

УДК 533
PACS 52.40.Hf

ОПТИМІЗАЦІЯ ІОННО-ПРОМЕНЕВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ НАНОРОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА

І. Місірук, О. Гірка, К. Середа, О. Бізюков

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
кафедра фізики плазми
п.л. Свободи, 4, 61077, Харків, Україна
e-mail: ivanmisiruk@gmail.com*

Досліджено процес коригуючого іонно-променевого травлення як засіб регулювання товщини функціональних шарів мікроелектроніки з високою точністю. Функціональний шар на підкладці травиться скануючим сфокусованим іонним пучком, локалізація і потужність якого відповідає топографії неоднорідності товщини функціонального шару. Показано можливість регулювання розподілу товщини плівок по поверхні підкладок до 4 \AA і зменшення шорсткості поверхні.

Ключові слова: іонний пучок, іонно-променеве травлення, функціональний шар

1 Вступ

Подальший розвиток плазмових технологій спрямований на підвищення критичних параметрів плазмових джерел іонів. Одним із цих параметрів є густина струму, яку можна підвищити шляхом збільшення іонного струму та/або поліпшення фокусування потоку іонів.

Нещодавно розглянуто конструкції дуоплазмотрону [1], здатного створювати пучки іонів фокусуванням розбіжних іонних пучків за допомогою електростатичних лінз, де зусилля спрямовані на підвищення повного струму пучка іонів. В даній роботі описується безіткове, компактне джерело іонів з холодним катодом, здатне забезпечити пучок іонів водню з густиною струму $\sim 0,16 \text{ А/см}^2$. Така густина струму є характерною для пристроїв термоядерного синтезу і дозволяє експериментально моделювати взаємодію плазми з першою стінкою термоядерного реактора.

Останнім часом особлива увага приділяється джерелам іонів з анодним шаром (такі джерела зазвичай називають коригуючими ракетними двигунами Хола [2]), які створюють циліндричний пучок іонів зі струмом до 300 мА. Вони характеризуються простотою та надійністю конструкції, стабільністю роботи, портативністю. Найбільш важливим параметром цього виду джерел є найвище відношення струму

пучка іонів до струму розряду. Можливе перетворення 40 – 80% розрядного струму у струм пучка іонів (для порівняння, у дуоплазмотроні можна перетворити лише 1–3% розрядного струму).

В цій роботі представлено дослідження, спрямовані на оптимізацію фокуруючої системи холівського двигуна для нанорозмірної обробки твердого тіла. Розраховано відхилення траєкторій іонів від балістичних. Ці розрахунки були прийняті до уваги при розробці конструкції реверсивної магнітної фокууючої системи. Було отримано профіль густини струму в площині кросовера пучка. Він свідчить про високу локалізацію густини потужності - до 3 кВт/см². Така оптимізована іонно-променева система може бути застосована для високошвидкісного травлення, полірування та осадження тонких плівок з використанням лише одного блоку живлення постійного струму.

У даній роботі також досліджується процес нанорозмірної обробки, в якому використовується джерело іонів FALCON [3] з надзвичайно високою густиною струму іонного пучка для високоточного регулювання товщини функціональних шарів мікроелектроніки. Неоднорідні шари, нанесені на підкладку, травляться шляхом сканування сфокусованим пучком іонів, зміна положення і потужності якого відповідає топографії неоднорідної поверхні шару.

2 Обладнання і результати експериментів

При застосуванні методу балістичного фокусування для збільшення густини струму пучка геометричний коефіцієнт компресії дорівнює (рис. 1.)

$$G_j = \frac{8R \sin^2 \alpha}{a}$$

При значеннях, що є характерними для наших експериментальних умов, коефіцієнт компресії дорівнює $G_j = 171$. Площа ж очікуваного кросовера становить $S_{crossover} = 3,45 \text{ мм}^2$.

В холівському джерелі іонів стандартний струм пучка сягає 200 мА за середньої енергії іонів 1 кеВ. За рахунок зменшення площі пучка ми можемо отримати густину струму $j_{crossover} = 5,79 \text{ А/см}^2$. А це вже неабияка потужність на одиницю площі $P = j \varepsilon_{ib} = 116 \text{ МВт/м}^2$.

Для здійснення балістичного фокусування звичайний плаский катод та анод холівського джерела було замінено на нові спеціальної форми з каналами, що забезпечують формування конусоподібного пучка. Експерименти проводились за розрядної напруги (1,5 ÷ 5) кВ. Струм у котушці магнітного поля змінювався від 0,7 до 3 А, що відповідає максимальній напруженості магнітного поля в розрядному проміжку 900 – 3300 Е. Тиск у робочій камері становив (4 ÷ 5)·10⁻⁴ Торр. Як робочий газ використовувався аргон.

Було показано, що діаметр пучка d в площині кросовера збільшується зі збільшенням напруженості магнітного поля, зменшується зі збільшенням розрядної напруги, не залежить від тиску газу й струму пучка (рис. 2.). Квадратики, трикутники, кола та інші фігури на рис. 2 відповідають серії експериментів.

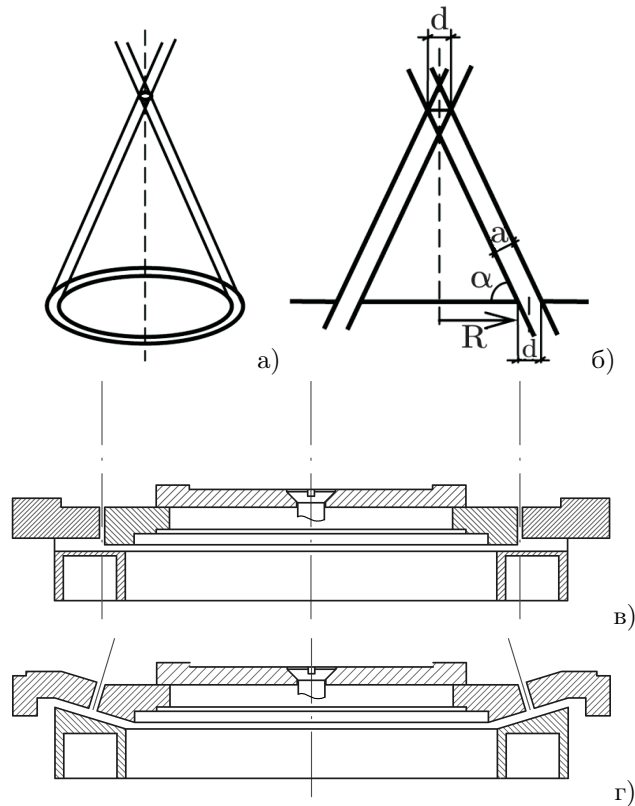


Рис. 1: Модель балістичного фокусування пучка (а), його геометричні параметри (б), електроди для забезпечення циліндричного пучка (в) та електроди для формування конусоподібного пучка (г).

Мінімальний діаметр перерізу площини кросовера, отриманий нами при застосуванні балістичного фокусування, досягає 1,5 см. Таким чином, балістичне фокусування в холівському джерелі не дає ідеального конусоподібного пучка.

Також розглянуто етапи руху іона в нашій системі. Іон, утворившись у розрядному проміжку, попадає в щілину магнітопроводів зі швидкістю, обумовленою розрядною напругою.

У щілині магнітопровода іон рухається в поперечному радіальному магнітному полі (рис. 3.) і під дією сили Лоренца здобуває азимутальне прискорення. При виході із зони існування магнітного поля іон зберігає поперечну швидкість, яка може перешкоджати успішній збіжності іонного потоку. Характерний розмір області магнітного поля $l_1 \approx 2$ см і ларморівський радіус $\rho_L = 10$ см ($\rho_L > l_1$).

Сумарне відхилення траєкторії іона від точки фокусування визначається виразом:

$$y_{\Sigma} = \frac{\omega_{Hi} l_1^2}{2v_z} + \frac{\omega_{Hi} l_1 L}{v_z} = \frac{l_1 L}{\rho_L} \approx \frac{H}{\sqrt{U}}.$$

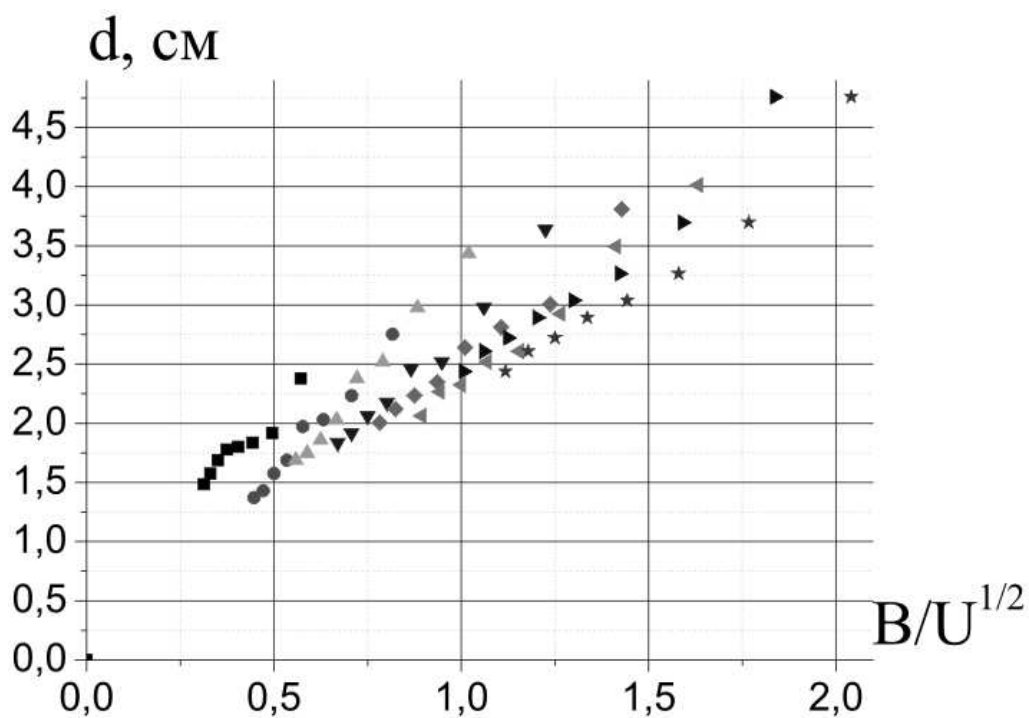


Рис. 2: Залежність внутрішнього діаметра пучка в площині кросовера від співвідношення струму в котушці магнітної системи джерела та розрядної напруги.

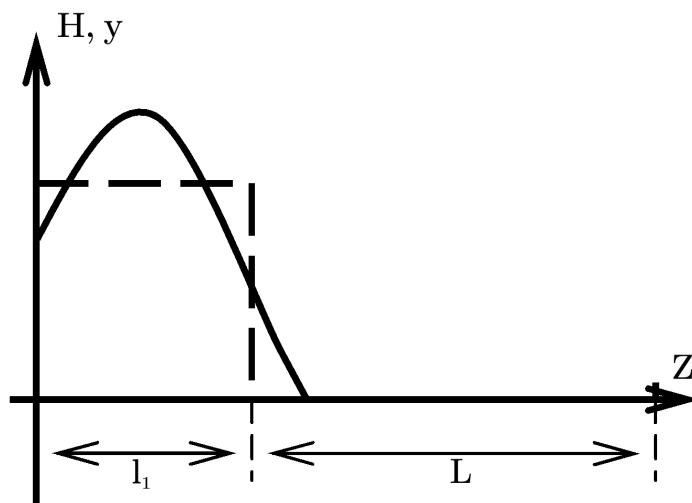


Рис. 3: Якісний розподіл напруженості магнітного поля в холівському джерелі.

З цього виразу видно основну проблему - поперечний імпульс, здобутий іоном на невеличкій ділянці l_1 , зберігається на довгій ділянці L . Для покращення фокусування запропоновано зкомпенсувати поперечний імпульс за рахунок магнітного поля зворотного напрямку (знаку), тобто використати для холівського іонного джерела магнітну систему з реверсивним магнітним полем (рис 4.).

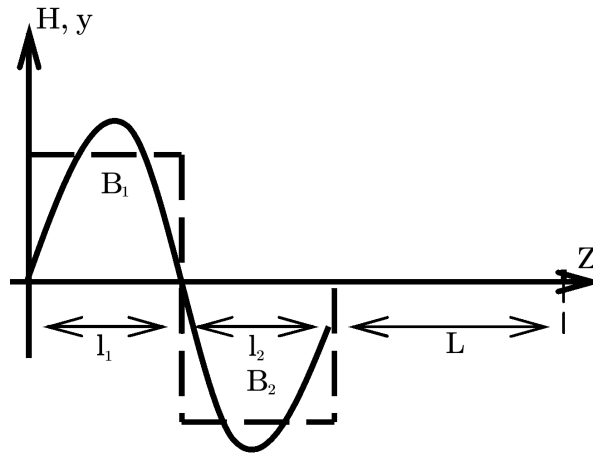


Рис. 4: Якісний розподіл напруженості магнітного поля в реверсивній системі.

В цьому випадку при виході з області магнітного поля

$$y(l_2) = \frac{\omega_{H1} l_1^2}{2v_z} + \omega_{H1} l_1 \frac{l_2}{v_z} - \frac{\omega_{H2} l_2^2}{2v_z}.$$

Для нашої мети ідеальним є випадок, коли $v_{y2}(l_2) = 0$, тобто $\omega_{B1} l_1 = \omega_{B2} l_2$, що фізично означає рівність магнітних потоків, тобто симетричну реверсивну магнітну конфігурацію. При цьому відхилення пучка дорівнює:

$$y(l_2) = \frac{\omega_{H1} l_1 l_2}{v_z} = \frac{l_1 l_2}{\rho_{L1}}.$$

Для максимального фокусування іонного пучка необхідно мати мінімальні характерні розміри областей реверсивного магнітного поля. Для досягнення високої густини потужності в області кросовера сфокусованих пучків актуальним є питання знаходження траєкторій заряджених частинок. Для знаходження траєкторії польоту іона в холівському джерелі іонів з балістичним та магнітним фокусуванням було взято аналог теореми Буша та закон збереження енергії:

$$\begin{aligned} m\dot{x} - m\dot{x}_0 &= -e(\psi - \psi_0), \\ \frac{m\dot{x}^2}{2} - \frac{m\dot{y}^2}{2} &= \varepsilon_i = \frac{mv_0^2}{2}. \end{aligned}$$

Звідси можна отримати вираз для траєкторії іона в трьох послідовних областях, в яких він рухається (рис. 5.). В першій області іон рухається у магнітному полі в щілині балістичного фокусування. У другій області частинки рухаються у реверсивному магнітному полі, яке створюється магнітопроводами магнітного фокусування.

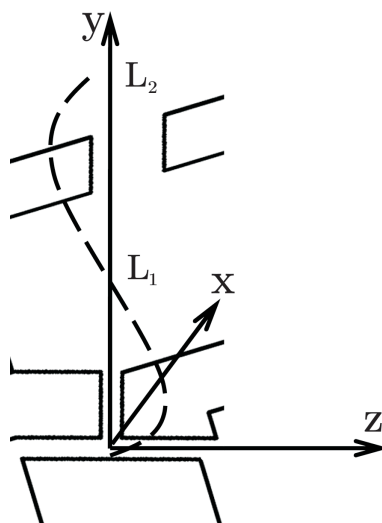


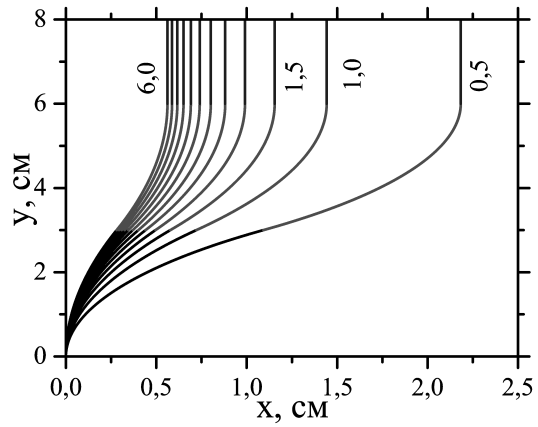
Рис. 5: Якісне представлення розподілу напруженості магнітного поля в системі магнітопроводів.

У третій області магнітне поле відсутнє, у ній частинки рухаються по заздалегідь набутих напрямках. На малюнках рис. 6 (а, б) показані траєкторії руху іона у просторі дрейфу сфокусованого пучка іонів при різних геометричних параметрах магнітної системи.

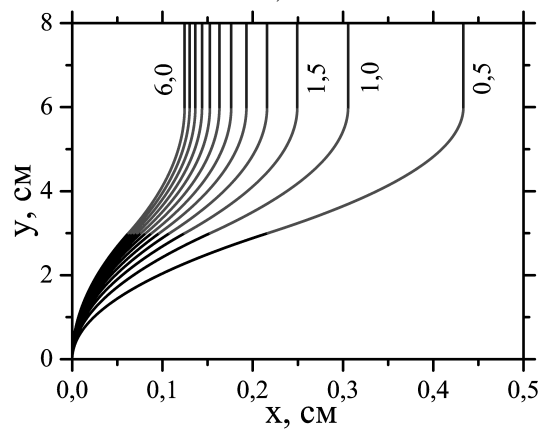
На основі проведених теоретичних досліджень було внесено зміни у конструкцію серійного холівського прискорювача з анодним шаром з балістичним та магнітним фокусуванням пучка іонів [4] без зовнішнього джерела електронів з метою досягнення максимальної густини потужності в області кросовера (рис. 7). Балістичне та магнітне фокусування пучка іонів дозволяє перетворити форму пучка із циліндричної у «конусоподібну». Таке конструктивне рішення дає змогу розв'язати декілька задач: значно збільшити густину струму пучка іонів на оброблюваній поверхні; застосовувати розпилюючі мішені малих розмірів з високим коефіцієнтом використання матеріалу в процесах іонно-променевого нанесення покриттів.

Експериментально профіль густини струму пучка іонів в площині кросовера було отримано за допомогою іонно-променевого розпилення плівки SiO_2 на кремнієвій підкладці та відновлений за інтерферометричною картиною. На рис. 8 показано профіль густини струму іонного пучка та інтерферометричну картину профілю травлення плівки SiO_2 товщиною 1,5 мкм на протязі 60 сек іонами водню з середньою енергією 1,5 кеВ при струмі пучка 10 мА. Видно, що запропонована модифікація холівського джерела іонів дозволила перетворити переріз пучка із кільця в круг у площині кросовера з характерним діаметром ≈ 3 мм. Це відповідає середньому коефіцієнту компресії $G_j \approx 50$.

Було розраховано просторовий розподіл температури (рис. 9) при взаємодії сфокусованого пучка іонів водню з поверхнею вольфрамової пластини. Розрахунки показують, що зразок зазнає значних теплових навантажень. Отримані результати



а)



б)

Рис. 6: Траєкторії руху іонів водню (а) та аргону (б) при різних значеннях енергії.

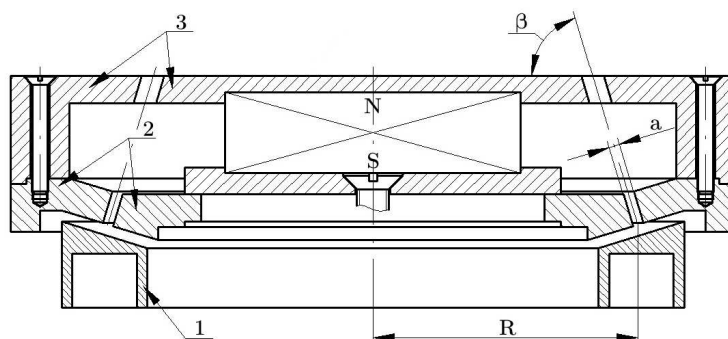


Рис. 7: Холівське джерело іонів з балістичним та магнітним фокусуванням пучка: 1–анод; 2–катод-магнітопровід балістичного фокусування; 3–магнітопровід магнітного фокусування.

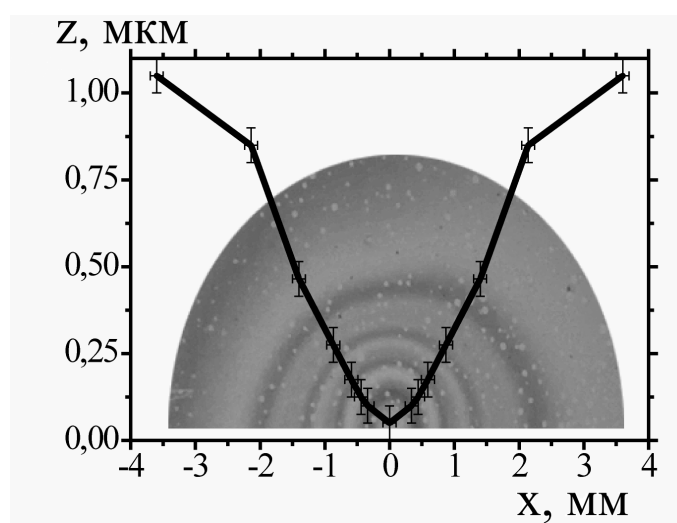


Рис. 8: Інтерферометрична картина профілю травлення плівки SiO_2 та розподіл густини струму в фокусі іонного пучка.

свідчать про те, що така модифікація серійного джерела іонів дозволяє застосовувати його для моделювання процесів взаємодії плазми зі стінкою в термоядерних установках.

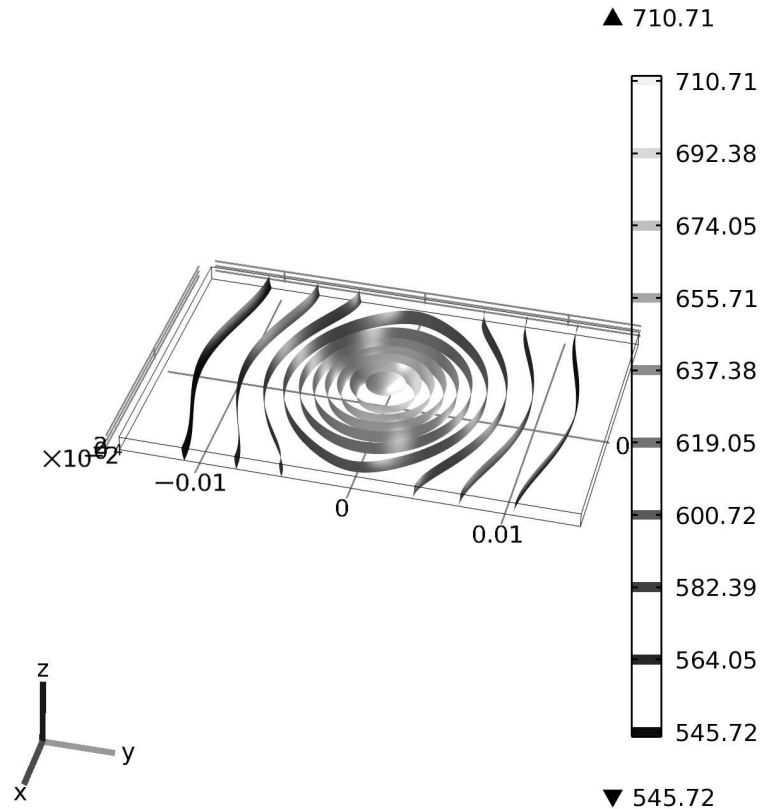


Рис. 9: Просторовий розподіл температури поверхні вольфраму під дією високоінтенсивного сфокусованого пучка іонів водню. Ізотермічні поверхні.

Експерименти з нанорозмірної обробки поверхні твердих тіл проводились на іонно-променевої системі, яка використовує коригувальне іонно-променеве травлення для регулювання товщини функціональних шарів мікроелектроніки з високою точністю на підкладках діаметром від 100 до 200 мм (рис. 10).

Система монтувалась у вакуумній камері, яка відкачувалась турбомолекулярним насосом до тиску 10^{-7} Торр. Робочий тиск - 10^{-5} Торр. Іонно-променева система складається з джерела іонів середніх енергій і координатної системи позиціонування-сканування іонного пучка на поверхні, котра обробляється (3,4) з програмним управлінням. Програмне забезпечення локального позиціонування дозволяє точно управляти кількістю витравленого матеріалу на питомій (визначеній) області підкладки.

Локальна швидкість травлення функціональних шарів регулюється зміною потужності пучка. Оскільки газовий розряд в джерелі іонів типу прискорювача з ано-

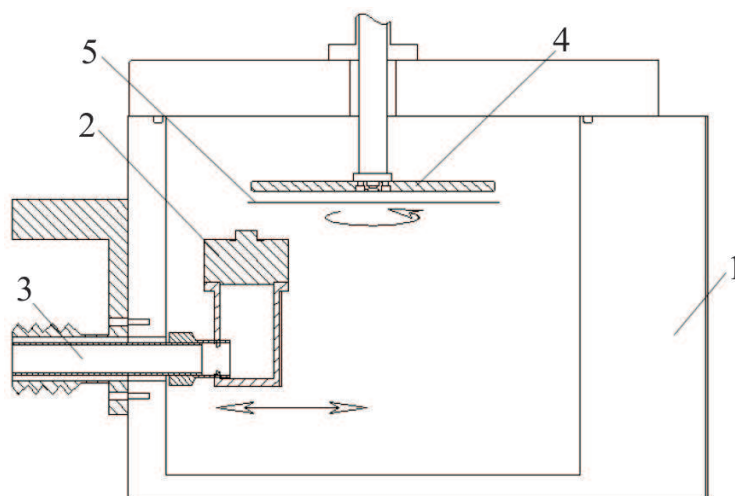


Рис. 10: Схема установки для нанорозмірної обробки поверхні твердого тіла.

дним шаром має зростаючу вольт-амперну характеристику, то потужність пучка легко регулюється зміною розрядної напруги. Профіль потужності струму іонного пучка відповідає профілю травлення поверхні зразків і показаний на рис. 8.

Для даного джерела іонів розроблено безрозжарювальний плазмовий нейтралізатор заряду іонного пучка на основі додаткового несамостійного газового розряду магнетронного типу із застосуванням ефекту «порожнистого катода». Його застосування дозволяє здійснювати високоефективну струмову нейтралізацію іонного пучка електронами і використовувати джерело іонів для іонно-променевої обробки діелектричних матеріалів також іонами хімічно активних газів.

Процес іонно-променевого полірування включає два етапи. На першому етапі трипроменевим інтерферометром визначається товщина плівки в локальних точках поверхні плівки. Кількість таких точок вимірювання товщини на поверхні підкладки в залежності від необхідної точності може сягати 1000, але зазвичай відповідає кількості чипів, які створюються на пластині і їх розміщенню. Топографія поверхні функціонального шару на поверхні підкладки відновлюється програмним шляхом і потім використовується для обчислення коригувальних локальних параметрів травлення. На рис. 11,а показана типова топографія поверхні плівки нітриду алюмінію. Сірі точки відповідають точкам локального вимірювання товщини плівки. Характерні параметри топографії: середнє значення товщини плівки – 8265.4 Å, максимальна товщина – 8341.7 Å, мінімальна товщина – 8179.8 Å, амплітуда – 161.8 Å.

Потрібно відзначити, що для партії зразків, отриманих на тому самому обладнанні і в однакових технологічних умовах, топографія поверхні і її параметри мало відрізняються, тому надалі можна використовувати їхні середні значення. На другому етапі функціональний шар на підкладці травиться скануючим іонним пучком. Локалізація і потужність іонного пучка програмно управляється таким чином,

щоб величина травлення відповідала топографії неоднорідності товщини функціонального шару. Після обробки іонним пучком для контролю ефективності процесу полірування повторюється процес визначення топографії поверхні.

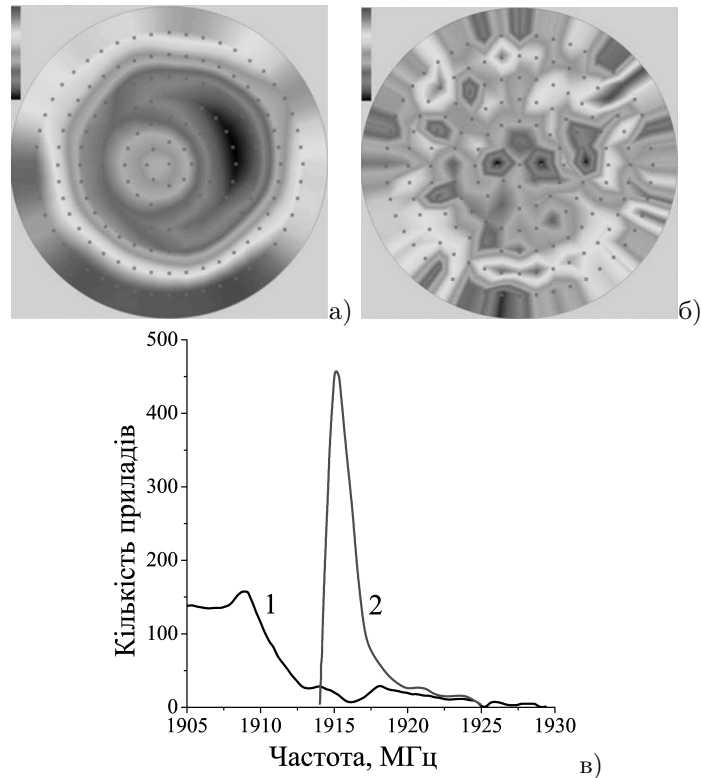


Рис. 11: Типова топографія поверхні плівки нітриду алюмінію, отриманого реактивним магнетронним напиленням (а), та топографія поверхні, отримана після полірування скануванням іонним пучком за один раз (б). (в) – розподіл кількості FBAR в залежності від резонансної частоти: 1 – початковий; 2 – після полірування.

На рис. 11,б показана типова топографія поверхні плівки нітриду алюмінію після одноразового скануючого травлення поверхні плівки іонним пучком. Характерні параметри топографії поверхні плівки після іонно-променевого полірування: середнє значення товщини плівки – 8172.3 \AA , максимальна товщина – 8176.2 \AA , мінімальна товщина – 8169.0 \AA , амплітуда – 7.2 \AA . Таким чином, неоднорідність товщини плівок за рахунок іонно-променевого полірування можна знизити до субнанометрового розміру. Ефективність процесу іонно-променевого полірування демонструється на рис. 11(в), де показано розподіл кількості тонкоплівкових об'ємних акустичних резонаторів (FBAR), отриманих на одній підкладці, від резонансної робочої частоти. Видно, що частотна смуга знижується більше, ніж у два рази, що забезпечує в промисловості збільшення якості і виходу придатних приладів у мікроелектроніці.

3 Висновки

Досліджено процес коригуючого локального іонно-променевого травлення для регулювання товщини функціональних шарів мікроелектроніки з високою точністю. Функціональний шар на підкладці травиться скануючим сфокусованим іонним пучком середніх енергій, локалізація і потужність, якого відповідає топографії неоднорідності товщини функціонального шару. Показано можливість регулювання розподілу товщини плівок по поверхні підкладок до $\pm 4 \text{ \AA}$ і зменшення шорсткості поверхні. Таким чином, неоднорідність товщини можна знизити до субнанометрового розміру.

В роботі було теоретично розраховано траєкторії руху іонів різних робочих газів у сфокусованому джерелі іонів холівського типу. На базі цих розрахунків було оптимізовано реверсивну магнітну систему для нанорозмірної обробки поверхні твердого тіла. Експериментально було отримано інтерферометричну картину профілю травлення сфокусованого джерела іонів, яка свідчить про високу густину потужності до 3 кВт/см^2 в площині кроссовера. Також було теоретично розраховано просторовий розподіл температури при взаємодії сфокусованого пучка іонів водню з пластиною вольфраму. Розрахунки вказують на можливі значні теплові навантаження на поверхню твердого тіла. Ці результати свідчать про можливість застосування даної модифікації джерела для експериментів з моделювання взаємодії плазми зі стінкою в термоядерних установках. Також було отримано залежність температури поверхні вольфраму в точці максимальної густини потужності від часу.

Список використаної літератури

1. *Brown Ian G.* The Physics and Technology of Ion Sources / Ian G. Brown// – 2004. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 37 p.
2. *Zhurin V.V.* Physics of closed drift thrusters/ V.V. Zhurin, H.R. Kaufman. R.S. Robinson// – 1999. – Plasma Sources Sci. Technol. 8 R1.
3. *Gutkin M.* Focused Anode Layer Ion Source With Converging and Charge Compensated Beam (FALCON)/ M. Gutkin, A. Bizyukov, V. Sleptsov [et al.]// U.S. Patent #US 7,622,721 B2, 2008/0191629 A1.
4. *Bizyukov A.A.* Hall ion source with ballistic and magnetic beam focusing/ A.A. Bizyukov, O.I. Girka, K.N. Sereda, A.V. Nazarov, E.V. Romaschenko [et al.]// Problems of atomic science and technology – 2008. – № 6. Series: Plasma Physics – P. 174-176.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2012
прийнята до друку 17.10.2012

OPTIMIZATION OF ION BEAM SYSTEM FOR NANOTRIMMING OF SOLID SURFACE

I. Misiruk, O. Girka, K. Sereda, A. Bizyukov

*Kharkiv 'V.N.Karazin' National University,
Department of Plasma Physics
4 Svobody sq., Kharkiv, 61077, Ukraine
e-mail: ivanmisiruk@gmail.com*

This paper concerns with investigation of the trimming process which uses ion beam etching for high-precision adjustment of the thickness of functional microelectronics layers. The layer deposited on the substrate is etched by scanning focused ion beam; its position and power is regulated according to the topography of layer non-uniformity. The trimming allows to create pre-defined topography of the non-uniformity with accuracy down to 4 Å and decrease the roughness of the surface.

Key words: ion beam, ion beam trimming, functional layer

ОПТИМИЗАЦИЯ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

И. Мисирук, А. Гирка, К. Середка, А. Бизюков

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
кафедра физики плазмы
пл. Свободы, 4, 61077, Харьков, Украина
e-mail: ivanmisiruk@gmail.com*

Исследован процесс корректирующего ионно-лучевого травления как средство регулировки толщины функциональных слоев микроэлектроники с высокой точностью. Функциональный слой на подложке травится сканирующим сфокусированным ионным пучком, локализация и мощность которого соответствует топографии неоднородности толщины функционального слоя. Показана возможность регулировки распределения толщины пленок по поверхности подложек до ± 4 Å и уменьшение шероховатости поверхности.

Ключевые слова: ионный пучок, ионно-лучевое травление, функциональный слой