

Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO

І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич, А. І. Іванісік,
Р. В. Семенишин, Л. О. Крячко*, М. Є. Головка*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ

Методами оптичної емісійної спектроскопії отримано просторові профілі температури та електронної концентрації в плазмі електричної дуги між електродами з композиційного матеріалу Ag—CuO. Для цього попередньо виконано селекцію спектральних ліній CuI та AgI та значень їх спектроскопічних констант. В припущенні наявності в плазмі локальної термодинамічної рівноваги на основі експериментально отриманих результатів розраховано концентрації парів металів в плазмі. Для перевірки одержаних результатів методом лінійної лазерної абсорбційної спектроскопії отримано просторові профілі заселеності рівня $^2D_{5/2}$ та концентрації атома міді в розрядному проміжку. Металографічні дослідження робочого шару на поверхні електродів показали зміну механізмів електричної ерозії електродного матеріалу при збільшенні струму до 30 А.

Ключові слова: спектроскопічні константи, плазма дугового розряду, композиційні електроди Ag—CuO.

Вступ

Широкого застосування в якості матеріалів для електродів та контактів комутуючих приладів електротехнічного призначення (реле, комутатори, розмикачі тощо) набули композиційні матеріали на основі міді та срібла [1, 2]. На сьогодні основні контактні матеріали на основі срібла класифіковані та описані [3]. До однієї з таких класифікованих груп належать системи срібло—оксид металу, де в якості оксидів використовуються оксиди кадмію, олова, міді та цинку при концентраціях 8—20% (мас.). Такі матеріали одержують або методами порошкової металургії, або внутрішнім окисненням сплавів срібла з кадмієм, оловом або міддю. Електро- та теплопровідність таких матеріалів знижуються з підвищенням вмісту оксиду. Матеріали системи срібло—оксид кадмію характеризуються надзвичайно високою ерозійною стійкістю, достатньо високою стійкістю проти зварювання і найнижчим серед матеріалів системи срібло—оксид металу контактним опором. Проте в роботі [3] констатується: “Коли б в середині 70-х років минулого століття не було порушене питання про те, що застосування кадмію призводить до забруднення довкілля, композиційні матеріали срібло—оксид металу інших систем до теперішнього часу не знайшли б помітно широкого застосування”. Саме тому на сьогодні велика увага приділяється розробці матеріалів, які містять замітник кадмію, зокрема срібло—оксид міді чи срібло—оксид олова.

© І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич, А. І. Іванісік, Р. В. Семенишин,
Л. О. Крячко, М. Є. Головка, 2010

Оскільки ефективність роботи комутуючих пристроїв визначається інтенсивністю процесів переносу маси в розрядному проміжку, які, в свою чергу, залежать як від структури поверхні електродів (контактів), так і від параметрів плазми дугового розряду, то оптимізація складу відповідного композиційного матеріалу потребує детальних металографічних досліджень поверхні таких електродів та спектроскопічних досліджень параметрів плазми розрядного проміжку. В композиційних системах срібло—оксид металу основним компонентом є, звичайно, срібло. Найбільш ймовірно саме цей елемент визначає як процеси на поверхні електродів, так і параметри дугової плазми.

У сучасній літературі є незначна кількість експериментальних та теоретичних робіт, присвячених дослідженням стану поверхні, параметрів плазми і дугового розряду між однокомпонентними срібними електродами. У роботі [4] досліджували просторові розподіли температури та вмісту парів срібла в аргоновій плазмі стабілізованого стінкою дугового розряду з срібним анодом. Показано домінуючий вплив домішки срібла на параметри плазми. У роботі [5] вивчали вплив введеної в електричну дугу потужності на температуру катоду, зокрема, зі срібла. Встановлено, що температура поверхні електроду (в даному випадку катоду) залежить від сорту матеріалу і для срібла є найнижчою порівняно з міддю та вольфрамом. Це, у свою чергу, зумовлює електроерозійну стійкість срібла. У роботі [6] запропоновано метод визначення анодного та катодного падіння напруги дугового розряду між срібними електродами при силі струму у діапазоні 350—1200 А. На думку авторів, визначення цих параметрів розряду дозволить коректно їх враховувати при розробці моделі дугової плазми та вивченні явищ на поверхні електродів. У роботах [7, 8] на основі гідродинамічної моделі досліджували вплив металевих домішок у повітряній плазмі на її параметри. Показано, що незначний вміст металу (1%), зокрема срібла, призводить до помітного охолодження осьової області розряду та зменшення швидкості переміщення у просторі каналу електричної дуги.

При дослідженні контактів на основі срібла у роботі [9] показано, що стан поверхні електродів визначає характер та швидкість переміщення опорних плям на самій поверхні. А це, в свою чергу, позначається на електроерозійних властивостях електродного матеріалу.

В оглядовій роботі [10] викладено результати досліджень композитів, які були виготовлені на основі срібла та працюють в режимі дугової ерозії. Відзначається, що під впливом високої температури вкраплення оксиду кадмію розкладаються, а на їх місці на контактній поверхні утворюються мікроратери; повторна дія дуги призводить до великих температурних градієнтів по всій товщині контакту. Наслідком цього є великі термомеханічні напруження, що провокують виникнення мікротріщин. А при наявності мікровиступів на поверхні електродів складаються умови для автоелектронної емісії.

Як відомо, під впливом електродугового розряду на поверхні електродів відбуваються незворотні структурні зміни робочого шару [11]. Такі модифіковані шари у різних авторів називаються або “вторинною структурою” [11], або “шарами напрацювання” [12]. Необхідно зазначити, що на поверхні електродів, виготовлених з композиційних матеріалів

різного складу, під дією дугового розряду утворюється своя унікальна вторинна структура [13—15].

На жаль, робіт, присвячених комплексному дослідженню як поверхні, так і параметрів плазми дугового розряду між композиційними електродами на основі срібла, окрім [13—15], в літературі немає. Ймовірно, причиною цього може бути “незручність” атома срібла для використання його у спектроскопічних дослідженнях (зокрема, в оптичній емісійній спектроскопії). Це пояснюється тим, що спектральні лінії атома срібла, які лежать у зручному для діагностики видимому діапазоні довжин хвиль, відповідають переходам з верхніх рівнів, енергії збудження яких мало відрізняються між собою. Це призводить до значної похибки у визначенні, зокрема, температури плазми. Додатковою проблемою є надто широке розмаїття спектроскопічних констант для цих ліній (ймовірність переходу, сила осцилятора тощо), наведених у літературі.

Очевидно, що відсутність надійно визначених параметрів плазми, у свою чергу, унеможливує встановлення однозначного взаємозв'язку цих параметрів із станом поверхні електродів. Складність дослідження поверхні композиційних електродів на основі срібла, яка зазнала впливу дугового розряду, полягає ще й у необхідності врахування технології виготовлення композиційного матеріалу [16].

Метою даної роботи є комплексне дослідження як поверхні, так і параметрів плазми дугового розряду між композиційними електродами (% (мас.)) 90Ag—10CuO, виготовленими методом порошкової металургії. Параметри плазми встановлювали із залученням методів оптичної емісійної та абсорбційної спектроскопії. Для визначення температури та електронної концентрації плазми необхідно попередньо виконати селекцію спектральних ліній атомів срібла і міді та їх спектроскопічних констант.

Вивчення взаємозв'язку параметрів плазми із станом поверхні електродів в роботі виконано із залученням оригінальних результатів металографічних досліджень.

1. Експеримент

Дугу ініціювали у повітрі між торцевими поверхнями неохолоджуваних мідних електродів. Діаметр стержневих електродів складав 6 мм. Для запобігання каплеутворення електродного матеріалу використовували імпульсний режим: імпульс струму 30 А накладався на “черговий” розряд слабого струму (3,5 А). Тривалість імпульсу складала приблизно 30 мс. Досліджувався квазістаціонарний режим.

Залучені у даній роботі методи оптичної спектроскопії базуються на вимірюваннях інтенсивності та контурів випромінюваних спектральних ліній з просторовою та часовою роздільними здатностями.

1.1. Вимірювання радіальних розподілів випромінювання спектральних ліній

Через просторову та часову нестабільність використовували метод однократної томографічної реєстрації випромінювання спектральних ліній. Швидкісне сканування просторових розподілів інтенсивності випромінювання у діапазоні 400—900 нм забезпечувала ПЗЗ-лінійка (B/W) SONY ILX526A з 3000 пікселів. У комбінації зі спектральним приладом вона дозволяла виконувати записи радіального розподілу випромінювання у

середньому перерізі розряду нестационарної дуги. Для керування процесом збору та обробки експериментальних даних використовували спеціально розроблений програмний інтерфейс [17].

Визначення просторового (радіального) розподілу випромінювання базується на припущенні існування осової симетрії плазмового джерела. У цьому випадку є можливість застосування традиційних методів перерахунку спостережуваних інтенсивностей випромінювання у локальній [18]. Крім того, оскільки досліджувана електрична дуга не стабілізована як у просторі, так і у часі, доцільно використати статистичні методи вимірювання та обробки експериментальних результатів.

Для отримання коректних результатів статистичними методами необхідно у кожному режимі дугового розряду зареєструвати достатню кількість просторових розподілів (до 100). Це вимагає значного обсягу пам'яті, що не завжди є виправданим. Тому оптимальним є апроксимація експериментальних розподілів аналітично заданими функціями (наприклад, функцією Гаусса). Як показав досвід, для виконання статистичної обробки зручніше використовувати лише певні параметри цих функцій.

Коли неможливо коректно апроксимувати експериментальні розподіли аналітично заданими функціями, необхідно залучити методи інтерполяції. В результаті застосування таких методів для статистичної обробки будемо мати згладжені спостережувані осесиметричні розподіли.

Для розширення динамічного діапазону вимірювання інтенсивності випромінювання спектральних ліній, яка реєструється приладом із зарядовим зв'язком, може бути використано незалежно два способи: залучення функції електронного затвору (якщо виробник ПЗЗ її передбачив) та додавання до оптичної схеми світлофільтрів з каліброваним пропусканням.

1.2. Вимірювання радіальних розподілів контурів випромінювання спектральних ліній

Для ресстрації радіальних розподілів контурів спектральних ліній використовували установку, оптична схема якої детально описана в роботі [19]. В цій установці селекцію випромінювання плазми за певними кутами забезпечує інтерферометр Фабрі—Перо у режимі еталона, схрещеного з приладом попередньої монохроматизації. Таким чином, вимірюючи ширину певного інтерференційного максимуму, можна визначити ширину спектральної лінії у відповідній просторовій точці плазмового об'єкту.

Розроблений програмний інтерфейс дозволяє фактично встановити радіальний розподіл електронної концентрації у розрядному каналі при умові, що ефект Доплера незначно впливає на розширення досліджуваної спектральної лінії у порівнянні з квадратичним ефектом Штарка. Діапазон виміряних ширин спектральної лінії (i , відповідно, електронних концентрацій) визначається вільним спектральним інтервалом еталона Фабрі—Перо.

1.3. Вимірювання просторових розподілів концентрації атомів міді у міжелектродному проміжку дугового розряду

Окремі параметри плазми (наприклад, концентрація атомів міді) можна встановити з інтенсивності поглинання стороннього зондуючого випромінювання — як це реалізується, зокрема, в лазерній абсорбційній

спектроскопії (ЛАС). Вимірювання просторового розподілу домішок міді у цьому методі базується на визначенні оптичної товщини плазми з використанням лазера на парах міді “Криостат 1” [20]. Реєстрацію лазерного випромінювання здійснювали за допомогою ПЗЗ матриці.

1.4. Металографія

Структурні зміни в робочому шарі вивчали металографічними методами за допомогою рентгеноструктурного аналізу, растрової мікроскопії мікрооб’ємів поверхні робочого шару та його перпендикулярного перерізу [13—15].

2. Результати та їх обговорення

2.1. Визначення температури

Серед методів оптичної емісійної спектроскопії для визначення температури плазми найпоширенішими є методи відносних інтенсивностей спектральних ліній та діаграм Больцмана.

Для застосування цих методів спочатку необхідно вибрати “зручні” для діагностики спектральні лінії, які мають відповідати певним вимогам. Тобто ці лінії повинні бути ізольовані в спектрі випромінювання і мати достатню інтенсивність для їх надійної реєстрації. Крім того, максимальна різниця між енергіями збудження їх верхніх рівнів повинна бути якомога більшою, що дає змогу визначати температуру з мінімально можливою похибкою.

Спектральні лінії AgI та CuI, які вибрані для дослідження параметрів плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами на основі попереднього аналізу даних робіт [21, 22], наведено у табл. 1.

Крім того, необхідно мати впевненість в надійності значень спектроскопічних констант — ймовірностей переходів A_{ij} або відповідних сил осциляторів f_{ji} . У дослідженнях найчастіше використовуються таблиці спектроскопічних констант із баз даних Національного бюро стандартів (США) [22] або тотожні їм зі збірника Національної системи стандартних довідкових даних [23]. Слід зазначити, що для ліній CuI, наведених у табл. 1, в роботі [23] надані результати більш ранніх досліджень [24] і оцінена похибка ймовірностей переходів в межах 25%, а для ліній AgI — в межах 50%. Тому доцільним є виконання критичного аналізу результатів оригінальної літератури з залученням даних більш сучасних робіт.

У табл. 2 та 4 наведено ймовірності переходів, сили осциляторів та часи життя радіаційних переходів в тій формі, в якій вони наведені в літературі протягом останніх 50-ти років. Ці результати отримані різними експериментальними та теоретичними методами. Серед експериментальних використовувалися методи кривих затухання [25, 26], кривих Різдженського [29, 33], перетинання рівнів [30, 47] “пучок—фольга” [31], випромінювання електричної дуги [24, 35, 47, 49—51, 54], затриманих співпадінь [37, 44] та зсуву фази [47]. А серед теоретичних — розрахунки на основі кулонівської апроксимації [27], методу Хартрі—Фока [28, 34, 36, 45—47], модельного потенціалу [39, 42], квазіемпіричного методу [41, 48], потенціалу Хартрі—Слатера [43], релятивістських багаточастинкових розрахунків [38] та квазірелятивістського квантового

Таблиця 1. Вибрані спектральні лінії міді та срібла (довжина хвилі λ , яка відповідає переходу з верхнього рівня i на нижній j , статистичні ваги g та енергії рівнів E)

Елемент	λ , нм	Перехід $i \rightarrow j$	g_j	g_i	E_j , eВ	E_i , eВ
CuI	424,9	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4P$	2	2	5,08	7,99
	427,5	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4P$	6	8	4,84	7,74
	448,0	$6s^2S \rightarrow 4p^2P$	2	2	3,79	6,55
	453,1	$6s^2S \rightarrow 4p^2P$	4	2	3,82	6,55
	458,7	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4F$	8	6	5,10	7,80
	465,1	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4F$	10	8	5,07	7,74
	470,5	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4F$	8	8	5,10	7,74
	510,6	$4p^2P \rightarrow 4s^2D$	6	4	1,39	3,82
	515,3	$4d^2D \rightarrow 4p^2P$	2	4	3,79	6,19
	521,8	$4d^2D \rightarrow 4p^2P$	4	6	3,82	6,19
	529,3	$4s5s^4D \rightarrow 4s4p^4D$	8	8	5,39	7,74
	570,0	$4p^2P \rightarrow 4s^2D$	4	4	1,64	3,82
	578,2	$4p^2P \rightarrow 4s^2D$	4	2	1,64	3,79
	793,3	$5s^2S \rightarrow 4p^2P$	2	2	3,79	5,35
	809,3	$5s^2S \rightarrow 4p^2P$	4	2	3,82	5,35
	AgI	405,5	$6d^2D \rightarrow 5p^2P$	2	4	3,66
447,6		$7s^2S \rightarrow 5p^2P$	2	2	3,66	6,43
466,8		$7s^2S \rightarrow 5p^2P$	4	2	3,78	6,43
520,9		$5d^2D \rightarrow 5p^2P$	2	4	3,66	6,04
546,5		$5d^2D \rightarrow 5p^2P$	4	6	3,78	6,05
547,2		$5d^2D \rightarrow 5p^2P$	4	4	3,78	6,04
768,8		$6s^2S \rightarrow 5p^2P$	2	2	3,66	5,28
827,4		$6s^2S \rightarrow 5p^2P$	4	2	3,78	5,28

дефекту орбіталі [40]. В літературі також існує, окрім роботи [23], низка інших таблиць спектроскопічних констант [32, 47, 52, 55, 56]. Але, на жаль, найсучасніша з них робота [47] наводить результати оригінальних робіт без критичного огляду. Спектроскопічні константи з довідників [52, 55, 56] дублюють значення з оригінальних робіт (табл. 2, 4), тому вони не наведені в табл. 2, 4, 6, 7. У табл. 6 та 7 спектроскопічні константи всіх робіт перераховано в добуток сили осцилятора на статистичну вагу нижнього рівня gf_{ji} . Відносні значення спектроскопічних констант з робіт [29, 54] у табл. 6 пронормовані відносно даних для лінії CuI 510,5 нм з роботи [28]. Аналогічно відносні значення з роботи [35] пронормовані відносно даних для лінії AgI 405,5 нм з роботи [40]. Значення сили осцилятора отримане в роботі [33] і скоректоване в огляді [32]. В табл. 3 та 5 наведено пояснення щодо позначень в табл. 2, 4, 6, 7 та на рис. 1—10.

Таблиця 2. Часи життя оптичних переходів τ , ймовірності переходів A_{ij} , сили осциляторів f_{ji} спектральних ліній міді

Позначення	Параметри	λ , нм															
		424,9	427,5	448,0	453,1	458,7	465,1	470,5	510,5	515,3	521,8	529,3	570,0	578,2	793,3	809,3	
●	$A_{ij} \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$	1,95	3,45	0,3	0,84	3,2	3,8	0,55	0,2	6,04	7,5	1,09	0,024	0,165			
■	τ , нс			84,0	86,0				7,0	66,2	45,0		7,3	7,1	22,4	21,0	
●	τ , нс			48,2	49,3					14,5	14,2						
▲	$g_2 A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$			0,07	0,14					2,69	4,83				0,27	0,51	
▼	$g f_{ji}$								0,0197	1,871	2,3417	1,3955	0,0089	0,0256			
◆	$g f_{ji} \text{ relative}$								1				0,089	0,36			
◀	f_{ji}								0,0079				0,0012				
▶	τ , нс						7,9			11,4	11,6						
●	$A_{ij} \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$	1,98	3,18	0,3	0,913	2,57	4,2	0,623	0,195	10,34	12,22	1,09	0,025	0,19	2,25	4,59	
★	f_{ji}								0,011								
□	f_{ji}									0,856							
○	f_{ji}									0,551	0,503						
△	$A_{ij} \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$										3,48						
▽	f_{ji}			0,0124													
				1	0,0122						0,5472	0,4983			0,1367	0,1381	
◇	f_{ji}									0,561	0,51						
△	f_{ji}									0,549	0,501						
▽	f_{ji}									0,546	0,498						
○	f_{ji}									0,5110	0,4672						
										6	7						

Продовження табл. 2

Позна-чення	Параметри	λ , нм														
		424,9	427,5	448,0	453,1	458,7	465,1	470,5	510,5	515,3	521,8	529,3	570,0	578,2	793,3	809,3
☆	$A_{ij} \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$	2,98	4,15				5,48	0,81				1,42				
◇	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$	0,142	0,291			0,194	0,352									
■	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$			0,0468	0,087										0,202	0,389
●	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$				0,052											
▲	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$								0,019				0,0028			
▼	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$								0,019				0,0028			
◆	$A_{ij} \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$								0,02				0,0029			
◀	f_{ji}	0,0512	0,1264	0,00909	0,0131	0,075	0,0976	0,0185	0,00515	0,488	0,465	0,0454	0,00114	0,00415	0,169	0,173
▶	f_{ji}	0,0601	0,0711	0,0148		0,081	0,1096	0,0314				0,0865				
⦿	f_{ji}	0,05		0,00774				0,0194								
★	f_{ji}		0,1293		0,0157		0,1992		0,00311	0,256	0,6285	0,181	0,00165	0,00645	0,229	0,2385
⦿	f_{ji}			0,0128	0,0127					0,57	0,521				0,141	0,143
■	f_{ji}			0,0136	0,0136					0,546	0,499				0,151	0,153
●	f_{ji}	0,082		0,057		0,14		0,18								
▲	gf_{ji}								0,0202	1,23	2,3		0,0018	0,013		
▼	gf_{ji}		0,72		0,20		1,8		0,020	1,9	2,4	1,4	0,0069	0,027	1,2	2,6
◆	$A_{ij} \text{ c}^{-1}$									$6,9 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^7$				$1,6 \cdot 10^7$	$3,1 \cdot 10^7$
◀	$g_i A_{ij} \text{ relative}$	6,54			3,53		54	7,15	1	57						

Таблиця 3. Пояснення до табл. 2, 6 та рис. 1—7

Позначення	Посилання	Метод визначення і посилання
◆	[24]	Випромінювання електричної дуги
■	[25]	Метод кривих затухання
●	[26]	Метод кривих затухання
▲	[27]	Розрахунки з використанням кулонівської апроксимації LS-зв'язків
▼	[28]	Метод Хартрі—Фока
◆	[29]	Метод крюків Рождественського
◀	[30]	рівнів
▶	[31]	“Пучок—фольга”
●	[32]	Критичний огляд
★	[33]	Метод крюків Рождественського
□	[34]	Релятивістський метод Хартрі—Фока
○	[34]	Релятивістський метод Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра
△	[39]	Метод модельного потенціалу слабкоз'язаного електрона
▽	[41]	Квазіемпіричний метод
◇	[42]	Метод з використанням релятивістського модельного потенціалу
◁	[42]	Метод з використанням релятивістського модельного потенціалу з поправкою на поляризацію ядра
▷	[42]	Метод з використанням релятивістського модельного потенціалу з поправкою на поляризацію ядра (використовувалися параметри, розраховані на основі релятивістського методу Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра)
○	[43]	Метод на основі потенціалу Хартрі—Слатера
☆	[44]	Метод затриманих співпадінь
○	[47]	Метод не наведений <i>Sukhanova G. B., Semenova D. P. // Isv. VUZ. Fizika. — 1970. — 11. — P. 147</i>
■	[47]	Розрахунок багато конфігураційним методом Хартрі—Фока <i>Carlsson J. // Phys. Rev. A. — 1988. — 38. — P. 1702</i>
●	[47]	Огляд <i>Gabla K., and Kunsiz M. // Acta Phys. Pol. A. — 1970. — 37. — P. 391</i>
▲	[47]	Зсув фази <i>Cunningham P. T., Link J. K. // J. Opt. Soc. Am. — 1967. — 57. — P. 1000</i>
▼	[47]	Перетин рівнів <i>Levin L.A., Budick B. // Bull. Amer. Phys. Soc. — 1966. — 11. — P. 455</i>
◆	[47]	Перетин рівнів <i>Bucka H., Ney J., and Heppke G. // Z. Angew. Phys. — 1966. — 20. — P. 354</i>
◀	[47]	Критичний огляд <i>Corliss C. H. // J. Res. Nat. Bur. Stand. — 1970. — 74 A. — P. 781</i>
▶	[47]	Випромінювання електричної дуги <i>Allen C. W., and Asaad A. S. // Mont. Not. Roy. Astron. Soc. — 1957. — 117. — P. 36</i>
●	[47]	Випромінювання електричної дуги <i>Corliss C. H. J. // Res. Nat. Bur. Stand. — 1962. — 66 A. — P. 497</i>
★	[47]	Випромінювання електричної дуги <i>Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F. Tables of Spectral-Line Intensities, Nat. Bur. Stand. (U.S.). — 1961. Monograph 32 U.S. Government Printing Office; Washington D. C.</i>
♠	[48]	Квазіемпіричний релятивістський метод
■	[48]	Квазіемпіричний релятивістський метод з поправкою на поляризацію ядра
●	[49]	Випромінювання електричної дуги
▲	[50]	Випромінювання електричної дуги
▼	[51]	Випромінювання електричної дуги
◆	[53]	Метод не наведений
◀	[54]	Випромінювання електричної дуги

Т а б л и ц я 4. Часи життя оптичних переходів τ , ймовірності переходів A_{ij} , сили осциляторів f_{ji} спектральних ліній срібла

Позначення	λ , нм	405,5	447,6	466,8	520,9	546,5	547,2	768,8	827,4
●	A_{ij} с ⁻¹				$6,94 \cdot 10^7$	$7,98 \cdot 10^7$	$1,34 \cdot 10^7$	$1,77 \cdot 10^7$	$3,23 \cdot 10^7$
■	$g_2 A_{ij} \cdot 10^8$ с ⁻¹	0,97	0,07	0,14	2,68	4,66	0,52	0,27	0,5
●	f_{ii}				0,882	0,82	0,091		
▲	f_{ii}				0,562	0,532	0,06		
▼	f_{ii}				0,623	0,588	0,0659		
◆	A_{ij} relative	9,7	1,82	3,5	40	66	7,4	2,8	4,3
◀	f_{ii}				0,583	0,555	0,056	0,161	0,17
▶	τ , нс	30,2		41,5	12,9	13,4			
●	f_{ii}				0,5773	0,5491	0,0613		
★	A_{ij} с ⁻¹					$7,57 \cdot 10^7$			
●	f_{ii}	0,1313	0,0142	0,0142	0,6119	0,5508	0,0612	0,1691	0,1691
□	f_{ii}	0,1318	0,0149	0,0139	0,5969	0,5575	0,062	0,1657	0,1707
○	f_{ii}	0,1147	0,015	0,0139	0,546	0,5116	0,0569	0,1659	0,1701
△	f_{ii}				0,73591	0,61787	0,06682		
▽	f_{ii}				0,618	0,585	0,0653		
◇	f_{ii}				0,565	0,536	0,0599		
◁	f_{ii}				0,711	0,669			
▷	f_{ii}	0,133	0,015	0,0146	0,602	0,569	0,0635	0,145	0,154
○	f_{ii}	0,114	0,0158	0,0153	0,558	0,53	0,592	0,157	0,166
☆	g/f_{ii}		0,34	0,46	6,1	7,1	0,71	1,2	2,3
■	A_{ij} с ⁻¹				$7,5 \cdot 10^7$	$8,6 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$		

2.1.1. Селекція спектроскопічних констант спектральних ліній атома міді

На рис. 1 зображено діаграму Больцмана для осової точки середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO при струмі 3,5 А з залученням всіх спектроскопічних констант для ліній міді (табл. 6). На рисунку також проведено лінійну апроксимацію з врахуванням всіх точок. Можна зробити висновок, що не всі спектроскопічні константи різних авторів мають бути використані для побудови діаграм. Отже, необхідно провести обґрунтовану селекцію таких констант на підставі критичного аналізу як джерел, так і поведінки експериментальних точок на діаграмі. По-перше, залучення констант з роботи [25] (■) викликає сумнів у доцільності їх подальшого використання. Обчислені з залученням цих констант заселеності значно відрізняються від лінійної апроксимації. Ці висновки можна було б зробити ще на етапі аналізу табл. 6. Додатковим аргументом на цю користь можна вважати зауваження авторів роботи [26] щодо неврахованого в роботі [25] джерела похибки.

Зважаючи на особливості досліджуваного джерела, а саме його нестабільність як у часі, так і в просторі, для подальшої селекції спектро-

Таблиця 5. Пояснення до табл. 4, 7 та рис. 8—10

Позначення	Посилання	Метод визначення
○	[23]	Критичний огляд
■	[27]	Розрахунки з використанням кулонівської апроксимації LS-зв'язків
●	[34]	Релятивістський метод Хартрі—Фока
▲	[34]	Релятивістський метод Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра
▼	[34]	Релятивістський метод Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра, але без поправки в операторі дипольного моменту
◆	[35]	Випромінювання електричної дуги
◀	[36]	Одноконфігураційний метод Хартрі—Фока з використанням модельних потенціалів
▶	[37]	Метод затриманих співпадінь
●	[38]	Релятивістські багаточастинкові розрахунки
★	[39]	Метод модельного потенціалу слабо зв'язаного електрона
●	[40]	Розрахунок на основі підходу квантового дефекту орбіталі
□	[40]	Розрахунок на основі квазірелятивістського формулювання підходу квантового дефекту орбіталі
○	[40]	Розрахунок на основі квазірелятивістського формулювання підходу квантового дефекту орбіталі з поправкою на поляризацію ядра
△	[43]	Метод на основі потенціалу Хартрі—Слатера
▽	[45]	Релятивістський метод Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра в потенціалі взаємодії
◇	[45]	Релятивістський метод Хартрі—Фока з поправкою на поляризацію ядра в потенціалі взаємодії та матриці переходу
◁	[46]	Релятивістський метод Хартрі—Фока
▷	[48]	Квазіемпіричний релятивістський метод
○	[48]	Квазіемпіричний релятивістський метод з поправкою на поляризацію ядра
★	[51]	Випромінювання електричної дуги
■	[53]	Метод не наведений

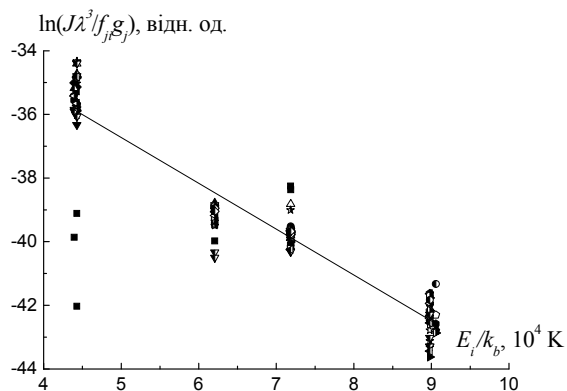


Рис. 1. Діаграма Больцмана для осьової точки середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмі 3,5 А із залученням всіх спектроскопічних констант для ліній міді.

Таблиця 6. Добутки сили осциляторів f_j на статистичні ваги нижнього рівня g_j спектральних ліній міді

Позначення	λ , нм															
	424,9	427,5	448,0	453,1	458,7	465,1	470,5	510,5	515,3	521,8	529,3	570,0	578,2	793,3	809,3	
◆	0,1056	0,7562	0,0181	0,0517	0,6056	0,9859	0,1460	0,0313	0,9618	1,8370	0,3662	0,0047	0,0165			
■			0,0717	0,0716				2,2330	0,2406	0,5443		2,6691	1,4119	0,8424	0,9351	
●			0,1249	0,1248					1,0982	1,7248						
▲			0,0211	0,0431					1,0709	1,9717				0,2547	0,5007	
▼								0,0197	1,8710	2,3417	1,3955	0,0089	0,0256			
◆								0,0197				0,0018	0,0071			
◀								0,0474				0,0048				
▶						3,2842			1,3969	2,1114						
●	0,1072	0,6970	0,0181	0,0562	0,4864	1,0897	0,1654	0,0305	1,6466	2,9930	0,3662	0,0049	0,0190	0,4246	0,9013	
★								0,03783								
□									1,7120							
○									1,1020	2,0120						
△										0,8523						
▽			0,0248	0,0488					1,0944	1,9932				0,2734	0,5524	
◇									1,1220	2,0400						
◁									1,0980	2,0040						
▷									1,0920	1,9920						
○									1,0221	1,8691						

Позна- чення	λ, нм														
	424,9	427,5	448,0	453,1	458,7	465,1	470,5	510,5	515,3	521,8	529,3	570,0	578,2	793,3	809,3
	0,1613	0,9097				1,4218	0,2150				0,4770				
	0,0769	0,6379			0,3672	0,9133									
			0,0282	0,0535										0,3812	0,7638
				0,0320											
							0,0297					0,0055			
							0,0297					0,0055			
							0,0313					0,0057			
	0,1024	0,7584	0,0182	0,0524	0,6000	0,9760	0,1480	0,0309	0,9760	1,8600	0,3632	0,0046	0,0166	0,3380	0,6920
	0,1202	0,4266	0,0296		0,6480	1,0960	0,2512				0,6920				
	0,1000		0,0155				0,1552								
		0,7758		0,0628		1,9920		0,0187	0,5120	2,5140	1,4480	0,0066	0,0258	0,4580	0,9540
			0,0256	0,0508					1,1400	2,0840				0,2820	0,5720
			0,0272	0,0544					1,0920	1,9960				0,3020	0,6120
	0,0820		0,0570		0,1400		0,1800								
								0,0202	1,2300	2,3000		0,0018	0,0130		
		0,7200		0,20		1,8000		0,020	1,9000	2,4000	1,4000	0,0069	0,0270	1,2000	2,6000
									1,0988	2,0084				0,3019	0,6087
	0,0446			0,0274		1,7657	0,2392	0,0197	1,1440						

**Продовження
табл. 6**

Таблиця 7. Добутки сили осциляторів f_{ji} на статистичні ваги нижнього рівня g_j спектральних ліній срібла

Позначення	λ , нм							
	405,5	447,6	466,8	520,9	546,5	547,2	768,8	827,4
○				1,2204	2,3108	0,2513		
■	0,2392	0,0210	0,0457	1,0902	2,0869	0,2334	0,2392	0,5131
●				1,7640	3,2800	0,3640		
▲				1,1240	2,1280	0,2400		
▼				1,2460	2,3520	0,2636		
◆	0,2636	0,0301	0,0630	1,7934	4,8864	0,3661	0,1367	0,2432
◀				1,1660	2,2200	0,2240	0,3220	0,6800
▶	0,0816		0,0787	0,3153	0,3342			
●				1,1546	2,1964	0,2452		
★					2,0335			
●	0,2626	0,0284	0,0568	1,2238	2,2032	0,2448	0,3382	0,6764
□	0,2636	0,0298	0,0556	1,1938	2,2300	0,2480	0,3314	0,6828
○	0,2294	0,0300	0,0556	1,0920	2,0464	0,2276	0,3318	0,6804
△				1,4718	2,4715	0,2673		
▽				1,2360	2,3400	0,2612		
◇				1,1300	2,1440	0,2396		
◁				1,4220	2,6760			
▷				1,2040	2,2760	0,2540		
○				1,4718	2,4715	0,2673		
☆		0,3400	0,4600	6,1000	7,1000	0,7100	1,2000	2,3000
■				1,1292	2,1442	0,2406	0,3137	0,6629

скопичних констант доцільно залучити результати інших досліджень плазми з домішками міді (наприклад, між мідними електродами). Як впливає з наведених діаграм Больцмана (рис. 2, 3), заселеності рівнів, обчислені з використанням спектроскопічних констант різних авторів в різних режимах роботи електродугових розрядів (3,5 та 30 А), в різних просторових точках розряду ведуть себе подібним чином. Винятком є поведінка розрахованих заселеностей рівня $5s^2S_{1/2}$ в плазмі електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO при силі струму 3,5 А. Можливою причиною відхилення заселеності цього рівня від рівноважного розподілу є незначна кількість парів міді в плазмі. Оскільки технологія виготовлення і композитних матеріалів і міді марки М1 допускає можливість потрапляння до складу електродів домішок заліза, із розгляду були вилучені спектральні лінії 424,9; 448,0, 453,1, 458,7 та 470,5 нм, які могли б перекриватися з лініями FeI. З цієї ж причини було вилучено лінію 529,3 нм через можливе перекриття з лінією NiI. Подальша селекція полягала у вилученні тих спектроскопічних констант, для яких заселеність рівнів у всіх досліджуваних режимах найбільше відрізнялася від апроксимаційної прямої. Таким чином, були вилучені спектроскопічні константи, що відповідають наступним

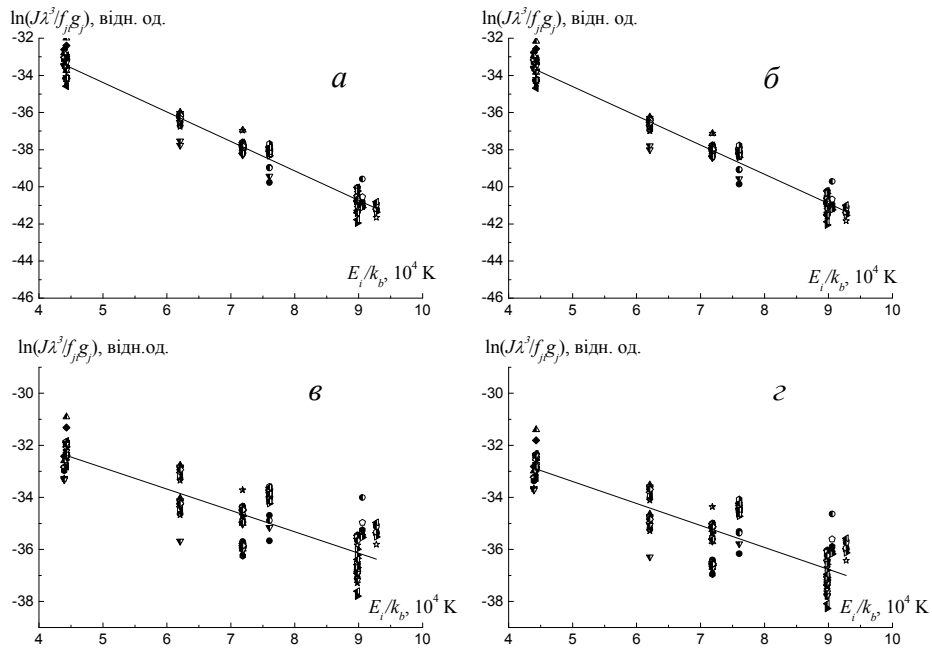


Рис. 2. Діаграми Больцмана для осьової точки (*a*, *в*) та на відстані від осі 0,8 (*б*) та 1,9 мм (*г*) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між мідними електродами при струмах 3,5 (*a*, *б*) та 30 А (*в*, *г*) із залученням всіх спектроскопічних констант для ліній міді.

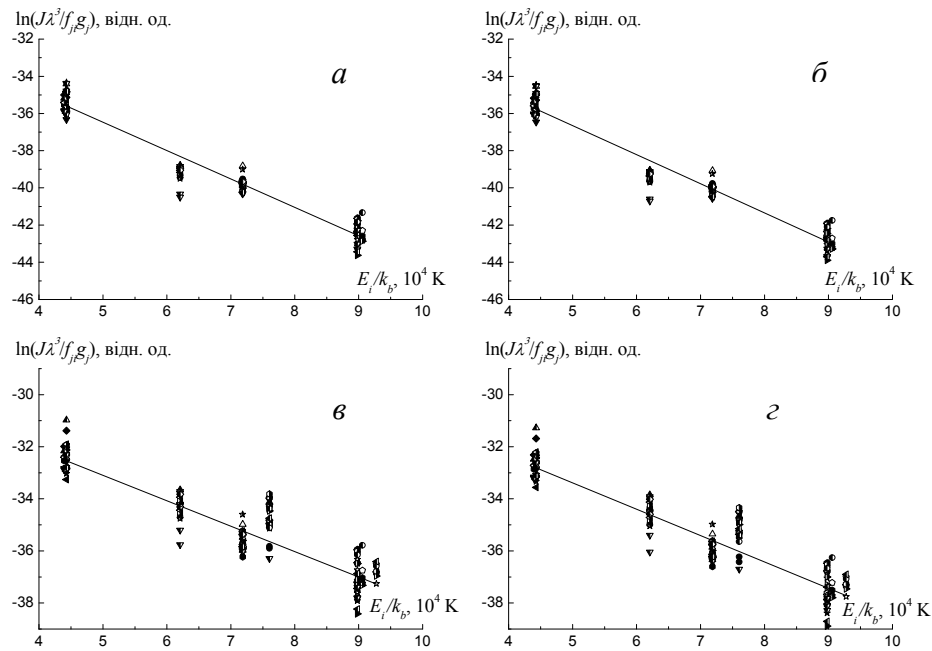


Рис. 3. Діаграми Больцмана для осьової точки (*a*, *в*) та на відстані від осі 0,7 (*б*) та 1,5 мм (*г*) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (*a*, *б*) та 30 А (*в*, *г*) із залученням всіх спектроскопічних констант для ліній міді.

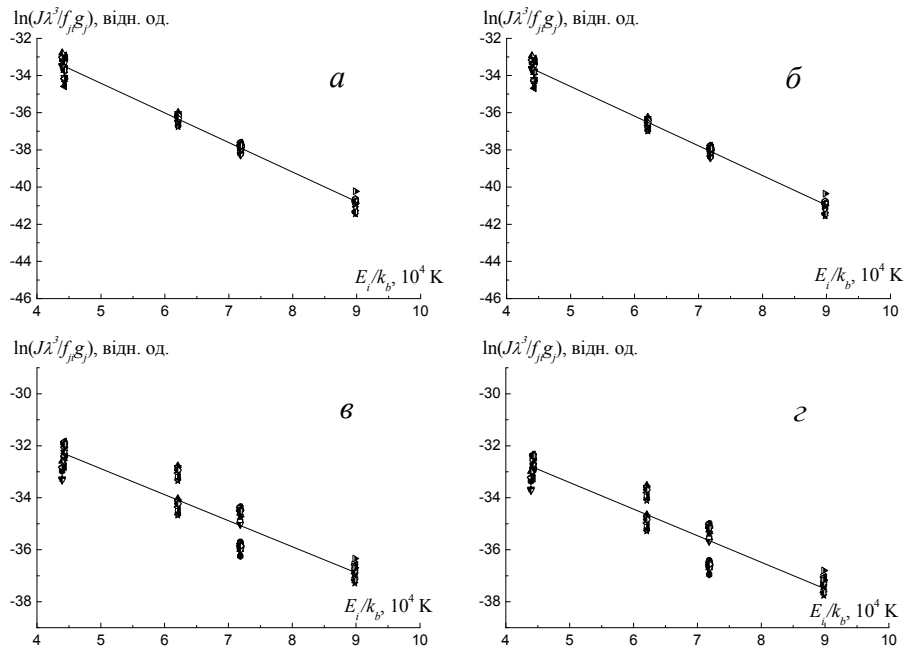


Рис. 4. Діаграми Больцмана для осьової точки (*a*, *в*) та на відстані від осі 0,8 (*б*) та 1,9 мм (*г*) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між мідними електродами при струмах 3,5 (*a*, *б*) та 30 А (*в*, *г*).

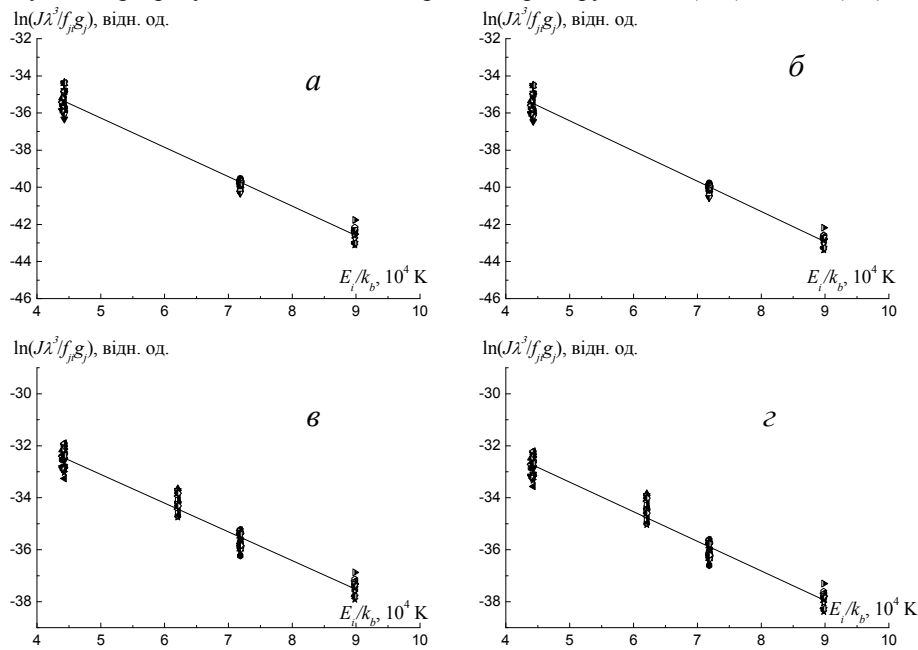


Рис. 5. Діаграми Больцмана для осьової точки (*a*, *в*) та на відстані від осі 0,7 (*б*) та 1,5 мм (*г*) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (*a*, *б*) та 30 А (*в*, *г*).

спектральним лініям: 793,3 [51] (▼), 809,3 [51] (▼), 515,3 [47] (★), 521,8 [39] (△), 570,0 [50] (▲) та 465,1 нм [31] (►). З аналогічних причин були вилучені всі спектроскопічні константи з роботи [29] (◆). Результат цього етапу селекції показано на рис. 4, 5.

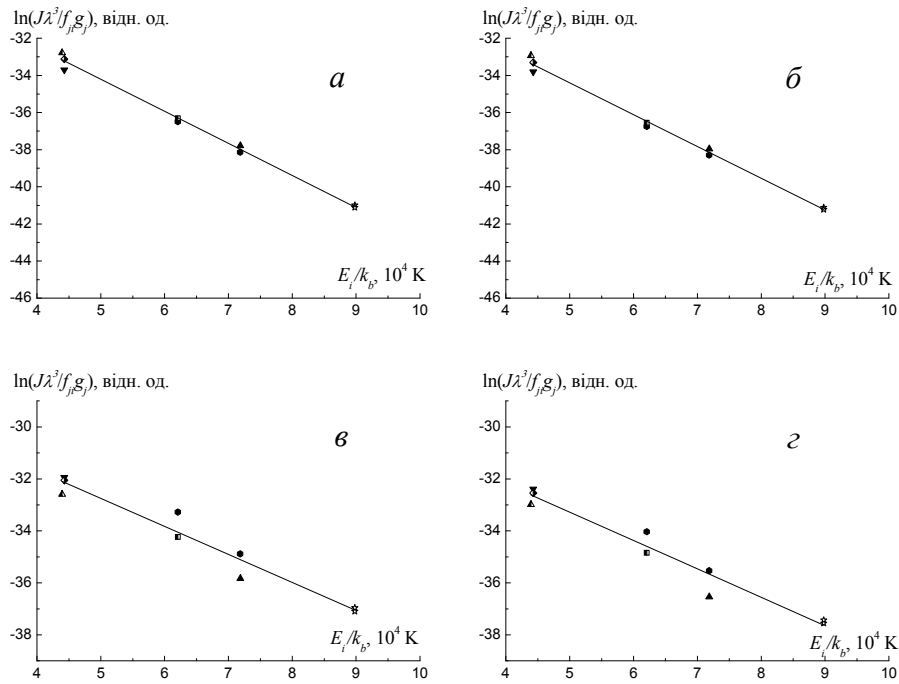


Рис. 6. Діаграми Больцмана для осьової точки (а, в) та на відстані від осі 0,8 (б) та 1,9 мм (г) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між мідними електродами при струмах 3,5 (а, б) та 30 А (в, г).

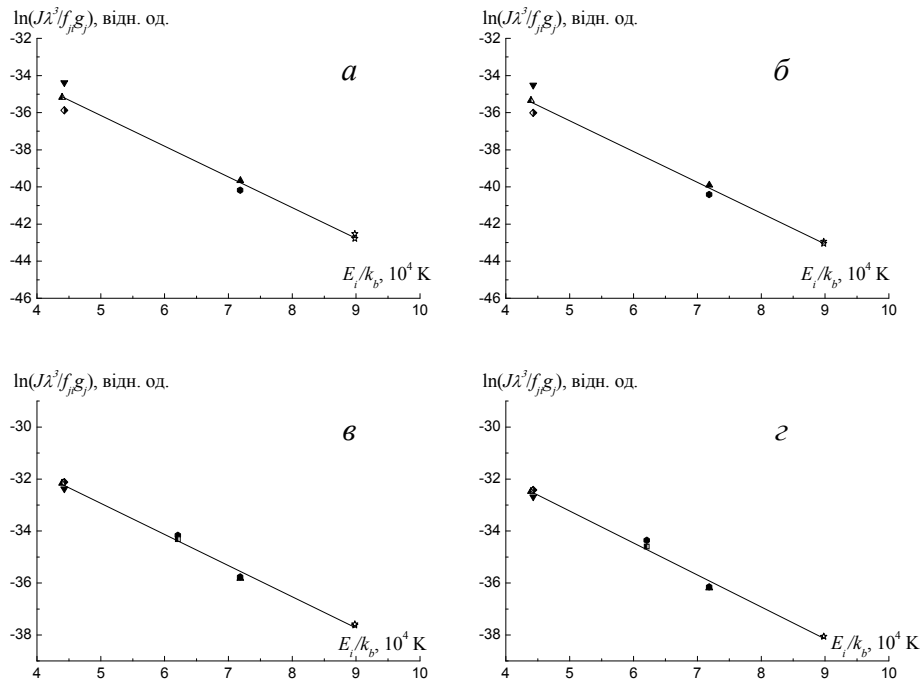


Рис. 7. Діаграми Больцмана для осьової точки (а, в) та на відстані від осі 0,7 (б) та 1,5 мм (г) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (а, б) та 30 А (в, г).

Таблиця 8. Перелік рекомендованих спектральних ліній CuI та відповідних спектроскопічних констант для діагностики плазми з домішками міді

λ , нм	g_{fji}	Посилання	Позначення
427,5	0,9097	[44]	☆
465,1	1,4218	[44]	☆
510,5	0,0197	[28]	▼
515,3	1,6466	[32]	●
521,8	1,9717	[27]	▲
570,0	0,0057	[47]	◆
578,2	0,0130	[50]	▲
793,3	0,4246	[32]	●
809,3	0,6120	[48]	■

На завершальному етапі були залишені спектроскопічні константи, для яких заселеність рівнів у всіх досліджуваних режимах найкраще співпадає з лінійною апроксимацією (рис. 6, 7). Перелік рекомендованих спектральних ліній та відповідних спектроскопічних констант для діагностики плазми з домішками парів міді наведено у табл. 8.

2.1.2. Селекція спектроскопічних констант спектральних ліній атома срібла

Для діагностики плазми, що містить домішки різних металів, доцільним є використання спектральних ліній того елемента, в якого різниця між енергіями збудження верхніх рівнів є максимальною. Зокрема, коли в плазмі присутні домішки срібла та міді, при визначенні температури плазми методом діаграм Больцмана чи відносних інтенсивностей, очевидно, перевагу слід надати використанню спектральних ліній атома міді. Як впливає з аналізу табл. 1, точність визначення температури плазми із використанням ліній CuI буде кращою в порівнянні з випадком залучення ліній AgI, оскільки різниця між енергіями збудження верхніх рівнів атома міді значно більша, ніж у ліній срібла. Проте, користуючись температурою, визначеною з використанням спектральних ліній атома міді, в такому плазмовому джерелі є можливість провести селекцію спектроскопічних констант для ліній атома срібла. Але необхідно звернути увагу на те, що незручність використання атома срібла як спектроскопічного елемента полягає в недостатній дослідженості його спектроскопічних констант на даний час.

На рис. 8 зображено діаграми Больцмана для середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO при струмах 3,5 (досліджувалися 8 ліній AgI) та 30 А (досліджувалися 6 ліній AgI) із залученням всіх відомих спектроскопічних констант для вибраних ліній атома срібла (табл. 7). На рисунках також проведено дві прямі (через невизначеність реального співвідношення між концентраціями атомів срібла та міді), нахил яких відповідає температурам, що визначені із залученням спектральних ліній атома міді. Аналізуючи діаграми (рис. 8), одразу ж можна зробити висновок,

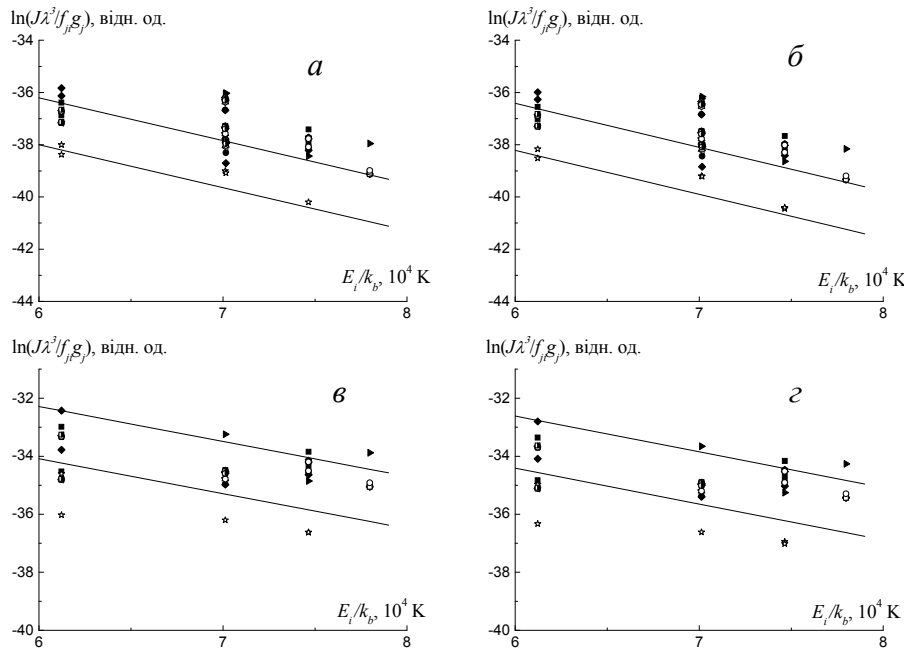


Рис. 8. Діаграми Больцмана для осьової точки (*a*, *в*) та на відстані від осі 0,7 (*б*) та 1,5 мм (*з*) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (*a*, *б*) та 30 А (*в*, *з*) із залученням всіх спектроскопічних констант для ліній срібла.

що обраховані заселеності з використанням спектроскопічних констант з роботи [51] добре узгоджуються з визначеною температурою. Проте заселеності значно відрізняються від інших. Це означає, що автор роботи запропонував досить непогані відносні значення спектроскопічних констант, однак помилився у визначенні їх абсолютних значень. Саме тому ці константи повинні бути вилучені з подальшого розгляду.

Оскільки співвідношення між концентраціями атомів срібла та міді невідоме, то в першу чергу необхідно задати положення прямої на діаграмі, опираючись на поведінку заселеностей. У всіх досліджуваних режимах розраховані значення заселеностей верхніх рівнів саме для ліній AgI 405,5 та 768,8 нм із залученням спектроскопічних констант робіт [40] (□) та [27] (■) дозволили найкращим чином відтворити нахил прямих, які відповідають температурам, визначеним з використанням спектральних ліній міді. Тому положення прямих на діаграмах визначали саме цими заселеностями. Таким чином, додатково позбулися ще й проблеми невизначеності, яка полягала у відсутності реального співвідношення між концентраціями атомів срібла та міді.

Подальші селекції решти заселеностей здійснювали на основі аналізу їх відхилення відносно обраного положення прямої. На підставі того, що розраховані заселеності рівнів у всіх досліджуваних режимах значно відрізнялися від прямої, були вилучені такі лінії: 405,5; 520,9 та 546,5 нм [37] (►) та побудовані діаграми, зображені на рис. 9.

На завершальному етапі були залишені спектроскопічні константи, для яких заселеність рівнів у всіх досліджуваних режимах найкраще співпадає з заданою прямою (рис. 10). Перелік рекомендованих спектральних ліній

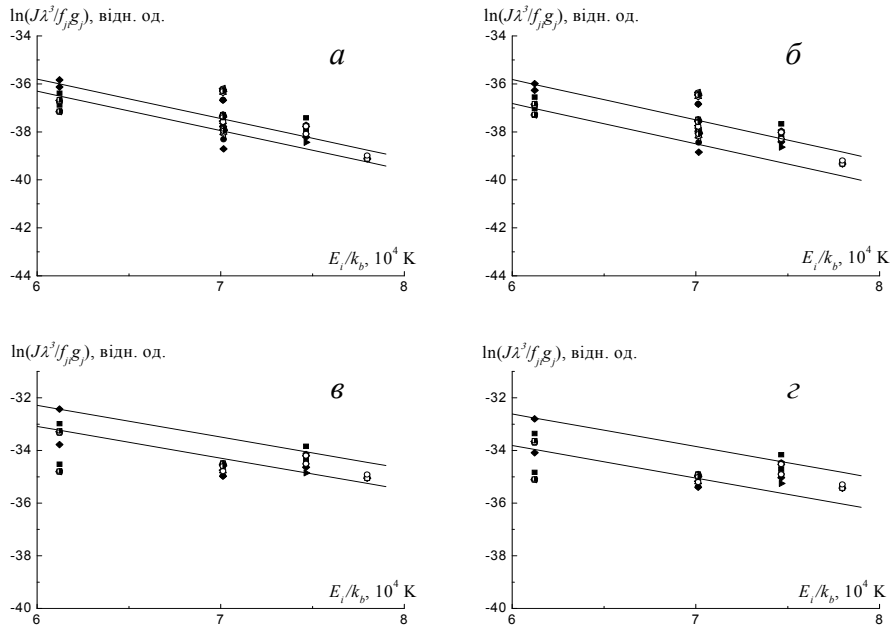


Рис. 9. Діаграми Больцмана для осьової точки (а, в) та на відстані від осі 0,7 (б) та 1,5 мм (г) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (а, б) та 30 А (в, г), побудовані з вилученням спектроскопічних констант [51] та [37 (крім $\lambda = 466,8 \text{ nm}$)].

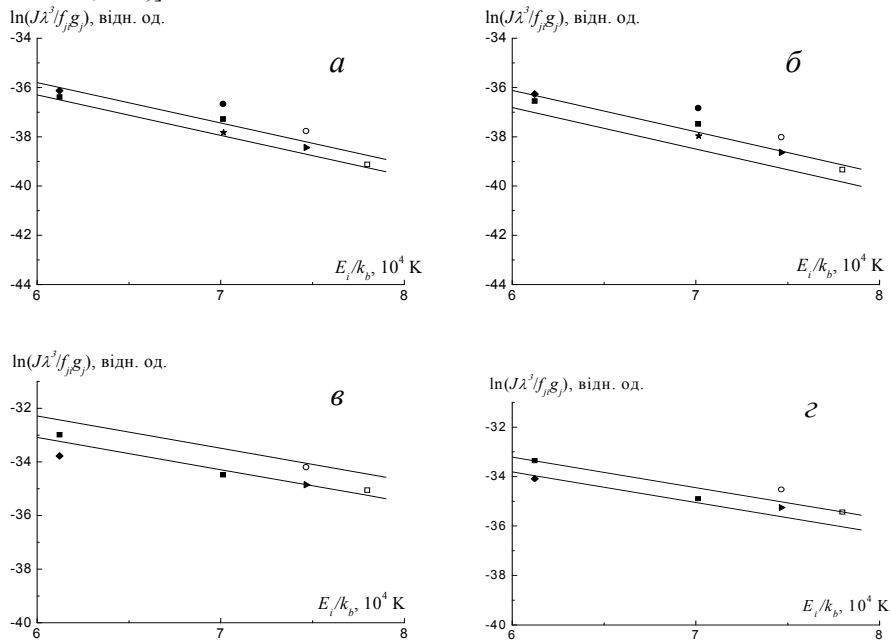


Рис. 10. Діаграми Больцмана для осьової точки (а, в) та на відстані від осі 0,7 (б) та 1,5 мм (г) середнього перерізу плазми вільно існуючого електродугового розряду між Ag—CuO електродами при струмах 3,5 (а, б) та 30 А (в, г), побудовані на основі селекції спектроскопічних констант.

Таблиця 9. Перелік рекомендованих спектральних ліній AgI та відповідних спектроскопічних констант для діагностики плазми з домішками срібла

λ , нм	gf_{ji}	Посилання	Позначення
405,5	0,2636	[40]	□
447,6	0,0300	[40]	○
466,8	0,0787	[37]	▶
520,9	1,0902	[27]	■
546,5	2,0335	[39]	★
547,2	0,3640	[34]	●
768,8	0,2392	[27]	■
827,4	0,1367	[35]	◆

та відповідних спектроскопічних констант для діагностики плазми з домішками парів срібла подано у табл. 9.

2.1.3. Температура плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами

На рис. 11 наведено радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 та 30 А. Температури розраховані методом діаграм Больцмана з використанням спектральних ліній CuI (табл. 8) та AgI (табл. 9). Як видно на рис. 11, температури, одержані різними методами із залученням спектральних ліній як атомів міді, так і срібла, співпадають в межах похибки вимірювань. Найкраще збігаються результати, одержані методом діаграм Больцмана із залученням ліній CuI та відносних інтенсивностей ліній AgI 405,5—768,8 нм. Тому можна рекомендувати використання ліній AgI 405,5 та 768,8 нм для визначення температури плазми з домішками парів срібла методом відносних інтенсивностей. Різниця між температурами на периферії розряду, можливо, зумовлена відхиленням стану плазми від рівноважного.

2.2. Визначення електронної концентрації

Електронну концентрацію в плазмі визначали з півширини спектральної лінії, коли домінуючим механізмом її розширення є квадратичний ефект Штарка:

$$N_e = K \cdot \Delta\lambda,$$

де K — коефіцієнт пропорційності, який відображає концентрацію електронів, нормовану на півширину лінії. В табл. 10 наведено спектральні лінії атомів срібла та міді, вибрані для визначення N_e , а також відповідні значення констант розширення w при певних параметрах плазми. При цьому слабкою залежністю від температури цих констант, як правило, нехтують.

Півширину спектральних ліній, а відповідно, і електронну концентрацію, із зареєстрованих експериментально інтерферограм визначали за допомогою спеціально розробленого програмного інтерфейсу [19].

Таблиця 10. Перелік констант розширення, спричиненого квадратичним ефектом Штарка, для спектральних ліній срібла та міді

Елемент	λ , нм	w , нм, $T = 10\ 000\text{ К}$, $N_e = 10^{17}\text{ см}^{-3}$	$K = N_e / w, \cdot 10^{24}$ см^{-4}	Посилання
CuI	448,0	0,422	2,370	[57]
	515,3	0,346	2,890	[57]
AgI	447,6	0,209	4,785	[58]
	466,8	0,230	4,348	[58]

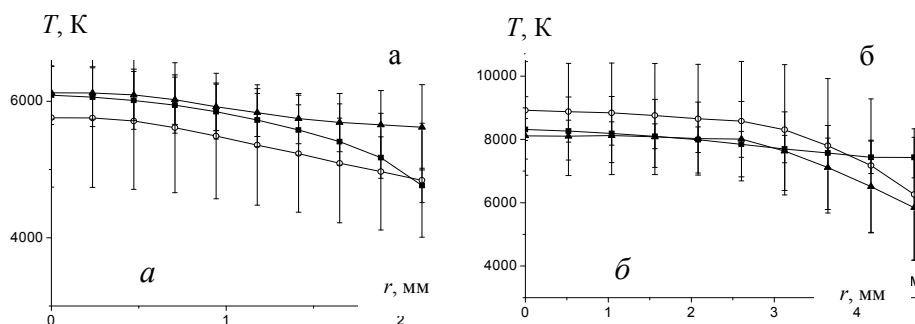


Рис. 11. Радіальні розподіли температури плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (а) та 30 А (б), розраховані методами діаграм Больцмана із залученням спектральних ліній CuI (■), AgI (○) та відносних інтенсивностей ліній AgI 405,5—768,8 нм (▲).

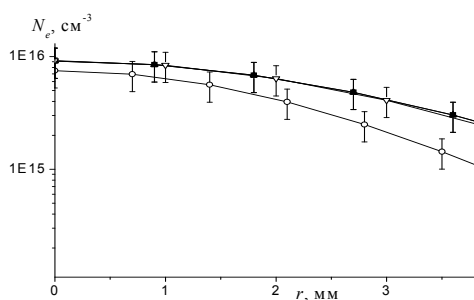


Рис. 12. Радіальні розподіли електронної концентрації плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 30 А, визначені з півширини спектральних ліній AgI 447,7 (■), AgI 466,8 (▲), CuI 448,0 (○) та CuI 515,3 нм (▽).

Як видно на рис. 12, розраховані профілі електронної концентрації, одержані з півширини різних спектральних ліній як атомів міді, так і срібла, співпали в межах похибки експерименту. Отже, запропоновані спектроскопічні константи в роботах [57, 58] та самі спектральні лінії можна рекомендувати для діагностики плазми з домішками міді та/або срібла.

На жаль, діапазон ширин спектральних ліній, які можна виміряти наявним інтерферометром Фабрі—Перо (у режимі еталона), не дозволяє виконати вимірювання контурів ліній, співвимірних з інструментальним контуром установки. Саме така ситуація реалізується у режимі роботи дуги при силі струму 3,5 А. Отже, у цьому випадку електронна концентрація не може бути визначена за допомогою обраної методики.

2.3. Рівноважний склад плазми

У випадку, коли плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, її можна описати системою рівнянь, яка в першу чергу залежить від сорту частинок, що знаходяться в її об'ємі. У плазмі вільно існуючого у повітрі електродугового розряду між Ag—CuO електродами беруться до уваги молекули, атоми та іони азоту та кисню. Крім того, внаслідок термічної дії розряду на електроди в плазмі будуть присутні атоми та іони срібла та міді. Для такого випадку система рівнянь буде мати наступний вигляд:

чотири рівняння Саха для атомів срібла, міді, азоту та кисню:

$$S_i(T, N_e) = \frac{N_e N_{i^+}}{N_i}, \quad i \rightarrow \text{Ag, Cu, N, O}; \quad (1)$$

два рівняння дисоціації для молекул азоту та кисню:

$$D(T) = \frac{N_i^2}{N_{i_2}}, \quad i \rightarrow \text{N}_2, \text{O}_2; \quad (2)$$

рівняння електронейтральності:

$$N_e = \sum N_{i^+}, \quad i \rightarrow \text{Ag, Cu, N, O}; \quad (3)$$

рівняння ідеального газу:

$$B(T) = N_e + \sum N_i + \sum N_{i^+} + \sum N_{i_2}, \quad i \rightarrow \text{Ag, Cu, N, O}; \quad (4)$$

співвідношення між кількістю частинок азоту та кисню в повітрі:

$$(N_{\text{N}} + 2N_{\text{N}_2} + N_{\text{N}^+}) = 3,72(N_{\text{O}} + 2N_{\text{O}_2} + N_{\text{O}^+}). \quad (5)$$

Система (1)—(5) складається з 9 рівнянь, що містять, окрім T та N_e , 10 невідомих. Для того щоб знайти розв'язок цієї системи, тобто отримати концентрації частинок плазми, необхідно додати ще одну залежність. Для цього можна використати співвідношення між концентраціями атомів срібла та міді, яке легко знайти з відношення інтенсивностей спектральних ліній AgI та CuI

$$\alpha = \frac{N_{\text{Ag}}}{N_{\text{Cu}}} \sim \frac{I_{\text{AgI}405,5}}{I_{\text{CuI}465,1}} \cdot f(T), \quad (6)$$

де $f(T)$ — функція, яка може бути легко порохвана для фіксованого значення T . Отримані у такий спосіб радіальні розподіли відношення концентрацій атомів срібла та міді показано на рис. 13.

На основі експериментально вимірянних значень температури та концентрації електронів можна розрахувати компонентний склад плазми.

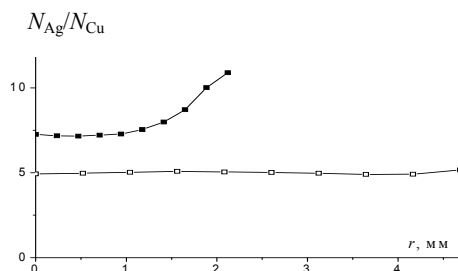


Рис. 13. Радіальні розподіли відношення концентрацій атомів срібла та міді в плазмі електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (■) та 30 А (○).

Подібний розрахунок рівноважного складу плазми дугового розряду у режимі слабкого струму 3,5 А не можна виконати без визначеної експериментальними методами електронної концентрації. Тому для виконання розрахунку рівноважного складу досліджуваної плазми пропонується скористатися наступним алгоритмом, який дозволить знайти концентрацію електронів, спираючись лише на вже знайдені експериментально інші параметри дугової плазми.

Як показали наші оцінки, у діапазоні температур 4500—6000 К (характерному для плазми дугового розряду при струмі 3,5 А) внесок в іонізацію складових повітря (азоту та кисню) не перевищує 15%. Тоді для визначення електронної концентрації можна скористатися наближеним співвідношенням

$$N_e = N_{\text{Cu}^+} + N_{\text{Ag}^+}. \quad (7)$$

Рівняння Саха для атомів срібла та міді (значення світових констант замінені їх числовими значеннями для концентрацій частинок в см^{-3}) набувають вигляду:

$$N_e N_{\text{Cu}^+} = 4,85 \cdot 10^{15} N_{\text{Cu}} \frac{U_{\text{Cu}^+}}{U_{\text{Cu}}} T^{3/2} e^{-E_{\text{Cu}^+}^i / kT}; \quad (8)$$

$$N_e N_{\text{Ag}^+} = 4,85 \cdot 10^{15} N_{\text{Ag}} \frac{U_{\text{Ag}^+}}{U_{\text{Ag}}} T^{3/2} e^{-E_{\text{Ag}^+}^i / kT}. \quad (9)$$

Виконавши перетворення над рівняннями (8), (9), одержимо

$$N_e^2 = 4,85 \cdot 10^{15} T^{3/2} \left(N_{\text{Cu}} \frac{U_{\text{Cu}^+}}{U_{\text{Cu}}} e^{-E_{\text{Cu}^+}^i / kT} + N_{\text{Ag}} \frac{U_{\text{Ag}^+}}{U_{\text{Ag}}} e^{-E_{\text{Ag}^+}^i / kT} \right). \quad (10)$$

Використаємо також і співвідношення (6) між концентраціями атомів срібла та міді, які ґрунтуються на експериментально визначених співвідношеннях інтенсивностей окремих спектральних ліній цих елементів за умови, що температура у плазмі вже також попередньо виміряна.

Тоді маємо

$$N_e^2 = 4,85 \cdot 10^{15} T^{3/2} N_{\text{Cu}} \left(\frac{U_{\text{Cu}^+}}{U_{\text{Cu}}} e^{-E_{\text{Cu}^+}^i / kT} + \alpha \frac{U_{\text{Ag}^+}}{U_{\text{Ag}}} e^{-E_{\text{Ag}^+}^i / kT} \right). \quad (11)$$

Концентрацію атомів міді N_{Cu} можна визначити, використовуючи одержану з експерименту відносну інтенсивність спектральної лінії міді, наприклад $\text{CuI } 465,1 \text{ нм}$:

$$N_{\text{Cu}} = B \cdot I_{4651} U_{\text{Cu}} \cdot e^{E_{4651_up} / kT}, \quad (12)$$

де коефіцієнт B відображає зв'язок відносних одиниць інтенсивності з їх абсолютними значеннями. Значення цього коефіцієнта можна знайти, використовуючи відповідні параметри плазми дугового розряду при силі струму 30 А лише для осьової точки:

$$B = \frac{N_{\text{Cu}}}{I_{4651} U_{\text{Cu}} \cdot e^{E_{4651_up} / kT}} \Bigg|_{I=30\text{A}}^{r=0}, \quad (13)$$

де N_{Cu} можна взяти із попередньо розрахованого рівноважного складу плазми дугового розряду при струмі 30 А.

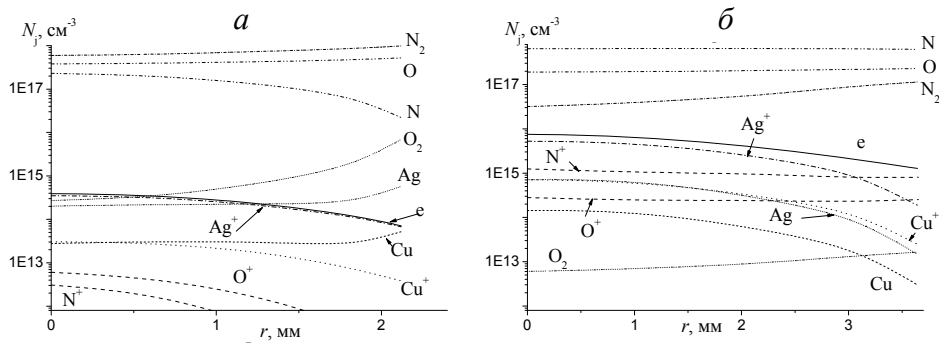


Рис. 14. Радіальні розподіли концентрацій складових плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (а) та 30 А (б).

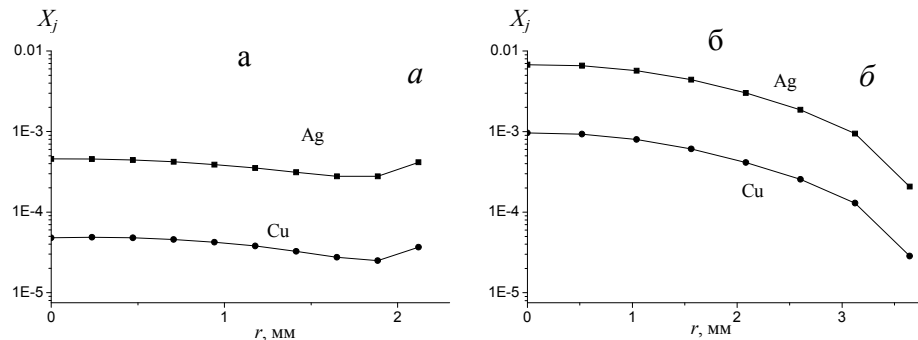


Рис. 15. Радіальні розподіли вмісту срібла та міді в плазмі електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (а) та 30 А (б).

Таким чином, запропонований алгоритм надає можливість обрахувати значення електронної концентрації і, відповідно, розрахувати рівноважний склад плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 А.

На рис. 14 показано радіальні розподіли концентрацій складових плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами. На рисунку видно, що електронна концентрація в розряді при силі струмі 3,5 А повністю визначається наявністю в електродному проміжку парів срібла. Це цілком природно і очікувано, оскільки в складі електродів срібла більше, ніж міді, на порядок, в той час коли потенціали іонізації AgI та CuI майже однакові. В розряді при силі струмі 30 А стає помітним внесок в іонізацію інших компонент плазми.

На рис. 15 подано радіальні розподіли вмісту срібла ($X_{Ag, \%} = (n_{Ag} + n_{Ag^+}) \cdot 100 / \sum n_i$) і, відповідно, міді ($X_{Cu, \%} = (n_{Cu} + n_{Cu^+}) \cdot 100 / \sum n_i$) в плазмі електродугового розряду між Ag—CuO електродами. Як видно, при силі струму 3,5 А, срібла в плазмі в 12 разів більше, ніж міді, а при силі струму 30 А — в 7 разів. Таким чином, вміст срібла та міді в плазмі практично повторює їх співвідношення в складі електродів.

2.4. Лінійна лазерна абсорбційна спектроскопія

Величина коефіцієнта поглинання $\kappa(\lambda)$ спектральної лінії пропорційна силі осцилятора f_{ki} та концентрації частинок N_k , що поглинають [20], тобто концентрації частинок (заселеності) в нижньому стані оптичного переходу відповідного рівня атома.

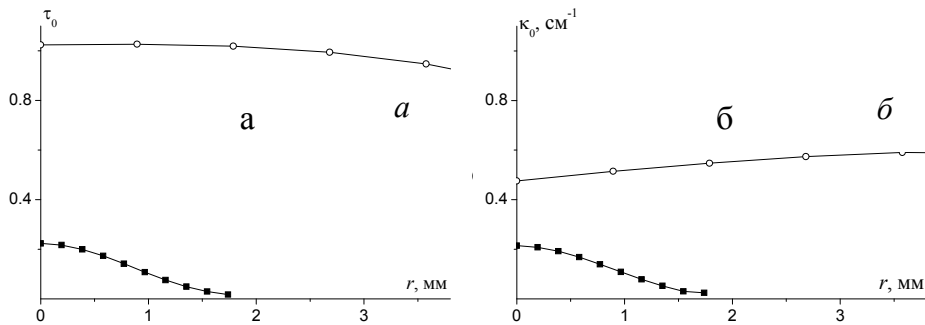


Рис. 16. Радіальні розподіли оптичної товщини (а) та коефіцієнта поглинання (б) в центрі спектральної лінії CuI 510,5 нм випромінювання плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (■) та 30 А (○).

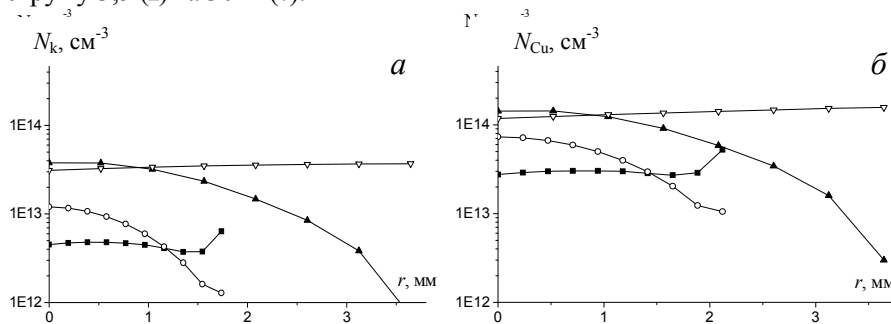


Рис. 17. Радіальні розподіли заселеності рівня атома міді (а) та концентрації атомів міді (б), отримані методами емісійної спектроскопії (■, ▲) та лінійної лазерної абсорбційної спектроскопії (○, ▽) в плазмі електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 (■, ○) та 30 А (▲, ▽).

На рис. 16 показано радіальні розподіли оптичної товщини та коефіцієнта поглинання в центрі спектральної лінії CuI 510,5 нм випромінювання плазми електродугового розряду між Ag—CuO електродами при силі струму 3,5 та 30 А. В якості зондуючого використовували випромінювання лазера на парах міді.

Зарєстровані розподіли коефіцієнта поглинання були використані для розрахунку заселеності N_k рівня $^2D_{5/2}$ атома міді (рис. 17, а). В припущенні виконання розподілу Больцмана для заселеності рівнів атома міді на основі експериментально отриманих профілів температури та N_k (рис. 17, а) були розраховані [20] просторові профілі концентрації атомів міді N_{Cu} (рис. 17, б). Результати, одержані різними методами, збігаються з гарною точністю для плазми електродугового розряду при силі струму 30 А. У випадку розряду при силі струму 3,5 А отримані концентрації відрізняються в межах 50%. Проте вважаємо, що для дуже малих значень концентрацій парів металу в плазмі така точність визначення є цілком прийнятною. Помітна розбіжність на периферії розрядів при різних струмах, очевидно, може бути пояснена відхиленням стану плазми від рівноважного.

Отже, як впливає з результатів наших досліджень, вміст парів металів електродного походження у розрядному проміжку (в середньому його перерізі) практично повторює їх вміст у складі електродів. При збільшенні струму до 30 А їх вміст в плазмі суттєво підвищився. Це може свідчити

про те, що із збільшенням введеної потужності у розряд і, відповідно, в електроди у робочому шарі на поверхні електродів відбулися якісні зміни. Тому є необхідним прослідкувати ці зміни (якщо вони є), виконавши дослідження мікроструктури і складу поверхні та об'єму робочого шару електродів.

2.5. Металографічні дослідження

Результати металографічних досліджень свідчать, що струм силою 3,5 А в цілому не викликає значного руйнування робочих поверхонь електродів. Зокрема, на катоді формується смужка ерозійного сліду в результаті випаровування електродного матеріалу під дією розряду (рис. 18, *a*). Майже на половині довжини слід має вигляд дуже вузької западини, з внутрішнього боку обмеженої валиком (рис. 18, *б*). На іншій частині біля межової області слід розширюється, утворюючи більш масштабні ерозійні плями. На дні катодного сліду відмічається наявність переважно кратерів і осадів із конденсованої пари (рис. 18, *в*). В той же час вздовж периметра аноду, на протилежних його сторонах виділяються дві опуклі оплавлені області з перенесеного матеріалу (рис. 18, *г, д*). Дно анодного сліду (частіше по краях локальних ділянок дії розряду) усяне розрізненими пагорбками в оточенні великої кількості осадів (рис. 18, *є*). Центральна частина робочої поверхні обох електродів зазнає зовсім незначного ерозійного руйнування — вона виявляється вкритою шаром конденсованої фази на основі срібла і закристалізованими бризками розплаву.

Таким чином, в умовах експерименту при струмі $I = 3,5$ А дуговий розряд уражає в основному периферію поверхні плоских електродів і це ураження має схожий характер: на обох електродах відбувається як активне випаровування, так і осадження матеріалу.

Аналіз мікроструктури шліфів досліджуваних електродів свідчить про те, що випаровування складових композиційного матеріалу в цих умовах здійснювалось майже одночасно: навіть під глибокою западиною, утвореною прив'язкою розряду до периферійної частини робочої поверхні

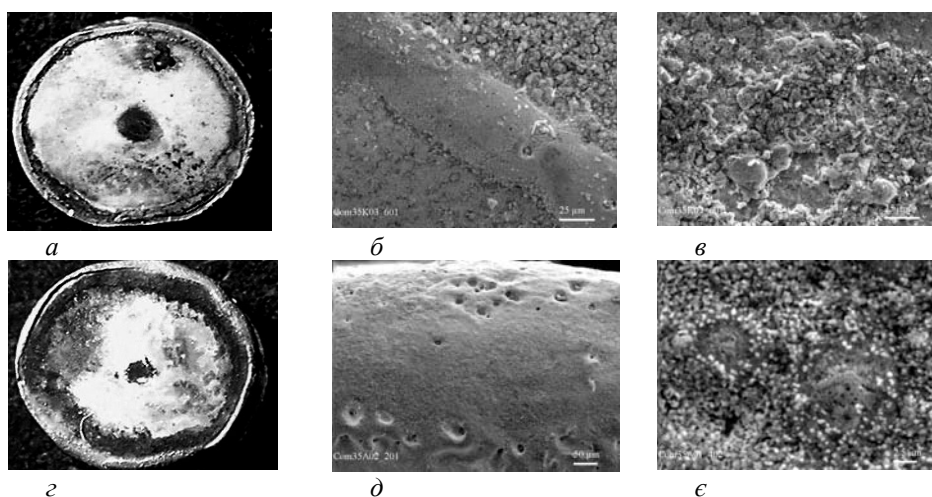


Рис. 18. Зовнішній вигляд і типові ділянки робочих поверхонь катоду (*a—в*) і аноду (*г—є*) з композиції Ag—CuO після випробувань ($I = 3,5$ А).

катоду, не спостерігається аномалій, зумовлених помітним перерозподілом компонентів композиції під дією концентрованого теплового джерела (рис. 19, *a, б*). Конгломерати CuO в поверхневому шарі звичайно руйнуються, проте утворення значної кількості рідкої фази в цих умовах не відбувається (рис. 19, *в*). З цього витікає, що після випаровування срібла навколо таких конгломератів їх окремі частинки, що слабо зв'язані між собою, можуть переноситись на анод в твердій фазі. В той же час на опуклих деталях рельєфу аноду зафіксовано підвищену концентрацію міді. Причому на ділянках, більше уражених розрядом, шар з міді формується, очевидно, за рахунок переважного випаровування срібла з перенесеного об'єму речовини, а також шляхом надходження міді з глибини електроду (приймаючи до уваги переважне орієнтування конгломератів CuO в напрямку дії теплового імпульсу) (рис. 19, *з, д*). Наявність в поверхневому шарі окремих фазових складових, як міді, так і срібла (рис. 19, *д*), також дозволяє припустити, що в зазначених умовах вони переносились майже одночасно.

Як свідчать результати мікроструктурних досліджень, центральна частина робочої поверхні аноду вкрита шаром срібла з диспергованими в ньому включеннями міді в різному стані — як у вигляді оксиду, так і металеві фази (рис. 19, *є—з*). Наявність в цьому шарі частинок CuO (рис. 19, *з*), аналогічних тим, що знаходяться у вихідному матеріалі (рис. 19, *і*), підтверджує припущення про імовірність переносу міді частково в твердій фазі у вигляді оксиду.

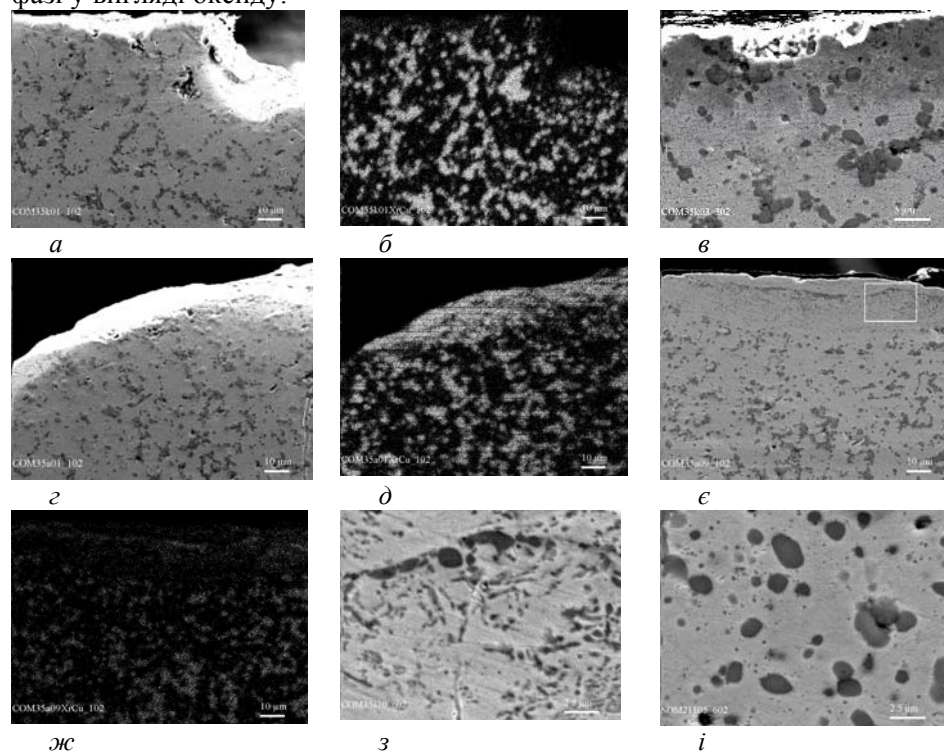


Рис. 19. Мікроструктура приповерхневих шарів катоду (*a—в*) і аноду (*з—і*) з композиції Ag—CuO після випробувань ($I = 3,5 \text{ A}$): *б, д, ж* — в RX CuK_α -випромінюванні; *з* — фрагмент рис. 19, *є* в режимі COMPO; *і* — вихідна мікроструктура композиційного матеріалу Ag—CuO .

Підвищення сили струму до $I = 30$ А викликає значне підсилення масопереносу між електродами і одночасно помітну контракцію розряду. Внаслідок останньої на локальній ділянці катоду поглиблюється ерозійний слід, в той час як на аноді починають рости горби з перенесеної речовини (рис. 20, *a*). При цьому поверхня бугрів зазнає доволі інтенсивного ерозійного руйнування, оскільки на ній зосереджується основна доля теплової потужності розряду. Дослідження шліфа вертикального перерізу периферійної частини горба підтвердило наявність на його поверхні і в приповерхневому об'ємі значної кількості закристилизованого мідного розплаву (рис. 20, *б, в*), чого не спостерігалось при струмі $I = 3,5$ А. Як свідчить рис. 20, *з, д*, формування центральної частини горбів супроводжувалось активізацією накопичення оксиду міді в приповерхневому шарі з подальшим його розкладанням; при цьому відбувалось збіднення на мідь прилеглого внутрішнього шару електродного матеріалу (рис. 20, *з*). Крім того, на деяких ділянках між щільними прошарками з міді утворюються окремі островки евтектики, чому сприяло активне перемішування міді і срібла в рідкому стані (рис. 20, *е, ж*). В той же час під шаром, що був нанесений на неробочу (центральну) частину поверхні електроду, перерозподілу компонентів не зафіксовано (рис. 20, *з*), але концентрація міді в ньому значно перевищує ту, що мала місце при $I = 3,5$ А (рис. 20, *з, і*).

Таким чином, результати металографічних досліджень вказують на існування відмінності в механізмах переносу в дуговому розряді речовини досліджуваних електродів з композиції Ag—CuO при струмах 3,5 і 30 А.

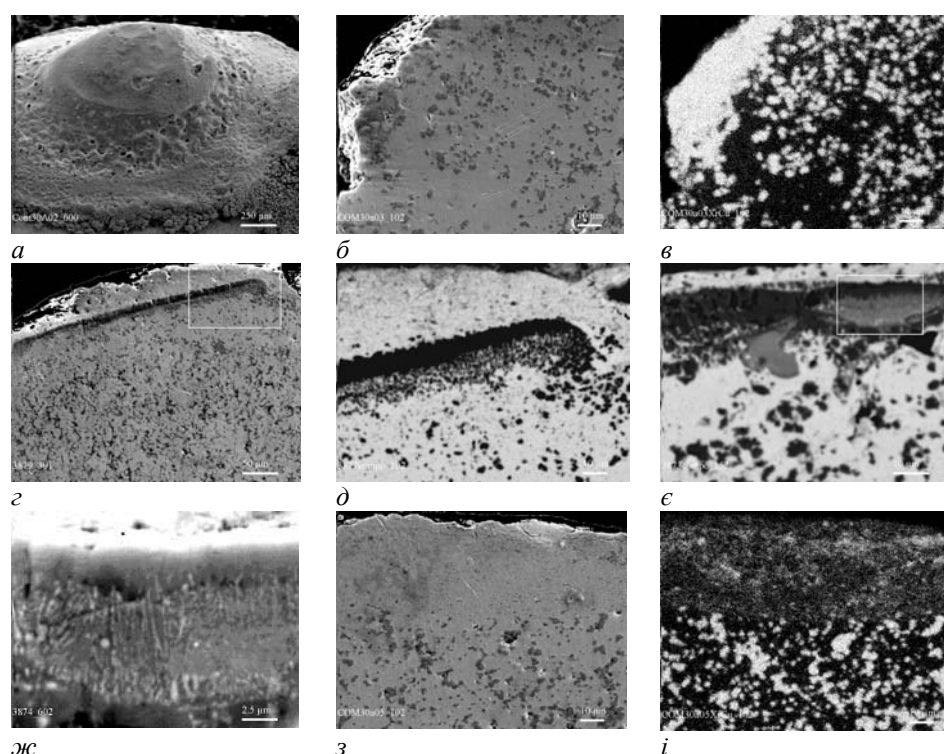


Рис. 20. Зовнішній вид горба (*a*) і мікроструктура аноду (*б—і*) після випробувань при $I = 30$ А: *в, і* — в RX CuK_α -випромінюванні; *д* — в режимі COMPO; *д, ж* — фрагменти рис. 20, *з, е* відповідно.

М'який режим горіння дуги сприяє пропорційній ерозії складових електродного матеріалу, в той час як при струмі $I = 30$ А внаслідок локалізації розряду посилюється ерозійне руйнування поверхонь попередньо сформованих горбів і при цьому слід очікувати більш активного випаровування срібла. Проте притаманний сріблун високий тиск пари в умовах дугового режиму веде до її розсіювання в міжелектродному проміжку, що може слугувати причиною зниження долі срібла в плазмі (по відношенню до міді) при загальному рості ерозійного руйнування електродного матеріалу. Про це також свідчить занадто висока концентрація міді на поверхні горба, що формується в цих умовах (рис. 20, б, в).

Висновки

Розроблено спектроскопічну методику діагностики багатокомпонентної повітряної плазми з домішками парів двох металів. Зокрема, ця методика реалізована для дослідження плазми електродугового розряду у повітрі між композитними електродами Ag—CuO.

Виконано селекцію спектральних ліній CuI та значень їх спектроскопічних констант, які можуть бути використані у діагностиці плазми з домішками парів міді.

Виконано також селекцію значень спектроскопічних констант ліній AgI для діагностики плазми, що містить пари срібла.

Для визначення температури плазми з домішками парів срібла методом відносних інтенсивностей рекомендовано використання ліній AgI 405,5 та 768,8 нм.

Методом лінійної лазерної абсорбційної спектроскопії визначено концентрацію атомів міді в розрядному проміжку при силі струму 3,5 та 30 А. Поєднання кількох методів діагностики дозволило надійно визначити вміст компонентів електродного матеріалу (срібла та міді) у розрядному проміжку електричної дуги.

Встановлено, що підвищення струму до 30 А викликає зростання вмісту металів в плазмі між електродами з композиції Ag—CuO майже на порядок з одночасним зменшенням кількісного співвідношення срібла до міді. Металографічні дослідження підтвердили, що із збільшенням введеної потужності у розряд на поверхні електродів відбуваються якісні зміни, спричинені зміною механізму електричної ерозії кожного з компонентів.

Одержані результати вказують на доцільність проведення аналогічних досліджень електродів з композиції Ag—CuO в більш широкому діапазоні навантажень.

1. Минакова Р. В., Кресанова А. П., Чураков М. М., Хоменко Е. В. Тенденции развития технологий изготовления композиционных материалов и контактов из них // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1998. — С. 5—19.
2. Буткевич Г. В., Белкин Г. С., Ведешенков Н. А., Жаворонков М. А. Электрическая эрозия электрических контактов и электродов. — М.: Энергия, 1978. — 256 с.
3. Афонин М. П., Овчинникова М. Н. Классификация материалов для электрических контактов низковольтной аппаратуры и области их применения в электротехнике // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2006. — С. 153—159.

4. Cheminat B., Gadaud R. and Andanson P. Vaporisation of a silver anode in an electric arc column // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1987. — **20**. — P. 444—452.
5. Salihou H., Abbaoui M., Lefort A. and Auby R. Determination of the power lost by conduction into the cathode at low current arc // *Ibid.* — 1995. — **28**. — P. 1883—1887.
6. Rei Hemmi, Yasunobu Yokomizu and Toshiro Matsumura. Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes // *Ibid.* — 2003. — **36**. — P. 1097—1106.
7. Xingwen Li, Degui Chen, Yi Wu and Ruicheng Dai. A comparison of the effects of different mixture plasma properties on arc motion // *Ibid.* — 2007. — **40**. — P. 6982—6988.
8. Xingwen Li, Degui Chen, Rui Li et al. Electrode evaporation effects on air arc behavior // *Plasma Science and Technology*. — 2008. — **10**, No. 3. — P. 323—327.
9. Брон О. Б., Сушков Л. К. Электрическая дуга на контактах из композитных материалов. — К.: Наук. думка, 1977. — С. 40—47.
10. Михайлов В. В. Некоторые результаты исследований в области электрических контактов // *Электрические контакты и электроды*. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1996. — С. 5—11.
11. Минакова Р. В., Кресанова А. П., Гречанюк Н. И. Композитные материалы для контактов и электродов // Там же. — 1996. — С. 96—105.
12. Афонин М. П. Слои наработки при эксплуатации контактов из композиции серебро-оксид кадмия // Там же. — 2004. — С. 116—119.
13. Бабич И. Л., Веклич А. Н., Крячко Л. А. и др. Параметры плазмы свободно горящего в воздухе дугового разряда с электродами на основе серебра // *Журн. прикладной спектроскопии*. — 2006. — **73**, вып. 3. — С. 375—379.
14. Babich I. L., Boretskij V. F., Minakova R. V., Veklich A. N. Plasma of electric arc between electrodes from composite materials // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. — 2008. — **14**, No. 6. — P. 159—161.
15. Бабич И. Л., Борецкий В. Ф., Веклич А. Н. и др. Эрозия композиционных электродов на основе меди в условиях дугового разряда на воздухе // *Электрические контакты и электроды*. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2008. — С. 14—22.
16. Babich I. L., Chukhalenko D. V., Grechanyuk N. I. et al. Plasma of electric arc discharge between Cu—Mo electrodes // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. — 2007. — **13**, No. 1. — P. 139—141.
17. Веклич А. М., Осідач В. С. Методика спектроскопічної діагностики плазми електричної дуги // *Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка*. — 2003. — Вип. 5. — С. 12—14.
18. Bockasten K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // *J. of the Optical Society of America*. — 1961. — **51**, No. 9. — P. 943—947.
19. Веклич А. М., Осідач В. С. Визначення електронної концентрації в плазмі електродугового розряду // *Вісник Київського університету. Серія: Фізико-математичні науки*. — 2004. — Вип. 2. — С. 428—435.
20. Бабич И. Л., Борецкий В. Ф., Веклич А. Н., Иванисик А. И. Спектроскопия плазмы электродугового разряда с примесями меди // *Электрические контакты и электроды*. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2008. — С. 4—13.
21. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий. — М.: Наука, 1977. — 800 с.
22. Ralchenko Yu., Kramida A. E., Reader J., and NIST ASD Team (2008). NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.5) [Online]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. — Accessed January 18, 2010. — <http://physics.nist.gov/asd3>.

23. *Wiese W. L., Martin G. A.* Wavelengths and transition probabilities for atoms and atomic ions // NSRDS—National Bureau of Standards. — Washington D.C., 1980. — No. 68. — P. 359—415.
24. *Kock M., Richter J.* Experimental transition probabilities and the solar abundance of copper // *Z. Astrophys.* — 1968. — **69**. — P. 180—192.
25. *Малахов Ю. И.* Времена жизни уровней CuI // *Оптика и спектроскопия.* — 1978. — **44**, № 2. — С. 214—218.
26. *Ошерович А. Л., Плехоткина Г. Л., Обидин В. Р.* Радиационные времена возбужденных состояний атомов и ионов меди // Там же. — 1981. — **50**, № 6. — С. 1046—1049.
27. *Pichler G.* Properties of the oscillator strengths of Cu I and Ag I spectral lines // *Fizika.* — 1972. — **4**. — P. 179—188.
28. *Borges F. O., Cavalcanti G. H. and Trigueiros A. G.* Determination of plasma temperature by a semi-empirical method // *Brazilian J. of Phys.* — 2004. — **34**, No. 4B. — P. 1673—1676.
29. *Zetl F., Neger T. and Jager H.* Relative oscillator strengths of Cu I lines from hook and emission measurements // *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* — 1984. — **17**. — P. 1755—1760.
30. *Krellmann H., Siefert E. and Wehreter E.* Some lifetimes, oscillator strengths and radial integrals in the Cu I spectrum // *Ibid.* — 1975. — **8**, No. 16. — P. 2608—2614.
31. *Cederquist H., Mannervik S., Kisielinski M. et al.* Lifetimes of some excited levels in Cu I and Cu II // *Phys. Scripta.* — 1984. — **8**. — P. 104—106.
32. *Bielski A.* A critical survey of atomic transition probabilities for Cu I // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 1975. — **15**. — P. 463—472.
33. *Островский Ю. И., Пенкин Н. П.* Абсолютные значения сил осцилляторов для линий хрома, марганца и меди // *Оптика и спектроскопия.* — 1957. — **3**, № 3. — С. 193—201.
34. *Migdalek J. and Baylis W. E.* Influence of atomic core polarisation on oscillator strengths for $2S_{1/2}-2P_{1/2,3/2}$ and $2P_{1/2,3/2}-2D_{3/2,5/2}$ transitions in Cu I, Ag I and Au I spectra // *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* — 1978. — **11**, No. 17. — P. L497—L501.
35. *Terpstra J. and Smit J. A.* Measurement of “optical” transition probabilities in the silver atom // *Physica.* — 1958. — **24**. — P. 937—958.
36. *Migdalek J. and Garmulewicz M.* The relativistic ab initio model potential versus Dirac–Fock oscillator strengths for silver and gold isoelectronic sequences // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* — 2000. — **33**. — P. 1735—1743.
37. *Плехоткина Г. Л.* Радиационные времена жизни Ag I, Ag II // *Оптика и спектроскопия.* — 1981. — **51**, № 1. — С. 194—196.
38. *Safronova U. I., Savukov I. M., Safronova M. S., Johnson W. R.* Third-order relativistic many-body calculations of energies and lifetimes of levels along the silver isoelectronic sequence // *Phys. Rev. A.* — 2003. — **68**. — P. 062505(9).
39. *Zheng N., Wang T., and Yang R.* Transition probability of CuI, AgI, and AuI from weakest bound electron potential model theory // *J. of Chem. Phys.* — 2000. — **113**. — P. 6169—6173.
40. *Lavin C., Almaraz M. A., Martin I.* Relativistic oscillator strengths for excited state transitions in some ions of the silver isoelectronic sequence // *Z. Phys. D.* — 1995. — **34**. — P. 143—149.
41. *Lindgard A., Curtis L. J., Martinson I. and Nielsen S. E.* Semi-empirical oscillator strengths for the CuI isoelectronic sequence // *Phys. Scripta.* — 1980. — **21**. — P. 47—62.
42. *Migdalek J. and Baylis W. E.* Influence of core polarisation on oscillator strengths along the copper isoelectronic sequence // *J. Phys. B: Atom. Mol. Phys.* — 1979. — **12**, No. 7. — P. 1113—1123.

43. *Curtis L. J. and Theodosiou C. E.* Comprehensive calculations of $4p$ and $4d$ lifetimes for the Cu sequence / L. J. Curtis // *Phys. Rev. A.* — 1989. — **39**, No. 2. — P. 605—615.
44. *Kerkhoff P., Micali G., Werner K., Wolf A., and Zimmermann P.* Radiative decay and autoionization in the 4D -States of the $3d^94s5s$ configuration in Cu I / H. Kerkhoff // *Z. Phys. A. Atoms and Nuclei.* — 1981. — **300**. — P. 115—118.
45. *Migdalek J. and Baylis W. E.* Relativistic Hartree-Fock oscillator strengths for the lowest $s \rightarrow p$ and $p \rightarrow d$ transitions in the first few members of the Ag(I) and Au(I) isoelectronic sequences, with allowance for core polarization // *J. Quant. Spectr. and Radiat. Transfer.* — 1979. — **22**. — P. 113—125.
46. *Cheng K. and Kim Y.* Excitation energies and oscillator strengths in the silver isoelectronic sequence // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1979. — **69**, No. 1. — P. 125—131.
47. *Fu K., Jogwich M., Knebel M., and Wiesemann K.* Atomic transition probabilities and lifetimes for the CuI system // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* — 1995. — **61**, No. 1. — P. 1—30.
48. *Migdalek J.* Relativistic oscillator strengths for some transitions in Cu(I), Ag(I) and Au(I) // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 1978. — **20**, No. 1. — P. 81—87.
49. *Corliss C. H.* Spectral-line intensities and gf-values in the first spectrum of copper // *J. Research NBS (Phys. and Chem.).* — 1962. — **66A**, No. 6. — P. 497—502.
50. *Riemann M.* Die Messung von relativen und absoluten optischen Übergangswahrscheinlichkeiten des CuI im wandstabilisierten Lichtbogen // *Z. Phys.* — 1964. — **179**. — P. 38—51.
51. *Корлисс Ч. и Бозман У.* Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. — М.: Мир, 1968. — 562 с.
52. *Kurucz R. L., Peytremann E. A.* Table of Semiempirical gf Values <SAO Spec. Report No. 362 (1975)> 1975SAOSR.362.....K\
53. *Komarovskiy V. A., Shabanova L. N.* // Private Communication, 1992. — Atomic database Spectr-W3 for plasma spectroscopy and other applications. — Accessed January 18, 2010. — <http://spectr-w3.snz.ru/index.phtml>
54. *Dickerman P. J. and Deuel R. W.* Measurement of relative transition probabilities for some lines of the CuI, AlI, and MoI spectra // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 1964. — **4**. — P. 817—817.
55. *Kurucz R. L. and Bell B.* // Atomic Line Data Kurucz CD-ROM. — Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1995. — No. 23.
56. *Егоров В. С., Толмачев Ю. А., Ключарев А. Н. и др.* Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов / Под ред. А. Г. Жиглинского. — С.-Пб.: изд-во С.-Петербургского университета, 1994. — 336 с.
57. *Konjevich R., Konjevich N.* Stark broadening and shift of neutral copper spectral lines // *Fizika.* — 1986. — **18**, No. 4. — P. 327—335.
58. *Dimitrijevic M. S., Sahal-Brechot S.* Atomic Data and Nuclear Data Tables. — 2003. — **85**. — P. 269—290.

Спектроскопия плазмы электродугового разряда между композиционными электродами Ag—CuO

И. Л. Бабич, В. Ф. Борецкий, А. Н. Веклич, А. И. Иванистик,
Р. В. Семенишин, Л. А. Крячко, М. Е. Головкова

Методами оптической эмиссионной спектроскопии получены пространственные профили температуры и электронной концентрации в плазме электрической дуги

между электродами из композиционного материала Ag—CuO. Для этого предварительно выполнена селекция спектральных линий CuI и AgI и значений их спектроскопических констант. В предположении наличия в плазме локального термодинамического равновесия на основе экспериментально полученных результатов рассчитаны концентрации паров металлов в плазме. Для проверки значений этих концентраций методом линейной лазерной абсорбционной спектроскопии получены пространственные профили заселенности уровня $^2D_{5/2}$ и концентрации атомов меди в разрядном промежутке. Металлографическими исследованиями обнаружены изменения в топографии поверхности и структуре рабочего слоя электродов вследствие изменения механизма электрической эрозии композиционного материала при увеличении тока.

Ключевые слова: спектроскопические константы, плазма дугового разряда, композиционные электроды Ag—CuO.

Spectroscopy of electric arc plasma between composite electrodes Ag—CuO

I. L. Babich, V. F. Boretskij, A. N. Veclich, A. I. Ivanisik,
R. V. Semenyshyn, L. A. Kryachko, M. Ye. Golovkova

Spatial profiles of temperature and electron density in electric arc plasma between composite electrodes Ag—CuO were obtained by optical emission spectroscopy techniques. For this purpose preliminarily selection of spectral lines CuI and AgI and their spectroscopic data values was realized. The concentration of metal vapour in plasma was calculated on a base of experimentally obtained results in assumption of local thermodynamic equilibrium. To verify values of this concentration, spatial profiles of population of $^2D_{5/2}$ level and copper atom concentration were obtained by linear laser absorption spectroscopy technique. Surface topography changes and structural changes in electrodes working layer were found by metallographic investigations due to the changes of electric erosion mechanism of composite material with increasing of discharge current.

Key words: spectroscopic data, plasma of electric arc discharge, composite electrodes Ag—CuO.