

ЕФЕКТИВНІ СОНЯЧНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ГЕТЕРОВАНОМУ КРЕМНІЇ

В роботі вивчено еволюцію рекомбінаційно-чутливих параметрів: часу життя та довжини дифузії нерівноважних носіїв струму у кремнієвих зразках, які піддавались термічним та геттеруєчим обробкам. Запропоновано ефективну технологію гетерування рекомбінаційно-активних домішок в кремнії, що полягає в нанесенні плівки Ge на тильовий бік пластини, іонному перемішуванні і постімплантаційному відпалі. Розроблено конструкцію і технологічний маршрут виготовлення конкурентоспроможних фотовольтаїчних перетворювачів сонячної енергії з використанням відносно низькоякісного дешевого кремнію.

Ключові слова: сонячний елемент, кремній, рекомбінація, гетерування, відпал, преципітація кисню, алмазоподібні плівки.

Изучено эволюцию рекомбинационно-чувствительных параметров: времени жизни и длины диффузии неравновесных носителей тока в кремниевых образцах, которые подвергались термическим и геттерирующим обработкам. Предложена эффективная технология геттерирования рекомбинационно-активных примесей в кремнии, которая включает нанесение пленки германия на тыльную сторону пластины, ионное перемешивание и постимплантационный отжиг. Разработано конструкцию и технологический маршрут изготовления конкурентноспособных фотовольтаических преобразователей солнечной энергии с использованием относительно низкокачественного недорогого кремния.

Ключевые слова: солнечный элемент, кремний, рекомбинация, геттерирование, отжиг, преципитация кислорода, алмазоподобные пленки.

Evolution of recombination-sensitive parameters such as lifetime and diffusion length of non-equilibrium carriers in silicon wafers subjected to thermal and gettering treatments have been studied. For the first time, it was proposed new technology for gettering of recombination active impurities in silicon. The technology includes deposition of Ge film onto Si wafer back side, ion-beam mixing followed by post-implantation annealing. Construction and technological route for competitive solar energy converters production have been developed.

Key words: solar cell, silicon, recombination, gettering, annealing, oxygen precipitation, diamond-like films.

Аналіз проблеми та постановка задачі

Незважаючи на велике розмаїття матеріалів для виготовлення сонячних елементів (СЕ), найбільшого поширення набули фотоелектричні перетворювачі на основі кремнію (Si). Кремнієві сонячні батареї займають основний сегмент світового ринку фотоелектричних джерел енергії. Їх широкомасштабне впровадження стримується поки що відносно високою вартістю, значну долю якої становить вартість вихідного кремнієвого матеріалу. Тому створення ефективних кремнієвих фотовольтаїчних перетворювачів сонячної енергії з низькою собівартістю потребує отримання дешевого вихідного матеріалу з відповідними фотоелектричними параметрами, які мають бути стабільними як в процесі виготовлення сонячних елементів, так і в процесі їх експлуатації.

Одним з найважливіших параметрів, які характеризують придатність матеріалу для виготовлення

ефективних СЕ, є час життя нерівноважних носіїв заряду τ_v в Si. Підвищений вміст шкідливих (рекомбінаційно-активних) домішок та дефектів збільшує швидкість рекомбінації неосновних носіїв заряду і знижує τ_v . Тому до пластин кремнію, що використовуються для виготовлення фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії, висуваються досить жорсткі вимоги відносно дефектності та вмісту рекомбінаційно-активних домішок, оскільки ці параметри впливають на ефективність сонячних елементів.

Одними з основних чинників, що приводять до генерації дефектів, додаткового введення шкідливих домішок, а відповідно до деградації фотоелектричних параметрів Si, є високотемпературні технологічні операції, що використовуються як в мікроелектронній технології, так і в технології виробництва сонячних елементів.

Для зменшення вартості кремнієвих сонячних елементів перспективним є використання відносно дешевого, нижчої якості, ніж високої вартості мікроелектронний та «сонячний» Si, матеріалу, який, як правило, містить досить значну концентрацію домішок. Для поліпшення його характеристик необхідно розробити технологію, яка б дозволила покращити фотоелектричні параметри пластин Si і отримати з відносно малофоточутливого матеріалу високофоточутливий, придатний для виготовлення СЕ та інших фоточутливих напівпровідникових приладів. Зокрема, для цього можуть бути використані методи гетерування небажаних домішок і дефектів з робочої поверхні і об'єму кремнієвих пластин на тилову, неробочу поверхню перед чи в процесі виготовлення СЕ. Такі методи можуть бути застосовані також для відновлення фотоелектричних характеристик пластин, які є відходами мікроелектронного виробництва. Розробка їх вимагає проведення контрольних експериментів на пластинах з різною вихідною біографією, типом і концентрацією домішок та структурних дефектів.

В зв'язку з цим, використання гетерних обробок при виготовленні високоефективних напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії є важливою технологічною процедурою. Зокрема, в технології виробництва СЕ використовуються стандартні гетерні процедури, розроблені в мікроелектронній промисловості, наприклад, легування фосфором, нанесення фосфоро-силікатних плівок, створення порушеного шару на тильному боці пластини і т. п.

Якщо концентрація домішок є досить високою і перевищує розчинність при даній температурі, то в об'ємі пластини виникають мікропреципітати домішок. Перед тим, як гетерувати домішки, що входять до складу мікропреципітатів, в таких зразках необхідно створити умови для їх розчинення.

Поки що вдається ефективно покращувати параметри лише окремих (як правило, приповерхневих) ділянок пластин, що знайшло застосування у виробництві інтегральних мікросхем (ІМС). Проте цього не достатньо для використання такого матеріалу у виробництві сонячних елементів.

Таким чином, питання мінімізації втрат к.к.д. СЕ, обумовлених поверхневою та об'ємною рекомбінаціями, які пов'язані з високим вмістом шкідливих домішок в Si, залишається досить актуальним.

Метою роботи є дослідження генераційно-рекомбінаційних процесів у кремнієвих пластинах після термічних обробок та створення ефективних методів гетерування рекомбінаційно-активних домі-

шок, а також розробка технологічного маршруту виготовлення ефективних сонячних елементів на гетерованому кремнії.

Результати досліджень.

Для вивчення генераційно-рекомбінаційних механізмів у кремнієвих пластинах та розробки ефективних методів гетерування було вибрано декілька партій кремнієвих пластин, що відрізнялись часом життя нерівноважних носіїв струму τ_V . Це пластини Si КДБ10 (100), що були забраковані в процесі мікроелектронного виробництва. Використання таких пластин є перспективним для виготовлення СЕ у зв'язку з їх низькою вартістю. Частина з цих пластин пройшла повний технологічний цикл виготовлення біполярних схем, однією з ключових операцій в якому є нарощування епітаксійного шару n-типу товщиною 16 мкм при $T=1250^\circ\text{C}$. Для досліджень, крім бракованих пластин, були вибрані стандартні кондиційні кремнієві пластини КДБ10.

На відібраних бракованих пластинах Si був проведений підготовчий етап їх реставрації, який включав зняття поверхневого шару кремнію товщиною 20 мкм з кожного боку пластини. Після шліфування пошкоджений абразивною обробкою шар видалявся хімічним травленням в лужному розчині (гідроксид натрію). Далі було проведено полірування робочого боку кремнієвих підкладок для отримання дзеркально – гладкої поверхні.

Досліди по ІЧ-поглинанню показали, що концентрація кисню в зразках лежить в межах $7 \dots 9 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$, значна частина кисню знаходиться у вигляді мікропреципітатів SiO_x , про що свідчить наявність додаткових смуг поглинання поблизу області 1106см^{-1} .

На всіх пластинах проводились вимірювання довжини дифузії нерівноважних носіїв струму за допомогою методу спектральної залежності фото е.р.с.

Проведений статистичний аналіз показав, що вихідні стандартні пластини (кремній КДБ-10) характеризуються середнім значенням $L_D \sim 150 \dots 200 \text{мкм}$. (рис. 1 а). Розподіл дифузійної довжини L_D для пластин, що проходили технологічний цикл виготовлення біполярних інтегральних мікросхем, приведений на гістограмі (рис. 1 б).

Як бачимо, після термічних обробок вихідних пластин в процесі виготовлення ІМС спостерігається зменшення довжини дифузії до значень $L_D \sim 20 \dots 50 \text{мкм}$. Величина L_D залежить від температури, часу обробок та кількості технологічних операцій.

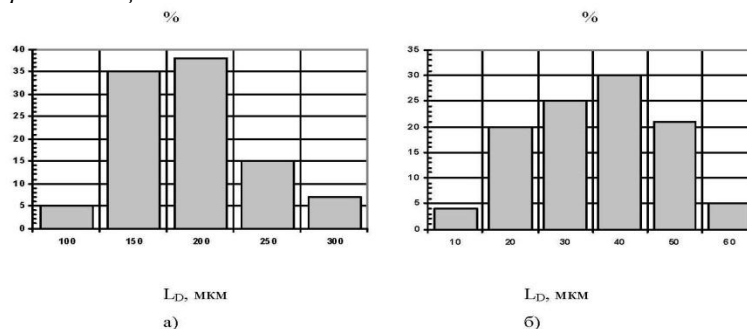


Рис. 1. Розподіл дифузійної довжини носіїв заряду в вихідних пластинах мікроелектронного кремнію КДБ10 (100) (а) та в пластинах після циклу термічних обробок (б).

Частина пластин, які були забраковані після нарощування епітаксійного шару, після реставрації додатково окислювались при температурі 1100°C на протязі 60 хвилин у вологому кисні ($O_2 + H_2O$) (з метою імітації технологічного процесу виготовлення SE) до товщини окислу кремнію 0,6 мкм, який в подальшому стравлювався в плавиковій кислоті (HF).

На рис. 2 а, б наведено гістограми розподілу довжини дифузії неосновних носіїв струму для цих пластин до і після окислення. В пластинках після епітаксійного нарощування довжина дифузії становить величину 10000 мкм, розкид значень L_D на пластині складає близько 80 %. Окислення таких пластин приводить до різкого зменшення величини L_D до значень 2040 мкм. Збільшується також дисперсія значень L_D .

Отримані результати свідчать про те, що в пластинках, на яких нарощувався епітаксійний шар при

високій температурі, йде гетерування рекомбінаційно-активних домішок епітаксійною плівкою, легованою фосфором, а преципітати кисню розчиняються при високих температурах і кисень після епітаксії розподіляється у вигляді невеликих SiO_x включень, які є рекомбінаційно неактивними. В процесі окислення таких пластин йде ріст преципітатів SiO_2 , виникають дефекти упакування, які декоруються атомами металів, а також вносяться додаткові забруднення домішками металів. Ці процеси приводять до деградації довжини дифузії неосновних носіїв струму.

Оскільки відомі технологічні процеси виготовлення SE включають в себе ряд високотемпературних технологічних операцій в інтервалі температур 800...1050°C, в тому числі операції окислення, то важливо запобігти при їх проведенні деградації L_D .

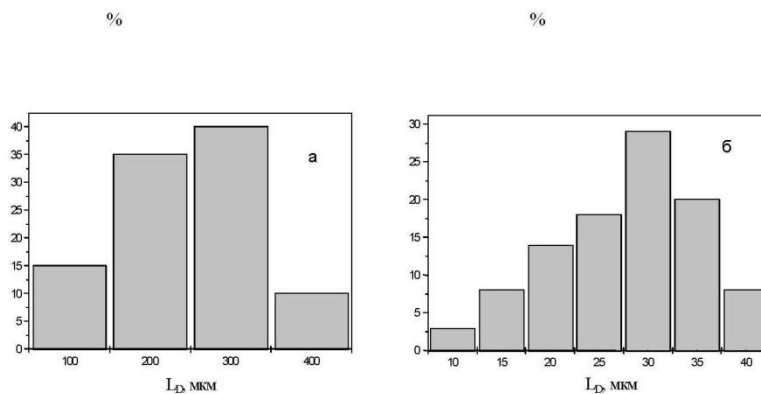


Рис. 2. Розподіл довжини дифузії в пластинках кремнію р- типу (100) після епітаксiального нарощування (а) та додаткового окислення цих пластин (б).

Були проведені дослідження впливу різних режимів відпалу на рекомбінаційні характеристики кремнієвих пластин [1,2]. Для зміни стану кисню використовувалися відпали в інтервалі температур 800...1200°C. Низькі температури використовувались для забезпечення росту мікропреципітатів, а високі – для їх розчинення.

Після відпалу при $T=800^\circ C$ на поверхні Si спостерігалась поява великої кількості ямок травлення густиною – 10^8 см^{-2} , які пов'язані з мікропреципітатами SiO_2 . При температурі 1000°C їх концентрація зменшується, при ще більш високих температурах ямки травлення не спостерігаються зовсім. Отримані дані свідчать про те, що в пластинках кремнію при низьких температурах відбувається ріст преципітатів SiO_2 , а при високих вони розпадаються. Ріст мікропреципітатів супроводжується виникненням дислокаційних петель і гетеруванням ними рекомбінаційно-активних домішок, що дає певне підвищення L_D [3]. Відносно малі значення L_D свідчать про наявність рекомбінації на границях поділу преципітат SiO_2 -Si.

Підвищення температури відпалу до 1100...1200°C приводить до розчинення мікропреципітатів SiO_2 , звільнення захоплених на них рекомбінаційно-активних домішок і збільшення їх активності в якості

рекомбінаційних центрів. При цьому довжина дифузії суттєво зменшується.

Ці дані свідчать про те, що пластинки Si після термообробки характеризуються значною концентрацією преципітатів кисню, які можуть діяти як внутрішні гетерні центри. Також не виключено, що в процесі термообробки пластинки додатково забруднюються рекомбінаційно-активними домішками.

Таким чином, процеси рекомбінації, що приводять до зменшення L_D в пластинках, які пройшли термообробку, обумовлені рекомбінаційно-активними домішками, зародженням і ростом мікропреципітатів SiO_x та їх взаємодією з рекомбінаційно-активними домішками.

Роль кисню залежить від температури відпалу, і якщо частина кисню вже знаходиться в зв'язаному стані, то подальша зміна його стану можлива тільки при досить високих температурах ($\geq 1200^\circ C$), коли розпадаються преципітати. При менших температурах слід враховувати ріст преципітатів і їх взаємодію з домішками, або розпад при дії додаткових факторів, таких, як інжекція міжвузлових атомів кремнію, або механічні напруження (стискуючі).

Розробка методів гетерування рекомбінаційно-активних домішок в кремнії.

Як показали наші дослідження, час життя нерівноважних носіїв струму в Si суттєво погіршується під

час стандартних термічних обробок і дифузійних процедур.

Причинами деградації часу життя можуть бути:

- забруднення пластини рекомбінаційно-активними домішками (Fe, Cu, Au і т. п.);
- генерація дефектів різних типів;
- преципітація фази SiO₂, SiC та ін.

Для поліпшення характеристик таких пластин перспективним може стати застосування методів гетерування цих домішок і дефектів.

Процедура гетерування включає в себе такі процеси:

- активацію домішки, що робить її рухомою при даній температурі;
- дифузію в напрямку спеціально створеної гетерної області;
- закріплення атома домішки в цій області.

Гетерування може бути проведено з різних сторін:

- гетерування з тилового боку;
- гетерування з обох сторін з подальшим стравлюванням збагаченого шкідливими домішками шару з одного боку;
- гетерування з лицевої сторони.

Для отримання матеріалу, придатного для виготовлення СЕ, необхідно провести очистку шару товщиною, близькою до товщини пластини. В середньому це – 200...500 мкм, що відповідає типовим товщинам кремнієвих пластин, які використовуються в мікроелектронній промисловості та для виготовлення СЕ. При цьому потрібно використовувати ефективні і разом з тим недорогі гетерні процедури. Розробка таких методів вимагає проведення контрольних експериментів на пластинках з різною вихідною біографією, типом і концентрацією домішок та структурних дефектів.

Як показує проведений аналіз, перспективні гетери можна розділити на дві групи, які відрізняються механізмами їх дії на домішки, що гетеруються:

1. Гетери, що поглинають рекомбінаційно-активні домішки внаслідок їх великої розчинності в гетерній області (Al-Si, фосфоросилікатне скло, пористий кремній та ін).

2. Гетери комбінованої дії, у яких зв'язуванню домішки на гетері передують стимуляція процесів дифузії домішок на гетер та/або стимуляція процесів розпаду дефектів, що мають рекомбінаційну активність. До цієї групи гетерів відносяться іонно-стимульовані гетери різних типів. Саме вони здаються найбільш перспективними при гетеруванні кремнієвих пластин з внутрішніми преципітатами.

Виходячи з цього, для подальших досліджень всі кремнієві пластини були поділені на 2 основні класи: пластини з малою концентрацією кремній-кисневих преципітатів (партія А), рекомбінаційні параметри яких визначаються швидкодіфундуючими рекомбінаційно-активними домішками та пластини, що містять внутрішні гетерні центри, якими виступають мікропреципітати домішок та SiO_x (партія Б).

Для дослідження різних методів гетерування були вибрані як відомі з літератури, так і оригінальні методи гетерування: 1 – імплантація Н⁺ (E=150 кеВ, D=3x10¹⁶ см⁻²); 2 – імплантація Аг⁺ (E=150 кеВ, D=3.6x10¹⁶ см⁻²); 3 – імплантація С⁺ (E=100 кеВ, D=1.8x10¹⁶ см⁻²); 4 – нанесення шару Al (d=100 нм); 5 – нанесення шару Al (d=100 нм) + імплантація Аг⁺ (E=150 кеВ, D=3.6x10¹⁶ см⁻²); 6 – нанесення шару Ge (d=100 нм); 7 – нанесення шару Ge (d=100 нм) + імплантація Аг⁺ (E=150 кеВ, D=3.6x10¹⁶ см⁻²); 8 – легування домішками фосфору при епітаксії Si. Методи вибрано так, щоб розділити вплив різних факторів на рекомбінаційну активність у Si. Гетерний шар формувався на тильному боці пластини, після чого зразки відпалювались в атмосфері Аг в інтервалі температур 800...1100°С протягом 0,5...4 годин. Встановлено, що оптимальними для гетерування є температура Т = 900 °С і тривалість відпалу 1 год.

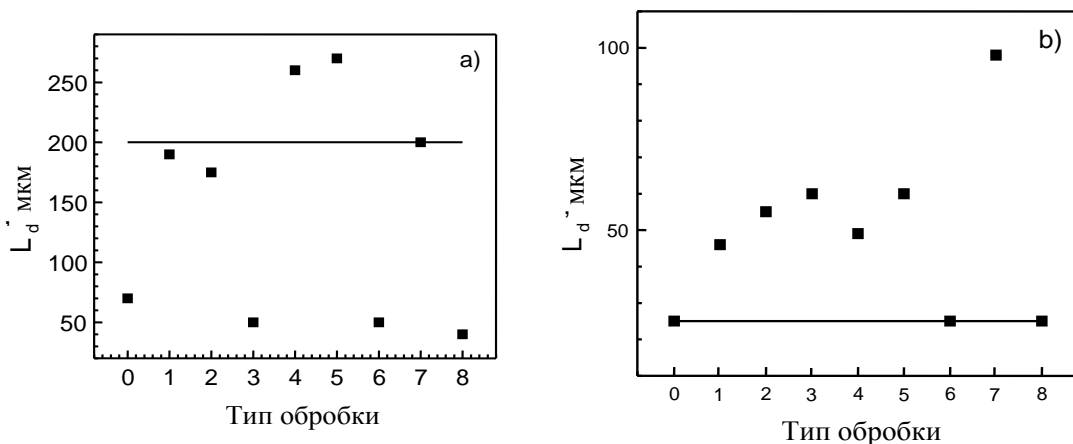


Рис. 3. Середні значення L_D для контрольних пластин (до гетерування) – суцільні лінії, а також після різних гетеруючих обробок для пластин: а– типу А, б– типу Б. Нумери обробок відповідають даним у тексті. Обробка 0 – термічний відпал при T=900°С, 1 год.

На рис. 3 а, б суцільними лініями наведені середні значення L_D для контрольних пластин (до гетерування), а також після різних гетерних обробок для пластин

двох партій, що належать до різних класів (з рекомбінаційно-активними домішками – партія А, з внутрішніми мікропреципітатами домішок та SiO_x –

партія Б). Видно, що процеси гетерування в більшості випадків приводять до збільшення величини L_D у пластинах партії Б (рис. 1б), а в зразках з високим значенням L_D в основному спричиняють зменшення цього параметру. В пластинах партії А ефективні лише гетери Al та Al+Ag⁺. Імплантація С⁺ і Ag⁺ в пластинах партії Б не дає значного збільшення величини L_D , а в пластинах з високим значенням L_D (партія А) спостерігається її зменшення. Найбільший ефект у партії Б дає використання плівки Ge після додаткової імплантації іонами Ag⁺ та наступного термічного відпалу, причому при наступних термічних обробках значення L_D залишається практично стабільним.

Обговорення результатів

Таким чином, найбільш ефективним методом для збільшення τ_V в термооброблених пластинах Si є запропонований нами метод нанесення плівки германію на тиловий бік пластини з подальшим іонно-променевим перемішуванням (іонами Ag⁺) та термічним відпалом. Механізми дії такого гетера можуть бути пов'язані з такими факторами: плівка Ge з іонним перемішуванням створює значні стискуючі напруження в об'ємі пластини, впливає на розпад мікропреципітатів і стимулює відрив домішок з

внутрішніх гетерних центрів; під час іонно-променевого перемішування відбувається інжекція міжвузлових атомів кремнію, які впливають на процеси взаємодії преципітатів з рекомбінаційно-активними домішками; крім цього гетерний шар суттєво відрізняється від Si коефіцієнтом сегрегації домішок, що дозволяє провести їх перерозподіл і закріпити в гетерній області.

Досягнута величина $L_D > 100$ мкм (пластини партії Б) в 3-4 рази перевищує її значення до гетерних обробок. Чи достатні отримані нами величини L_D для застосування такого матеріалу у виробництві СЕ? Як показав аналіз літератури [4], струм короткого замикання СЕ J_{sc} і напруга холостого ходу U_{oc} збільшуються із збільшенням L_D , але саме починаючи з $L_D = 100$ мкм це зростання значно уповільнюється. Отже, величина $L_D = 100$ мкм цілком достатня для матеріалу, що використовується для виготовлення СЕ широкого застосування (ККД 12-15 %).

Систематизовані результати розрахунків залежності ефективності СЕ від методу гетерування домішок в Si представлені на рис. 4, де по осі ординат відкладені очікувані значення ефективності СЕ для кожної з використаних гетерних обробок.

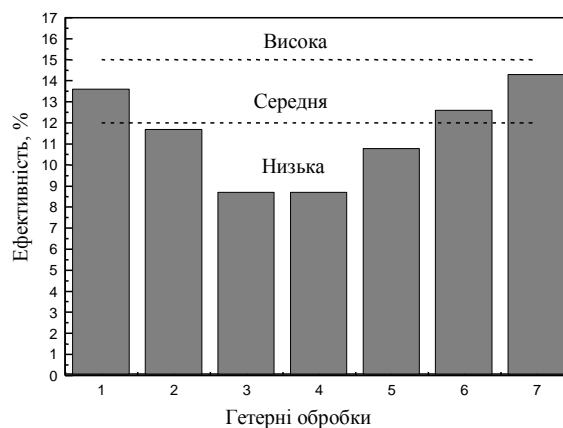


Рис. 4. Обробки: 1) вихідний Si; 2) вихідний Si після відпалу без гетера; 3) вихідний Si після окислення без гетера; 4) легування кремнієвого епітаксійного шару фосфором під час епітаксії + відпал; 5) імплантація С⁺ ($E = 100$ кеВ, $D = 1.8 \cdot 10^{16}$ см⁻²) + відпал; 6) осадження шару Ge + відпал; 7) осадження шару Ge з наступною імплантацією Ag⁺ + відпал. Відпал проводився при 900° С на протязі 1 години в Ar.

Видно, що розроблений процес гетерування (поз. 7) дозволяє досягнути достатньо високих значень ефективності СЕ. При цьому при розрахунках базова конструкція СЕ не враховувала таких можливостей для поліпшення ефективності, як текстурування робочої поверхні, антизапірний тиловий контакт та інших вдосконалень. Бачимо, що для гетерних обробок 6, 7 (їх вибір, природно, визначається передісторією кремнієвого матеріалу) навіть в цьому випадку можна сподіватись на отримання ефективності СЕ 13-14 %

Конструктивно-технологічні особливості СЕ на основі гетерованого кремнію

На основі отриманого кремнієвого матеріалу був створений технологічний маршрут виготовлення сонячних фотоелементів з ефективністю 14-15 %. Оригінальність такого маршруту полягає у:

- гетеруванні рекомбінаційно-активних домішок нанесенням на зворотній бік пластини Si плівки германію за допомогою термоіонного методу;
- використанні в якості просвітлюючого та захисного покриття аламазоподібних гідрогенізованих вуглецевих плівок, які одночасно виконують додаткову функцію пасивації рекомбінаційних центрів в області просторового заряду на кінцевій стадії виготовлення СЕ [5, 6].
- інтегрованості процесів гетерування в загальний маршрут виготовлення СЕ.

Розроблений технологічний процес з урахуванням процедур гетерування складається з таких основних етапів:

- реставрація кремнієвих пластин (у випадку використання відходів мікроелектронного виробництва), яка включає в себе процеси зняття сформованих на

попередніх етапах виготовлення ІМС різного роду плівок і дифузійних та епітаксійних шарів методом хімічного травлення;

- текстурування поверхні підкладок анізотропним травленням;
- гетерування домішок та дефектів в кремнієвих пластинах за розробленим способом;
- маскування робочого боку пластин плівкою SiO₂ та дифузія бору в зворотню сторону при температурі 980 °С з метою формування ізотипного p⁺-p переходу;
- маскування плазмохімічним осадженням SiO₂ тильного боку пластини та створення мілкового p-n

переходу на робочому боці методом дифузії фосфору з POCl₃ при температурі 950 °С;

- формування на робочому боці мезаструктури шляхом травлення кремнію в травнику зі складом HF-HNO₃-H₂O з метою бокової пасивації p-n переходу;
- формування алюмінієвої контактної сітки на фронтальній поверхні та нанесення контактів на тильний бік пластин;
- впалювання контактів Al при температурі 450 °С;
- створення просвітлюючого та пасивуючого покриття нанесенням алмазоподібної вуглецевої плівки на робочий бік пластини.

На рис. 5 зображено поперечний переріз виготовленого сонячного елемента

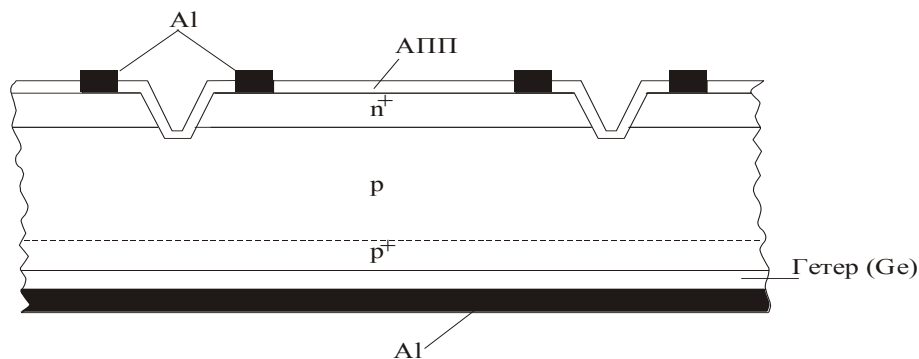


Рис. 5. Структура сонячного елемента

Параметри СЕ, які були виготовлені по описаній технології з використанням низькоякісних некондиційних кремнієвих пластин (вихідна довжина дифузії

нерівноважних носіїв заряду не перевищувала 30 мкм), наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Параметри виготовлених сонячних елементів (спектральні умови АМ 1,5, енергетична освітленість 1000 Вт/м², температура 25°С).

| 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 | 31,5 | 0,620 | 0,792 | 15,3 |
| 2 | 2 | 31,7 | 0,613 | 0,764 | 14,6 |
| 3 | 2 | 31,3 | 0,611 | 0,795 | 15,0 |
| 4 | 2 | 31,6 | 0,619 | 0,771 | 14,9 |
| 5 | 2 | 32,0 | 0,617 | 0,769 | 15,0 |
| 6 | 2 | 30,6 | 0,619 | 0,806 | 15,1 |
| 7 | 2 | 31,3 | 0,619 | 0,803 | 15,3 |
| 8 | 2 | 30,2 | 0,611 | 0,793 | 14,4 |
| 9 | 2 | 30,8 | 0,617 | 0,774 | 14,6 |
| 10 | 2 | 31,6 | 0,612 | 0,781 | 14,9 |

Ефективність таких СЕ становить 14,9 ± 0,4 % а середня собівартість оцінюється на 10-20 % нижче собівартості СЕ, отриманих на стандартному Si по тій же технології.

З використанням виготовлених СЕ було зібрано декілька експериментальних фотоелектричних модулів, на основі яких створена фотоенергетична установка встановленою потужністю генеруючої частини (фотоелектричних батарей) – 200 Вт та вихідною потужністю 1 КВт, яка пройшла успішні випробування в умовах Карпатського регіону.

Висновки

1. Як показали наші дослідження, час життя нерівноважних носіїв струму в Si суттєво погіршується під час стандартних термічних обробок і дифузійних процедур, що необхідно враховувати при розробці технологічного процесу виготовлення сонячних елементів. Суттєвий вплив на рекомбінацію неосновних носіїв струму в Si мають процеси преципітації кисню та взаємодії преципітатів з домішками металів.

2. Для гетерування домішок в пластинах Si з внутрішніми мікропреципітатами використано новий

метод, що включає нанесення плівки Ge, іонно-променево перемішування та наступний відпал. Продемонстровано високу ефективність запропонованого гетера для пластин Si, які мають вихідну довжину дифузії нерівноважних носіїв заряду в широкому діапазоні від 20 до 200 мкм. Такий гетер ефективно запобігає деградації рекомбінаційно-чутливих параметрів при наступних високотемпературних обробках.

3. Запропонована промислова технологія, що дозволяє виготовити на відносно дешевому кремнії SE з ефективністю 14...15 % при середній собівартості на 10-20 % нижче від собівартості SE, отриманих на стандартному кремнії без гетерних обробок, яка відрізняється від традиційних використанням нових методів гетерування та алмазоподібних плівок в якості просвітлюючих та пасивуючих покриттів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Romanyuk B. N., Popov V. G., Litovchenko V. G., Klyui N. I., Romanyuk A. B., Gorbulyk 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. – Vol. 5. – № 4. – P. 555-560.
2. Романюк Б. М. Вплив термічних обробок на час життя нерівноважних носіїв заряду в Cz-Si / Романюк Б. М., Попов В. Г., Мельник В. П., Клюї М. І., Горбулик В. І., О. С. Оберемок. // *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка*. – 2000. – Вип. 79. – С. 25-29.
3. Borghesi A., Pivas B., Sassella A., Stella A. Oxygen precipitation in silicon // *J. Appl Phys.* – 1995. – Vol. 77, № 2. – P. 4169-4244.
4. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии : Пер. с англ. / К. Рейви. – М. : Мир, 1984. – 470 с.
5. Горбулик В. І. Покращення характеристик кремнієвих сонячних елементів нанесенням захисних та просвітлюючих a-C:H:N плівок / Горбулик В. І., Клюї М. І., Литовченко В. Г., Костильов В. П., Романюк А. Б. // *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка*. – 1999. – Вип. 66. – С. 14-17.
6. Klyui N. I., Litovchenko V. G., Kostylyov V. P., Rozhin A. G., Gorbulyk V. I., Voronkin M. A., Zaika N. I. Silicon Solar Cells with Antireflecting and Protective Coatings Based on Diamond-Like Carbon and Silicon Carbide Films // *Optoelectronics Review*. – 2000. – V. 8. – № 4. – P. 406-409.

Рецензенти: д.т.н., проф. Радченко М. І.,
к.т.н., доц. Сирота О. А.

© Горбулик В. І., 2011

Стаття надійшла до редколегії 11.05.2011 р.