

П.О. ГЕНЦАРЬ, О.І. ВЛАСЕНКО, С.М. ЛЕВИЦЬКИЙ

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
(Просп. Науки, 41, Київ 03028; e-mail: rastneg@isp.kiev.ua)**ЛАЗЕРНО-СТИМУЛЬОВАНЕ  
ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДБИВАЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ  
МОНОКРИСТАЛІЧНОГО  $n$ -GaAs(100)**

УДК 621.315.592

У даній роботі представлені результати оптичних досліджень спектрів відбиття монокристалів  $n$ -GaAs(100) з питомим опором 10 Ом·см (при кімнатній температурі) в діапазоні 0,2–1,7 мкм до та після лазерного опромінення в інтервалі енергій 66–108 мДж/см<sup>2</sup>. Експериментально показано збільшення відбиваючої здатності досліджуваних кристалів при даній лазерній обробці. Даний інтегральний ефект пояснено відмінностями оптичних характеристик приповерхневого шару та об'єму матеріалу (комплексний показник заломлення приповерхневого шару  $\tilde{n}_s = n_s + i\chi_s$  відрізняється від комплексного показника заломлення об'єму матеріалу  $\tilde{n}_v = n_v + i\chi_v$ ).

**Ключові слова:**  $n$ -GaAs(100), лазерне опромінення, спектри відбиття, показник заломлення, приповерхневий шар.

Арсенід галію (GaAs) є одним із основних матеріалів, який використовується в ролі підкладки для нанесення різних плівок, отримання наноструктур, гетероструктур, для виготовлення світлодіодів, сонячних елементів і інших електронних приладів сучасного покоління. Метою даної роботи було дослідження впливу лазерного опромінення на оптичні властивості монокристалів  $n$ -GaAs(100). Дана робота є продовженням робіт авторів по впливу лазерного опромінення на оптичні властивості напівпровідників [1–3]. За допомогою лазерної обробки функціональних матеріалів електронної техніки змінюють їх оптичні і електрофізичні властивості.

У даній роботі представлені результати оптичних досліджень спектрів відбиття монокристалів  $n$ -GaAs(100) з питомим опором 10 Ом·см (при кімнатній температурі) в діапазоні 0,2–1,7 мкм до та після лазерного опромінення в інтервалі енергій 66–108 мДж/см<sup>2</sup>.

Як експериментальні зразки використовували напівпровідникові пластини монокристалічного  $n$ -GaAs(100) з питомим опором 10 Ом·см (при кімнатній температурі). Поверхня кристалів піддавалась механічно-хімічній обробці. Зразки піддавались лазерній обробці, а саме поверхня кристала

була рівномірно опромінена при кімнатній температурі ( $T = 300$  К) імпульсами випромінювання Nd:YAG лазера ( $\lambda = 532$  нм) наносекундної тривалості ( $\tau = 7$ –8 нс) із густиною енергії  $E$  від 66 до 108 мДж/см<sup>2</sup>.

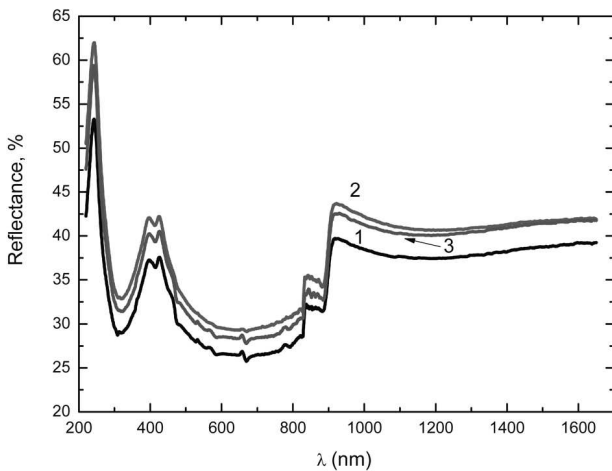
На рисунку показано спектри відбиття  $n$ -GaAs(100) залежно від енергії лазерного опромінення.

Кількісною характеристикою оптичного явища відбиття електромагнітних хвиль є енергетичний коефіцієнт відбиття  $R$ . Коефіцієнт відбиття  $R$  при нормальному падінні або відбиття  $R$  напівнескінченного ізотропного середовища (напівпровідника) визначається таким співвідношенням [4]:

$$R = \frac{(n - n_0)^2 + \chi^2}{(n + n_0)^2 + \chi^2}, \quad (1)$$

де  $n$  – показник заломлення досліджуваного зразка,  $n_0$  – показник заломлення середовища, із якого на досліджуваний зразок падає світло (електромагнітна) хвиля;  $\chi$  – коефіцієнт екстинкції зразка.

Збільшення відбиваючої здатності монокристалів  $n$ -GaAs(100) при лазерному опроміненні в діапазоні енергій 66–108 мДж/см<sup>2</sup> можна пояснити таким чином: при обробці досліджуваних кристалів відбуваються структурні зміни тонких приповерхневих шарів і в результаті в інтегральний ефект відбиття дає внесок тонкий



Спектри відбиття монокристалів *n*-GaAs(100): вихідний зразок – крива 1 та зразки, опромінені енергіями 66 МДж/см<sup>2</sup>; 108 МДж/см<sup>2</sup> криві 2, 3 відповідно

приповерхневий шар і об'єм матеріалу. Іншими словами, можна сказати, що це результат інтерференції відбитих світлових (електромагнітних) хвиль від границь повітря – тонкий приповерхневий шар і тонкий приповерхневий шар – об'єм кристала. Відбиваюча здатність кристалів визначається показником заломлення  $n$  та коефіцієнтом екстинкції  $\chi$ . Відмінності оптичних характеристик приповерхневого шару та об'єму матеріалу (комплексний показник заломлення приповерхневого шару  $\tilde{n}_s = n_s + i\chi_s$  відрізняється від комплексного показника заломлення об'єму матеріалу  $\tilde{n}_v = n_v + i\chi_v$ ) і приводять до інтегрального ефекту, зображеного на рисунку.

Коефіцієнт відбиття системи тонкий приповерхневий шар напівпровідника – об'єм напівпровідника при нормальному падінні світлової (електромагнітної) хвилі має вигляд [5, 6]:

$$\rho = \frac{\rho_{12} + \rho_{23} \exp(2i\delta)}{1 + \rho_{12}\rho_{23} \exp(2i\delta)}, \quad (2)$$

де

$$\rho_{12} = r_{12} \exp(i\varphi_{12}) = \frac{(n_0 - N_1)}{(n_0 + N_1)},$$

$$\rho_{23} = r_{23} \exp(i\varphi_{23}) = \frac{(N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)}$$

– френелівські коефіцієнти відбиття зовнішньої границі (зовнішнє середовище – приповерхневий

тонкий шар) і внутрішньої границі (тонкий приповерхневий шар напівпровідника – об'єм напівпровідника);  $n_0$  – показник заломлення зовнішнього середовища;  $N_1 = n_1 + ix_1$  і  $N_2 = n_2 + ix_2$  – комплексні показники заломлення тонкого приповерхневого шару напівпровідника і об'єму напівпровідника відповідно;  $\varphi_{12}$  і  $\varphi_{23}$  – зсув фаз при відбиванні променя світлової хвилі від поверхні тонкого приповерхневого шару і від границі тонкий приповерхневий шар напівпровідника – об'єм напівпровідника відповідно,  $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) N_1 d$  ( $d$  – товщина тонкого приповерхневого шару напівпровідника,  $\lambda$  – довжина хвилі).

Нехтуючи величинами третього і четвертого порядку малості, коефіцієнт відбиття  $R$  системи тонкий приповерхневий шар напівпровідника і об'єм напівпровідника можна записати у вигляді:

$$R = (r_{12}^2 + r_{23}^2 \exp(-2x_1 d^*) + 2r_{12}r_{23} \exp(-x_1 d^*) \times \cos \varphi_-) / (1 + r_{12}^2 r_{23}^2 \exp(-2x_1 d^*) + 2r_{12}r_{23} \exp(-x_1 d^*) \cos \varphi_+), \quad (3)$$

де

$$\varphi_{\pm} = \varphi_{12} \pm (\varphi_{23} + n_1 d^*),$$

$$d^* = \frac{4\pi}{\lambda} d.$$

Як видно із рисунка інтенсивність високоенергетичних піків у монокристалічному *n*-GaAs(100) після лазерного опромінення зростає (піки  $E_1 (\Lambda_{3V} - \Lambda_{1C})$ ,  $E_1 + \Delta_1 (\Lambda_{3V} - \Lambda_{1C})$ ;  $E_2 (\Sigma_V - \Sigma_C)$ ) [5, 7].

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 подальших досліджень для виявлення і вивчення закономірностей та особливостей дії лазерного випромінювання з різними характеристиками на функціональні матеріали електронної техніки. Вивчення механізмів лазерного опромінення є важливим для подальшого 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.ін., свідчать про те, що доцільно проводити подальші дослідження дії лазера на тонкі приповерхневі шари матеріалів.

До механізмів нетермічної природи відносять такі:

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, у тому числі поверхневої оже-рекомбінації.

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

4. Механізм ударної хвилі – виникає в структурі під дією потужних світлових імпульсів, при цьому знакозмінні поля механічних напружень приводять до виникнення вакансій, які мають високу рухливість, що сприяє дифузії домішкових (міжвузлових) атомів у 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, зумовлене наявністю ділянок  $n$ -GaAs(100), які мають дефектну структуру і володіють здатністю активно поглинати точкові дефекти і зв'язувати домішки. В арсеніді галію роль гетера виконують шари  $Ga_2O_3$ ,  $As_2O_5$  та інші.

Необхідно відзначити, що глибина проникнення світлової хвилі в зразок дорівнює  $\alpha^{-1}$ , а для напівпровідників у типових випадках  $\alpha$  вище краю поглинання має порядок  $10^4$ – $10^6$   $cm^{-1}$ . При таких великих коефіцієнтах поглинання світло буде зон-

дувати лише дуже тонкий шар поблизу поверхні зразка (близько 1 мкм або менше). Метод відбиття світла достатньо давно і традиційно використовується для вимірювання оптичних констант і дослідження оптичних властивостей функціональних матеріалів електронної техніки.

Таким чином, проведені оптичні дослідження спектрів відбиття монокристалів  $n$ -GaAs(100) з питомим опором 10 Ом·см (при кімнатній температурі) в діапазоні 0,2–1,7 мкм до та після лазерного опромінення в інтервалі енергій 66–108 мДж/см<sup>2</sup> показали:

1. Під дією лазерного опромінення відбуваються структурні зміни приповерхневого шару монокристалічного  $n$ -GaAs(100).

2. Експериментально показано збільшення відбиваючої здатності досліджуваних кристалів при даній лазерній обробці.

3. Інтегральний ефект збільшення відбиваючої здатності досліджуваних зразків пояснюється відмінностями оптичних характеристик приповерхневого шару та об'єму матеріалу (комплексний показник заломлення приповерхневого шару  $\tilde{n}_s = n_s + i\chi_s$  відрізняється від комплексного показника заломлення об'єму матеріалу  $\tilde{n}_v = n_v + i\chi_v$ ).

1. П.О. Генцарь, О.І. Власенко, С.М. Левицький, І.Б. Янчук, С.Р. Лаворик. Вплив лазерного опромінення на оптичні властивості тонких приповерхневих шарів  $Ge_{1-x}Si_x$ . *Фізика і хімія твердого тіла* **15**, 303 (2014).
2. П.О. Генцарь, О.І. Власенко, С.М. Левицький, В.А. Гнатюк. Лазерно-стимульоване збільшення відбиваючої здатності напівпровідників. *Фізика і хімія твердого тіла* **15**, 856 (2014).
3. П.О. Генцарь, С.М. Левицький. Лазерно-стимульовані процеси в напівпровідниках. *Хімія, фізика та технологія поверхні* **7**, 186 (2016).
4. П. Ю, М. Кардона. *Основы физики полупроводников* (Физматлит., 2002).
5. В.А. Тягай, О.В. Снитко. *Электроотражение света в полупроводниках* (Наукова думка, 1980).
6. А.М. Евстигнеев, О.В. Снитко, Л.В. Артамонов, П.А. Генцар, А.Н. Красико. Вклад поверхности в эффект электроотражения и его выделение при налички поляризации анизотропии. *УФЖ* **31**, 756 (1986).
7. В.И. Гавриленко, А.М. Грегов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников: Справочник* (Наукова думка, 1987).

Одержано 27.08.17

*P.O. Gentsar, O.I. Vlasenko, S.M. Levytskyi*

LASER-STIMULATED  
ENHANCEMENT OF THE REFLECTANCE  
OF SINGLE-CRYSTALLINE *n*-GaAs(100)

S u m m a r y

The results of optical researches concerning the reflection spectra of *n*-GaAs(100) single crystals with a specific resistance of

10  $\Omega$  cm (at room temperature) measured in a light wavelength interval of 0.2–1.7  $\mu\text{m}$  before and after the laser irradiation to an energy dose of 66–108  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  are reported. The experiment revealed a growth in the reflectance of the examined crystals after their laser treatment. This integral effect is explained as a result of the difference between the optical characteristics (the complex refractive index) in the near-surface layer and in the bulk of the irradiated material.