

УДК 621.315.592

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ НА ПРОЦЕСИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В КРЕМНІЄВИХ ФОТОЧУТЛИВИХ СТРУКТУРАХ

В. В. Черненко

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
45, пр. Науки, Київ 03028, Україна, т. (044) 525–5043, ф. (044) 525–5788,
e-mail: vvch88@rambler.ru, vvch@isp.kiev.ua

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОЇ РЕКОМБІНАЦІЇ НА ПРОЦЕСИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В КРЕМНІЄВИХ ФОТОЧУТЛИВИХ СТРУКТУРАХ

В. В. Черненко

Анотація. Експериментально досліджений вплив приповерхневого ізотипного n^+ - n -переходу сформованого біля фронтальної поверхні на рекомбінаційні характеристики кремнієвих фоточутливих структур. Показано, що присутність приповерхневого ізотипного переходу в таких структурах забезпечує малу швидкість ефективної поверхневої рекомбінації навіть у випадку незапасивованої поверхні. Встановлено, що після стравлення сильнолегованої n^+ -області приповерхневого ізотипного n^+ - n -переходу ефективна швидкість поверхневої рекомбінації збільшується внаслідок того, що домінуючими рекомбінаційними механізмами стають рекомбінація через поверхневі рекомбінаційні центри та рекомбінація в області просторового заряду шару виснаження.

Ключові слова: кремнієва фоточутлива структура, поверхнева рекомбінація, приповерхневий ізотипний перехід, пасивація

INFLUENCE OF SURFACE RECOMBINATION ON PHOTOVOLTAIC CONVERSION PROCESSES IN SILICON PHOTOSENSITIVE STRUCTURES

V. V. Chernenko

Abstract. The influence of the front near-surface isotypic n^+ - n -junction on the recombination characteristics of silicon photosensitive structures was experimentally investigated. It was shown that the presence of near-surface isotypic junction in such structures provides low velocity of effective surface recombination even in the case unpassivated surface. It was found that after complete etching of heavily doped n^+ -layer of near-surface isotypic n^+ - n -junction the effective surface recombination velocity increases due to the fact that the dominant recombination mechanisms in this case are recombination via surface recombination centres and recombination in the depletion layer of space-charge region.

Keywords: silicon photosensitive structure, surface recombination, near-surface isotypic junction, passivation

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

В. В. Черненко

Аннотация. Экспериментально исследовано влияние приповерхностного изотипного n^+ - n -перехода, сформированного возле фронтальной поверхности, на рекомбинационные характеристики кремниевых фоточувствительных структур. Показано, что присутствие приповерхностного изотипного перехода в таких структурах обеспечивает малую скорость эффективной поверхностной рекомбинации даже в случае незапассивированной поверхности. Установлено, что после стравливания сильнолегированной n^+ -области приповерхностного изотипного n^+ - n -перехода эффективная скорость поверхностной рекомбинации увеличивается вследствие того, что доминирующими рекомбинационными механизмами становятся рекомбинация через поверхностные рекомбинационные центры и рекомбинация в области пространственного заряда слоя истощения.

Ключевые слова: кремниевая фоточувствительная структура, поверхностная рекомбинация, приповерхностный изотипный переход, пассивация

Вступ

Підвищення ефективності процесів фотоелектричного перетворення енергії в кремнієвих фоточувствительних структурах (КФС) залишається актуальною задачею вже протягом досить тривалого часу. Одним із основних шляхів досягнення цього є зменшення рекомбінаційних втрат в таких структурах, для чого необхідно мінімізувати швидкості як об'ємної, так і поверхневої рекомбінації. Відомо, що для зменшення швидкості об'ємної рекомбінації необхідно забезпечити високі значення часу життя нерівноважних носіїв заряду у виготовленій КФС. Для зменшення негативного впливу поверхневої рекомбінації на характеристики КФС зараз широкого застосування набули такі методи, як пасивація поверхні кремнію та створення приповерхневих переходів [1–5].

Якщо пасивація поверхні кремнію, яка реалізується нанесенням діелектричних шарів, зменшує швидкість поверхневої рекомбінації безпосередньо на межі поділу кремній-діелектрик, то присутність приповерхневих переходів створює приповерхневий потенціальний бар'єр, який обмежує підведення носіїв заряду певного типу до поверхневих рекомбінаційних центрів. Приповерхневі переходи створюються нанесенням на поверхню напівпровідника діелектричного шару з вбудованим зарядом або неоднорідним по товщині розподілом легуючих домішок у приповерхневих шарах емітера або бази КФС. Причому, чим більше

співвідношення між концентраціями основних носіїв заряду в приповерхневому індукованому чи легуваному шарі і в базі або емітері КФС, тим ефективніше бар'єр зменшує швидкість рекомбінації через поверхневі рекомбінаційні центри, але при підвищенні в приповерхневому шарі рівня концентрації основних носіїв заряду до $\sim 10^{18}$ см^{-3} і вище в цьому шарі значну роль починає відігравати Оже-рекомбінація [4–7].

У випадку застосування приповерхневих переходів оперують поняттям ефективної швидкості поверхневої рекомбінації віднесеної до межі області просторового заряду і квазінейтрального об'єму. Більш детальному вивченню особливостей поведінки ефективної швидкості поверхневої рекомбінації присвячений ряд робіт [5, 8, 9]. Зокрема, в роботі [9] був досліджений вплив на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації питомого опору підкладки, рівня інжекції, матеріалу діелектричного шару та способу його нанесення. А в роботі [5] теоретично проаналізований вплив на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації таких чинників, як величина і знак поверхневого заряду, індукованого в приповерхневому шарі емітера чи базової області КФС внаслідок нанесення на його поверхню пасивуючого шару, параметрів поверхневих рекомбінаційних центрів межі поділу діелектрик-напівпровідник, концентрації легуючих домішок в емітері і базовій області КФС і показано, що у випадках утворення приповерхневих шарів збагачення або інверсії поверхневі рекомбінаційні втрати при

відносно невисоких рівнях інжекції істотно знижуються.

На даний час вплив приповерхневих переходів на рекомбінаційні характеристики КФС експериментально вивчений недостатньо. Це пов'язано з тим, що для КФС зі звичайним (двостороннім) розташуванням струмозбираючих контактних електродів можливість експериментальної зміни певних фізичних характеристик приповерхневих бар'єрів без пошкодження цих електродів є досить обмеженими. Але використання в даній роботі в якості об'єкта досліджень КФС з тилowym розташуванням колекторного р-n-переходу, подібних за конструкцією описаним в роботі [10], у яких фронтальна поверхня вільна від струмозбираючих електродів і які внаслідок цього є зручними для дослідження поверхневих та приповерхневих рекомбінаційних процесів у фоточутливих структурах дозволяє уникнути цієї проблеми. Крім того, актуальним є дослідження впливу згаданих методів зменшення поверхневої рекомбінації на протікання генераційно-рекомбінаційних процесів в КФС з тилowym розташуванням колекторного р-n-переходу. Тому дана робота присвячена експериментальному дослідженню впливу поверхневих та приповерхневих рекомбінаційних механізмів на процеси фотоелектричного перетворення енергії у КФС з приповерхневими ізотипними n^+ - n -переходами, локалізованими біля їх фронтальної поверхні.

Методика експериментів

Експериментальні дослідження були проведені на зразках сонячних елементів (СЕ) товщиною 400 мкм і площею $1 \times 2 \text{ см}^2$, виготовлених на основі n-типу кремнію зонної плавки марки КБЕ-2 з питомим опором 2 Ом·см. Об'єкти досліджень мали вільну від електродів фронтальну поверхню, завдяки тому, що алюмінієва контактна металізація зустрічно-штирьового типу була сформована на тилowій поверхні досліджуваних СЕ у вигляді двох направлених назустріч гребінок, одна з яких забезпечувала контакт до базової n-області СЕ, а друга — до емітерної p^+ -області, створеної за допомогою дифузії бору біля тилowої поверхні. Біля фронтальної поверхні СЕ мали мілкий ізотипний n^+ - n -перехід, сформований за допомогою дифузії фосфору, з рівнем легування n^+ -шару $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Крім того, для пасивації поверхні і зменшення оптичних втрат на фронтальну поверхню СЕ був нанесений шар двоокису кремнію товщиною 110 нм. Схематичне зображення кремнієвого СЕ з тилowym розташуванням колекторного р-n-переходу наведено на рис. 1.

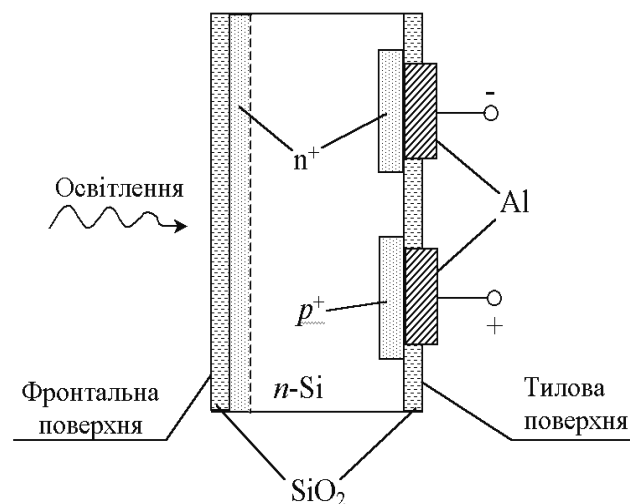


Рис. 1. Схематичне зображення кремнієвого СЕ з тилowym розташуванням колекторного р-n-переходу

На зазначених зразках СЕ досліджувались світлові вольт-амперні характеристики (ВАХ), з яких визначались основні фотоенергетичні параметри СЕ, а також спектральні залежності струму короткого замикання СЕ $I_{\text{кз}}$ в діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = 400 \div 1200 \text{ нм}$, які вимірювались в режимі автоматичної підтримки постійногорівня енергетичної освітленості. Для визначення впливу на генераційно-рекомбінаційні процеси в СЕ пасивуючого поверхневого шару двоокису кремнію і приповерхневого ізотипного n^+ - n -переходу, локалізованого біля його фронтальної поверхні, зазначені характеристики досліджувались в процесі поетапного контрольованого травлення приповерхневих шарів і базової області СЕ з боку фронтальної поверхні при фіксованих параметрах струмозбираючої контактної металізації на тилowій поверхні. Світлові ВАХ дозволяють в процесі поетапного травлення вивчити, зокрема, поведінку струму короткого замикання СЕ, величина якого визначається ефективністю збирання фотогенерованих носіїв заряду, а за допомогою спектральних залежностей струму короткого замикання можна дослідити особливості протікання рекомбінаційних процесів, які, в свою чергу, впливають на ефективність збирання нерівноважних носіїв заряду у СЕ.

Під час травлення СЕ були надійно захищені, доступною для травника була лише їх фронтальна поверхня. Етапи контрольованого травлення були наступними: зняття шару двоокису кремнію з фронтальної поверхні СЕ, видалення приповерхневого n^+ -шару ізотипного переходу шляхом травлення фронтальної кремнієвої поверхні на глибину декілька мікрометрів, поступове (в декілька етапів) травлення базової області на глибину ≈ 300 мкм. При цьому шар двоокису кремнію стравлювався у 20 % розчині HF, а приповерхневий n^+ -шар ізотипного n^+ - n -переходу і базова n -область — у кислотному травнику $HNO_3:HF$ із відповідним об'ємним співвідношенням компонентів 3:1. Після кожного етапу травлення зразки СЕ ретельно промивались у дистильованій воді. Товщина стравлених кремнієвих шарів задавалася зміною часу травлення. Зняття шару двоокису кремнію контролювалось за змочуваністю у воді фронтальної поверхні СЕ, а товщина і однорідність травлення шарів кремнію контролювалась мікрометром. Стан поверхні кремнію після кожного етапу травлення контролювався візуально за допомогою мікроскопу.

Виміри світлових ВАХ та спектральних залежностей проводились на установці фототехнічних випробувань СЕ і на установці для визначення відносних спектральних характеристик фотоперетворювачів в атестованому органами Держспоживстандарту України Центрі випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України.

Експериментальні результати і їх обговорення

Проведений контроль показав, що використаний кислотний травник забезпечує досить однорідне травлення шарів кремнію: при стравленні кремнієвих шарів товщиною біля 100 мкм неоднорідність складала ± 5 мкм. Візуальний контроль під мікроскопом дозволив зробити висновок про непогану якість кремнієвої поверхні після всіх етапів проведеного травлення, що підтверджувалось відсутністю поверхневих аномалій.

На рис.2 наведені типові світлові ВАХ одного з досліджених СЕ, отримані в спектральних умовах АМ1,5 (енергетична освітленість $P_L = 1000$ Вт/м², температура $T = 25^\circ C$), починаючи з початкової та наступні, отримані після

певних етапів травлення. Визначені з цих світлових ВАХ значення фотоенергетичних параметрів СЕ наведені у табл. 1. А на рис. 3 наведені спектральні залежності струму I_{K3} того ж СЕ після тих же етапів травлення.

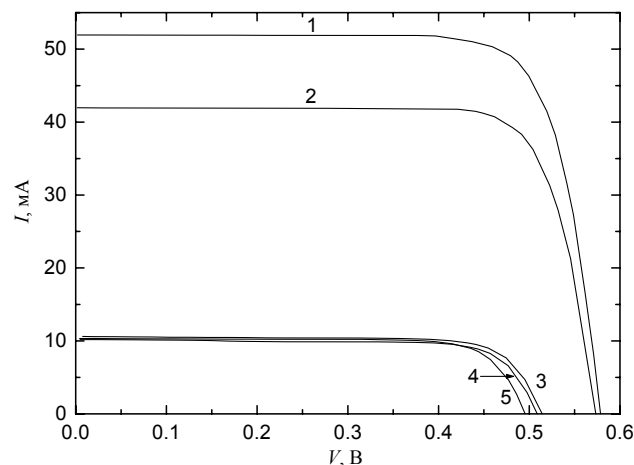


Рис. 2. Світлові ВАХ СЕ (умови АМ1,5) для таких етапів травлення з фронтальної сторони: 1 — початкова (до проведення травлення); 2 — після зняття шару двоокису кремнію товщиною 110 нм; 3 — після видалення приповерхневого n^+ -шару (травлення на глибину декілька мікрометрів); 4 — після стравлення ≈ 100 мкм базової області; 5 — після стравлення ще ≈ 200 мкм базової області (сумарно ≈ 300 мкм)

Таблиця 1
Значення фотоенергетичних параметрів СЕ, визначених з наведених на рис.2 світлових ВАХ

№ світлової ВАХ (рис.2)	Струм короткого замикання, I_{K3} , мА	Напруга розімкненого кола, V_{PK} , В	Коефіцієнт форми світлової ВАХ, K_{Φ}	Ефективність, η , %
1	51,94	0,579	0,78	11,71
2	41,97	0,573	0,79	9,47
3	10,62	0,514	0,77	2,10
4	10,18	0,509	0,77	2,00
5	10,33	0,495	0,78	2,00

Як видно з рис. 2 і табл. 1 видалення шару SiO_2 з фронтальної поверхні СЕ призводить до зменшення струму короткого замикання I_{K3} на величину біля 20 % і до незначного зменшення напруги розімкненого кола V_{PK} . Після наступного етапу травлення, яким видалявся приповерхневий n^+ -шар ізотипного n^+ - n -переходу, зазначені вище фотоенергетичні параметри значно погіршувались, причому величина струму I_{K3} зменшувалась приблизно в 4 рази до величини ≈ 10 мА. Останні три етапи травлення базової області, за рахунок яких товщина СЕ

кожного разу зменшувалась на величину біля 100 мкм залишали значення струму $I_{КЗ}$ приблизно на тому ж рівні і призводили до незначного зменшення значень напруги V_{PK} . Світлова ВАХ СЕ після передостаннього етапу травлення базової області (сумарно на величину ≈ 200 мкм) на рис.2 не наведена. Як видно з табл.1, в процесі травлення коефіцієнт форми світлової ВАХ залишався незмінним, а ефективність СЕ спочатку зменшувалась, а потім залишалась незмінною на рівні 2 %, причому особливо значне зменшення ефективності спостерігалось після видалення приповерхневого n^+ -шару ізотипного n^+ - n -переходу.

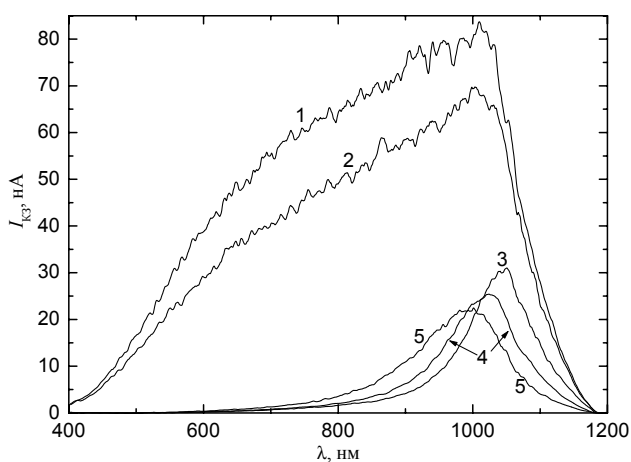


Рис. 3. Спектральні залежності струму короткого замикання $I_{КЗ}$, отримані в умовах постійного рівня енергетичної освітленості, при травленні СЕ з фронтальної сторони. Номер залежності відповідає номеру етапу травлення, визначеному у підпису під рис.2

Спектральні залежності струму $I_{КЗ}$ змінювались наступним чином, рис.3. Спочатку, після зняття шару двоокису кремнію з фронтальної поверхні СЕ, незначна зміна цієї характеристики із збереженням практично тієї ж форми, а потім, після видалення приповерхневого n^+ -шару ізотипного n^+ - n -переходу, спектральна залежність суттєво змінюється порівняно з попередніми залежностями, що проявляється у істотному зменшенні фоточутливості у всьому дослідженому діапазоні довжин хвиль, зокрема, у максимумі характеристики та появі практично нульової спектральної фоточутливості в діапазоні довжин хвиль 400–650 нм. Наступне травлення базової області СЕ на глибину ≈ 100 мкм привело до подальшого зменшення максимального значення величини струму $I_{КЗ}$ на спектральній залежності. Ще два послідовних травлення базової області СЕ на глибину ≈ 100

мкм кожне призводили до поступового незначного зміщення максимуму спектральної характеристики у короткохвильову область (спектральна залежність після передостаннього травлення на рис.3 не наведена).

Аналогічні результати спостерігались на всіх досліджених в роботі СЕ.

Як видно з рис.3, початкова спектральна залежність струму короткого замикання СЕ має спад в короткохвильовій області спектра. Цей спад обумовлений малою глибиною поглинання короткохвильового світла, що приводить до підвищення рівня рекомбінаційних втрат внаслідок генерації відносно високої концентрації нерівноважних носіїв заряду в приповерхневому шарі, де негативний вплив поверхневої рекомбінації є більш значним. Величина ефективно швидкості поверхневої рекомбінації в даному випадку визначається трьома складовими — швидкістю рекомбінації через рекомбінаційно-активні центри на межі поділу Si-SiO₂, швидкістю Оже-рекомбінації в сильнолегованому приповерхневому n^+ -шарі і швидкістю рекомбінації в області просторового заряду (ОПЗ) приповерхневого ізотипного n^+ - n -переходу. Якщо домінуючим рекомбінаційним механізмом, відповідальним за поверхневі рекомбінаційні втрати на фронтальній поверхні такого СЕ, є рекомбінація в ОПЗ приповерхневого n^+ - n -переходу, то її швидкість, як було показано у роботі [11], повинна зменшуватись на багато порядків при збільшенні рівня ін'єкції нерівноважних електронних пар у приповерхневій області, внаслідок чого короткохвильова чутливість повинна помітно зростати. Але проведені в роботі експериментальні дослідження показали, що стаціонарне освітлення білим світлом різної інтенсивності фронтальної поверхні досліджених СЕ у процесі вимірювання спектральних залежностей струму короткого замикання не приводило до помітного підвищення короткохвильової чутливості, що виключає домінування рекомбінації в ОПЗ над двома іншими зазначеними вище складовими поверхневої рекомбінації.

При збільшенні довжини хвилі від 400 нм глибина поглинання світла збільшується, область генерації нерівноважних носіїв заряду наближається до тилового колекторного p^+ - n -переходу СЕ, вони генеруються в більш товстому шарі, при цьому зменшується доля носіїв заряду, які генеруються у приповерхневому n^+ -

шарі, і, внаслідок цих причин, величина струму $I_{\text{КЗ}}$ на спектральних залежностях зростає. Спад у довгохвильовій області обумовлений зменшенням енергії фотонів, через що вони стають нефотоактивними.

Як уже зазначалось, значення швидкості поверхневої рекомбінації на незапасивованій поверхні кремнію значно перевищує відповідне значення для системи Si-SiO₂. Але виявлені зміни величин струму $I_{\text{КЗ}}$ і напруги V_{PK} після видалення шару SiO₂ з фронтальної поверхні SE, як і зміни у відповідних спектральних залежностях, узгоджуються з відомими даними для непросвітлених та просвітлених шаром SiO₂ поверхонь кремнію [12] і свідчать про те, що ці зміни викликані лише зміною оптичних характеристик фронтальної поверхні SE (зняттям просвітлюючого покриття) та про відсутність помітного впливу рекомбінації через поверхневі рекомбінаційно-активні центри на незапасивованій фронтальній поверхні на характеристики досліджених SE, а, значить, і на відсутність помітної зміни величини ефективної швидкості поверхневої рекомбінації, введеної на межі області просторового заряду і квазінейтрального об'єму. Це вказує на те, що в досліджених SE саме Оже-рекомбінація є домінуючим механізмом поверхневої рекомбінації та підтверджує ефективність дії приповерхневого ізотипного переходу, спрямованої на зменшення поверхневих рекомбінаційних втрат, і узгоджується з теоретично отриманими в роботі [5] результатами.

Суттєве зменшення значень струму $I_{\text{КЗ}}$ і напруги V_{PK} SE та зміни форми і фоточутливості спектральних залежностей струму $I_{\text{КЗ}}$ SE після видалення приповерхневого n⁺-шару ізотипного n⁺-n-переходу є наслідком значного погіршення рекомбінаційних характеристик досліджених SE, що пов'язано з негативним впливом великої ефективної швидкості поверхневої рекомбінації на фронтальній поверхні і вказує на домінування поверхневої рекомбінації над об'ємною. Величина ефективної швидкості поверхневої рекомбінації при цьому визначається швидкістю рекомбінації в приповерхневій ОПЗ та швидкістю рекомбінації через поверхневі рекомбінаційно-активні центри на незапасивованій фронтальній поверхні кремнію.

Проведені наступні етапи травлення вже істотно не впливають ні на значення фотоенергетичних параметрів, ні на форму спектральних характеристик, ні на величини спектральної фоточутливості в максимумі спектральних характеристик, що обумовлено постійним значним впливом великої ефективної швидкості поверхневої рекомбінації в SE з незапасивованою фронтальною поверхнею і видаленим приповерхневим ізотипним переходом. Виявлені зменшення величини напруги V_{PK} та незначний зсув максимуму спектральних характеристик в короткохвильову область по мірі травлення базової області SE швидше за все обумовлені тим, що при зменшенні товщини SE величина напруги V_{PK} знижується через наближення фронтальної поверхні з великою ефективною швидкістю поверхневої рекомбінації до колекторного p⁺-n-переходу, який знаходиться біля тилової поверхні SE, а зсув максимуму спектральних характеристик викликаний наближенням до робочого переходу SE області генерації нерівноважних носіїв заряду.

Проведені контрольні досліди показали, що при освітленні досліджених в роботі SE через оптичний фільтр СЗС-25, який не пропускає опромінення з довжиною хвилі $\lambda > 800$ нм, тобто забезпечує приповерхнєве поглинання світла, величини струмів $I_{\text{КЗ}}$ SE після видалення шару SiO₂ з їх фронтальної поверхні змінювались слабо, а після видалення приповерхневого n⁺-шару ізотипного n⁺-n-переходу зменшувались більш ніж на порядок порівняно з величинами цих струмів у SE з існуючим ізотипним приповерхневим переходом. Це підтверджує, що ізотипний приповерхневий перехід забезпечує малу ефективну швидкість поверхневої рекомбінації навіть у випадку незапасивованої поверхні кремнію.

Слід додати, що незмінність коефіцієнту форми світлової ВАХ в процесі травлення вказує на незмінність параметрів струмозбираючої контактної металізації, яка знаходиться на тилій поверхні SE, що підтверджує її надійний захист під час травлення, а зміни значень ефективності SE безпосередньо визначаються відповідними змінами значень величин струму $I_{\text{КЗ}}$ і напруги V_{PK} при переході від одного етапу травлення до наступного.

Висновки

Експериментально досліджений вплив поверхневої рекомбінації на фронтальній поверхні КФС з приповерхневими ізотипними n^+ - n -переходами на їх світлові ВАХ і визначені з них фотоенергетичні параметри, а також на спектральні залежності струму короткого замикання в діапазоні довжин хвиль 400÷1200 нм. Встановлено, що короткохвильову fotocутливість таких КФС зменшує Оже-рекомбінація у приповерхневому n^+ -шарі ізотипного переходу. Показано, що при відсутності приповерхневого ізотипного n^+ - n -переходу, локалізованого біля фронтальної поверхні КФС, ефективна поверхнева рекомбінація на цій поверхні має дуже значний негативний вплив на величини фотоенергетичних параметрів таких структур, а присутність приповерхневого ізотипного переходу забезпечує малу швидкість ефективної поверхневої рекомбінації навіть у випадку незапасивованої поверхні, що узгоджується з теоретично отриманими в роботі [5] результатами.

Список літератури

1. Горбань А. П., Литовченко В. Г. Исследование токов, управляемых поверхностным пространственным зарядом, в эффекте поля и МОП-структурах // Укр. физич. журн. — 1967. — Т.12, № 7. — С.1069–1082.
2. Wolf M. High-efficiency silicon solar cells. — Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. — San Diego, USA, 1980. — P.674–679.
3. Green M. A. Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancement // *Semicond. Sci. Technol.* — 1993. — Vol.8, № 1. — P.1–12.
4. Swanson R. M. Approaching the 29 % limit efficiency of silicon solar cells. — Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf. — Barcelona, Spain, 2005. — P.584–589.
5. Вплив концентрації надлишкових носіїв заряду на ефективну швидкість поверхневої рекомбінації в кремнієвих fotocутливих структурах / Горбань А. П., Костильов В. П., Саченко А. В. та ін. // Укр. фіз. журн. — 2006. — Т.51, № 6. — С.599–605.
6. Green M. A., Blakers A. W., Narayanan S., Taqum M. Improvements in silicon solar cell efficiency // *Solar cells.* — 1986. — V.17, N1. — P.75–83.
7. Kerr M. J., Campbell P., Cuevas A. Lifetime and efficiency limits of crystalline silicon solar cells. — Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. — New Orleans, USA, 2002. — P.438–441.
8. Glunz S. W., Sproul A. B., Warta W., Wettling W. Injection-level-dependent recombination velocities at the Si-SiO₂ interface for various dopant concentrations // *J. Appl. Phys.* — 1994–75, N3. — P.1611–1615.
9. Kampwerth H., Rein S., Glunz S. Accurate determination of bulk lifetime and surface recombination velocity // Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conf. — Paris, France, 2004. — P.733–737.
10. Swanson R. M. Point-contact solar cells: modeling and experiment // *Solar cells.* — 1986. — V.17, N1. — P.85–118.
11. Вплив плаваючих р- n -переходів на ефективність кремнієвих сонячних елементів із тилловими контактами / Горбань А. П., Костильов В. П., Саченко А. В. та ін. // Укр. фіз. журн. — 2010. — Т.55, № 7. — С.784–792.
12. Горбань А. П., Костыльов В. П. О просветлении кремниевых поверхностно-канальных фотопреобразователей // *Надежность микроэлектронных схем и элементов.* — Киев: Наук. думка. — 1982. — С.87–93.