

УДК 681.3

Г. Л. Лисенко, к. т. н., доц.;

І. В. М'ялківська, асп.

ЕЛЕМЕНТАРНА КОМІРКА ОПТИЧНОГО ТРАНСПАРАНТА ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ НА SEED-СТРУКТУРАХ

Досліджено та проаналізовано оптичні властивості напівпровідникових матеріалів групи $A^{III}B^V$ для реалізації SEED-структури. SEED-структура розглядається як один з можливих варіантів виконання елементарної комірки оптичного транспаранта. Розглянуто такі оптичні властивості напівпровідників як поглинання, пропускання та відбиття в залежності від довжини хвилі випромінювання, яким освітлюється транспарант.

Вступ

В останній час відбувається постійне зростання обсягів інформації, що передається в обчислювальних системах, що обумовлює для них актуальність проблем паралельного введення великої кількості інформації.

Проблему можна вирішити шляхом оптичного введення масивів даних із застосуванням оптичних транспарантів.

Вже досить довгий час існують електрично керовані напівпровідникові транспаранти, які мають оптичні виходи. Однак, такі пристрої мають багато проблем. Вони, зазвичай, споживають багато енергії, тому і не використовуються масово у пристроях, що працюють в реальних цифрових системах.

Для реалізації інтеграції оптичних транспарантів у єдину структуру використовують SEED-пристрої. SEED (Self-Electro-Optic Effect Device — пристрій з власним електрооптичним ефектом) — це пристрій, що дозволяє вирішити ці проблеми і дає можливість створити повноцінні пристрої з оптичними входами і виходами. Тому розглянемо можливість використання SEED як елементарну комірку оптичного транспаранта.

Вибираючи напівпровідниковий матеріал для реалізації SEED-структури, необхідно дослідити параметри відповідних матеріалів. Об'єктом дослідження оберемо напівпровідники групи $A^{III}B^V$.

Аналіз основних параметрів напівпровідникових матеріалів

Одним із параметрів напівпровідників, який змінюється залежно від довжини хвилі є показник заломлення n . Для випадків оптичних напівпровідникових матеріалів, які проявляють нові властивості при зміні певних факторів, він розглядається у комплексно-му вигляді, а саме [1]:

$$n = n + j\chi, \quad (1)$$

де n — показник заломлення матеріалу, χ — показник поглинання матеріалу.

Проаналізувавши окремо дійсну і уявну частини комплексного показника заломлення [2], побудуємо графіки їх залежності від довжини хвилі та виконаємо порівняння на прикладі InAs (рис. 1).

З графіків (див. рис. 1) видно, що дійсна і уявна частини показника заломлення змінюються майже за однако-вим законом. Проте значення величини уявної частини значно поступаються значенням дійсної частини (майже у 10 разів). Однак саме уявна частина комплексного показника заломлення відповідає за прояв нелінійних ефектів в напівпровідниках при дії на них зовнішнього електрично-го поля.

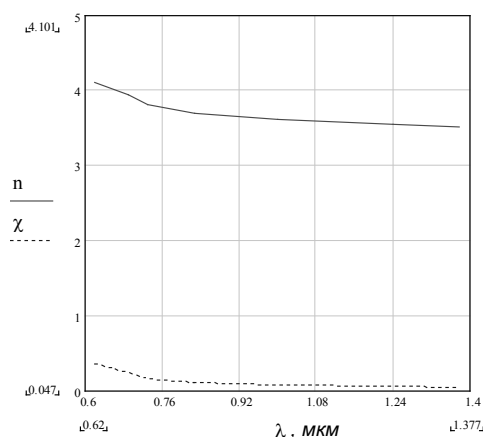


Рис. 1. Графіки залежності дійсної і уявної частини комплексного показника заломлення від довжини хвилі

Ще одним важливим параметром, який залежить від довжини хвилі є коефіцієнт поглинання. Вигляд графіків залежності поглинання матеріалу від енергії фотона для досліджуваних напівпровідників показаний на рис. 2 та 3.

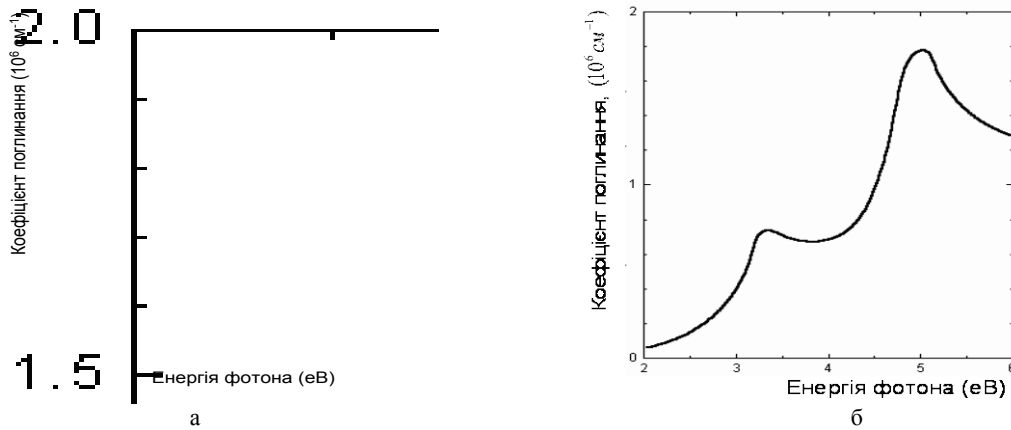


Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнта поглинання від енергії фотона для: а — InAs; б — InP

На рис. 2 зображена залежність коефіцієнта поглинання напівпровідників InAs та InP від енергії фотона при температурі 300 К [3, 4].

На рис. 3 зображені графіки залежності коефіцієнта поглинання для напівпровідникових матеріалів GaAs та GaP від енергії фотона при температурі 300 К [5, 6].

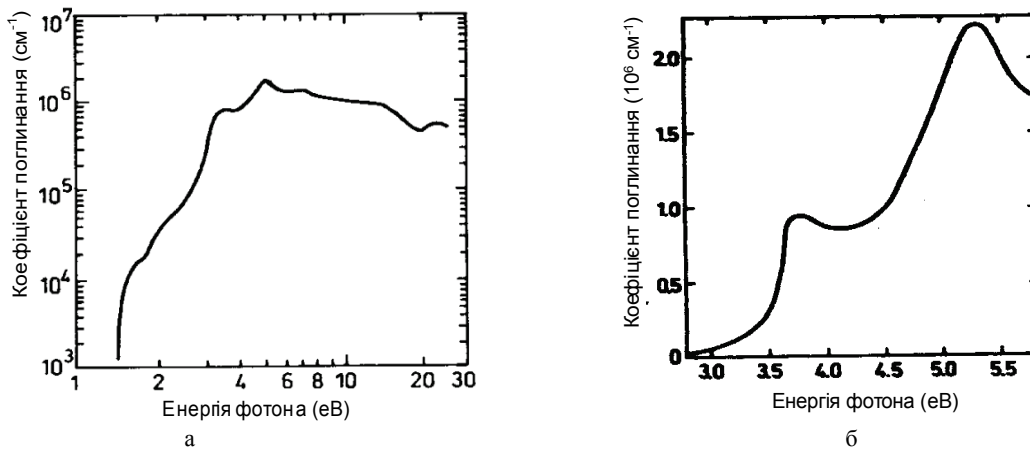


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта поглинання від енергії фотона для: а — GaAs; б — GaP

Що стосується зв'язку між поглинанням матеріалу і інтенсивністю світла, що падає на нього, то такі залежності можна поділити на два випадки. В першому випадку існує залежність інтенсивності хвилі, що відбивається від поверхні напівпровідника, а в другому — залежність інтенсивності хвилі, що проходить через матеріал.

Відповідно для першого випадку формула, що описує цю залежність має вигляд [2]

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2}, \tag{2}$$

де R — коефіцієнт відбиття матеріалу; I_r — інтенсивність вихідного відбитого пучка; I_0 — інтенсивність падаючого пучка.

Для випадку хвилі, що проходить через напівпровідник, існує залежність [2]

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha\chi}}{1 + R^2 e^{-2\alpha\chi}}, \tag{3}$$

де T — коефіцієнт пропускання матеріалу; I_i — інтенсивність вихідного пучка, що пройшов через напівпровідник; α — коефіцієнт поглинання матеріалу.

З формул (2) та (3) видно, що знаючи інтенсивність падаючого пучка і коефіцієнт поглинання (відбиття) матеріалу, можна визначити інтенсивність вихідного (відбитого або такого, що пройшов через напівпровідник) пучка.

Приспосовуючи дані дослідження до системи оптичного транспаранта, можна зробити висновок. Знаючи вихідну інтенсивність випромінювання, яка буде задовольняти необхідним умовам, можна визначити вхідну інтенсивність випромінювального пристрою, яким для оптичного транспаранта може бути вертикально-випромінюючий лазер (VCSEL). Іншими словами, за допомогою формул (2) та (3) можна підбирати необхідну інтенсивність VCSEL, якими будуть освітлюватись комірки оптичного напівпровідникового транспаранта.

Розрахунок коефіцієнту поглинання на вільних носіях заряду для напівпровідників групи A^{III}B^V

Коефіцієнт поглинання матеріалу на вільних носіях заряду для напівпровідників має вигляд [1]

$$\alpha = \frac{N_e \lambda^2 g e^3}{4\pi^2 \epsilon_0 m_c^2 c^3 n \mu_c}, \tag{4}$$

де N_e — концентрація електронів в зоні провідності; λ — довжина хвилі випромінювання; g — g -фактор (його значення для більшості напівпровідників групи A^{III}B^V дещо менше 2) [1] μ_c — рухливість носіїв заряду; m_c — ефективна маса електрона; n — показник заломлення матеріалу.

Дослідимо властивості поглинання SEED-структур, виконаних із різних напівпровідникових матеріалів за допомогою (4). Дані для розрахунків використовуємо з [1] та [2]. При цьому застосуємо значення концентрації електронів, які наведені в таблиці.

Значення концентрації електронів для напівпровідників групи A^{III}B^V

Напівпровідниковий матеріал	Концентрація електронів, см ⁻³			
	10 ¹⁶	2·10 ¹⁷	10 ¹⁸	5·10 ¹⁸
GaAs, InAs, GaP, InP				

Отже, залежність поглинання від концентрації носіїв заряду на довжинах хвиль 850, 950, 1310 та 1550 нм для GaAs та InAs має вигляд, показаний на рис. 4.

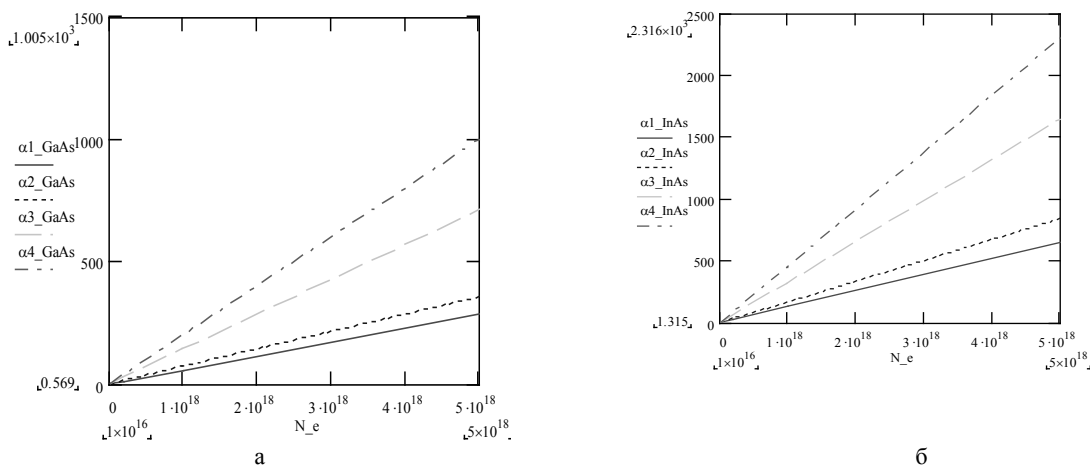


Рис. 4. Графіки залежності поглинання α [см⁻¹] від концентрації носіїв N_e [см⁻³] на довжинах хвиль $\lambda_1 = 850$ нм, $\lambda_2 = 950$ нм, $\lambda_3 = 1310$ нм, $\lambda_4 = 1550$ нм для: а — GaAs; б — InAs

Аналогічно розраховано коефіцієнт поглинання на вільних носіях заряду для GaP та InP на таких самих довжинах хвиль з різними значеннями концентрації носіїв. Відповідні графіки подані на рис. 5.

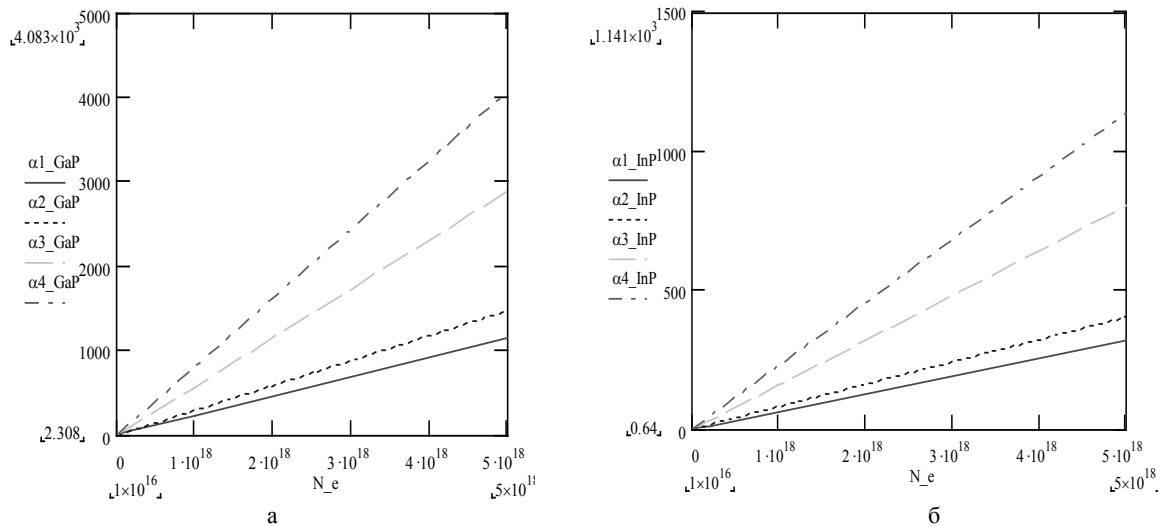


Рис. 5. Графіки залежності поглинання α [см^{-1}] від концентрації носіїв N_e [см^{-3}] на довжинах хвиль $\lambda_1 = 850$ нм, $\lambda_2 = 950$ нм, $\lambda_3 = 1310$ нм, $\lambda_4 = 1550$ нм для: а — GaP; б — InP

На графіках рис. 4 та 5 змінні α_1 , α_2 , α_3 , α_4 відповідають значенням коефіцієнта поглинання на довжинах хвиль $\lambda_1 = 850$ нм, $\lambda_2 = 950$ нм, $\lambda_3 = 1310$ нм, $\lambda_4 = 1550$ нм.

Аналіз графіків на рис. 4а показує, що найменші значення коефіцієнта поглинання GaAs має на довжині хвилі 850 нм, хоча не набагато більші значення α для цього матеріалу на $\lambda = 950$ нм. Що стосується коефіцієнта поглинання в залежності від концентрації електронів, то при мінімальній концентрації у 10^{16} см^{-3} значення α для всіх довжин хвиль відрізняються на дуже незначну величину. Проте ситуація різко змінюється, якщо $N_e = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і поглинання GaAs на довжині хвилі 1550 нм стає максимальним ($\alpha = 1,005 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$), а на 850 нм відповідно мінімальним ($\alpha = 0,3616 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$).

Аналізуючи графіки на рис. 4б, спостерігаємо аналогічну ситуацію. Мінімальне значення коефіцієнта поглинання для InAs буде на довжині хвилі 850 нм з концентрацією електронів 10^{16} см^{-3} ($\alpha = 1,315 \text{ см}^{-1}$), а максимальне — на 1550 нм ($\alpha = 2,316 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$). Тобто, максимальне значення поглинання для InAs перевищує відповідне значення поглинання для GaAs приблизно в 2 рази.

Що стосується графіків залежності поглинання від концентрації носіїв для GaP та InP (див. рис. 5), то спостерігається така сама тенденція як і на графіках на рис. 4а та 4б.

Проте, для GaP (див. рис. 5а) значення поглинання на всіх довжинах хвиль з різними концентраціями електронів перевищують відповідні значення для GaAs — приблизно в 4 рази, а для InAs — приблизно в 2 рази. Так, на довжині хвилі 850 нм мінімальне значення $\alpha = 2,308 \text{ см}^{-1}$, а максимальне — $1,154 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. Для $\lambda = 1550$ нм мінімальним є значення поглинання $8,167 \text{ см}^{-1}$, а максимальним — $4,083 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. При цьому оптимальними (з найменшими значеннями α) довжинами хвиль залишаються 850 та 950 нм.

Графіки на рис. 5б для InP своїми значеннями подібні до графіків для GaAs. Так, на довжині хвилі 850 нм мінімальне значення $\alpha = 0,64 \text{ см}^{-1}$, а максимальне — $0,32014 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. На довжині хвилі 1550 нм мінімальне значення поглинання — $2,282 \text{ см}^{-1}$, а максимальне — $1,141 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$.

Оскільки основною задачею оптичного транспаранта є можливість модуляції світла, то виконаємо аналіз отриманих результатів з метою виявлення матеріалу з найбільшою зміною коефіцієнта поглинання при зміні концентрації.

В результаті такого аналізу було виявлено, що на довжинах хвиль 850 та 950 нм найкраще модулює випромінювання GaAs, на довжині хвилі 1310 нм — InP, на довжині хвилі 1550 нм — GaP. Отже, в залежності від того, яка довжина хвилі буде обрана для оптичного транспаранта як управляюча, такий напівпровідник буде обрано як матеріал для його реалізації.

Висновки

Проаналізовано оптичні властивості напівпровідників GaAs, InAs, InP та GaP для реалізації SEED-структури, яка може бути використана як елементарна комірка оптичного транспаранта. В

результаті такого аналізу було виявлено основні залежності показників заломлення, поглинання та відбиття від довжини хвилі випромінювання, яке падає на комірку оптичного транспаранта.

Встановлено залежність між інтенсивністю падаючого пучка та інтенсивністю вихідного (відбитого або такого, що пройшов через напівпровідник) пучка з урахуванням коефіцієнту поглинання (відбиття) матеріалу. Ця залежність дозволяє підбирати необхідну інтенсивність VCSEL, якими будуть освітлюватись комірки оптичного напівпровідникового транспаранта.

В результаті дослідження коефіцієнта поглинання матеріалу на вільних носіях заряду виявилось, що він залежить не тільки від довжини хвилі і показника заломлення, а і від таких факторів як концентрація електронів та рухливість носіїв заряду.

Виконано аналіз для виявлення матеріалу з найбільшою зміною коефіцієнта поглинання при зміні концентрації. В результаті аналізу було виявлено, що на довжинах хвиль 850 та 950 нм найкраще модулює випромінювання GaAs, на довжині хвилі 1310 нм — InP, на довжині хвилі 1550 нм — GaP. Отже, в залежності від того, яка керувальна довжина хвилі буде обрана для оптичного транспаранта, такий напівпровідник потрібно обирати як матеріал для реалізації SEED-структури як його елементарної комірки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Р. Смит. Полупроводники / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 560 с.
2. Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения типа A^{III}B^V) / Под ред. Р. Уиллардсона и А. Бира / Пер. с англ. — М.: Мир, 1970. — 488 с.
3. Mikhailova M. P. Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol. 1, Levinshtein M., Rumyantsev S. and Shur M., ed. // World Scientific, London, 1996. P. 147—168.
4. Schmidt Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol. 1, M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, ed. // World Scientific, London, 1996. P. 169—190.
5. Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L. Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol. 1, M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, ed. // World Scientific, London, 1996. P. 77—103.
6. Goldbery Yu. A. Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol.1, M. Levinshtein, S. Rumyantsev and M. Shur, ed. // World Scientific, London, 1996. P. 104—124.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007)» (31.05—2.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.09.07
Рекомендована до друку 04.10.07

Лисенко Геннадій Леонідович — доцент, *Мялківська Ірина Володимирівна* — аспірант.

Кафедра лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет