

УДК 681.51:621.9.048

Г.В. Канашевич

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси

## ФІЗИЧНІ ЯВИЩА І МЕХАНІЗМИ, ЗА ЯКИМИ ЗМІНЮЄТЬСЯ ПОВЕРХНЯ І ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР ОПТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ВІД ДІЇ ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ

В статті представлено основні фізичні явища за якими змінюється поверхня і поверхневий шар оптичного і технічного скла при дії низькоенергетичного ( $E \leq 10$  кеВ) електронного потоку. Визначено три стадії термічної та дві стадії електричної дії електронного потоку на оптичний матеріал. Представлено опис фізичних процесів, які відбуваються на кожній виділеній стадії. Наведено приклади впливу електронного променя на оптичне скло марок К-8 та БК-10, а також фотопластин. Представлено схему основних явищ та механізмів, які супроводжують перетворення ПШ оптичного і технічного скла від термоелектричного впливу електронного потоку.

**Ключові слова:** електронний потік, фізичні явища, електронно-променева обробка, оптичне скло, поверхневий шар, стадії термічної дії електронного потоку, стадії електричної дії електронного потоку.

### Вступ

**Актуальність.** В раніше опублікованих автором роботах [1 – 4] та у роботах інших авторів [5 – 8] показана ефективність впливу низькоенергетичного ( $E \leq 10$  кеВ) стрічкового електронного потоку у зменшенні зовнішнього нанорельєфу, усуненні дефектного та тріщинувидного шарів у оптичному склі проплавленням його поверхневого шару (ПШ) на глибину до 10 мкм. Термоелектричною дією електронів можна змінити мікроструктуру ПШ скла, хімічний склад та рафінувати його від домішок, що залишаються від промислового шліфування і полірування. За цими показниками електронно-променева обробка (ЕПО) може вигідно використовуватися для створення ПШ з новими властивостями [8 – 10].

Проте, переведення ЕПО у нову якість, забезпечивши їй високу, на рівні субмікронних технологій прецизійність, є непростю задачею, вирішення якої пов'язане з визначенням фізичних явищ і механізмів, які супроводжують сам процес обробки та за якими формується нова поверхня і ПШ.

**Мета роботи.** Визначення фізичних явищ і механізмів за якими формується поверхневий шар з новими властивостями у оптичному склі в результаті електронно-променевої обробки.

### Основний розділ

**Постановка експерименту.** Для електронно-променевої обробки використовувалися плоскопаралельні пластини з оптичного скла К8 та БК10 круглої форми (діаметром 20 мм і товщиною 6мм) та прямокутні пластини (розміром 70×14×6мм), поверхні яких формувалися у промислових умовах методом глибокого шліфування і полірування (ГШП) та фотопластини без емульсії, поверхня яких формува-

лася полум'яним поліруванням. Електронно-променева установка побудована на базі вакуумної установки УВН-74. В якості інструмента для поверхневої обробки пластин використовувався електронний потік стрічкової форми, який генерувався електронно-променевою гарматою Пірса. Параметри електронної обробки:  $P_{\text{пит}} = 10^2 \dots 5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{обр}} = 1,5 \dots 4,5$  см/с; температура попереднього нагріву скла  $T_{\text{нагр}} = 250 \dots 490$  °С. Ширина електронної стрічки  $b = 1,5 \dots 2,5$  мм. Для виявлення структурних особливостей ПШ скла після електронно-променевого впливу використане вибіркове травлення поверхні скла в розчині HF+гліцерин у співвідношенні 1 : 9. Нанорельєф поверхонь пластин визначався за допомогою атомно-силового мікроскопу NT-206V. Глибина проплавленого шару визначалася за допомогою спеціально розроблених методик на електронному мікроскопі PEM-100У, залишкові напруження в пластинах визначалися на приладі ПКС-250.

**Обговорення результатів експерименту.** Процес обробки скла, з енергією електронів  $E \leq 10$  кеВ, відноситься до високотемпературних процесів, який реалізується за відомим механізмом перетворення кінетичної енергії електронів у теплову енергію за рахунок розсіяння та поглинання електронів ПШ. Оскільки скло відноситься до матеріалів з низькою теплопровідністю, тепла енергія локалізується у ПШ і градієнт температур у ПШ досягає значень  $10^2 \dots 10^3$  °С/мм; а температура на поверхні досягає значень 1100...1300°С при температурі попереднього нагріву матеріалу  $T_0 = 380 \dots 800$  °С [8].

Електронно-променевий метод обробки скла ефективно реалізується на двох стадіях теплової дії (СТД). І СТД передбачає відсутність рідкої фази в поверхні матеріалу від впливу електронів, II СТД – утворення рідкої фази у ПШ матеріалу під елект-

ронною стрічкою. Якщо нарощувати потужність потоку і зменшувати час його дії, настає процес

кипіння, який супроводжується інтенсивним випаровуванням матеріалу поверхні [9], рис. 1.

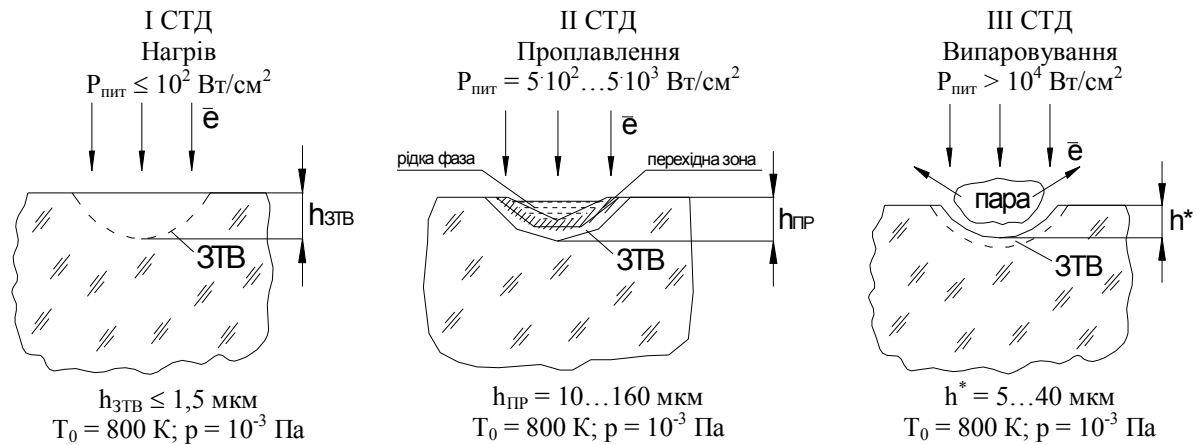


Рис. 1. Стадії термічного впливу низькоенергетичного електронного потоку на оптичний матеріал у вакуумі:  $h_{ЗТВ}$  – зона термічного впливу у мкм;  $p$  – рівень атмосферного тиску у вакуумній камері у Па;  $h_{ЗТВ}$  – глибина зони термічного впливу у мкм;  $h_{ПР}$  – глибина проплавлення;  $h^*$  – зниження рівня поверхні від випаровування у мкм

Конкуруючим процесом щодо термічної дії є процес електричної дії потоку, який також можна охарактеризувати послідовними стадіями електричної дії (СЕД). І СЕД призводить до накопичення електричного заряду  $qп$  в ПШ матеріалу, величину якого можна визначити як:  $qп = qe \cdot S \cdot hg \cdot Pe$ , де  $qe$  – заряд, який переноситься електронами на поверхню і в ПШ матеріалу;  $hg$  – глибина дефектного шару;  $S$  – площа поверхні матеріалу, яка перекривається електронним потоком;  $Pe$  – відносна кількість електронів, яка осіла в одиниці об'єму дефектного шару.

В результаті проникнення первинних електронів з фронту потоку у матеріал, температура його ПШ збільшується до 900 °С, що зменшує електричний опір поверхні до 18.103 Ом.м. При цьому накопичений на поверхні і в ПШ (в межах дефектного шару) заряд буде зменшуватися за рахунок розтікання вздовж поверхні у напрямку найменшого опору ( $R_{пот} \gg R_p$ , де  $R_{пот}$  – електричний опір електронного потоку;  $R_p$  – електричний опір дефектного шару, або, опір розтікання). Здатність матеріалу відводити заряд визначаємо опором розтікання:  $R_p = \rho / 2h$  і опором потоку:  $R_{пот} = U_{пот} / I_{пот}$ .

Умова  $R_p \ll R_{пот}$  еквівалентна умові  $\rho V \ll 4RU_{пот} / I_{пот}$ , що у випадку традиційної електронної літографії дає  $\rho V \ll 109$  Ом·см. Тобто, якщо матеріал пластини має питомий опір  $\rho V \ll 109$  Ом·см, то заряд в ній практично не накопичується і його вплив на електронний потік можна не враховувати.

Об'ємний заряд у ПШ буде накопичуватись при умові виконання нерівності:  $R_{пот} \ll R_p$ , де  $R_{пот}$  – електричний опір електронного потоку;  $R_p$  – електричний опір поверхневого дефектного шару (опір розтікання).

ІІ СЕД можна характеризувати з моменту, коли зменшення електричного опору матеріалу до (17,8...7,6) · 10<sup>2</sup> Ом.м забезпечує умови для ефективної взаємодії іншої частини потоку, а саме вершини гауса з поверхнею матеріалу. При цьому параметри обробки ( $R_{пит}$ ,  $to_{бр}$ ,  $ke$  – коефіцієнт зосередженості потоку) та теплофізичні характеристики матеріалу ( $a$ ,  $\lambda$ ) визначають характер розповсюдження тепла вглиб матеріалу. На ІІ СТД зовнішнє електричне поле призводить до переорієнтації кремній-кисневого каркасу у рідкій фазі скла з утворенням ламелярної структури, яка виявляється при травленні зразка у розчинах HF+гліцерин (1:9) на протязі 10...12 хвилин. Ламелі розміром в десятки долі мікрометрів фіксують своє положення при охолодженні у напрямку, за яким діяло електричне поле. Локальні скупчення іонів-модифікаторів ( $Na^+$ ,  $K^+$ ) можуть призвести до прояву пінч-ефекту, в результаті чого на поверхні матеріалу можуть утворитися кратери з діаметром у декілька мікрометрів, які погіршують якісні характеристики поверхні, рис. 2.

Разом з тим, поверхню силікатного скла активно залишає кисень (табл. 1), характерний розподіл інтенсивності рентгенівського випромінювання якого представлений на рис. 3.

Слабкозв'язані іони лужних металів підхоплюються зовнішнім електричним полем з поверхні матеріалу і виносяться у вакуум, а внутрішнє електричне поле ініціює дрейф іонів у матеріалі, який спрямований за лініями інтенсивності електричного поля. Експериментально встановлена нестійкість концентрації оксидів-модифікаторів ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $BaO$ ) в поверхні оптичного скла силікатної групи при дії електронів, табл. 1, табл. 2, що обумовлюється їх леткістю.

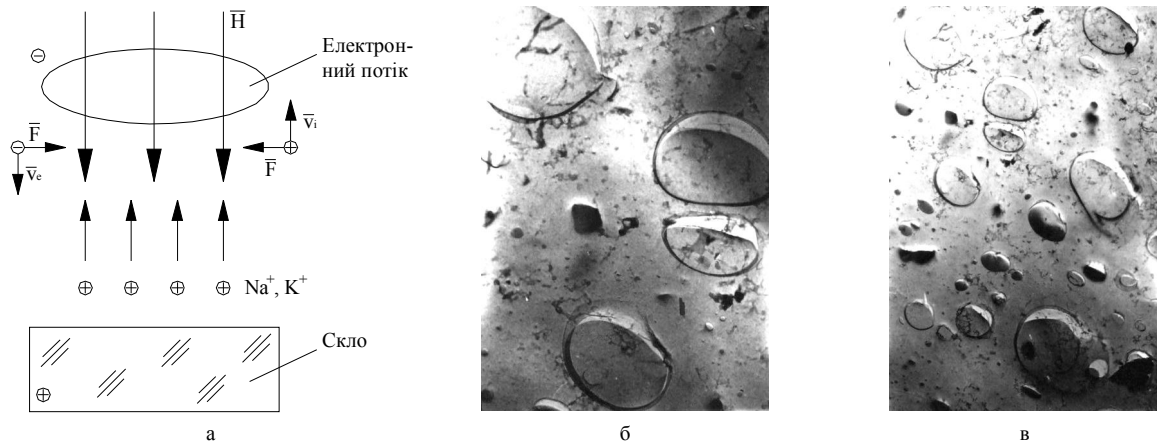


Рис. 2. Схема утворення пінч-ефекту від дії електронного потоку (а) та поверхня скла К8 з утвореними кратерами: зб.×25000 (б), зб.×12500 (в), ЭМ-200, Pt-C-репліка

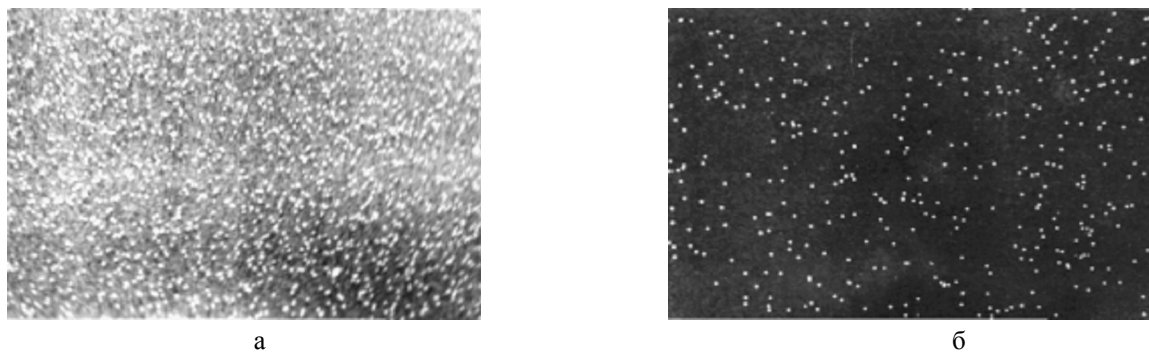


Рис.3. Характерний розподіл інтенсивності рентгенівського випромінювання кисню по поверхні скла К108 до (а) і після (б) електронного впливу, РЕМ-100У

Таблиця 1

Статистичні дані інтенсивності рентгенівського випромінювання елементів поверхневого шару оптичного скла К8 до і після електронно-променевої обробки

Інтенсивність, число імпульсів/с					
Поверхня після обробки механічним шліфуванням і поліруванням		Поверхня після нагрівання у вакуумі $p = 10^{-3}$ Па, $T = 800$ °К		Поверхня після електронної обробки $P_{пит} = 5 \cdot 10^2$ Вт/см <sup>2</sup> $V_{пот} = 2,5$ см/с	
Si <sub>К<math>\alpha</math></sub>	Na <sub>К<math>\alpha</math></sub>	Si <sub>К<math>\alpha</math></sub>	Na <sub>К<math>\alpha</math></sub>	Si <sub>К<math>\alpha</math></sub>	Na <sub>К<math>\alpha</math></sub>
6212	493	6225	465	6509	226
6200	476	6307	427	6215	246
6362	421	6281	406	6451	284
6178	451	6218	590	6293	240
6284	460	6332	595	6580	290

Кількісний аналіз окремих елементів поверхневого шару скла БК10 до і після мікробробки електрон-

ним потоком ( $P_{пит} = 5.102$  Вт/см<sup>2</sup>,  $V_{пот} = 2,5$  см/с) приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Зміна елементного складу в поверхні скла БК10 в результаті електронно-променевої обробки

	O <sub>2</sub>	Na	Si	K	Ba	Zn
Зразок до обробки електронним потоком (поверхня)	3,07	1,59	53,12	11,57	16,84	13,82
Після обробки електронним потоком (поверхня)	1,85	1,44	53,22	8,97	15,40	12,92

Утворення рідкої фази у ПШ, зменшення концентрації слабкоз'язаних елементів, леткість частки розплаву у вакуум призводить до зменшення рівня вихідної поверхні. При глибині проплавлення у 10...20 мкм ліквідується дефектний та тріщинуватий шари, силами поверхневого натягу формується новий нанорельєф поверхні величиною 1,3...3,5 нм. Якщо, глибина рідкої

фази ( $h_{пр}$ ) перевищить, як мінімум, у 3 рази глибину залягання тріщинуватого шару, то тріщинуватий шар буде повністю усунено. Важливою якісною характеристикою створеного ПШ без погіршення площинності поверхні є його глибина проплавлення  $h_{пр}$ , величина якої залежить від параметрів електронно-променевої обробки  $R_{пит}$ ,  $V_{пот}$ ,  $T_0$ , рис. 4.

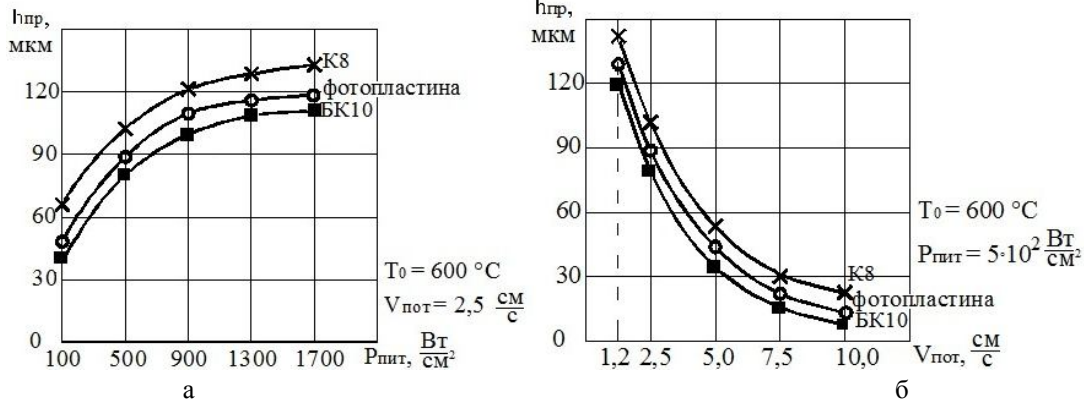
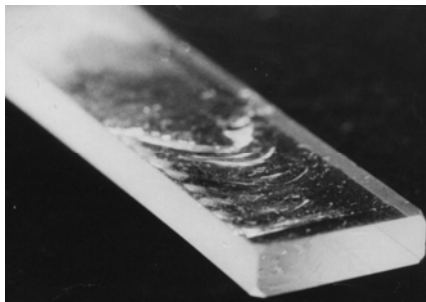


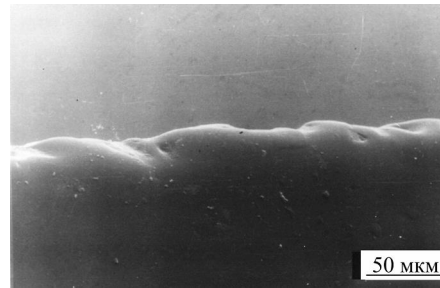
Рис. 4. Залежності глибини проплавлення  $h_{пр}$  ПШ скла К8, БК10 та фотопластин від параметрів обробки: а – питомої потужності потоку  $R_{пит}$ ; б – швидкості потоку  $V_{пот}$

Механічний тиск, який здійснює електронний потік на поверхню розплаву (при П СТД), призво-

дить до утворення хвиль, рис. 5, які при охолодженні утворюють мікронерівності.



а



б

Рис. 5. Зовнішній вигляд поверхні пластини зі скла К8 після електронно-променевої обробки та охолодження: а – загальний вигляд застиглої хвилі; б – фрагмент хвилі, зб.  $\times 1000$ ; РЭМ-100У

Процес утворення таких мікронерівностей залежить від ширини електронного потоку  $b$ . Чим вузьчий потік, тим ймовірність виникнення хвиль великої амплітуди та довжини зменшується до нуля. Разом з тим, тиск електронного потоку збуджує не тільки хвилі на поверхні, але й призводить до об'ємного руху рідкого шару за законами гідродинаміки. В результаті цього, при русі розплаву за електронним потоком, матеріал ПШ перемішується і рафінується, а поверхня формується силами поверхневого натягу. Наявність та величина хвиль визначаються шириною потоку, глибиною проплавлення та в'язкістю розтопленого матеріалу. У широкій ванні розплаву при постійному тиску електронного потоку будуть збуджуватись довгі хвилі, які при високій швидкості охолодження не встигають згаснути, а сили поверхневого натягу не встигають утворити рівну поверхню. Подібні результа-

ти отримані і на склі інших марок. Отримані експериментальним шляхом дані, досліджені явища та механізми, за якими змінюються властивості ПШ оптичного і технічного скла узагальнено у окрему схему, рис. 6.

## Висновки

За результатами роботи можна зробити наступні висновки:

Процесу утворення ПШ із зміненими властивостями на оптичному і технічному склі від дії електронного потоку передують два конкуруючих механізми: теплової та електричної дії. В результаті такої сукупної дії, підвищується температура поверхневого шару матеріалу до значень 1100...1300 $^\circ\text{C}$ , відбувається накопичення негативного заряду у ПШ та його стікання за напрямками мінімального електричного опору.

Як наслідок, змінюється в'язкість ПШ від твердого до рідинно-текучого стану, що супроводжується леткістю частки матеріалу у вакуум, поляризацією матеріалу ПШ, десорбцією слабкозв'язаних з ПШ йонів зокрема,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  стимульованою температурними і електричними полями електричним полем. Ступінь прояву цих явищ та дія механізмів обумовлена потужністю, питомою потужністю електронного потоку, шириною, або коефіцієнтом зосередженості потоку, та часу його дії на матеріал.

### Список літератури

1. Канашиевич Г.В. Превращения в поверхностном слое оптического стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Г.В. Канашиевич // Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Нано- и микросистемная техника» (Россия). Рубрика: Материаловедческие и технологические основы МНСТ. – 2008. – № 10. – С. 28-30.

2. Канашиевич Г.В. Термоэлектрический влияние низкоэнергетического электронного потока на дефектный шар оптического стекла / Г.В. Канашиевич // Вісник НТУУ «КПІ», Серія Приладобудування. – Вип. 45. – С. 123-130.

3. Канашиевич Г.В. Дослідження поверхневого шару оптического скла після електронно-променевої обробки / Г.В. Канашиевич // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – Вип. 32. – С. 237-244.

4. Канашиевич Г.В. Комплексна методика визначення якості поверхні та поверхневих шарів оптичних матеріалів модифікованих електронним променем / Г.В. Канашиевич // Вісник Черкаського державного технологічного університету: Черкаси, ЧДТУ. – 2013. – № 3. – С. 108-115.

5. Лохов Ю.Н. Зарядовые процессы при электронно-лучевой модификации поверхности оптических стекол / Ю.Н. Лохов, В.Г. Сапогин, Д.И. Чердиченко // Изв. ВУЗов, Естественные науки (Северо-Кавказский регион) 3 (1995): 91.

6. Лохов Ю.Н. Модификация поверхности оптических стекол при электронно-лучевой обработке в вакууме / Ю.Н. Лохов, А.А. Углов, Д.И. Чердиченко // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 1. – С. 56-62.

7. Применение финишной электронно-лучевой обработки для получения полупроводниковых и диэлектри-

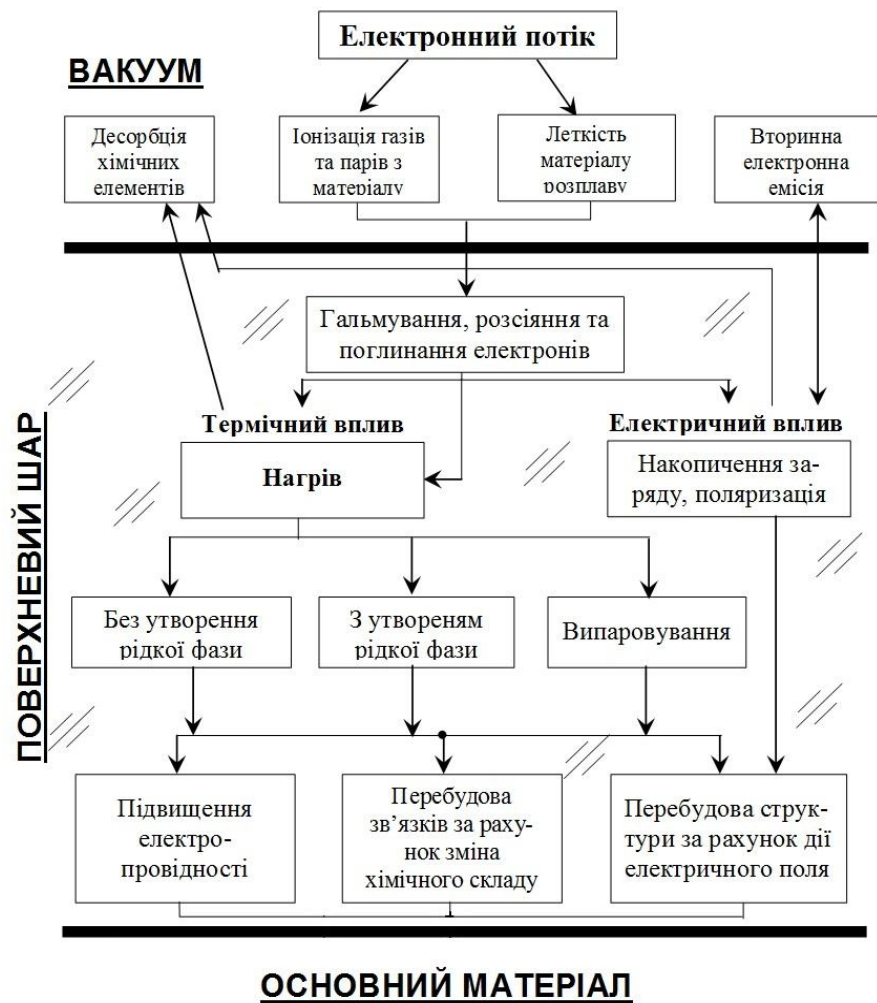


Рис. 6. Схема основних явищ та механізмів, які супроводжують перетворення ПШ оптичного скла від термоелектричного впливу електронного потоку

ческих подложек для микро- и нанотехнологий / О.А. Агеев, С.П. Авдеев, Д.И. Чердиченко, Е.Ю. Гусев // Известия ТРТУ. – 2006. № 9. – 116 с.

8. Спеціальні методи обробки оптичного скла (технологія, техніка, економіка): навч. посіб. за ред. Академіка ІАУ, професора Д.І. Котельникова / М.П. Бочок, М.П. Бутко, В.А. Ващенко, Г.В. Канашиевич, Д.І. Котельников. – Чернівці: ЧДТУ, 2002. – 152 с.

9. Г.В. Технологічні можливості електронно-променевої обробки оптичного скла / Г.В. Канашиевич // Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту: Черкаси, ЧІПІ, 1998. – № 3. – С. 48-55.

10. Канашиевич Г.В. Мікрообробка поверхонь пластин з оптичного скла низькоенергетичним стрічковим електронним потоком / Г.В. Канашиевич // Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах: мат-лы Четвертої щорічної Промислової конференції з міжнародним участком і виставки, 2–7 лютого 2004 г., п. Славське, Карпати. – К.: УІЦ «Наука, техніка, технологія», 2004. – С. 232-233.

Надійшла до редколегії 9.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.І. Осипенко, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И МЕХАНИЗМЫ, СОГЛАСНО КОТОРЫМ МЕНЯЕТСЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Г.В. Канашевич

*В статье представлены основные физические явления, согласно которым меняется поверхность и поверхностный слой оптического и технического стекла при воздействии низкоэнергетического ( $E \leq 10$  кэВ) электронного потока. Определены три стадии термического и две стадии электрического воздействия электронного потока на оптический материал. Представлено описание физических процессов, которые происходят на каждой выделенной стадии. Приведены примеры влияния электронного луча на оптическое стекло марок К-8 и БК-10, а также фотопластинок. Представлена схема основных явлений и механизмов, сопровождающих преобразования поверхностного слоя оптического и технического стекла от термоэлектрического воздействия электронного потока.*

**Ключевые слова:** электронный поток, физические явления, электронно-лучевая обработка, оптическое стекло, поверхностный слой, стадии термического воздействия электронного потока, стадии электрического воздействия электронного потока.

## PHYSICAL PHENOMENA AND MECHANISMS THAT CHANGE THE SURFACE AND SURFACE LAYER OF OPTICAL MATERIALS WHEN EXPOSED TO AN ELECTRON BEAM

G.V. Kanashevych

*The article presents the basic physical phenomena that affect the surface and the surface layer of the optical and technical glass when exposed to low-energy ( $E \leq 10$  keV) electron flux. We identified three stages in heat influence and two stages in electric influence of the electron beam on the optical material. The description of the physical processes that occur at each identified stage is provided. There given the examples how the electron beam affects the optical glass of category K-8, and BK-10 and photographic plates. The scheme of the basic phenomena and mechanisms that accompany the transformation of the surface layer of the optical and technical glass under the thermoelectric effect of the electron beam is provided.*

**Keywords:** an electron beam, physical phenomena, electron beam treatment, optical glass, the surface layer, stages of heat influence of the electron beam, stages of electric influence of the electron beam.