УДК 621.373.826.038

Голуб М. В., *викладач,*
Брик С. М., *магістр,*
Гарасюта В. М., *магістр,*
Савченко В. І., *магістр,*
Сандига О. Ю., *магістр*
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси, Україна, тел. (0472) 730261

ТЕХНІЧНІ, ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ТА ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНІ КРИТЕРІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ МІКРООБРОБКИ ОПТИЧНИХ ВИРОБІВ МАЛИХ РОЗМІРІВ

В статті представлено технічні, технологічні умови та техніко економічні критерії електронно-променевої мікрообробки оптичних виробів малих розмірів (до $1 \cdot 10^{-3}$ м). Лінійні розміри та температурні режими роботи катоду дозволяють визначати вимоги до джерел енергії, електронно-променевої гармати, систем попереднього нагріву і охолодження виробів, систем керування потужністю електронного потоку, а значить і оптимізувати режими електронно-променевої мікрообробки виробів малих розмірів. Джерело нагріву повинно бути рухомим і забезпечувати локальний нагрів поверхні оптичного матеріалу з точністю 0.5%, а параметри, що регулюються, повинні змінюватися у межах 2...4 порядків.

Ключові слова: *електронний потік, електронно-променева обробка (мікрообробка), оптичне скло, поверхневий шар скла, мікрооптика, інтегральна оптика, MOMS, MOEMS.*

Актуальність. Різке зростання попиту користувачів до мікрооптичних виробів, мікрооптомеханічних систем (MOMS) та мікрооптоелектромеханічних систем (MOEMS) усе сильніше загострює проблему виготовлення плат малих розмірів (від 10…1000 мкм) для розташування на їх поверхні оптичних мікроелементів з лінійними розмірами у 0,47…0,75 мкм [1-3].

Вирішення цієї проблеми в умовах оптичного виробництва можливе через розробку та впровадження нового інструментарію, екологічно чистих технологічних середовищ, які б забезпечили створення матеріалів з новими фізико-хімічними властивостями, та виробів з максимальним ефектом взаємодії зі світловими хвилями.

Принципову можливість використання стрічкового електронного потоку для керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів та створення на поверхні оптичних матеріалів фокусуючих, відбиваючих та заломлюючих світло мікроструктур доведено у роботах професора Канашевича Г.В. [4,5].

Разом з тим, недослідженими та невисвітленими залишаються питання з технічних, технологічних умов та техніко економічних критеріїв цієї технології

Мета роботи. Дослідити та визначити технічні, технологічні умови та техніко економічні критерії електронно-променевої мікрообробки оптичних виробів малих розмірів, оптимізуючи результати попередніх робіт з поверхневої електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів.

Обладнання, об'єкти обробки і інструмент для електронно-променевої обробки:

Обладнання. Електронно-променева установка виготовлена на базі вакуумної установки УВН74-П3. Електронний термопарний регулятор температури РИФ-101 забезпечує необхідний температурний профіль печі з точністю ±1°С. Максимальна робоча температура нагріву печі 800°С. Механізм переміщення забезпечує рух пластин в об'ємі вакуумної камери зі швидкістю 0…50 см/с, залишковий тиск у вакуумній камері складає 10^{-4} Па.

Об'єкти мікрообробки: мікролінзи, плоскопаралельні пластини, рис.1.

Рис. 1. Об'єкти обробки електронним потоком

Мікролінзи широко використовуються, як фокусуючі елементи волоконно-оптичних систем зв'язку, в мікроелектроніці, лазерній хірургії та терапії, мікрооб'єктивів ендоскопів, лазерних аналізаторах, в MOMS та MOEMS [6].

Інструмент обробки. Електронно-променева гармата Пірса генерує стрічковий електронний потік питомої потужності 10^1 Вт/см^2 ≤ $P_{пит}$ ≤ 10^5 Вт/см^2, який може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю $v_{пот}$ = 0…20 см/с, b' – ширина стрічки 0,5…3 мм.

Отримані результати та їх обговорення.

Нами побудована схема, (рис.2), яка відображає еволюцію інструментарію (елементарного інструменту) та її взаємозв'язок зі зменшенням лінійних розмірів виробів мікрооптики, інтегральної оптики і волоконної оптики [2,7,8].

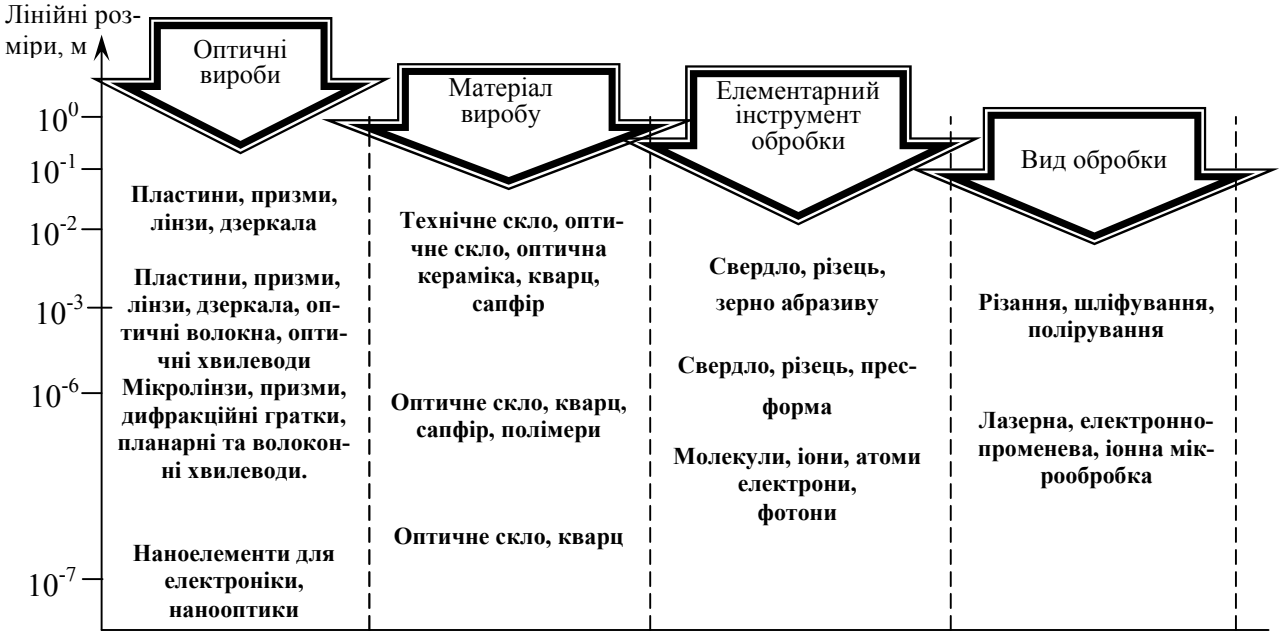

Рис. 2. Діапазони розмірів сучасних виробів оптики, мікрооптики, інтегральної та волоконної оптики а також матеріалу, елементарного інструменту та виду обробки

Суть методу низькоенергетичного (Е ≤ 10 кеВ) полірування полягає в тому, що електронний потік фіксованої потужності при взаємодії з поверхнею оптичного матеріалу (скло, полікристал) здатний розігріти та розтопити тонкий, у десятки та сотні мікрометрів, поверхневий шар даного матеріалу [9, 10]. Робоча температура в зоні дії електронного потоку складає близько 1500 °С, а час дії електронного потоку на матеріал не перевищує декількох секунд. В результаті взаємодії потоку електронів певної енергії з матеріалом низької теплопровідності на поверхні такого матеріалу виникає зона з рідинно-текучим станом. При використанні рухомого потоку електронів ця рідинна зона також буде рухомою. В залежності від режимів такої обробки (потужності потоку та часу дії на матеріал) після охолодження утворюється хвиляста або плоска поверхня. Застигла поверхня представляє собою тонкий шар, який відрізняється від основного матеріалу своєю структурою та фізико-хімічними властивостями [9].

Аналізуючи концепцію [11] високоефективного керування процесом електронно-променевої мікрообробки для забезпечення прецизійності технології можна визначити такі технічні та технологічні умови електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів малих розмірів.

До технічних умов належать:

1. Наявність спеціального технологічного вакуумного обладнання або адаптація існуючого вакуумного обладнання, які б забезпечили використання:

- термопечі у вакуумній камері (вакуум не менший за 10^{-3} Па) для попереднього нагріву і охолодження виробів з регульованим діапазоном робочих температур 20...640 ºС ± 1 ºС на протязі 10 годин роботи установки;

- технологічної арматури, механізмів руху, які б забезпечили швидкість проходження електронного потоку 0,2...10 см/с;

- електронно-променевої гармати Пірса із стрічковою формою потоку з необхідним нахилом потоку до поверхні виробу, яка оброблюється.

2. Наявність джерел живлення електронно-променевої гармати Пірса, які б забезпечили стабільну роботу гармати в межах питомої потужності $P_{пит} = 0{,}5 \cdot 10^2 ... 5 \cdot 10^4$ Вт/см^2 та регульований нагрів (20...1250) °С і охолодження оптичних матеріалів зі швидкістю меншою за 8 °С/хв в умовах обробки.

3. Забезпечення на базі ПК автоматизованої системи зондування електронного потоку та керування режимами електронно-променевої обробки.

4. Наявність приладів та обладнання для забезпечення технологічного контролю якості виробів, отриманих поверхонь і функціональних шарів.

До технологічних умов належать:

1. Забезпечення оптимальних значень вакууму, температур попереднього нагріву виробів у вакуумній камері перед електронно-променевою обробкою.

2. Забезпечення оптимальних значень потужності і швидкості електронного потоку при поверхневій обробці оптичних матеріалів.

3. Забезпечення оптимальних режимів нагріву та охолодження виробів після електронно-променевої обробки.

4. Визначення характеристик якості (мікрорельєфу поверхонь, площинності, світлорозсіяння, залишкових термонапружень, чистоти оптичної поверхні тощо) оброблених деталей.

Оскільки процес обробки передбачає сильний локальний термічний вплив електронної стрічки на поверхню заготовки (градієнт температур на поверхні досягає значень $10^2...10^3$ К/мм), і виходячи з розмірів електронної стрічки (довжина робочої частини катоду не перевищує 80 мм, а діаметр катоду не перевищує 0,8 мм) визнаємо, що ширина і довжина зони обробки будуть обмеженими. З урахуванням цих умов та необхідної номенклатури оптичних матеріалів проведено класифікацію виробів, які отримуються електронно-променевим методом, а саме:

- за матеріалом (скляні без металізації і з металізацією поверхні; керамічні без металізації і з металізацією поверхні);

- за розмірами: по довжині і ширині (малих розмірів – до 5 мм; середніх розмірів – від 5 до 30 мм; крупних розмірів – від 30 до 60 мм); по товщині (тонкі – до 3 мм; середні – від 3 до 8 мм; товсті – більше 8 мм);

- за формою поверхні (плоскі; з мікрорельєфом; опуклі; ввігнуті);

- за способом обробки (без оплавлення поверхні; з оплавленням поверхні).

Сукупність цих ознак буде визначати вимоги до джерел енергії, електронно-променевої гармати, систем попереднього нагріву і охолодження виробів, систем керування потужністю електронного потоку.

В залежності від форми і матеріалу виробу ці параметри можуть змінюватись у широкому діапазоні значень. При виборі обладнання необхідно оцінити ступінь його універсальності для отримання найбільшого техніко-економічного ефекту від його впровадження. Це можливо при оптимальній відповідності обладнання технологічним і економічним вимогам. Перші визначаються вищезгаданими характеристиками виробів та відповідними параметрами обробки. Інші вимоги визначаються необхідною якістю виробу (R_a; R_z; $h_{пр}$; n; $\sigma_р$; $\sigma_{ст}$ та інші) і його серійністю.

Для порівняння варіантів вакуумного обладнання з урахуванням технологічних і техніко-економічних особливостей, які виникають у конкретних ситуаціях, недостатньо відомих критеріїв, тому виникла необхідність доповнити їх показниками ефективності і техніко-економічними критеріями [12, 13]:

- $P_{пр} = \Sigma T_н / S_{обр}$, нормогодини/см^2 – питома трудомісткість процесу електронно-променевої обробки;

- $P_м = \Sigma C_м / S_{обр}$, грн/см^2 – питома матеріалоємність процесу електронно-променевої обробки;

- $C = \Sigma C_і / S_{обр}$, грн/ см^2 – собівартість процесу електронно-променевої обробки;

- $P_к = \Sigma C_к / S_{обр}$, грн/ см^2 – питомі капіталовкладення;

- $A = 1 - t_н / t_{обр.\,с}$ – критерій адаптивності обладнання,

- де $t_н$ – час налагодження обладнання під електронно-променеву обробку серійного типорозміру виробу, $t_{обр.\,с}$ – час обробки всієї серії;

- $Ш = 1 – t_{доп} / t_{обр}$ – критерій швидкодії обладнання,

- де $t_{доп}$ – час на допоміжні операції; $t_{обр}$ – час на обробку;

- $\Gamma = 1 - t_г / t_{зм}$ – критерій готовності обладнання,

- де $t_г$ – термін часу для приведення обладнання у робочий стан після повного відключення, $t_{зм}$ – термін часу повної робочої зміни;

- $P_W = W_i / W_{i+1}$ – критерій точності регулювання потужності джерела енергії,

- де і – ступень регулювання;

- $P_{ww} = 1 - W_{мін} / W_{мах}$ – критерій діапазону потужності джерела енергії;

- $P_s = S_{н\,i} / S_{ні+1}$ – критерій точності регулювання площі нагріву під електронно-променевим потоком;

- $Я = \{ R_a ; R_z; h_{пр}; n; \sigma_р; \sigma_{ст} \}$ – критерій якості виробів після електронно-променевої обробки, який може бути виражено абсолютним або питомим показником шорсткості поверхні, глибиною проплавлення, показником заломлення, напруженнями стиснення або розтягнення у матеріалі після термічної обробки;

- ΔG_{01} – критерій активності оточуючого середовища, який приймає два значення: 0 – при негативній дії середовища та 1 – при забезпеченні захисту матеріалів при обробці;

- $\eta_{теп}$ – критерій ефективності повної теплової обробки оптичних матеріалів (електронно-променевою гарматою і у термопечах при нагріві і охолодженні).

Одержані дані за результатами промислових і експериментальних порівнянь ефективності різних джерел енергії дозволяють сформулювати вимоги до оптимального джерела енергії при поверхневій мікрообробці оптичних матеріалів наступним чином:

- джерело нагріву повинно бути стрічковим, рухомим і повинно забезпечувати локальний нагрів оптичних матеріалів з точним регулюванням площі і форми технологічної зони нагріву матеріалу;

- параметри, що регулюються, повинні змінюватися у межах 2...4 порядків;

- загальна похибка джерела по інтенсивності у технологічній зоні повинна складати величину не більшу за 1%.

Висновки: за результатами проведених досліджень можна зробити висновки:

1. Сукупність ознак, що стосуються ступені вакууму в технологічній установці, лінійних розмірів та температурних режимів роботи катоду дозволяє визначати вимоги до джерел енергії, електронно-променевої гармати, систем попереднього нагріву і охолодження виробів, систем керування потужністю електронного потоку, а значить і оптимізувати режими електронно-променевої мікрообробки виробів малих розмірів (10…1000 мкм) з оптичних матеріалів.

2. Отримані критерії слід використовувати разом з аналізом особливостей поверхонь і приповерхневих шарів оброблених матеріалів.

3. Одержані дані за результатами промислових і експериментальних порівнянь ефективності різних джерел енергії дозволяють сформулювати вимоги до оптимального джерела енергії при поверхневій мікрообробці оптичних матеріалів наступним чином:

- джерело нагріву повинно бути стрічковим, рухомим і повинно забезпечувати локальний нагрів оптичних матеріалів з точним (0.5%) регулюванням площі і форми технологічної зони нагріву матеріалу;

- параметри, що регулюються, повинні змінюватися у межах 2...4 порядків;

- загальна похибка джерела по інтенсивності у технологічній зоні повинна складати величину не більшу за 1%.

Список літератури

1. https://hi-tech.ua/mirovoy-ryinok-smartfonov-vyiros-pri-etom-dolya-samsung-i-apple-snizilas/
2. https://deps.ua/novosti/item/optychni-razvetviteli-v-setjah-dostupa.html
3. https://itc.ua/articles/kremnievaya_fotonika_kak_alternativa_mednym_vnutrennim_soedineniyam_25541/
4. Канашевич Г. В. Фізичні явища і механізми за якими змінюється поверхня і поверхневий шар оптичного матеріалу від дії електронного потоку. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил.* 2014. №1. С. 184–189.
5. Канашевич Г. В. Термоелектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла. *Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування.* Вип. 45. С. 123–130.
6. Оптика та оптичні прилади ДСТУ ISO 10110–1:2004 – ДСТУ ISO 10110–14:2004 [Чинний від 25–10–01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – IV, 231 с. – (Національний стандарт України)
7. Greenwod J., Dobre G. An optical pressures ensor for an aeronautical application using white light interferometry *Proc. SPIE. 2000.* Vol. 4075. P. 94–100.

8. Optomechatronic systems. *Proc. SPIE.* 2001. Vol. 4190. 350 p.
9. Канашевич Г. В. Термічна електронно-променева обробка скляних плат оптичних інтегральних схем: монография. Укр. Деп. в НИИ ТЭХИМ, Черкассы, 2002. 165 с.
10. Канашевич Г. В. Технологічні умови і показники ефективності спеціальної електронно-променевої обробки поверхні оптичного скла. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць.* Житомир: ЖДТУ, 2013. Вип. 14. С. 62–74.
11. Канашевич Г. В., Щерба А. І. Дробот І. В. Алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевій мікрообробці. *Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці та технологіях».* 2012. Вип. 27. С. 231–239.
12. Шепелев А. Г., Юрченко Л. Д., Редкокаша А. П. Анализ информационных потоков по функциональным покрытиям на стеклах. *Сборник докладов Международного научно-практического симпозиума ”Функциональные покрытия на стеклах”.* Харьков: ННЦ ХФТИ, ”Константа”, 2003. С. 8–10.
13. Григорович И. М., Мрочек Ж. А., Фигурин Б. Л., Селифанов С. О., Селифанов В. И., Рулинский В. И., Ресенчук В. В. Установка вакуумно-плазменной металлизации и пайки керамических изоляторов “Сапфир-10”. *Электронная обработка материалов.* 1991. № 1.

References

1. https://hi-tech.ua/mirovoy-ryinok-smartfonov-vyiros-pri-etom-dolya-samsung-i-apple-snizilas/
2. https://deps.ua/novosti/item/optychni-razvetviteli-v-setjah-dostupa.html
3. https://itc.ua/articles/kremnievaya_fotonika_kak_alternativa_mednym_vnutrennim_soedineniyam_25541/
4. Kanashevich, H. V. (2014) Physical phenomena and mechanisms on which the surface and surface layer of the optical material change from the action of the electronic stream. *Collection of scientific works of the Kharkiv University of Air Forces.* № 1. P. 184–189.
5. Kanashevych, H. V. (2013) The thermoelectric effect of low-energy electron beam to the defective layer optical glass. *Vestnik NTUU "KPI" series Instrument Series.* Vol. 45. P. 123–130.
6. Optics and optical instruments DSTU ISO 10110-1: 2004 - DSTU ISO 10110-14: 2004 [Effective from 25-10-01]. K.: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2006. IV, 231 p. (National Standard of Ukraine)
7. Greenwod, J., Dobre, G. (2000) An optical pressures ensor for an aeronautical application using white light interferometry. *Proc. SPIE.* Vol. 4075. P. 94–100.
8. Optomechatronic systems. *Proc. SPIE.* 2001. Vol. 4190. 350 p.
9. Kanashievich, H. V. (2002) Thermal electron-beam processing of glass fiber optic integrated circuits. Monograph. Ukr Dep. in the Research Institute of TEKHIM, Cherkasy. 165 p.
10. Kanashevich, H. V. (2013) Technological conditions and indicators of the efficiency of special electron beam treatment of optical glass surface. *Processes of mechanical processing in mechanical engineering: Sb. sciences works.* Zhytomyr: ZHDTU. Ed. 14, P. 62–74.
11. Kanashevich, G. V, Shcherba, A. I Drobot I. V. (2012) Algorithm for controlling the quality of the surface layer of optical materials under electron-beam microprocessing. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Thematic issue "Mathematical modeling in technology and technologies".* Vol. 27. P. 231–239.
12. Shepelev, A. G., Yurchenko, L. D., Radkoksa, A. P. (2003) Analysis of Information Flows on Functional Coatings on Glasses. *Collection of reports of the International Scientific and Practical Symposium "Functional coatings on glasses".* Kharkov: NSC KhPTI, "Constant". P. 8–10.
13. Grigorovich, I. M., Mrochev, J. A., Figurin, B. L., Selifanov, S. O., Selifanov, V. I., Rulinsky, V. I, Reshenchuk, V. V. Installation of vacuum-plasma metallization and soldering of ceramic insulators "Sapphire-10". *Electronic processing of materials.* 1991. № 1.

M. V. Holub, *lecturer*
S. M., Bryk, *master*
V. M. Harasiuta, *master*
V. I. Savchenko, *master*
O. Yu. Sandyha, *master*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

TECHNICAL, TECHNOLOGICAL CONDITIONS AND TECHNO-ECONOMIC CRITERIA OF ELECTRON-BEAM MICROPROCESSING OF OPTICAL PRODUCTS OF SMALL SIZES

The article presents the technical, technological conditions and techno-economic criteria of electron-beam microprocessing of optical products of small sizes (up to 1 · 10-3 m). The linear dimensions and temperature modes of the cathode can determine the requirements for energy sources, electron beam gun, preheating and cooling systems, power control systems for electronic flow, and thus optimize the modes of electron beam microprocessing of small size products. The heating source must be mobile and provide local heating of the surface of the optical material with an accuracy of 0.5%, and the regulated parameters must vary within 2... 4 orders.

Keywords: *electronic flow, electron beam processing (microprocessing), optical glass, glass surface layer, microoptics, integral optics, MOMS, MOEMS.*

Рецензенти Канашевич Г.В., д.т.н., професор,
Поздєєв С.В., д.т.н., професор.