

## ОПТИМІЗАЦІЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

П. П. Горлей<sup>1</sup>, О. А. Червінський<sup>1</sup>, Ю. В. Воробйов<sup>2</sup>, Х. Гонзалез-Ернандез<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,  
вул. Коцюбинського, 2, 58012, Чернівці, Україна

<sup>2</sup>Керетарське відділення наукового центру "СІНВЕСТАВ", Норпоніенте 2000, 76230, Керетаро, Мексика

<sup>3</sup>Науковий центр "СІМАВ", проспект Мігеля Сервантеса 120,  
Індустріальний район Чічуачуа, 31109, Чічуачуа, Мексика

(Отримано 13 березня 2008 р.; в остаточному вигляді — 23 червня 2008 р.)

У роботі представлено результати чисельного моделювання процесів електронного транспорту в сонячному елементі з гетеропереходом  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Оптимізовано величини ефективності фотоперетворення сонячного елемента  $\eta$  як функції молярного вмісту алюмінію  $x$ , товщини шару  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , типу та концентрації легуючої домішки, що дало змогу встановити допустимі межі зміни цих параметрів, які забезпечують значення  $\eta = 20.2 \div 20.8\%$  при умовах АМ1.5 без спеціальної модифікації поверхні фотоперетворювача.

**Ключові слова:** сонячний елемент, арсенід галію, гетероперехід, оптимізація, моделювання, домішки.

PACS number(s): 71.15.-m, 72.40.+w, 73.20.Nb

### ВСТУП

Активний розвиток сонячної енергетики привів останніми роками до значного підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних елементів (СЕ) за рахунок значного ускладнення їхньої структури та спеціальних модифікацій і просвітлення поверхні фотоперетворювача [1]. При цьому, не зважаючи на те, що для найбільш використовуваних для СЕ базових напівпровідників іще не досягнуто максимальних значень коефіцієнтів ефективності СЕ [2], вартість таких "високо-ефективних" фотоперетворювачів значно перевищує вартість "звичайних". Подальше збільшення  $\eta$  можливе не тільки завдяки новим технологіям (наприклад, рідинно-фазової епітаксії), застосуванням концентрованого сонячного опромінення, але й за рахунок значного зменшення витрат енергії в СЕ шляхом "вилучення" "зайвих" механізмів рекомбінації за допомогою підбору типу та концентрації легуючої домішки, товщини шару широкозонного "вікна" [3]. Комп'ютерне моделювання належить до найдешевших методів розв'язання цієї важливої науково-технічної проблеми, оскільки порівняно просто дає змогу визначити найефективніші комбінації величин і типів керуючих параметрів та геометрії СЕ [3,4]. Ця стаття присвячена частковому розв'язанню проблеми оптимізації величин керуючих параметрів сонячного елемента на гетеропереході (ГП)  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ , який, завдяки усій сукупності властивостей GaAs, належить до найбільш вивчених і використовуваних у різних галузях науки та техніки [2,3]. Справді, арсенід галію порівняно з кремнієм має більший коефіцієнт оптичного поглинання та ширину забороненої зони, а також більшу рухливість носіїв заряду, що дає змогу створювати на його основі СЕ з теоретичним значенням  $\eta \approx 30\%$  в умовах АМ1 [2]. Використовувані на сьогодні СЕ на базі GaAs є різними модифікаціями ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [1] і мають величину  $\eta \approx 17\%$  в умовах

АМ1 [5]. При цьому здебільшого значення молярного складу  $x$  вибирають у межах  $x < 0.2$  або  $x > 0.7$  [1,6]. Результати проведеного нами моделювання з використанням пакета програм "Solar Cell Simulator" [7] показали, що шляхом вибору величини  $x$ , товщини шару  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , типу та концентрації легуючої домішки в арсеніді галію можна забезпечити значення  $\eta \approx 20.2 \div 20.8\%$  для ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при умовах АМ1.5 без модифікації структури його поверхні.

### ТЕОРІЯ

Розраховуючи ефективність СЕ структури ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , як базову вибирали модель Андерсона для різкого ГП [8]. При цьому приймалося, що "вбудоване" електричне поле локалізовано тільки в області просторового заряду (ОПЗ) поблизу контакту напівпровідників, а зміни концентрацій електронів і дірок при освітленні мають один порядок величин і не приводять до появи об'ємного заряду в усьому елементі. Оскільки тривалість життя нерівноважних електронів (із концентрацією  $n$ ) і дірок (із концентрацією  $p$ ) здебільшого значно перевищує тривалість діелектричної релаксації [9], то процеси перенесення струму можна звести до дифузії неосновних носіїв у квазінейтральних ділянках за рахунок градієнта їх концентрації. При зроблених наближеннях система вихідних рівнянь для одномірної польової моделі має вигляд [10]:

$$\frac{d^2 p(z)}{dz^2} = \frac{p - p_{n0}}{L_{pW}^2} - \frac{\Phi_0 \alpha_W}{D_{pW}} e^{-\alpha_W z}$$
$$\frac{d^2 n(z)}{dz^2} = \frac{n - n_{p0}}{L_{nA}^2} - \frac{\Phi_0 \alpha_A}{D_{nA}} e^{-\alpha_A W} e^{-\alpha_A (z - W)}. \quad (1)$$

У системі рівнянь (1) уведено такі позначення:  $\Phi_0$  — інтенсивність потоку світлових квантів на поверхні

СЕ,  $\alpha_{W,A}$  — коефіцієнти поглинання відповідної частини елемента (індекс  $W$  — для “вікна”  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , індекс  $A$  — для “поглиначча”  $\text{GaAs}$ ) для фіксованої довжини хвилі. За початок відліку системи координат  $z$  вибрано зовнішню межу “вікна”. У цьому випадку ОПЗ обмежена координатами  $W_W - w_n$  та  $W_A - w_p$ , де  $W_W$  та  $W_A$  є товщинами “вікна” та “поглиначча” відповідно. Величини  $w_n$  та  $w_p$  є глибинами проникнення ОПЗ в електронну та діркову частини переходу, які залежать від діелектричних проникливостей базових матеріалів, а також концентрацій власних домішок  $N_D$  та  $N_A$  [9]. Інші позначення в (1) загальноприйнятні (див., напр., [9,10]).

При врахуванні залежностей  $\alpha_{W,A}$  від довжини хвилі світловий потік розглядали як суперпозицію монохроматичних джерел з інтенсивністю, що відповідає розподілові спектра світла в умовах освітлення АМ1.5. [11]. Останнє, своєю чергою, давало змогу проводити розраховувати рекомбінаційні струми в СЕ залежно від концентрації легуючої домішки  $N_r$ , молярного складу  $x$  та відносної товщини “вікна”  $D_W = W_W/D_L$ , де  $D_L = W_W + W_A$  — загальна товщина ГП.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для забезпечення потрібної точності розрахунків рекомбінаційні струми обчислювали інтегруванням системи рівнянь (1) за методом Ньютона–Котеса п'ятого порядку [12] по 128 рівновіддаленим точкам у квазінейтральних ділянках “вікна” та “поглиначча” й окремо в ОПЗ через великі різниці у протяжностях цих ділянок. Достовірність результатів розрахунків контролювали виконанням вимог, щоб отримані вольт-амперні характеристики СЕ на основі ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , а також розраховані значення струму короткого замикання  $I_{sc}$ , напруги холостого ходу  $U_{oc}$ , фактора заповнення  $FF$  та ефективності (коефіцієнта корисної дії — ККД)  $\eta$  узгоджувалися з відповідними за вибором величин параметрів системи рівнянь (1) літературними даними.

Числові значення та молярні залежності параметрів  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  для інтегрування системи (1) брали з робіт [13–16]. Інтервал зміни значень  $x$  вибирали в межах  $0 < x < 0.4$ , для якого справедливо використовувати при розрахунках емпіричні співвідношення [16].

Перш ніж навести результати розрахунків, зауважимо, що новизна цієї роботи полягає й у тому, що (на відміну від звичайного випадку низькоомного арсеніду галію [17]) робочим елементом вибрано майже високоомний  $n\text{-GaAs}$ , у якого концентрації власних дефектів  $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  і  $N_A = 2.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а легуюча домішка донорного типу з концентрацією  $N_r$  створює глибокий рекомбінаційний рівень поблизу середини забороненої зони матеріалу. При цьому загальну товщина СЕ визначали рядом умов, а саме: максимально можливим ступенем поглинання падаючого світлового потоку та мінімальним темпом рекомбінації в об'ємі напівпровідника, вона повинна бути

сумірно з дифузійною довжиною неосновних носіїв (в  $n\text{-GaAs}$  величина  $L_p \approx 30 \div 50 \mu\text{m}$  [13]). Згідно з проведеним аналізом, як легуючу домішку можна вибрати кисень, рівню залягання якого відповідає енергія  $E_c - 0.79 \text{ eV}$  [14] або  $E_c - 0.69 \text{ eV}$  [15]. Така велика розбіжність між цими величинами, на думку авторів [18], зумовлена впливом можливих побічних ефектів, які не враховуються при аналізі експериментальних результатів (гальвано-магнітних, резонансних тощо). Для визначеності при розрахунках приймали, що рівню кисню в  $n\text{-GaAs}$  відповідає енергія  $E_c - 0.69 \text{ eV}$ .

На рис. 1 показано залежність ККД СЕ  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  від концентрації легуючої домішки  $N_r$  та молярного складу твердого розчину  $x$ , розраховану при  $T = 300 \text{ K}$ . Видно, що характер залежності  $\eta(x)$  зберігається при фіксованих  $N_r < 9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а для  $N_r \geq 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  — величина ККД нелінійно зменшується зі зростанням  $N_r$ . При цьому існує критичне значення  $N_r = N_D$ , з перевищенням якого система (1) перестає інтегруватися. Важливо, що величина  $\eta$  при  $0.28 < x < 0.30$  та  $N_r < 9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  сягає 20.8%. Поза цим інтервалом ефективність СЕ нелінійно і досить різко зменшується зі зміною складу  $x$ .

Результати розрахунків засвідчують, що при фіксованій величині  $N_r < 9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  струм короткого замикання  $I_{sc}$  та фактор заповнення  $FF$  плавніше повторюють залежність  $\eta(x)$ , у той час як напруга холостого ходу  $U_{oc}$  СЕ  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  повільно зростає на проміжку  $x = 0.0 \div 0.1$ , а потім виходить на насичення  $U_{oc} = 0.87 \text{ V}$ . При цьому для  $0.28 < x < 0.30$  розрахункова величина  $FF \approx 0.85$ .

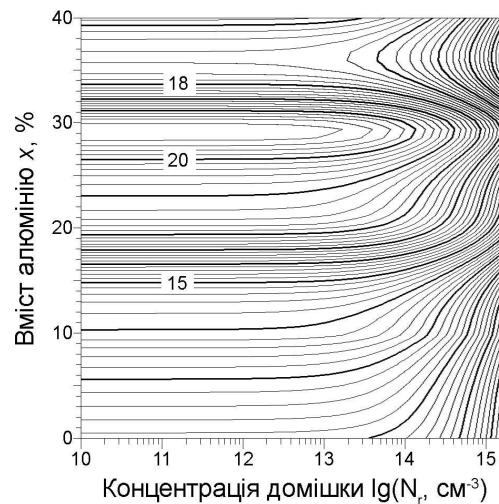


Рис. 1. Залежності коефіцієнта  $\eta$  сонячного елемента  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  від  $x$  та концентрації центрів рекомбінації  $N_r$ .

Залежності  $\eta$  ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  від відносної товщини “вікна”  $D_W$  та молярного складу  $x$  зображено на рис. 2. Видно, що при  $x < 0.20$  і  $x > 0.31$  величина  $\eta$  швидко змінюється зі збільшенням  $D_W$ . При цьому для  $0.1 > D_W > 0.006$  і, зокрема, для товщин “вікна”  $0.37 \mu\text{m} > W_W > 0.30 \mu\text{m}$  та  $x = 0.29$  величина  $\eta$  приймає максимальне значення в 20.2%. Зауважи-

мо, що саме такі товщини  $W_W$  використовують у сучасних багатошарових СЕ на основі  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  [3]. Важливо, що загальна товщина  $D_L$  досліджуваного одинарного ГП при розрахованих оптимальних значеннях  $W_W$  збігається з дифузійною довжиною дірок у  $n\text{-GaAs}$ , а тому високоомність базового матеріалу не має критичного впливу на величину ККД цього СЕ.

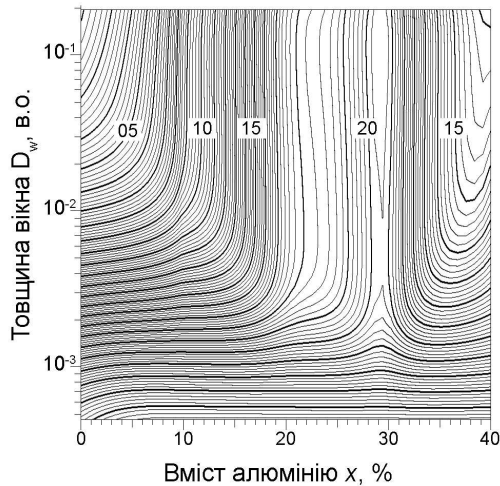


Рис. 2. Залежності коефіцієнта  $\eta$  сонячного елемента  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  від  $x$  та  $D_W$ .

Оскільки останніми роками досить інтенсивно досліджують підвищення ефективності роботи СЕ в умовах концентрованого сонячного випромінювання, ми також розраховували залежності параметрів досліджуваного ГП  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  від ступеня концентрації випромінювання. Виявилось, що при  $T = 300\text{ K}$  і концентрації освітленості  $K_c = 1000$  сонячних світил величина  $\eta$  зростає від 20.2% до 27.7%. Зауважимо, що авторам праць [3,19], завдяки оптимізації структури СЕ та спеціальним прозорим полімерним покриттям, удалося отримати рекордне значення

$\eta = 25\%$  для 5-ти шарової структури СЕ  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при  $T = 300\text{ K}$  і  $K_c = 1000$ . Подібні результати наведено також у працях [1,20].

## ВИСНОВОК

У статті показано, що коефіцієнт корисної дії СЕ  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в умовах АМ1.5 можна без модифікації поверхні фотоперетворювача довести до граничного значення  $\eta = 20.2\text{--}20.8\%$ , якщо як робочий елемент на відміну від традиційного підходу, використовувати високоомний  $n\text{-GaAs}$  із концентрацією власних дефектів  $N_D \approx 5 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$  і  $N_A \approx 2.3 \cdot 10^{16}\text{ cm}^{-3}$  при цілеспрямованому легуванні домішкою донорного типу, що створює глибокий рекомбінаційний рівень поблизу середини забороненої зони матеріалу, наприклад, киснем. Установлено допустимі межі зміни молярного вмісту алюмінію  $x$ , товщини шару  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  та концентрації легуючої домішки кисню, які для СЕ  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на основі високоомного  $\text{GaAs}$  забезпечують поліпшену ефективність його фотоперетворення. Цей результат важливий для розробників сонячних елементів новітнього покоління з підвищеними значеннями експлуатаційних параметрів. Продемонстровано також, що створений відповідно до сьогоденних потреб сонячної енергетики програмний продукт [7] дає змогу моделювати властивості СЕ при наявності концентрованого сонячного випромінювання, отримуючи результати, адекватні експериментальним даним.

## ПОДЯКИ

Автори висловлюють вдячність проф. П. М. Горлею за цінні консультації та плідне обговорення результатів роботи.

- [1] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovolt. Res.Appl. **15**, 425 (2007).
- [2] Е. А. Андрюшин, А. П. Силин, Усп. физ. наук **161**, 129 (1991).
- [3] Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев, Физ. техн. полупр. **38**, 937 (2004).
- [4] А. В. Савченко, А. П. Горбань, В. П. Костылев, А. А. Серба, И. О. Соколовский, Физ. техн. полупр. **41**, 1231 (2007).
- [5] Е. Б. Заверюхина, Н. Н. Заверюхина, Л. Н. Лезилова, Б. Н. Заверюхин, В. В. Володарский, Р. А. Мунинов, Письма журн. тех. физ. **31**, 54 (2005).
- [6] Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, Д. З. Гарбузов, В. Р. Ларионов, В. Д. Румянцев, В. Б. Халфин, Физ. техн. полупр. **11**, 1765 (1977).
- [7] П. П. Горлей, О. А. Червінський, Сенсорна електроніка та мікросистемні технології **4**, 16 (2007).
- [8] A. Farenbruch, R. Vube, *Fundamentals of Solar Cells* (Academic Press, New York, 1983).
- [9] S. M. Sze, *Modern Semiconductor Device Physics* (J.Wiley & Sons, New York, 1998).
- [10] В. В. Сердюк, *Фізика сонячних елементів* (Логос, Одеса, 1994).
- [11] R. Hulstorm, R. Bird, C. Riordan, Solar Cells. **15**, 365 (1985).
- [12] T. E. Shoup, *Applied numerical methods for the microcomputer* (Prentice Hall, 1984).
- [13] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/index.html>
- [14] А. Милнс, *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (Мир, Москва, 1977).
- [15] В. И. Фистуль, *Атомы легирующих примесей в полупроводниках (состояние и поведение)* (Физ.-мат. лит-ра, Москва, 2004).
- [16] D. E. Aspnes, Surface Sci. **132**, 406 (1983).
- [17] Б. Л. Шарма, Р. К. Пурохит, Полупроводниковые ге-

- теропереходы (Сов. радио, Москва, 1979).
- [18] М. В. Симакин, В. В. Остробородова, В. С. Вавилов, Физ. техн. полупр. **11**, 1738 (1977).
- [19] В. М. Андреев, В. П. Хвостиков, В. Р. Ларионов, В. Д. Румянцев, Е. В. Палеева, М. З. Шварц, Физ. техн. полупр. **33**, 1070 (1999).
- [20] H. F. MacMillan, H. C. Hamaker, N. R. Kaminar, M. S. Kuryla, M. Ladle Ristow, D. D. Liu, G. F. Virshup, in *20th IEEE Photovoltaic Specialist Conference* (1988), p. 462.

#### OPTIMIZATION OF HETEROJUNCTION SOLAR CELL $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

P. P. Horley<sup>1</sup>, O. A. Chervinsky<sup>1</sup>, Yu. V. Vorobiev<sup>2</sup>, J. Gonzalez-Hernandez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Yuri Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky Str., 58012 Chernivtsi, Ukraine*

<sup>2</sup>*CINVESTAV Unidad Queretaro, Libramiento Norponiente 2000, 76230 Queretaro, Mexico*

<sup>3</sup>*CIMAV, Miguel de Cervantes 120, 31109 Chihuahua, Mexico*

The paper presents some results of numerical studies concerning carrier transport processes in the heterojunction solar cell  $n\text{-GaAs}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . The authors optimized photovoltaic efficiency of the modeled device as a function of aluminum molar content  $x$ , window layer thickness, type and concentration of the doping impurity, which allowed to determine the ranges of control parameters required to ensure photovoltaic efficiency of  $20.2 \div 20.8\%$  under normal conditions for the cell without special surface modifications.