

PACS numbers: 07.85.Fv, 41.50.+h, 61.05.-a, 68.55.J-, 81.15.Cd, 81.16.Nd, 82.80.Yc

## **Створення елементів рентгенівської оптики із застосуванням протонно-променевої літографії**

**В. М. Коломієць, С. М. Кравченко, І. М. Кононенко, О. Г. Пономарьов,  
В. А. Ребров, С. В. Колінько**

*Інститут прикладної фізики НАН України,  
вул. Петропавлівська, 58,  
40030 Суми, Україна*

Метода рентгенівської фазово-контрастної візуалізації як метода дослідження структури об'єктів є надзвичайно перспективною з точки зору практичного застосування, особливо в галузі медицини. Але для реалізації цієї методи потрібна значна ступінь когерентності Рентгенового випромінення. Створення Тальботового інтерферометра на основі рентгенівських фазових дифракційних ґратниць дає можливість працювати з поліхроматичним випроміненням Х-променевої трубки. Це уможливило уникнути використання дорогого наукового обладнання, наприклад синхротрона, і значно пришвидшує широке застосування цієї методи. Зазвичай, модельними фазовими ґратницями є ґратниці на основі силіцію з гальванічно осадженим золотом, оскільки золото має достатньо високу густину та велике значення масового коефіцієнта поглинання Рентгенового випромінення. Оскільки золото є достатньо коштовним матеріалом, то в якості поглинального матеріалу можна використовувати бісмут, який значно дешевший і неістотно погіршує фізико-технічні характеристики фазових дифракційних ґратниць. В роботі запропоновано методику виготовлення ґратчастих структур на основі монокристалічного силіцію з поглинальним матеріалом бісмутом за допомогою протонно-променевої літографії. Експонування протонним пучком окремих ділянок зразків з попередньо нанесеним позитивним фоторезистом ПММА є необхідним для проведення наступних етапів процесу виготовлення фазових ґратниць — вищавлювання опромінених областей і гальванопластики. В результаті проведених експериментів були одержані дослідні зразки ґратчастих структур висотою близько 15 мкм, періодом у 85 мкм та шпаруватістю у 0,4. Для дослідження структури та висоти зразків використовувалася метода растрової електронної мікроскопії.

X-ray phase-contrast image visualization as a study method of object structure is extremely promising as to its practical application, in particular, in medi-

cine. However, it requires high level of x-ray coherence. The Talbot interferometer method based on x-ray phase diffraction gratings allows operations with polychromatic radiation of an x-ray tube; thus, there is no need in expensive and bulky equipment like synchrotron. Since gold has rather high density and high x-ray absorption coefficient, the gratings based on a silicon single crystal with an electrodeposited gold usually present the model phase gratings. As gold is a very expensive material, bismuth may be applied as an absorption material, because it is cheap and insignificantly deteriorate the physical and technical properties of x-ray phase diffraction gratings. This work proposes a fabrication method for the grating structures based on single-crystalline silicon with bismuth as an absorption material and the proton-beam lithography applied (a nuclear scanning microprobe end-station of an electrostatic accelerator at the Institute of Applied Physics of the N.A.S. of Ukraine, Sumy). Positive resistant material PMMA is coated with a centrifuge method on the thin copper films (of 50 nm) with a Ti sublayer (of 15 nm) preliminary sprayed on a single-crystalline Si substrate with a magnetron sputtering technique. Some areas of the samples with PMMA photoresist underwent the exposure of a proton beam with an experimentally determined irradiation dose (of about 90 nC/mm<sup>2</sup>) required for the complete etching of the radiated areas. The exposure is necessary for further stages of phase-gratings' fabrication, namely, etching of the radiated areas and electroplating. Bismuth electroplating is performed with current density of about 3 mA/cm<sup>2</sup>. In the course of the experiments, the test samples of the grating structures of 15- $\mu$ m height, 85- $\mu$ m period, and 0.4 off-duty ratio are obtained. Rutherford backscattering of ions is used to study the structure thickness at certain stages; scanning electron microscopy is applied to study the structure and height of the samples at the final stage of fabrication.

Метод рентгеновской фазово-контрастной визуализации как метод исследования структуры объектов является чрезвычайно перспективным с точки зрения практического применения, особенно в области медицины. Но для реализации этого метода требуется значительная степень когерентности рентгеновского излучения. Создание интерферометра Тальбота на основе рентгеновских фазовых дифракционных решёток даёт возможность работать с полихроматическим излучением рентгеновской трубки. Это позволяет избежать использования дорогостоящего научного оборудования, например синхротрона, и значительно ускоряет широкое применение этого метода. Обычно модельными фазовыми решётками являются решётки на основе кремния с гальванически осаждённым золотом, так как золото имеет достаточно высокую плотность и большое значение массового коэффициента поглощения рентгеновского излучения. Поскольку золото — достаточно дорогой материал, то в качестве поглощающего материала можно использовать висмут, который значительно дешевле и несущественно ухудшает физико-технические характеристики фазовых дифракционных решёток. В работе предложена методика изготовления решёточных структур на основе монокристаллического кремния с поглощающим материалом висмутом с помощью протонно-лучевой литографии. Экспонирование протонным пучком отдельных участков образцов с предварительно нанесённым положительным фоторезистом ПММА необходимо для проведения следующих этапов процесса изготов-

лення фазових решіток — витравлювання облучених областей і гальванопластики. В результаті проведених експериментів були отримані образці решітчастих структур висотою близько 15 мкм, періодом 85 мкм і скважністю 0,4. Для дослідження структури і висоти образців використовувався метод растрової електронної мікроскопії.

**Ключові слова:** рентгенівська фазово-контрастна метода, фазова дифракційна ґратниця, протонно-променева літографія, магнетронне розпорощення, фоторезист ПММА, експонування, вищавлювання, гальванопластика.

**Key words:** x-ray phase-contrast imaging, x-ray phase diffraction grating, phase proton-beam lithography, magnetron sputtering, resistant material PMMA, exposure, etching, electroplating.

**Ключевые слова:** рентгеновский фазово-контрастный метод, фазовая дифракционная решётка, протонно-лучевая литография, магнетронное распыление, фоторезист ПММА, экспонирование, травление, гальванопластика.

*(Отримано 19 листопада 2018 р.)*

## 1. ВСТУП

Останнім часом в науці і техніці досить активно розвивається новий напрям досліджень, який пов'язаний з рентгенівською фазово-контрастною візуалізацією об'єктів. Рушійною силою цих досліджень став той факт, що для підвищення контрастності рентгенограм, замість реєстрації інтенсивності випромінювання, можна реєструвати фазовий зсув Рентгенових променів при проходженні їх через об'єкт дослідження. При фазово-контрастній методі візуалізації зміщення фаз безпосередньо не вимірюється, оскільки воно приводить до зміни інтенсивності випромінювання, яку можна потім фіксувати детектором, як і при стандартних рентгенівських методах. Це найбільш актуально при дослідженні об'єктів, які мають низьку ефективність поглинання Рентгенового випромінювання. Прикладом є м'які біологічні тканини, полімери або волокнисті композиційні матеріали [1].

Фазово-контрастну методу було відкрито ще в 1930 році голландським фізиком Фріцом Церніке (Нобелівська премія 1953 р.) [2]. З того часу було розроблено ряд методів для використання рентгенівського фазового контрасту, але всі ці методи потребували значного ступеня когерентності використовуваного випромінювання [3, 4]. Ця проблема була вирішена шляхом використання фазових дифракційних ґратниць у Тальботовому інтерферометрі, які уможливають працювати з поліхроматичним випромінюванням рентгенівської трубки [1]. В цьому інтерферометрі використову-

ють 3 типи ґратниць: ґратниця джерела, яка потрібна для одержання просторово когерентного рентгенівського випромінення (source grating); фазозсувна ґратниця — для зміни фази випромінення на  $\pi$  або  $\pi/2$  (splitter grating); ґратниця аналізатора — для розділення інтерференційної картини (analyser grating) [5].

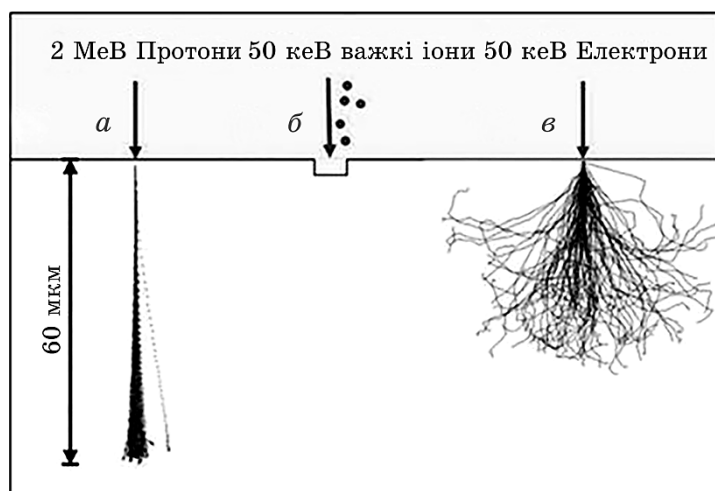
При створенні фазових дифракційних ґратниць в якості поглинального матеріялу, зазвичай, використовують золото, що зумовлено його достатньо високою густиною ( $19,3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) та великим значенням масового коефіцієнта поглинання Рентгенового випромінення ( $25,84 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ ) за енергії у 31 кеВ. Але витрати золота на виготовлення однієї ґратниці становлять декілька грам, що значно підвищує вартість виробництва [6].

Альтернативою золота може стати оливо або бісмут завдяки їхній достатньо низькій вартості та порівнянню із золотом масовому коефіцієнту поглинання Рентгенового випромінення. Оливо та бісмут мають густини  $11,34$  і  $9,8 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  та масові коефіцієнти поглинання  $27,5$  і  $28,9 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$  відповідно за енергії Рентгенового випромінення у 31 кеВ. Із співвідношення між інтенсивністю падного Рентгенового випромінення  $I_0$  та інтенсивністю вихідного випромінення  $I_i$ :  $I_i/I_0 = \exp(-\mu_m \rho l)$ , де  $\mu_m$  — масивний коефіцієнт поглинання,  $\rho$  — густина матеріялу, а  $l$  — поперечний переріз Рентгенового променя, можна зробити висновок про те, що ефективність поглинання Рентгенового випромінення оливом та бісмутом нижча за ефективність поглинання випромінення золотом у 1,54 та в 1,7 рази відповідно при 31 кеВ [7].

Зважаючи на дорожнечу золота та токсичність олива, є сенс проводити експерименти з виготовлення ґратниць, де в якості поглинального матеріялу є бісмут. Тому нашу роботу присвячено вивченню можливості виготовлення ґратниці джерела на основі підкладки з монокристалічного кремнію з гребенями бісмуту з використанням протонно-променевої літографії.

## 2. МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ФАЗОВИХ ҐРАТНИЦЬ ДЖЕРЕЛА РЕНТГЕНОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Виготовлення фазових ґратниць передбачає використання літографічного процесу для одержання гребінчастої структури. Достатньо ефективною в цьому напрямі, з нашої точки зору, є протонно-променева літографія, оскільки для протонів бічний розкид пучка дуже малий порівняно з глибиною проникнення в матеріял [8]. Цей розкид відбувається в кінці діапазону, а для перших двох третин шляху (рис. 1) промінь має поперечні розміри такі, як і до входу в матеріял. Тому використання протонно-променевої літографії уможливорює одержувати тривимірні структури з високим аспектним відношенням і високою якістю біч-



**Рис. 1.** Порівняння проникної здатності в Si: (а) протонного пучка (*p*-beam), (б) йонного пучка (FIB) та (в) електронного пучка (*e*-beam). Зображення *p*-beam та *e*-beam були симульовані за допомогою програм RIM і CASINO відповідно [8].<sup>1</sup>

них стінок (шерсткість на рівні 3 нм) [9].

В нашій роботі одержання ґратниць джерела з використанням протонно-променевої літографії відбувалося в декілька етапів: підготовка підкладинки; напорошення металевої плівки на підкладинку (плівка потрібна для гальванопластики); нанесення, експонування та щавлення фоторезисту (полімерний світлочутливий матеріал, який змінює свою розчинність при опромінюванні); гальванічне нанесення бісмуту.

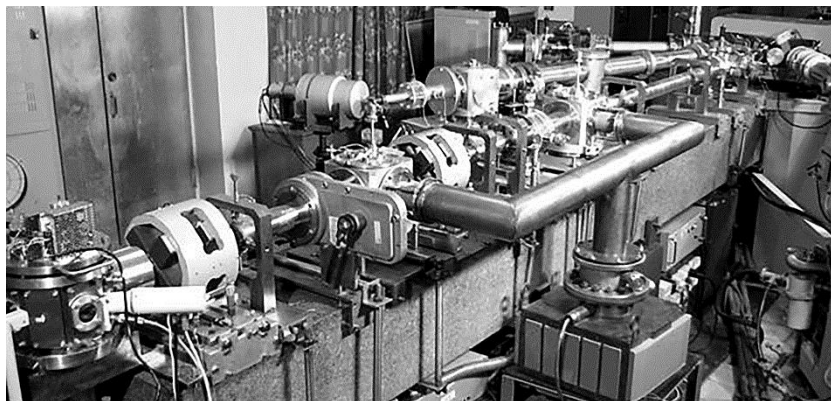
**Підготовка підкладинки.** Підкладинки з монокристалічного полірованого Si площею близько 1 см<sup>2</sup> по чергово промивалися в бензині марки «Калоша» та етиловому спирті з застосуванням ультразвукового приладу УЗДН SELMI, після чого розміщались у вакуумній камері установки ВУП-5М.

**Напорошення металевої плівки.** В установці ВУП-5М на цю підкладинку методом магнетронного розпорошення в середовищі очищеного аргону було напорошено плівку Cu ( $\cong 50$  нм) з підшаром Ti ( $\cong 15$  нм) при температурі підкладинки у 200°C. Товщина шарів вимірювалася методом Резерфордського зворотнього розсіювання (РЗР). Детально цю методику вимірювання товщини тонкопліткових зразків описано в роботі [10]. Матеріал металевої плівки (мідь) був обраний, виходячи з міркувань високого значення провідності, що є вагомим при проведенні гальванічного осадження. Підшар Ti необхідний для поліпшення адгезії мідної плівки до підкладинки.

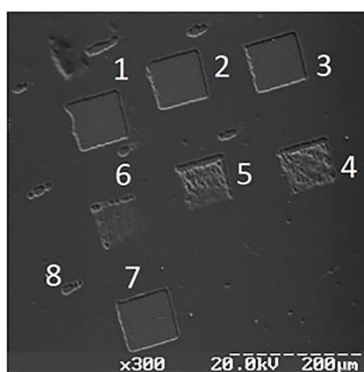
**Нанесення, експонування та шавлення фоторезисту.** В якості резистивного матеріалу був використаний позитивний фоторезист ПММА (поліметилметакрилат, хемічна формула  $C_5O_2H_8$ ). Для одержання 4%-розчину резисту механічно подрібнений порошок ПММА був розчинений в анізолі (хемічна формула —  $C_6H_5OCH_3$ ) впродовж 10 хвилин за допомогою ультразвукової установки УЗДН SELMI.

Відомо, що співвідношення мас резисту та розчинника впливає на товщину шару резисту на підкладинці [11]. Для нанесення розчину резисту на підкладинки використовувалася центрифуга ОПН-8 в режимі швидкості обертання у 2000 об./хв. На підкладинку, що закріплювалася у центрифугі, було нанесено  $\approx 10$  мкл розчину ПММА, а потім проводилося центрифугування впродовж 3 хвилин. Далі, для видалення залишку розчинника (анізолу) зразки сушилися на повітрі. Такі умови нанесення фоторезисту уможливили одержати його тонкий і рівномірний шар, про що свідчила інтерференційна картина одного кольору на поверхні резисту.

Відомо, що молекула фоторезисту ПММА являє собою ланцюг зв'язаних мономерів, загальна атомна маса яких сягає кількох сотень тисяч атомних одиниць. Експонування високоенергетичним протонним пучком такої молекули приводить до розпадання останньої на окремі фрагменти з меншою молекулярною масою. Щоб досягти якісного вищавлювання резисту, який опромінюють, треба враховувати, що доза опромінення залежить від молярної маси, і тому потрібно було експериментально визначити дозу опромінення для конкретного несертифікованого резисту ПММА [12]. Час експозиції пучка протонів в точці зразка (пікселі) встановлювався, виходячи з таких параметрів, як розмір сфокусовано-



**Рис. 2.** Загальний вигляд каналу ЯСМЗ (ядерний сканувальний мікроскоп) в ІПФ НАН України (м. Суми) [14].<sup>2</sup>



**Рис. 3.** РЕМ-зображення опромінених і процавлених областей. Цифрами позначено номери областей: № 1 — 90 нКл/мм<sup>2</sup>; № 2 — 180 нКл/мм<sup>2</sup>; № 3 — 250 нКл/мм<sup>2</sup>; № 4 — 36 нКл/мм<sup>2</sup>; № 5 — 45 нКл/мм<sup>2</sup>; № 6 — 20 нКл/мм<sup>2</sup>; № 7 — 890 нКл/мм<sup>2</sup>. Цифрою 8 позначено початкове положення пучка при опроміненні області № 7.<sup>3</sup>

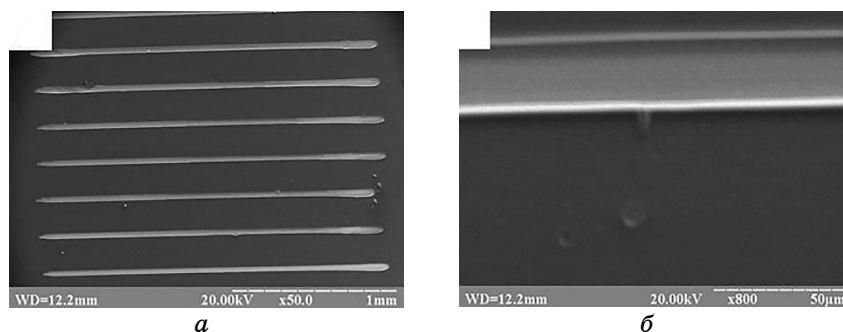
го пучка і його загальний струм, що були попередньо визначені. Згідно з літературними даними [13], для пучка протонів МеВ-них енергій при одержанні 3D-структур необхідна доза для резисту ПММА складає 80–150 нКл/мм<sup>2</sup>.

Керування (сканування) сфокусованим пучком протонів у методі протонно-променевої літографії здійснювалось електромагнетною сканувальною системою в каналі ядерного сканувального мікросонду (ЯСМЗ) на електростатичному пришвидшувачі в ІФ НАН України (рис. 2).

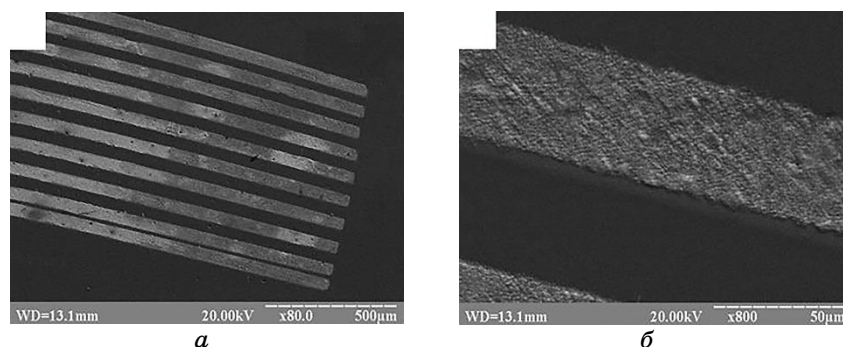
Для визначення необхідної дози опромінення фоторезисту було опромінено різними дозами зразок з підкладкою з полікору в сімох областях, які мали вигляд квадрату зі стороною близько 70 мкм.

Наступним після опромінення етапом є відокремлення експонованих і неекспонованих реагентів. Однією з метод такого відокремлення є щавлення зразка в ізопропіловому спирті з дейонізованою водою (співвідношення 7:3) з подальшим подвійним промиванням в дейонізованій воді та сушкою на повітрі. В результаті щавлення були одержані зображення опромінених областей за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ) (рис. 3). З цього рисунку видно, що внесена доза в областях 4–6 була недостатньою, про що свідчить не повністю вищавлений резист внаслідок недостатньої зміни його властивостей під дією опромінення.

Доза опромінення, яка перевищує 90 нКл/мм<sup>2</sup> (областях 1–3, 7), є достатньою для того, щоб розірвати всі полімерні ланцюжки по всій глибині резисту [12].



**Рис. 4.** РЕМ-зображення процавленого зразка Si/Ti/Cu з фоторезистом: а) збільшення в 50 разів; б) збільшення в 800 разів.<sup>4</sup>



**Рис. 5.** РЕМ-зображення зразка Si/Ti/Cu з фоторезистом і гальванічно осадженим Bi: а) збільшення в 80 разів; б) збільшення в 800 разів.<sup>5</sup>

В результаті опромінення зразків з фоторезистом на підкладці Si/Ti/Cu дозою близько  $90 \text{ нКл/мм}^2$  та їх щавлення в ізопропіловому спирті з дейонізованою водою були одержані РЕМ-зображення опромінених областей площею близько  $2 \text{ мм}^2$  (рис. 4).

Зазначимо, що в нашій роботі використовувався канал ЯСМЗ з максимальною енергією пучка протонів до 2 MeV. Тому, згідно з результатами роботи [15], максимальна глибина проникнення протонів в фоторезисті ПММА становить 60,8 мкм. Для поліпшення аспектного відношення цей показник можна збільшити шляхом збільшення енергії пучка протонів, оскільки енергія йону є основним чинником, який впливає на його глибину проникнення для певного матеріялу [16].

Останнім етапом одержання фазової ґратниці джерела був процес гальванопластики. Гальванічне осадження бісмуту відбувалося з густиною струму у  $3 \text{ mA/cm}^2$ . Зображення з растрового електронного мікроскопа поверхні зразків після гальванопластики



представлено на рис. 5.

В результаті проведених експериментів з виготовлення фазових ґратниць джерела були одержані періодичні структури висотою, за РЕМ-дослідженнями, близько 15 мкм, періодом у 85 мкм та шпаруватістю близько 0,4.

### 3. ВИСНОВКИ

Метода Тальботового інтерферометра на основі фазових дифракційних ґратниць — це метода, яка може бути застосована для одержання якісних фазоконтрастних зображень біологічних об'єктів. При цьому в якості джерела випромінювання можна використовувати рентгенівську трубку, а не громіздкий і дорогий синхротрон. Виготовлення фазоконтрастних ґратниць має бути максимально зручним процесом і придатним для масового виробництва, але без значного пониження якості. Як альтернативу золоту, в якості поглинального матеріалу можна використовувати бісмут, що здешевлює процес виготовлення ґратниць і неістотно погіршує їхні технічні характеристики. Відповідно, в результаті проведених робіт (з використанням протонно-променевої літографії) були одержані дослідні зразки фазових ґратниць з висотою гребенів бісмуту близько 15 мкм.

Метода протонно-променевої літографії є перспективною для руху в область більш високих енергій Рентгенового випромінювання, оскільки уможливує одержувати ґратниці з високим аспектним відношенням.

### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. C. David, J. Bruder, T. Rohbeck, C. Grunzweig, C. Kottler, A. Diaz, O. Bunk, and F. Pfeiffer, *Microelectronic Engineering*, **84**: 1172 (2007).
2. F. Zernike, *Physica. Part I*, **9**: 686 (1942).
3. R. Fitzgerald, *Phys. Today*, **53**, No. 7: 23 (2000).
4. A. Momose, *Opt. Express*, **11**, No. 19: 2303 (2003); <https://doi.org/10.1364/OE.11.002303>.
5. F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk, and C. David, *Nature Phys.*, **2**: 258 (2006).
6. D. Noda, M. Tanaka, K. Shimada, W. Yashiro, A. Momose, and T. Hattori, *Microsyst. Technol.*, **14**: 1311 (2008).
7. J. Als-Nielsen and D. McMorrow, *Elements of Modern X-Ray Physics* (Chichester: Wiley: 2011).
8. F. Watt, M. V. H. Breese, A. A. Bettiol, and J. A. Van Kan, *Materials Today*, **10**, No. 6: 20 (2007).
9. C. Udalagama, A. A. Bettiol, and F. Watt, *Phys. Rev. B*, **80**: 224107 (2009).
10. В. Н. Коломиєц, И. Н. Кононенко, С. Н. Кравченко, М. И. Захарец, В. Е. Сторижко, В. И. Возный, А. Н. Бугай, А. Ю. Девизенко, *Металлофиз.*

- новейшие технол., **38**, № 6: 815 (2016); doi:10.15407/mfint.38.06.0815.
11. H. W. Ro, Y. Ding, and H.-J. Lee, *J. Vac. Sci. Technol.*, **24**, No. 6: 2973 (2006).
  12. А. Г. Пономарев, А. С. Лапин, С. В. Колин'ко, В. А. Ребров, В. О. Журба, М. В. Петровский, В. Н. Коломиец, С. Н. Кравченко, *Ж. нано-электрон. физ.*, **9**, № 6: 06010 (2017); doi:10.21272/jnep.9(6).06010.
  13. J. A. Van Kan, A. A. Bettioli, and S. Y. Chiam, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **260**: 460 (2007).
  14. O. M. Buhay, A. A. Drozdenko, M. I. Zakharets, I. G. Ignat'ev, A. B. Kramchenkov, V. I. Miroshnichenko, A. G. Ponomarev, and V. E. Storizhko, *Physics Procedia*, **66**: 166 (2015).
  15. А. А. Пономарева, *Квадрупольные зондоформирующие системы со свободными параметрами фокусирующих полей* (Диссертация на соискание учёной степени канд. физ.-мат. н.) (Сумы: 2013).
  16. J. A. Van Kan, T. C. Sum, T. Osipowicz, and F. Watt, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **161**: 366 (2000).

## REFERENCES

1. C. David, J. Bruder, T. Rohbeck, C. Grunzweig, C. Kottler, A. Diaz, O. Bunk, and F. Pfeiffer, *Microelectronic Engineering*, **84**: 1172 (2007).
2. F. Zernike, *Physica Part I*, **9**: 686 (1942).
3. R. Fitzgerald, *Phys. Today*, **53**, No. 7: 23 (2000).
4. A. Momose, *Opt. Express*, **11**, No. 19: 2303 (2003); <https://doi.org/10.1364/OE.11.002303>.
5. F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk, and C. David, *Nature Phys.*, **2**: 258 (2006).
6. D. Noda, M. Tanaka, K. Shimada, W. Yashiro, A. Momose, and T. Hattori, *Microsyst. Technol.*, **14**: 1311 (2008).
7. J. Als-Nielsen and D. McMorrow, *Elements of Modern X-Ray Physics* (Chichester: Wiley: 2011).
8. F. Watt, M. B. H. Breese, A. A. Bettioli, and J. A. Van Kan, *Materials Today*, **10**, No. 6: 20 (2007).
9. C. Udalagama, A. A. Bettioli, and F. Watt, *Phys. Rev. B*, **80**: 224107 (2009).
10. V. N. Kolomiyets, I. N. Kononenko, S. N. Kravchenko, M. I. Zakharets, V. Yu. Storizhko, V. I. Vozny, A. N. Buhay, And A. Yu. Devizenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 6: 815 (2016) (in Russian); doi:10.15407/mfint.38.06.0815.
11. H. W. Ro, Y. Ding, and H.-J. Lee, *J. Vac. Sci. Technol.*, **24**, No. 6: 2973 (2006).
12. А. Г. Пономарев, А. С. Лапин, С. В. Колин'ко, В. А. Ребров, В. О. Журба, М. В. Петровский, В. Н. Коломиец, and С. Н. Кравченко, *J. Nano-Electron. Phys.*, **9**, No. 6: 06010 (2017) (in Russian); doi:10.21272/jnep.9(6).06010.
13. J. A. Van Kan, A. A. Bettioli, and S. Y. Chiam, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **260**: 460 (2007).
14. O. M. Buhay, A. A. Drozdenko, M. I. Zakharets, I. G. Ignat'ev, A. B. Kramchenkov, V. I. Miroshnichenko, A. G. Ponomarev, and V. E. Storizhko, *Physics Procedia*, **66**: 166 (2015).
15. А. А. Пономарева, *Квадрупольные Зондоформирующие Системы Со Св-*

*bodnymi Parametrami Fokusiruyushchikh Poley* [Quadrupole Probe-Forming Systems with Free Parameters of Focusing Fields] (Thesis of Disser. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Sumy: 2013) (in Russian).

16. J. A. Van Kan, T. C. Sum, T. Osipowicz, and F. Watt, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **161**: 366 (2000).

---

*Institute of Applied Physics, N.A.S. of Ukraine,  
58 Petropavlivska Str.,  
40000 Sumy, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. Comparison of penetrating power in Si: (a) of a proton beam (*p*-beam), (б) of ion beam (FIB), and (в) of electron beam (*e*-beam). Images of *p*-beam and *e*-beam were simulated in SRIM and CASINO, respectively [8].

<sup>2</sup> Fig. 2. General view of NSMP end-station (nuclear scanning microprobe) at the Institute of Applied Physics, N.A.S. of Ukraine (Sumy) [14].

<sup>3</sup> Fig. 3. SEM image of irradiated and etched areas. Digits are numbers of the areas: No. 1—90 nC/mm<sup>2</sup>; No. 2—180 nC/mm<sup>2</sup>; No. 3—250 nC/mm<sup>2</sup>; No. 4—36 nC/mm<sup>2</sup>; No. 5—45 nC/mm<sup>2</sup>; No. 6—20 nC/mm<sup>2</sup>; No. 7—890 nC/mm<sup>2</sup>. Digit 8 denotes the starting position of the beam on the irradiated area No. 7.

<sup>4</sup> Fig. 4. SEM image of etched Si/Ti/Cu areas with photoresist: a) 50 zooming; б) 800 zooming.

<sup>5</sup> Fig. 5. SEM image of Si/Ti/Cu sample with photoresist and electroplated Bi: a) 80 zooming; б) 800 zooming.