

## **ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.373.826.038

### **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНОГО І ТЕХНІЧНОГО СКЛА**

<sup>1)</sup>Канашевич Г. В., <sup>1)</sup>Голуб М. В., <sup>2)</sup>Антонюк В. С., <sup>3)</sup>Слепцов В. Ф.

<sup>1)</sup>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна;

<sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; <sup>3)</sup>Інститут сучасних знань, м. Мінськ, Білорусь

*На основі отриманих експериментальних даних та існуючих досягнень окреслені перспективи використання технології поверхневої обробки оптичного і технічного скла стрічковим електронним потоком.*

*Поверхнева електронно-променева обробка забезпечує спрямовану зміну фізичних і хімічних властивостей поверхневих шарів скла силікатної групи (К8, БК10, ТК21, фотопластин), що може вигідно використовуватися в приладобудуванні при створенні елементної бази для мікрооптоелектромеханічних приладів і систем.*

**Ключові слова:** *приладобудування, електронний потік, електронно-променева обробка, електронно-променева мікрообробка, поверхневий шар скла, оптичне скло, технічне скло, мікрооптика, інтегральна оптика.*

#### **Вступ**

У сучасному приладобудуванні технології обробки матеріалів спрямовані на одержання бездефектних хімічно однорідних (ювенільних) поверхонь і, переважно, характеризуються відмовою від використання абразивну при шліфуванні і поліруванні та впровадженням субмікронних технологій з використанням, у тому числі і електронно-променевих технологій. Такий розвиток обумовлений, з одного боку, прогресом у створенні мікрооптоелектромеханічних приладів і систем (МОEMS) [1–3] з іншого боку – вдосконаленням матеріалів та мініатюрних деталей для напівпровідникових лазерних випромінювачів, волоконно-оптичних ліній зв'язку, інтегрально-оптичних схем, виробів мікрооптики, які б забезпечили високий рівень експлуатаційної надійності цих систем [4,5,7].

В Україні прецизійні технології мають передумови розвиватися незалежно від характеру перебудови промисловості, спираючись на багаторічний досвід і успіхи з інформаційних технологій, приладобудування, оптичної промисловості [4, 6, 8]. Очевидно, що такий розвиток має бути у напрямку виготовлення та впровадження нового спеціального інструментарію для мікро- і нанотехнологій, які б забезпечили виготовлення елементної бази для МОEMS, високу екологічну чистоту та енергозбереження такого виробництва.

Перші роботи з поверхневої електронно-променевої обробки оптичного скла та ситалів належать В. М. Лісоченка [9,10] і виконані у Таганрозькому радіотехнічному інституті (Росія) у 70-х роках минулого століття і розвинуті у подальшому В. А. Ващенком [14] у Черкаському технологічному університеті.

Переважна кількість робіт Таганрозького радіотехнічного інституту спрямовані на електронно-променево обробку основи для оптоелектронних приладів та фотоемітуючих структур [11-13].

В той же час принциповими і невирішеними залишаються питання щодо перспектив та шляхів подальшого розвитку і використання технологій електронно-променевої обробки у промисловості.

**Мета роботи:** на основі існуючих досягнень та отриманих експериментальних даних визначити перспективи використання електронно-променевої обробки оптичного і технічного скла у мікротехнологіях.

### Обладнання, матеріали і інструмент електронно-променевої обробки

**Обладнання.** Електронно-променево установка виготовлена на базі вакуумної установки УВН74-ПЗ і оснащена піччю попереднього нагріву та охолодження скла. Електронний термопарний регулятор температури РИФ-101 (Феодосія, Україна) забезпечує необхідний температурний профіль печі з точністю  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Максимальна робоча температура нагріву печі  $800^\circ\text{C}$ . Механізм переміщення забезпечує рух пластин в об'ємі вакуумної камери зі швидкістю  $0 \dots 20$  см/с, залишковий тиск у вакуумній камері складає  $10^{-4}$  Па.

**Матеріали.** Оптичне скло силікатної групи марок К8, БК10, ТК21, з якого виготовлено плоскопаралельні прямокутні пластини (лінійні розміри  $70 \times 14 \times 6$  мм) та диски (діаметром 20,0 мм і товщиною 2; 4; 6; 8 мм) з відполірованими поверхнями ( $R_z = 0,025$  мкм), скло фотопластин очищене від емульсії (рис. 1).

**Інструмент обробки.** Електронно-променево гармата Пірса, яка розташована у вакуумній установці УВН74-ПЗ і генерує стрічковий електронний потік питомої потужності  $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{ном}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю  $v_{\text{ном}} = 0 \dots 20$  см/с,  $b'$  – ширина стрічки 0,5...3 мм.

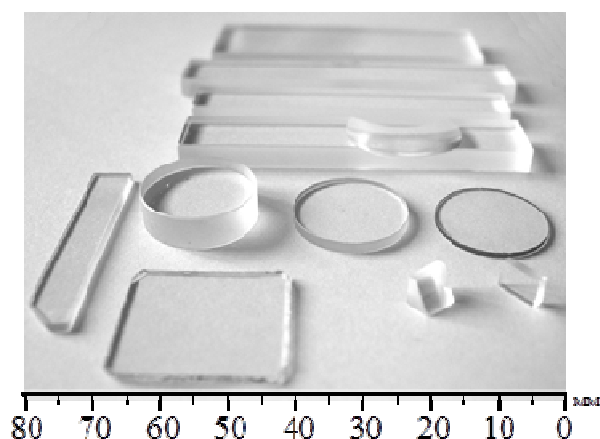


Рис. 1. Загальний вигляд пластин з оптичного і технічного скла, поверхні яких підлягали електронно-променевої мікрообробці

### Отримані результати та їх обговорення

Поверхня пластини оплавляється електронним потоком на глибину до 160 мкм (рис. 2, а) і охолодження є кінцевою стадією формування модифікованого

поверхневого шару (ПШ) (рис. 2, б). Сформований ПШ відрізняється від основного матеріалу структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією.

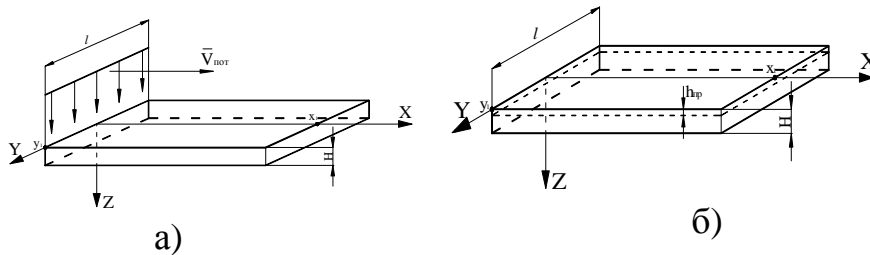


Рис. 2. Схема руху стрічкового електронного потоку відносно поверхні пластини (а) та розташування модифікованого ПШ (б)

За критерії якості поверхні та ПШ оптичного скла після електронно-променевої обробки вибираємо:

- середньостатистичний нанорельєф  $R_z$  поверхні;
- середньостатистична глибина  $h_{np}$  модифікованого ПШ;
- оптична однорідність ПШ (бездефектність, залишкові термонапруження);
- площинність  $N, \Delta N$  поверхні пластин;
- залишковий рівень вихідної поверхні  $\Delta h$ ;
- площа поверхні пластини, яку оброблено електронним потоком -  $S_{обр}$ .

При цьому, якість мікрообробки визначається станом технологічного середовища, досконалістю інструмента обробки – електронного потоку, точністю і гнучкістю керування процесом та засобами діагностики і контролю якості обробки.

Процес низькоенергетичної ( $E \leq 10$  кеВ) електронної обробки оптичних матеріалів відноситься до високотемпературних (температура в зоні дії потоку  $T = 1000 \dots 1650$  К) і передбачає сильний локальний термічний вплив електронної стрічки на ПШ заготовки (рис. 3).

На рис. 3,а представлені експериментальні залежності зміни температури ( $T, K$ ) по товщині поверхневого шару пластин скла різних марок (глибина від поверхні  $0 \dots 240$  мкм). Окреслені межі температур у яких спостерігається перехід скла від твердого до рідинно-текучого стану. Основні параметри процесу: температура попереднього нагріву скла перед електронно-променевою обробкою  $T_0, (K)$ ; швидкість електронного потоку на поверхні пластини –  $V_{пот} (cm/s)$ ; питома потужність електронного потоку –  $P_{пит} (W/cm^2)$ .

На рис. 3, б наведені залежності глибини проплавлення –  $h_{пр} (mkm)$  від температури попереднього нагріву –  $T_0, (K)$ , а на рис. 3, в – залежності, які відображають зміну параметру шорсткості –  $R_z, (nm)$  від температури попереднього нагріву скла –  $T_0, (K)$ .

Ефективно дію електронного потоку на силікатне скло можна використати, як без утворення ним рідкої фази, так із утворенням рідкої фази на поверхні матеріалу.

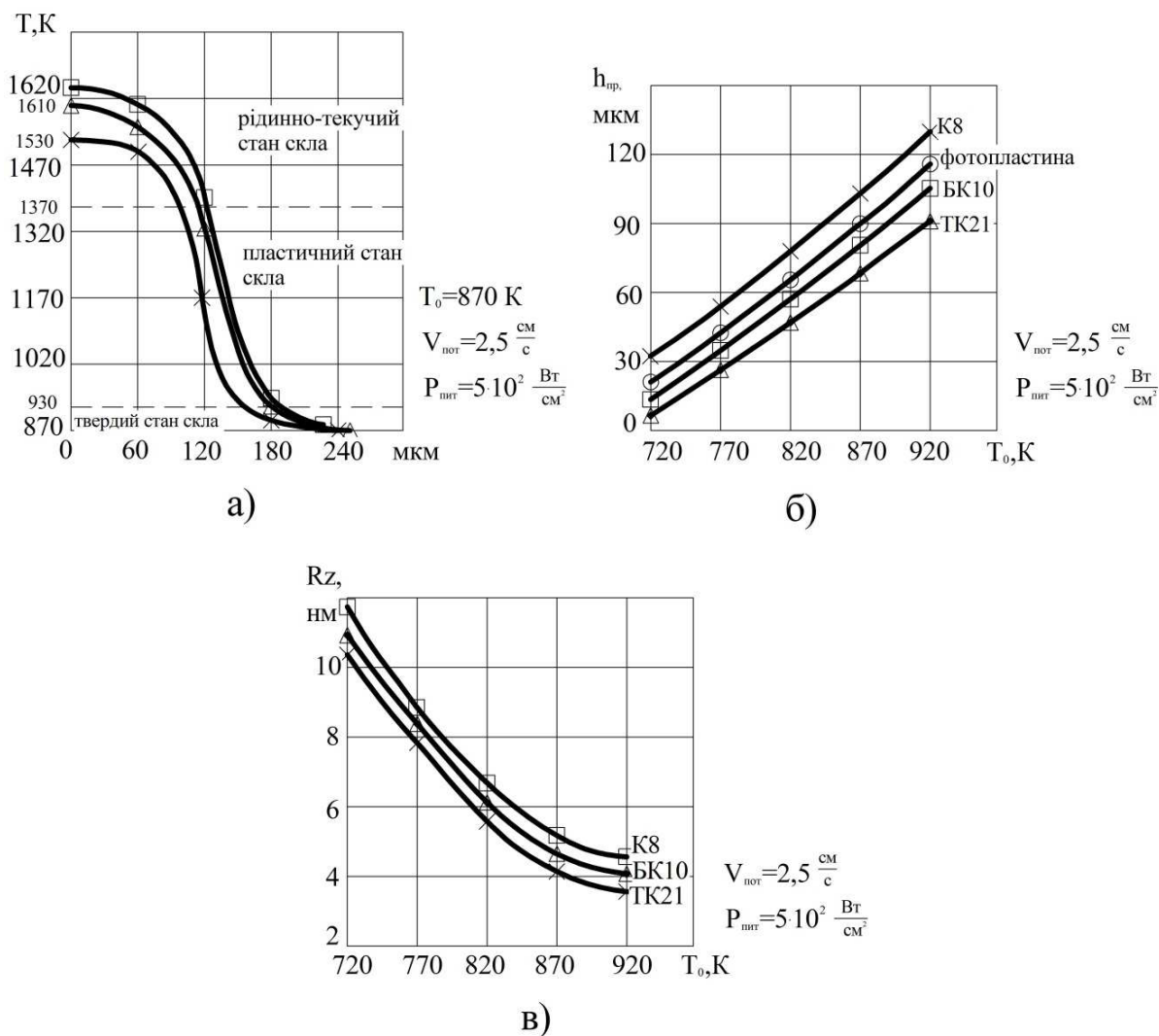


Рис. 3. Експериментальні залежності зміни температури від товщини поверхнього шару пластин скла різних марок (а); глибини проплавлення –  $h_{\text{пр}}$ , мкм (б), та - параметру шорсткості –  $R_z$ , нм (в) від температури попереднього нагріву ( $T_0$ , К), де  $V_{\text{пот}}$ , (см/с) – швидкість електронного потоку на поверхні пластини;  $P_{\text{пит}}$ , (Вт/см<sup>2</sup>) – питома потужність стрічкового електронного потоку

Коли поверхня не переплавляється, це забезпечує поліпшення оптичних властивостей ПШ за рахунок гомогенізації продуктів гідролізу, які заповнюють дефектний шар. Така мікрообробка проводиться електронним потоком на глибину до 2,0 мкм.

Коли поверхневий шар переплавляється до глибин у 10...120 мкм, це забезпечує поліпшення як оптичних, так і механічних властивостей поверхонь скляних елементів шляхом повного усунення дефектного шару.

Окремі характеристики поверхні і ПШ скла силікатної групи К8, ТК21, БК10 та фотопластин після електронно-променевої обробки наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики поверхні і поверхневого шару силікатного скла після електронно-променевої обробки

№	Марка скла	Мікротвердість, $H_v$ , МПа	Показник заломлення, $n$	Максимальні залишкові термонапруження, $\sigma$ , МПа	Усадка поверхні, $h_{зниж}$ , мкм	Мікронерівності, $R_z$ , нм
1	К8	350	1,498	6,6	0,8...12,2	4,2...4,6
2	ТК21	330	1,652	6,3	0,8...12,6	3,8...4,3
3	БК10	310	1,557	6,2	1,1...12,9	3,9...4,2
4	Фото-пластина	320	1,470	6,0	1,3...11,8	4,4...4,9

Проведений комплекс досліджень [15-18], дозволив отримати дані, науково обґрунтувати і сформулювати основні положення спрямованого модифікування ПШ оптичного і технічного скла електронним потоком:

1. Фізичною основою процесу ефективної електронної мікрообробки оптичних матеріалів з діелектричними властивостями та аморфною структурою є підвищення їх електропровідності попереднім нагрівом до температур на  $10...50^\circ\text{C}$  нижче температури початку деформації.

2. Технічною основою служить гармата Пірса, електронна оптика якої формує у вакуумі потік електронів стрічкової форми питомої потужності  $0,5 \cdot 10^1 \dots 10^4 \text{ Вт/см}^2$  і працює при прискорюючих напругах до 10кВ. Швидкість електронної стрічки на поверхні виробу змінюється в межах  $V = 0,5 \dots 10 \text{ см/с}$  і вибирається залежно від складу матеріалу, геометрії та необхідної якості обробки.

3. Основними фізико-хімічними процесами, які протікають в зоні фізичного контакту електронного потоку і поверхні силікатного скла та обумовлюють формування нової поверхні і ПШ визначено: локальне змінення в'язкості матеріалу ПШ від твердого до рідинно-текучого стану під впливом температури; десорбцію слабо зв'язаних елементів і домішок з ПШ у вакуум, ініційовану електричним полем потоку; перенесення частки матеріалу розплаву ПШ у вакуум, ініційовану температурою; дифузійні процеси, які виникають внаслідок зміни концентрації рухомих йонів  $\text{Na}^+$  та  $\text{K}^+$  за перерізом пластини і призводять до структурної перебудови ПШ, що обумовлює виникнення термонапружень у ПШ.

4. Якісні показники поверхні та стан ПШ оптичного матеріалу при їх формуванні електронним потоком залежить від електропровідності матеріалу, його теплофізичних характеристик (температуропровідності, теплопровідності), просторово-динамічних характеристик потоку, його потужності, форми, розмірів, часу дії на матеріал, а також від умов нагріву і охолодження матеріалу обробки.

5. Деструктуризація поверхонь і ПШ оптичних матеріалів електронним потоком є основою для створення шарів з іншими функціональними властивостями.

6. Висока технологічна гнучкість і адаптивність електронного потоку дозволяє застосувати його просторово-динамічні характеристики і реалізувати вибірково, як термічний так і електричний вплив на ПШ матеріалу.

Розроблена технологія базується на результатах фундаментальних досліджень процесів взаємодії електронного потоку з діелектричними матеріалами, фізико-хімічних і структурних перетворень їх поверхні та поверхневих шарів. За даною технологією на поверхні скла, з залученням літографії, створюються мікропрофілі висотою до 120 мкм з кроком 5...100 мкм, що використано для виготовлення оптичних елементів мікрометричних розмірів.

Основні стадії термічного впливу електронного потоку на ПШ оптичного і технічного скла, показники якості та функціональні призначення модифікованого ПШ наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Стадії термічного впливу на поверхневого шару оптичного технічного скла від дії стрічкового електронного потоку

Стадія термічного впливу	Режим обробки	Показники якості ПШ	Функціональні призначення ПШ
I	I $P_{\text{пит}} \leq 10^2 \text{ Вт/см}^2$ $V_{\text{обр}} < 8 \text{ см/с}$	Покращення оптичної однорідності, покращення адгезійної здатності до металевих покриттів, підвищення хімічної стійкості	Світлопропускаюча оптика, основа для металізації, захист від дії морської води і солявого туману
II	II $P_{\text{пит}} = 5 \cdot 10^2 \dots 10^3 \text{ Вт/см}^2$ $V_{\text{обр}} = 6 \dots 8 \text{ см/с}$	Знищення дефектного шару, підвищення міцності, зменшення шорсткості до 2...5 нм, відсутність мікрodefektів, зменшення показника заломлення, підвищення хімічної стійкості, покращення прозорості	Блокуючий шар для іонного обміну, основа для створення елементної бази ІО та МО, мікропрофілі для МО, оптична пам'ять, градієнтна оптика, плати для ІО та МО
III	III $P_{\text{пит}} = 2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ $V_{\text{обр}} = 1,5 \dots 6 \text{ см/с}$	Знищення дефектного шару, підвищення міцності, зменшення шорсткості до 2...5 нм, відсутність мікрodefektів, зменшення показника заломлення, підвищення хімічної стійкості, відшарування від основного матеріалу	Блокуючий шар для іонного обміну (ІО), основа для створення елементної бази ІО та МО, мікропрофілі для МО, оптична пам'ять, градієнтна оптика, плати для ІО та МО
IV	IV $P_{\text{пит}} \geq 10^4 \text{ Вт/см}^2$ $V_{\text{обр}} = 0,5 \dots 8 \text{ см/с}$	не визначалися	не визначалися

На рис. 4 представлено схематичні зображення та фотографії пластин зі скла К8, поверхня яких проплавлена електронним потоком через з'ємну маску. В якості маски використано фольгу з Ni товщиною 0,2 мм. В результаті такої

обробки на поверхні утворюється макрорельєф: за рахунок усадки оплавленої ділянки (а), або мікрорельєф після травлення такої ділянки у розчині HF (б).

Електронним потоком можна не тільки проплавити ПШ скла, але й внести термічні напруження у поверхню пластини. Керуючи напруженнями на стадії охолодження досягається іще один оригінальний результат, а саме – відшарування частини проплавленої поверхні в результаті термоудару (швидкого охолодження).

На рис. 5 представлено відшаровані поверхні товщиною 120...200 мкм, з пластин круглої і прямокутної форми зі скла ТК21 в результаті термоудару.

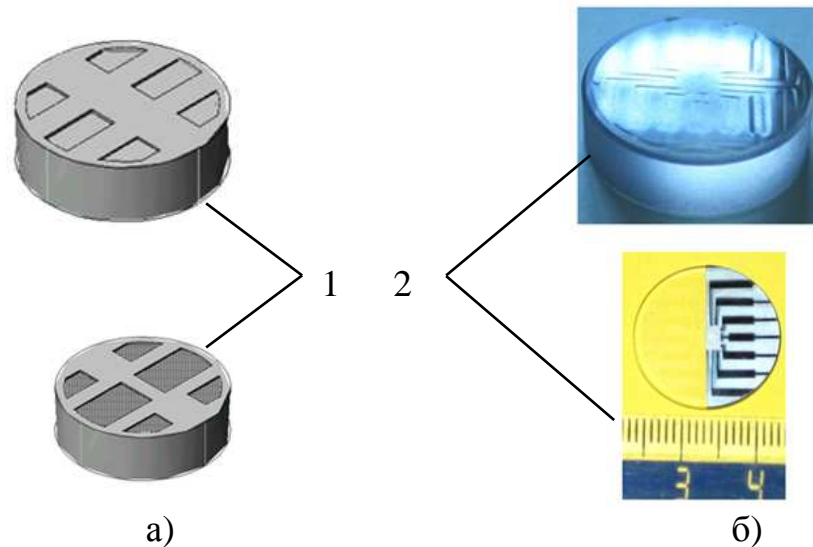


Рис. 4. Пластини зі скла К8 з макрорельєфом на поверхні після електронно-променевої обробки (а) та після травлення у розчинах HF (б): 1 – схематичне зображення пластини; 2 – отримані зразки після електронно-променевої обробки

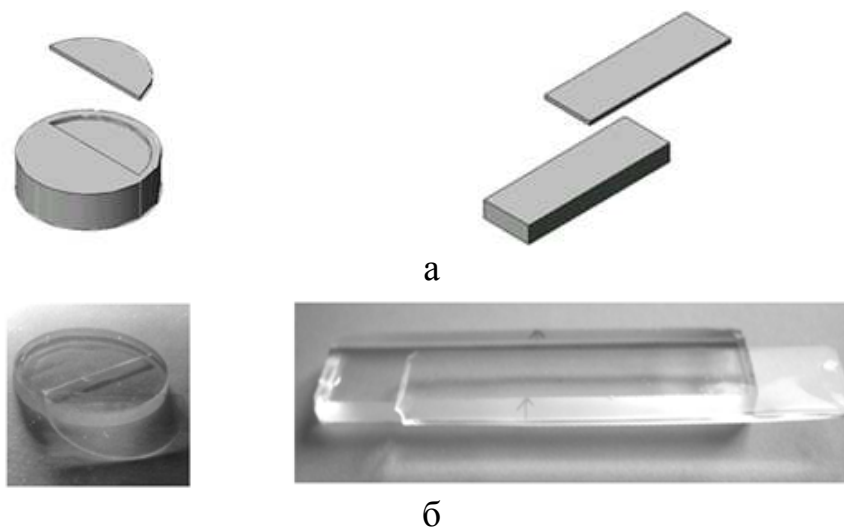


Рис. 5. Поверхні, які відшаровано з плат круглої і прямокутної форми товщиною 120...200 мкм: а – схематичне зображення пластини; б – отримані зразки після електронно-променевої обробки

Використовуючи окремі операції з фотолітографії (маскування та травлення у розчинах HF), можна отримати фокуруючі оптичні мікроелементи, які виготовлено на поверхні пластини зі скла К8 (рис. 6).

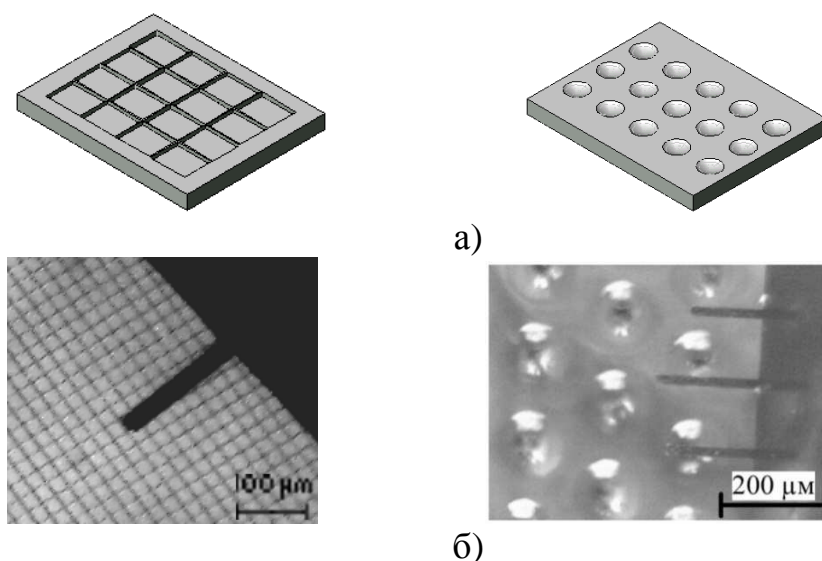


Рис. 6. Мікрооптичні фокуруючі елементи прямокутної і круглої форми на поверхні оптичного скла К8, які виготовлені за електронно-променевою технологією: а – схематичне зображення елементів; б – зразки фокуруючих оптичних мікроелементів

Наведені вище результати вказують на потенційних можливостях електронної стрічки, як прецизійного інструменту для створення технологій, у тому числі комбінованих, з технологіями мікроелектроніки.

### **Висновки**

Метод поверхневої електронно-променевої обробки оптичного і технічного скла є достатньо перспективним не тільки для розвитку приладобудування та оптичної промисловості, але й для технологій MOEMS, а його унікальність можна охарактеризувати наступними чинниками:

1. Керований термоелектричний вплив у вакуумі на крихкий оптичний матеріал від електронного потоку забезпечує розігрів, плавлення, або випаровування матеріалу поверхневого шару. Проплавлення поверхневого шару на глибину до 120 мкм забезпечує отримання бездефектних поверхонь на будь якому прозорому оптичному матеріалі з будь якою технологічною спадковістю, включаючи усю номенклатуру технічного скла.
2. Фізико-хімічні перетворення поверхні під впливом електронів у вакуумі надають такі нові властивості ПШ оптичному матеріалу за хімічним складом, показником заломлення, міцністю, які іншими методами отримати неможливо, і можуть вигідно конкурувати з існуючими прецизійними технологіями для мікрообробки.



3. Електронно-променева мікрообробка з використанням стрічкового електронного потоку та технологій мікроелектроніки може бути покладено у концепцію створення елементів нового покоління для МОEMS.

Подальше використання та вдосконалення методу електронно-променевої мікрообробки в Україні слід, на погляд авторів, прогнозувати за динамікою та рівнем науково-технічного прогресу в державі, які характеризуються характером використання природних та енергоресурсів, зміною стану оточуючого середовища, рівнем розвитку економіки, транспорту, зв'язку, військово-промислового комплексу, космічної галузі, соціальної сфери, охорони здоров'я. Для ефективного розвитку цих напрямків, необхідною умовою є робота інноваційного характеру у напрямку розвитку мікро- і нанотехнологій, створення наноматеріалів, у тому числі, вдосконалення оптичної промисловості до рівня виготовлення МОEMS.

Розширення виробництва мікрооптики, як за рахунок впровадження сучасного лазерного і електронно-променевого інструментарію, так і внаслідок безперервного удосконалення технологічного обладнання у напрямку його універсалізації, автоматизації і багатоопераційності дозволить інтенсифікувати розвиток в Україні прецизійних технологій мікрообробки оптичних матеріалів, спеціалізованого обладнання для виготовлення МОEMS.

#### **Література**

1. МОEMS: micro-opto-electro-mechanical system / Manouchehr E. Motamedi, editor. p. 615.
2. MEMS Micro-Electro-Mechanical System, ST Microelectronics. – Режим доступу: [www.st.com](http://www.st.com).
3. MEMS inOpticalNetworks. – Режим доступу: [www.allaboutmems.com](http://www.allaboutmems.com).
4. Конопальцева Л. И. Некоторые данные о работах по интегральной оптике в СНГ / Л. И. Конопальцева // Оптическая техника. – 1994. – № 3. – С. 8-9.
5. Свечников Г. С. Интегральная оптика / Свечников Г. С. – К.: Наукова думка, 1988. – 166 с.
6. Патон Б. Е. Современные электронно-лучевые технологии ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ / Патон Б. Е. // Автоматическая сварка. – 2001. - № 2. – С. 3-9.
7. Полтавцев Ю. Г. Технология обработки поверхности в микроэлектронике / Полтавцев Ю. Г. – К.: Техника, 1990. – 206 с.
8. А.с. №1798995 СССР, МКИ С03В 37/00. Способ изготовления канальных оптических волноводов / Д. И. Котельников, Г. В. Канашевич, Г. Н. Дубровская, М. И. Жученко, Л. И. Конопальцева (СССР), №49/09696/33 опубл. 11.02.91 Бюл. №12.
9. Лисоченко В. Н. Технология электронно-лучевой полировки плат микросхеми входных окон видеоканалов: дисс. канд. техн. наук :05.27.06. – М., 1997. – 152 с.
10. Дудко Г. В. Проблема формирования особоличистых и бездефектных поверхностей / Г. В. Дудко, В. Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. Ленинград. – 1985. – С. 13-16.
11. Электронно-лучевая обработка плат фотоэмитирующих структур. Кравченко А. А. Москва, спец. ВАК 05.27.01, канд. техн. наук, 1989. – 19 с.
12. Лохов Ю.Н. Модификация поверхности оптических стекол при электронно-лучевой обработке в вакууме / Ю.П. Лохов, А.А. Углов, Д.И. Чередниченко // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 1. – С. 56–62.

13. Кравченко А. А. О формировании предельно гладких поверхностей стекол / А. А. Кравченко, Ю. Н. Лохов, Д. И. Чередниченко // Физика и химия стекла. – 1990. – Т. 16. – № 6. – С. 923 – 927.
14. Научные основы управления качеством электронно-лучевой обработки изделий из специальных оптических материалов. Ващенко В.А. Киев, спец. ВАК 05.03.07, докт. техн. наук: 1996. – 32 с.
15. Kanashevich G.V. Cooling of plates from optical glass after electronic micro-treatment / G.V. Kanashevich // Электронная обработка материалов (Кишинев). – 2005. – №4 (234). – С. 79–83.
16. Kanashevich G.V. Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form / Kanashevich G.V. // The 7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition, Beijing, China, 25-29 Sept. 2005. – P. 7.
17. Канашевич Г. В. Превращения в поверхностном слое оптического стекла и фотопластин из силикатного стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Г. В. Канашевич // Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Нано- и микросистемная техника» (Россия). Рубрика: Материаловедческие и технологические основы МНСТ., 2008. – № 10. – С. 28–30.
18. Канашевич Г. В. Термоэлектричний вплив низкоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла / Г. В. Канашевич // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування». – 2013. – Вип. 45. – С. 123-130.

*Надійшла до редакції  
03 березня 2014 року*

© Канашевич Г. В., Голуб М. В., Антонюк В. С., Слепцов В. Ф., 2014