

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

УДК 537.52;533.9:08;533.9:537.872

Веклич Анатолій Миколайович

**ФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМИ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ, ЩО ВІЛЬНО ГОРИТЬ
В ПАРАХ МІДІ**

Спеціальність 01.04.08 - Фізика та хімія плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1997



00751113 (I)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі фізичної електроніки радіофізичного факультету Київського університету імені Тараса Шевченка

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЖОВТЯНСЬКИЙ Віктор Андрійович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор **КИРИЧЕНКО Георгій Сергійович**

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
ЛУКАШЕНКО Володимир Іванович

Провідна організація: Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" (м.Харків)

Захист відбудеться 22 вересня 1997 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.01.17 при Київському університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 252127, Київ-127, просп. акад. Глушкова 6, радіофізичний факультет, ауд. 46.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського університету імені Тараса Шевченка (252033, Київ-33, вул. Володимирська 58).

Автореферат розісланий "28" вересня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. фіз.-мат. наук

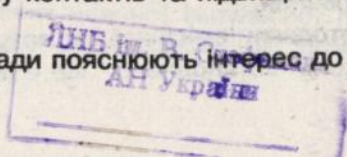
Шкавро А.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електрична дуга з плавкими електродами є основою різноманітних технологічних застосувань. З точки зору фізики плазми найбільш характерною особливістю таких дуг є визначальний вплив електродних парів на властивості дугової плазми. Це зумовлене низьким значенням потенціалу іонізації металів, які найчастіше використовуються в технологічних пристроях на основі таких дуг (залізо - 7.9 еВ, мідь - 7.73 еВ, срібло - 7.58 еВ тощо), по відношенню до складових атмосфери (азот - 14.53 еВ, кисень - 13.62 еВ). Вже незначна домішка (близько 1 %) парів металів електродного походження помітно змінює в достатньо широкому температурному інтервалі електронну концентрацію, що встановлюється в розряді, а отже електропровідність, випромінювальну здатність та процеси переносу в плазмі. Це позначається на просторовому розподілі та абсолютних значеннях всіх основних параметрів плазми: температури, концентрації важкої компоненти тощо. Таким чином, основні властивості плазми електричної дуги з плавкими електродами цілком визначаються "забруднюючими" домішками.

Конкретним прикладом пристроїв, де суттєвими є згадані процеси, можуть бути розмикачі потужних електричних кіл. Між контактами розмикачів може ініціюватися дуга, що приводить до ерозії металу, з якого виготовлений контакт. З технологічних міркувань в таких пристроях, як правило, використовується мідь, срібло або золото. Низьке значення потенціалу іонізації їх атомів порівняно з атомами оточуючого газу сприяє збереженню достатньої провідності у відносно низькотемпературній зоні міжконтактного проміжку розмикача. Вказана обставина різко знижує ефективність роботи таких пристроїв і є суттєвою проблемою продовження ресурсу їх експлуатації та надійності. Можна сподіватись, що детальне дослідження фізичних процесів, які визначають властивості плазми ініційованого таким чином розряду, дозволить оптимізувати склад матеріалу контактів та підвищити надійність розмикачів.

Наведені вище приклади пояснюють інтерес до вивчення



ластивостей плазми, яка містить домішкові компоненти атомів, що легко іонізуються.

Іншою характерною ознакою таких дуг вважається рівноважність плазми. Вона є переважаючою в абсолютній більшості досліджень плазми таких дуг ще з класичних робіт Бурхорна, який встановив спектроскопічними методами наявність локальної термодинамічної рівноваги в плазмі електричної дуги між залізними електродами. Проте, як буде показано, в ряді пізніших досліджень такий підхід приводить до фізично необґрунтованих результатів експериментальних вимірювань радіальної структури дуги. Експериментальні роботи з цієї тематики проводились переважно з використанням стабілізованих стінками дуг з витратним електродом. Застосування таких пристроїв створює очевидні зручності при проведенні просторових вимірювань параметрів плазми дуги, яка в умовах вільного горіння виявляє помітну просторову та часову нестабільність. У випадку ж стабілізованих стінками дуг можна використовувати традиційні методики без особливих вимог до їх швидкодії (тривалість процесу складає декілька хвилин). Проте стабілізована стінками дуга за своєю природою є лише експериментальною моделлю реальної електричної дуги, що вільно горить (наприклад, зварювальної дуги з плавким електродом). Як показує наш досвід, параметри плазми цієї моделі, такі як температура, вміст домішок, концентрації електронів та важкої компоненти, далеко не завжди відповідають реально існуючим в дугах, що вільно горять. Тому виникає питання адекватності моделі і реального об'єкта досліджень.

Мета даної роботи - експериментальне дослідження фізичних особливостей плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, з використанням швидкісних засобів вимірювань та методик.

Наукова новизна роботи.

1. Розроблена і реалізована швидкісна (характерний час - 1 нс) методика діагностики плазми, на основі одночасної реєстрації просторового і спектрального розподілу її випромінювання.

Методами емісійної та лазерної абсорбційної оптичної спектроскопії встановлено, що в приелектродних областях і на

периферії електричної дуги, що вільно горить в парах міді, на відміну від відомих стабілізованих стінками дуг, плазма проявляє нерівноважні властивості.

2. Показано, що порушення локальної термодинамічної рівноваги в плазмі електричної дуги, що вільно горить в парах міді, визначається наявністю різких градієнтів її параметрів. Механізмом, відповідальним за таке порушення, є перенесення резонансного випромінювання. Врахування такого механізму в рамках зіткнувально-випромінювальної моделі приводить до задовільного результату в припущенні часткової локальної термодинамічної рівноваги.

3. Вперше встановлено, що просторові структури параметрів плазми електричних дуг в парах міді - що вільно горить та стабілізованої стінками - суттєво різні. Відповідно, стабілізована стінками дуга, як модельне джерело, може мати лише обмежене застосування при дослідженні процесів в плазмі електричної дуги, що вільно горить між мідними електродами.

4. На основі експериментальних досліджень плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, встановлені оптимальні значення параметрів штарківського уширення спектральних ліній $\text{CuI } \lambda = 515.3 \text{ нм}$ та $\lambda = 510.5 \text{ нм}$.

Наукове та практичне значення роботи.

Одержані результати важливі для розуміння фізичних процесів, що визначають стан плазми електричних дуг.

Розроблені методики можуть бути застосовані для діагностики плазми цілого ряду плазмових пристроїв, що містять пари міді. Основні ідеї запропонованих методик можуть бути реалізовані також при дослідженні електричних дуг, що вільно горять в парах інших металів.

Отримані уточнені значення спектроскопічних констант спектральних ліній міді, які мають важливе значення для спектроскопії плазми.

Запропонований швидкісний спектрометр на основі астигматичної оптики може бути використаний в спектроскопії швидкоплинних та нестационарних плазмових процесів: експериментальних дослідженнях щільної імпульсної плазми в квазістационарних плазмових прискорювачах, пристінкової

плазми в токамаках, плазми зварювальних дуг, плазмотронів тощо.

Результати досліджень можуть бути корисними при проектуванні різних пристроїв, що базуються на використанні електричних дуг, що вільно горять між плавкими електродами.

Отримані результати можуть бути використані при вивченні фізичних процесів в дугах широкого кола технологічних застосувань, у тому числі в комутуючих пристроях електричних кіл.

Достовірність одержаних результатів забезпечується використанням комплексу сучасних методів досліджень, стандартної вимірювальної апаратури, використанням апробованих методів теоретичного аналізу та сучасних обчислювальних засобів, а також відповідністю експериментальних даних і розрахованих залежностей.

Положення, що виносяться на захист:

1. Розроблена та реалізована методика швидкісної спектрометрії плазми на основі застосування астигматичної оптики забезпечує одночасну реєстрацію спектрального та просторового розподілу випромінювання і повністю задовольняє потребам спектроскопії нестационарних у часі та просторі плазмових об'єктів, у тому числі електричних дуг, що вільно горять.

2. Плазма електричної дуги, що вільно горить в парах міді, в приелектродних областях та на периферії розряду, на відміну від відомих стабілізованих стінками дуг, має нерівноважні властивості.

3. Порушення локальної термодинамічної рівноваги в плазмі електричної дуги, що вільно горить в парах міді, визначається наявністю різких градієнтів її параметрів і відповідно просторовою неоднорідністю її випромінювальних та поглинальних характеристик. Механізмом, відповідальним за порушення рівноваги, є перенесення резонансного випромінювання, яке обумовлює недозаселеність основного рівня атома міді по відношенню до рівноважного; таким чином, в плазмі реалізується часткова локальна термодинамічна рівновага.

4. Штарківське уширення спектральної лінії $\text{CuI } \lambda =$

= 515.3 нм при концентрації електронів $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та температурі плазми $T = 10^4 \text{ К}$ становить $\Delta\lambda^* = 0.346 \text{ нм}$, що відповідає розрахунку Конґевіс R. та Конґевіс N. Для лінії CuI $\lambda = 510.5 \text{ нм}$ це уширення складає $\Delta\lambda^* = 0.21 \text{ нм}$.

Особистий внесок автора дисертації. Дисертація є підсумком результатів експериментальних досліджень, виконаних автором особисто. За безпосередньою участю автора розроблено, створено та випробувано оригінальний швидкісний спектрометр; реалізовані методики вимірювання та обробки результатів. Аналіз та узагальнення отриманих результатів проводились автором як особисто, так і за участю інших співавторів.

Апробація роботи. Основні результати досліджень по темі дисертації доповідались та обговорювались на III Всесоюзній конференції з фізики газового розряду (Київ, 1986), XX Всесоюзному з'їзді з спектроскопії (Київ, 1988), XI Всесоюзній конференції з генераторів низькотемпературної плазми (Новосибірськ, 1989), VII Всесоюзній конференції з плазмових прискорювачів та іонних інжекторів (Харків, 1989), XIX Міжнародній конференції з явищ в іонізованих газах (Белград, 1989), XI та XII Європейських секційних конференціях з атомної та молекулярної фізики іонізованих газів (ESCAMPIG) (С.Петербург, 1992 та Нідерланди, 1994), конференції "Плазмотехнологія-95" (Запоріжжя, 1995), XII Міжнародному симпозіумі з хімії плазми (Міннеаполіс, 1995), XXIII конференції європейського фізичного товариства з контрольованого синтезу та фізики плазми (Київ, 1996), III Азіатсько-Тихоокеанській конференції з питань науки та технології плазми (Токіо, 1996).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 19 друкованих робіт, у тому числі 3 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, заключення, переліку посилань з 92 найменувань, додатка; викладена на 123 сторінках, 2 таблиці та 40 рисунків включно.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень,

сформульовано мету дисертаційної роботи, а також відображено наукову новизну, основні результати та практичне значення роботи. В цьому ж розділі наведено короткий зміст роботи та основні положення, що виносяться на захист.

Перший розділ є оглядовим. У ньому представлено огляд літератури по темі дисертації, в якому коротко розглянуті роботи по вивченню властивостей плазми електричної дуги в парах металів електродного походження. Як правило, експериментальні дослідження параметрів такої плазми проводились з використанням розрядної камери типу Меккера, або її подальшої модифікації - MEVARC, які забезпечують необхідну просторово-часову стабільність дуги. Достатня ж осьова симетрія цієї стабілізованої стінками дуги виправдовує застосування незбурюючих класичних методів оптичної спектrometerії. Виконані дослідження традиційно базуються на припущенні щодо існування в плазмі локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР).

Характерними в плазмі таких розрядів є просторові профілі домішкової компоненти електродного походження: максимальне значення концентрації домішок спостерігається на осі розряду безпосередньо біля плавкого електроду (як правило, аноду) на відстані $z \leq 0.5$ мм. Причому, розрахований в припущенні ЛТР, відносний вміст металевих домішок в плазмі в цій області не перевищував 1 %. При віддаленні від аноду ($z > 0.5$ мм) концентрація домішок поступово зменшується, а її радіальний профіль має незначний максимум, зміщений від осі на периферію. Основним механізмом, що визначає таку радіальну структуру плазми стабілізованих дуг в парах електродного матеріалу, вважалась амбіполярна дифузія.

Плазма ж електричних дуг, що вільно горять між плавкими електродами, систематично не досліджувалась. Відомі тільки окремі роботи, присвячені визначенню температури плазми.

У другому розділі розглядаються методи одержання та діагностики плазми електричної дуги, що вільно горить між мідними електродами. Досліджувалась плазма електричної дуги, що вільно горить у відкритій атмосфері між двома вертикально розміщеними мідними електродами -

циліндричними стержнями діаметром 6 мм. Міжелектродний проміжок змінюється в інтервалі від 2 до 8 мм. Для запобігання інтенсивного розплавлення електродів реалізовано квазістаціонарний режим дугового розряду: на дугу з силою постійного струму 3.5 А накладались імпульси амплітудою 30 А і тривалістю 30 мс.

При дослідженні параметрів плазми такої електричної дуги використовуються оптичні методи діагностики. Розроблений та реалізований швидкісний спектрометр на основі дисектора електростатичного типу ДИ-14. Значний астигматизм монохроматора МДР-12 у даному спектрометрі дозволив вилучити із схеми додаткову фокусуючу оптику: фотокатод дисектора безпосередньо суміщується з сагітальною фокальною площиною монохроматора за його вихідною щілиною, яка розташована у меридіональній фокальній площині. Таке технічне рішення дає змогу реєструвати просторовий розподіл інтенсивностей випромінювання вздовж вхідної спектральної щілини монохроматора у заданому спектральному діапазоні. У поєднанні з інтерферометром Фабрі-Перо спектрометр забезпечує одночасну реєстрацію просторового та спектрального розподілу інтенсивностей випромінювання; тобто, дозволяє вимірювати контури спектральних ліній в різних просторових точках плазмового об'єму. Характерні осцилограми представлені на рис.1, де показані радіальний

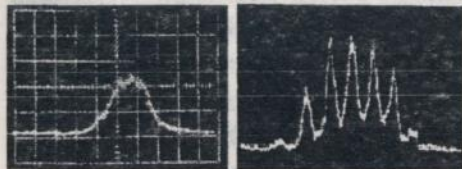


Рис.1

розподіл випромінювання електричної дуги для однієї із спектральних ліній міді (а) та інтерферограма, яка містить у собі інформацію одночасно про просторовий та спектральний розподіл

інтенсивності лінії (б).

Таким чином, швидкісний спектрометр цілком задовольняє вимогам даного експерименту, зокрема, потребам спектроскопії такого нестационарного у часі та просторі плазмового об'єкту, як електрична дуга, що вільно горить в парях міді.

Детально розглядається метод вимірювання контурів спектральних ліній випромінюючої щільної плазми.

Запропонована оригінальна методика вимірювання напівширин ліній, порівняльних за величиною з вільним спектральним інтервалом інтерферометра Фабрі-Перо.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, методами емісійної оптичної спектроскопії. Вивчались радіальні профілі температури, концентрації електронів, атомів міді. Інтерпретація отриманих результатів проводилась в припущенні ЛТР.

В діагностиці плазми електричної дуги з мідними електродами як спектроскопічний елемент природньо використати саме мідь, що потрапляє в розрядний проміжок в результаті ерозії електродів.

Радіальні профілі температури $T(r)$ плазми електричної дуги визначаються за методом відносних інтенсивностей спектральних ліній $\text{CuI } \lambda = 521.8$ та 510.5 нм.

Для вимірювання просторового розподілу електронної концентрації N_e в плазмі використовуються дві незалежні та взаємодоповнюючі методики: по штарківському уширенню спектральної лінії $\text{CuI } \lambda = 515.3$ нм та по абсолютній інтенсивності лінії $\text{CuI } \lambda = 465.1$ нм. Відомі з літератури дані про напівширину лінії $\lambda = 515.3$ нм, зумовлену квадратичним ефектом Штарка, відрізняються між собою майже на порядок. Саме тому вимірювання радіального розподілу контурів спектральної лінії $\lambda = 515.3$ нм були доповнені вимірюваннями відповідного розподілу абсолютної інтенсивності I_a спектральної лінії $\lambda = 465.1$ нм, енергія збудження E_a верхнього рівня якої складає 7.74 еВ. Саме для цієї лінії, як видно із співвідношення (1), інтенсивність виявляється пропорційною квадрату N_e :

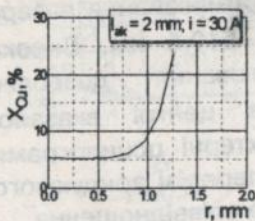
$$I_a \sim N_a T^{-3/2} \exp[(E_i - E_a)/kT] \sim N_e^2 T^{-3/2}, \quad (1)$$

де N_a - концентрація атомів міді, $E_i = 7.73$ еВ - потенціал іонізації атома міді, k - постійна Больцмана. Співставлення результатів вимірювання N_e за різними методиками в одному із режимів роботи дуги, дало можливість встановити, що параметр уширення спектральної лінії $\text{CuI } \lambda = 515.3$ нм,

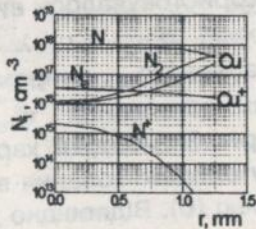
зумовлений квадратичним ефектом Штарка, найкращим чином відповідає даним, запропонованим в розрахунковій роботі Кон'євіч Р. та Кон'євіч N. А саме, для $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і $T = 10^4 \text{ K}$ напівширина складає $\Delta\lambda^* = 0.346 \text{ нм}$.

Одержані експериментально радіальні профілі температури та електронної концентрації дозволяють розрахувати в припущенні ЛТР компонентний склад усіх присутніх в плазмі частинок.

На рис 2. приведений приклад визначеного у такий спосіб радіального розподілу відносного вмісту міді (до азоту) X_{Cu} (а) в середньому перерізі електричної дуги з міжелектродним проміжком $I_{\text{ак}} = 2 \text{ мм}$ і силою струму $I = 30 \text{ А}$,



а



б

Рис.2

а також, складових N_i азотно - мідної плазми, а саме: концентрації електронів N_e , молекул азоту (N_2), атомів та іонів азоту (N , N^+), атомів та іонів міді (Cu , Cu^+) (б).

Аналогічно отримані подібні радіальні розподіли для плазми електричної дуги з параметрами: $I_{\text{ак}} = 2 \text{ мм}$, $I = 3.5 \text{ А}$ та $I_{\text{ак}} = 8 \text{ мм}$, $I = 3.5; 30 \text{ А}$.

Аналізуючи одержані в припущенні ЛТР результати, треба звернути увагу на аномальне зростання вмісту парів металу на периферії дуги. Причому, якщо в плазмі дуги з проміжком $I_{\text{ак}} = 8 \text{ мм}$ і силою струму 30 А це нефізично високе значення вмісту спостерігається лише на периферії розряду, то у випадку дуги з проміжком $I_{\text{ак}} = 2 \text{ мм}$ і тією ж силою струму (30 А) вміст міді вже на осі складає більше 5 %. Хоча, як раніше зазначалось, при дослідженні плазми стабілізованої стінкою дуги в парах міді, що виконувалось в припущенні про існування в плазмі ЛТР, вміст атомів металевих домішок не перевищував 1 % навіть безпосередньо біля плавкого електроду.

Вказана обставина дозволяє зробити такі взаємовиключні висновки:

- або плазма вільноіснуючої електричної дуги в припущенні ЛТР на відміну від стабілізованої стінкою характеризується аномально високим вмістом парів металу на периферії дуги та поблизу електродів;

- або ж плазма у вказаних областях не є рівноважною.

Для перевірки одержаних результатів на наступному етапі проведений додатковий цикл досліджень з використанням методу, незалежного від існування в плазмі ЛТР.

В четвертому розділі викладені результати експериментальних вимірювань радіальних профілів заселеності метастабільного рівня N_m атомів міді в електричній дузі, що вільно горить, з використанням незалежного від наявності в плазмі ЛТР методу - лазерної абсорбційної спектроскопії.

Як зондуєuche використовувалось випромінювання лазера на парах міді на довжині хвилі $\text{CuI } \lambda = 510.5 \text{ нм}$. Висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє вимірювати коефіцієнт поглинання κ_0 в центрі вказаної спектральної лінії. На рис.3 наведені характерні осцилограми просторового розподілу випромінювання в перерізі зондуєучого пучка без дуги (а) та з нею (б). Відповідно до співвідношення



Рис.3

$$\kappa_0 = A (f_{kl} \lambda_{kl}^2 / \Delta \lambda) \cdot N_m \quad (2)$$

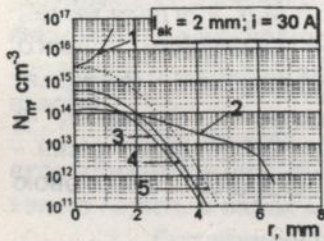
можна розрахувати просторові розподіли заселеності метастабільного рівня N_m атомів міді, маючи профілі κ_0 та зробивши

додаткові оцінки відповідних профілів напівширини $\Delta \lambda$ спектральної лінії $\lambda = 510.5 \text{ нм}$. На рис. 4,б - 6,б приведені графіки таких оцінювальних просторових розподілів напівширини спектральної лінії 510.5 нм:

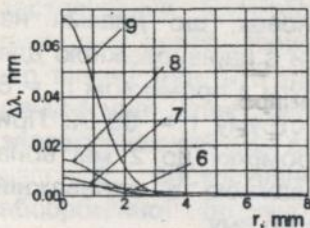
- крива 6 одержана виходячи з раніше визначеного температурного профіля за умови, що домінуючим в уширенні є ефект Доплера;

- криві 7 та 8 одержані також з раніше визначеного профілю електронної концентрації за умови, що домінуючим в уширенні є квадратичний ефект Штарка з параметрами

уширення, взятими відповідно, з робіт Konjevic R., Konjevic N. та Fleurier C.



а



б

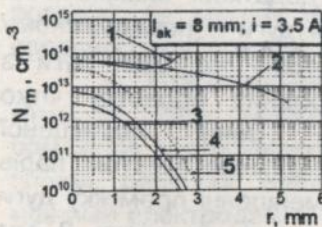
Рис.4

На рис. 4,а - 6,а показані розраховані відповідні профілі заселеності метастабільного рівня атомів міді:

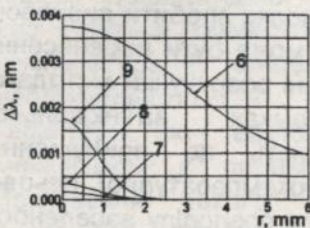
- крива 1 одержана за результатами емісійної оптичної спектроскопії в припущенні ЛТР;

- крива 2 одержана за умови, що уширення визначається ефектом Доплера;

- криві 3 та 4 одержані за умови, що уширення визначається квадратичним ефектом Штарка з параметрами уширення з робіт Konjevic R., Konjevic N. та Fleurier C, відповідно.



а

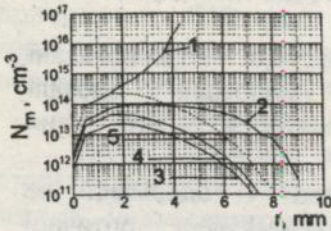


б

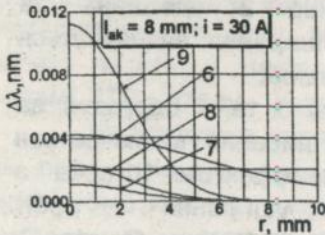
Рис.5

Для електричної дуги $I_{ak} = 8$ мм і $i = 3.5$ А результати вимірювання незалежними методиками співпадають, що підтверджує існування в такій плазмі ЛТР. Причому співпадання саме кривої 2 з кривою 1 закономірне, бо в цьому режимі роботи дуги уширення спектральної лінії 515.3 нм визначається саме ефектом Доплера.

Додаткові детальні вимірювання профілю спектральної лінії CuI $\lambda = 510.5$ нм в одному із режимів дуги з використанням раніше згаданої методики, дозволило встановити, що штарківський параметр уширення, взятий в роботі Konjevic R., Konjevic N., повинен бути збільшений,



а



б

Рис.б

принаймні, на порядок і становить $\Delta\lambda^* = 0.21$ нм. Тому, з огляду на це, для нового значення цього параметра розраховані радіальні профілі напівширини - крива 9, та заселеності метастабільного рівня - крива 5 (показана штриховою лінією).

Таким чином, аналізуючи графіки на рис. 4 - 6, можна зробити висновок, що плазма на периферії дуги є нерівноважною для електричної дуги з проміжком $I_{ak} = 8$ мм і силою струму $I = 30$ А. При зменшенні проміжку до 2 мм вона стає нерівноважною в переважній частині свого об'єму.

Ця обставина змушує

говорити про особливу поведінку плазми в приелектродних областях. Саме тому були проведені додаткові вимірювання розподілу інтенсивності випромінювання дуги в повздовжньому напрямку на довжині хвилі $\text{CuI } \lambda = 465.1$ нм. Для дуги з проміжком $I_{ak} = 8$ мм в приелектродних областях чітко спостерігаються різко неоднорідні зони підвищеної інтенсивності випромінювання з максимальним вмістом парів міді та електронної концентрації. При зменшенні проміжку дуги до 4 мм ці зони об'єднуються і вже при проміжку 2 мм утворюють одну різко неоднорідну зону з інтенсивним випромінюванням. Вказана обставина дозволяє зробити висновок, що причиною порушення ЛТР в плазмі може бути перенесення резонансного випромінювання. Проведені розрахунки методами числового моделювання в рамках зіткнувально-випромінювальної моделі підтверджують це припущення. Перенесення випромінювання з високотемпературної осьової зони спричиняє порушення рівноважного розподілу заселеності рівнів атома міді. Тобто, реалізується часткова локальна термічна рівновага (ЧЛТР), коли основний та метастабільний рівні заселені згідно з температурою на осі розряду,

а інші - з місцевою температурою. Врахування механізму перенесення випромінювання призводить до згладжування на периферії нефізичного "катастрофічного" зростання як заселеності метастабільного рівня зокрема, так і вмісту міді взагалі.

В заклученні на основі аналізу результатів експериментальних досліджень плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, формулюються такі висновки:

1. Експериментальні методи діагностики електричних дуг, що вільно горять між плавкими електродами, потребують застосування швидкісних методів реєстрації просторового розподілу випромінювання; для дослідження електричної дуги, що вільно горить в парах міді, запропоновано та реалізовано швидкісний спектрометр на основі астигматичної оптики, задовольняючий цим вимогам.

2. Застосування комплексу емісійної та лазерної абсорбційної оптичної спектроскопії дозволило дослідити плазму електричної дуги незалежно від її стану.

3. Встановлено, що плазма електричної дуги, що вільно горить в парах міді, в приелектродних областях і на периферії розряду, на відміну від відомих стабілізованих стінками дуг, проявляє нерівноважні властивості.

4. Стабілізована стінками дуга, зокрема з розрядною камерою типу Меккера або MEVARC, може мати лише обмежене застосування, як модель для дослідження процесів в плазмі реальної електричної дуги, що вільно горить між мідними електродами.

5. Порушення локальної термодинамічної рівноваги в плазмі досліджуваної електричної дуги, що вільно горить, визначається наявністю різких градієнтів її параметрів, таких як температура T , концентрація електронів N_e та просторовою неоднорідністю її випромінювальних та поглинальних характеристик. Відповідальним за порушення рівноваги механізмом є перенесення резонансного випромінювання. Врахування такого механізму в рамках зіткнувально-випромінювальної моделі приводить до задовільного результату. Модель часткової локальної термодинамічної рівноваги найбільш повно відображає характер стану плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, в

досліджуваних режимах.

6. Проведено аналіз спектроскопічних параметрів деяких спектральних ліній атома міді CuI. Параметри уширення спектральної лінії CuI $\lambda = 515.3$ нм, зумовленого квадратичним ефектом Штарка, в досліджуваних режимах існування плазми електричної дуги, що вільно горить в парах міді, найкращим чином відповідають даним, запропонованим в розрахунковій роботі Kopjević R., Kopjević N. Параметри для спектральної лінії CuI $\lambda = 510.5$ нм, що відомі з літератури, занижені, як мінімум, на порядок.

Основні матеріали дисертації опубліковані в роботах:

1. Андреева Л.И., Веклич А.Н., Гулый А.П. и др. Электронно-оптический регистратор спектров излучения ЭОР-2М // Приборы и техн. эксперим. 1987. N 1. С.241.

2. Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Скоростной плазменный томографический спектрометр // ЖПС.1989. Т.50, N 4. С.565-570.

3. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Исследование роли самопоглощения излучения в свободнгорящих дугах в парах меди методами лазерной диагностики // ЖПС. 1989. Т. 51, N 4. С. 571-575.

4. Веклич А.Н., Жовтянский В.А., Кайдалов С.А., Пчелов Е.М. Скоростная томографическая спектрометрия высокого разрешения // Физика плазмы.1992. Т.18, в.2. С. 267-269.

5. А.с.1072149 (СССР). Система токопроводов питания диодов импульсного электронного умножителя / Веклич А.Н., Жовтянский В.А., Новик О.М., Подвысоцкий В.Т. Опубл. в Б.И. 1984. N5. С.190.

6. А.с. 1420386 (СССР) Скоростной спектрометр / Веклич А.Н., Жовтянский В.А., Новик О.М. Опубл. в Б.И. 1988. N32. С.181.

7. А.с.1763903 МКИ⁵G0I J3/12 Скоростной спектрометр / Веклич А.Н., Жовтянский В.А., Новик О.М. Опубл.в Б.И. 1992. N35.

8. Babich I.L., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A. Self-absorption in the outer regions of a free-burning arc between copper electrodes // XIX Int. Conf. on Phenomena In Ionized Gases. Contr. Papers, Belgrade, 10-14 July 1989. Belgrade.1989. V.2.

P.308-309.

9. Babich I.L., Cheredarchuk A.I., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A. Nonequilibrium properties of electrical arc plasma and combined methods of its diagnostic // 12th International Symposium on Plasma Chemistry. ISPC 12. 1995. Minneapolis. Proceedings. V.IV. P.1861-1866.

10. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Физические особенности плазмы свободнотгорящей электрической дуги в парах меди // Плазмотехнология-95. Сб. науч. трудов. Запорожье. 1995. С.14-17.

11. Babich I.L., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A. The Fast Scanning Interferometry of High Density Plasma. //23nd EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Kiev. 24-28 June 1996. Contributed Papers. Part III. P.999-1002.

12. Babich I.L., Cheredarchuk A.I., Veklich A.N. and Zhovtyansky V.A. Spectroscopy Diagnostics of Nonequilibrium Thermal Plasma. // The 3rd Asia-Pacific Conf. on Plasma Science & Technology, Tokyo, July 15-17, 1996. Conference Proceedings. Vol.I. P. 235-240.

13. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Экспериментальное исследование радиальной структуры нестационарного разряда в парах меди // III Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Тез. докл. Киев. 1986. Ч.II. С. 162-164.

14. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Высокоскоростная томографическая лазерная спектроскопия и интерферометрия возбужденных атомов свободнотгорящего разряда // XX Всесоюз. съезд по спектроскопии. Тез. докл. Киев. 1988. ч.II. С.468.

15. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Особенности диагностики плазмы по спектральным линиям примесной меди // VII Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам, Харьков, 26-28 сентября 1989. Тез. докл. Харьков. 1989. С.188-189.

16. Бабич И.Л., Веклич А.Н., Жовтянский В.А. Радиальная структура свободнотгорящей дуги между медными электродами // XI Всесоюз. конф. низкотемпературной плазмы; Тез. докл. Новосибирск. 1989. ч.I. С.228-229.

17. Веклич А. Н. , Жовтянский В. А. Оптическая диагностика плазмы нестационарных электрических дуг // XI Всесоюз.конф.по генераторам низкотемпературной плазмы. Тез.докл. Новосибирск. 1989. Ч.II. С.169-170.

18. Babich I.L., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A. The comparison of the CuI 515.3 nm spectral line Stark broadening parameters with the results of spectroscopic researches of arc plasma in the copper vapour // ESCAMPIG 92. Abstracts of invited lecture and cont.pap. St.Petersburg. Russia. 1992. V.16F P.184-185.

19. Babich I.L., Veklich A.N., Zhovtyansky V.A. , Pankin A.Yu., Cheredarchuk A.I. Combined spectroscopy and simulation methods of free-burning arc plasma investigation // ESCAMPIG 94. Abstracts of invited and contributed papers. The Netherlands. 1994.V.18E. P.310-311.

SUMMARY

Veklich A.N. The physics peculiarities of the free-burning electric arc plasma in the copper vapour.

This thesis is for the degree of Candidate of Science in Physics and Mathematics. Speciality: 01.04.08 - Plasma Physics and Chemistry. Taras Shevchenko Kiev University, Kiev, 1997.

Manuscript where results 19 scientific work are stated is defended. The dissertation is devoted to the experimental investigation of physics peculiarities of the free-burning electric arc plasma in the copper vapour by fast scanning device and techniques.

It is found, the free-burning electric arc plasma in copper vapour at the electrode vicinity areas and at the discharge periphery, as opposed to the known wall-stabilized arc, exhibits nonequilibrium properties. The deviation from equilibrium in plasma is determined by presence of sharp gradients of its parameters and according by the spatial nonuniformities of its emission and absorption features. The probable mechanism, responsible for this deviation from equilibrium, is the resonance radiation transfer; thus, the partial local thermodynamics equilibrium is realized.

In investigated modes of the free-burning electric arc plasma in copper vapour the Stark broadening parameters of spectral lines CuI $\lambda = 515.3$ nm and $\lambda = 510.5$ nm are specified.

АННОТАЦІЯ

Веклич А.Н. Фізическіе особенності плазми свободногогорячої електрическої дуги в парах меди.

Дисертація на соискание ученої степені кандидата фізико-математических наук по спеціальності 01.04.08 - фізика і хімія плазми. Київський університет імені Тараса Шевченка, Київ, 1997.

Защищається рукопись, в котрій изложены результати 19 научних работ. Дисертація посвящена експериментальному дослідженню фізических особенностей плазми свободногогорячої електрическої дуги в парах меди с применением скоростных средств измерений і методик.

Установлено, що плазма свободногогорячої електрическої дуги в парах меди в приелектродних областях і на периферії розряду, в отличие от известных стабилизированных стенками дуг, проявляє неравновесніе свойства. Нарушение равновесия в плазме определяется наличием резких градиентов ее параметров і соответственно пространственной неоднородностью ее излучательных і поглотительных характеристик. Механизмом, ответственным за нарушение равновесия, является перенос резонансного излучения, в результате чего, реализуется частичное локальное термодинамичное равновесие.

В исследуемых режимах существования плазмы свободногогорячої електрическої дуги в парах меди уточнены параметры штáркового уширения спектральных линий атома меди CuI $\lambda = 515.3$ нм і $\lambda = 510.5$ нм.

Ключові слова: електрична дуга, пари міді, плазма, оптична спектроскопія, швидкісні методи діагностики, нерівноважність.

Підписано до друку 3.07.1997 р. Формат 60x84/16. Друк офсетний.

Зам. 7-0687 Тираж 100 прим.

Надруковано у "Поліграфцентрі Київського університету ім. Тараса Шевченка"

252017, Київ, бульвар Т.Шевченка, 14

тел. 224-01-05

AB 38.396