

С.П. Новосядлий, С.М. Марчук, В.М. Варварук, Л.В. Мельник

Конструкторсько-технологічні аспекти формування структур сонячних елементів (СЕ) на кремнієвих епітаксійних структурах (КЕС)

*Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна, E-mail: fcss@pu.if.ua*

Досліджено параметри та характеристики структур СЕ, виготовлених на основі епітаксійних структур кремнію. Представлено систему: активована бором чи фосфором кремнієва підкладка і епітаксійний шар, який співпадає з підкладкою за типом провідності.

Ключові слова: сонячні елементи (СЕ), кремнієві епітаксійні структури (КЕС), епітаксійна технологія.

Стаття поступила до редакції 11.06.2013; прийнята до друку 15.12.2013.

Вступ

Одна із головних задач сучасної геліотехніки – це зниження вартості фотоелектричних перетворювачів, а саме сонячних елементів (СЕ). Для її вирішення необхідно:

1. знизити вартість вихідного напівпровідникового матеріалу;
2. спростити і здешевити при цьому технологію формування структур СЕ;
3. підвищити ефективність роботи СЕ, збільшуючи їх ККД до рівня $\geq 20\%$.

Із напівпровідникових матеріалів, які сьогодні використовують для виготовлення СЕ, найбільш широке використання отримав монокристалічний кремній, який використовується в ролі бази і є несучим елементом конструкції фотоперетворювача. Але технологія отримання монокристалічного кремнію із заданими електрофізичними параметрами характеристиками є дуже дорогою операцією, яка вимагає застосування високотемпературних прецизійних процесів ($>1400^\circ\text{C}$) та використання спеціального технологічного обладнання, матеріалів і газів особливої чистоти. Вирощування зливків монокремнію сьогодні здійснюють двома високотехнологічними методами: методом Чохральського і зонної плавки.

Широке використання СЕ сьогодні вимагає розширити номенклатуру та підвищити параметри структур СЕ, а саме: напругу холостого ходу, струм короткого замикання, характеристику заповнення та коефіцієнт корисної дії. В даній статті подається матеріал, який вказує на модернізацію технології

формування структур СЕ, коефіцієнта техніко-економічних показників структур СЕ, а саме, використовуючи кремнієві епітаксійні структури.

I. Технологія формування структур СЕ

Дана робота присвячена дослідженню параметрів та характеристик структур СЕ, виготовлених на основі епітаксійних структур кремнію (КЕС), які представляють собою систему: активована бором чи фосфором кремнієва підкладка і епітаксійний шар, який співпадає з підкладкою за типом провідності – це так звана базова конструкційна технологія епіросту є як високотемпературною ($>900^\circ\text{C}$), так і низькотемпературною ($<500^\circ\text{C}$). В такій конструкції монокристалічному кремнію відводиться в основному роль несучого елемента, що дозволяє знизити вимоги до чистоти і досконалості монокристалу, тобто використовувати недорогі монокристали сонячного кремнію. Одночасно в такому варіанті дуже спрощується задача створення типового омичного контакту. Зокрема, при виготовленні вихідного зливка монокристалу кремнію може бути виключена операція глибокої очистки, якщо у вихідній сировині переважає вміст тих донорних або акцепторних домішок, які визначають тип провідності епітаксійної плівки. Операція спеціального легування в такому випадку також спрощується, бо вона зводиться до введення максимальних концентрацій однієї або певного набору донорних чи акцепторних домішок.

Сильно легований кремній, який не проходить епітаксійної очистки зонною плавкою (так званий металургійний кремній), більш ніж на 2 порядки дешевший того кремнію, який сьогодні використовується для виготовлення СЕ з високим ККД (>20%).

Формування базової області в епішарі тут зводиться до вирощування плівки з питомим опором 0,2-10 Ом·см, що не представляє складності при використанні процесів осадження із газової фази і допускає застосування реагентів без їх глибокої очистки (особливої чистоти) з вмістом домішок 10^{-4}.

Епітаксійна технологія є ще привабливою тим, що дозволяє отримувати зверхчисті шари без вмісту ізоконцентраційних домішок кисню і вуглецю. Крім цього, застосування методів як високо- так і низькотемпературного епітаксійного нарощування доцільно ще тому, що можна сумістити в єдиному технологічному мікроциклі послідовно отримання базової області СЕ і високолегованого (>math>10^{19}</math> см⁻³) тонкого ізотипного n⁺- чи p⁺-шару. Явище автолегування, яке має місце при осадженні шарів на сильнолегованих підкладках, є пагубним при формуванні структур інтегральних схем і напівпровідникових діодів чи транзисторів, є вже досить корисним при виготовленні структур СЕ. Класичне автолегування проникнення домішки з підкладки в епішар приводить до виникнення вмонтованого електричного поля в базі СЕ поблизу металургійної межі, що спричиняє легування n⁺- і p⁺-шарів (тонких і високолегованих) використовують імплантатори багатозарядних іонів (B⁺⁺, P⁺⁺, As⁺⁺), що виключає розмиття дифузійних концентраційних профілів. [1]

Епітаксійні структури p-p⁺- і n-p⁺-типів можуть бути також отримані в хлоридному процесі, реалізованому у вертикальних реакторах установки УНЕС-2П-КА або "Епіквар-121-МТ" із графітовим п'єдесталом під завантаження 8 чи 16 підкладок використовувались пластини кремнію, леговані бором або фосфором до концентрацій 3·10¹⁸-3·10²⁰ см⁻³, орієнтовані як в площині (111), так і (100). Необхідну величину питомого опору епітаксійних шарів забезпечувалось введенням в газову суміш SiCl₄, диборану Si₂H₆ або фосфіну PH₃. [2]

Температуру епітаксії можна значно знизити (500°C), використавши процес низькотемпературної НВЧ-плазмової епітаксії в реакторах електронно-циклотронного резонансу (ЕЦР), який легко реалізується на установках типу GIR-820. Тут використовують силановий (дисилановий) процес епітаксійного росту з одночасним легуванням епішарів бором чи фосфором.

II. Параметри і характеристики СЕ

Параметри отриманих епітаксійних шарів вимірювали за стандартними методиками: товщину методом декорування шарового шліфа, питомий опір

– по тесовим структурам, які формувались на КЕС, виготовлених на Si-підкладках КДБ-10 чи КЕФ-20 орієнтацій (111) та (100). [3]

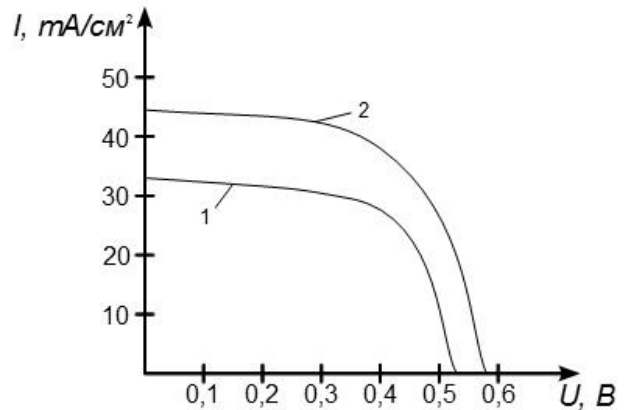


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики сонячних елементів на основі епіплівки Si із структурою p-p⁺ при освітленості в умовах АМО: 1 – для КЕС, сформованій на установці УНЕС-2ПКА; 2 – для КЕС, сформованих в НВЧ-реакторі ЕЦР.

Із Si-підкладки p-типу з питомим опором $\rho = 0,001$ Ом·см товщиною 350 мкм, та епітаксійної плівки p-типу з опором $\rho = 4$ Ом·см товщиною 6 мкм були виготовлені структури СЕ без просвітлюючого покриття. На поверхні епітаксійного шару формувался p-n-перехід в результаті імплантації фосфору (P⁺⁺) на глибину 0,35-0,55 мкм, шаровий опір такого n⁺-шару складав 25-40 Ом/□. Після нанесення контактів на тильну та фронтальну сторону пластин вирізають елементи фотоперетворювачів площею 10x20 мм². [4]

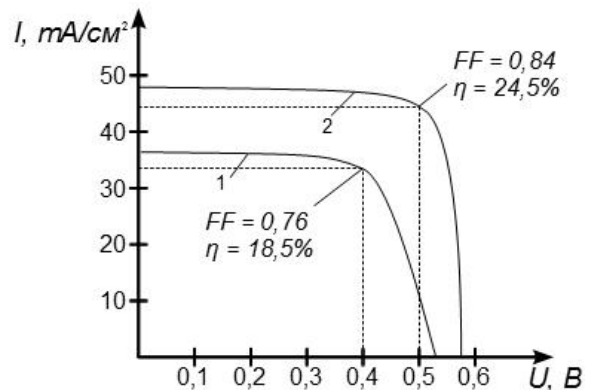


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики сонячних елементів при освітленості вольфрамовою лампою із світловим потоком 55 Вт/см² (лабораторний імітатор), сформованих на КЕС типу p-p⁺ в хлоридному високотемпературному процесі (1) і силановому низькотемпературному процесі (2).

Типова для всіх елементів навантажувальна характеристика, яка заміряна під імітатором сонячного випромінювання на основі вольфрамової лампи в умовах АМО при інтенсивності світлового

поток 1360 Вт/м^2 приведена на рис. 1 Коефіцієнт заявленої характеристики СЕ складає $FF = 0,76$ при ККД $\eta = 18,5\%$ для КЕС, виконаних на установці УНЕС-2ПКА і $0,84$ при ККД $\eta = 24,5\%$ для КЕС, виконаних в НВЧ-реакторі ЕЦР. Якщо врахувати, що при нанесенні просвітлюючого покриття ІТО ($\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}_z$) можна підвищити ККД СЕ на 25-30%, то ККД СЕ в цьому випадку може досягти значень 23% та 32%.

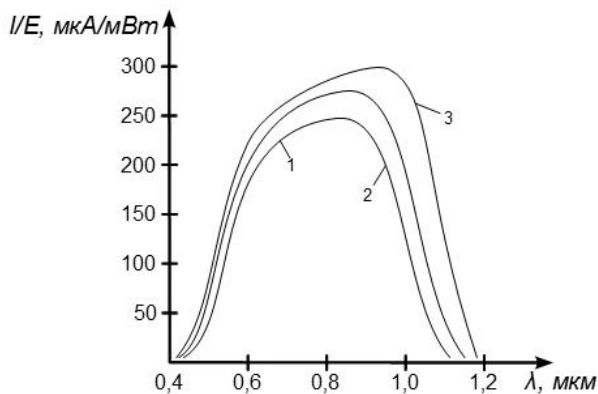


Рис. 3. Спектральна чутливість СЕ: 1 – на моно-Si-підкладках утонення товщиною 320 мкм; 2 – на основі епішару із структурою p-p⁺ без утонення підкладки; 3 – на основі епішару із структурою p-p⁺ з утоненням підкладки до 250 мкм.

На рис. 2 приведені навантажувальні характеристики СЕ при освітленості вольфрамовою лампою з інтенсивністю світлового потоку всього 55 мВт/см^2 . Просвітлююче покриття наносилось щоб не спотворювати спектральної чутливості СЕ, характеристика якого приведена на рис. 3 і яка вимірювалась на монохроматорі МДР-3. Виготовлені СЕ мали ізотипний типовий контакт p-p⁺, а для порівняння елемент №3 відрізнявся від елементів №1 і №2 тим, що обернена сторона Si-підкладки стравлювалась на товщину 150 мкм до нанесення тонкого контакту.

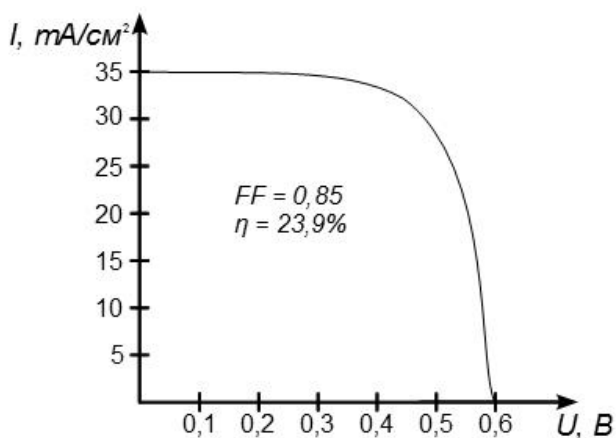


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика СЕ на основі КЕС типу n-p⁺ при освітленості імітатором в умовах АМО із просвітлюючим покриттям.

Так як у високолегованій Si-підкладці (n- чи p-типу) проходить досить повне поглинання довгохвильового випромінювання на вільних носіях заряду, то зменшення товщини підкладки до 250 мкм приводить до збільшення чутливості СЕ в довгохвильовій області спектра за рахунок відбивання від тильного контакту (його роблять V-подібним або U-подібним) і поглинання в базі під час зворотнього ходу. На рис. 3 приведена також спектральна чутливість СЕ виготовленого із кристалічного кремнію p-типу з $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ товщиною 250 мкм, який має ККД 24%.

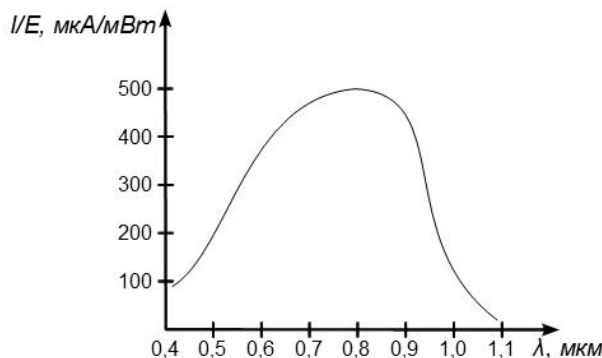


Рис. 5. Спектральна чутливість СЕ на основі КЕС із структурою n-p⁺-типу та просвітленням.

Для виготовлення СЕ можна використовувати також епітаксійні структури n-p⁺ із наступними параметрами: сильнолегована фосфором кремнієва підкладка з концентрацією домішки $(1-8) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ товщиною після утонення 250 мкм та епітаксійний шар з питомим опором (4-10) Ом·см товщиною 4-10 мкм. На рис. 4 і 5 приведені навантажувальна та спектральна характеристика сформованих за такою технологією структур СЕ. На ці елементи наносилось просвітлююче покриття ІТО. Як за ККД, так і спектральній чутливості вони не відрізняються від структур СЕ, виготовлених на КЕС типу p-p⁺, хоча і мали меншу товщину епішару з утоненням. [5]

Висновки

1. Кремнієві епітаксійні структури p-p⁺ і n-p⁺-типів можуть бути використані для формування високоефективних сонячних елементів на основі p-n-переходу та бар'єрів Шотткі.
2. Для формування якісних КЕС (без вмісту кисню і вуглецю) слід використовувати низькотемпературну епітаксію в НВЧ-плазмових реакторах (ЕЦР).
3. Спектральна чутливість СЕ на основі епітаксійних структур може бути значно збільшена (в 1,5-2 рази) за рахунок утонення підкладок до товщини 220-250 мкм.
4. Формування якісних p-n-переходів з малим коефіцієнтом $n = 1,05-1,1$ (низьким рівнем генераційно-рекомбінаційних процесів)

забезпечується багатозарядною іонною імплантацією бора (B^{++}) та фосфора (P^{++}).

5. Високий рівень збирання носіїв заряду

забезпечується оптимальною контактною гребінкою, сформованою на основі алюмінієвого сплаву алюміній-кремній-гольмій на АКГо-1-1.

- [1] K. Chopra, S. Dak. Tonkoplenochnye solnechnye jelementy. Per s ang. pod. red. M.M. Koltuna. (Mir, Moskva, 1986, 440 s).
- [2] V.I. Striha, S.S. Kul'chickaja. Solnechnye jelementy na osnove kontakta metall-poluprovodnik (Jenergoatomizdat, Sankt-Peterburg, 1992, 135 s).
- [3] S.P. Novosjadlij, P.I. Mel'nik, R.I. Zapuhljak. Fiziko-tehnologichni osoblivosti formuvannja struktur SE na osnovi p-n-perehodiv (Metalofizika i novitni tehnologii, 2003, T25, №3, s. 333-352).
- [4] Patent na korisnu model' "Sposib виготовлення вискоєфективних сонячних елементів на монокремнії". №51487 МПК N01M8/05 2010 (Novosjadlij S. P., Vivcharuk V. M.).
- [5] M.A. Grean., A. W. Blakers. Advantages of metal-insulator-semiconductor structures for silicon solar cells (Solar Cells, 1983, v.8, N1, p. 3-16).

S.P. Novosyadlyy, S.M. Marchuk, V.M. Varvaruk, L.V. Melnyk

Design and Technological Aspects of SC Structures on Silicon Epitaxial Structures

*Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, E-mail: fcss@pu.if.ua*

Investigated parameters and characteristics of CE structures made from silicon epitaxial structures. Presented system: activated boron or phosphorus silicon substrate and epitaxial layer, which coincides with the substrate by type conductivity.

Keywords: solar cells (SC) silicon epitaxial structure (SES) epitaxial technology.