

П.О. Генцарь, О.І. Власенко, С.М. Левицький, І.Б. Янчук, С.Р. Лаворик
**Вплив лазерного опромінення на оптичні властивості тонких
приповерхневих шарів $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$**

*Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України,
03028 м. Київ, проспект Науки, 41, rastneg@isp.kiev.ua*

В даній роботі проведено оптичні дослідження (спектри відбивання та пропускання) твердих розчинів $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0,85$) до і після лазерного опромінення в діапазоні енергій $46,6 \text{ мДж/см}^2$ до $163,5 \text{ мДж/см}^2$. Показано, що в області фундаментального оптичного переходу даного матеріалу відбиваюча здатність зменшується, а пропускання збільшується із збільшенням енергії лазерного опромінення.

Ключові слова: $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$, лазерне опромінення, спектри відбивання, спектри пропускання.

Стаття постуила до редакції 28.11.2013; прийнята до друку 15.03.2013.

Як відомо існує багато способів поверхневої обробки функціональних матеріалів електронної техніки – це іонне бомбардування, лазерне опромінення або нанесення на поверхню плівок [1]. Це приводить до зміни, зокрема, електричних і оптичних властивостей матеріалу, що є важливим для виробництва електронних пристроїв сучасного покоління. В останній час дуже успішно використовують для обробки поверхні (приповерхневих шарів) лазерне опромінення. В даній роботі досліджено вплив лазерного опромінення на оптичні властивості твердих розчинів $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. З цією метою було досліджено спектри відбивання і пропускання даних розчинів в області фундаментального оптичного переходу.

Монокристали $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($x = 0,85$) вирощувалися методом кристалізації з розплаву (метод Чохральського).

Із отриманого злитка було вирізано зразки відповідної форми та розмірів. В подальшому зразки піддавались механічному шліфуванню та поліруванню. Наступним етапом була хімічна обробка кристалів.

Зразки $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ піддавались хімічній обробці поверхні матеріалу, а саме: промивання зразка в ацетоні (3 – 5 хв.) – змивання з поверхні залишків продуктів різки, мастик; промивання в метанолі (5 хв.); травлення поверхні у травнику Уайта ($\text{HNO}_3 + \text{HF}$, 3:1) із швидкістю травлення 25 мкм/хв. Зразки травились протягом 2 хв.); промивання в метанолі (I) (5 хв.) та метанолі (II) (5 хв.), де позначення (I) та (II) відповідають двом різним посудинам, просушування кристалів.

На наступному етапі зразки піддавались лазерній

обробці, а саме поверхня кристалу була рівномірно опромінена при кімнатній температурі ($T = 300 \text{ К}$) імпульсами випромінювання неодимового лазера ($\lambda = 532 \text{ нм}$) наносекундної тривалості ($\tau = 7-8 \text{ нс}$) із густиною енергії E від $46,6$ до $163,5 \text{ мДж/см}^2$.

Отримані до теперішнього часу результати досліджень можливостей лазерної обробки тонких приповерхневих шарів металів, напівпровідників та діелектриків свідчать про перспективність застосування лазерної обробки і вказують на необхідність дальніших досліджень для виявлення і вивчення закономірностей і особливостей дії лазерного випромінювання з різними характеристиками на функціональні матеріали електронної техніки.

Вивчення механізмів лазерного опромінення є важливим для дальнішого прогресу лазерної техніки. Існують механізми термічної і нетермічної природи (ударний, фотохімічний та плазмовий механізми лазерної обробки). Термічний механізм лазерної обробки в більшості випадків є основним механізмом дії лазерного випромінювання. Зроблено багато розрахунків профілю температури в зоні дії променя лазера (оптично-квантового генератора (ОКГ)) і його часових залежностей для різних напівпровідникових матеріалів з різними фізичними параметрами при різних режимах роботи ОКГ. Труднощі, які виникають при теоретичних розрахунках, а саме врахування зміни констант теплопровідності досліджуваного матеріалу в часі, нетермічних механізмів рекомбінації нерівноважних носіїв заряду і т.д. говорять про те, що доцільно проводити дальніші дослідження дії лазера на тонкі приповерхневі шари матеріалів.

До механізмів нетермічної природи відносять наступні:

1. Іонізаційний механізм - іонізація та зміна зарядового стану дефектів напівпровідникової підкладки під дією імпульсу ОКГ приводить до відпаду радіаційних дефектів та їх комплексів.

2. Механізм безвипромінювальної рекомбінації – вплив Оже-процесів, в тому числі поверхневої Оже-рекомбінації.

3. Механізм випромінювальної рекомбінації – перебудова ділянок напівпровідникових структур, які не підлягають безпосередньо дії випромінювання лазера, але розміщених на віддалях, які знаходяться в зоні розповсюдження рекомбінаційного випромінювання.

4. Механізм ударної хвилі – виникає в структурі під дією потужних світлових імпульсів, при цьому знакоміні поля механічних напружень приводять до виникнення вакансій, які володіють високою рухливістю, що сприяє дифузії домішкових (міжвузлових) атомів в сторону деформацій (ефект переміщення міжвузлових і домішкових атомів отримав назву гетерування); методи лазерного гетерування дозволяють уникати додаткових дефектів кристала і створювати необхідну конфігурацію деформаційного поля (локальні ділянки).

Структурне гетерування, тобто поглинання, обумовлено наявністю ділянок $Ge_{1-x}Si_x$, що мають дефектну структуру і володіють здатністю активно поглинати точкові дефекти і зв'язувати домішки. В кремнії роль гетера виконують поверхневі шари SiO_x , SiO_2 , Si_3N_4 , $SiO_{2-x}P$, SiC та інші, а в германію роль гетера виконують поверхневі шари GeO_2 або GeO .

Таким чином, лазерна обробка тонких приповерхневих шарів дозволяє змінювати фізичні властивості (оптичні, електрофізичні та інші) функціональних матеріалів електронної техніки, а це є визначальним при дослідженні фундаментальних проблем наноструктурних систем, наноматеріалів та нанотехнологій.

Із кількісного аналізу спектрів пропускання твердих розчинів $Ge_{0,15}Si_{0,85}$ визначено чисельне значення фундаментального оптичного переходу E_0 даних зразків, яке дорівнює 1,051 eV (1180 nm). Слід відмітити, що пік показника заломлення відповідає фундаментальному краю поглинання. В той же час спад показника заломлення відповідає піку поглинання.

В припущенні про лінійну залежність енергії E_0 від складу розчину x виконуються співвідношення:

$$E_0(Ge_{1-x}Si_x) = E_0(Ge) + k \cdot x \quad (1)$$

$$E_0(Ge_{1-x}Si_x) = E_0(Si) - k(1-x), \quad (2)$$

де $E_0(Ge) = 0,66$ eV [2]; $E_0(Si) = 1,11$ eV [2]; $k = 0,45$ eV.

Розраховане значення енергії E_0 обчислене за формулами (1) та (2) рівне 1,0425 eV при складі розчину $x = 0,85$. Відхилення розрахованого значення енергії E_0 від експериментального значення енергії E_0 становить 0,0085 eV.

Як видно з рис. 1 та рис. 2 у наших

експериментах спостерігається ефект просвітлення. Це результат інтерференції світла відбитого від границі повітря – просвітлюючий приповерхневий шар та від границі просвітлюючий приповерхневий шар – твердий розчин. Дана інтерференція приводить до взаємного гасіння відбитих світлових хвиль, а звідси до підсилення інтенсивності світла, що проходить. Згідно теорії максимальний ефект просвітлення досягається коли товщина просвітлюючого покриття кратна непарному числу четвертей довжин хвиль λ ($d = (2l + 1) \frac{\lambda}{4}$; де $l = 0, 1, 2, \dots$), а показник заломлення просвітлюючого покриття n_2 визначається із співвідношення $n_2^2 = n_1 \cdot n_3$, де n_1 - показник заломлення середовища з якого падає світло на досліджуваний зразок

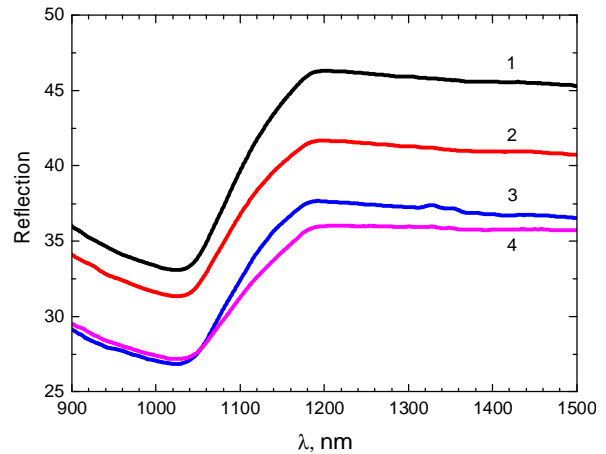


Рис. 1. Спектри відбивання твердих розчинів $Ge_{0,15}Si_{0,85}$ в області фундаментального оптичного переходу E_0 : вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями: 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2 - 4 відповідно.

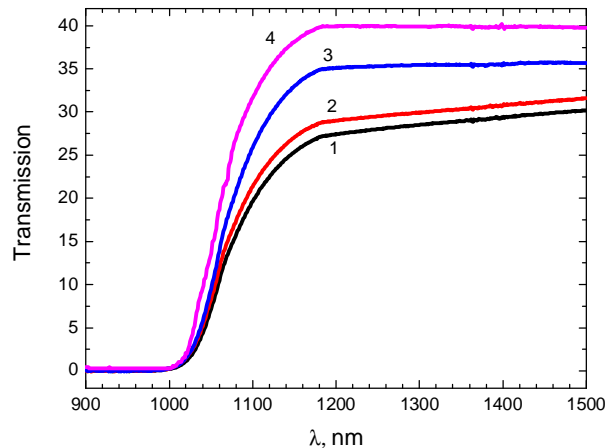


Рис. 2. Спектри пропускання твердих розчинів $Ge_{0,15}Si_{0,85}$ в області фундаментального оптичного переходу E_0 : вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями: 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2 - 4 відповідно.

(показник заломлення повітря), n_3 - показник заломлення твердого розчину.

Якщо товщина приповерхневого шару в якому відбулись структурні перетворення кратна цілому числу півхвиль ($d = l \frac{\lambda}{2}$; де $l = 0, 1, 2, \dots$), то відбиваюча здатність кристалів збільшиться, а пропускаюча здатність зменшиться.

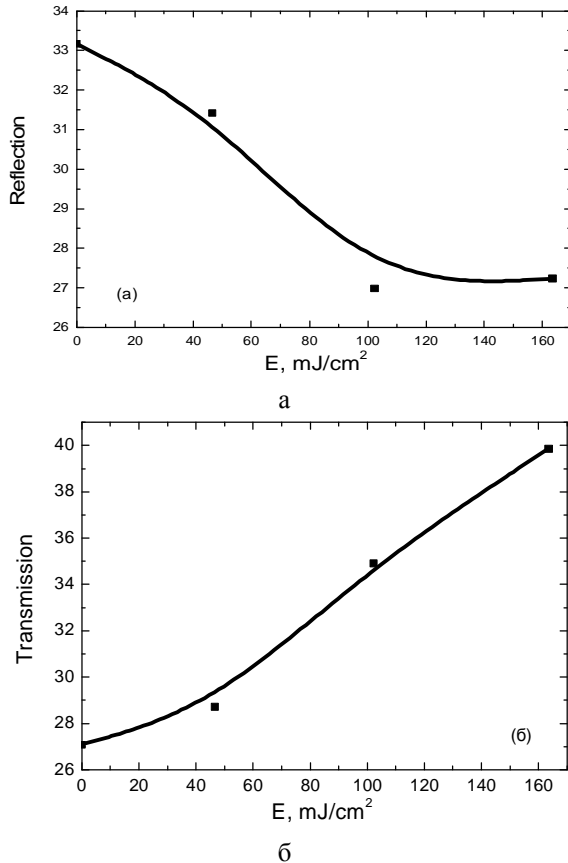


Рис. 3. залежність відбивання (а) та пропускання (б) досліджуваних зразків від енергії лазерного опромінення на довжині хвилі 1180 нм.

Відбита світлова хвиля послаблюється тим сильніше, чим більша різниця $n_3 - n_2$. Якщо

$n_2 > n_3$, то інтерференція відбитих від границь просвітлюючого покриття променів, навпаки підсилить інтенсивність відбитої світлової хвилі [3].

Оптичні властивості кристалів визначаються показником заломлення n та коефіцієнтом екстинкції χ . Відмінності оптичних характеристик приповерхневого шару та об'єму (комплексний показник заломлення приповерхневого шару $\tilde{n}_s = n_s + iC_s$ відрізняється від комплексного показника заломлення об'єму матеріалу $\tilde{n}_v = n_v + iC_v$) [4].

Як видно з рис. 1 при збільшенні енергії лазерного випромінювання від 46,6 мДж/см² до 163,5 мДж/см² відбиваюча здатність досліджуваного матеріалу зменшується. Це означає, що різниця показників заломлення об'єму досліджуваного матеріалу та приповерхневого шару збільшується. Спектри пропускання (рис. 2) даних зразків показали, що існує повна кореляція із спектрами відбивання, тобто пропускання при збільшенні енергії лазерного випромінювання в цьому діапазоні збільшується.

На рис. 3 показано залежності відбивання (а) та пропускання (б) досліджуваних зразків від енергії лазерного опромінення на довжині хвилі 1180 нм.

Таким чином, проведені дослідження показали, що під час лазерного опромінення відбувається модифікування поверхні твердого розчину Ge_{1-x}Si_x, утворюється нова фаза в приповерхневому шарі з показником заломлення меншим, ніж показник заломлення твердого розчину. Із спектрів пропускання визначено, що енергія фундаментального оптичного переходу твердого розчину Ge_{1-x}Si_x ($x = 0,85$) E_0 дорівнює 1,051 eV.

Генцарь П.О. – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник;
Власенко О.І. – доктор фізико-математичних наук, професор;
Левицький С.М. – науковий співробітник;
Янчук І.Б. – кандидат фізико-математичних наук, докторант ІФН ім. В.С. Лашкарьова;
Лаворик С.Р. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

- [1] Ф. Бехштенд, Р. Эндерлайн, Поверхности и границы раздела полупроводников (Мир, Москва, 1990).
- [2] Ю.П. Кардона М., Основы физики полупроводников (Физматлит, Москва, 2002).
- [3] Борн М. Вольф Э., Основы оптики (Наука, Москва, 1973).
- [4] В.А. Тягай, О.В. Снитко, Электроотражение света в полупроводниках (Наукова Думка, Киев, 1980).

P.O. Gentsar, O.I. Vlasenko, S.M. Levytskyi, I.B. Yanchuk, S.R. Lavoryk

Influence of Laser Radiation on the Optical Properties of Thin Layers Ge_{1-x}Si_x

V. Lashkoryov Institute of Semiconductors Physics, prospect Nauki, 41, Kyiv, 03028, E-mail: rastneg@isp.kiev.ua

In this work are the optical studies (reflectance and transmission spectrum) of solid solutions Ge_{1-x}Si_x ($x = 0.85$) before and after laser irradiation in the energy range 46.6 mJ/cm² to 163.5 mJ/cm². It is shown that in the fundamental optical transition reflecting the ability of the material decreases and the transmittance increases with increasing power laser irradiation.

Keywords: Ge_{1-x}Si_x, laser irradiation, reflectance spectrum, transmission spectrum.