

Канд. техн. наук М. П. Рудь, канд. техн. наук М. О. Бондаренко,
канд. техн. наук Ю. І. Коваленко, І. В. Яценко,
канд. техн. наук Є. Я. Губар, д-р техн. наук Г. В. Канашевич

Державний технологічний університет, м. Черкаси

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СТРІЧКОВОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ ДЛЯ МІКРООБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено методику дослідження електронного потоку стрічкової форми, яка складається з частин зондування електронного потоку та дослідження зон термічного впливу на металевій і скляній поверхнях. Досліджено залежності просторово-енергетичних характеристик стрічкового електронного потоку від технологічних параметрів.

Ключові слова: електронно-променева мікрообробка, зондування електронного потоку, взаємодія електронного потоку з поверхнею.

Вступ

На сьогодні концентровані потоки енергії знаходять дедалі ширше застосування у прецизійних технологіях обробки матеріалів [1–5]. Однією з таких технологій є електронно-променева поверхнева мікрообробка оптичного скла. Застосування електронного променя як інструмента з гнучким керуванням його потужністю, формою та траєкторією надали практичну можливість ефективно вплинути на поверхневий шар (ПШ) матеріалів з різною електропровідністю, у тому числі на нанорельєф та структуру порушеного шару, які утворилися після різних видів фінішної обробки [6–12].

Нами достатньо апробований спосіб обробки оптичного і технічного скла електронами, енергія яких не перевищує 10 кеВ. Окремі результати висвітлені в роботах [13–25]. Серед переваг цього способу слід відзначити: 1) високі гнучкість керування параметрами електронного потоку та сумісність з технологіями мікроелектроніки й інтегральної оптики; 2) екологічна чистота; 3) рафінування та спрямоване модифікування поверхневого шару оптичного матеріалу за коефіцієнтом заломлення, мікротвердістю, хімічним складом шляхом термоелектричного впливу на дефектний шар; 4) кероване розчинення дефектного шару оптичного скла під локальним впливом температур 1000...1300 °С, які створені електронним потоком та утворення при охолодженні монолітної бездефектної структури ПШ глибиною до 160 мкм і зменшеним нанорельєфом поверхні до значень $R_z = 1,5...3,5$ нм.

Для розширення вже досягнутих технологічних можливостей [13–18] та подальшого використання цього способу у прецизійній обробці матеріалів з різною електропровідністю (провідників, напівпровідників та діелектриків), одним з головних завдань, на рівні з технологічними умовами, постає завдання фор-

мування стабільного стрічкового потоку електронів із заданими потужністю та формою розподілу енергії.

Мета роботи: визначення взаємозв'язку параметрів стрічкового електронного потоку з конструктивними особливостями електронної гармати та формування електронної стрічки для ефективного впливу на матеріали з різною електропровідністю.

Обладнання, матеріали та методика досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на модернізованій вакуумній установці УВН-74ПЗ, яка містить печі нагріву та охолодження, арматуру для утримання та руху об'єктів обробки, електронно-променевою гарматою Пірса з дротяним вольфрамовим катодом (діаметр катоду 0,4 мм, довжина дроту 90 мм). При розжарюванні катод випромінює електрони, які прискорюються електростатичним полем, проходять через щілину анода (довжина щілини дорівнює 80 мм, ширина може змінюватися у межах 1...4 мм) і спрямовуються на зразок. Електричні характеристики гармати: струм катода $I_k = 10...50 \text{ A} \pm 15\%$; діапазон прискорювальних напруг – $U_{прис} = 0...10 \text{ кВ} \pm 2...3\%$; діапазон струму потоку $I_{пот} = 50...400 \text{ mA} \pm 1...5\%$. Залишковий тиск у вакуумній камері після відкачки повітря і при роботі гармати становить $p_0 = (3...5) \cdot 10^{-4}$ Па. Відстань від електронної гармати до об'єкта обробки може змінюватися в необхідних межах $H = 10...60 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. Прискорювальна напруга до 10 кВ забезпечує енергію електронам, якої достатньо для розігріву поверхні матеріалу у вакуумі до температур 800...1500 °С. Як матеріал обробки використано пластини силікатного технічного скла товщиною 2 мм (фотопластини без емульсії), пластини товщиною 2 мм зі сталі 12Х18Н10Т та сітка зі сталі Х18Н10Т (крок комірки 60 мкм, діаметр дроту сітки 60 мкм). Об'єкт обробки

може переміщуватися під гарматою зі швидкістю $v_{\text{пот}} = 0 \dots 20$ см/с. Схеми обробки поверхонь об'єктів стрічковим електронним потоком представлена в [9, 13, 14].

Якість мікрообробки визначається станом технологічного середовища (залишковим тиском, температурою нагріву та охолодження виробів), досконалістю інструмента обробки – електронної гармати та електронного потоку, а також обладнанням і програмним продуктом, які забезпечують гнучкі та якісні режими мікрообробки. Поверхня матеріалу оплавляється електронним потоком на глибину до 200 мкм, а охолодження є кінцевою стадією формування модифікованого ПШП.

Дослідження поверхні катода, залишкового нанорельєфу поверхонь скла після електронно-променевої мікрообробки проводилося за допомогою атомно-силового мікроскопа (АСМ) «NT-206V» (виробник: ТДВ «Микротестмашины», Білорусь) за відповідними методиками з використанням кремнієвих зондів «Ultrasharp CSC12» (виробник: «Mikromasch», Німеччина). До складу прилада входять система мікропозиціонування і вбудований оптичний довгофокусуєчий

мікроскоп Logitech (виробник: «Logitech Inc», США), які дозволяють встановлювати вихідні координати на поверхні зразка при повторному дослідженні з точністю ± 1 мкм.

Після впливу електронів, при відносній нерухомотості гармати і об'єкта обробки, на поверхні матеріалів спостерігалися зони від термічного впливу (ЗТВ) у вигляді смуг, які досліджувалися за геометрією, кольором і слідами плавлення.

Експериментальна схема для визначення характеристик гармати наведена на рис. 1.

Результати експерименту та їх обговорення

Джерелом випромінювання електронів є дротяний вольфрамовий катод діаметром 0,5 мм. До основних експлуатаційних параметрів катода відносимо: струм емісії I_e , струм розігріву катода I_k , термін служби t_k , точність юстування та ефективність катода η [28].

Високі температури катода ($T = 2100 \dots 2200$ °C) та періодичний контакт з атмосферою призводить до ерозії його поверхні (рис. 2).

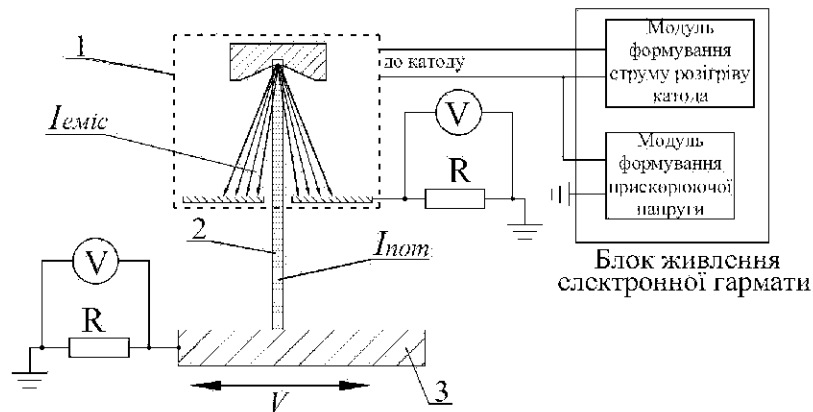


Рис. 1. Схема зондування електронного потоку стрічкової форми [26, 27]:

1 – модуль електронної гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – рухома платформа;
 $I_{\text{пот}}$ – струм електронного потоку; $I_{\text{еміс}}$ – струм емісії катода

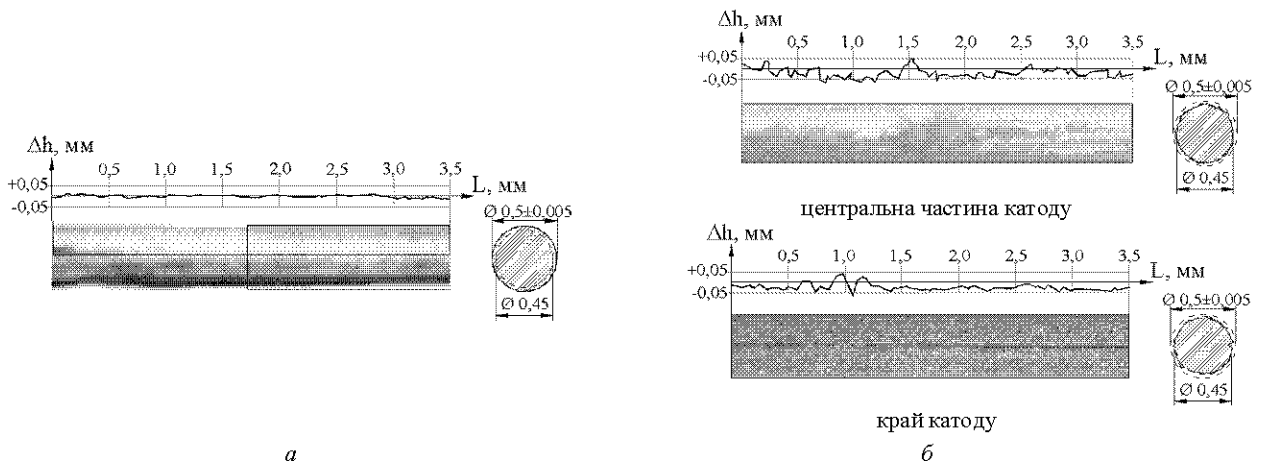


Рис. 2. Поверхні дотяного вольфрамового катода (діаметр $D = 0,5$ мм; довжина робочої частини $L = 60$ мм; струм розігріву $I_f = 30$ А; тиск $p_0 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Па) до експлуатації (а) та після експлуатації (б) протягом 90 годин (78 циклів відкачування) $\times 16$, профілограма та зображення отримані за допомогою АСМ «NT-206V»

Ми визначили термін ефективної експлуатації д्रो-тяних вольфрамових катодів марки ВА-1 діаметром 0,1...0,6 мм в умовах технології електронно-промене-вої мікрообробки ПШП оптичних матеріалів, який становить 40...120 годин і обумовлений фізичним станом поверхні катода і визначається робочою температурою, струмом емісії, діаметром дроту, електричними харак-теристиками навантаження катода та часом його кон-такту з повітрям при технологічній розгерметизації вакуумної камери. Ефективною експлуатацією катода визначено період протягом якого його діаметр змен-шується не більше ніж на 10%. Зменшення діаметра катода пов'язане, в першу чергу, з нерівномірним ви-паровуванням матеріалу у зв'язку з непостійністю тем-ператури уздовж дроту. Ефективність катода визначає-мо, як відношення струму емісії катода до потужності, яку витрачено на його розігрів.

Характерні сліди термічної дії електронної стрічки на металевій сітці представлені на рис. 3. Більш світлі зони відповідають більшій інтенсивності дії електронного потоку. Відхилення ширини електронного потоку по довжині, відносно розміру його центральної части-ни, для відстаней $H = 10...40$ мм не перевищує 2...5%, що дозволяє класифікувати електронний потік на по-верхні виробу як стрічку. Темна смужка в середині зони дії електронного потоку b' пояснюється наявністю двох максимумів інтенсивності дії потоку електронів, що характерно для використаної електронно-оптичної системи і підтверджено теоретичними розрахунками [29, 30] та експериментально [26, 27].

Аналогічні результати з термічного впливу потоку отримані і на металевій (12X18H10T) пластині, рис. 4.

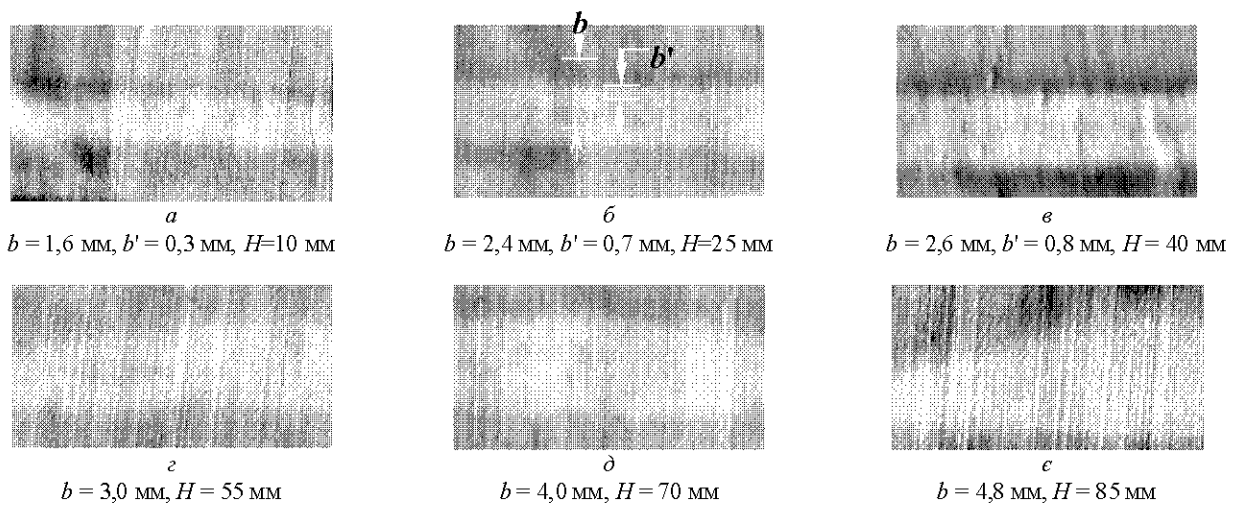


Рис. 3. Зовнішній вигляд зон термічного впливу на поверхні сітки зі сталі 12X18H10T на відстанях H від об'єкту дії до електронно-променевої гармати $\times 5$

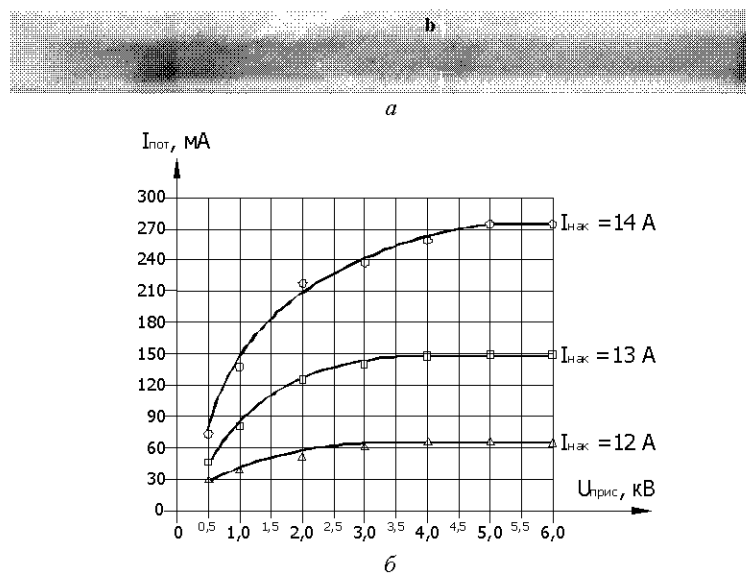


Рис. 4. Характерний вигляд ЗТВ на поверхні пластини зі сталі 12X18H10T (а) від дії електронного потоку (масштаб 10:1) та залежність струму електронного потоку $I_{ном}$ від прискорюючої напруги $U_{прис.}$ (б). Ширина щілини анода $b_a = 2,0$ мм. Ширина електронного потоку $b = 2,4$ мм

Зовнішній вигляд поверхні фотопластини після дії потоку електронів представлений на рис. 5.

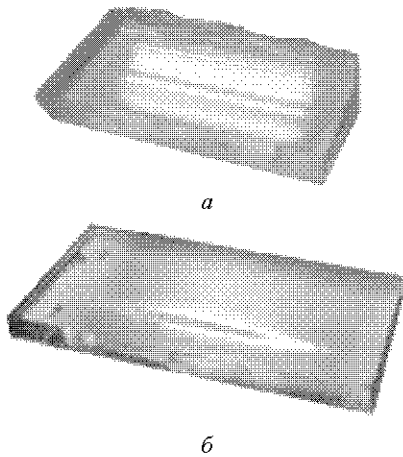


Рис. 5. Зовнішній вигляд поверхні фотопластини у косовідбиваючому світлі після дії електронного потоку :
(а) – сканування по поверхні сформованим потоком;
(б) – слід від нерухомого потоку ($T_0 = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $U_{np} = 4...5\text{ кВ}$, $I_{nom} = 100\text{ мА}$), масштаб 1:1.

Експериментальна і розрахункова залежність ширини ЗТВ b , центральної частини ЗТВ b' і коефіцієнта зосередженості k_e від відстані до об'єкту (металева стрічка) дії $H_{обр}$ наведені на рис. 6.

Апроксимуючи експериментально отриману залежність ширини ЗТВ і центральної частини ЗТВ при відстані об'єкту обробки від електронно-променевої гармати $H_{обр}$ методом найменших квадратів, отримаємо наступні рівняння апроксимуючої кривої: $b(H_{обр}) = a_1 H_{обр} + a_2 H_{обр}^2$, $b'(H_{обр}) = a_3 H_{обр} + a_4 H_{обр}^2$.

Використовуючи отриману залежність $b(H_{обр})$ і відому формулу $k_e = (2m)^{-1}$, де m – напівширина ЗТВ ($m = \frac{1}{2}b$), отримаємо залежність коефіцієнта зосередженості електронного потоку k_e від відстані до об'єкту дії $H_{обр}$: $k_e(H_{обр}) = a_1 H_{обр} + a_2 H_{обр}^2$.

Таблиця 1 – Приклад зміни ширини та форми електронного потоку при переході з поверхні металевої пластики на поверхню скла

Умови впливу електронного потоку	Форма електронного потоку	Ширина електронного потоку b , мм	Густина струму максимальна j_{max} , мА/см ²
На металеву пластину $H_{обр} = 20\text{ мм}$, $U_{np} = 3\text{ кВ}$, $I_x = 15\text{ А}$, $I_{nom} = 45\text{ мА}$		2	67
На поверхню скла $H_{обр} = 20\text{ мм}$, $U_{np} = 3\text{ кВ}$, $I_x = 15\text{ А}$, $I_{nom} = 45\text{ мА}$, $T = 800\text{ К}$		3,5	41

Результати, які отримані за цією методикою, добре узгоджуються з даними [28] для електронних пучків середніх енергій з круглою формою перерізу.

При переході електронного потоку з металу на скло ширина стрічки змінюється, що підтверджується зондуванням потоку [27] та враховується при виборі режимів мікрообробки, табл. 1. Зміна ширини електронного потоку пов'язана з дією негативного поверхневого заряду, що накопичується на діелектричній поверхні.

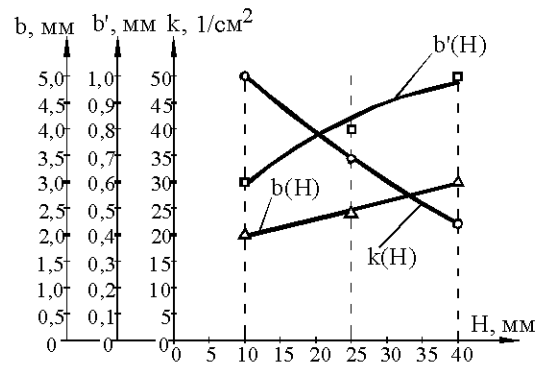


Рис. 6. Залежності ширини ЗТВ b , центральної частини ЗТВ b' і коефіцієнта зосередженості електронного потоку k_e від відстані до об'єкту дії електронно-променевої гармати $H_{обр}$

Висновки

1. Розроблена схема дослідження електронного потоку стрічкової форми дозволила визначити термін ефективної експлуатації дрютяних вольфрамових катодів марки ВА-1 діаметром 0,1...0,6 мм в умовах технології електронно-променевої мікрообробки ПШ оптичних матеріалів, який становить 40...120 годин. Ефективною експлуатацією катода визначено період, на протязі якого його діаметр зменшується не більше ніж на 10%.

2. Досліджені режими роботи ЕПГ Пірса в залежності від її енергетичних характеристик з допомогою

зон термічного впливу на металевій поверхні (сталь 12X18H10T) та на діелектричній поверхні (скло) дозволили встановити залежність коефіцієнта зосередженості електронного потоку від відстані від анода гармати до оброблюваної поверхні.

3. Досліджено вплив на ширину та форму електронного потоку діелектричної поверхні (скляні фотопластини) та показано розфокушуючу дію поверхневого заряду на діелектрику.

Список літератури

1. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / [Б. Е. Патоң, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренко и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 3–7.
2. Коваленко В.С. Технология и оборудование для электрофизических и электрохимических методов обработки / Коваленко В.С. – К. : Вища школа, 1983. – 176 с.
3. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов / Под ред. Дж. Р. Брюэра. – М. : Радио и связь, 1984. – 332 с.
4. Котельников Д. И. Системные проблемы ЭОМ микрооптики / Д. И. Котельников, Д. Н. Петрига // Электронная обработка материалов. – 2002/ – № 3. – С. 3–8.
5. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справ-к / [Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Коко-ра А. Н.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Дудко Г. В. Проблема формирования особо чистых и бездефектных поверхностей / Г. В. Дудко, В. Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. – Ленинград. – 1985. – С. 13–16.
7. Исследование электронно-лучевых процессов в создании базовых технологий ЭЛЭФП / [Г. В. Дудко, С. К. Кулов, Ю. А. Розе, Н. Г. Максимова] // Электронная промышленность. – 1991. – Вып. 1. – С. 41–45.
8. Борисов Н. А. Полировка германия бегущим плоским электронным лучем / Н. А. Борисов, Г. В. Дудко // Физико-технические вопросы кибернетики АН УССР. – Киев, 1971. – С. 3–22.
9. Борисов Н.А. Полировка кремниевых пластин электронным лучем / Н.А. Борисов, Г.В. Дудко // Электронная обработка материалов. – 1969. – №5(29). – С. 18–21.
10. Kanashevich G.V. Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form / G.V.Kanashevich // The 7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition, Beijing, China, 25–29 Sept. 2005. – 7 p.
11. Канашевич Г. В. Превращения в поверхностном слое оптического силикатного стекла и фотопластин из силикатного стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Г. В. Канашевич // Нано- и микросистемная техника. Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал (Россия). Рубрика : Материаловедческие и технологические основы МНСТ. – 2008. – № 10. – С. 28–30.
12. Kanashevich G.V. Superficial micro- and nanostructures in optical glass, which were formed by band electronic stream / G.V.Kanashevich, L.I.Konopalceva // Materials of International meeting «Clusters and Nanostructured materials (CNM'2006)», Uzhgorod, 'Karpaty', Ukraine, October 9-12, 2006, P2-8, P.XXI.
13. Канашевич Г. В. Электронная обработка оптических материалов / Г. В. Канашевич, Д. И. Котельников // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 2. – С. 12–16.
14. Канашевич Г. В. Низкоэнергетическая электронно-лучевая обработка поверхности стекла и возможности ее использования в технологии ИО / Г. В. Канашевич, Л. И. Конопальцева, В. А. Ващенко. — Деп. в ГНТБ Украины 26.07.93. – № 1616-УК93. – 10 с.
15. А.С. 1798995 СССР Способ изготовления канальных оптических волноводов / Д. И. Котельников, Г. В. Канашевич, Г. Н. Дубровская. – 1991. – № 12.
16. Пат. 19762 Україна, МКИ С03С15/00. Спосіб одержання матованих рисунків на поверхні скла / Г.М. Дубровська, Т.І. Веретільник, Г.В. Канашевич ; опубл. 25.12.97.
17. Пат. 3384, МКИ С03С23/00. Спосіб отримання ювелірних поверхонь на склі / Г. В. Канашевич ; опубл. 15.11.04, Бюл. № 11.
18. Пат. 4178 Україна, МКИ С03В29/00; С03С23/00. Спосіб обробки скла / Г. В. Канашевич ; заявл. 01.11.04 ; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1.
19. Бондаренко М.О. Оптимізація параметрів стрічкового електронного потоку за допомогою зон термічного впливу / М. О. Бондаренко, Г. В. Канашевич, В. А. Ващенко // Тези доповідей першої Міжнародної НТК «Машинобудування та металообробка – 2003». – Кіровоград, 17–19 квітня 2003. – С. 15–16.
20. Котельников Д. И. Изменение свойств оптического стекла после электронно-лучевой обработки / Д. И. Котельников, Г. В. Канашевич, Г. Н. Дубровская // Тез. докл. II Всесоюзной конференции «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». Уральское отделение академии наук СССР, институт электрофизики, г. Свердловск, 1991. – С. 86–88.
21. Влияние режимов электронно-лучевой обработки на свойства поверхностных слоев оптических стекол / [В. А. Ващенко, Г. В. Канашевич, П. П. Дмитренко и др.] // Вісник Сумського державного університету. – 2002. – № 5(38)–6(39). – С. 99–105.
22. Автоматизація переміщень заготовок при формуванні функціональних шарів в оптичних матеріалах електронною обробкою / [Г. В. Канашевич, М. П. Рудь, В. А. Ващенко та ін.] // Радиоелектроника и информатика. – 2004. – № 4. – С. 54–58.
23. Исследования по зондированию ленточного электронного луча / [В. А. Ващенко, Г. В. Канашевич, П. П. Дмитренко, Д. М. Краснов] // Вісник ЧІТІ. – 2001. – № 1. – С. 43–49.
24. Взаимосвязь структурных и фазовых превращений с адгезионными свойствами пленок на поверхности оптического стекла после электронно-лучевой модификации / [Г. Н. Дубровская, С. В. Поздеев, Г. В. Канашевич и др.] // Поверхность, РАН, Москва, №12. – 2001. – С. 33–37.
25. Канашевич Г. В. Применение АСМ в исследовании поверхностей и функциональных слоев в оптических материалах, полученных методом электронной микрообработки / Г. В. Канашевич // Сб. докладов 6-го Белорусского семинара «БелСЗМ», Минск, 12–15 октября 2004. – С. 42–44.

26. The express-diagnostics of band electronic stream / [M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu.I. Kovalenko etc.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – №3. – 2005. – С. 49–51.
27. Рудь М. П. Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку / М. П. Рудь // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск – 2007. – С. 148–150.
28. Кацман Ю. А. Электронные лампы высоких и низких частот / Ю. А. Кацман. – [2-е изд.]. – М. : Высшая школа. – 1968. – 375 с.
29. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков / Пирс Дж. Р. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 216 с.
30. Моделювання низькоенергетичної стрічкової електронної гармати Пірса методом кінцевих елементів / [М. П. Рудь, Г. В. Канашичев, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко] // Наукові праці : науково-методичний журнал. – Вип. 161. – Т. 173. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – С. 150–155.

Одержано 09.10.2012

Рудь М.П., Бондаренко М.А., Коваленко Ю.И., Яценко И.В., Губарь Е.Я., Канашичев Г.В. Исследование и формирование ленточного электронного потока для микрообработки поверхностей материалов

Разработана методика исследования электронного потока ленточной формы, которая состоит из частей зондирования электронного потока и исследования зон термического влияния на металлической и стеклянной поверхностях. Исследованы зависимости пространственно-энергетических характеристик ленточного электронного потока от технологических параметров.

Ключевые слова: электронно-лучевая микрообработка, зондирование электронного потока, взаимодействие электронного потока с поверхностью.

Rud M., Bondarenko M., Kovalenko Y., Yatsenko L, Gubar E., Kanashevich G. Research and forming of ribbon electron beam for micromachining of material surfaces

Research methodology of band form electronic stream research that consists of electronic stream probe parts and research of the thermal affected zones on metallic and glass surfaces was invented. The dependence of the spatial and energy characteristics of band electron beam from technological parameters was investigated.

Key words: electron beam microprocessing, diagnostics of electron beam, interaction of the electron beam with the surface.