

Л.С. Монастирський, А.М. Брода, О.Й. Мельник

Вплив імпульсної дії на динаміку температурних полів в надгратці поруватого кремнію

Львівський національний університет ім. І. Франка,
вул. Драгоманова 50, м. Львів, 79005, Україна, E-mail: monastyr@wups.lviv.ua

Досліджено імпульсне поширення тепла в класичних надгратках поруватого кремнію. Неявним числовим методом розраховано температурні профілі в надгратці, створені дією імпульсних лазерних і електронних променів. Показано можливість ефективного застосування теплоізоляційних властивостей поруватого кремнію і використання температурних профілів для дослідження нелінійної термостимульованої дифузії в надграткових об'єктах.

Ключові слова: надгратка, поруватий кремній, термостимульована дифузія.

Стаття поступила до редакції 19.05.2003; прийнята до друку 23.10.2003.

I. Вступ

Поруватий кремній має коефіцієнт теплопровідності порядку 1,2 Вт/(м·К) [7], що в 120 раз менше від монокристалічного кремнію. Тобто поруватий кремній цікавий не тільки здатністю емітувати світло у видимій області, але й своїми теплоізоляційними властивостями. Вже розроблені методики по створенню локальних термоізоляційних точок на кремнієвій підкладці. В одній з робіт [3] показано, що поруватий кремній (por-Si) створений на полікристалічному кремнію має кращі ізоляційні характеристики ніж той, що створено на монокристалічному.

Нами поставлено задачу по покращенню термоізоляційних властивостей, тому було розглянуто теплоперенесення в класичних надгратках з por-Si з різними ступенями поруватості. Якість термоізоляції досліджували імпульсним поширенням тепла під дією лазерного і електронного опромінення, аналізуючи температурні розподіли, отримано числовими розрахунками.

II. Експериментальна частина

Дослідження теплопереносу здійснювали на періодичній структурі, яка складалася з багатьох шарів поруватого кремнію (por-Si) і підкладки кремнію (Si). Кожен шар por-Si має товщину 1 мкм і поруватість 25% або 50%. Нами розглянуто три варіанти класичних надграток (рис. 1). Товщина всієї структури складала $L = 10$ мкм, причому в перших

двох випадках є чотири шари por-Si з різною поруватістю, а шар монокристалічного кремнію складає 6 мкм. Відміна між першою і другою полягає у порядку розміщення різнопоруватих шарів. Структури типів 1 і 2 створено для вивчення теплоізоляційних властивостей.

Зразки класичних надграток були піддані імпульсному лазерному і електронному нагріву. Вихідна потужність лазерного і електронного опромінення складала $0,16$ мВт/мкм² і час імпульсної дії – $0,01$ мс. Однакові потужності і часи дії імпульсу взято для порівняльної характеристики температурних залежностей обох джерел нагріву.

Всі параметри для обрахунку температурних полів підібрано реальними. Імпульсний нагрів здійснювали з сторони шарів поруватого кремнію.

Поглинання теплової потужності лазера P здійснювалося за законом Бугера-Ламберта

$$P = P_0 \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

де x – координата по глибині структури, P_0 – потужність лазерного опромінення на поверхні надгратки, T – температура, $\alpha(T)$ – температурно залежний коефіцієнт поглинання.

$$\alpha(T) = \alpha_0 (h\nu - \Delta E_g(T))^s \quad (2)$$

$$\Delta E_g(T) = \Delta E_0 - \delta T, \quad (3)$$

де ΔE_0 – ширина забороненої зони por-Si при 0°C , $\delta = 4 \cdot 10^{-4}$ eV/K – температурний фактор для кремнію. Для нагріву ми використали рубіновий лазер ($\lambda = 0,694$)

Коефіцієнт поглинання $\alpha_0 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м⁻¹ в поруватому кремнію для рубінового лазера при 300 К. $S = 0,5..1,5$ кристалічний фактор неоднорідності структури. Коефіцієнт відбивання від

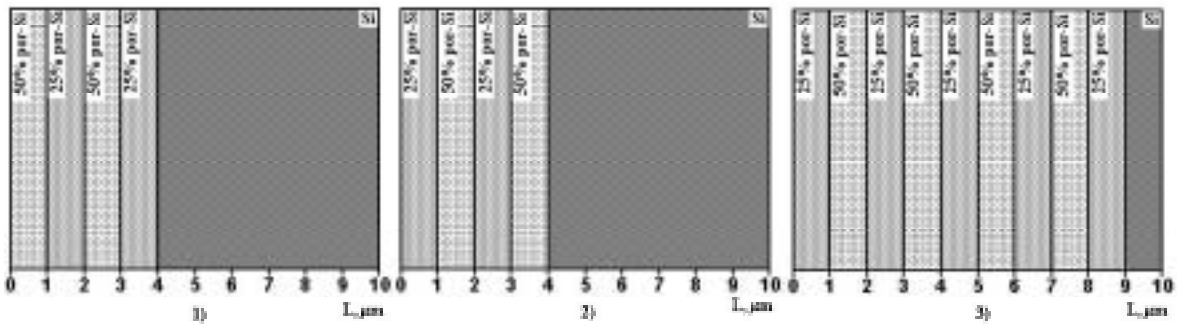


Рис. 1. Структури досліджуваних класичних надграток.

поверхні por-Si – 0,33.

При імпульсному електронному опроміненні теплова енергія P поглинається у вигляді:

$$P = P_0 \exp(-(x-d)^2/1,44r), \quad (4)$$

де P_0 – вихідна потужність електронного опромінення, r – півширина гаусіани ($r=0,9$), $d = (0,2..0,4)R_{B-T}$ – глибина розсіювання електронів в досліджуваній структурі (R_{B-T} – глибина Віддінгтона-Томсона).

III. Математичний опис і числовий розрахунок

Одновимірний випадок теплопереносу в класичній надгратці описується нелінійним нестационарним диференціальним рівнянням (5), яке було розв'язано нами числовим методом – методом три точкових різницевих схем [1,2]:

$$c(T)\rho(x)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + z, \quad (5)$$

де $c(T)$ – температурно залежна теплоємність, ρ – густина, $k(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, t – час, z – густина потужностей теплових джерел, $z = P(x, t) - Q$, де Q – виділення тепла у зовнішнє

середовище.

Для розв'язку рівняння (5) вводять граничні умови II-го роду (6), (7). Граничні умови вимагають, щоб у шарі структури температура була рівна температурі навколишнього середовища T_k при $x = L$ і були відсутні втрати енергії з поверхні ($x = 0$) за рахунок конвекції і перевипромінювання у навколишнє середовище.

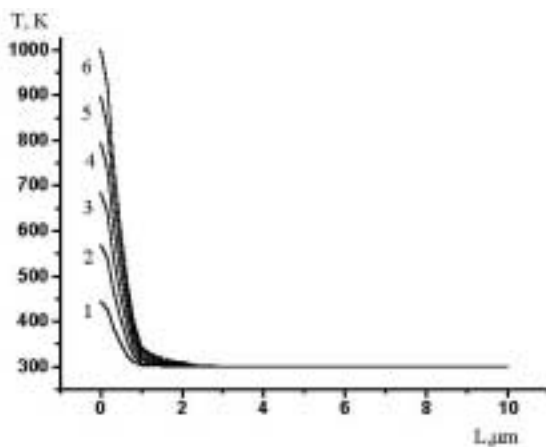
$$T(x,0) = T_k; \quad T(L, t) = T_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=L} = 0 \quad (7)$$

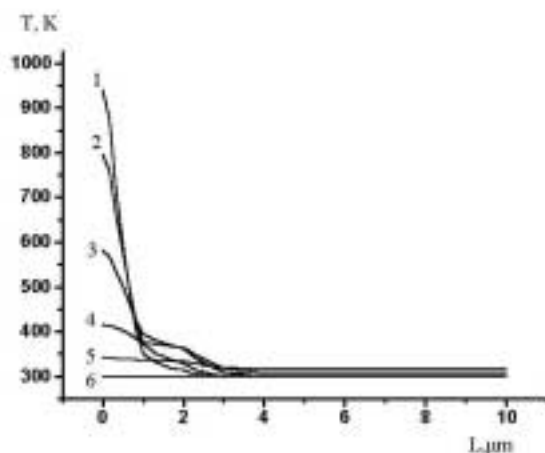
Розв'язавши рівняння (5), ми отримаємо температурні профілі нагріву і охолодження.

IV. Поширення тепла в надгратках поруватого кремнію

Сімейства кривих рис. 2а отримано для потужності $P_0 = 0,16$ мВт/мкм² при імпульсному лазерному нагріві надграткової структури типу 1, де на поверхні поруватість por-Si 50%. Криві нагрівання рис. 2а (1-6) мають монотонно спадний від координати характер, набуваючи екстремальних



а)



б)

Рис. 2. Профілі нагрівання а) і охолодження б) структури типу 1 під дією імпульсного лазерного випромінювання (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/мкм²) (індекси при температурних кривих показують їх порядковість по часу(за часом)).

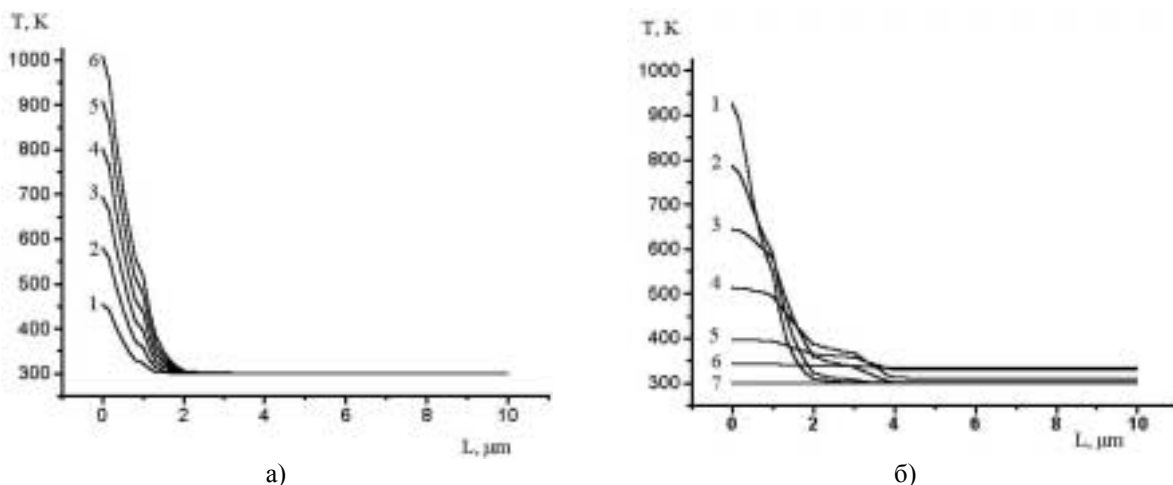


Рис. 3. Профілі нагрівання а) і охолодження б) структури типу 2 під дією імпульсного лазерного випромінювання (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/мкм²) (індекси при температурних кривих показують їх порядковість за часом).

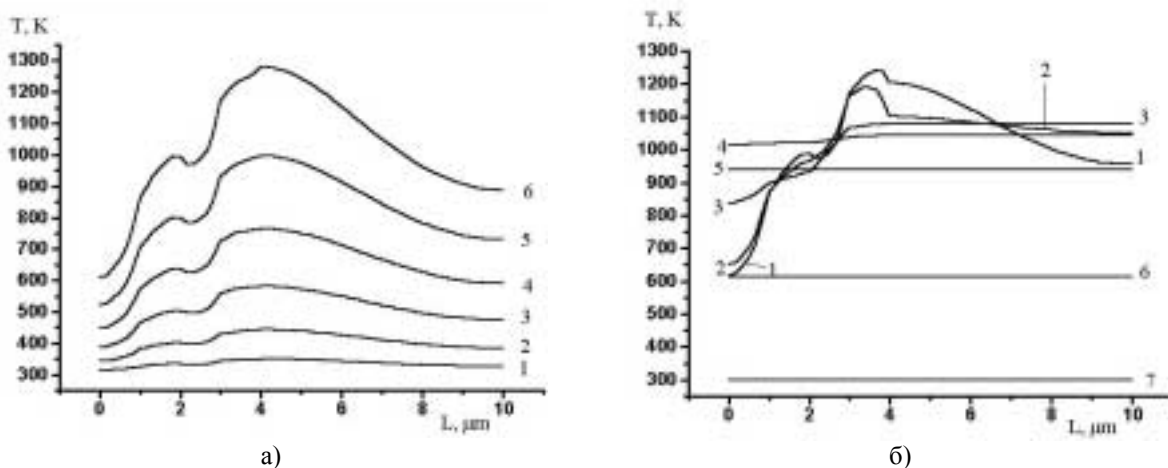


Рис. 4. Профілі нагрівання а) і охолодження б) структури типу 1 під дією імпульсного електронного бомбардування (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/мкм²) (індекси при температурних кривих показують їх порядковість за часом)

значень температури на поверхні зразка в момент закінчення дії імпульсу ($T \approx 1000$ K). Однак у цій структурі сильно прогрівається тільки шар області поруватого кремнію в 1 мкм, немає поширення тепла через 50%-поруватий шар роg-Si у 25%-ий. Це пов'язано з тим, що більш поруватий шар має вищу теплоємність і меншу теплопровідність. Тому спостерігається злом температурних профілів (3-6).

Криві температурного охолодження рис. 2б (1-7) характеризуються зломами в глибинах структури 2, 3, 4 мкм. Це пов'язано із зміною поруватості у тих точках. По величинах кутів зломів можна судити про швидкість поширення тепла в надгратці. Отже чим менший кут, тим швидше поширюється тепло. В 25%-поруватих шарах (1-2, 3-4 мкм) кути найменші. Шар монокристалічного кремнію проводить рівномірно (4-6 мкм). Крива 6 (рис. 2а) відповідає температурному балансу з навколишнім середовищем.

Лазерне опромінення структури 2 (рис. 3а) прогріває поверхню частину до 2 мкм, незважаючи, що після 25% роg-Si йде 50%. Однак міжшаровий

перехід на глибині 1 мкм все-таки спостерігається на всіх температурних кривих (рис. 3а, криві (1-6), хоча зміни швидкості теплопередачі не відбулося. Тоді 25% роg-Si шар відіграє роль поглинання потужності, а опромінювальною поверхнею структури 2 фактично стає 50%-поруватий шар роg-Si, тільки вихідна потужність є в 2 рази менша.

На кривих охолодження (рис. 3б) структури типу 2 яскравіше відображаються температурні зломи у точках міжшарового переходу. Однак, незважаючи на сильне поглинання тепла першим шаром, надгратка прогрівається більше ніж структура типу 1.

На рисунках 4, 5 зображено температурні розподіли для структур 1 і 2 відповідно при імпульсній обробці електронними променями вихідної потужності $0,16$ мВт/мкм² з часом дії імпульсу $0,01$ мс. Вище було показано, що електрони максимально розсіюються на глибині $d = (0,2 \dots 0,4)R_{B-T} = 3,5$ мкм, враховуючи порувату структуру надгратки. Криві нагріву обох структур схожі на гаусіанівський розподіл, якщо згладити їх неоднорідності в області класичних надграток

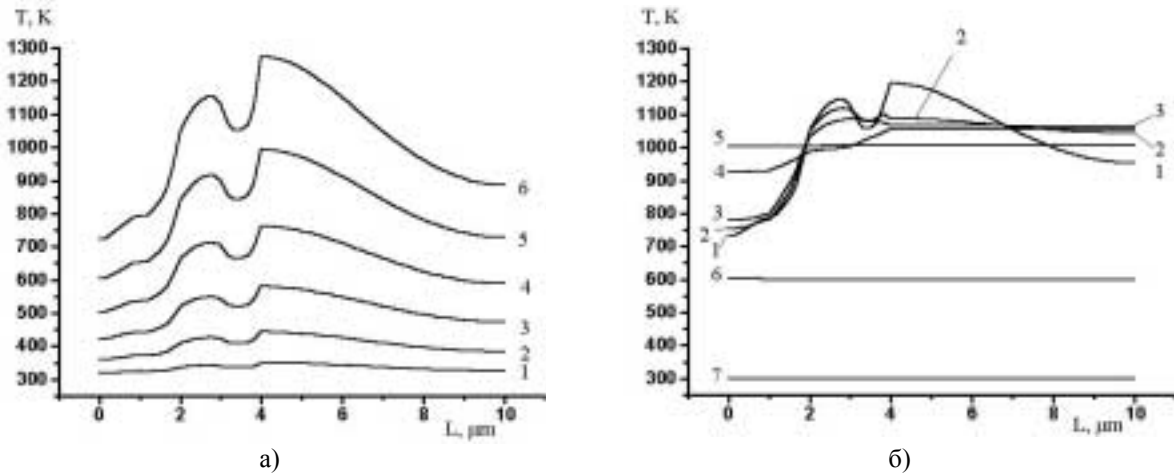


Рис. 5. Профілі нагрівання а) і охолодження б) структури типу 2 під дією імпульсного електронного бомбардування (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ мкВт/мкм²) (індекси при температурних кривих показують їх черговість за часом).

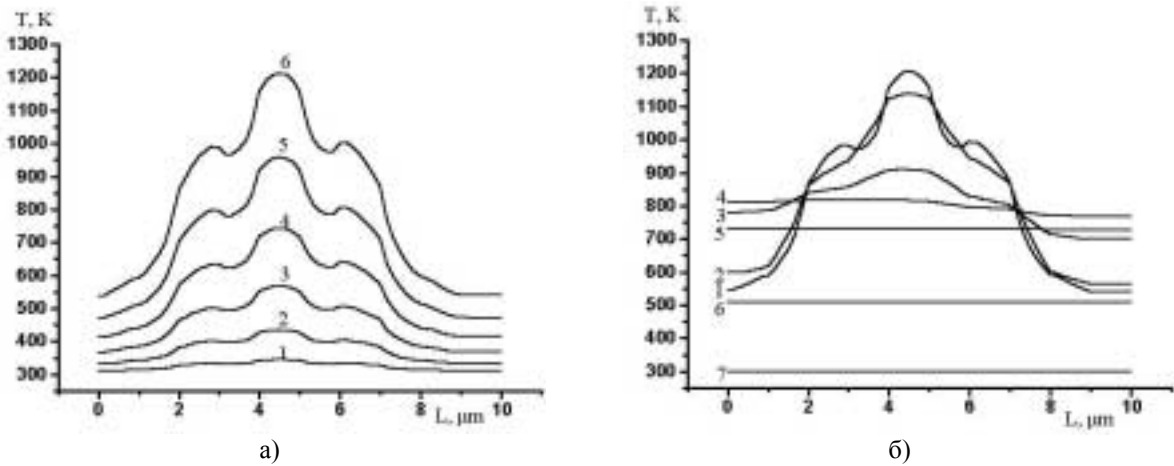


Рис. 6. Профілі нагрівання а) і охолодження б) структури типу 3 під дією імпульсного електронного бомбардування (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/мкм², на глибині максимального розсіювання електронів $\sim 0,385R_{В-Т}$ 4,5 мкм) (індекси при температурних кривих показують їх порядковість за часом).

(0-4 мкм), з температурним максимумом біля точки 3,5 мкм (рис. 4а, 5а). Локальні температурні максимуми в областях 1-2 мкм, 3-5 мкм відповідають шарам структури з високою теплопровідністю і меншою теплоємністю, тобто 25% поруватого por-Si і гетероструктурі 25% por-Si/Si відповідно (рис. 4а), а для структури 2 – області 0-1 мкм і 2-3 мкм (рис. 5а). Локальні мінімуми – в областях 0-1 мкм, 2-3 мкм (рис. 4а), 1-2 мкм, 3-4 мкм (рис. 5а), – відповідають por-Si з поруватістю 50%.

В області монокристалічного Si 4-10 мкм температурні профілі нагріву носять монотонно спадний характер (рис. 4а, 5а). В цій області йде швидке перенесення тепла до тильної сторони, тому нагрів і охолодження до вирівнювання температур проходять набагато швидше (рис. 4б, (1-3); рис. 5б, (1-4)). Охолодження області класичних надграток обох типів проходить у передачі тепла до поверхні, аж до загального вирівнювання температур у всіх точках. Причому локальні температурні максимуми розмиваються, теплоперенесення здійснюється у двох

напрямах з різними швидкостями.

В обох структурах при електронному опроміненні відбувається швидкий прогрів тильної частини, що дає можливість проводити термічних відпал робочої частини, минувши ізоляційний шар із надгратки. Проведено вивчення імпульсного поширення тепла електронним бомбардуванням тільки в самій надгратці (структура 3 (рис. 1)). Розглянуто два випадки: електрони максимально розсіюються на 25% por-Si на глибині $d = 4,5$ мкм і 50% por-Si, $d = 3,5$ мкм. У першому випадку ми очікуємо температурний максимум при 4,5 мкм, а в другому – мінімум при 3,5 мкм.

У першому випадку криві нагріву мають симетричний вигляд локальних екстремумів відносно одного центрального максимуму (рис. 6а). Тому на профілях охолодження спостерігається рівномірне поширення тепла в обидві сторони структури, з розмиттям локальних максимумів.

У другому випадку симетрія відносно центрального локального мінімуму (рис. 7а). Тому охолодження проходить у напрямках температурних

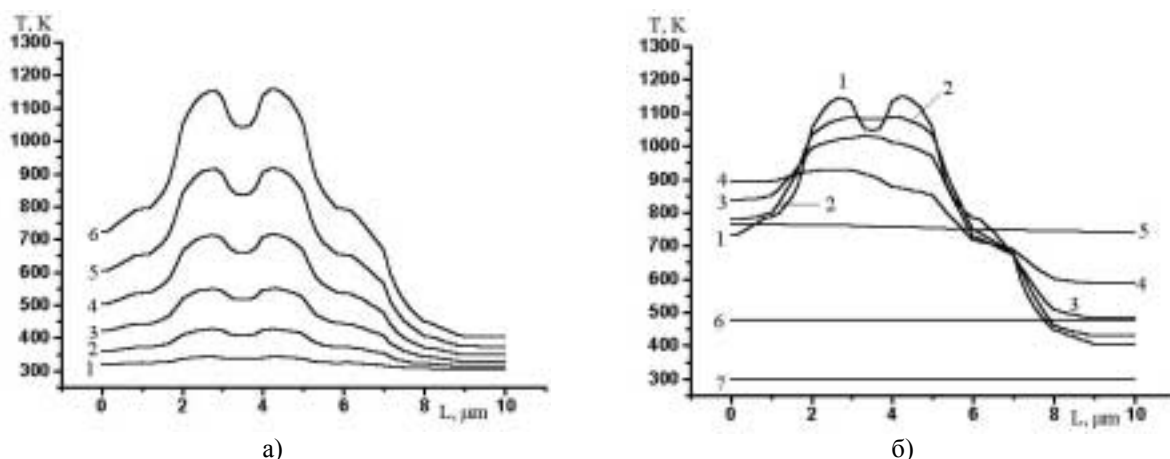


Рис. 7. Профілі нагрівання а) і б) охолодження періодичної поруватої структури типу 3 під дією імпульсного електронного бомбардування (період імпульсу 10^{-5} с, потужність імпульсу $1,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/мкм², на глибині максимального розсіювання електронів $\sim 0,3R_{\text{в-т}}$ 3,5 мкм) (індекси при температурних кривих показують їх порядковість за часом).

мінімумів (рис. 7б). На кривих (3-4) починають розвиватися локальні мінімуми і з'являються злами, що відповідають міжшаровим переходам в надгратці.

V. Висновки

Досліджено термоізоляційні властивості класичних надграток трьох типів, використовуючи дію імпульсного лазерного і електронного опромінення. З аналізу температурних розподілів показано, що структура типу 1 за своїми ізоляційними властивостями краща за структуру типу 2. У структурі типу 1 сильно прогрівається тільки шар області 50% поруватого кремнію в 1 мкм, немає поширення тепла через 50%-поруватий шар por-Si у 25%-ий. Це пов'язано з тим, що більш поруватий шар має вищу теплоємність і меншу температуро-провідність. Лазерне опромінення структури 2 прогріває поверхневу частину до 2 мкм, незважаючи, що після 25%por-Si йде 50%.

В обох структурах при електронному опроміненні відбувається швидкий прогрів тильної частини, що дає можливість проводити термічний відпал робочої частини, минувши ізоляційний шар із

надгратки.

Аналіз температурних профілів створених дією електронного опромінення не дає порівняльної характеристики, котра із надграток має кращі термоізоляційні властивості. Однак розраховані температурні розподіли для монокристалічного кремнію можна використати для розрахунків термовідпалів і нелінійної дифузії у структурі, в якій створено такий класичний ізоляційний шар.

Проведено вивчення імпульсного поширення тепла електронним бомбардуванням тільки в самій надгратці. При цьому визначили напрям поширення тепла. У випадку, коли електрони максимально розсіюються на 25% por-Si на глибині $d = 4,5$ мкм теплопоширення відбувається від центрального максимуму у дві сторони. У другому випадку, електрони розсіюються на 50% por-Si, $d = 3,5$ мкм тепло поширюється у двох напрямках до локальних температурних мінімумів.

Монастирський Л.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Брода А.М. – аспірант;

Мельник О.Й. – кандидат фізико-математичних наук.

- [1] L. Monastyrskii, I. Olenych, P. Parandii. Numerical modeling of the pulse heat-transfer and impurities diffusion under mechanical stresses in semiconductor crystals // *Journal of Crystal Growth*, (2001).
- [2] Л.С. Монастирський. *Масо- і теплоперенесення у неоднорідних напівпровідникових структурах на основі кадмій-ртуть-телур та кремнію*: Препринт.-К.:ІСДО, 60 с (1993).
- [3] A.G. Nassiopoulou, G. Kaltsas. Porous Silicon as an Effective Material for Thermal Isolation on Bulk Crystalline Silicon // *Phys. stat sol.(a)*, **182**, pp. 307-311 (2000).
- [4] Р.Д. Венгреневич, Ю.В. Гудыма. Кинетика оптического теплового пробоя тонкой полупроводниковой плёнки // *ФТТ*, **7**(43), с. 1171-1175 (2001).
- [5] S. Manotas at al. Laser Heating in Porous Silicon Studied by Micro-Raman Spectroscopy // *Phys. stat sol.(a)*, **182**, pp. 331-334 (2000).
- [6] L. Monastyrskii, A. Broda. The heat transferring in the pulse irradiated crystal with non-linear heat parameters // *VII-th ISPCS/2001 seminar, Czestchowa "Prace naukowe" WSP, ser Chemia* (**5**) pp. 171-179 (2001)
- [7] G Geseley, J Linsmeieryx, V Drachy, J Frickey and R Arens-Fischerz. Temperature-dependent thermal conductivity of porous silicon // *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, pp. 2911-2916 (1997).

L.S. Monastyrskyy, A.M. Broda, O.I. Melnyk

Influencing an Impulsive Action on Dynamics of Temperature Fields at the Superlattice of **Поруватого Silicon**

*Lviv Ivan Franko National University,
50, Drahomanov Str., Lviv, 79005, Ukraine, E-mail: monastyr@wups.lviv.ua*

The pulsing distribution of heat in classical superlattices of porous silicon is explored. The implicit numerical method calculates temperature profiles created by activity pulsing laser and electron beams in superlattices. The opportunity of effective application of heat-insulating properties of porous silicon and usages of temperature profiles for investigation a nonlinear thermostimulated diffusion in superlattice objects is shown.