

© 2000 р. В.І. Горбулик, Б.М. Романюк*, Л.Ф. Політанський,
В.Г. Попов*, М.І. Ключ*, С.Г. Волков*

ОКБ "Рута", Чернівці

*Інститут фізики напівпровідників НАН України, Київ

ТЕХНОЛОГІЧНІ І КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ МОДУЛІВ СОНЯЧНИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ

Розроблено конструкцію і технологічний маршрут виготовлення конкурентноспроможних фотовольтаїчних перетворювачів сонячної енергії (сонячних елементів) на основі відносно низькоякісного дешевого кремнію (включаючи відходи мікроелектронного виробництва). Дана задача була вирішена за рахунок використання оригінальних технологій гетерування і нанесення алмазоподібної вуглецевої плівки в якості просвітлюючого і пасивуючого покриття. На основі виготовлених елементів сконструйовано і виготовлено модулі фотоперетворювачів різної потужності і проведено їх випробовування.

Construction and technological route for competitive solar energy converters (solar cells) production have been developed. The converters are based on relatively low quality and low cost silicon including wastes of microelectronics production. The task has been successfully solved due to application of original technologies of gettering treatments and deposition of antireflection and passivating diamond like carbon films. Modules of photovoltaic converters of various power and based on the developed solar cells have been constructed, fabricated, and tested.

Створення ефективних напівпровідникових фотовольтаїчних перетворювачів сонячної енергії потребує розв'язання чотирьох основних завдань:

1. Виготовлення кремнієвого матеріалу з відповідними параметрами, які мають бути стабільними як у процесі виготовлення сонячних елементів (СЕ), так і у процесі їх експлуатації;
2. Розробка конструкції СЕ, що відповідає найбільшій ефективності фотоперетворення;
3. Розробка оптимального технологічного процесу виготовлення СЕ;
4. Розробка надійної конструкції модуля сонячної батареї (СБ).

Вирішення цих завдань має на меті отримання стабільних джерел екологічно чистої енергії з низькою собівартістю. При цьому необхідно добиватися високої ефективності СЕ, але разом з тим прагнути, щоб вартість матеріалу і технологічного процесу не збільшувалась. Це забезпечить конкурентоспроможність СБ порівняно з традиційними джерелами енергії.

Нами був створений технологічний маршрут виготовлення сонячних фотоелементів з ефективністю 12-15% при використанні відносно низь-

коякісного (дешевого) кремнієвого матеріалу. Оригінальність такого маршруту забезпечується рядом технологічних операцій, які включають:

- гетерування рекомбінаційно-активних домішок нанесенням на тильну сторону пластини Si плівки германію з наступними йонним перемішуванням і термічним відпалом [1];
- використання в якості просвітлюючого і захисного покриття алмазоподібних гідрогенізованих вуглецевих плівок, які одночасно виконують додаткову функцію пасивації рекомбінаційних центрів в області просторового заряду на кінцевій стадії виготовлення СЕ [2].

Етапи технологічного маршруту і параметри технологічних процесів виготовлення СЕ визначались з таких критеріїв:

1. Технологічні процеси і режими їх проведення мусять якомога повніше виключати фактори, що приводять до зменшення довжини дифузії неосновних носіїв струму у кремнію після гетерування домішок.
2. В основу технології виготовлення СЕ повинні бути закладені базові технологічні процеси і обладнання виробництва інтегральних схем і напівпровідникових приладів, що дозволить

використати для виготовлення СЕ ділянки мікроелектронного виробництва.

Розроблений технологічний маршрут, з врахуванням етапів гетерування, складається з таких основних операцій:

- реставрація дешевих некондиційних кремнієвих пластин (включаючи відходи виробництва інтегральних мікросхем), яка включає процеси:

а) зняття порушених, у тому числі сформованих на попередніх етапах виготовлення мікросхем різного роду плівок і дифузійних та епітаксійних шарів,

б) гетерування домішок у пластинах;

- плазмохімічне осадження SiO_2 на робочу сторону пластины;

- дифузія бору у зворотну сторону пластины при температурі 980°C з метою формування ізотипного p^+-p переходу;

- зняття SiO_2 і боросилікатного скла, плазмохімічне осадження SiO_2 на тильну сторону пластины;

- створення мілкового $p-n$ переходу на робочій стороні методом дифузії фосфору з POCl_3 при температурі 950°C ;

- формування за допомогою фотолітографії мезаструктури по периметру окремих СЕ шляхом травлення кремнію у травнику зі складом $\text{HF}-\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}$ у пропорції 19:1:8;

- напилення Al товщиною 4-6 мкм. на робочу сторону;

- формування методом фотолітографії контактної сітки на робочій стороні пластин;

- напилення Al товщиною 4-6 мкм. на тильну сторону;

- впалювання Al при температурі 450°C протягом 30 хв.;

- нанесення алмазоподібної вуглецевої плівки на робочу сторону для створення просвітлюючого і пасивуючого покриття.

На рис.1 зображено поперечний переріз виготовленого сонячного елемента.

Оскільки нами використовувались круглі пластини Si діаметром 100 мм, то особлива увага приділялась розробці фотошаблону для створення контактної сітки до емітерної області, яка надала б можливість максимально використати площу такої пластины, а також не допустити закороток на периферії. У результаті проведених розрахунків, досліджень і випробувань різних конструкцій ми прийшли до висновку, що оптимальною для створення СБ малої потужності є конфігурація контактної сітки, зображена на рис.2а,

причому оптимальні розміри контактної сітки можна забезпечити тільки з використанням процесів фотолітографії. Для виготовлення СБ середньої і великої потужності оптимальною виявилась конструкція контактної сітки, що зображена на рис 2б. У даному випадку з технологічного процесу виготовлення СЕ були вилучені операції фотолітографії і травлення мезаструктур, а контакти наносились на лицеву сторону методом трафаретного друку, що значно знизило вартість технологічного процесу.

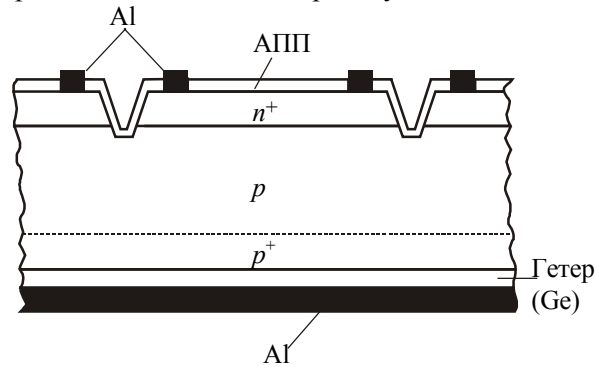
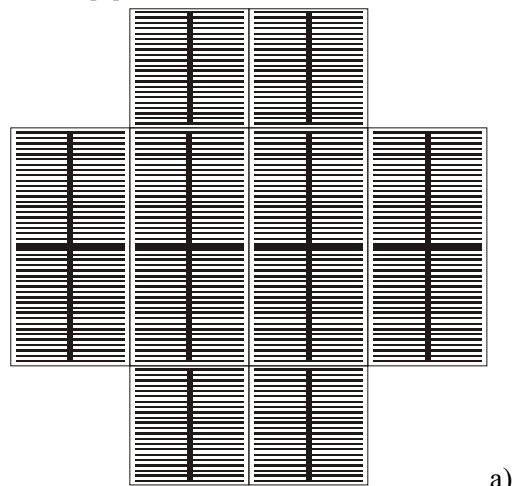
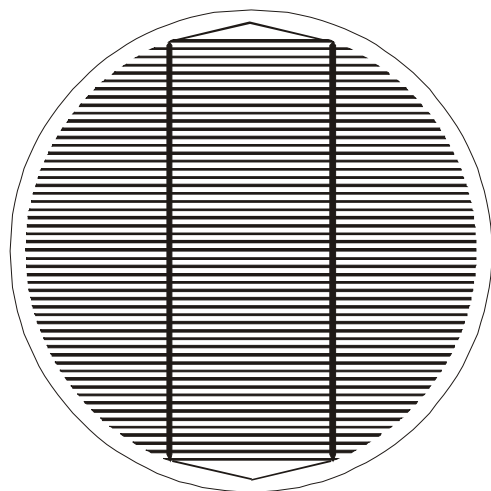


Рис.1. Переріз сонячного елемента.



а)



б)

Рис.2. Конфігурація контактної сітки.

Таблиця 1. Параметри виготовлених сонячних елементів.
(спектральні умови АМ 1,5, енергетична освітленість 1000 Вт/м², температура 20°C).

Номер зразка	Площа елемента, см ²	Густина струму короткого замикання, мА/см ²	Напруга холостого ходу, В	Фактор заповнення вольт-амперної характеристики	Ефективність, %
1	2	31,3	0,611	0,795	15,0
2	2	30,2	0,611	0,793	14,4
3	2	31,7	0,613	0,764	14,6
4	2	30,6	0,619	0,806	15,1
5	2	31,6	0,612	0,781	14,9

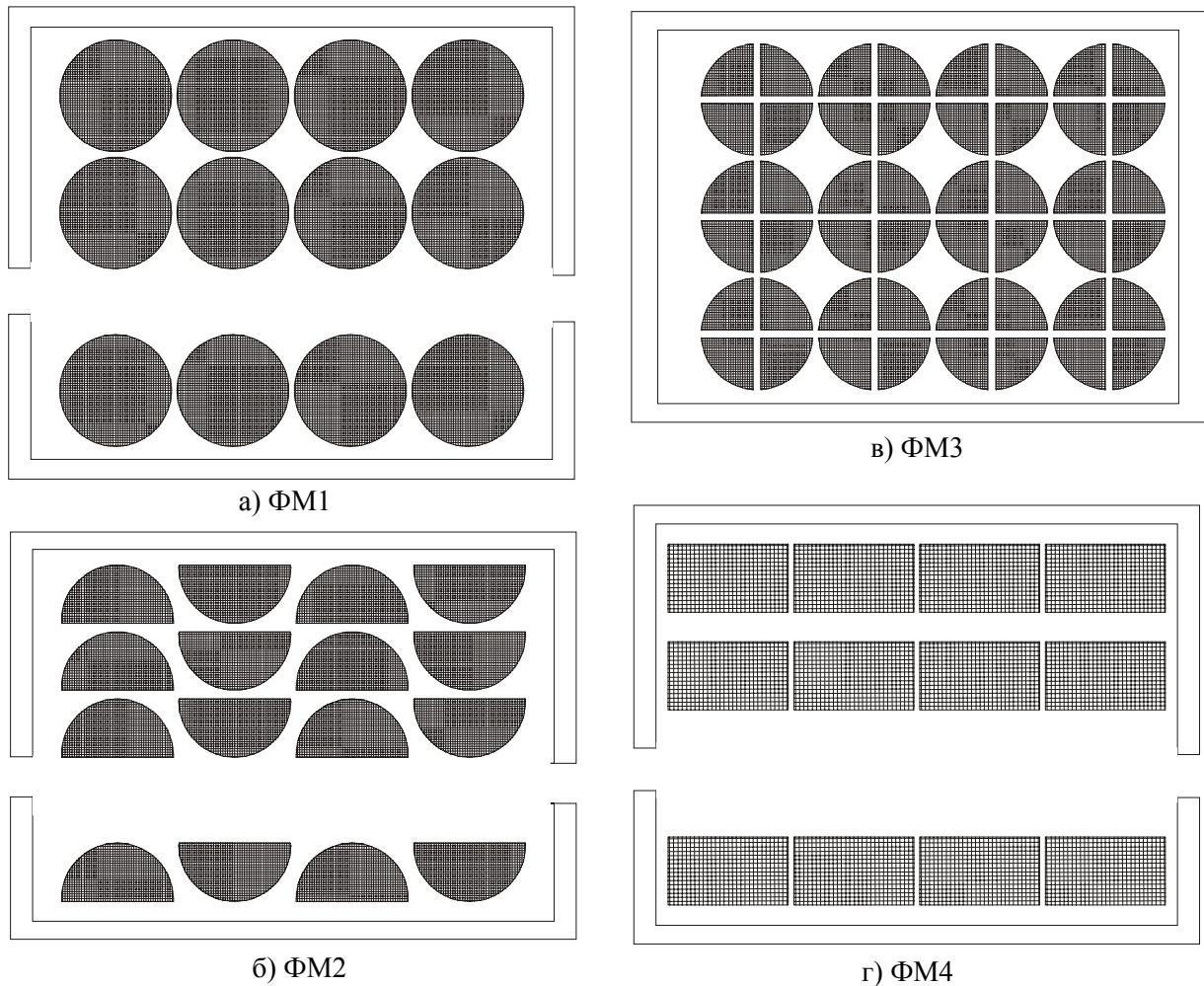


Рис.3. Типи розроблених модулів фотоперетворювачів.

Параметри СЕ, що були виготовлені нами з використанням описаної технології на некондиційних кремнієвих пластинах (вихідна довжина дифузії нерівноважних носіїв заряду не перевищувала 30 мкм), наведено у таблиці 1.

При збільшенні площі елемента його характеристики дещо погіршуються, що є типовим і пояснюється планарною неоднорідністю параметрів і недосконалістю технологічних процесів.

На основі виготовлених СЕ зібрано декілька експериментальних фотоелектричних модулів (ФМ) різної потужності. Конструкції модулів відрізнялись розмірами і формою сонячних елементів а також способом їх компоновання у модулях. На рис.3 зображено типи модулів, що розроблені у процесі виконання даної роботи.

Слід зауважити, що різке збільшення струму сонячної батареї, що відбирається зовнішнім на-

вантаженням, може привести до тимчасового падіння вихідної напруги СБ. У зв'язку з цим, як правило, паралельно вмикають акумуляторну батарею (АБ), яка працює у перехідних режимах. Крім того, потреба в електроенергії існує і при відсутності сонячного випромінювання. Тому для безперервної роботи фотоелектричних систем необхідно використовувати АБ. В даний час значна кількість споживачів електроенергії розрахована на напругу 12 В. Щоб забезпечити активний струм зарядки 12-вольтових АБ, сонячні батареї проектуються на номінальну робочу напругу 16-17 В, тому розрахунки робочих характеристик ФМ проводили, виходячи з номінальної напруги ФМ, рівної 16 В.

Також слід мати на увазі, що основний об'єм процесу збірки СБ займають операції електричного з'єднання СЕ. Щоб уникнути паралельних з'єднань сонячних елементів (а з ними й додаткових електричних втрат на міжелементних з'єднаннях і ускладнення і подорожчання технології монтажу СЕ у модуль), СЕ з'єднували тільки у послідовний ланцюжок, паралельні з'єднання були відсутні. Таким чином при проектуванні ФМ задавали не вихідну потужність модуля, а величину струму при заданій робочій напрузі (16 В), виходячи з міркувань найбільш раціонального використання площі кремнієвої підкладки діаметром 100 мм при розділенні її на елементи.

Параметри виготовлених модулів наведено у таблиці 2.

Найбільш просте – використання круглих пластин, що звільняє від додаткових витрат на порізку пластин. Разом з тим, відношення корисної (зайнятої СЕ) площі до загальної площі такої

батареї є мінімальним у порівнянні з випадками її компонування з фрагментів пластин. Перевагою використання для складання модуля половинок пластин є те, що можна досягти значно більшої щільності упаковки пластин, а отже зменшити загальну площу модуля при тій же вихідній потужності. Додаткові затрати при цьому, крім затрат на порізку пластин, включають також затрати на пасивацію бокових граней. Найбільш щільне компонування досягається при використанні прямокутних пластин. Однак при цьому нерационально використовується площа круглих пластин при розділенні на окремі прямокутні СЕ. Важливим параметром, який характеризує оптимальність компонування СЕ на панелі, є коефіцієнт заповнення площі, який визначається як відношення

$$F_{\text{зап}} = (N \cdot S_{\text{ел}}) / S_n,$$

де N – загальна кількість сонячних елементів у даному ФМ, $S_{\text{ел}}$ – повна площа СЕ, S_n – площа несучої поверхні панелі. У залежності від характеру подальших розрахунків, S_n може означати:

1. Площу, що зайнята тільки сонячними елементами з міжелементними з'єднаннями;
2. Всю, так звану, доступну для використання площу, яку займають сонячні елементи, включаючи їх електричні з'єднання і проводку;
3. Загальну площу панелі за виключенням отворів у ній і площі, що зайнята шарнірами та іншими подібними конструктивними елементами;
4. Всю загальну площу, включаючи розміщення електропроводки і частини панелі, що не використовується активно.

Таблиця 2. Параметри виготовлених модулів фотоперетворювачів.

Тип модуля	Загальна площа модуля, см ²	Корисна площа модуля, см ²	Коефіцієнт заповнення площі	Потужність, Вт		Робоча напруга, В		Ефективність, %	
				*	**	*	**	*	**
ФМ1	4170	2808	0,67	–	28,3	–	17,4	–	10,1
ФМ2	1800	1404	0,78	11,13	16,66	18,1	18,1	12,3	11,9
ФМ3	1170	702	0,6	6,28	7,79	17,4	17,3	11,9	11,1
ФМ4	820	594	0,72	4,73	6,97	18,0	17,4	12,7	12,1

* – вимірювання проводились на натурному Сонці з спектральним розподілом, що відповідає умовам АМ 3, при температурі 20°С і енергетичній освітленості модулів: ФМ2 – 649 Вт/м², ФМ3 – 753 Вт/м², ФМ4 – 648 Вт/м². Випробування модуля ФМ1 при натурному Сонці не проводились;

** – випробування проводились з допомогою макета імітатора Сонця на основі імпульсної ксенонової лампи ІФК 120 у спектральних умовах, близьких до АМ 1,5, при енергетичній освітленості 1000 Вт/м² і температурі 20°С.

Часто у літературі не вказується – яке з використаних визначень було застосовано автором. Практична величина $F_{\text{зап}}$, одержана при обчисленні S_n першим з перерахованих способів, лежить у межах 0,85-0,92. Для плоских стандартних конструкцій ФМ важко одержати значення коефіцієнта заповнення більше 0,95. Для модуля ФМ4, як приклад, коефіцієнт заповнення, розрахований при підстановці у формулу S_n , обчисленого першим способом, рівний 0,958, що говорить про досить вдале компонування елементів. Коефіцієнти заповнення, розраховані для ФМ четвертим способом, наведені у таблиці 2. Відносно низьке значення $F_{\text{зап}}$ для модуля ФМ4, зібраного з прямокутних СЕ, пов'язане з невеликою площею самого модуля, а не свідчить про неефективність компонування.

Отримані параметри СЕ і модулів, як показує аналіз літератури, майже не поступаються типовим параметрам відповідних приладів, призначених для широкого використання (дивися, наприклад, [3]), а їх вартість, завдяки використанню низькоякісного і некондиційного матеріалу, суттєво нижча за середньосвітову для аналогічних виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Romanyuk B.N., Popov V.G., Litovchenko V.G., Klyui N.I., Romanyuk A.B., Gorbulik V.I., Moskal D.N., Volkov S.G.* Evolution of recombination parameters of "solar" monocrystalline silicon due to thermal and gettering treatments // *Functional Materials*. - 1998. - 5, No.4. - P.555-560.
2. *Горбулик В.І., Ключ М.І., Литовченко В.Г., Костильов В.П., Романюк А.Б.* Покращення характеристик кремнієвих сонячних елементів нанесенням захисних та просвітлюючих а-С:Н:Н плівок // *Науковий вісник ЧДУ. Вип. 66: Фізика. Електроніка*. - Чернівці: ЧДУ, 1999. - С.14-16.
3. *Stone J.L.* SOLAR 2000: the next critical step towards large-scale commercialization of photovoltaics in the United States // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. - 1994. - 34. - P.41-49.