

УДК 537.52:621.327

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

DOI 10.24144/2415-8038.2020.48.92-101

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

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,
e-mail: alexsander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРУЖЕНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РОЗРЯДУ МІЖ ЕЛЕКТРОДОМ З МІДІ І ЕЛЕКТРОДОМ З ЦИНКУ В АРГОНІ

Приведено характеристики перенапруженого наносекундного розряду між електродом з міді і електродом з цинку в аргоні підвищеного тиску ($p=50$ кПа). Досліджено просторові, електричні і оптичні характеристики розряду, при віддальх між електродами $d = 2$ і 7 мм. Вивчення спектрів випромінювання плазми розряду дозволило встановити основні збуджені продукти, які утворювались в плазмі. Наявність в спектрах випромінювання плазми інтенсивних спектральних ліній атомів і однозарядних іонів як міді, так і цинку створює передумови синтезу тонких біметалевих плівок на основі композиції «мідь-цинк» з продуктів розпорощення

Ключові слова: перенапружений наносекундний розряд, аргон, мідь, цинк, плазма.

Вступ

Композиційні матеріали на основі перехідних металів (Cu, Zn, Ag...) і їх оксидів набули широкого застосування при виготовленні електродів і контактів комутуючих приладів (реле, комутаторів і розмикачів). В тому числі це і контактні матеріали системи «срібло-оксид металу» [1].

Іншими практично важливими застосуваннями композитних сполук на основі металів є проблема діагностики плазми дугового розряду між електродами з композиційного матеріалу Ag – CuO в повітрі атмосферного тиску. При допущенні наявності локальної термодинамічної рівноваги в дуговому розряді, розраховано концентрації металів в плазмі, встановлено, що зростання струму викликає збільшення вмісту металів в плазмі дугового розряду між електродами з комутаційного матеріалу Ag – CuO майже на порядок з одночасним зменшенням кількісного співвідношення срібла до міді [2].

В значній кількості випадків синтез

композитних матеріалів відбувається хімічними чи електрохімічними методами, в лазерній плазмі або при використанні магнетронів низького тиску. Останні два методи потребують застосування дороговартісної вакуумної і лазерної техніки. Тому важливим є пошук нових фізичних методів синтезу композитних матеріалів, які реалізуються при вибухах тонких провідників в газах високого тиску [3] чи в наносекундних сильно-струмових розрядах [4].

В перенапружених наносекундних розрядах в газах атмосферного тиску формування ектонів при мікробибухах неоднорідностей на робочих поверхнях електродів супроводжується викидом парів матеріалу електродів в міжелектродний простір [5], що дозволяє використати їх для синтезу тонких плівок на основі композитних сполук або напрацьовувати ультрадисперсні композитні порошки на основі перехідних металів [6].

Дослідження умов синтезу біметалевих наноструктур Cu-Zn з продуктів деструкції цинкових і мідних електродів у пере-

напруженому наносекундному розряді атмосферного тиску інертних газів практично відсутні, тому актуальною є задача встановлення умов осадження тонких композитних плівок на основі перехідних металів (Cu, Zn, Cd, ...), яке проводиться без застосування коштовного лазерного чи високовакуумного обладнання.

В статті приведені результати дослідження характеристик перенапруженого наносекундного розряду в аргоні підвищеного тиску, що запалювався між електродом з міді і електродом з цинку. На основі парів цинку і міді в нерівноважній плазмі високого тиску можливе утворення біметалевих Cu-Zn наночастинок, які можуть осаджуватись на діелектричній підкладці у вигляді тонкої плівки. Процес синтезу біметалевої плівки відбувається при автоматичному її опроміненні жорстким УФ-випромінюванням плазми парів міді і цинку, що позитивно впливає на електричні характеристики плівки [7].

Техніка та методика досліджень

Дослідження характеристик перенапруженого біполярного наносекундного розряду проводилось на експериментальному стенді, характеристики якого приведені в [4]. Перенапружений наносекундний розряд між електродом з міді і електродом з цинку запалювався в герметичній камері з оргскла. Віддаль між електродами складала $d = 2$ або 7 мм.

Для запалювання розряду на електроді розрядної комірки подавались біполярні імпульси високої напруги тривалістю 50-100 нс амплітудою $\pm(20-40)$ кВ. Частота слідування імпульсів напруги була вибрана рівною 80-100 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 ємнісного дільника напруги, поясу Роговського та широкосмугового осцилографа БЛОР-04.

Розрядний проміжок був перенапружений, що створювало сприятливі умови для формування пучка втікаючих електронів ви-

сокої енергії і супутнього рентгенівського випромінювання [8].

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, підключений 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 аргон до тисків 50 або 100 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.

Просторові і електричні характеристики

На рис. 1 приведена усереднена за часом світлина перенапруженого наносекундного розряду, яка була зареєстрована з часовою експозицією фотокамери ≈ 1 с.

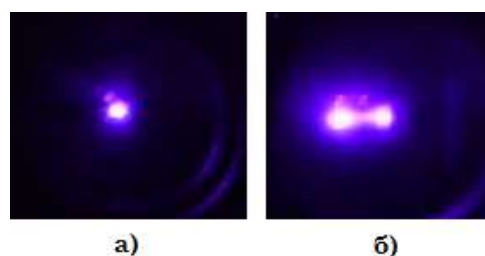


Рис. 1: Світлини перенапруженого наносекундного розряду між мідним і цинковим електродами при $p(\text{Ar}) = 50$ кПа ($d=2$ мм) а), і $p(\text{Ar}) = 100$ кПа ($d=2$ мм) б).

Осцилограми напруги і струму були в формі згасаючих в часі осциляцій, що зумовлено неузгодженістю вихідного опору

високовольтного модулятора з опором навантаження. Повна тривалість осциляцій напруги на проміжку та розрядного струму досягала 200-400 нс при тривалості окремих осциляцій напруги 10 – 20 нс, а осциляції струму мали тривалість $\approx 50-70$ нс. Короткотривалі осциляції найкраще проявлялись на осцилограмах напруги. На осцилограмах струму вони були частково проінтегровані за часом внаслідок великої сталої часу поясу Роговського, який використовувався в цих дослідженнях.

Для розряду в аргоні при тиску при 50 кПа амплітуда найбільшого спаду напруги на електродах досягала в початковій стадії розряду і складала $\approx \pm 2 - 4$ кВ, струму $\pm 80-100$ А, а імпульсної потужності – 0,8 МВт, що забезпечувало енергетичний внесок за один розрядний імпульс в плазму $\approx 122,6$ мДж (рис. 2).

При збільшенні тиску аргону до 100 кПа і міжелектродної віддалі до 7 мм (рис. 3) перепад напруг різної полярності в початковій фазі розряду при $t = 30-60$ нс досягав 20 кВ, а струму $\pm 70-100$ А. Максимальна величина електричної імпульсної потужності досягала 2.5 МВт при $t = 80-90$ нс. Основний енергетичний внесок в плазму здійснювався протягом перших 100 нс з моменту запалювання розряду. Енергія одного розрядного імпульсу досягала $\approx 168,7$ мДж (рис. 3).

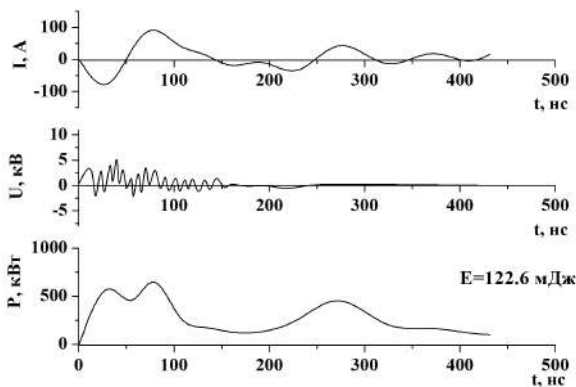


Рис. 2: Часові залежності імпульсної електричної потужності розряду, напруги між електродами з міді і електродом з цинку і струму розряду при міжелектродній віддалі $d=2$ мм; $p(\text{Ar}) = 50$ кПа.

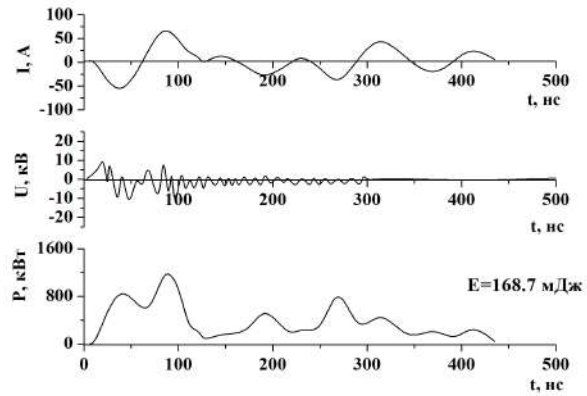


Рис. 3: Часові залежності імпульсної електричної потужності розряду, напруги між електродом з міді і електродом з цинку і струму розряду при міжелектродній віддалі $d=7$ мм; $p(\text{Ar}) = 100$ кПа.

Оптичні характеристики

Контрольні експерименти проводились з розрядом в аргоні високого тиску між електродами з цинку або міді. Результати дослідження спектральних характеристик плазми перенапруженого наносекундного розряду в аргоні атмосферного тиску між електродами з цинку наведені в [9].

На рисунку 4 приведені контрольні спектри випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами, який запалювався при $p(\text{Ar}) = 100$ кПа і віддалі між електродами – 2 мм, а результати його ідентифікації зведені в таблицю 1. Відповідні дані для розряду між різними металевими електродами приведені на рис. 5 і таблиці 2.

Особливістю всіх спектрів випромінювання була наявність континууму, на фоні якого спостерігались всі спектральні лінії і смуги. Природа даного континууму в умовах нашого експерименту пов'язана з тепловим і рекомбінаційним випромінюванням плазми. Форма континууму з широким максимумом при 400-450 нм добре корелювалась з результатами, відомими з літератури.

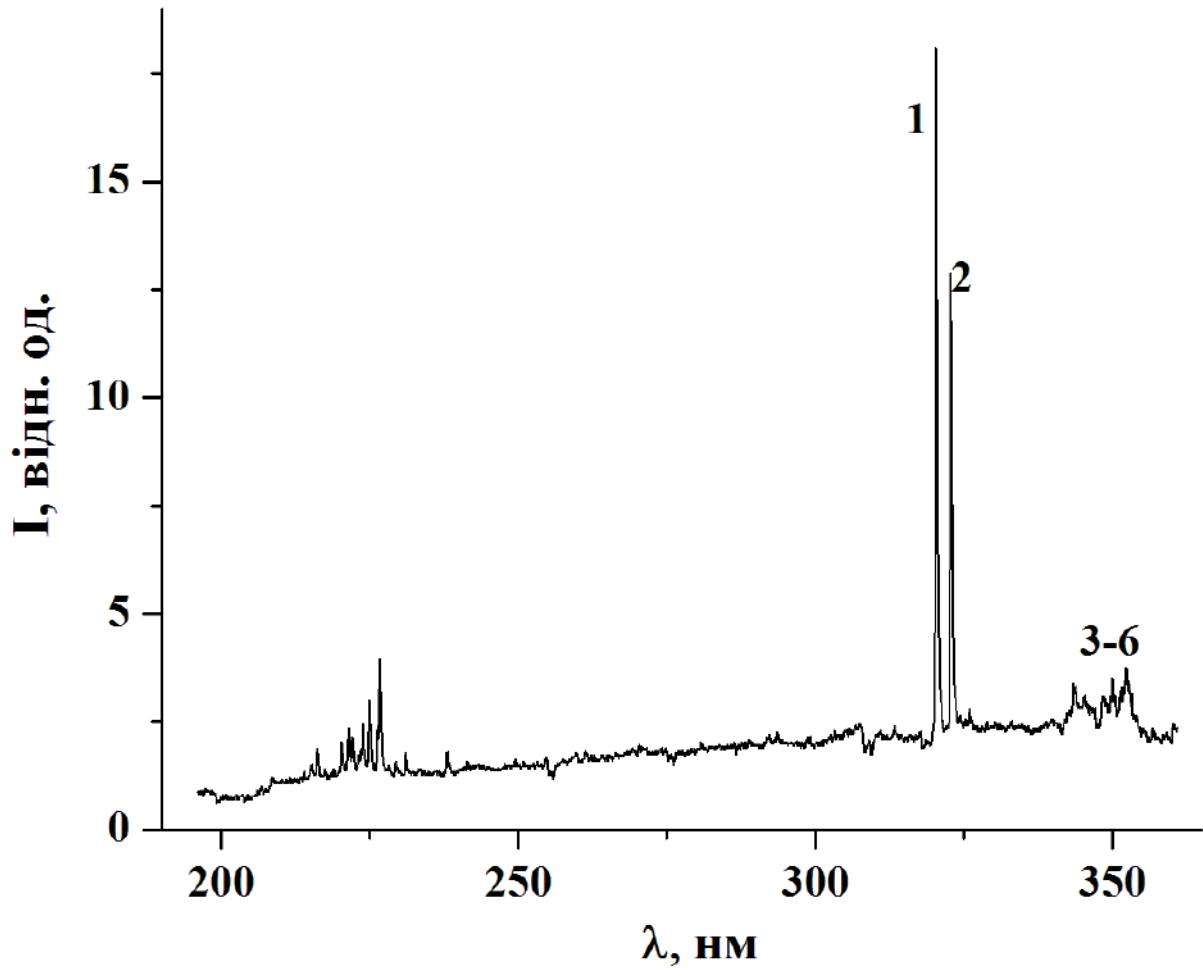


Рис. 4: Спектр випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між мідними електродами в аргоні при $p(\text{Ar}) = 50$ кПа ($d=2$ мм).

Табл. 1: Результати ідентифікації спектру (рис. 4) випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді при $p(\text{Ar}) = 50$ кПа.

№	$\lambda_{\text{табл. нм}}$	$I_{\text{експ.}} \text{, відн. од.}$	Об'єкт
1	324.75	18.06	CuI
2	327.39	12.94	CuI
3	350.05	3.38	N_2
4	354.89	3.13	N_2
5	357.69	3.53	N_2
6	358.21	3.71	N_2

Так, в [10] для іскрового розряду в аргоні атмосферного тиску в спектрі випромінювання було зареєстровано інтенсивний континуум в діапазоні довжин хвиль 350-460 нм з максимумом при $\lambda=420$ нм. Неперервний

спектр випромінювання плазми починав реєструватись після проміжку часу $\Delta t=40$ від початку розряду, коли інтенсивність іонних ліній аргону починала різко зростати.

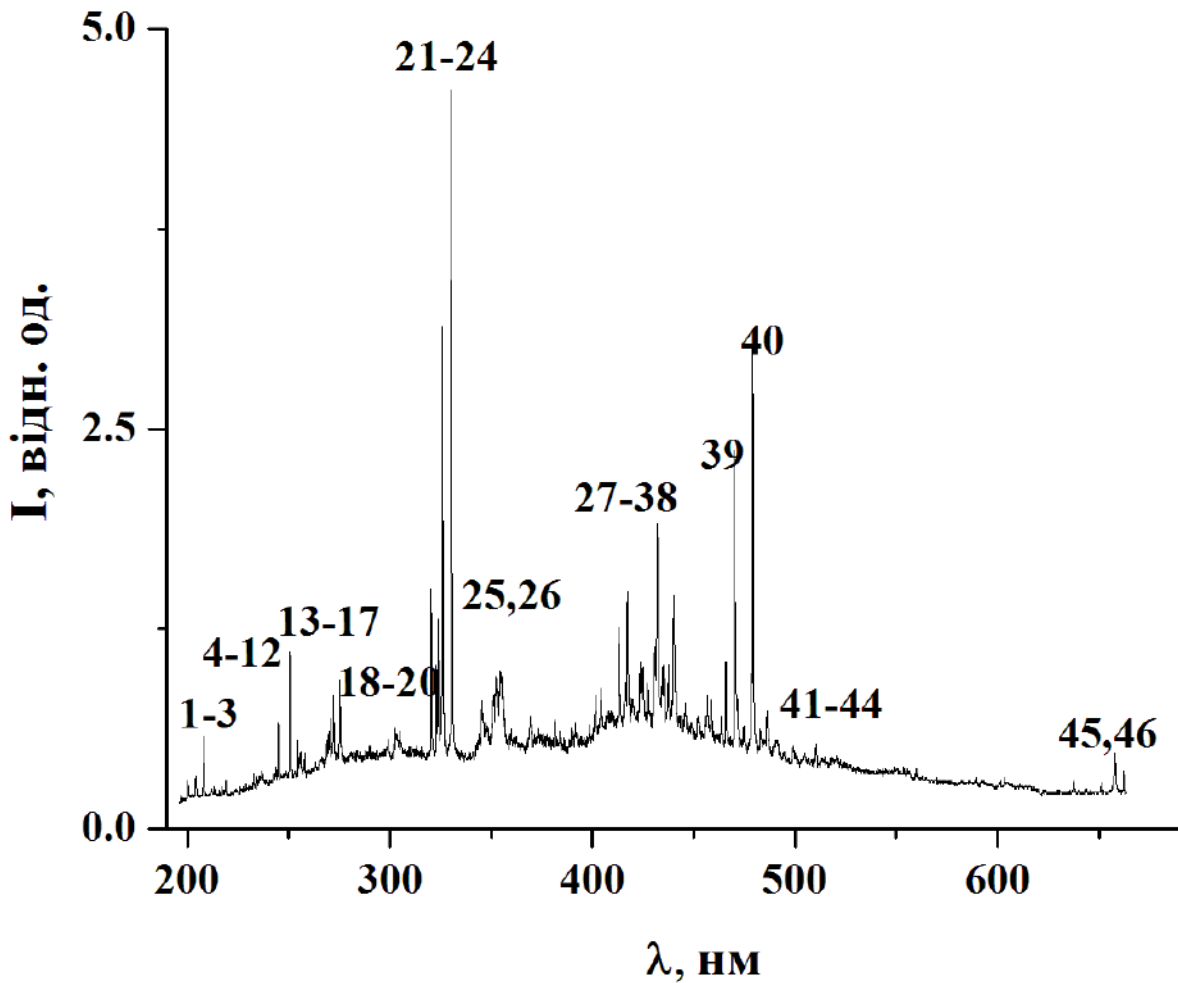


Рис. 5: . Спектр випромінювання плазми перенапруженого наносекундного розряду між електродом з міді і електродом з цинку при $p(\text{Ar}) = 50$ кПа ($d=2$ мм).

В спектрах випромінювання плазми газо-парової суміші аргону і міді (рис. 3) в УФ-діапазоні довжин хвиль 214-330 нм (лінії 1-23; табл. 1) спостерігалось випромінювання на переходах атома і однозарядного іона міді. Найбільш інтенсивною іонною спектральною лінією була лінія з $\lambda = 227.62$ нм CuII , а з атомарних найінтенсивнішими були резонансні спектральні лінії атома міді з $\lambda = 324.75$ і 327.39 нм CuI , у яких нижнім енергетичним рівнем є основний рівень. В УФ-спектрі випромінювання також спостерігались смуги другої додатної системи молекули азоту, оскільки в даних експериментах відкачування розрядної камери відбувалось лише до залишкового тиску повітря ≈ 10 Па. В діапазоні довжин хвиль 360-659 нм

спостерігалось випромінювання переважно на переходах ArI ; ArII , а також інтенсивна спектральна лінія атома водню ($\lambda = 656,29$ H_α), яка зумовлена залишковим тиском повітря в камері після її відкачування форвакуумною помпою. Збільшення тиску аргону з 50 до 200 кПа приводило до збільшення інтенсивності більшості спектральних ліній міді і цинку в 2-4 рази.

При відстані між електродами 2 мм і використанні біполярного генератора висковольтних наносекундних імпульсів відбувається формування однієї чи декількох (при сильному перенапруженні розрядного проміжку) катодних плям, які рухаються одна назустріч одній.

Табл. 2: Результати ідентифікації спектру (рис. 4) випромінювання перенапруженого наносекундного розряду між електродами з міді при $p(\text{Ar}) = 50$ кПа.

№	$\lambda_{\text{табл, нм}}$	$I_{\text{експ.}}, \text{вiдн. од.}$ $p(\text{Ar}) = 50 \text{ кПа}$	Об'єкт	№	$\lambda_{\text{табл, нм}}$	$I_{\text{експ.}}, \text{вiдн. од.}$ $p(\text{Ar}) = 50 \text{ кПа}$	Об'єкт
1	202.54	0.3	ZnII	24	330.25	4.61	ZnI
2	203.93	0.32	ZnII	25	344.60	0.78	N ₂
3	207.99	0.57	ZnII	26	354.89	0.96	N ₂
4	213.59	0.26	CuII	27	368.65	0.67	CuII
5	216.50	0.23	CuI	28	373.78	0.62	ArII
6	217.49	0.25	CuII	29	380.31	0.70	ArII
7	218.17	0.29	CuI	30	402.26	0.83	CuI
8	226.30	0.25	CuI	31	403.54	0.87	ArII
9	229.43	0.28	CuII	32	417.18	1.48	CuII
10	230.31	0.34	CuI	33	433.35	1.9	ArI
11	236.98	0.35	CuII	34	440.09	1.43	ArII
12	244.16	0.66	CuI	35	446.05	0.78	ArII
13	255.79	0.47	ZnII	36	457.93	0.79	ArII
14	258.24	0.47	ZnI	37	463.72	0.69	ArII
15	268.41	0.55	ZnI	38	465.79	1.04	ArII
16	271.24	0.69	ZnI	39	470.33	2.37	ArII
17	275.64	0.92	ZnI	40	479.87	3.02	ArI
18	282.43	0.47	CuI	41	487.62	0.73	ArI
19	299.73	0.56	CuI	42	500.68	0.53	CuII
20	303.61	0.62	CuI	43	510.55	0.54	CuI
21	320.82	1.5	CuI	44	511.82	0.4	ArI
22	324.31	1.31	CuI	45	636.95	0.3	ArI
23	327.39	3.14	CuI	46	656.29	0.47	H _α

Для високовольтного наносекундного розряду в аргоні атмосферного тиску деякі оптичні і газодинамічні характеристики плазми катодної плями наводились в [10]. Проте в цих експериментах, чітко фіксувалось випромінювання плазми катодної плями діаметром $\approx 0.2-0.3$ мм і, прив'язаного до неї, плазми дифузного розряду, який займав більшу частину розрядного проміжку. Основна частина енергії 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, механізм утворення збуджених іонів міді в плазмі може визначатися процесами їх збудження електронами з основного стану відповідного іона. Ефективні перерізи збудження іонів перехідних металів електронним ударом є великими і, наприклад, для іонів цинку досягають - 10^{-16} см² [11].

Відповідні перерізи для іонів міді на даний час невідомі.

Передумовою протікання таких процесів є висока концентрація електронів в плазмі перенапружених розрядів наносекундної тривалості, яка досягає 10^{17} см⁻³ [12].

Розширення спектру випромінювання плазми парів міді і цинку в більш далеку УФ-ділянку (до 202.54 нм) в порівнянні з спектром парів міді збільшує ефективність автоматичного опромінення підкладки і зародків композитної плівки на підкладці жорстким УФ-випромінюванням з плазми розряду, що важливо для впливу на її електричні та оптичні характеристики (утворення смуг просвітлення) [7].

Висновки

Таким чином, встановлено, що при тиску аргону 50 кПа між електродом з міді і електродом з цинку при міжелектродній віддалі $d=2$ мм запалювався однорідний в просторі перенапружений наносекундний розряд з імпульсною електричною потужністю до 0.8 МВт при енергетичному внеску в плазму за один імпульс ≈ 122.7 мДж, а при $d=7$ мм плазма розряду концентрувалась переважно біля кінців голкових електродів

Дослідження спектральних характеристик плазми на основі паро-газових сумішей «мідь-цинк-аргон» показало, що найбільш інтенсивними були спектральні резонансні спектральні лінії атома міді ($\lambda = 324.75$ і 327.39 нм CuI); з ліній однозарядного іона міді в інтервалі 200-330 нм найінтенсивні-

шою була лінія $\lambda = 227.62$ нм CuII. З іонних спектральних ліній в видимій ділянці спектру виділялась лінія з $\lambda = 618.86$ нм CuII. Внесення парів цинку в розряд дозволило змістити короткохвильову границю спектру випромінювання до 202-207 нм за рахунок інтенсивних іонних ліній цинку і збагатити спектр УФ-випромінювання плазми інтенсивними спектральними лініями 258.24; 268.41; 271.24 і 275.64 нм ZnI. Збільшення тиску аргону з 50 до 200 кПа приводило до збільшення інтенсивності більшості спектральних ліній міді і цинку.

Наявність в спектрі випромінювання плазми на основі паро-газових сумішей «мідь-цинк-аргон» створює необхідні умови для осадження композитних плівок типу «Cu-Zn» на підкладку, встановлену біля системи електродів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Афонин М.П. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной коммутационной аппаратуры и области их применения в электротехнике / М.П. Афонин, М.Н. Овчинников // Электрические контакты и электроды— К.: Труды Института материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.— 2006. — С.153–159.
- [2] Babich I.L. Spectroscopic Data and Stark Broadening of CuI and AgI Spectral Lines: Selection and Analysis / I.L. Babich, V.F. Boretskij, A.N. Veklich, R.V. Semenyshyn // [Advances in Space Research.](#) — 2014. — V. 54, № 7 — P. 1–31.
- [3] Романов Д.А. Формирование электровзрывных износостойких и электроэрозионно стойких покрытий с использованием электронно-пучковой обработки / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Электрические контакты и электроды. — 2014. — № 12. — P. 154–161.
- [4] Шуаїбов О.К. Нові газорозрядні методи одержання селективного ультрафіолетового і видимого випромінювання та синтезу наноструктур оксидів перехідних металів: монографія / О.К. Шуаїбов, А.О. Малініна, О.М. Малінін — Видавництво УжНУ «Говерла», Ужгород.— 2019. — 188 с.
- [5] Mesyats G.A. Ecton – Electron Avalanche from metal // [Usp. Fizich. Nauk.](#) — 1995. — Vol. 165, № 6. — С. 601–626.
- [6] Иванов В.В. Высокопроизводительное получение наноразмерных частиц в импульсно-периодическом многозарядном газоразрядном генераторе / В.В. Иванов, А.А. Ефимов, Д.А. Мыльников, А.А. Лизунова, А.В. Богазеев, И.В. Бекетов, С.В. Щербинин // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т.42, № 16. — С. 95–101.
- [7] Абдуев А.Х. УФ-ассистирование процесса роста прозрачных проводящих слоев на основе оксида цинк / А.Х. Абдуев, А.Ш. Асваров, А.К. Ахметов, Р.М. Эмиров, В.В. Беляев // [Письма в ЖТФ.](#) — 2017. — Т.43, № 22. — С. 40–47.

- [8] Runaway electrons preionized diffuse discharge / Ed. by Tarasenko V.F.— New York: Nova Science Publishers Inc. — 2014. — 578 p.
- [9] Данило В.В. Характеристики сильнострумового наносекундного розряду на сумішах гелію та аргону з малими домішками води / В.В. Данило, О.Й. Миня, О.К. Шуаїбов, І.В. Шевера, З.Т. Гомокі, М.В. Дудич // Науковий вісник Ужгородського університету. Фізика.— 2017.— Вип.42.— С.128 – 136.
- [10] Курбанисмаилов В.С. Излучательные и спектральные характеристики искрового канала в аргоне / В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Г.Б. Рагимханов // Прикладная физика. — 2014. —Т.2, № 3. — С. 35 – 38.
- [11] Gomonai A.N. Radiative Decay np^2 autoionization states under dielectronic recombination of the Zn^+ and Cd^+ ions // [Journal of Applied Spectroscopy](#). — 2015. —Vol.82, № 1. — P. 17–22.
- [12] Levko D. Early stage time evolution of a dense nanosecond microdischarge use in fast switching applications / D. Levko, Laxminarayan L. Raja // [Physics of Plasmas](#). — 2016. — Vol.22. — P. 123518.

Стаття надійшла до редакції 4.12.2020

А.К. Шуаїбов, А.И. Миня, Р.В. Грицак, А.А. Малинина, З.Т. Гомокі,
А.Н. Малинин, И.В. Шевера, В.В. Данило, М.И. Ватрала

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина,
e-mail: alexsander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНАПРЯЖЕННОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ МЕДИ И ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ ЦИНКА В АРГОНЕ

Приведены характеристики перенапряженного наносекундного разряда между электродом из меди и электродом из цинка в аргоне повышенного давления ($p = 50$ кПа). Исследовано пространственные, электрические и оптические характеристики разряда, при расстояниях между электродами $d = 2$ и 7 мм. Изучение спектров излучения плазмы разряда позволило установить основные возбужденные продукты, которые образовывались в плазме. Наличие в спектрах излучения плазмы интенсивных спектральных линий атомов и однозарядных ионов как меди, так и цинка создает предпосылки синтеза тонких биметаллических пленок на основе композиции «медь-цинк» из продуктов распыления материала электродов в аргоне.

Ключевые слова: перенапряженный наносекундный разряд, аргон, медь, цинк, плазма.

A.K. Shuaibov, A.I. Minya, R.V. Hrytsak, A.A. Malinina, Z.T. Gomoki,
A.N. Malinin, I.V. Shevera, V.V. Danylo, M.I. Vatralla

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voshyna Str., 54, Ukraine,
e-mail: alexsander.shuaibov@uzhnu.edu.ua

CHARACTERISTICS OF AN OVERSTRESSED NANOSECOND DISCHARGE BETWEEN COPPER ELECTRODES AND ZINC ELECTRODES IN ARGON

Purpose. Study of the characteristics of an overstressed nanosecond discharge between a copper electrode and a zinc electrode in high-pressure argon ($p = 50$ kPa). The spatial, electrical, and optical characteristics of the discharge were investigated for the distance between the electrodes $d = 2$ and 7 mm.

Methods. The study of the characteristics of an overstressed bipolar nanosecond discharge was carried out on an experimental stand. An intense nanosecond discharge between a copper electrode and a zinc electrode was ignited in a sealed Plexiglas chamber. The distance between the electrodes was $d = 2$ or 7 mm. To ignite the discharge, bipolar high-voltage pulses with a duration of 50 - 100 ns and an amplitude of $\pm (20$ - $40)$ kV were applied to the electrodes of the discharge cell. Plasma radiation was recorded in the spectral range $\lambda = 196$ - 663 nm.

Results. The study of the spectral characteristics of plasma based on vapor-gas mixtures "copper-zinc-argon" showed that the most intense were the resonance spectral lines of the copper atom ($\lambda = 324.75$ and 327.39 nm CuI) of the lines of a singly charged copper ion in the range 200 - 330 nm, the most intense was the line $\lambda = 227.62$ nm CuII. A line with $\lambda = 618.86$ nm CuI was distinguished from ionic spectral lines in the visible region of the spectrum. The introduction of zinc vapor into the discharge made it possible to shift the short-wavelength edge of the emission spectrum to 202 - 207 nm due to the intense ionic lines of zinc and to enrich the spectrum of UV radiation of the plasma with intense spectral lines 258.24 ; 268.41 ; 271.24 and 275.64 nm ZnI.

Conclusions. The study of the emission spectra of the discharge plasma made it possible to establish the main excited products that were formed in the plasma. The presence in the plasma radiation spectra of intense spectral lines of atoms and singly charged ions, both copper and zinc, creates the prerequisites for the synthesis of thin bimetallic films based on the copper-zinc composition from the products of sputtering of the electrode material in argon.

Keywords: overstressed nanosecond discharge, argon, copper, zinc, plasma.

REFERENCES

- [1] Afonin M.P. (2006) "Classification of materials for electrical contacts of low-voltage switching equipment and their applications in electrical engineering" ["Klasifikacija materialov dlja jelektricheskikh kontaktov nizkovol'noy kommutacionnoj aparatury i oblasti ih primenenija v jelektrotehnike"], Electrical contacts and electrodes, K.:Trudy Instituta materialovedenija im. I. N. Francevicha NAN Ukrainy, pp.153–159.
- [2] Babich I.L., Boretskij V.F., Veklich A.N., Semenyshyn R.V. (2014) "Spectroscopic Data and Stark Broadening of CuI and AgI Spectral Lines: Selection and Analysis" [Advances in Space Research.](#), V. 54, №7, pp. 1–31.
- [3] Romanov D.A., Olesjuk O.V., Budovskih E.A., Gromov V.E. (2014), "Formation of electroexplosion wear- and electroerosion-resistant coatings using electron beam treatment" ["Formirovanie jelektrovzryvnyh iznoso- i jelektrojerozionno stojkikh pokrytij s is-

pol'zovaniem jelektronno-puchkovej obrabotki”], Electrical contacts and electrodes [Jelektricheskie kontakty i jelektrody], № 12, pp. 154–161.

- [4] Shuaibov O.K., Malinina A.O., Malinin O.M. (2019) ”New gas-discharge methods for obtaining selective ultraviolet and visible radiation and synthesis of nanostructures of oxides of transition metals” [”Novi gazorozrjadni metodi oderzhannja selektivnogo ul'trafioletovogo i vidimogo viprominjuvannja ta sintezu nanostruktur oksidiv perehidnih metaliv”], Uzhhorod National University Publishing House ”Hoverla”, Uzhhorod, 188 p.
- [5] Mesyats G.A. (1995) Ecton – Electron Avalanche from metal, [Advances in Physical Sciences, V.165, №6, pp.601 – 626.](#)
- [6] Ivanov V.V., Efimov A.A., Myl'nikov D.A., Lizunova A.A., Bogazeev A.V., Beke-tov I.V., Shherbinin S.V. (2016) ”High-performance production of nanosized particles in a pulse-periodic multi-gap gas-discharge generator” [”Vysokoproizvoditel'noe poluchenie nanorazmernih chastic v impul'sno-periodicheskom mnogozazornom gazorozrjadnom generatore”], JETP Letters [Pis'ma v ZhTF], Vol.42, № 16, pp. 95–101.
- [7] Abduev A.H., Asvarov A.Sh., Ahmetov A.K., Jemirov R.M., Beljaev V.V. (2017) ”UV As-sisted Growth of Transparent Conductive Zinc Oxide Layers” [”UF-assistirovanie processa rosta prozrachnyh provodjashhjih sloev na osnove oksida cink”], [JETP Letters \[Pis'ma v ZhTF\], Vol.43, № 22, pp. 40 – 47.](#)
- [8] Tarasenko V.F. (2014) ”Runaway electrons preionized diffuse discharge” New York: Nova Science Publishers Inc., 578 p.
- [9] Danilo V.V., Minja O.J., Shuaibov O.K., Shevera I.V., Gomoki Z.T., Dudich M.V. (2017) ”Characteristics of high-current nanosecond discharge on mixtures of helium and argon with small impurities of water” [”Kharakterystyky sylnostrumovoho nanosekundnoho rozriadu na sumishakh heliiu ta Arhonu z malymy domishkamy vody”], Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics [Nauk. Visn. Uzhhorod. Univ. Ser. Fiz.], №42, pp.128–136.
- [10] Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Ragimhanov G.B. (2014) ”Radiative and spectral char-acteristics of a spark channel in argon” [”Izluchatel'nye i spektral'nye harakteristiki iskrovogo kanala v argone”], Applied Physics [Prikladnaja fizika], Vol.2, №3, pp. 35–38
- [11] Gomonai A.N. (2015) ”Radiative Decay np^2 autoionization states under dielectronic recombi-nation of the Zn^+ and Cd^+ ions”, [Journal of Applied Spectroscopy, Vol.82, № 1, pp. 17 – 22.](#)
- [12] Levko D., Laxminarayan L. Raja (2016) ”Early stage time evolution of a dense nanosecond microdischarge use in fast switching applications”, [Physics of Plasmas, Vol.22, p.123518.](#)