

[0000-0002-7547-5081]

І. С. Жайворонок,

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
e-mail: zhaivoronok1988@ukr.net; klondaikfaust@gmail.com

[0000-0002-3264-9096]

О. В. Коваленко

Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України,
вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна

ВПЛИВ ОСНОВНИХ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ СТРІЧКОВОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОНІВ НА ЯКІСТЬ ОТРИМУВАНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО СКЛА

У статті наведено результати дослідження впливу основних робочих параметрів стрічкового потоку електронів на якість мікрорельєфу поверхні оптичного скла. Встановлено залежність впливу основних робочих параметрів (форми, розміру та розподілу густини струму) низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми на якість мікрорельєфу поверхні оптичного скла сорту «крон». Це дозволило оцінити процес взаємодії потоку електронів з поверхнею оптичного скла. Також було встановлено, що корисний струм потоку електронів становить близько 30 % від загального струму емісії катода електронної гармати. Показано, що на точність визначення робочих параметрів стрічкового потоку електронів методом зондування можуть впливати такі фактори: зменшення діаметра зондів під впливом потоку електронів та нагрівання зондів під час вимірювання. При цьому сумарна похибка зондового методу визначення густини струму потоку електронів не перевищувала 8 %. Методом атомно-силової мікроскопії встановлено, що після оброблення поверхонь оптичного скла сорту «крон» низькоенергетичним електронним пучком стрічкоподібної форми за умови забезпечення раціональної форми, розміру та розподілу густини струму як у робочому просторі, так і на обробленій поверхні нерівності зменшуються від 40-75 нм до 3,5-5 нм.

Ключові слова: стрічковий потік електронів, визначення робочих параметрів, зондовий метод, мікрорельєф поверхні, оптичне скло.

Вступ. Електронно-променево оброблення (ЕПО) є одним із найперспективніших видів оброблення елементів оптоелектроніки, мікрооптики тощо. Як встановлено в [1-5], найбільш істотний вплив на якість (стан поверхні та її залишкові мікронерівності) та ефективність (час оброблення, ймовірність отримання гарантованих результатів) такого оброблення мають робочі параметри стрічкового електронного потоку. Проте серед основних контрольованих робочих параметрів електронного потоку найменш стабільними є параметри потоку електронів (форма, розмір і розподіл густини струму по поперечному перерізу). Тому різні установки ЕПО, особливо в процесах, що вимагають високої точності та якості оброблення, оснащуються електронними системами керування енергією [6, 7].

Серед науковців, які досліджували вплив стрічкового потоку електронів на поверхню оптичного скла, слід відзначити В. Антонюка, М. Бондаренка, В. Ващенко,

Я. Гулояна, Г. Канашевича, П. Маццольді, М. Руда та інших [8-12].

Проте обґрунтовані дані про вплив робочих параметрів електронного потоку на якість поверхні оптичного скла в роботах цих вчених розглядаються недостатньо, особливо в питаннях оперативного визначення параметрів електронного потоку. Перспективним у цьому напрямі є використання зондових методів визначення щільності розподілу електронів в електронній стрічці.

Раніше в роботі [13] використано оригінальний метод ротаційного зонда, який у роботі [14] був адаптований для вимірювання параметрів стрічкових електронних потоків, згідно з яким зондування відбувається шляхом рівномірного поступального переміщення блока зондів уздовж робочої поверхні (на різних відстанях від цієї поверхні) та якомога більш паралельно до неї. Проте цей метод також має низку недоліків, пов'язаних з впливом на вимірювальну систему вторинних еле-

ктронів, емітованих поверхнею матеріалу (при наближенні зондуєчої системи до поверхні) і розігрівом самого зондового блока та знімних металевих електродів, що суттєво впливає на здатність такої системи щодо адекватного та правильного вимірювання, чим знижує точність визначення робочих параметрів електронної стрічки, а також не дозволяє встановити залежність між цими параметрами та параметрами якості поверхні оптичного скла. Тому удосконалення зондового методу встановлення розподілу електронів в електронній стрічці за енергетичними показниками, що дозволило б встановити вплив робочих параметрів стрічкового електронного потоку на якість поверхні оптичного скла, є питанням актуальним.

Метою роботи є визначення залежності впливу основних робочих параметрів стрічкового потоку електронів (форми, розміру та розподілу густини електронного струму) на якість поверхні оптичного скла (відсутність мікро- та макродефектів поверхні, мінімальні залишкові мікронерівності тощо).

Задачі, вирішенню яких присвячена ця робота, є такими:

- встановити чинники, які впливають на точність визначення робочих параметрів електронного потоку стрічкової форми;

- оцінити взаємодію стрічкового електронного потоку з поверхнею оптичного скла шляхом дослідження основних робочих параметрів такого потоку;

- дослідити покращення якості мікрорельєфу поверхні оптичного скла від впливу стрічкового електронного потоку.

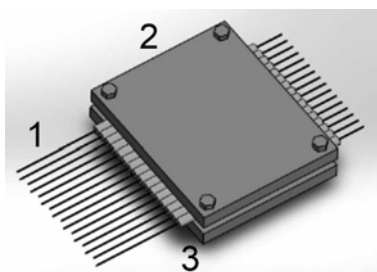
Виклад основного матеріалу. Необхідність проведення зондування електронного потоку в процесі його впливу на оброблюва-

ний матеріал спрямована на регулювання робочих параметрів такого потоку в режимі реального часу, чим нівелюються конструктивні недоліки існуючих на сьогодні електронно-променевих гармат та покращується якість процесу оброблення.

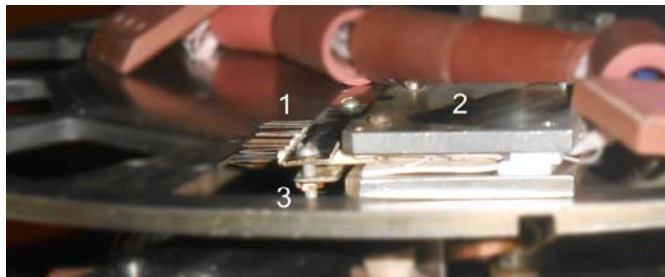
Так, стандартна електронно-променева гармата Пірса (ЕПГ), що використовується для формування стрічкового потоку електронів, має такі недоліки: нерівномірність розподілу потоку електронів уздовж стрічки (пов'язано з провисанням вольфрамового дротяного катода при нагріванні до робочих температур і відтоком тепла на його затискачах), тривалий час розігріву катода (що веде до його старіння), недотримання форми потоку електронів на поверхні оброблюваного матеріалу, що пов'язано з поляризацією поверхні діелектрика (оптичного скла).

Ефективними методами оперативного встановлення розподілу електронного потоку по поверхні оброблюваного матеріалу (особливо діелектриків, яким притаманна поляризація поверхні від впливу низькоенергетичного (з енергією, меншою за 10 кеВ) потоку електронів) є методи зондування [15]. Серед таких методів для зондування стрічкового електронного потоку добре зарекомендував себе метод зондування, що як засіб зондування використовує модуль, який містить лінійний масив вольфрамових дротяних електродів-зондів [16].

Такий зондовий модуль первинного вимірювального перетворювача для визначення характеристик стрічкового електронного потоку являє собою лінійний масив з 16 вольфрамових зондів (на відстані 5 мм між ними) в одній площині паралельно один одному (рисунки 1).



а)



б)

Рисунок 1. Тривимірна модель (а) та зовнішній вигляд (б) блока зондування стрічкового електронного потоку: 1 – вольфрамові зонди, 2 – металевий корпус зондуєчого модуля, 3 – екрануюча пластина

Однак конструкція, представлена авторами цієї роботи, відрізняється від конструкції, запропонованої в [16], тим, що під час роботи на вольфрамові зонди подається напруга 30-80 В, що усуває ефект відштовхування електронів на краях зондів при визначенні струму, який наводиться в них за рахунок дії сили Ампера. Це дозволяє визначити

зміну розподілу густини струму в робочому просторі ЕПГ по довжині стрічки електронного потоку (максимально за один прохід на 80 мм).

Зондування електронного потоку стрічкової форми в робочому просторі електронної гармати відбувається за схемою і в послідовності, що зображені на рисунку 2.

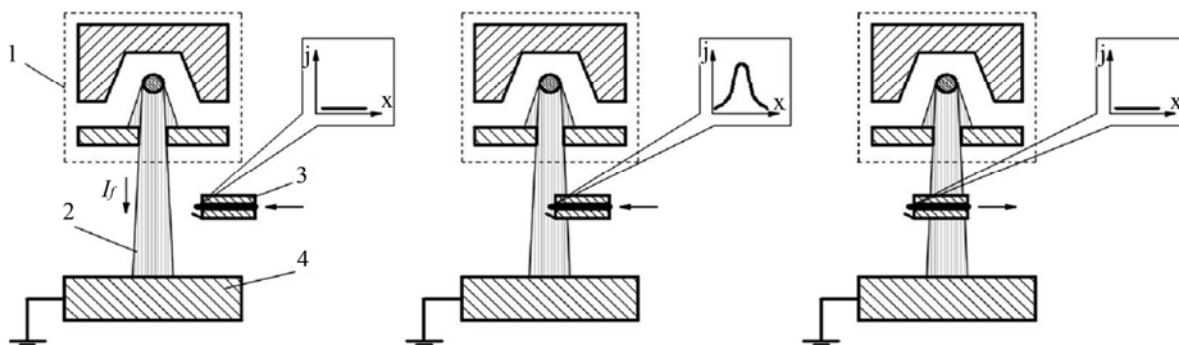


Рисунок 2. Схема зондування електронного потоку стрічкової форми в робочому просторі електронно-променевої гармати: 1 – модуль електронно-променевої гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – модуль зондового вимірювального перетворювача, 4 – колектор електронного потоку; I_f – струм електронного потоку

Так, на етапі формування електронного променя в ЕПГ зонд підводиться до електронного потоку (паралельно поверхні, яка підлягає впливу на неї цього потоку) і далі – в зону його дії (між анодом і поверхнею оброблюваного матеріалу). Поступове сканування стрічкового електронного потоку із заданою швидкістю таким зондовим модулем дозволяє отримати динамічний розподіл електронів у стрічці – як у просторі, так і на поверхні оброблюваного матеріалу.

Щоб захистити зонди від впливу вторинних електронів, що емітуються з оброблюваного матеріалу, вони закріплені на краю рухомої платформи, щоб усі електрони потоку, не відібрані зондами, не впливали на роботу перетворювача.

Для високоточного визначення розподілу струму в електронному потоці та на поверхні оброблюваного матеріалу зондовий модуль розташовують під кутом, що дорівнює половині кута розходження електронного потоку (приблизно $1,4-1,6^\circ$) (рисунк 3).

Струм кожного із зондів через мідний дріт і вакуумний електричний вхід подається на реєструючий пристрій, детально описаний в роботі [17]. Сигнал, отриманий від кожного зонда, який змінюється, коли він проходить під електронним потоком, є результатом ін-

тегрування розподілу струму вздовж поперечного перерізу електронного потоку, який перетинає вольфрамовий зонд.

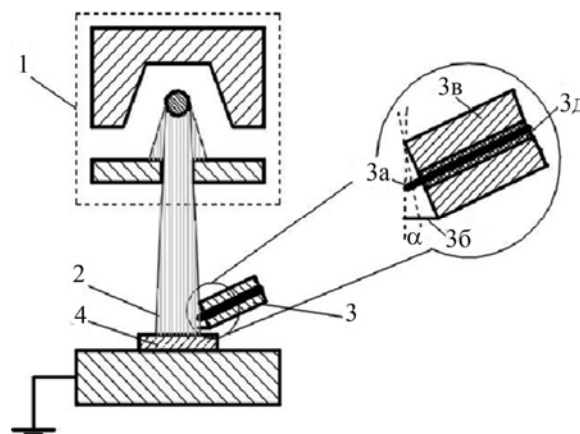


Рисунок 3. Схема зондування електронного потоку стрічкової форми на поверхні оптичного скла: 1 – модуль електронно-променевої гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – модуль зондового вимірювального перетворювача, 3а – вольфрамовий зонд, 3б – екран, що захищає від впливу вторинних електронів з поверхні, 3в – металевий корпус, 3г – діелектрична прокладка, 4 – дослідний зразок оптичного скла, α – половина кута розходження електронного потоку ($\alpha \approx 1,4-1,6^\circ$)

Щоб отримати розподіл густини струму по поперечному перерізу електронів, записуючий пристрій проводить перетворення струму зонда в кожній позиції зондового модуля. Після цього мікропроцесор виконує чисельне диференціювання характеристик зондів і перерахунок густини струму в поточному положенні зондів:

$$j(x) = (i d(x) - i d(x - \Delta x)) / d \cdot v \cdot t,$$

де $j(x)$ – густина струму, діагностованого в точці x ; $i d(x)$ – поточне значення струму, діагностованого зондовим модулем; $i d(x - \Delta x)$ – значення струму, діагностованого за попереднє вимірювання; d – діаметр зонда; v – швидкість переміщення зондового модуля; t – період між вимірюваннями струмів.

Для вимірювання часу використано високоточні кварцові таймери (абсолютна похибка визначення часу не перевищує 0,042 с/год).

Отримані дані та розрахований за ними розподіл густини струму в робочій області ЕПГ передається на ПК для подальшого оброблення та візуалізації.

Основними перевагами розробленого методу зондування є: можливість проведення експрес-зондування електронного потоку несосьової форми (в цьому випадку стрічки) за один цикл з подальшим електронно-променевим обробленням, просте математичне обчислення вимірюваних характеристик зонда, можливість проведення зондування в автоматичному режимі. Виміряні характеристики відразу після визначення густини струму передаються в автоматичну систему керування електронним обробленням для подальшого аналізу і корегування (за потребою). Для зондування стрічкового електронного потоку розроблено схеми, призначені для визначення форми розміру та розподілу густини струму потоку електронів як засобу оброблення в робочому просторі ЕПГ та на поверхні оброблюваного матеріалу (оптичного скла).

Результати досліджень. Аналіз зондових характеристик електронного потоку. На рисунку 4 зображено зондові характеристики, отримані розробленим пристроєм, розташованим у центрі електронного потоку, шляхом проведення зондування робочого простору ЕПГ (рисунк 4, а) та по поверхні оптичного скла (рисунк 4, б).

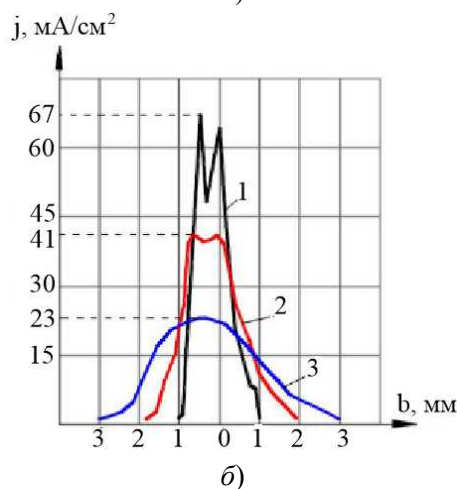
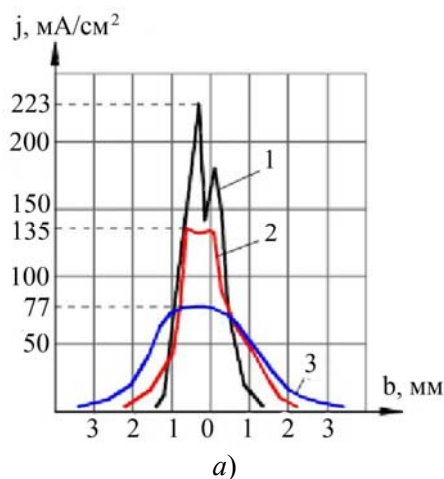


Рисунок 4. Характеристики зонда, отримані в робочому просторі ЕПГ (а) та по поверхні оптичного скла (б):

а) розподіл густини зондового струму вздовж перерізу електронного потоку в робочому просторі ЕПГ; б) щільність розподілу зондового струму по поверхні оптичного скла при робочих струмах електронного потоку: 1 – $I_f = 150$ мА; 2 – $I_f = 175$ мА; 3 – $I_f = 200$ мА

Пробні випробування зондового пристрою проводились за умов і режимів, за яких відбувається електронно-променеве оброблення оптичного скла, а саме: відстань від зондів до анода $H = 20$ мм, прискорювальна напруга $U = 3$ кВ, струм розігріву катода $I_C = 15$ А, робочий струм електронного потоку $I_f = 150$ - 200 мА.

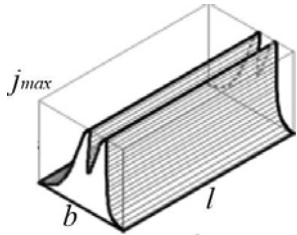
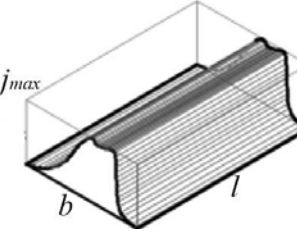
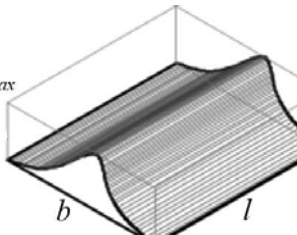
Як видно з рисунка 4, при порівнянні результатів вимірювання густини струму електронного потоку в робочому просторі ЕПГ і по поверхні оптичного скла форми розподілу електронного потоку в обох випадках однакові за умов однакових робочих струмів електронного потоку, його ширина та кути розхо-

дження електронного потоку (що становлять близько 8-10 %) змінюються пропорційно відстаням між площинами зондування. У той же час результати сканування щільності розподілу струму електронного потоку показали, що, незалежно від повного робочого струму електронного потоку, струм електронного

потоку на поверхні оптичного скла (так званий корисний струм) становить близько 30 %.

В результаті зондування стрічкового електронного потоку при обробленні оптичного скла визначено основні робочі параметри такого потоку на поверхні оптичного скла К8 (таблиця 1).

Таблиця 1. Основні робочі параметри потоку електронів на поверхні оптичного скла за різних значень струмів електронного потоку

№	Режим оброблення електронним потоком	Форма електронного потоку	Довжина l і ширина b електронного потоку, мм	Максимальна густина струму електронного потоку, j_{max} , mA/cm^2
a	$H = 20 \text{ мм}$, $U = 3 \text{ кВ}$, $I_c = 15 \text{ А}$, $I_f = 150 \text{ мА}$		$l = 58 \text{ мм}$, $b = 2 \text{ мм}$	$j_{max} = 67 \text{ мА}/\text{см}^2$
б	$H = 20 \text{ мм}$, $U = 3 \text{ кВ}$, $I_c = 15 \text{ А}$, $I_f = 175 \text{ мА}$		$l = 59 \text{ мм}$, $b = 3,5 \text{ мм}$	$j_{max} = 41 \text{ мА}/\text{см}^2$
в	$H = 20 \text{ мм}$, $U = 3 \text{ кВ}$, $I_c = 15 \text{ А}$, $I_f = 200 \text{ мА}$		$l = 61,5 \text{ мм}$, $b = 6 \text{ мм}$	$j_{max} = 23 \text{ мА}/\text{см}^2$

В результаті зондування стрічкового електронного потоку встановлено, що на практиці за різних режимів електронно-променевого оброблення можна отримати різні закони розподілу густини струму, відмінні від гаусівських.

Обговорення результатів. Для досягнення мети цієї роботи було проведено ряд досліджень щодо визначення залежності впливу основних робочих параметрів стрічкового електронного потоку на мікрорельєф поверхні обробленого оптичного скла.

Такі дослідження проводилися методом атомно-силової мікроскопії на приладі «NT-

206». Як вимірювальний інструмент використовувалися кремнієві зонди «Ultrasharp CSC12».

У результаті проведених досліджень встановлено, що поверхня оптичного скла, оброблена за режимом: $H = 20 \text{ мм}$, $U = 3 \text{ кВ}$, $I_c = 15 \text{ А}$, $I_f = 150 \text{ мА}$, є неоднорідною, має високу пористість і містить мікродфекти поверхні (тріщини, напливи тощо) (рисунок 5), що відповідає двопіковій гаусовій формі розподілу електронного потоку (див. таблицю 1, a). У цьому випадку мікронерівності такої поверхні становлять 40-75 нм.

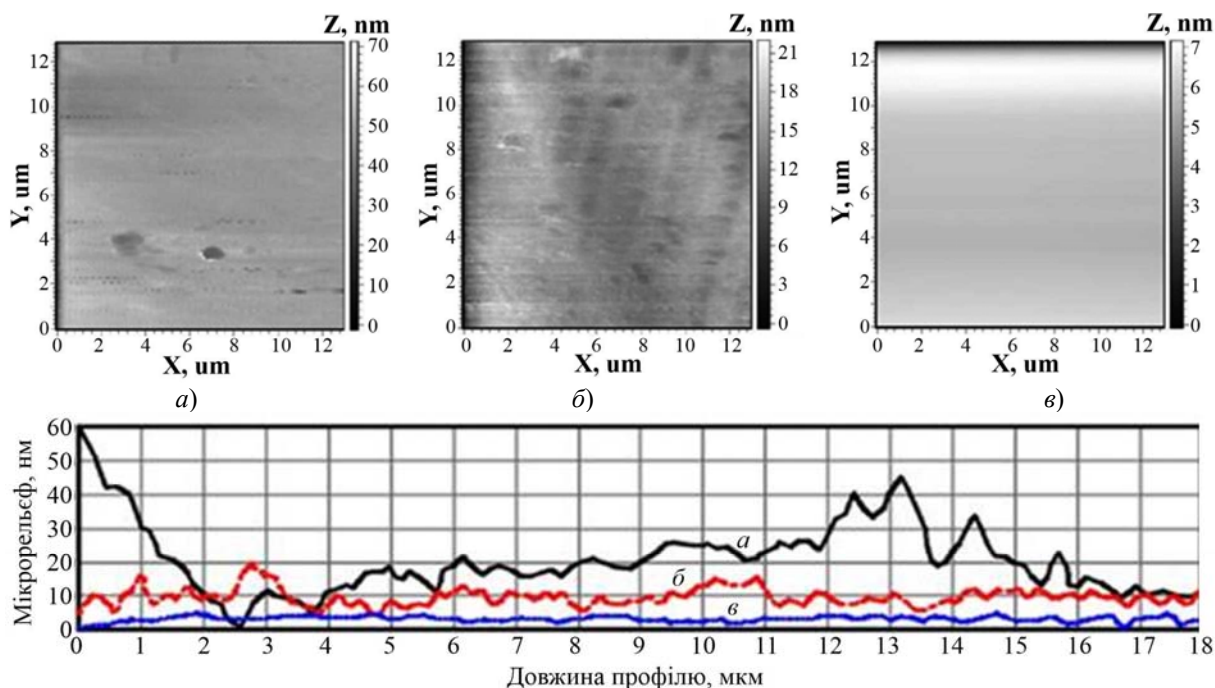


Рисунок 5. Топограма (вгорі) поверхні оптичного скла К8 на 13×13 мкм і профіль (знизу) рельєфу по головній діагоналі топограми за таких режимів оброблення електронним потоком:

$H = 20$ мм, $U = 3$ кВ, $I_c = 15$ А, $I_f = 150$ мА (а); $I_f = 175$ мА (б); $I_f = 200$ мА (в)

При обробленні поверхні оптичного скла електронним потоком в режимі: $H = 20$ мм, $U = 3$ кВ, $I_c = 15$ А, $I_f = 175$ мА (рисунки 5, б, таблиця 1, б) фактично, як і в попередньому випадку, спостерігалася неоднорідність поверхні, а залишкові мікронерівності були зменшені до 12-24 нм. Проте оброблення оптичної поверхні стрічковим електронним потоком з максимальним струмом $I_f = 200$ мА (рисунки 5, в, таблиця 1, в) дозволяє максимально (до 99,8 %) усунути мікронедефекти та пористість (до 93,7 %) поверхні, що дозволяє зробити її більш однорідною. Залишкові мікронерівності при цьому зменшуються до 3,5-5 нм.

Висновки. Таким чином, за допомогою розробленого за участю авторів методу та засобу зондування стрічкового електронного потоку визначено основні робочі характеристики (форму, величину та розподіл густини струму) цього потоку, що дозволило оцінити взаємодію електронного потоку з поверхнею оптичного скла. Встановлено, що корисний струм електронного потоку становить приблизно 30 % від загального струму емісії електронів з катода.

Наукова новизна: вперше встановлено, що на точність визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку зондува-

льним методом можуть впливати такі фактори: зменшення діаметра зондів під дією електронного потоку та в процесі нагрівання зондів під час вимірювання. Показано, що приблизно після 40-50 вимірювань відбувається значне зменшення діаметра зондів до 5 %, після чого виникає необхідність встановлення нових зондів з ідентичними характеристиками. При цьому відбувається зменшення впливу нагрівання зонда в процесі вимірювання, попередній нагрів здійснюється кількома електронними проходками потоку. В той же час враховується похибка записуючого пристрою, а сумарна похибка зондового методу визначення щільності електронного потоку не перевищує 8 %.

Методом атомно-силової мікроскопії встановлено, що після оброблення поверхонь оптичного скла сорту «крон» низькоенергетичний електронний потік формує стрічку з урахуванням її оптимальної форми, розмірів і розподілу густини струму в робочому просторі та на поверхні – зменшення мікронерівностей з 75 нм до 3,5-5 нм.

Практична цінність роботи полягає у виготовленні за запропонованою технологією різноманітних пристроїв, комплексів (як фокусуємих фотоприймальних та віддзеркалюємих компонентів). В цілому, поверхня скла

після електронно-променевого оброблення має більш однорідну структуру і збережена від мікрodefektів, на відміну від поверхонь без електронно-променевого оброблення, що знаходиться застосування.

В перспективі авторами планується проведення систематизації отриманих результатів з подальшими аналізом і регулюванням робочих параметрів електронного потоку безпосередньо в процесі оброблення.

Список використаних джерел

- [1] M. Bondarenko, I. Bondarenko, V. Antoniuk, D. Telezhynskiy, and V. Andriienko, "Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, no. 2, pp. 53-55, 2017.
- [2] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in discrete production*, no. 1, pp. 13-15, 2015.
- [3] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Vertsanova, I. V. Iatsenko, V. A. Andriienko, and Y. Y. Bondarenko, "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology", in *XIV Int. Conf. Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, May, 20-25, 2013.
- [4] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. I. Gordienko, O. V. Kyrychenko, and V. A. Vashchenko, "Increase of realibility of optic-electronic devices by means of finishing electron-beam processing of their optical element". *Mach. Technol. Mater.*, no. 4, pp. 160-164, 2018.
- [5] В. А. Ващенко, І. В. Яценко, Ю. Г. Лега, та О. В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів*. Київ, Україна: Наук. думка, 2011.
- [6] E. Skoryna, V. Medyanyk, M. Bondarenko, I. Bondarenko, S. Bilokin, and V. Antoniuk, "The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing", *Innovations*, no. 1, pp. 30-33, 2018.
- [7] O. Andriienko, M. Bondarenko, and V. Antonyuk. "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in *19 Междунар. науч.-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Одесса, 9-13 сент., 2019.
- [8] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kyrychenko, V. Vashchenko, and V. Tsybulin, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in Discrete Production*, no. 1, pp. 9-12, 2016.
- [9] Г. В. Канашиевич, В. А. Ващенко, та М. О. Бондаренко, "Перспективи використання електронного променя в технологіях інтегральної оптики". *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*, № 2, с. 189-193, 2000.
- [10] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, and O. M. Tishchenko, "Regularities of influence of electron-beam technology modes on the performance characteristics of optical elements". *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 11 (2), pp. 02014-02021, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(2).02014.
- [11] I. Yatsenko, "Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building", *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, pp. 100-110, 2016. doi: 10.15276/opu.1.48.2016.12.
- [12] T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography", *Optics letters*, no. 6 (12), pp. 613-615, 1981.
- [13] M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, G. V. Kanashevich, and V. A. Vaschenko, "The express-diagnostics of band electronic stream", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 49-51, 2005.
- [14] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko. "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", in *Int. Sci.-Tech. Conf. Innovations in ingeneering*, Burgas, Sept. 9-12, 2015.

- [15] J. Henoc, *In Quantitative Electron Probe Microanalysis*. Washington, USA: National Bureau of Standards Spec., 1968.
- [16] M. Bondarenko, V. Antonyuk, Yu. Kovalenko, M. Rud, and R. Haidash, "Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics", *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, no. 4 (1), pp. 58-64, 2018.
- [17] R. Gaidash, S. Ralchenko, V. Medyanik, and M. Bondarenko, "Control of spatial characteristics of the ribbon-shaped electron stream in the process of processing optical coverings of optoelectronics products", *Machines. Technologies. Materials*, no. 10, pp. 398-401, 2018.
- ### References
- [1] M. Bondarenko, I. Bondarenko, V. Antoniuk, D. Telezhynskiy, and V. Andriienko, "Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, no. 2, pp. 53-55, 2017.
- [2] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in discrete production*, no. 1, pp. 13-15, 2015.
- [3] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Vertsanova, I. V. Iatsenko, V. A. Andriienko, and Y. Y. Bondarenko, "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology", in *XIV Int. Conf. Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, May, 20-25, 2013.
- [4] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. I. Gordienko, O. V. Kyrychenko, and V. A. Vashchenko, "Increase of realibility of optic-electronic devices by means of finishing electron-beam processing of their optical element". *Mach. Technol. Mater.*, no. 4, pp. 160-164, 2018.
- [5] V. A. Vashchenko, I. V. Iatsenko, Yu. H. Leha, and O. V. Kyrychenko, *Fundamentals of electronic processing of products from optical materials*. Kyiv, Ukraine: Nauk. dumka, 2011 [in Ukrainian].
- [6] E. Skoryna, V. Medyanik, M. Bondarenko, I. Bondarenko, S. Bilokin, and V. Antoniuk, "The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing", *Innovations*, no. 1, pp. 30-33, 2018.
- [7] O. Andriienko, M. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in *19th Int. Sci.-Pract. Conf. Quality, Standardization, Control: Theory and Practice*, Odessa, Sept. 9-13, 2019.
- [8] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kyrychenko, V. Vashchenko, and V. Tsybulin, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in Discrete Production*, no. 1, pp. 9-12, 2016.
- [9] H. V. Kanashevych, V. A. Vashchenko, and M. O. Bondarenko, "Prospects for the use of an electron beam in technologies of integrated optics", *Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu*, no. 2, pp. 189-193, 2000 [in Ukrainian]
- [10] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, and O. M. Tishchenko, "Regularities of influence of electron-beam technology modes on the performance characteristics of optical elements". *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 11 (2), pp. 02014-02021, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(2).02014.
- [11] I. Yatsenko, "Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building", *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, pp. 100-110, 2016. doi: 10.15276/opu.1.48.2016.12.
- [12] T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography", *Optics letters*, no. 6 (12), pp. 613-615, 1981.
- [13] M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, G. V. Kanashevich, and V. A. Vaschenko, "The express-diagnostics of band electronic stream", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*, no 3, pp. 49-51, 2005.
- [14] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko. "Influence of param-

- ters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", in *Int. Sci.-Tech. Conf. Innovations in ingeneering*, Burgas, Sept. 9-12, 2015.
- [15] J. Henoc, *In Quantitative Electron Probe Microanalysis*. Washington, USA: National Bureau of Standards Spec., 1968.
- [16] M. Bondarenko, V. Antonyuk, Yu. Kovalenko, M. Rud, and R. Haidash, "Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam micro-processing of dielectrics", *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, no. 4 (1), pp. 58-64, 2018.
- [17] R. Gaidash, S. Ralchenko, V. Medyanyk, and M. Bondarenko, "Control of spatial characteristics of the ribbon-shaped electron stream in the process of processing optical coverings of optoelectronics products", *Machines. Technologies. Materials*, no. 10, pp. 398-401, 2018.

I. S. Zhayvoronok,

Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
e-mail: zhaivoronok1988@ukr.net; klondaikfaust@gmail.com

O. V. Kovalenko

Cherkasy Research Expert Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine,
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine

THE INFLUENCE OF THE MAIN OPERATING PARAMETERS OF THE RIBBON-SHAPED FLOW OF ELECTRONS ON THE QUALITY OF THE OBTAINED MICRORELIEF ON THE OPTICAL GLASS SURFACE

The article presents the results of the study of the influence of the main operating parameters of the ribbon-shaped flow of electrons on the quality of the microrelief on the optical glass surface. The purpose of the work is to determine the influence of the main operating parameters of the ribbon-shaped flow of electrons (shape, size and distribution of the electron current density) on the quality of the optical glass surface (absence of micro- and macro-defects on the surface, minimal residual micro-uniformities, etc.). The dependence of the influence of the main operating parameters of the low-energy ribbon-shaped flow of electrons on the quality of the surface microrelief of the "crown" optical glass is established, which makes it possible to evaluate the process of interaction of the electron flow with the optical glass surface. It is also established that the useful current of the electron flow is about 30% of the total emission current of the cathode of the electron gun. It is shown that such factors as: the decrease in the diameter of probes under the influence of the electron flow and the heating of probes during the measurement can affect the accuracy of determining the operating parameters of the ribbon-shaped electron flow by the probing method. Thus, after approximately 40-50 measurements, a significant decrease in the diameter of probes to 5% occurs, after which it becomes necessary to install new probes with identical characteristics. At the same time, the total error of the probe method for determining the density of the electron flow doesn't exceed 8%. Using the method of atomic force microscopy, it is established that after processing the surfaces of optical glass of the "crown" grade with a low-energy ribbon-shaped electron flow, provided that the rational shape, size and distribution of the current density are ensured both in the operating space and on the treated surface, the irregularities are reduced from 40-75 nm to 3,5-5 nm. The practical value of the work lies in the production of various devices and complexes (as focusing photo-receiving and reflecting components) using the proposed technology. In general, the glass surface after electron beam treatment has a more uniform structure and is protected from microdefects, unlike surfaces without electron beam treatment, which finds application.

Keywords: ribbon flow of electrons, determination of operating parameters, probe method, surface microrelief, optical glass.

Стаття надійшла 06.09.2022

Прийнято 27.09.2022