

**О.А. Гончаров, В.Ю. Баженов,
А.М. Добровольський, І.М. Проценко, І.В. Найко**

Інститут фізики НАН України,
просп. Науки, 46, Київ, 03028, Україна,
+380 44 525 2329, gonchar@iop.kiev.ua

НОВІТНІ ДОСЯГНЕННЯ В РОЗРОБЦІ ЕРОЗІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ПЛАЗМИ



Вступ. Ерозійні джерела плазми забезпечують високопродуктивне формування іонно-плазмових потоків шляхом випарювання матеріалу електродів та мають широке застосування у науці й промисловості для синтезу різноманітних покриттів, модифікації поверхні матеріалів та створення джерел заряджених частинок.

Проблематика. На сьогодні проблемою у створенні високоякісних покриттів є їх обмежена однорідність, що зумовлено присутністю мікрокрапельної фази в іонно-паровому потоці ерозійних джерел плазми.

Мета. Створення нового покоління ерозійних плазмових джерел, зокрема, вакуумно-дугових, вільних від мікрокрапель, для ефективного синтезу високоякісних покриттів з заданими функціональними властивостями.

Матеріали й методи. Для створення джерел чистої металеві плазми було запропоновано та реалізовано оригінальну ідею використання аксіально-симетричної плазмооптичної системи для введення додаткової енергії у потік щільної багатокомпонентної металеві плазми за рахунок ефективного самоузгодженого утворення швидких електронів. Такі енергетичні електрони здатні ефективно впливати на плазмовий потік, що проходить крізь систему, випаровуючи та руйнуючи мікрокраплі, які суттєво обмежують використання ерозійних джерел щільної плазми для технологічних розробок.

Результати. Розроблено концептуальний проект комбінованого джерела, яке містить у одному пристрої вакуумно-дугове плазмове джерело та аксіально-симетричну циліндричну електростатичну плазмооптичну лінзу. Запропонована розробка є оригінальною та не має аналогів у світі.

Висновки. Наведені результати дослідження відкривають широку перспективність практичного застосування запропонованої ідеї для усунення небажаних мікрровключень зі збереженням перенесення маси у потоці металеві плазми, що формується вакуумно-дуговим джерелом. Поєднання плазмові лінзи з вакуумно-дуговим джерелом іонів відкриває нові можливості керування низькоенергетичним плазмовим потоком, що розповсюджується у напрямку до підкладки (при нанесенні плівок) або емісійної сітки (при генерації іонного пучка).

Ключові слова: ерозійне джерело плазми, щільна плазма, плазмооптична система, мікрокраплі.

Ерозійні джерела плазми — це широкий клас джерел іонно-плазмових потоків, зокрема вакуумно-дугові та з генерацією лазером, що широко використовуються у науці та промисловості для синтезу різноманітних покриттів та створення джерел заряджених часток. Ерозійні джерела плазми знаходять застосу-

вання в індустриальних методах модифікації поверхні конструктивних та декоративних матеріалів. Водночас, їх використання у створенні високоякісних покриттів, особливо з високою однорідністю на нанорівні та покриттів для оптичних застосувань, обмежується присутністю в потоці мікрокрапельної фази. Проблемі присутності мікрровключень в іонно-паровому потоці ерозійних джерел плазми (вакуумно-дугових) та його очищення від них,

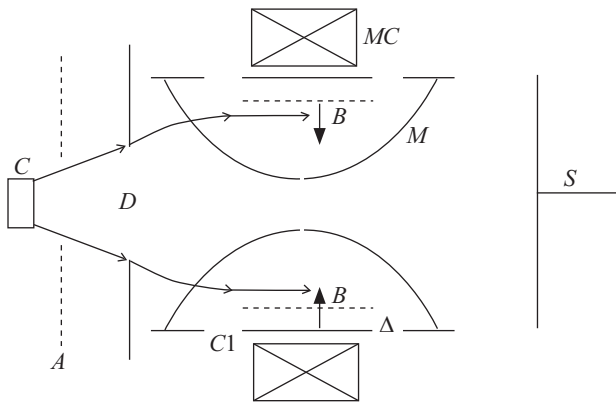


Рис. 1. Схематичне зображення системи для усунення мікрокрапель з плазмового потоку: *C* – катод; *A* – анод; *D* – діафрагма; *MC* – магнітна котушка; *M* – магнітні силові лінії; Δ – просторовий шар, в якому утворюється сильне електричне поле; *C1* – циліндричний електрод, який утворює електронний пучок під дією вторинної іонно-електронної емісії; *S* – підкладка для нанесення покриття

присвячено чимало наукових та технічних досліджень [1–6], де охарактеризовано основні схеми фільтрів та способи запобігання присутності крапельної фази у робочому потоці. Проте, наявні системи фільтрації, будуються, головним чином, на сепарації (видаленні) речовини крапельної фази з потоку. Такий підхід викликає суттєву втрату продуктивності технологічного процесу.

В Інституті фізики НАН України (ІФ НАНУ) було запропоновано ідею побудови системи фільтрації, що не передбачає видалення речовини крапельної фази з потоку, а, навпаки, полягає у збагаченні продуктивності іонно-плазмової обробки. Ключовим моментом зазначеної розробки є введення за допомогою пучка швидких електронів додаткової енергії у потік металевої плазми, що проходить крізь систему, задля ефективного випаровування та руйнування мікрокрапель. Такі енергетичні електрони можуть формуватися самоузгоджено при проходженні плазмового потоку завдяки вторинній іонно-електронній емісії з циліндричних електродів плазмооптичної системи.

Плазмооптичні системи (плазмові лінзи), що ґрунтуються на фундаментальній плазмо-

динамічній ідеї магнітної ізоляції електронів та еквіпотенціалізації силових ліній ізолюючого магнітного поля, успішно зарекомендували себе під час фокусування та керування сильнострумовими пучками іонів та іонно-плазмовими потоками [7]. Використання таких систем у режимі генерації швидких електронів може бути перспективним для використання як модифікованих плазмооптичних фільтрів, здатних для усунення мікрокрапель з потоків ерозійних плазмових джерел.

Теоретичні припущення та експериментальні демонстрації, проведені в ІФ НАНУ, показали, що запропонована ідея для усунення мікрокрапель є інноваційною та ефективною при розробці новітньої плазмової системи для фільтрації мікрокрапель (або зменшення їх до нанорівня) з потоку щільної металевої плазми, що утворюється джерелами ерозійної плазми, такими як вакуумна дуга та джерело лазерної плазми. На сьогоднішньому етапі дослідження в експериментах використано вакуумно-дугове джерело плазми. Перші наукові результати, що свідчать про перспективність та високий практичний потенціал цієї ідеї, наведено в циклі робіт [8–12].

Нижче викладено результати досліджень різних режимів роботи системи вакуумно-дугового джерела плазми з плазмооптичним фільтром, які спричинили появу концептуального проекту оптимізованої збірки «вакуумно-дугове плазмово джерело – модифікована циліндрична плазмова лінза з нееквіпотенціальними електродами».

Після того, як в роботі [1] було детально розглянуто всі можливі енергетичні канали взаємодії часток багатоконпонентної плазми з рідкими металевими макрочастинками з типовими діаметрами 1–10 мкм, було висловлено припущення, що за рахунок власних ресурсів плазмовий потік від вакуумної дуги не може випарювати краплі в процесі транспортування на підкладку при нанесенні покриттів та синтезі тонких плівок. Не зосереджуючись на подробицях різних пропозицій щодо вве-

дення додаткової енергії у потік низькотемпературної щільної плазми, нижче наведено суть запропонованого оригінального та фізично прозорого підходу. Схематичне зображення новітньої плазмо-оптичної системи з використанням електронного пучка для ефективного усунення мікрокрапель у потоці металеві плазми, що розповсюджується у системі, наведено на рис. 1. Сильно іонізована багатокомпонентна плазма з мікрокраплями утворюється вакуумно-дуговим джерелом з катодом C і анодом A . Зазвичай, перед виходом з апертури джерела, потік проходить через кілька екранів. Екрани та апертура типово присутні у таких пристроях та видаляють певну частину крапель. Відразу після апертури потік потрапляє у плазмооптичний пристрій. Прикладення від'ємного потенціалу на центральний електрод $C1$ призводить до формування шару з сильним електричним полем, яке, головним чином, спрямовано у напрямку радіусу. Суттєво менше електричне поле проникає всередину потоку металеві плазми. Такі умови призводять до формування біля електроду $C1$ просторового шару товщиною $\Delta \ll \rho_e \equiv eE_r/m_e \omega_{He}^{-2}$ з великим радіальним електричним полем E_r . Зауважимо, що система знаходиться в магнітному полі, у якому повинні задовольнятися відповідні нерівності $\rho_{He} \ll D \ll \rho_{H^+}$. Тут ρ_{He} та ρ_{H^+} — ларморівські радіуси електронів та іонів, D — діаметр фільтру. При цьому електрони у об'ємі системи замагнічуються, а іони — не замагнічуються. Для типових умов від'ємний потенціал $-1-3$ кВ, прикладається до центральних циліндричних електродів системи. Внаслідок цього, вторинна іонно-електронна емісія утворює електронний пучок зі швидкістю $V_b = (2eU/m_e)^{1/2}$ та щільністю струму $j_b = \gamma j_i$, де γ — коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії. Цей електронний пучок формується самоузгодженим чином у тонкому шарі $\Delta \ll \rho_e = V_b/\omega_{He}$ при проходженні плазмового потоку завдяки частині іонів плазми, які прискорюються у цьому шарі в напрямку центрального електроду. Оцінювання показують, що для ти-

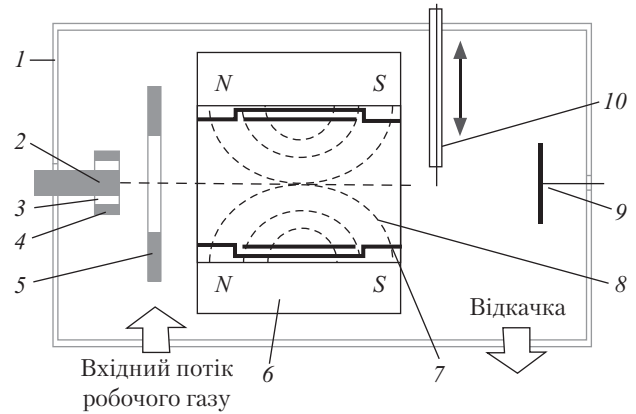


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 — вакуумна камера; 2 — катод вакуумно-дугового джерела; 3 — ізолююче кільце; 4 — електромеханічний електрод підпалу; 5 — анод вакуумно-дугового джерела; 6 — система постійних магнітів та магнітопроводу фільтру; 7 — електроди фільтру; 8 — силові лінії магнітного поля, що замикають попарно з'єднані крайні електроди фільтру; 9 — підкладка; 10 — радіальний зонд. Джерело ізольовано від камери

пових параметрів плазмового потоку, який формується вакуумно-дуговим джерелом, енергія іонів у потоці становить $\varepsilon_i \approx 20-60$ еВ, а температура електронів плазми T_e та їх щільність n_0 дорівнюють $T_e \approx 2-4$ еВ, $n_0 = 10^{11}-10^{12}$ см⁻³ відповідно. Для циліндричних електродів фільтру діаметром 70 мм та магнітних полів 200–400 ерстед вказані нерівності строго виконуються в широкому діапазоні експериментальних умов.

Таким чином, електронний пучок, що формується на внутрішній поверхні центрального циліндричного електроду плазмооптичного фільтру, буде вносити в об'єм плазмового потоку, що розповсюджується, суттєву частину енергії, яка перевищує всю енергію, накопичену в іонах та електронах плазми. Цей пучок під дією пружних та непружних зіткнень з нейтральними атомами та зарядженими частками плазми у схрещених електричних та магнітних полях спрямовується до осі системи. При цьому електрони пучка можуть зіштовхуватися з металевими краплями, і таким чином випарювати та руйнувати їх.

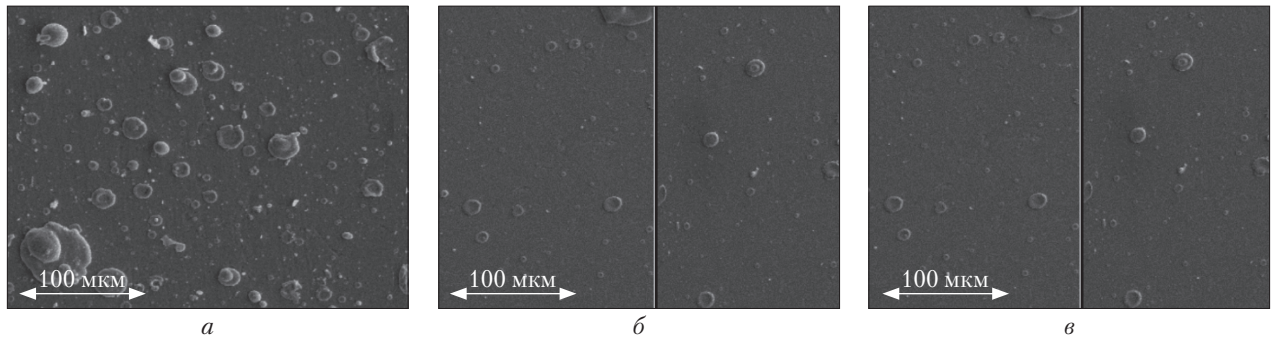


Рис. 3. Ефект руйнування мікрокрапель міді на поверхні зразків (видима площа $250 \times 330 \mu\text{m}$) (СЕМ): а – фільтр вимкнено; б – фільтр в режимі $U = -1000 \text{ В}$, $B = 0$; в – фільтр в режимі $U = -1000 \text{ В}$, $B = 360 \text{ Гс}$

Для експериментальної перевірки дієвості та перспективності нової ідеї очищення багатокомпонентного плазмового потоку металеві мікрокрапель було використано пристрій, схему якого наведено на рис. 2. Застосовано вакуумно-дугову систему безперервної дії типу «Булат». Струм дугового розряду становив $60\text{--}80 \text{ А}$, напруга на розряді – 22 В при напруженості магнітного поля у фільтрі $B = 0 \text{ Гс}$ та 30 В при $B = 360 \text{ Гс}$. Діаметр мідного катоду – 20 мм . Підкладка для нанесення покриття з нержавіючої сталі мала площу 1 см^2 та знаходилась під від’ємним потенціалом -200 В , а відстань від катоду до підкладки складала 250 мм . Час нанесення покриття – 3 хв .

У експериментальному пристрої як фільтр для мікрокрапель було застосовано плазмооптичний фільтр з трьома електродами, при цьому крайні електроди було з’єднано та заземле-

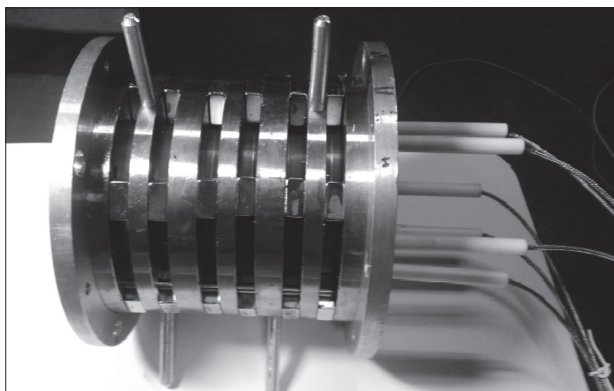


Рис. 4. Варіант вдосконаленого плазмооптичного фільтру

но, а до центрального електроду прикладався від’ємний потенціал $-1\text{--}1,5 \text{ кВ}$. Магнітне поле з індукцією на осі системи 360 Гс створювалося за допомогою постійних магнітів. Довжина фільтру – 15 см , внутрішній діаметр електродів – 68 мм , ширина центрального електроду – 69 мм , крайніх – по 25 мм .

Зразки з нанесеною плівкою міді досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ). Зображення для різних режимів роботи фільтру наведено на рис. 3. Пролітковоється ефект суттєвого зменшення кількості мікрокрапель як у режимі з магнітним полем, так і без нього, тобто, у режимі порожнього катоду. Слід також зауважити, що спостерігається зменшення діаметру великих крапель після проходження плазмооптичного фільтру.

Експерименти з першим варіантом плазмооптичного фільтру виявили певні недоліки його конструкції. Зокрема, виникло питання дослідження впливу магнітного поля на робочі характеристики фільтру. Також конструкція електродної системи не дозволяла гнучко варіювати розподіл прикладеного потенціалу до електродів фільтру. Все це спричинило вдосконалення його конструкції та переходу на імпульсно-періодичний режим роботи з метою проведення системних експериментальних досліджень.

Застосування наявного програмного забезпечення та набутого раніше досвіду конструювання плазмооптичних систем дозволило ство-

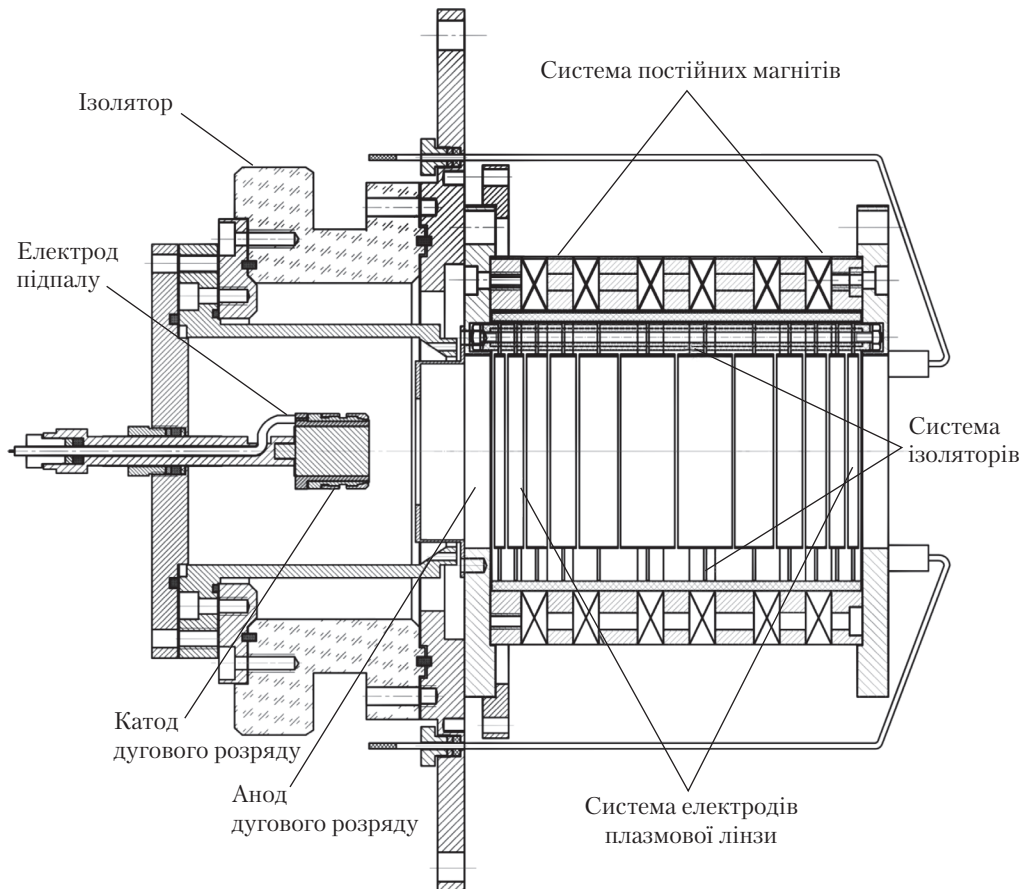


Рис. 5. Схема об'єднаної збірки «вакуумно-дугове джерело плазми–вдосконалений плазмово-оптичний фільтр». Внутрішній діаметр електродів фільтру дорівнює 80 мм

рити прилад, що містить на зовнішньому боці магнітопровід з постійними магнітами та систему підводів потенціалу до електродів електродної системи (рис. 4). Магнітопровід виконано з магніто-м'якого заліза та постійних магнітів з Nd-Fe-B. Індукція магнітного поля на поверхні одного магніту у формі паралелепіпеду становить в середньому 0,3 Т. Система має шість проміжків для встановлення окремих постійних магнітів товщиною до 10 мм та поперечною площиною до 20 × 20 мм. Вставки з магніто-м'якого заліза забезпечують створення суцільного однорідного поля у великому об'ємі.

Систему електродів фільтру виконано з немагнітних матеріалів. Електроди, підводи до них та конструкційні стяжки виконано з не-

ржавіючої немагнітної сталі. Ізоляційні вставки — з оргскла та фторопласту. На схемі установки (рис. 5) зображено розташування ізоляційних вставок складної форми, що повинні усувати ризики короткого замикання між електродами під високим потенціалом та заземленими за рахунок осадження на стінках каналу металеві плазми з матеріалу катоду. Канал транспортування низькоенергетичної плазми утворюється шістьма парами електродів та діелектриком між ними. Електроди мають різну ширину та окремі підводи до кожної пари. Вони розташовані симетрично відносно середньої площини лінзи. Велика кількість електродів дозволяє гнучко підбирати форму розподілу потенціалу вздовж стінки транспортного каналу. Дві середні пари елект-

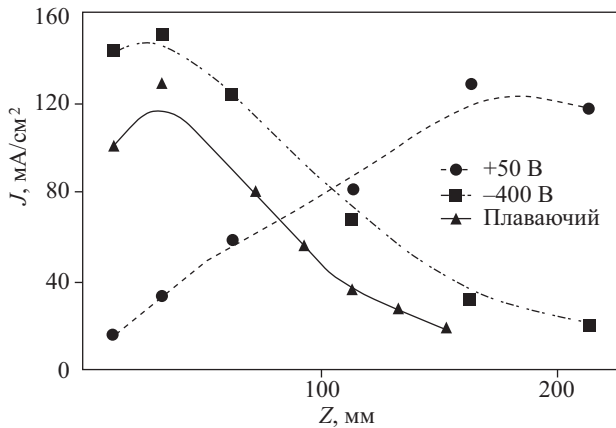


Рис. 6. Залежність щільності струму іонів міді на колекторі J від його відстані Z від вихідної площини плазмооптичного фільтру (струм розряду — 100 А, залишковий тиск — $1,5 \times 10^{-6}$ Тор, магнітна індукція — 0,03 Т)

родів розташовано в межах ділянки однорідного магнітного поля. Інші пари — в межах градієнтної ділянки, що збільшує гнучкість системи в цілому.

Дослідження показали, що найбільш перспективною для подальшого конструювання практично привабливого технологічного пристрою є об'єднана збірка «плазмове джерело—плазмова лінза», яка являє собою аксіально-симетричну систему з ерозійного джерела вакуумно-дугової плазми та плазмооптичної лінзи на постійних магнітах, що дозволяє створювати схрещені електричні та магнітні поля, які суттєво впливають на параметри поширюваного іонно-плазмового потоку.

Також було внесено зміни у режим роботи вакуумно-дугового джерела плазми, а саме, здійснено перехід від безперервного режиму до імпульсно-періодичного з окремим електрофізичним електродом підпалу. Електрофізичні параметри джерела: струм розряду 100–300 А; тривалість імпульсу 100–300 мкс; період повторення імпульсів 1–5 с; залишковий тиск у вакуумній камері $1,5 \times 10^{-6}$ Тор; робочий газ аргон міг додаватись до тиску 1×10^{-4} Тор; катод з міді (\varnothing 6 мм) або титану (\varnothing 18 мм). Варто зауважити, що в цьому випадку було використано катодний блок загально відомого

джерела важких металевих іонів типу *MEVVA* (*metal, vapor, vacuum arc*). Головні параметри плазмооптичної системи були такими: магнітне поле з індукцією $B = 300$ Гс на осі створено системою постійних магнітів; від'ємний потенціал на центральному електроді фільтру змінювався до -3 кВ; крайні електроди були заземлені; внутрішній діаметр електродів фільтру становив 80 мм, а його довжина — 14 см; плазмовий потік після проходження фільтру досліджували за допомогою секціонованого колектору, який складався із чотирьох незалежних колекторів кільцевої форми. При цьому анодом вакуумно-дугового джерела слугував найближчий до катоду крайній електрод фільтру.

Результати плазмодинамічних досліджень розповсюдження щільного низкотемпературного іонно-плазмового потоку у розробленій системі наведено на рис. 6. Вони є усередненими даними вимірів шести плазмових імпульсів, нуль z -вісі відповідає вихідній площині лінзи. В той час, як плазма у вільному просторі розповсюджується з суттєвою розбіжністю, отримані експериментальні результати свідчать, що, для певного діапазону тиску газу та прикладеного до центрального електроду потенціалу, переважна частина плазмового потоку проходить плазмооптичний фільтр наскрізь. Більш того, при зазначених умовах експерименту ця система здійснює фокусування плазмового потоку, що особливо яскраво проявляється у випадку плаваючого потенціалу на центральному електроді, і, на нашу думку, зумовлено формуванням самоузгодженого розподілу фокусуємого електричного потенціалу в об'ємі плазмового потоку. При цьому спостерігається утворення додаткового перепаду потенціалу біля $+10$ В на центральному електроді, цілком достатнього для фокусування низькоенергетичного іонно-плазмового потоку з енергією 20–30 еВ.

Також можна спостерігати фокусування плазмового потоку на виході лінзи у випадку прикладення від'ємного потенціалу до централь-

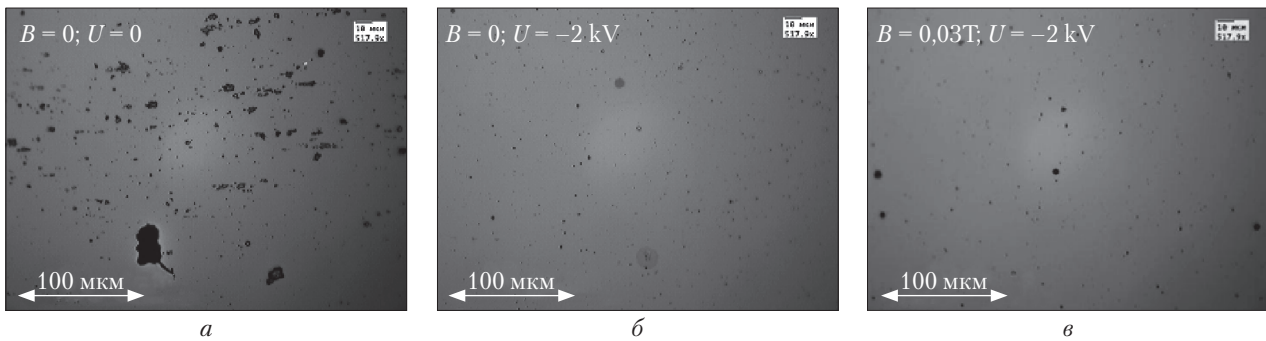


Рис. 7. Поверхня зразків за різних робочих режимів вдосконаленого плазмооптичного фільтру (отримано із застосуванням оптичного мікроскопа): *a* – фільтр вимкнено; *б* – фільтр в режимі $U = -2000$ В, $B = 0$; *в* – фільтр в режимі $U = -2000$ В, $B = 300$ Гс

ного електроду лінзи (напруга живлення – 500 В, дійсний потенціал на центральному електроді близько – 400 В). Це може бути зумовлено генерацією швидких електронів завдяки вторинній емісії при падінні іонів на внутрішню поверхню центрального електроду лінзи. Ці електрони разом з повільними плазмовими електронами можуть накопичуватися на осі та забезпечувати фокусування іонів потоку за рахунок поляризаційного ефекту.

В чистому плазмооптичному режимі, коли напруга живлення центрального електроду становила +500 В (при цьому дійсний потенціал на центральному електроді був лише біля +50 В), плазмооптичний ефект фокусування був слабшим, порівняно з іншими розглянутими випадками. Причиною цього може бути ускладнена конфігурація системи в зв'язку з тим, що центральний електрод стає другим анодом вакуумно-дугового розряду.

З метою перевірки ефективності роботи вдосконаленого плазмооптичного фільтру осадження плівок міді було виконано як для повністю відключеного фільтру, так і для фільтру без магнітного поля. В останньому випадку система електродів фільтру формує умови виникнення несамостійного або самостійного, залежно від тиску в камері, розряду типу порожиного катод. Електрони в такому розряді також можуть мати енергію рівня різниці прикладених до розрядного проміжку потенціалів і у зіткненнях з мікрокраплями руйнувати їх.

Поверхню осаджених шарів досліджували за допомогою оптичного мікроскопу. Поверхні зразків під мікроскопом мають різний вигляд для різних робочих режимів плазмооптичного фільтру (рис. 7). Можна бачити, що кількість крапель суттєво зменшується у обох випадках застосування фільтру. Зменшується і максимальний розмір крапель, що досягають поверхні зразка. Більш ефективного руйнування крапельної фази можна досягти при подальшій оптимізації параметрів фільтру.

Для перевірки ефективності фільтрації плазмового потоку іонів тугоплавких металів у розробленій системі матеріал катоду було змінено на титан. Для дослідження мікрокрапель титану на поверхні зразка використовували 3 типи підкладок: стандартне предметне скло мікроскопа, органічне та кварцове скло. Візуальне дослідження поверхні зразків за однакових умов обробки показало більшу кількість мікрокрапель на поверхні підкладки з кварцового скла. На інших поверхнях, окрім меншої загальної кількості крапель, було виявлено сліди від мікрокрапель, які потрапили на поверхню, але не втримались на ній. Найбільш ймовірною причиною утримання крапель на поверхні кварцового скла є незначний коефіцієнт його термічного розширення. Завдяки цьому, навіть при значному температурному стресі (охолодженні титанової краплі від розплавленого стану до нормальних умов), краплі залишаються на поверхні. З урахуванням

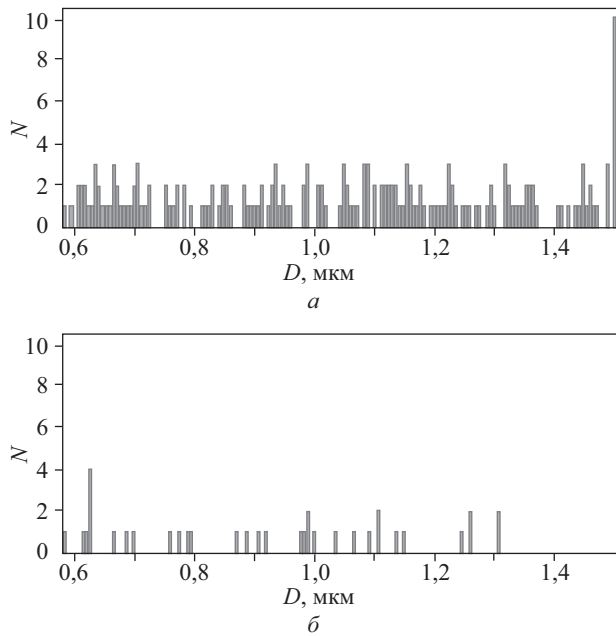


Рис. 8. Гістограма розподілу мікрокрапель титану за розміром у системі «вакуумно-дугове джерело плазми – вдосконалений плазмооптичний фільтр»: *a* – фільтр вимкнено; *б* – фільтр в режимі $U = -1800$ В, $B = 0$. Розмір крапель розраховано з використанням коефіцієнту відбиття титану $R = 0,5$

зазначеного, в подальшому для досліджень використовували виключно підкладки з кварцового скла.

Для порівняння результатів різних умов дослідження (фільтр вимкнено/увімкнено) використано однакові параметри роботи вакуумно-дугового джерела: струм розряду 120 А, тривалість імпульсу 1 мс, частота повторення 1 Гц, кількість імпульсів близько 9000 (2,5 години безперервної роботи), тиск робочого газу аргону 5×10^{-4} Тор. При використанні плазмооптичного фільтру для очищення плазмового потоку від мікрокрапель струм розряду з порожнистим катодом складав близько 3,5 А, напруга на катоді розряду – близько $-1,8$ кВ.

Початкові спостереження наявності мікрокрапель титану показали достатньо малу їх кількість (порівняно з експериментами з міддю) навіть при вимкненому фільтрі. Найбільш ймовірно, це спричинено більш високою туго-

плавкістю титану, порівняно з міддю. Завдяки цьому при однаковому енерговкладі у дуговий розряд на мідному катоді візуально підтверджено одночасне існування декількох плям, в той час як на титановому катоді спостерігалась лише одна пляма. Таким чином, найбільш раціональна процедура підрахунку крапель під мікроскопом вимагала значно більшого поля зору, і, відповідно, меншого збільшення порівняно з варіантом дослідження з міддю. Вочевидь, при цьому також погіршувалася роздільна здатність, що робило малі краплі непомітними при використанні стандартної схеми спостереження з наскрізним освітленням. Тому виникла необхідність використання іншого способу підрахунку, який б дозволив визначати краплі, менші за роздільну здатність мікроскопа.

Головним принципом роботи методу отримання зображення поверхні є реєстрація відбиття світла від мікрокрапель на чорному тлі. Прецизійне фокусування оптичного мікроскопа здійснювалося шляхом отримання мінімального розміру дифракційно обмежених зображень малих крапель. Використання збільшення системи $\times 10$ (об'єтивів з апертурою 0,2) та цифрової камери Canon 350D з розміром сенсора $15 \times 22,5$ мм дозволило здійснювати одночасну реєстрацію крапель у достатньо великому полі зору ($1,5 \times 2,25$ мм) і таким чином покращити якість статистичного аналізу. Роздільна здатність складала близько 1,5 мкм у площині зображення.

Яскравість світла, відбитого від поверхні крапель, більших за роздільну здатність, не залежить від розміру краплі $B = B_0 R$, де B_0 – яскравість джерела, R – коефіцієнт відбиття титану. Для крапель, менших за роздільну здатність, видима яскравість зменшується відповідно до $B \approx B_0 R (d/D_{RES})^2$, де d – діаметр краплі, D_{RES} – роздільна здатність системи. Таким чином, аналіз зображення зразка на чорному тлі дозволяє підрахувати краплі, більші за D_{RES} та отримати розподіл за розміром для менших крапель.

Процедура обробки зображення з цифрової камери була наступною:

1) перетворення RAW файлу у 16-розрядний TIFF (градації сірого) з гаммою 0.5 (*UFRAW freeware*) для отримання гістограм розподілу за діаметром;

2) відбір по одному пікселю на кожний максимум інтенсивності (*ImageJ freeware*);

3) побудова гістограми (ширина вікна накопичення 256, тобто 256 значень з повного діапазону 65 536).

Отримані результати (рис. 8) без сумніву свідчать про зменшення кількості мікрокрапель при ввімкненому фільтрі. При цьому повністю усуваються великі краплі (понад 1,5 мкм) та залишається невелика кількість крапель середнього розміру (0,5–1,5 мкм), які, ймовірно, є залишками великих крапель, що не встигли випаруватися у фільтрі на основі розряду з порожнистим катодом.

Окрім розглянутого у роботі застосування плазмооптичної системи типу циліндричної плазмової лінзи для фільтрації мікрокрапель у плазмовому потоці, слід також відмітити перспективність її використання з метою підвищення ефективності інших плазмооптичних систем, зокрема, призначених для формування пучків багатозарядних іонів важких металів. Схему використання плазмооптичної лінзи як елемента вакуумно-дугового джерела іонів наведено на рис. 9. Початкові експерименти з вимірюванням зарядового складу іонів міді після проходження такої системи з одночасним застосуванням магнітного поля та прикладення від'ємного потенціалу до центрального електроду засвідчили суттєве збільшення струму іонів міді із зарядами від $1+$ до $4+$, а саме, емісійний струм збільшувався приблизно від 0,25 А до 0,5 А, зокрема струм Cu^{3+} змінювався від 0,45 мА до 1,8 мА, а Cu^{1+} від 0,05 мА до 0,75 мА. Вказані значення свідчать про фокусування низькоенергетичного плазмового потоку в напрямку емісійної сітки, а також підтверджують здатність наявних в об'ємі лінзи швидких електронів керувати середньою

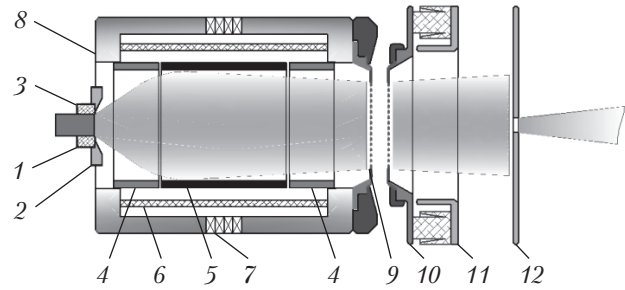


Рис. 9. Схема модифікованої комбінованої збірки MEVVA та плазмової лінзи для покращення параметрів вакуумно-дугового джерела металевих іонів: 1 – катод; 2 – електрод підпалу; 3 – ізолятор; 4 – крайні електроди; 5 – центральний електрод; 6 – ізолятор; 7 – магнітна система; 8 – магнітопровід; 9 – емісійна сітка; 10 – супресор; 11 – прискорюючий електрод; 12 – вихідна апертура

величиною заряду іонів в отриманому багатозарядному іонному пучку. Слід також зазначити, що збільшення струму іонів з вищими зарядами при використанні такої системи робить її привабливою для практичних застосувань як вхідного елемента лінійних прискорювачів іонів важких металів та в інших сучасних іонно-пучкових технологіях модифікації поверхневих властивостей матеріалів.

Таким чином, в результаті проведеного циклу теоретичних та експериментальних досліджень було створено та випробувано новітню аксіально-симетричну плазмооптичну систему для видалення мікрокрапель з потоку щільної низькотемпературної багатокомпонентної плазми, що утворюється ерозійним плазмовим джерелом вакуумно-дугового типу. Досягнутий рівень розуміння фізичних процесів, що виникають в системі з швидкими електронами, дозволив створити експериментальний макет комерційного прототипу покращеного ерозійного джерела металеві плазми, де в одному пристрої поєднано вакуумно-дугове джерело та плазмооптичний фільтр. Така об'єднана оптимізована збірка після певної адаптації до конкретних технологічних умов цілком готова для практичних застосувань у пристроях синтезу функціональних покриттів з суттєво покращеними властивостями. Також інноваційним перспективним результатом проведеного

циклу робіт є розуміння того, що така збірка в режимі модифікованого вакуумно-дугового джерела багатозарядних іонів металевої плазми відкриває можливості для створення нового покоління широко відомих іонних джерел типу *MEVVA* (*metal, vapor, vacuum arc*) які успішно працюють у лінійних прискорювачах важких іонів та в процесах модифікації поверхневих властивостей матеріалів. Але ця робота потребує подальших творчих зусиль з метою оптимізації та удосконалення системи та

могла б стати цікавим прикладом інноваційних розробок, спрямованих на підтримку сталого економічного розвитку країни.

Роботу виконано за програмою Наукового приладобудування НАН України за проектом П13/16-18 і частково за Цільовою комплексною програмою «Перспективні дослідження з фізики плазми, керованого термоядерного синтезу та плазмових технологій» за проектом Пл-18.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Anders A. Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas. *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82, no. 8. P. 3679–3688. <https://doi.org/10.1063/1.365731>.
2. Boxman R.L., Goldsmith S. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control. *Surf. and Coat. Techn.* 1992. V. 51, no. 1. P. 39–50. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90369-L](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90369-L).
3. Anders S., Anders A., Yu K.M., Yao X.Y., Brown I.G. On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots. *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 1993. V. 21, no. 5. P. 440–446. <https://doi.org/10.1109/27.249623>.
4. Anders A., Slack J. *Phase transitions in vacuum arcs in the context of liquid metal arc sources*. Proceedings of the 25th ISDEIV. (September, 2012). Tomsk, Russia, 2012. P. 305–308.
5. Aksenov I.I., Aksyonov D.S., Vasilyev V.V., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. Two-Cathode Filtered Vacuum-Arc Plasma Source. *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2009. V. 37, no. 8. P. 1511–1516. <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2018820>.
6. Аксенов И.И. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков, 2005. 216 с.
7. Goncharov A. Invited Review Article: The Electrostatic Plasma Lens. *Rev. Sci. Instrum.* 2013. V. 8, no. 4(2). P. 021101. <https://doi.org/10.1063/1.4789314>.
8. Goncharov A.A., Maslov V.I., Fisk A. *Novel Plasma-Optical Device for the Elimination of Droplets in Cathodic Arc Plasma Coating*. Society of Vacuum Coaters. 55th Annual Technical Conference Proceedings. (May, 2012). Santa Clara, CA, 2012. P. 441–444.
9. *U.S. patent application # 2014/0034484A1 (6 February 2014)*. Fisk A., Maslov V., Goncharov A. Device for the Elimination of Microdroplets from a Cathodic Arc Plasma Source.
10. Goncharov A.A. Recent development of plasma optical systems (invited). *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. P. 02B901. <https://doi.org/10.1063/1.4931718>.
11. Goncharov A., Tsiolko V., Dobrovolskii A., Bazhenov V., Litovko I. New generation plasmadynamical systems with fast electrons. *Вісник Київського Національного Університету ім. Т. Шевченка. Радіофізика та електроніка*. 2017. V. 25, no. 1. P. 13–22.
12. Goncharov A.A., Dobrovolsky A.M., Bazhenov V.Yu., Litovko I.V., Naiko I.V., Naiko L.V., Kostin E.G., Protsenko I.M. Last results of novel plasmaoptical devices investigation. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. V. 116, no. 4. P. 36–39.

Стаття надійшла до редакції 04.12.18

Статтю прорецензовано 28.02.19

Статтю підписано до друку 01.03.19

REFERENCES

1. Anders, A. (1997). Growth and decay of macroparticles: A feasible approach to clean vacuum arc plasmas. *J. Appl. Phys.*, 82(8), 3679–3688. <https://doi.org/10.1063/1.365731>.
2. Boxman, R. L., Goldsmith, S. (1992). Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: generation, transport and control. *Surf. and Coat. Techn.*, 51(1), 39–50. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90369-L](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90369-L).

3. Anders, S., Anders, A., Yu, K. M., Yao, X. Y., Brown, I. G. (1993). On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 21(5), 440–446. <https://doi.org/10.1109/27.249623>.
4. Anders, A., Slack, J. (2012, September). *Phase transitions in vacuum arcs in the context of liquid metal arc sources*. Proceedings of the 25th ISDEIV. Tomsk, Russia, P. 305–308.
5. Aksenov, I. I., Aksyonov, D. S., Vasilyev, V. V., Luchaninov, A. A., Reshetnyak, E. N., Strel'nitskij, V. E. (2009). Two-Cathode Filtered Vacuum-Arc Plasma Source. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 37(8), 1511–1516. <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2018820>.
6. Aksyonov, I. I. (2005). *Vakuumnaya duga v erozionnyh istochnikah plazmy*. Kharkov. 216 p. [in Russian].
7. Goncharov, A. (2013). Invited Review Article: The Electrostatic Plasma Lens. *Rev. Sci. Instrum.*, 84(2), 021101. <https://doi.org/10.1063/1.4789314>.
8. Goncharov, A. A., Maslov, V. I., Fisk, A. (2012, May). *Novel Plasma-Optical Device for the Elimination of Droplets in Cathodic Arc Plasma Coating*. Society of Vacuum Coaters. 55th Annual Technical Conference Proceedings, Santa Clara, CA. P. 441–444.
9. *U.S. patent application # 2014/0034484A1 (6 February 2014)*. Fisk A., Maslov V., Goncharov A. Device for the Elimination of Microdroplets from a Cathodic Arc Plasma Source.
10. Goncharov, A. A. (2016). Recent development of plasma optical systems (invited). *Review of Scientific Instruments*, 87, 02B901. <https://doi.org/10.1063/1.4931718>.
11. Goncharov, A., Tsiolko, V., Dobrovol'skii, A., Bazhenov, V., Litovko, I. (2017). New generation plasmadynamical systems with fast electrons. *Visnyk Kyivskogo Natsionalnogo Universytetu im. T. Shevchenka, Radiofizyka ta elektronika*, 25(1), 13–22.
12. Goncharov, A. A., Dobrovolsky, A. M., Bazhenov, V. Yu., Litovko, I. V., Naiko, I. V., Naiko, L. V., Kostin, E. G., Protsenko, I. M. (2018). Last results of novel plasmaoptical devices investigation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 116(4), 36–39.

Received 04.12.18

Revised 28.02.19

Accepted 01.03.19

Goncharov, A.A., Bazhenov, V.Yu., Dobrovol'skiy, A.M.,
Protsenko, I.M., and Naiko, I.V.

Institute of Physics of the NAS of Ukraine,
46, Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine,
+380 44 525 2329, gonchar@iop.kiev.ua

RECENT ADVANCES IN THE DEVELOPMENT OF EROSION SOURCES OF PLASMA

Introduction. Erosion sources of plasma provide a highly productive formation of ion-plasma streams by evaporating the electrode material and have been widely used in science and industry for synthesizing various coatings, modifying material surfaces, and for creating the sources of charged particles.

Problem Statement. At present, the main problem in creating high-quality coatings is their limited homogeneity due to the presence of the microdroplet phase in ion-vapor stream of erosion plasma sources.

Purpose. To create a new generation of erosion plasma sources, particularly, of vacuum arc-type ones that are free of microdroplets in order to efficiently synthesize high-quality coatings with predetermined functional properties.

Materials and Methods. For creating sources of pure metal plasma, an original idea based on the use of axially symmetric plasma-optical system for introducing additional energy into a flow of dense multi-component metal plasma due to efficient self-sustained generation of fast electrons has been proposed. Such energetic electrons are able to effect the plasma flow passing through the system and, particularly, to evaporate and to eliminate microdroplets that essentially limit the use of erosion dense plasma sources for technological developments.

Results. Conceptual design of combined source containing vacuum arc plasma source and axially symmetric cylindrical electrostatic plasma-optical lens in a single device has been created. The designed hardware does not have analogs worldwide.

Conclusions. The research has opened up wide prospects for practical application of the proposed idea for removal undesired micro-impurities while keeping the mass transfer in metal plasma flow formed by vacuum arc source. Combination of plasma lens with vacuum arc ion source enables controlling low energy plasma flow towards the substrate (i.e., film deposition) or towards emission grid (i.e., ion beam generation).

Keywords: erosion plasma source, dense plasma, plasma-optical system, and microdroplets.

*А.А. Гончаров, В.Ю. Баженов, А.М. Добровольский,
І.М. Проценко, І.В. Найко*

Институт физики НАН Украины,
просп. Науки, 46, Киев, 03028, Украина,
+380 44 525 2329, gonchar@iop.kiev.ua

НОВЕЙШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ЭРОЗИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЛАЗМЫ

Введение. Эрозионные источники плазмы обеспечивают высокопроизводительное формирование ионно-плазменных потоков путем испарения материала электродов и широко используются в науке и промышленности для синтеза различных покрытий, модификации поверхности материалов и создания источников заряженных частиц.

Проблематика. В настоящее время проблемой в создании высококачественных покрытий является их ограниченная однородность, что обусловлено присутствием микрокапельной фазы в ионно-паровом потоке эрозионных источников плазмы.

Цель. Создание нового поколения эрозионных источников плазмы, в частности, вакуумно-дуговых, свободных от микрокапель для эффективного синтеза высококачественных покрытий с заданными функциональными свойствами.

Материалы и методы. Для создания источников чистой металлической плазмы была предложена и реализована оригинальная идея использования аксиально-симметричной плазмооптической системы для введения дополнительной энергии в поток плотной многокомпонентной металлической плазмы за счет самосогласованного создания быстрых электронов. Такие энергетические электроны способны эффективно влиять на плазменный поток, проходящий через систему, в частности, испарять и разрушать микрокапли, существенно ограничивающие использование эрозионных источников для технологических разработок.

Результаты. Разработан концептуальный проект комбинированного источника, содержащего в одном устройстве вакуумно-дуговой источник плазмы и аксиально-симметричную цилиндрическую электростатическую плазмооптическую линзу. Предложенная разработка является оригинальной и не имеет аналогов в мире.

Выводы. Приведенные результаты исследования дают широкие перспективы практического применения предложенной идеи для устранения нежелательных микровключений при сохранении массопереноса в потоке металлической плазмы, формируемой вакуумно-дуговым источником. Объединение плазменной линзы и вакуумно-дугового пламенного источника открывает новые возможности для управления низкоэнергетическим плазменным потоком, распространяющимся по направлению к подложке (при нанесении пленок) или эмиссионной сетке (при генерации ионного пучка).

Ключевые слова: эрозионный источник плазмы, плотная плазма, плазмооптическая система, микрокапли.