

Формування варізонної активної області фотоелектричного перетворювача на основі твердих розчинів AlGaAs модуляцією потоку триметилалюмінію в методі МОС-гідридної епітаксії

С.І. Круковський^{1,2*}, Г.А. Ільчук², Р.С. Круковський^{1,2}, І.В. Семків², Е.О. Змійовська², С.В. Токарев²

¹ НВП "ЕЛЕКТРОН-КАРАТ", вул. Стрийська, 202, 79031 Львів, Україна

² Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна

(Одержано 14.02.2018, опубліковано online 25.06.2018)

Представлено методику формування гетероструктури $n\text{GaAs}/p\text{AlGaAs}/p^+\text{GaAs}$ за допомогою методу МОС-гідридної епітаксії в температурному діапазоні 630-700 °С. Проведено дослідження розподілу концентрації носіїв заряду по товщині епітаксійних шарів $n\text{-GaAs}$ легованих кремнієм та концентрації AlAs по товщині шару твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Показано високу структурну досконалість отриманих епітаксійних шарів варізонної структури. Створено сонячний елемент з активною площею 1 см². Показано, значення коефіцієнта корисної дії ($\eta = 25,37\%$) отриманого сонячного елемента, що є вищим від такого значення для елементів на основі GaAs.

Ключові слова: AlGaAs, МОС-гідридна епітаксія, Варізонна структура.

DOI: [10.21272/jnep.10\(3\).03025](https://doi.org/10.21272/jnep.10(3).03025)

PACS numbers: 61.72.uj, 73.61.Ey, 81.15.Gh

1. ВСТУП

На сьогодні максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричних перетворювачів з одним $p\text{-}n$ переходом виготовлених на основі монокристалічних тонких гнучких плівок GaAs виготовлених фірмою Alta Devices становить 28,8 % [1], а ККД каскадних фотоперетворювачів на основі гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs вже перевищує 40 % [2]. Проте, поряд з цим провадиться низка робіт, по вдосконаленню існуючих та розробці різноманітних тонкоплівкових, кремнієвих чи фотоперетворювачів на основі органічних та інших матеріалів та дослідженню нових матеріалів з їх подальшою можливістю використання у таких перетворювачах [3-6]. Існує два основних критерії оцінки таких фотоперетворювачів з точки зору практичного використання. Першим є вартість одного вата генерованої електроенергії. І цей критерій застосовується для фотоперетворювачів наземного використання. Другий критерій це максимальна потужність, що досягається фотоперетворювачем в тому числі і при значних ступенях концентрації сонячної енергії. На сьогодні він є визначальним для сонячних батарей, що працюють в умовах космосу, або ж в апаратах спеціального призначення. Отже, враховуючи це є актуальним розробка технологічних способів виготовлення фотоперетворювачів на основі монокристалічних матеріалів, що здешевить їх вартість зберігаючи при цьому доволі високий ККД.

Відомо [7], що фотоелектричний перетворювач (ФЕП) на основі напівпровідникової структури з одним $p\text{-}n$ переходом може перетворювати в електричну енергію тільки певний енергетичний діапазон сонячного спектру, енергія фотонів якого є рівною, або ж більшою від ширини забороненої зони активної області напівпровідникового матеріалу. Фотони з меншою енергією поглинаються активною областю напівпровідникової структури без фотогенерації носіїв заряду.

Збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) ФЕП можна досягнути, якщо розширити спектральний діапазон сонячного світла, що спричиняє фотогенерацію носіїв заряду в області $p\text{-}n$ переходу. Для цього необхідно розмістити один над одним два або більше $p\text{-}n$ переходів із напівпровідникових матеріалів з різною шириною забороненої зони (E_g) [8-9]. Щоб кожен із $p\text{-}n$ переходів здійснював ефективне перетворення сонячного світла певної ділянки спектру, необхідно, щоб ширина забороненої зони напівпровідника верхнього $p\text{-}n$ переходу була більша від ширини забороненої зони напівпровідника нижнього $p\text{-}n$ переходу. Крім того, для зменшення омичних втрат кожен із робочих $p\text{-}n$ переходів з'єднується тунельним діодом, що суттєво ускладнює технологію виготовлення цих структур. Істотним їх недоліком є необхідність в підборі матеріалів, з яких виготовляються тунельні діоди. Оскільки, максимальний струм тунелювання падає із збільшенням ширини забороненої зони матеріалу, з якого виготовлений тунельний діод, то для сонячних елементів, що працюють при високих ступенях концентрації, необхідно зменшувати ширину забороненої зони матеріалу тунельного діода, а це погіршує узгодження між верхніми $p\text{-}n$ переходами каскадного фотоелектричного перетворювача.

Способом, що може вирішити проблему збільшення частотної смуги сонячного світла, яка поглинається із фотогенерацією носіїв, при обмеженні кількості робочих $p\text{-}n$ переходів, є виготовлення епітаксійних шарів у вигляді твердих розчинів із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку.

Нами поставлено задачу розробити спосіб отримання епітаксійної структури сонячного елемента, який забезпечував би підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних елементів за рахунок отримання активного фотогенеруючого шару у вигляді твердого розчину AlGaAs із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку.

* goro0609@gmail.com

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Кристалізація гетероструктури $n\text{-GaAs}/p\text{-AlGaAs}/p^+\text{-GaAs}$, схематичне зображення якої приведене на рис. 1, здійснювалась методом МОС-гідридної епітаксії при пониженому тиску на установці Discovery 180LDM.

<p>Контактний шар $p^+\text{-GaAs}$ $p^+ \sim (2-5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$</p>
<p>$p\text{-AlGaAs}$ $p \sim (6-8) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$</p>
<p>$n\text{-GaAs}$ $n \sim (1-3) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$</p>
<p>Підкладка $n^+\text{-GaAs}$ (100) $n^+ \sim (3-5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$</p>

Рис. 1 – Схематичне зображення гетероструктури $n\text{-GaAs}/p\text{-AlGaAs}/p^+\text{-GaAs}$ з активним фотогенеруючим шаром у вигляді твердого розчину AlGaAs із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку

Шари $n\text{-GaAs}$, $p\text{-AlGaAs}$, $p^+\text{-GaAs}$ кристалізувались на поверхні підкладок $n\text{-GaAs}$ з кристалографічною орієнтацією (100) в температурному діапазоні 630-700 °С. Співвідношення елементів п'ятої групи до елементів третьої становило 50-70.

В якості елементів третьої і п'ятої груп використовували триметилгалій (TMGa), триметилалюміній (TMA1), арсин (AsH_3), а як донорні та акцепторні домішки силан (SiH_4) (200 ppm у водні) та діетилцинк (DEZn) відповідно. Кількість триметилгалію (TMGa) в газовій суміші при нарощуванні шару $n\text{-GaAs}$ була постійною і становила $N_{\text{TMGa}} = 1,32 \cdot 10^{-4}$ моль/хв. Пари триметилалюмінію в зону реакції впродовж нарощування варізонного шару твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0-0,32$) подавались в імпульсному режимі з наростаючою амплітудою імпульсів потоку змінюючись від нуля до 10^{-4} моль/хв. Відстань між імпульсами була мінімальною, яку міг забезпечити мас-контролер потоку триметилалюмінію установки Discovery 180LDM, і становила 5 с. Швидкість нарощування твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при фіксованій температурі (700 °С) знаходиться в інтервалі (55-60) нм/хв.

Визначення профілів розподілу концентрації носіїв по товщині епітаксійних шарів проводилось з використанням С-V електропрофілометра Accent PN4300PC.

Омега скани епітаксійних структур отримували на високороздільному рентгенівському дифрактометрі X'Pert PRO MRD XL в лабораторії В.П. Кладька ІФП НАНУ (м. Київ).

Визначення ширини забороненої зони твердого розчину здійснювали з використанням фотолюмінесцентного картографа PHILIPS NANOMETRICS RPM2000.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Формування базового епітаксійного шару $n\text{-GaAs}$ проводилось у два етапи. На першому етапі легуван-

ня шару не здійснювалось, що давало можливість оцінити чистоту технологічного процесу. Епітаксійний нелегований шар товщиною 0,5 мкм кристалізувався на напівізолюючій підкладці $n^+\text{-GaAs}$ ($100 \pm 0,1^\circ$) ($\rho \geq 107 \Omega \text{ cm}$) фірми Wafer Technology [10], при ефективному потоці арсину 413 sccm. Він характеризувався дзеркальною морфологією поверхні та наступними електрофізичними параметрами:

$$n = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \mu = 4580 \text{ cm}^2/\text{V c} (300 \text{ K});$$

$$n = 2,3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}, \mu = 38950 \text{ cm}^2/\text{V c} (77 \text{ K}).$$

Значення отриманих параметрів відповідає середньостатистичним даними для епітаксійних шарів арсеніду галію одержуваних на установках МОС-гідридної епітаксії при пониженому тиску.

На другому етапі випрацьовувалось легування кремнієм епітаксійного шару $n\text{-GaAs}$. Для цього в єдиному технологічному процесі послідовно нарощувались два епітаксійних шари $n\text{-GaAs}$ легованих різними концентраціями кремнію. Співвідношення газових потоків елементів третьої та п'ятої груп становило 47,8. Потік дисилану в реактор, при нарощуванні першого шару становив – 3,2 мкМоль/хв, а при нарощуванні другого шару – 4,0 мкМоль/хв. На рис. 2 показаний, отриманий з використанням С-V електропрофілювання, профіль розподілу концентрації електронів в двох послідовно нарощених епітаксійних шарах $n\text{-GaAs}$ легованих різними концентраціями кремнію.

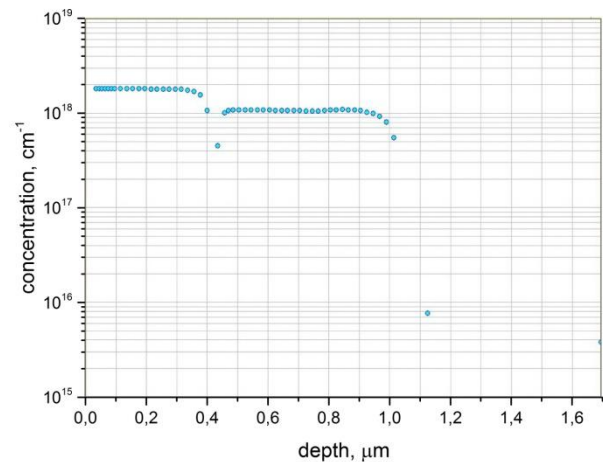


Рис. 2 – Профіль розподілу концентрації електронів в двох послідовно нарощених епітаксійних шарах $n\text{-GaAs}$ легованих різними концентраціями кремнію

Отримані результати забезпечують можливість кристалізації базових шарів з оптимальною для фотоелектричних перетворювачів концентрацією.

Наступним етапом формування епітаксійної структури фотоперетворювача був вибір технологічних параметрів кристалізації активного варізонного шару $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Вбудоване електричне поле в епітаксію шарі твердого розчину $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ забезпечує суттєве збільшення ефективної довжини дифузійного зміщення електронів в бік $p\text{-n}$ переходу і зменшення впливу поверхневої рекомбінації електрон-діркових пар генерованих поблизу поверхні епітаксійної структури короткохвильовою складовою сонячного світла.

При виборі величини градієнту складу твердого розчину в шарі $Al_xGa_{1-x}As$ виходили з наступних міркувань:

- дифузійна довжина електронів в шарах p -GaAs з концентрацією $\approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ становить приблизно 5 мкм [11], а в шарах твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ще менше (3-4 мкм) [7];
- розрахункова залежність струму короткого замикання при АМО від товщини шару p -GaAs у фотоелектричних перетворювачах на основі гетероструктур $nGaAs/pGaAs/pAl_xGa_{1-x}As$ для дифузійних довжин електронів 5 мкм досягає максимальних значення при товщинах p -GaAs рівних 0,5-1,5 мкм [7];
- враховувались технологічні можливості формування максимального градієнту твердих розчинів $Al_xGa_{1-x}As$ на товщинах 1-2 мкм методом МОС-гідридної епітаксії на установці D-180LDM.

На основі вище викладеного було визначено, що товщина варізонного шару повинна знаходитись в межах 0,8-1,2 мкм. Вміст AlAs на повинен перевищувати величину $x < 0,33$, оскільки при більших значеннях "x" твердий розчин $Al_xGa_{1-x}As$ стає непрямозонним, а в таких напівпровідниках умови фотогенерації значно погіршуються.

Згідно проведених нами розрахунків складу твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ від кількості парів триметилалюмінію в газовій фазі реактора та узгодження їх з попередніми експериментальними дослідженнями встановлено вид аналітичного виразу, що визначає часову залежність кількості парів триметилалюмінію, в зоні реакції необхідну для формування варізонного шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0-0,32$) на товщинах 0,8-1,2 мкм.

$$N_{TMAl} = -9,4 \cdot 10^{-7} + 2,9 \cdot 10^{-7} t + 1,1 \cdot 10^{-7} t^2, \quad (1)$$

де N_{TMAl} – кількість парів триметилалюмінію в газовій фазі реактора; t – час нарощування шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0-0,32$).

Саме за такої часової залежності газового потоку триметилалюмінію в газовій фазі реактора можна забезпечити оптимальну крутизну наростання вмісту AlAs при якій забезпечуються найбільш ефективні умови фотогенерації носіїв по всій товщині шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0-0,32$). Оптимальний розподіл концентрації AlAs по товщині шарів $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0-0,32$), приведений на рис. 3. Він отриманий при фіксованій витраті триметилгалію (TMGa) $N_{TMGa} = 1,32 \cdot 10^{-4}$ моль/хв в газовій фазі реактора.

Оцінка якості окремих епітаксійних шарів та гетероструктури в цілому проводилась з використанням високороздільної рентгенівської дифрактометрії. На рис. 4 приведені результати цих досліджень. Омга скани отримані від поверхні шару n -GaAs на підкладці фірми Wafer technology (синя лінія) та від двошарової епітаксильної структури (n^+ -GaAs (100) \ $nGaAs:Si/p-AlGaAs:Zn$) (червона лінія).

Епітаксійний шар n -GaAs, сформований на поверхні підкладки фірми Wafer technology, має ідеальну структуру з майже теоретично досяжною межею напівширини лінії відбивання (8,4 с). Високу структурну досконалість має також і двошарової епітаксильна

структура незважаючи на присутність гетерограниці між шарами n - та p -типу провідності.

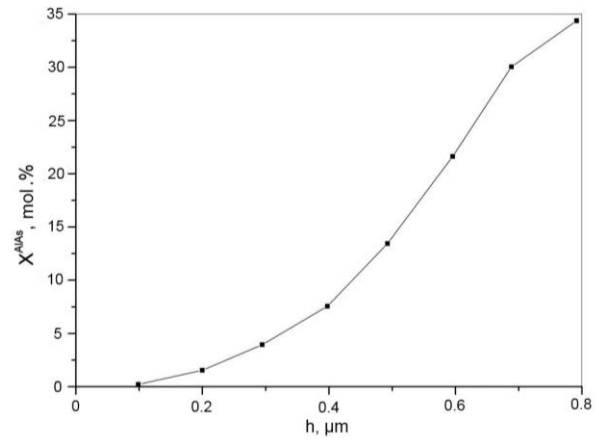


Рис. 3 – Профіль розподілу концентрації AlAs по товщині шару твердого розчину $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0-0,32$) в гетероструктурі GaAs/AlGaAs

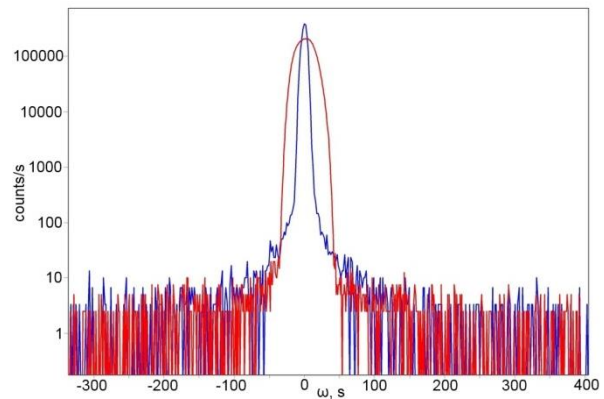


Рис. 4 – Омга скани отримані на високороздільному рентгенівському дифрактометрі: синя лінія - від поверхні шару n -GaAs на підкладці фірми Wafer technology; червона - від двошарової епітаксильної структури (n^+ -GaAs (100) \ $nGaAs:Si/p-AlGaAs:Zn$)

Контактний шар p^+ -GaAs, що формувався в складі гетероструктури $nGaAs/pAlGaAs/p^+GaAs$ легувався діетилцинкам. Його товщина становила 0,2-0,3 мкм, а концентрація дірок – $(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На основі виготовлених таким способом гетероструктур $nGaAs/pAlGaAs/p^+GaAs$ з активним фотогенеруючим шаром у вигляді твердого розчину p -AlGaAs із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку були виготовлені сонячні елементи. У якості металізації до n^+ -GaAs підкладки використовувалось Au-Ge, а до p^+ -GaAs відповідно Au-Zn покриття нанесене магнетронним розпиленням. Активна площа сонячних елементів становила приблизно 1 см^2 . На поверхні структури створювалось антивідбиваюче захисне покриття із SiO_2 .

На рис. 5 показані усереднена вольт-амперна характеристика отримана від партії із 5 шт. сонячних елементів, виготовлених на основі епітаксійних структур з активним фотогенеруючим шаром у вигляді твердого розчину із наростаючою шириною забороненої зони до напрямку світлового потоку.

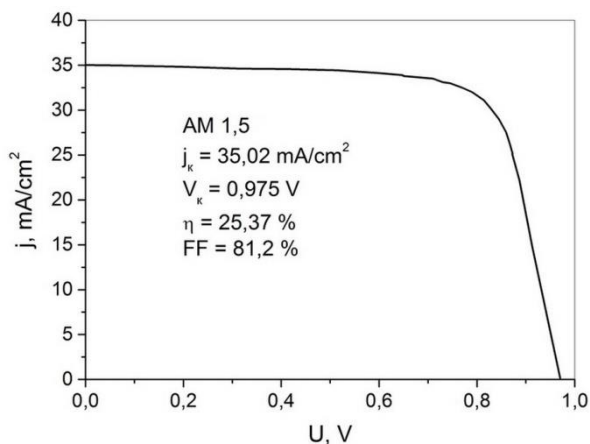


Рис. 5 – Усреднена вольт-амперна характеристика отримана на основі партії із 5 шт. сонячних елементів, виготовлених на основі епітаксійних структур $n\text{GaAs}/p\text{AlGaAs}/p^+\text{GaAs}$

Слід зазначити, що досягнуте значення коефіцієнта корисної дії є вищим від того, яке досягається промисловими сонячними елементами виготовленими на основі GaAs епітаксійних структур з одним p-n переходом без варизонного активного шару (25,1 %) [1]. Формування на поверхні підкладки брегівського дзеркала перед нарощуванням епітаксійної структури $n\text{GaAs}/p\text{AlGaAs}/p^+\text{GaAs}$ з активним варизонним шаром, а також використання антивідбиваючого комбінованого покриття на основі $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ дозволить істотно підвищити ККД сонячних елементів із варизонним активним шаром.

Використання високопродуктивного методу МОС-гібридної епітаксії для формування епітаксійних структур з активним варизонним фотогенеруючим шаром у вигляді твердого розчину $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0$,

0,32), із наростаючою шириною забороненої зони до поверхні епітаксійної структури, забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних елементів у порівнянні із тими структурами в яких p-n перехід виготовлений на основі матеріалів з однаковою шириною забороненої зони.

4. ВИСНОВКИ

Відпрацьовані технологічні режими отримання гетероструктури $n\text{GaAs}/p\text{AlGaAs}/p^+\text{GaAs}$ методом МОС-гібридної епітаксії. Епітаксійний нелегований шар n-GaAs кристалізований на напівізолюючій підкладці $n^+\text{GaAs}$ (100) при потоці арсину 413 sccm характеризується параметрами $n = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu = 4580 \text{ cm}^2/\text{V s}$ (300 K) та $n = 2,3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $\mu = 38950 \text{ cm}^2/\text{V s}$ (77 K). Легування епітаксійного шару n-GaAs кремнієм проводилось нарощуванням двох епітаксійних шарів n-GaAs легованих різними концентраціями кремнію. Профіль розподілу концентрації електронів показав можливість формування шарів з оптимальною для ФЕП концентрацією домішок. З'ясовано, що оптимальна товщина активного варизонного шару $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ повинна становити 0,8-1,2 мкм з вмістом AlAs – $x < 0,33$. Для формування такого варизонного шару твердого розчину необхідна кількість парів триметилалюмінію становить $N_{\text{TMAI}} = -9,4 \cdot 10^{-7} + 2,9 \cdot 10^{-7} t + 1,1 \cdot 10^{-7} t^2$. За допомогою високороздільної рентгенівської дифрактометрії показано, що отримані епітаксійні шари мають високу структурну досконалість. На основі отриманих структур було створено сонячний елемент з активною площею 1 cm^2 . Дослідження вольт-амперних характеристик показало, що отримане значення корисної дії становить $\eta = 25,37 \%$, що є кращим порівняно з сонячними елементами на основі GaAs структур.

Формирование варизонной активной области фотоэлектрического преобразователя на основе твердых растворов AlGaAs модуляцией потока триметилалюминия в методе МОС-гибридной эпитаксии

С.И. Круковский^{1,2}, Г.А. Ильчук², Р.С. Круковский^{1,2}, И.В. Семкив², Е.О. Змийовська², С.В. Токарев²

¹ НПП “ЭЛЕКТРОН-КАРАТ”, ул. Стрийская, 202, 79031 Львов, Украина

² Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С.Бандэры, 12, 79013 Львов, Украина

Представлена методика формирования гетероструктуры $n\text{GaAs}/p\text{AlGaAs}/p^+\text{GaAs}$ с помощью метода МОС-гибридной эпитаксии в температурном диапазоне 630-700 °С. Проведено исследование распределения концентрации носителей заряда по толщине эпитаксиальных слоев n-GaAs легированных кремнием и концентрации AlAs по толщине слоя твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Показано высокое структурное совершенство полученных эпитаксиальных слоев варизонной структуры. Создан солнечный элемент с активной площадью 1 cm^2 . Показано значение коэффициента полезного действия ($\eta = 25,37 \%$) полученного солнечного элемента, которое является выше такого значения для элементов на основе GaAs.

Ключевые слова: AlGaAs, МОС-гибридная эпитаксия, Варизонная структура.

Formation of Graded-Gap Active Region of the Photoelectric Converter Based on AlGaAs Solid Solutions by Trimethylaluminium Flow Modulation in the MOC Vapour Deposition Method

S.I. Krukovskiy^{1,2}, H.A. Ilchuk², R.S. Krukovskiy^{1,2}, I.V. Semkiv², E.O. Zmiiivska², S.V. Tokarev²

¹ "ELECTRON-CARAT" Scientific-Research Company, 202, Stryyska Str., 79031 Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera Str., 79013 Lviv, Ukraine

The method of formation of nGaAs/pAlGaAs/p⁺GaAs heterostructure by the MOC vapour deposition method in the temperature range of 630-700 °C is presented. The investigation of the charge carrier concentration dependence on the thickness of the n-GaAs epitaxial layers doped with silicon and AlAs concentration dependence on the thickness of the Al_xGa_{1-x}As solid solution layer was carried out. The high structural perfection of the obtained epitaxial layers of the graded-gap structure is shown. A solar cell with an 1 cm² active area is created. It is shown that the value of the efficiency coefficient ($\eta = 25,37\%$) of the obtained solar elements is higher than this one for solar elements based on GaAs.

Keywords: AlGaAs, Metalorganic chemical vapour deposition (MOCVD), Graded-Gap Structure.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **16**, 61 (2008).
2. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **24**, 905 (2016).
3. I. Semkiv, H. Ilchuk, M. Pawlowski, V. Kusnez, *Opto-Electron. Rev.* **25** No 1, 37 (2017).
4. A.V. Franiv, A.I. Kashuba, O.V. Bovgyra, O.V. Futey, *Ukr. J. Phys.* **62** No 8, 679 (2017).
5. G.A. Il'chuk, V.V. Kusnez, V.Y. Rud', Y.V. Rud', P.Y. Shapowal, R.Y. Petrus', *Semiconductors* **44** No 3, 318 (2010).
6. A.I. Kashuba, Ya.A. Zhydachevskyy, I.V. Semkiv, A.V. Franiv, O.S. Kushnir, *Ukr. J. Phys. Opt.* **19** No 1, 1 (2018).
7. В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев, *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л.: Наука: 1989) (V.M. Andreyev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev, *Fotoelektricheskoye preobrazovaniye kontsentririvannogo solnechnogo izlucheniya* (L.: Nauka: 1989)) [In Russian].
8. P. Asbeck, *J. Appl. Phys.* **48**, 820 (1977).
9. V. Badescu, P.T. Landsberg, *Semicond. Sci. Tech.* **8**, 1267 (1993).
10. М.М. Вакив, С.И. Круковский, Ю.Е. Николаенко, Р.С. Круковский, В.Р. Тимчишин, Н.Я. Сьворотка, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре* **2**, 10 (2010) (M.M. Vakiv, S.I. Krukovskiy, Yu.Ye. Nikolayenko, R.S. Krukovskiy, V.R. Timchishin, N.Ya. Syvorotka, *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* **2**, 10 (2010)) [In Russian].