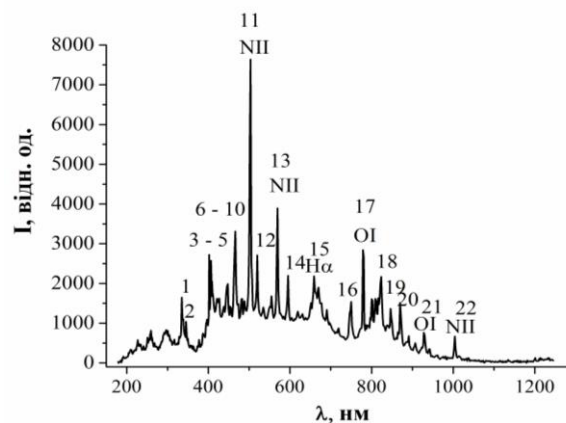


Рис.2. Спектр випромінювання плазми ВНР між електродами з вольфраму при тиску повітря 101 кПа (f = 1000 Гц, d = 2 мм).

спектральні лінії OI, OII, OIII.

Спектральні лінії випромінювання атомів і іонів з плазми ВНР у газових сумішах повітря з парами вольфраму спостерігались на фоні неперервного випромінювання плазми. Найбільш яскраво виражений континуум у випромінюванні ВНР спостерігався в спектральному інтервалі 400-500 нм.

Досить значна інтенсивність випромінювання на переходах спектральних ліній іонів азоту над випромінюванням атомів азоту можуть бути зумовлено рекомбінаційним механізмом заселення верхніх енергетичних рівнів атомарних іонів азоту в перенапруженому наносекундному розряді [14]. Енергії верхніх енергетичних рівнів для спектральних ліній N II розміщені у діапазоні від 21 до 26 еВ. Це свідчить про високу температуру електронів у

Таблиця 1.

Результати ідентифікації спектрів випромінювання плазми ПНР між електродами з вольфраму при тиску повітря 101 кПа (d = 2 мм; f=1000 Гц)

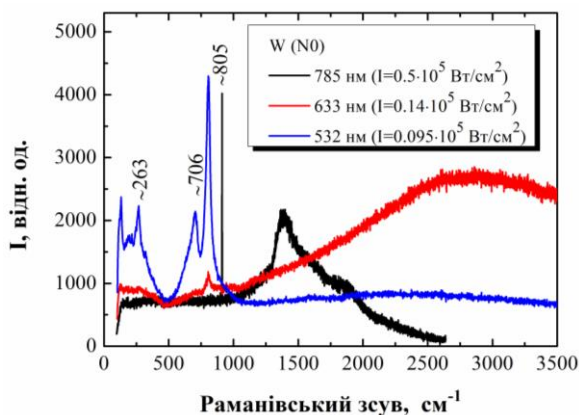
№	λ табл, нм	I експ відн. од.	Об'єкт	Енижн., еВ	Еверх., еВ	Термнижн	Термверх
1	332.97	1646	N II	17.87	21.59	2s2p <sup>3</sup> 1D <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3p 1D <sub>2</sub>
2	343.71	1031	N II	18.49	22.10	2s <sup>2</sup> 2p3s 1P <sup>o</sup> <sub>1</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3p 1S <sub>0</sub>
3	395.53	1089	W I	2.43	5.57	5d <sup>5</sup> ( <sup>4</sup> G)6s <sup>3</sup> G <sub>6</sub>	5d <sup>3</sup> ( <sup>4</sup> F)6s( <sup>5</sup> F)6p <sup>6</sup> G <sub>6</sub>
4	400.87	2720	W I	0.365	3.45	5d <sup>5</sup> ( <sup>6</sup> S)6s <sup>7</sup> S <sub>3</sub>	5d <sup>5</sup> ( <sup>6</sup> S)6p <sup>7</sup> P <sup>o</sup> <sub>4</sub>
5	407.43	2142	W I	0.365	3.40	5d <sup>5</sup> ( <sup>6</sup> S)6s <sup>7</sup> S <sub>3</sub>	5d <sup>5</sup> ( <sup>6</sup> S)6p <sup>7</sup> P <sup>o</sup> <sub>3</sub>
6	422.77	1618	N II	21.59	24.53	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 1D <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p4s 1P <sup>o</sup> <sub>1</sub>
7	444.70	1984	N II	20.40	23.19	2s <sup>2</sup> 2p3p 1P <sub>1</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3d 1D <sup>o</sup> <sub>2</sub>
8	463.05	3307	N II	18.48	21.15	2s <sup>2</sup> 2p3s 3P <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3p 3P <sub>2</sub>
9	480.32	1612	N II	20.66	23.24	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 3D <sub>3</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3d 3D <sup>o</sup> <sub>3</sub>
10	489.51	1553	N II	17.87	20.40	2s <sup>2</sup> p <sup>3</sup> 1D <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3p 1P <sub>1</sub>
11	500.51	7638	N II	20.66	23.14	2s <sup>2</sup> 2p3p 3D <sub>3</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3d 3F <sup>o</sup> <sub>4</sub>
12	520.16	2706	N I	11.60	13.98	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3p 2S <sup>o</sup> <sub>1/2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)5d 2P <sub>3/2</sub>
13	567.95	3890	N II	18.48	20.66	2s <sup>2</sup> 2p3s 3P <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3p 3D <sub>3</sub>
14	594.16	2195	N II	21.15	23.24	2s <sup>2</sup> 2p3p 3P <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3d 3D <sup>o</sup> <sub>3</sub>
15	656.27	2179	H <sub>α</sub>	10.20	12.09	2p 2P <sup>o</sup> <sub>1/2</sub>	3d 2D <sub>3/2</sub>
16	746.83	1535	N I	10.33	11.99	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3s 4P <sub>5/2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3p 4S <sup>o</sup> <sub>3/2</sub>
17	777.19	2838	O I	9.14	10.74	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> ( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3s <sup>3</sup> S <sup>o</sup> <sub>2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> ( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3p 5P <sub>3</sub>
18	821.63	2166	N I	10.33	11.84	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3s 4P <sub>5/2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3p 4P <sup>o</sup> <sub>5/2</sub>
19	844.63	1363	O I	9.52	10.98	2s <sup>2</sup> 2p3( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3s <sup>3</sup> S <sup>o</sup> <sub>1</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> ( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3p 3P <sub>2</sub>
20	868.02	1512	N I	10.32	11.75	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3s 4P <sub>1/2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3p 4D <sup>o</sup> <sub>3/2</sub>
21	926.60	759	O I	10.74	12.07	2s <sup>2</sup> 2p3( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3p 5P <sub>3</sub>	2s <sup>2</sup> 2p3( <sup>4</sup> S <sup>o</sup> )3d 5D <sup>o</sup> <sub>4</sub>
22	1002.32	667	N II	26.21	27.45	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3p 4D <sup>o</sup> <sub>5/2</sub>	2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> ( <sup>3</sup> P)3d 2F <sub>5/2</sub>

досліджуваній плазмі, оскільки для здійснення рекомбінації іонів з електронами плазми потрібно наявність двозарядних атомарних іонів азоту.

### III. Спектри раманівського розсіювання

Детальна методика синтезу і наплення тонких плівок, які були синтезовані з продуктів ерозії електродів наведена в [16]. Плівки аналізували за допомогою всіх трьох доступних довжин хвиль діодних лазерів (532, 633 і 785 нм) з використанням спектрометра раманівського розсіювання світла Renishaw InVia confocal Raman microscope (UK). Діаметр лазерного пучка складав 1 мкм.

Спектр раманівського розсіювання лазерного випромінювання тонкими плівками, осадженими з плазми парогазової суміші «Air – W» при атмосферному тиску повітря, приведені на рис. 3. Спектри реєструвались з острівків розмірами 3-10 мкм, які складались з синтезованої в плазмі сполуки на основі вольфраму і повітря. Ідентифікація раманівських спектрів розсіювання випромінювання лазерів проводилась з використанням праць [17,18]. Основна частина синтезованих острівків мали характерні розміри 3x3 мкм і на світлинах були темного кольору. Їх раманівський спектр наведено на рис.3.



**Рис.3.** Спектр раманівського розсіювання лазерного випромінювання острівкової плівки, осадженою з плазми суміші повітря і парів вольфраму.

Смуги, наведені на рис.3 спостерігались в [17]. Смуга при довжині хвилі  $\lambda = 263 \text{ см}^{-1}$  відповідає O-W-O модам зв'язку W-O-W (модам вигину) зв'язування кисню, смуга при  $\lambda = 706$  і  $805 \text{ см}^{-1}$ , належать до W-O розтягування. Максимуми розсіяного світла при довжинах хвиль  $\lambda = 706$  і  $805 \text{ см}^{-1}$  пов'язані з симетричними і несиметричними коливаннями зв'язків  $W^{6+}-O$  (модам розтягування) в октаедричному блоці  $WO_6$  [18]. Зсуви максимумів піків смуг від максимумів, які наводяться в працях інших авторів,

зумовлені формуванням структури  $WO_{3-x}$  за рахунок створення кисневих вакансій [18].

### Висновки

Таким чином, встановлено, що при атмосферному тиску повітря між електродами з вольфраму та при міжелектродній віддалі 2 мм запалювався однорідний ВНР з максимальною амплітудою напруги одної полярності до 30 кВ і струму до 100 А при  $p(\text{Air}) = 101 \text{ кПа}$ . Розряд запалювався і існував в формі цугу окремих півхвиль тривалістю близько по 100 нс з майже сталою амплітудою при тривалості цугу в межах 500 нс, що оптимально для руйнування поверхні електродів і синтезу тонких плівок з такої плазми. Максимальна імпульсна потужність ВНР складала 3.0 МВт, а найбільша енергія в одному електричному імпульсі досягала 312.6 мДж. Зменшення тиску повітря з 101 до 13.3 кПа приводило до значного зменшення енергетичних характеристик розряду.

Дослідження спектральних характеристик плазми ВНР в газопарових сумішах «Air-W» показало, що найбільш інтенсивними в спектрах були спектральні лінії атомів і іонів азоту; зменшення частоти слідування імпульсів струму з 1000 до 80 Гц приводило до значного зменшення інтенсивності всіх спектральних ліній та континууму.

Дослідження спектрів раманівського розсіювання світла плівками, що були осаджені з плазми розряду, показало, що це плівки оксиду вольфраму ( $WO_3$ ).

**Шуайбов О.К.** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ»;

**Грицак Р.В.** – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, доцент кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ»;

**Миня О.Й.** – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ»;

**Малініна А.О.** – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ»;

**Шевера І.В.** – старший викладач кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ»;

**Білак Ю.Ю.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення систем факультету інформаційних технологій, ДВНЗ «УжНУ»;

**Гомокі З.Т.** – молодший науковий співробітник кафедри прикладної фізики і квантової електроніки, ДВНЗ «УжНУ».

[1] O.K. Shuaibov, A.O. Malinina, *Overstressed Nanosecond Discharge in the Gases at Atmospheric Pressure and Its Application for the Synthesis of Nanostructures Based on Transition Metals*, Progress in Physics of Metals, 22(3), 382(2021); <https://doi.org/10.15407/ufm.22.03.382>.

- [2] M.I. Vatralla, O.K. Shuaibov, O.Y. Mynya, R.V. Hrytsak, Z.T. Homoki 30th Anniversary Conference of the Institute of Electronic Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Uzhhorod, Ukraine, 2022), 128 p.
- [3] G.A. Mesyats, *Ecton – Electron Avalanche from metal*, Phys.-Usp., 38(6), 567(1995); <https://doi.org/10.1070/pu1995v038n06abeh000089>.
- [4] V.F. Tarasenko, Runaway electrons preionized diffuse discharge (New York, Nova Science Publishers Inc., 2014).
- [5] T.E. Itina, A.Voloshko, *Nanoparticle formation by laser ablation in air and by spark discharge at atmospheric pressure*, Appl. Phys. B, 113(3), 473(2013); <https://doi.org/10.5772/61303>.
- [6] Y. Shi, Y. Zang, *Designed growth of WO<sub>3</sub>/PEDOT core/shell hybrid nanorod arrays with modulated electrochromic properties*, Chemical Engineering Journal, 335, 942 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.163>.
- [7] Yu.O. Adamchuk, S.V. Chushchak, L.Z. Boguslavskii, A.V. Sinchuk *The Regularities of Titanium and Tungsten Carbide Formation from Products of Electric Explosion Destruction of Conductors*, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 59(3), 281(2023); <https://doi.org/10.3103/S1068375523030043>.
- [8] S.M. Karadeniz, *Novel Synthesis of Good Electrochromic Performance WO<sub>3</sub> Nanoplates Grown on Seeded FTO*, European Journal of Science and Technology, 27, 718(2021); <https://doi.org/10.31590/ejosat>.
- [9] Y.Zhen, B. Petter Jelle, T. Gao, *Electrochromic properties of WO<sub>3</sub> thin films: The role of film thickness*, Analytical Science Advances, 1, 124(2020); <https://doi.org/10.1002/ansa.202000072>.
- [10] R.J. Sáenz-Hernández, G.M. Herrera-Pérez, J.S. Uribe-Chavira, M. C. Grijalva-Castillo, J.T. Elizalde-Galindo, J. A. Matutes-Aquino, *Correlation between Thickness and Optical Properties in Nanocrystalline  $\gamma$ -Monoclinic WO<sub>3</sub> Thin Films*, Coatings, 12(11), 1727(2022); <https://doi.org/10.3390/coatings12111727>.
- [11] R. Shuker, Y. Binur, A. Szoke, *Studies of afterglows in noble-gas mixtures. A model for energy transfer in He/Xe*, Phys. Rev.A., 12(2), 515(1975); <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.12.515>.
- [12] A. R. Striganov, Tables of spectral lines of neutral and ionized atoms (New York: Springer New York: 1968).
- [13] NIST Atomic Spectra Database Lines Form [https:// physics.nist.gov/ PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html) .
- [14] D.Z. Pai, D.L. Lacoste, C.O. Laux, *Nanosecond repetitively pulsed discharge in air at atmospheric pressure – the sparc regime*, Plasma Souces Sci. Technol., 19, 065015(2010); <https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/6/065015>.
- [15] R.V. Hrytsak, O.Y. Mynya, O.K. Shuaibov, Z.T. Homoki, M.I. Vatralla, Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference “Towards a Holistic Understanding: Interdisciplinary Approaches to Overcoming Global Challenges and Promoting Innovative Solutions” (Dnipro, Ukraine, 2024), p. 101.
- [16] O.K. Shuaibov, O.Y. Mynya, Z.T. Homoki, I.V. Shevera, V.V. Danylo, *Method for Synthesizing Zinc Oxide Nanostructures with Automatic Ultraviolet Radiation Assistance*, Patent 124311, Ukraine, MPK (2021.01): C01G 9/02, No. a 2019 02824; Publ. 25.08.2021, Bulletin No.34, 6 p.
- [17] T. Sarmah, N. Aomoa, G. Bhattacharjee, S. Sarma, B. Bora, D.N. Srivastava, H. Bhuyan, M. Kakati, G. De Temmerman, *Plasma expansion synthesis of tungsten nanopowder*, Journal of Alloys and Compounds, 725, 606(2017); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.207>.
- [18] F. Fang, J. Kennedy, J. Futter, T. Hopf, A. Markwitz, E. Manikandan, G. Henshaw, *Size-controlled synthesis and gas sensing application of tungsten oxide nanostructures produced by arc discharge*, Nanotechnology, 22(33), 335702 (2011); <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/33/335702>.

O.K. Shuaibov, R.V. Hrytsak, O.Y. Mynya, A.O. Malinina, I.V. Shevera, Yu.Yu. Bilak,  
Z.T. Homoki

## Conditions for pulsed gas-discharge synthesis of thin tungsten oxide films from a plasma mixture of air with tungsten vapors

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine, [alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua](mailto:alexander.shuaibov@uzhnu.edu.ua)

Characteristics of high-voltage nanosecond discharge in gas-vapor mixtures "Air – W" at air pressures  $p = 101.13; 13.3$  kPa are provided. The discharge was ignited between tungsten electrodes. Formation of tungsten oxide clusters in the plasma occurred during the introduction of tungsten vapors into the discharge gap via an electron mechanism, creating conditions for the synthesis of thin tungsten oxide (WO<sub>3</sub>) films deposited on a glass substrate.

The optical properties of the discharge from the central region of a 2 mm-wide gap were investigated. The main components responsible for excitation in the plasma of a tungsten-based vapor-gas mixture with air were identified. Examination of the Raman spectra of laser-scattered radiation by the experimentally synthesized thin films revealed them to be island-like films of tungsten oxide (WO<sub>3</sub>).

**Keywords:** overvoltage nanosecond discharge, tungsten, air, thin films, radiation spectrum, plasma.