

УДК 621.9.048.7

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ
СТРІЧКОВОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-
ПРОМЕНЕВОМУ МІКРООБРОБЛЕННІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Жайворонок І. С., Коваленко Ю. І.

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

E-mail: i.zhayvoronok88@gmail.com; kovalenkoyi@ukr.net

В статті показана можливість підвищення точності визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку при електронно-променевому мікрообробленні діелектричних матеріалів у вакуумі (на прикладі полікристалічного кремнію марки Кр0 та оптичного скла марки К8) в результаті аналізу та вибору найбільш прийнятних енергетичних режимів роботи дротяної електронно-променевої гармати Пірса.

Метою роботи є дослідження впливу вольт-амперних характеристик дротяної електронно-променевої гармати Пірса на якість та повторюваність процесу оброблення діелектричних матеріалів електронним потоком стрічкової форми, що дозволяє обрати найбільш раціональні режими визначення робочих параметрів електронного потоку з більш високою точністю. У роботі запропоновано технологічний експеримент з електронно-променевого мікрооброблення діелектричних поверхонь, а також визначені та досліджені робочі параметри процесу такого оброблення залежно від можливих енергетичних характеристик основного робочого вузла електронно-променевого обладнання, а саме – електронно-променевої гармати Пірса. Отримані внаслідок експериментального дослідження робочі параметри стрічкового електронного потоку дозволили забезпечити найбільш якісне оброблення поверхонь діелектричних матеріалів за рахунок покращення таких показників точності визначення цих параметрів, як прецизійність (так, стандартне відхилення повторюваності S , зменшилося з 8,33 % до 4,95 %, а стандартне відхилення відтворюваності S_R зменшилося з 13,28 % до 6,18 %), що підтверджує репрезентативність робочих параметрів, так і правильність (зміщення методики визначення робочих параметрів в електронному потоці є статистично незначущим за умов довірчого інтервалу на осі $\delta=0$ при рівні значущості $\alpha=0,05$). Аналіз отриманих результатів щодо електронно-променевого мікрооброблення поверхонь діелектричних матеріалів за обраними робочими параметрами доводить покращення якості та підвищення відтворюваності результатів оброблення цих поверхонь за чистотою, а також зменшення залишкового нанорельєфу на 18-25 %. Проведене порівняння результатів експериментального електронно-променевого мікрооброблення діелектриків з результатами їх лазерного поверхневого оброблення дозволило встановити зменшення залишкових мікронерівностей поверхні, як при електронно-променевому мікрообробленні (для оптичного скла марки К8 у 17-27 разів; для кремнію Кр0 – у 14-22 рази), так і при поверхневому лазерному обробленні (для обох видів матеріалу – у 12-14 разів). При цьому, поверхневе лазерне оброблення не дозволяє усунути хвилястість поверхні, яка пов'язана зі специфікою взаємодії лазерного променя з поверхнею оптичного матеріалу, тоді як при обробленні електронним потоком стрічкової форми виникнення такої хвилястості не спостерігається. Висновки та проаналізовані дані, отримані в статті за результатами експериментальних досліджень, можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів електронно-променевого мікрооброблення при отриманні виробів мікрооптики, інтегральної оптики, мікроелектрооптики, наноелектроніки тощо.

Ключові слова: електронний потік; точність; робочі параметри; електронно-променева гармата; вольт-амперна характеристика.

Вступ

На сучасному рівні розвитку науки та техніки ставиться ряд вимог до компонентів виробів науко-місткого обладнання, а саме: прецизійність, висока надійність, мініатюрність та точність їх виконання [1]. Найбільш застосованими матеріалами при виготовленні таких компонентів є діелектрики (скло, моно- та полікремній, кераміка, композиційні та метаматеріали), що зарекомендували себе в якості надійного, а в більшості випадків і безальтернативного заміника традиційних конструкційних матеріалів. Серед широкої номенклатури таких діелектри-

ків слід відмітити оптичне скло та кремній, які в останній час знаходять все ширше використання в таких галузях, як мікро- та нанотехнології, точне приладобудування, прецизійне машинобудування, інформаційні технології, авіакосмічне будування, медицина тощо [2, 3].

Але, розвиток технологій виготовлення компонентів виробів з цих матеріалів та розширення їх функціональних можливостей внаслідок їх подальшої мініатюризації та відмови від традиційних технологій виготовлення (механічного, хіміко-механічного, полум'яного полірування) на користь

сучасних мікротехнологій (LIGA, SUMMiT, MUMPs, та інших) [4], обмежується відсутністю технологічних прийомів щодо усунення дефектного приповерхневого шару, чим значно знижує техніко-експлуатаційні характеристики таких виробів. Вирішення даної проблеми полягає у високоточному обробленні діелектриків перспективними методами із залученням концентрованих потоків енергії.

Серед таких методів оброблення діелектричних матеріалів із застосуванням концентрованих потоків енергії вигідно відрізняється метод стрічкового електронно-променевого мікрооброблення [5], який дозволяє не тільки зменшити залишковий мікрорельєф поверхні до одиниць нанометрів, але й повністю усунути дефектний та тріщинуватий приповерхневий шари в діелектрику шляхом рівномірного проплавлення поверхні на глибину до 10 мкм. В якості інструмента для здійснення такого оброблення в роботі [6] пропонується використовувати електронний потік стрічкової форми, що генерується дротяним вольфрамовим катодом електронно-променевої гармати Пірса, конструкція та принцип дії якої детально розглянуті в роботі [7].

Постановка проблеми

В роботі [8] описується метод поверхневого електронно-променевого полірування пластин із силікатного оптичного скла із використанням електронно-променевої гармати Пірса з дротяним вольфрамовим катодом, та встановлена можливість отримання бездефектних (з усуненим дефектним шаром) поверхонь із залишковими нерівностями порядку 5 нм. Водночас, робочі параметри такого оброблення обиралися в результаті експериментальних досліджень і в кожному конкретному випадку (наприклад, при отриманні асферичних поверхонь), що не може бути застосованим для якісного поверхневого електронно-променевого мікрооброблення.

В сучасних роботах [9 – 12] науковців – фахівців в області поверхневого електронно-променевого оброблення, як-то: Ващенко В. А., Канашевича Г. В., Коваленка Ю. І., Крішна А. Т., Міклера Е., Нікнорова Н. В., Рудя М. П. та інших було удосконалено метод керованого мікрооброблення поверхонь різноманітних діелектричних матеріалів (оптичного скла, кремнію, кераміки, композиційних матеріалів, сапфіру, та інших) низькоенергетичним стрічковим потоком електронів (енергія електронів в стрічці не перевищує 10 кеВ).

Проте подальший розвиток запропонованого методу для оброблення діелектриків обмежений низкою невирішених питань. Так, основним невирішеним на сьогодні питанням залишається питання відсутності оперативного контролю та стабілізації розподілу енергії в електронному потоці через недосконалість методів автоматичного керування стрічковим потоком електронів.

Основним чинником якісного електронно-променевого оброблення поверхонь діелектричних

матеріалів є дотримання рівномірності та стабільності закону розподілу енергії електронної стрічки в процесі її руху вздовж поверхні, яка підлягає обробленню. За методикою, описаною в роботі [12], показана можливість отримання рівномірного за розподілом енергії електронного потоку стрічкової форми, яка здійснюється підбором геометричних параметрів електронно-променевої гармати Пірса. При цьому, відхилення ширини електронного потоку відносно розміру його центральної частини (a , відповідно, і розподіл енергії електронної стрічки) для відстаней від 10 мм до 40 мм від аноду електронно-променевої гармати до поверхні, що підлягала обробленню, не перевищувала 2-5 %. Проте, недоліком цієї методики є неможливість проведення високоточного визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку в режимі реального часу, що виключає проведення динамічного керування розподілом потужності в електронній стрічці. Іншим недоліком методики є низька стабільність процесу оброблення, що пов'язана зі зниженням енергетичних показників електронного потоку в часі через зміну опору в процесі нагріву. Це доводить необхідність ручного корегування струмом електронного потоку та прискорюючої напруги в процесі оброблення.

Тому вирішення питання підвищення точності визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку внаслідок дослідження енергетичних (вольт-амперних) характеристик дротяної електронно-променевої гармати Пірса, що дозволить отримати стабільний розподіл енергії електронної стрічки в процесі якісного електронно-променевого мікрооброблення діелектричних матеріалів є актуальним.

Метою роботи є дослідження впливу вольт-амперних характеристик дротяної електронно-променевої гармати Пірса на якість та повторюваність процесу оброблення діелектричних матеріалів електронним потоком стрічкової форми, що дозволяє обрати найбільш раціональні режими визначення робочих параметрів електронного потоку з більш високою точністю.

Матеріали та методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на модернізованій вакуумній установці УВН-71, до складу якої входила електронно-променева гармата Пірса (діаметр катоду 0,4 мм, довжина катоду 90 мм, довжина щілини аноду $a = 80$ мм, ширина щілини аноду $b_a = 2,5$ мм), що генерує електронний потік стрічкової форми довжиною 60 мм. Робочі характеристики електронно-променевої гармати:

- максимальний струм розігріву катоду $I_f = 50 \text{ A} \pm 15 \%$;
- діапазон прискорюючих напруг $U = 0,5\text{-}6 \text{ кВ} \pm 2\text{-}3\%$;

– діапазон струмів електронного потоку $I = 20-400$ мА $\pm 1-5\%$.

Тиск у вакуумній камері при електронно-променевому мікрообробленні становив $p_0 = (3-5) \cdot 10^{-4}$ Па та реєструвався вакуумметром ВМБ-8 (діапазон виміру тисків 10^0-10^{-7} Па). Відстань від електронної гармати (зовніш-

ньої поверхні анода) до оброблюваної поверхні становила $H = 25$ мм $\pm 0,1$ мм.

Експериментальна схема дослідження, наведена на рис. 1, дозволяє коректно виміряти та дослідити вольт-амперну характеристику електронно-променевої гармати Пірса.

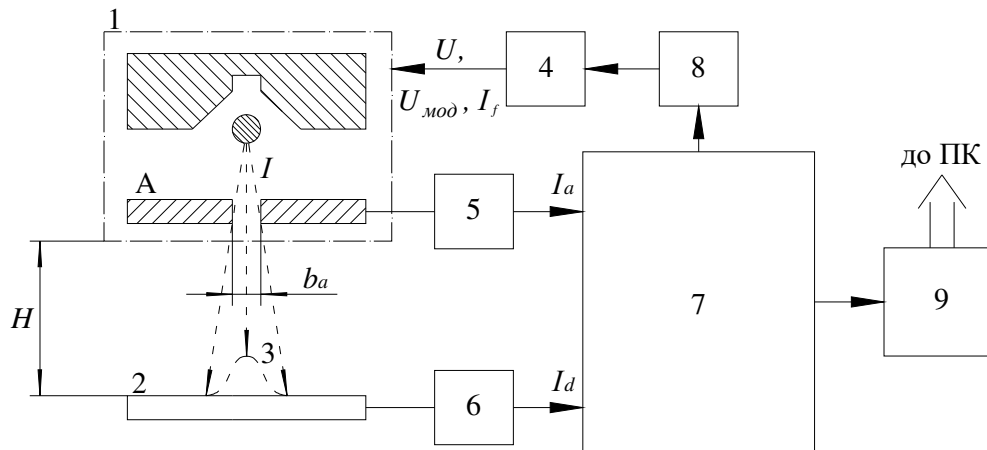


Рис. 1. Експериментальна схема визначення вольт-амперної характеристики на катоді електронно-променевої гармати Пірса та на пластині з діелектрика: 1 – електронно-променева гармата Пірса; 2 – пластина з діелектрика; 3 – розподіл електронного потоку стрічкової форми по поверхні діелектричного матеріалу; 4 – керований блок живлення електронно-променевої гармати; 5, 6 – блоки аналогової обробки зондових сигналів; 7 – блок цифрової обробки зондових сигналів; 8 – система автоматичного керування ЕПГ Пірса; 9 – блок передачі даних на ПК; А – анод; H – відстань від електронно-променевої гармати до поверхні діелектрика; b_a – ширина щілини аноду; U – прискорююча напруга; U_{mod} – напруга, що подається на модулятор; I_f – струм розігріву катоду; I – струм електронного потоку; I_a – струм на аноді; I_d – струм на діелектриці

Для порівняння результатів поверхневого електронно-променевого мікрооброблення діелектриків використовувалися дані, отримані лазерним поверхневим обробленням, що проводилося на установці «Diag-6» скануючим лазерним променем (діаметр променя 200 мкм) за таких режимів: потужність випромінювання 15 Вт, швидкість сканування 500 мм/с, фокусна відстань 150 мм.

Дослідження мікрогеометрії поверхонь діелектриків після технологічного експерименту проводилося на атомно-силовому мікроскопі "NT-206" з використанням кремнієвих зондів "Ultrasharp CSC12". Атомно-силовий мікроскоп також містив систему мікропозиціонування і вбудований оптичний довгофокусуєчий мікроскоп Logitech, що спрощувало вибір необхідної ділянки на поверхні зразка.

Для підвищення достовірності результатів дослідження, вимірювання мікрогеометрії проводиться не менше ніж в 15 випадкових точках обраних випадковим чином на 10 однотипних зразках, оброблених за однакових режимів та окремо узятих для кожного виду оброблення.

Аналіз отриманих результатів

В результаті проведених технологічних експериментів по визначенню розподілу струму електронного потоку на аноді та діелектричному матеріалі,

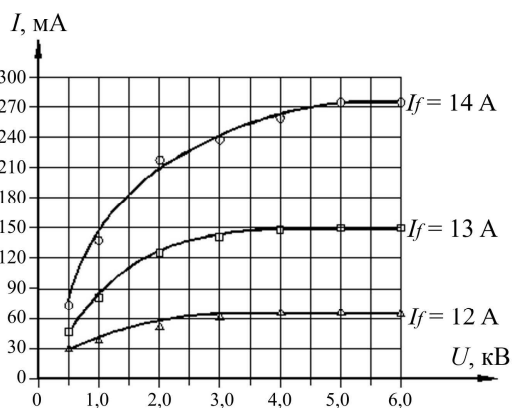
який виступав як об'єкт оброблення (на прикладі оптичного скла К8) були отримані залежності струму електронного потоку I від прискорюючої напруги U за різних значень ширини анодної щілини та струму розігріву катоду I_f , рис. 2 – рис. 4.

Для визначення рівномірності закону розподілу енергії електронної стрічки вздовж поверхні, яка підлягає обробленню, було використано розроблену авторами систему зондування [13].

Основні задачі, що вирішувалися такою системою зондування полягали в наступному:

- вимірювання щільності розподілу енергії в поперечному перерізі електронного потоку з питомою потужністю 10^2-10^3 Вт/см²;
- визначення ефективної ширини електронної стрічки;
- дослідження факторів, які впливають на розподілення енергії вздовж поперечного перерізу електронного потоку;
- визначення робочих параметрів електронного потоку в процесі електронно-променевого оброблення;
- вимірювання робочих параметрів електронного потоку на різних відстанях від поверхні оптичного матеріалу;
- безпосереднє використання отриманих результатів зондування для корегування робочих параме-

трів з подальшою стабілізацією та керуванням



електронним потоком.

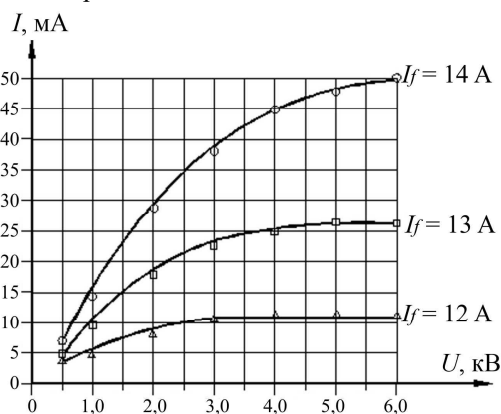


Рис. 2. Залежність струму електронного потоку I від прискорюючої напруги U на катоді (а) електронно-променевої гармати Пірса та на пластині зі скла К8 (б). Ширина щілини аноду $b_a = 2,5$ мм, площа відбитку на оптичній пластині від дії електронної стрічки $4,0$ мм \times 90 мм [14]

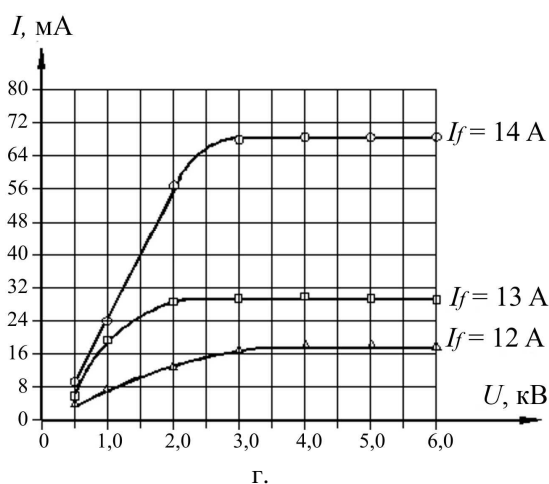
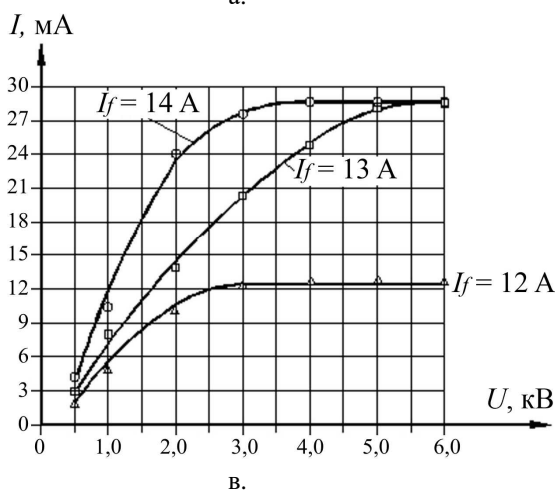
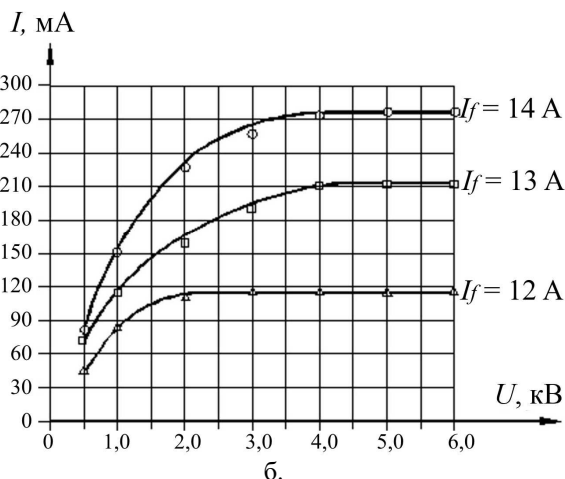
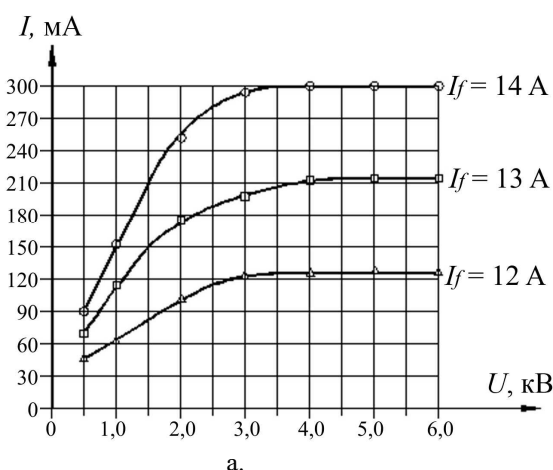


Рис. 3. Залежність струму електронного потоку I від прискорюючої напруги U на катоді (а, б) електронно-променевої гармати Пірса та на пластині зі скла К8 (в, г). Ширина щілини аноду $b_a = 1,5$ мм (а, в), $b_a = 3,0$ мм (б, г); площа відбитку на оптичній пластині від дії електронної стрічки $2,7$ мм \times 90 мм (а, в), $6,0$ мм \times 90 мм (б, г)

Як видно із рис. 2, залежність струму електронного потоку від прискорюючої напруги і на катоді електронної гармати, і на пластині з оптичного скла, за умов оптимальних геометричних па-

раметрів електронно-променевої гармати Пірса, що були отримані в роботі [14], надає структурне перетворення поверхневого шару діелектриків (повне переплавлення трищінуватого та дефектно-

го шарів), у результаті чого утворюється нова кварцова структура. Робочі параметри низькоенергетичного електронно-променевого мікрооброблення діелектриків за таких умов та при ширині анодної щілини $b_a = 2,5$ мм мають високу стабільність в діапазоні прискорюючої напруги 3-6 кВ та струму оброблення 30-180 мА (на аноді) або 5-30 мА (на діелектрику) при струмі розігріву катоду – до 13 А. На процесах, які відбуваються за вищезазначених умов ґрунтуються основні технологічні режими електронно-променевого мікрооброблення виробів із оптичного скла та кремнію.

Для порівняння, на рис. 3 наведені вольт-амперні характеристики для ширини щілини аноду $b_a = 1,5$ мм (рис. 3,а, в) та $b_a = 3,0$ мм (рис. 3,б, г).

Результати дослідження вольт-амперних характеристик при меншому значенні щілини катоду (рис. 3,а, в) вказують на високу стабільність в діапазоні прискорюючої напруги 3,5-6 кВ та струму оброблення 120-300 мА (на аноді), тоді, як на діелектрику стабільне значення прискорюючої напруги спостерігається лише в діапазоні значень струму оброблення 5-15 мА, що відповідає лише режимам електронно-променевого мікрооброблення для стадії електронного впливу, що характеризується тепловим обробленням поверхонь без їх переплавлення, та, відповідно, усунення дефектного і трищинуватого шарів [15].

В той же час, при значенні $b_a = 3,0$ мм (рис. 3,б, г), висока стабільність, як і у випадку $b_a = 2,5$ мм (рис. 2), спостерігається в діапазоні прискорюючих напруг 3-6 кВ та струмі розігріву катоду $I_f = 12-14$ А. Водночас, струм електронного потоку на аноді знаходиться в діапазоні значень $I = 90-300$ мА, тоді, як на діелектрику значення струму оброблення збільшуються до $I_d = 16-70$ мА, що відповідає лише режимам електронно-променевого мікрооброблення для тієї стадії електронного впливу, за якої відбувається інтенсивне випаровування і кипіння речовини поверхневого шару оптичного скла, а його практичне використання малоперспективне та вкрай обмежене [15].

Разом із встановленням залежності струму електронного потоку від прискорюючої напруги для обрання оптимальних значень робочих параметрів стрічкового електронного потоку, системою визначення вольт-амперних характеристик (див. рис. 1) були отримані розподіли щільності струму в електронному потоці в безпосередній близькості до поверхні оброблюваного матеріалу, розраховані за даними, отриманими при заданих параметрах за різних значень напруги на модуляторі, рис. 4.

В результаті проведеного аналізу низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми було встановлено, що за різних робочих параметрів такого потоку на практиці спостерігаються різні закони розподілу густини струму, які відрізняються між собою, а також від нормального (гаусівського) розподілення.

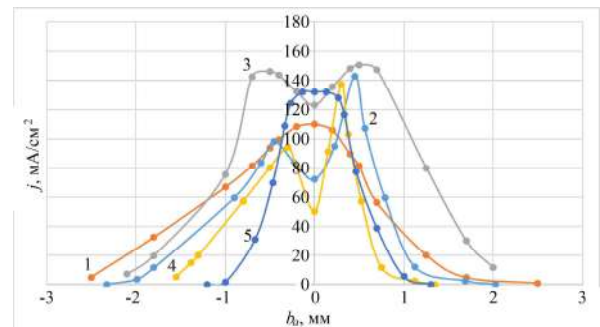


Рис. 4. Зондові характеристики електронного потоку: розподіл щільності струму розрахований за даними про зондовий струм в електронному потоці ($U = 3500$ В; 1 – $U_{mod} = 0$ В; 2 – $U_{mod} = 25$ В; 3 – $U_{mod} = 35$ В; 4 – $U_{mod} = 45$ В; 5 – $U_{mod} = 55$ В)

На думку авторів, це пов'язане з тим, що прискорююче поле електронів в електронно-променевої гарматі Пірса має максимальну інтенсивність саме по центру модулятора та знижується ближче до його країв (оскільки катод електронно-променевої гармати розігрівається по довжині нерівномірно, а найбільший потік електронів формується в його центральній (відносно довжини) частині). При зміні напруги на модуляторі струм пучка також зазнає змін по величині внаслідок зміни просторового заряду на катоді. Водночас, змінюється величина робочої ділянки катоду, яка емітує потік електронів, що, в свою чергу, призводить, і до зміни робочої поверхні катоду, і до зміни розподілу густини струму електронного потоку в просторі робочої зони та на поверхні матеріалу (рис. 5).

Робочі параметри процесу оброблення, які були отримані в результаті дослідження вольт-амперних характеристик дрютяної електронно-променевої гарматі Пірса було використано для поверхневого оброблення пластин з оптичного скла К8 та кремнію Кр0. За результатами електронно-променевого мікрооброблення таких діелектриків за оптимальних режимів проводилося їх порівняння з результатами лазерного поверхневого оброблення, що дозволило виявити зменшення залишкових мікронерівностей поверхні: для оптичного скла К8 з 40-110 нм до 1,5-6,5 нм (кремнію – з 25-30 нм до 1,4-1,8 нм) при електронно-променевому мікрообробленні та до 3,3-7,8 нм для оптичного скла К8 (та до 2 нм – для кремнію Кр0) при поверхневому лазерному обробленні (рис. 6) [16].

Водночас, як можна побачити на рис. 6, на поверхнях пластин, які були оброблені скануючим лазерним променем, спостерігалася хвилястість поверхні. Збільшення потужності лазерного випромінювання з одночасним збільшенням фокусної

відстані збільшує таку хвилястість, що, вірогідно, пов'язано зі збільшенням в'язкості діелектричного аморфного матеріалу на повітрі. Подальше ж збільшення потужності лазерного випромінювання з

15 Вт до 25 Вт є недоцільним, оскільки призводить до утворення на оптичних поверхнях мікротріщин – аж до руйнації оброблюваного зразка.

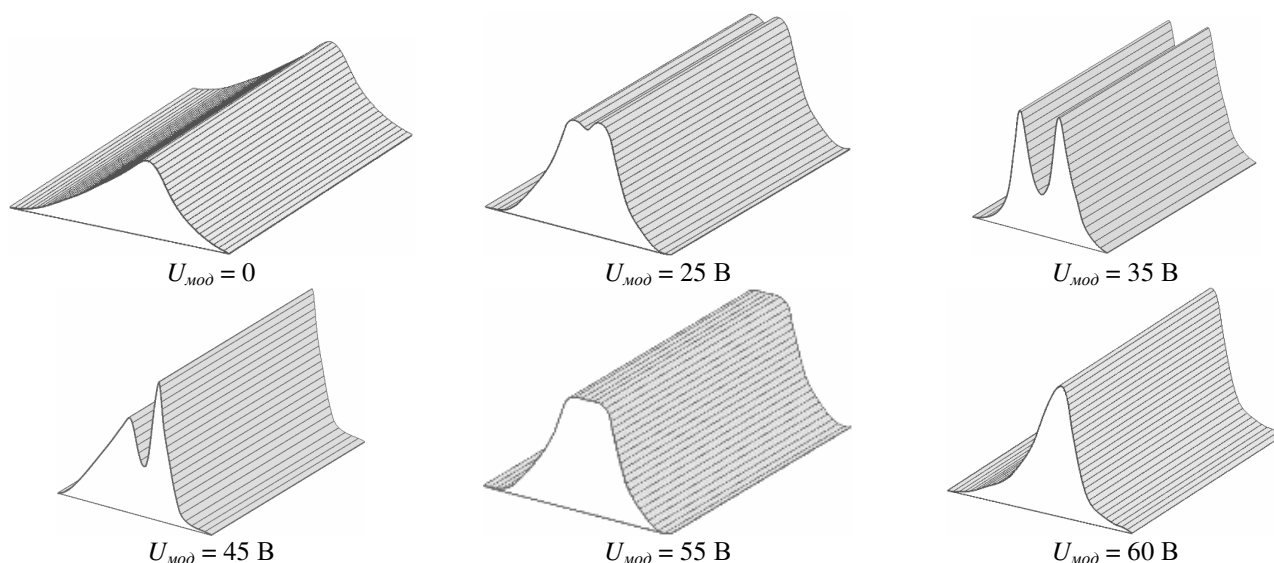


Рис. 5. Форма розподілу щільності струму електронного потоку за різних значень напруги на модуляторі U_{mod} за таких робочих параметрів: ширина анодної зілини $b_a = 2,5$ мм, струм розігріву катоду $I_f = 13$ А, прискорююча напруга $U = 3500$ В

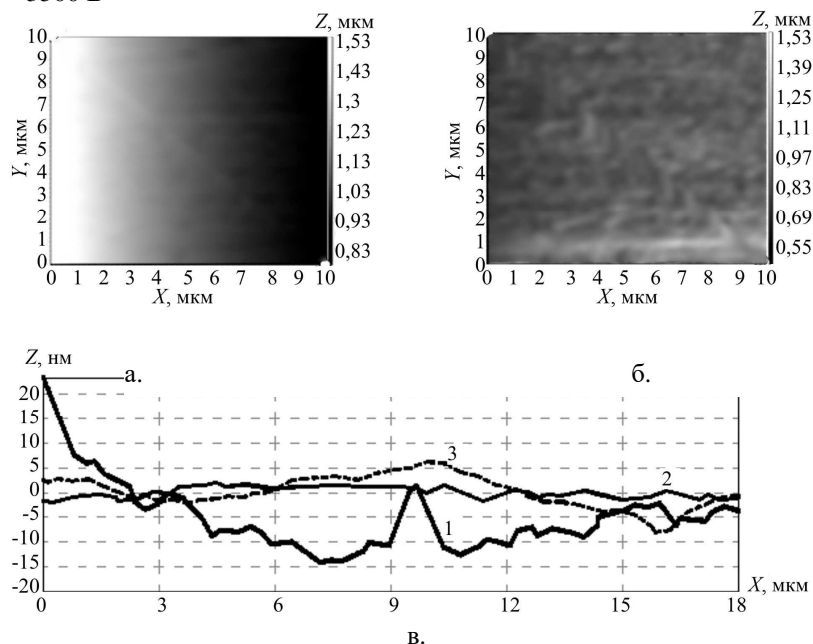


Рис. 6. Мікрогеометрія (а, б) та профіль ділянки поверхні (10×10 мкм) пластини зі скла К8, яка була оброблена електронним потоком (а) та скануючим лазерним променем (б): 1 – профіль вихідної поверхні; 2 – профіль поверхні, обробленої електронним потоком; 3 - профіль поверхні, обробленої скануючим лазерним променем

Паралельно з дослідженнями поверхні діелектриків після їх лазерного оброблення, проводилися дослідження поверхонь оптичного скла після оброблення його поверхні стрічковим електронним потоком за різних режимів (рис. 7).

Наведені на рис. 7 результати корелюють з припущеннями, зробленими авторами, щодо мак-

симальної відповідності найкращої якості отриманих в процесі електронно-променевого оброблення поверхонь залежно від оптимальних параметрів вольт-амперних характеристик ЕПГ, які були отримані за наведеною в роботі схемою (див. рис. 1).

Отримані внаслідок експериментального дослідження робочі параметри стрічкового електро-

ного потоку дозволили забезпечити найбільш якісне оброблення поверхонь діелектричних матеріалів при покращенні таких показників точності

визначення цих параметрів, як прецизійність, що підтверджує репрезентативність робочих параметрів, так і правильність [17].

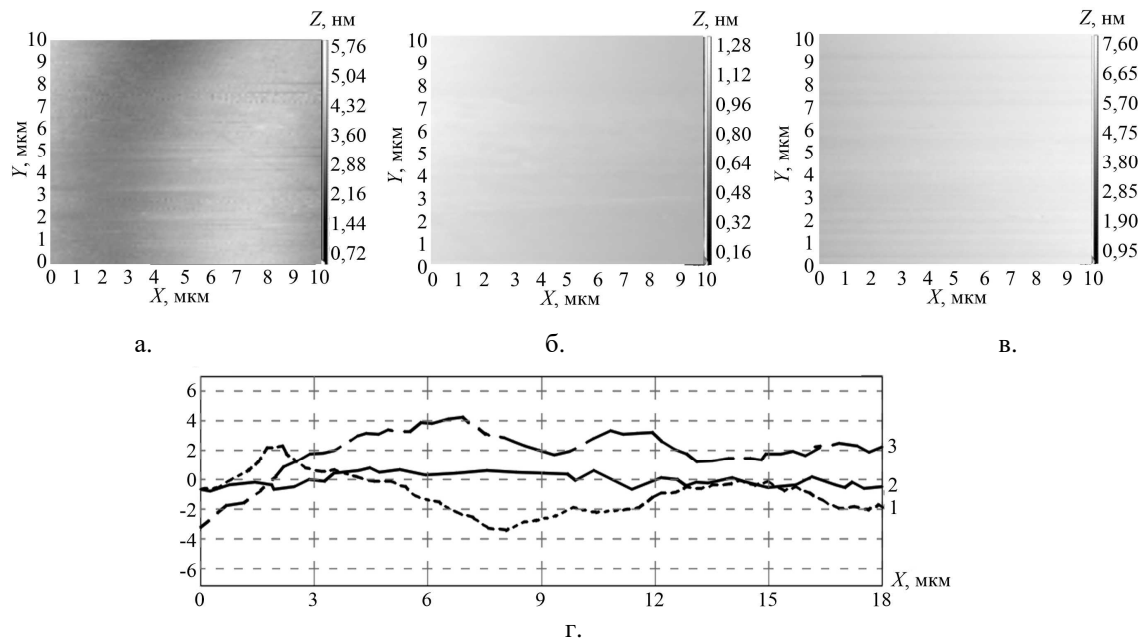


Рис. 7. Мікрогеометрія (а) – (в) та профіль (г) ділянки поверхні 10×10 мкм пластин зі скла К8, які були оброблені стрічковим електронним потоком за різних робочих параметрів: а) $U = 2,5$ кВ; $I_{nom} = 10,5$ мА; $I_f = 12$ А; $b_a = 1,5$ мм; б) $U = 3,5$ кВ; $I_{nom} = 24$ мА; $I_f = 13$ А; $b_a = 2,5$ мм; в) $U = 5,5$ кВ; $I_{nom} = 44$ мА; $I_f = 14$ А; $b_a = 3,5$ мм

Визначення прецизійності робочих параметрів проводилося в такій послідовності. Для отриманих внаслідок експериментальних лабораторних досліджень робочих параметрів y_{ij} розраховувалося середнє значення \bar{y}_j , з використанням яких розраховувалося стандартне відхилення відтворюваності S_R .

При розрахунках стандартного відхилення повторюваності S_r враховувалося стандартне відхилення та кількість лабораторій (у нашому випадку три), в яких проводилося відтворення технологічного експерименту. В той же час, при розрахунках міжлабораторного стандартного відхилення S_L враховували лабораторну складову зміщення B_i та середнє значення лабораторної складової зміщення \bar{B} .

Правильність визначення робочих параметрів визначається через розрахунок середнього арифметичного значення результатів вимірювань m , з використанням еталонного значення y_{et} , що дозволяє розрахувати лабораторне зміщення Δ , і далі – зміщення методу δ .

У результаті проведених розрахунків у табличному редакторі Microsoft Excel з використанням спеціально розробленого авторами макросу встановлено, що стандартне відхилення повторюваності S_r зменшилося з 8,33 % до 4,95 %, а стандартне відхилення відтворюваності S_R зменшилося з 13,28 % до 6,18 % (показники прецизійності визначення робочих параметрів електронно-променевого оброблення діелектриків). У той же час було встановлено, що зміщення методики визначення робочих параметрів

в електронному потоці є статистично незначущим за умов довірчого інтервалу на осі $\delta=0$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$, що дозволило підтвердити правильність визначення цих параметрів.

Отже, провівши аналіз результатів досліджень енергетичних характеристик дрютяної електронно-променевої гармати Пірса в процесі експериментального оброблення діелектриків електронним потоком стрічкової форми встановлене підвищення точності визначення робочих параметрів (прискорюючої напруги, щільності електронного потоку, напруги на модуляторі тощо) такого оброблення на 7-8 %.

Висновки

1. Досліджено вплив вольт-амперних характеристик електронно-променевої гармати Пірса на якість оброблення діелектричних поверхонь електронним потоком стрічкової форми. Показано, що при ширині анодної щілини $b_a = 2,5$ мм можна реалізувати основні технологічні режими низькоенергетичного електронно-променевого мікрооброблення діелектриків, тоді як зменшення або збільшення значення b_a обмежує діапазон технологічних режимів такого технологічного процесу, чим знижує якість оброблення поверхонь.

2. Проведене порівняння результатів електронно-променевого мікрооброблення діелектриків за оптимальних режимів з результатами їх лазерного поверхневого оброблення, що дозволило встановити зменшення залишкових мікронерівностей поверхні

для оптичного скла К8 з 40-110 нм до 1,5-6,5 нм (відповідно, з 25-30 нм до 1,4-1,8 нм для кремнію Кр0) при електронно-променевому мікрообробленні та до 3,3-7,8 нм (для скла К8) і до 2 нм (для кремнію Кр0) при поверхневому лазерному обробленні. При цьому, поверхнєве лазерне оброблення не дозволяє усунути хвилястість поверхні, яка пов'язана зі специфікою взаємодії лазерного променю з поверхнею оптичного матеріалу, тоді як при обробленні електронним потоком стрічкової форми виникнення такої хвилястості не спостерігається.

3. Показано, що електронно-променеве мікрооброблення поверхонь діелектричних матеріалів на прикладі пластин з оптичного скла К8 та кремнієвих пластин Кр0 дозволяє підвищити відтворюваність результатів такого мікрооброблення за чистотою та залишковим нанорельєфом на 18-25 %.

4. Внаслідок аналізу результатів щодо якості поверхонь, що досліджувалися методом атомно-силової мікроскопії, встановлене підвищення на 7-8 % точності визначення робочих параметрів електронного потоку стрічкової форми при електронно-променевому мікрообробленні діелектриків, яке безпосередньо залежить від обраних енергетичних характеристик електронно-променевої гармати Пірса, які визначалися на розробленій та представленій у роботі схемі визначення вольт-амперних характеристик електронно-променевої гармати.

5. Отримані внаслідок експериментального дослідження робочі параметри стрічкового електронного потоку дозволили забезпечити найбільш якісне оброблення поверхонь діелектричних матеріалів за рахунок покращення таких показників точності визначення цих параметрів, як прецизійність (так, стандартне відхилення повторюваності S_r зменшилося в 1,7 рази, а стандартне відхилення відтворюваності S_R зменшилося у 2,15 рази), що підтверджує репрезентативність робочих параметрів, так і правильність (зміщення методики визначення робочих параметрів в електронному потоці є статистично незначущим за умов довірчого інтервалу при рівні значущості $\alpha = 0,05$).

Подальші перспективні дослідження в рамках продовження цієї наукової роботи будуть спрямовані на створення системи автоматичного регулювання робочих параметрів електронно-променевої гармати Пірса безпосередньо в процесі оброблення діелектричних матеріалів різного хімічного складу та форми.

Література

- [1] H. V. Kanashevych, V. A. Vashchenko, V. M. Lukashenko & et al., "Optoelectronics and microoptics are promising branches of science and technology", *Bulletin ChSTU*, is. 6, pp. 52 – 62, 2002. [in Ukrainian]
- [2] U. Petzold, "Optical Glass: A High-Tech Base Material as Key Enabler for Photonics", in *Advances in Glass Science and Technology*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2018 [Online]. DOI: 10.5772/intechopen.73925
- [3] S. S. Chen, Y. Y. Zhang, X. R. Hong & J. F. Li, "Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems: A brief review", *J. Semicond.*, vol. 43 (8), pp. 081301 – 081309, 2022. DOI: 10.1088/1674-4926/43/8/081301
- [4] James J. Allen, *Micro electro mechanical system design*. Taylor & Francis Group, CRC Press (2005), Boca Raton. 451 p.
- [5] M. O. Bondarenko, V. A. Vashchenko, S. O. Bilokin, Yu. Iu. Bondarenko & et al., "Study of the conditions for the formation of nanostructures on the surfaces of piezoelectric ceramics under the action of a tape electron flux", *Bulletin SUNU V.Dalia named*, vol. 8 (162), part 2, pp. 30-34, 2011. [in Ukrainian]
- [6] V. A. Syrovoi, "Theory of single-component electron beams", *Radiophys Quantum Electron*, is. 33, pp. 546-553, 1990. DOI: 10.1007/BF01037861
- [7] M. P. Rud, M. O. Bondarenko, Yu. I. Kovalenko, I. V. Iatsenko & et al., "Research and formation of tape electronic flow for microprocessing of materials surfaces", *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, is. 2, pp. 58-63, 2012. [in Ukrainian]
- [8] Yu. I. Kovalenko, M. O. Bondarenko, I. V. Iatsenko, M. P. Rud & et al., "Modification of the nanorelief on optical glass by electron beam microprocessing", *Bulletin ChSTU*, is. 1, pp. 104-107, 2012. [in Ukrainian]
- [9] E. Micler, Ching-Te Li, A. T. Krishnan & et al. "A charge damage study using an electron beam low k treatment", in *Proc. Interconnect Technology Conference*. (09 July, 2004). DOI: 10.1109/ITC.2004.1345740.
- [10] N. V. Nikonorov, A. I. Sidorov, V. A. Tsekhomskii & et al. "Electron-beam modification of the near-surface layers of photosensitive glasses". *Tech. Phys. Lett.*, is. 35, pp. 309-311, 2009. DOI: 10.1134/S1063785009040063.
- [11] Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Vertsanova, I. V. Iatsenko & et al. "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology", in *XIV Intern. conf. Physics and technology of thin films and nanosystems* (Ivano-Frankivsk, May, 20-25, 2013).
- [12] M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko & et al. "The express-diagnostics of band electronic stream", *Bulletin ChSTU*, is. 3, pp. 49-51, 2005. [in Ukrainian]
- [13] Yu. I. Kovalenko & et al. "Research of the spatial and energetic characteristics of the electron flow of the tape form", in *X Intern. Industr. conf. Effectiveness of realization of scientific, resource and industrial potential in modern conditions* (Slavske, February 18-22, 2010). [in Ukrainian]
- [14] M. P. Rud, H. V. Kanashevych, V. P. Boiko, Yu. I. Kovalenko & et al. "Determination of the distribution of the current density of the tape electron beam in the processing of optical materials", in *V Intern. Science and Pract. conf.*

Dynamics of scientific research - 2006, (Dnipropetrovsk, Nauka i osvita, 2006). [in Ukrainian]

- [15] M. O. Bondarenko, H. V. Kanashevych & V. A. Vashchenko, "Optimization of the parameters of the tape electronic stream with the help of zones of thermal influence", in *I Intern. Science and Tech. conf. Mechanical engineering and metalworking – 2003*, (Kirovohrad, April 17-19, 2003). [in Ukrainian]

- [16] M. A. Bondarenko, Yu. B. Shevchenko, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko & et al. "Investigation of the microgeometry of the surface of optical glasses after electronic and after laser treatment by atomic force microscopy", in *VII Intern. conf. Methodological aspects of scanning probe microscopy*, (Minsk, November 1-3, 2006).

- [17] DSTU ISO 5725-(1-6):2005 Accuracy (correctness and precision) methods and results of measurements. Part 1 – Part 6.

UDC 621.9.048.7

I. S. Zhaivoronok, Yu. I. Kovalenko

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

INCREASING THE ACCURACY OF DETERMINING THE WORKING PARAMETERS OF THE RIBBON-SHAPED ELECTRONIC FLOW IN THE ELECTRON-BEAM MICRO-PROCESSING OF DIELECTRICS

The article shows the possibility of increasing the accuracy of determining the operating parameters of the ribbon-shaped electron flow during electron beam micromachining of dielectric materials in a vacuum (using the example of Kp0 grade polycrystalline silicon and K8 grade optical glass) as a result of the analysis and selection of the most acceptable energy modes of operation of the Pierce wire electron-beam gun. The purpose of the work is to study the influence of the volt-current characteristics of the Pierce wire electron-beam gun on the quality and repeatability of the process of processing dielectric materials with a ribbon-shaped electron flow, which allows choosing the most rational modes of determining the operating parameters of the electron flow with higher accuracy.

The paper proposes a technological experiment on electron-beam micromachining of dielectric surfaces, as well as defined and investigated the working parameters of the process of such processing, depending on the possible energy characteristics of the main working node of the electron-beam equipment, namely, the Pierce electron-beam gun.

The operating parameters of the ribbon-shaped electron flow obtained as a result of the experimental study made it possible to ensure the highest quality processing of the surfaces of dielectric materials due to the improvement of such indicators of the accuracy of determining these parameters as precision (for example, the standard deviation of the repeatability of S_r decreased from 8.33% to 4.95%, and the standard the S_R reproducibility deviation decreased from 13.28% to 6.18%), which confirms the representativeness of the working parameters, as well as the correctness (the bias of the method of determining the working parameters in the electronic flow is statistically insignificant under the conditions of the confidence interval on the axis $\delta = 0$ at the significance level $\alpha = 0.05$). The analysis of the obtained results regarding the electron-beam microprocessing of the surfaces of dielectric materials according to the selected operating parameters proves the improvement of quality and the increase in the reproducibility of the results of the processing of these surfaces in terms of purity, as well as the reduction of the residual nanorelief by 18-25%.

A comparison of the results of experimental electron-beam microprocessing of dielectrics with the results of their laser surface treatment made it possible to establish a reduction in residual micro-uniformities of the surface, as in electron-beam microprocessing (for optical glass K8 by 17-27 times; for silicon Kp0 - by 14-22 times), as well as during surface laser treatment (for both types of material – 12-14 times). At the same time, surface laser treatment does not allow to eliminate surface waviness, which is related to the specifics of the interaction of the laser beam with the surface of the optical material, while when processing with an electron flow of the ribbon form, the occurrence of such waviness is not observed.

The conclusions and analyzed data obtained in the article based on the results of experimental research can be used to optimize the technological regimes of electron-beam micromachining in the production of products of microoptics, integrated optics, nanoelectronics, etc.

Keywords: ribbon-shaped electron flow; accuracy; operating parameters; electron beam gun; volt-current characteristic.

*Надійшла до редакції
12 жовтня 2022 року*

*Рецензовано
14 листопада 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).