

PACS numbers: 51.50.+v, 52.80.Mg, 52.80.Tn, 52.90.+z, 79.60.Jv, 81.16.-c, 82.33.Xj

**Умови синтези ультрадисперсного вольфраму
у високовольтному наносекундному розряді
між електродами з вольфраму в інертних газах**

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

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

Наведено електричні й оптичні характеристики високовольтного наносекундного розряду (ВНР) між електродами з вольфраму за атмосферних тисків інертних газів (He, Ar, Kr). Утворення ультрадисперсних частинок вольфраму відбувалося в процесі внесення парів вольфраму в розрядний проміжок внаслідок мікрровибухів неоднорідностей поверхонь електрод у сильному електричному полі й утворення ектонів. Це створювало передумови для синтезу ультрадисперсних частинок вольфраму в розрядній камері. Досліджено осцилограми напруги, струму, імпульсну потужність розряду й енергію, яка вносилася у плазму за один розрядний імпульс. Оптичні характеристики розряду досліджувалися з центральної частини розрядного проміжку величиною у 2 мм. Встановлено основні збуджені складові плазми парогазових сумішей He (Ar, Kr)–W за високих значень параметра E/N (E — напруженість електричного поля, N — сумарна концентрація частинок у плазмі).

The electrical and optical characteristics of a high-voltage nanosecond discharge (HVND) between tungsten electrodes at atmospheric pressures of inert gases (Ne, Ar, Kr) are presented. The formation of ultrafine tungsten particles occurred during the introduction of tungsten vapour into the discharge gap as a result of the microexplosions of electrode-surface inhomogeneities in a strong electric field and the formation of ectons. This creates prerequisites for the synthesis of ultrafine tungsten particles in the discharge chamber. The voltage and current oscillograms, the pulse discharge power, and the energy introduced into the plasma during one discharge pulse are studied. The optical characteristics of the discharge are studied from the central part of the discharge gap of 2 mm. The main excited components of the plasma of vapour–gas mixtures He (Ar, Kr)–W 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) are de-

terminated.

Ключові слова: високовольтний наносекундний розряд, вольфрам, інертні гази, ектони, плазма.

Key words: high-voltage nanosecond discharge, tungsten, noble gases, ectons, plasma.

(Отримано 28 березня 2024 р.)

1. ВСТУП

Незважаючи на велику кількість різних металевих наночастинок (НЧ), які були успішно одержані різними методами, знання про механізми зародження та росту їх у даному розряді все ще обмежені головним чином через відсутність експериментальних даних *in situ*.

У статті [1] повідомлялося про безрідинну синтезу НЧ міді із застосуванням магнетронного розряду у холодному буферному газі. Тут представлено результати мірянь рентгенівського розсіювання під малим кутом *in situ*, виконаних поблизу магнетронної мішені з міді в буферному газі аргоні. Показано, що формування НЧ міді відбувалося переважно в області, обмеженій магнетронним плазмовим кільцем. У цій зоні діаметер НЧ міді зростав від 10 до 90 нм.

Результати синтези НЧ вольфраму з використанням газового агрегаційного кластерного джерела на основі магнетронного розряду наведено в статті [2]. Наночастинки мали розміри у 70–100 нм, а їхню форму було зумовлено дендритною морфологією з розгалуженнями, які виходили із центру та розвивались у вигляді квітки. Структурні дослідження виявили наявність α -W-фази та залишкової β -W-фази.

У статті [3] повідомлялося про одержання однофазних нанопорошків α -W з використанням паравольфрамату амонію як вихідного матеріалу й оптимальних умов синтези. Процес включав два етапи: радіочастотне індукційне термічне плазмове оброблення та термохімічне відновлення за 600–900°C. Оцінювався вплив температури відпалу на фазу та на розмір частинок вольфраму. Коли високочастотне індукційне термічне плазмове оброблення проводилося з Гідрогеном і без нього, то спостерігалось утворення змішаної фази α -W та β -W-нанопорошку і WO_3 -нанопорошку відповідно. Однофазний нанопорошок α -W був одержаний шляхом відпалу WO_3 -нанопорошку у водні (за температури у 700°C упродовж 10 хв.), в результаті чого утворилися гомогенні НЧ вольфраму малих розмірів ($\cong 21$ нм) без газової агрегації.

В статті [4] наведено огляд останніх досягнень у формуванні й осадженні НЧ методом газової агрегації. Приклади варіюються від шляхетних металів (Ag, Au) до реактивних металів (Al, Ti та Si) і відповідних оксидів. Акцент зроблено на механізмі росту наночастинок і їхніх властивостях. Повідомлялося також про розробку моделювання методом Монте-Карло пояснення механізму росту та динаміки утворення НЧ залежно від умов експерименту. Розглядалася роль слідових кількостей реактивних газів та імпульсної роботи плазми на процес зародження НЧ та обговорювалось оброблення НЧ у плазмовому середовищі, яке приводило до заряджання НЧ.

Про два способи одержання нановольфраму хемічними методами повідомлялося в статті [5]. НЧ вольфраму одержувалися шляхом водневого термічного відновлення оксиду Вольфраму за температур у 500–600°C або шляхом проведення піролізу. За допомогою рентгеноструктурної аналізи та сканувальної електронної мікроскопії було досліджено структуру та морфологію зразків нановольфраму. Одержані нанопорошки вольфраму мали розміри в діапазоні 7–30 нм (залежно від температури синтезу).

В статті [6] повідомлялися результати прямого одержання НЧ вольфраму з вольфрамового зливка методом електронно-променевого випаровування. Синтезу наночастинок було здійснено у високовакуумній установці з фізичним осадженням пари вольфраму й електронно-променевим випаровуванням. Розміри синтезованого нановольфраму були в діапазоні від 50 до 120 нм.

Результати дослідження УФ-випромінення високовольтного багатеелектродного розряду наносекундної тривалості по поверхні діелектрика у повітрі, який є перспективним для утворення мікро- та наночастинок оксидів перехідних металів, наведено в статті [7]. Розряд запалювався в формі набору послідовних мікроплазмових утворень з питомим енергетичним внеском на рівні 1 кДж/см³ і концентрацією електронів у $\cong 10^{17}$ см⁻³. У випромінненні плазми домінувало випромінення атомів і йонів матеріалу електрод (мідь або неіржавійна криця). Результати мірювання інтенсивності УФ-випромінення плазми показали, що ККД УФ-випромінювання відносно енергії, яку було внесено в розряд, сягав $\approx 1\%$.

Як впливає з вищенаведених матеріалів з синтезу нанопорошків вольфраму, для синтезу їх використовують магнетронні розряди низького тиску, хемічні методи, іскрові розряди наносекундної тривалості й електронний жмут. Ці методи, крім імпульсного розряду, потребують використання високовакуумної техніки, електронних жмутів або складних хеміко-технологічних реакторів.

Для спрощення техніки та технології синтезу нановольфраму

можливо використати реактор на основі перенапруженого наносекундного розряду з ектонним внесенням парів матеріалу електрод у плазму [8, 9], за допомогою якого були синтезовані мікрота наноструктури оксидів перехідних металів.

В даній статті наведено результати дослідження умов синтези нановольфраму в перенапруженому наносекундному розряді атмосферного тиску з ектонним механізмом внесення парів між електродами з вольфраму в інертних газах.

2. ТЕХНІКА Й УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження характеристик високовольтного наносекундного розряду (ВНР) між електродами з вольфраму в інертних газах проводилося з використанням експериментального стенда, схему й основні характеристики якого та систему вимірювання характеристик розряду наведено в статті [7]. Віддаль між електродами складала $d = 2$ мм. Електроди були встановлені в розрядну камеру, яку виготовлено з оргскла.

Для запалювання ВНР на електроди розрядної камери подавалися біполярні імпульси високої напруги тривалістю у 100–150 нс, амплітудою у ± 20 –40 кВ. Частота слідування імпульсів напруги знаходилася в діапазоні 80–1000 Гц. Тиск інертних газів складав 101,2 і 13,3 кПа.

Розрядний проміжок було перенапружено, що створило сприятливі умови для формування жмута «електронів-втікачів» високої енергії та супутнього рентгенівського випромінення [10].

Розрядну камеру відкачували форвакуумною помпою до залишкового тиску у 5–10 Па, а після в камеру напускали інертні гази. Діаметер циліндричних електрод з вольфраму складав 5 мм. Радіус заокруглення їхньої робочої торцевої поверхні був однаковим і дорівнював 3 мм.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ

За атмосферного тиску інертних газів і віддалі між електродами $d = 2$ мм ВНР мав вигляд яскравої центральної частини діаметром близько 2–3 мм і низки більш слабких струменів плазми, що відходили від її центральної частини. В інертних газах атмосферного тиску вигляд ВНР був подібним до ВНР між електродами з сульфіду Аргентуму в цих газах [11].

Осцилограми напруги, струму, імпульсна потужність для ВНР між електродами з вольфраму за різних тисків криптону наведено на рис. 1 за величини напруги на аноді тиратрона високовольтного модулятора імпульсів у 13 кВ.

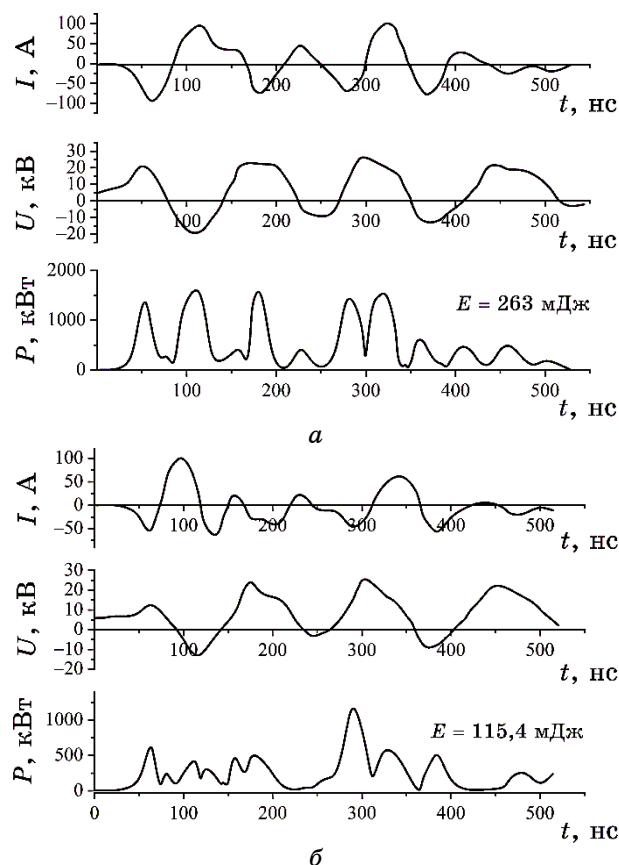


Рис. 1. Осцилограми струму, напруги й імпульсної потужності ВНР між електродами з вольфраму за міжелектродної віддалі у 2 мм і тисків криптону у 101,3 (а) і 13,3 кПа (б) ($U_{\text{зад}} = 13$ кВ).¹

Осцилограми напруги та струму були в формі згасних у часі осциляцій тривалістю близько 80–100 нс, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору високовольтного модулятора з опором навантаження. Повна тривалість осциляцій напруги на проміжку та розрядного струму досягала 500 нс.

За атмосферного тиску криптону максимальна імпульсна потужність складала 1,6 МВт (за $t_2 = 115$ нс), а енергетичний внесок у плазму складав 263 мДж (рис. 1, а). Зі зменшенням тиску криптону до 13,3 кПа ці характеристики зменшувалися до 1 МВт (за $t_4 = 280$ нс) і $E = 115,4$ мДж (рис. 1, б) відповідно.

На рисунку 2 наведено електричні характеристики ВНР в аргоні. Для ВНР в аргоні атмосферного тиску амплітуди першої, другої та третьої півхвиль напруги знаходилися в межах 20–22

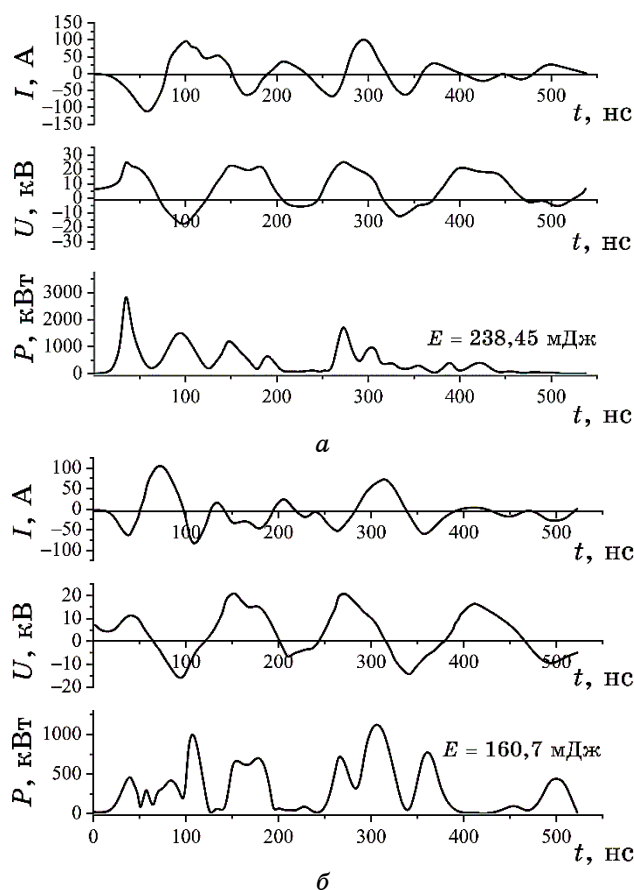


Рис. 2. Осцилограми струму, напруги й імпульсна потужність ВНР між електродами з вольфраму за тисків аргону у 101 (а) і 13,3 (б) кПа.²

кВ за часів $t_1 = 50$, $t_2 = 175$ і $t_3 = 300$ нс відповідно, а максимум струму складав близько 110 А ($t_1 = 60$ нс). Максимум імпульсної потужності ВНР сягав 2,7 МВт за $t_1 = 35$ нс, а енергетичний внесок у плазму за один розрядний імпульс складав $\cong 239$ мДж.

Зі зменшенням тиску аргону до 13,3 кПа амплітуда першого негативного імпульсу напруги зменшувалася до 15 кВ, і він спостерігався за $t_1 = 100$ нс. Максимальна величина півхвилі струму досягала 100 А за час, близький до $t = 90\text{--}100$ нс. Максимальна величина імпульсної потужності досягалася за час у 110 нс — 1 МВт (рис. 2, б), а внесок енергії у ВНР за один розрядний імпульс дорівнював 160,7 мДж.

Електричні характеристики ВНР у гелії за тих же умов збу-

дження розряду, що і в криптоні й аргоні, за формою були подібними до відповідних характеристик ВНР в криптоні й аргоні, але величини струмів і напруг були меншими, що привело до зменшення енергії розрядного імпульсу в 2–3 рази. Такий розподіл електричних характеристик ВНР в різних інертних газах ймовірно зумовлений різним опором плазми та різними умовами його узгодження з вихідним опором високовольтного модулятора.

Результати контрольних експериментів з ВНР атмосферного тиску в повітрі та кисні показали, що їхні енергетичні характеристики сумірні з відповідними даними для ВНР у криптоні й аргоні: енергія, що вносилася за один розрядний імпульс у ВНР в повітрі складала 312,6 мДж, в кисні — 245,4 мДж.

Спектри випромінювання ВНР в різних газопарових сумішах на основі парів вольфраму наведено на рис. 3. Результати розшифрування спектрів випромінювання плазми газопарових сумішей Kr–W, He–W наведено в таблицях 1 і 2. Для ідентифікації спектральних ліній у спектрах використовувалися довідники [12, 13].

Спектральні лінії атомів і йонів у ВНР у всіх газопарових сумішах на основі вольфраму спостерігалися на фоні неперервного випромінювання плазми. Найбільш яскраво цей континуум був виражений у випромінненні ВНР на основі криптому атмосферного тиску. Він спостерігався в спектральному інтервалі 400–500 нм. Широкий континуум у спектральній області 200–1100 нм пов'язаний з тепловим і рекомбінаційним випромінненням йонів важких інертних газів [14]. Він також проявлявся в плазмі на основі повітря та кисню (рис. 3). Континуум був практично відсутній у спектрі випромінювання ВНР на основі гелію за тих же самих умов експерименту (рис. 3).

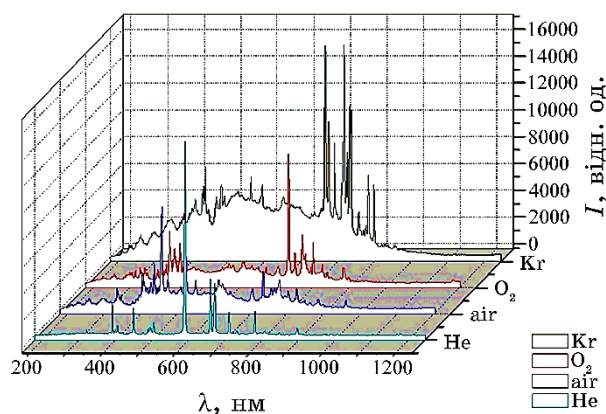


Рис. 3. Спектри випромінювання плазми ВНР в газопарових сумішах атмосферного тиску.³

ТАБЛИЦЯ 1. Результати ідентифікації спектрів випромінювання плазми ВНР між електродами з вольфраму за тиску криптону у 101,3 кПа ($d = 2$ мм, $f = 1000$ Гц).⁴

№	$\lambda_{\text{табл.}}, \text{нм}$	$I_{\text{експ.}}$	відн. од.	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}, \text{еВ}$	$E_{\text{верх.}}, \text{еВ}$	Терм _{нижн.}	Терм _{верх.}
1	395,53	3822	WI	2,43	5,57		$5d^5(^4G)6s^5S_6$	$5d^46s(^6D)7s^5D_6$
2	400,87	4317	WI	0,365	3,45		$5d^5(^6S)6s^7S_3$	$5d^5(^6S)6p^7P_4$
3	407,43	4614	WI	0,365	3,40		$5d^5(^6S)6s^7S_3$	$5d^5(^6S)6p^7P_3$
4	437,61	7977	KrI	13,98	16,83		$4s^24p^4(^3P)5s^4P_{3/2}$	$4s^24p^4(^3P)5p^4D_{7/2}$
5	476,57	7133	KrII	14,26	16,87		$4s^24p^4(^3P)5s^4P_{3/2}$	$4s^24p^4(^3P)5p^4D_{5/2}$
6	557,02	7564	KrI	9,91	12,14		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{1/2})5p^2[3/2]_1$
7	587,09	6319	KrI	10,03	12,14		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{1/2})5p^2[3/2]_2$
8	645,63	4999	KrI	11,44	13,36		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2]_3$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})6d^2[7/2]_4$
9	760,15	15804	KrI	9,91	11,54		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[3/2]_2$
10	769,45	12285	KrI	9,91	11,52		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[3/2]_1$
11	785,48	10471	KrI	10,56	12,14		$4s^24p^5(^2P_{1/2})5s^2[1/2]_0$	$4s^24p^5(^2P_{1/2})5p^2[1/2]_1$
12	792,85	4001	KrI	11,44	13,00		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5d^2[7/2]^3$
13	810,43	15856	KrI	9,91	11,44		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2]_2$
14	819,00	9431	KrI	10,03	11,54		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[3/2]_2$
15	826,32	13535	KrI	10,64	12,14		$4s^24p^5(^2P_{1/2})5s^2[1/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{1/2})5p^2[3/2]_2$
16	829,81	13294	KrI	10,03	11,52		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[3/2]_1$
17	850,88	4039	KrI	10,64	12,10		$4s^24p^5(^2P_{1/2})5s^2[1/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{1/2})5p^2[3/2]_1$
18	877,67	7380	KrI	10,03	11,44		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[5/2]_2$
19	892,86	6489	KrI	9,91	11,30		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_2$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[1/2]_1$
20	975,17	849	KrI	10,03	11,30		$4s^24p^5(^2P_{3/2})5s^2[3/2]_1$	$4s^24p^5(^2P_{3/2})5p^2[1/2]_1$

ТАБЛИЦЯ 2. Результати ідентифікації спектру випромінення плазми ВНР між електродами з вольфраму за тиску гелію у 101 кПа ($d = 2$ мм, $f = 1000$ Гц).⁵

№	$\lambda_{\text{табл.}}, \text{нм}$	$I_{\text{експ.}}, \text{відн. од.}$	Об'єкт	$E_{\text{нижн.}}, \text{еВ}$	$E_{\text{верх.}}, \text{еВ}$	Терм _{нижн.}	Терм _{верх.}
1	388,86	326	HeI	7,42	23,00	$1s2s\ ^3S_1$	$1s3p\ ^3P_1$
2	395,53	51	WI	2,43	5,57	$5d^5(^6G)6s\ ^5S_6$	$5d^46s(^6D)7s\ ^5D_6$
3	400,87	55	WI	0,365	3,45	$5d^5(^6S)6s\ ^7S_3$	$5d^5(^6S)6p\ ^7P_4$
4	407,43	63	WI	0,365	3,40	$5d^5(^6S)6s\ ^7S_3$	$5d^5(^6S)6p\ ^7P_3$
5	447,14	176	HeI	20,96	23,73	$1s2p\ ^3P_1$	$1s4d\ ^3D_2$
6	471,31	33	HeI	20,96	23,59	$1s2p\ ^3P_2$	$1s4s\ ^3S_1$
7	492,19	69	HeI	21,21	23,73	$1s2p\ ^1P_1$	$1s4d\ ^1D_2$
8	501,56	152	HeI	20,61	23,08	$1s2s\ ^1S_0$	$1s3p\ ^1P_1$
9	587,59	2136	HeI	20,96	23,07	$1s2p\ ^3P_2$	$1s3d\ ^3D_2$
10	656,28	449	H $_{\alpha}$	10,20	12,09	$2p\ ^2P$	$3d\ ^2D$
11	667,81	525	HeI	21,21	23,07	$1s2p\ ^1P_1$	$1s3d\ ^1D_2$
12	706,51	228	HeI	20,96	22,71	$1s2p\ ^3P_2$	$1s3s\ ^3S_1$
13	728,13	64	HeI	21,21	22,92	$1s2p\ ^1P_1$	$1s3s\ ^1S_0$
14	777,19	231	OI	9,14	10,74	$2s^2p^3(^4S)3s\ ^5S_2$	$2s^2p^3(^4S)3p\ ^5P_3$

У статті [15], де вивчалися характеристики іскрового розряду в аргоні атмосферного тиску між металевими електродами, в спектрі випромінення плазми також було зареєстровано інтенсивний континуум у діпазоні довжин хвиль 350–460 нм з максимумом для $\lambda = 420$ нм.

Спектральні лінії атома Вольфраму 395,53, 400,87, 407,43 WI нм (виділені в таблицях курсивом) спостерігались у ВНР у всіх робочих середовищах. Невелика кількість спектральних ліній атома Вольфраму у ВНР може бути зумовлена тим, що збуджені атоми та йони Вольфраму вступають у швидкі реакції утворення малих кластерів і наночастинок вольфраму. Інтенсивність випромінення спектральних ліній атома Вольфраму послідовно зменшувалась із заміною криптона на аргон і аргону на гелій, що узгоджується з величиною енергії, яка вносилась у розряд у цих плазмових середовищах.

В спектрах випромінення ВНР у газопарових сумішах у видимій і близькій інфрачервоній ділянках довжин хвиль спостерігались характеристичні спектральні лінії атомів He, Ar і Kr.

Механізм утворення збуджених атомів інертних газів у цих експериментах з великою ймовірністю визначається процесами збудження та йонізації електронами атомів інертних газів у ме-

тастабільних станах і йонів інертних газів в основному енергетичному стані, а також процесами їхньої рекомбінації з електронами.

4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що за атмосферного тиску гелію, аргону та крипто-ну між електродами з вольфраму за міжелектродної віддалі у 2 мм запалювався однорідний ВНР з максимальною амплітудою напруги одної полярности до 30 кВ і струму до 100 А у повітрі за $p = 101$ кПа. ВНР запалювався й існував у формі цугу окремих півхвиль тривалістю по $\cong 100$ нс з майже сталою амплітудою за тривалости цугу в межах 500 нс, що оптимально для руйнування поверхні електрод і синтези тонких плівок з такої плазми. Максимальна імпульсна потужність ВНР досягалася в криптоні — 2,6 МВт за найбільшої енергії в одному електричному імпульсі у 263 мДж. Зменшення тиску буферних газів з 101 до 13,3 кПа приводило до значного зменшення енергетичних характеристик розрядів.

Дослідження спектральних характеристик ВНР у газопарових сумішах Kr (Ar, He)–W показало, що в газопарових сумішах на основі крипто-ну й аргону спостерігався континуум, на фоні якого реєструвались обмежена кількість ліній атома Вольфраму та характеристичні лінії інертних газів. Інтенсивність випромінювання ліній атома Вольфраму зменшувалася послідовно з переходом від буферного газу крипто-ну до гелію. Зменшення тиску інертних газів і частоти слідування імпульсів струму з 1000 до 80 Гц приводило до значного зменшення інтенсивности всіх спектральних ліній і континууму. Найбільш ймовірними процесами утворення збуджених атомів і йонів буферного газу можуть бути процеси ступеневого збудження та йонізації, дисоціативного збудження та йонізації, збудження атомарних йонів електронами та процеси рекомбінації електронів з йонами.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. J. Kousal, A. Shelemin, M. Schwartzkopf, O. Polonskyi, J. Hanuš, P. Solař, M. Vaidulych, Daniil Nikitin, P. Pleskunov, Z. Krtouš, T. Strunskus, F. Faupel, S. V. Roth, H. Biederman, and A. Choukourov, *Nanoscale*, **38**, No. 10: 18275 (2018); <https://doi.org/10.1039/C8NR06155F>
2. T. Acsente, R. F. Negrea, L. C. Nistor, C. Logofatu, E. Matei, R. Birjega, C. Grisolia, and G. Dinesculă, *Eur. Phys. J. D*, **69**: 161 (2015); <https://doi.org/10.1140/epjd/e2015-60097-4>
3. D. Shin, H.-W. Shim, B. Swain, K.-S. Park, and C.-G. Lee, *Korean J. Met. Mater*, **58**, No. 11: 798 (2020);

- <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.11.798>
4. Oleksandr Polonskyi, Amir Mohammad Ahadi, Tilo Peter, Kenji Fujioka, Jan Willem Abraham, Egle Vasiliauskaite, Alexander Hinz, Thomas Strunskus, Sebastian Wolf, Michael Bonitz, Holger Kersten, and Franz Faupel, *Eur. Phys. J. D*, **72**, No. 93: 1 (2018); <https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80419-8>
 5. Kh. A. Abdullin, A. A. Azatkaliev, M. T. Gabdullin, Zh. K. Kalkozova, B. N. Mukashev, and A. S. Serikkanov, *Phys. Solid State*, **60**: 2634 (2018); <https://doi.org/10.1134/S1063783419010025>
 6. R. Kh. Ashurov, Kh. B. Ashurov, V. N. Arustamov, I. Kh. Khudaykulov, and D. T. Usmanov, *Uzbek Journal of Physics*, **24**, No. 4: 268 (2022); <https://doi.org/10.52304/.v24i4.380>
 7. A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, Yu. N. Kozlov, I. A. Kossyi, M. A. Misakyan, I. V. Moryakov, M. I. Taktakishvili, N. M. Tarasova, and S. M. Temchin, *Plasma Phys. Rep.*, **45**: 246 (2019); <https://doi.org/10.1134/S1063780X19020016>
 8. 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>
 9. O. K. Shuaibov, O. Y. Mynia, O. M. Malinin, R. V. Hrytsak, A. O. Malinina, A. I. Pogodin, and Z. T. Homoki, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, **15**, No. 1: 01010 (2023); [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01010](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01010)
 10. G. A. Mesyats, *Usp. Fizich. Nauk*, **165**, No. 6: 601 (1995); <https://doi.org/10.1070/%20PU1995v038n06ABEH000089>
 11. O. K. Shuaibov, R. V. Hrytsak, and R. P. Romanets, *The III International Scientific and Practical Conference 'Modern Challenges to Science and Practice' (January 24–26, 2022, Varna)*, p. 483.
 12. *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*; https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
 13. A. R. Striganov, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms* (New York: Springer: 1968).
 14. R. V. Hrytsak, O. K. Shuaibov, O. I. Mynia, and Z. T. Homoki, *Proceedings of the International Conference 'Uzhhorod School of Atomic Physics and Quantum Electronics' Dedicated to the 100th Anniversary of Professor I. P. Zapisochnyi (May 26–27, 2022, Uzhhorod): Book of Abstracts*, p. 199.
 15. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, and G. B. Ragimkhanov, *Prikladnaya Fizika*, **2**: 35 (2014) (in Russian).

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

¹ Fig. 1. Oscillograms of current, voltage, and pulse power of the HVND between tungsten electrodes at an interelectrode distance of 2 mm and krypton pressures of 101.3 (a) and 13.3 kPa (b) ($U_{ch} = 13$ kV).

² Fig. 2. Oscillograms of current, voltage and pulse power of the HVND between tungsten electrodes at argon pressures of 101 (a) and 13.3 (b) kPa.

³ Fig. 3. Radiation spectra of the HVND plasma in atmospheric pressure gas–vapor mixtures.

⁴ TABLE 1. Results of identification of the emission spectra of the HVND plasma between tungsten electrodes at a krypton pressure of 101.3 kPa ($d = 2$ mm, $f = 1000$ Hz).

⁵ TABLE 2. Results of identification of the emission spectrum of the HVND plasma between tungsten electrodes at a helium pressure of 101 kPa ($d = 2$ mm, $f = 1000$ Hz).