

УДК 621.382.2

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕКСТУРУВАННЯ ЇХ ПОВЕРХНІ

С. В. Ленков¹, Д. В. Лукомський², О. І. Ликов³, В. В. Зубарєв⁴

¹Д.т.н., проф., ВІТІ НТУУ “КПІ”, м. Київ

²ВАТ “Квазар”, м. Київ

³ІЕПБ, м. Київ

⁴К.т.н., Мінпромполітики України

Анотація

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕКСТУРУВАННЯ ЇХ ПОВЕРХНІ

С. В. Ленков, Д. В. Лукомський, О. І. Ликов, В. В. Зубарєв

Наведені результати дослідження впливу текстуровання поверхні на електрофізичні характеристики кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Отриманні результати можуть бути використані при розробці чи удосконаленні технології виробництва кремнієвих фотоперетворювачів для підвищення їх якості і надійності.

Ключові слова: надійність, кремнієві фотоелектричні перетворювачі, текстуровання, піраміди, антивідбиваюче покриття

Аннотация

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕКСТУРИРОВАНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

С. В. Ленков, Д. В. Лукомский, А. И. Лыков, В. В. Зубарев

Приведены результаты исследования влияния текстурирования поверхности на электрофизические характеристики кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Полученные результаты могут быть использованы при разработке или усовершенствовании технологии производства кремниевых фотопреобразователей для повышения их качества и надежности.

Ключевые слова: надежность, кремниевые фотоэлектрические преобразователи, текстурирование, пирамиды, антиотражающее покрытие

Summary

INCREASE OF PERFORMANCE OF SILICON SOLAR CELLS THROUGH A TEXTURING OF THEIR SURFACE

S. V. Lenkov, D. V. Lukomskyy, A. I. Lykov, V. V. Zubarev

The experiment on definition of influence texturing of a surface on the characteristics of silicon solar cells is described. The obtained results can be utilised at development or refinement of the production technology of silicon cells for increase of their efficiency and reliability.

Keywords: reliability, silicon solar cell, surface texturing, pyramids, antireflective coating

Сьогодні при промисловому виготовленні кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) для зменшення оптичних втрат широко застосовується текстурування їх поверхні [1]. Для вибору найбільш раціонального маршруту виготовлення кремнієвих ФЕП необхідно визначити особливості впливу текстурування поверхні на електрофізичні характеристики готового приладу та оцінити приріст ефективності фотоперетворювання завдяки текстуруванню поверхні.

Як відомо, текстурування поверхні кремнієвих пластин дозволяє отримати наступні вагомні переваги [2]:

- зменшення коефіцієнту оптичного відбиття від поверхні ФЕП;

- зсув поглинання фотонів ближче до області просторового заряду завдяки їх неперпендикулярного входження в об'єм напівпровідника.

Коефіцієнт відбиття кремнію з плоскою поверхнею складає близько 35%, а для кремнію з текстурованою поверхнею зменшується до 11% [3]. Зменшення відбиття призводить до зростання як струму короткого замикання, так і напруги холостого ходу, що в свою чергу проявляється в підвищенні ефективності ФЕП. Використання одно- або двохшарового антивідбиваючого покриття (АВП) дозволяє знизити інтегральний коефіцієнт відбиття до кількох процентів [4]. На рис. 1 наведені типові спектральні розподіли коефіцієнту відбиття фотоперетворювачів з плоскою поверхнею з антивідбиваючим покриттям (а) та текстурованою поверхнею з антивідбиваючим покриттям (б).

Для текстурування поверхні кремнієвих пластин найбільш широко використовується спонтанне анізотропне хімічне травлення в гарячих лужних розчинах [2, 5]. При такому травленні на поверхні кремнієвих пластин утворюються чотириохгранні піраміди, які спря-

мованні вершинами догори. Утворення пірамід пов'язано з тим, що швидкість травлення кремнію для площини (100) вища, ніж для площини (111). Одним з найбільш важливих та критичних параметрів при текстуруванні є концентрація розчину. В роботі [3] наведені залежності коефіцієнту оптичного відбиття пластин від концентрації водних розчинів КОН та NaOH. Дослідження показали, що для кожного з розчинів існує свій діапазон концентрацій, в якому відбиття мінімально. Це пов'язано з тим, що саме в цих діапазонах концентрацій травлення кремнію є анізотропним. При підвищенні концентрації розчину травлення стає ізотропним і утворення пірамід не відбувається. Іншими параметрами процесу є температура та термін травлення. Найкращі результати досягалися в діапазоні температур +70...90 °С за час близько 10 хвилин [3]. Час травлення визначає розмір та густину розташування пірамід, що впливає на відбиття від поверхні пластин [6]. Типова залежність коефіцієнту відбиття від терміну травлення приведена на рис. 2.

Для визначення впливу текстурування поверхні на електрофізичні характеристики готових приладів, перетворювачі виготовлялися по 4 різним маршрутам (рис. 3). Дослідження проводились з використанням кремнію марки КДБ-1 (1,2 Ом·см) з концентрацією вуглецю $N_c < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрацією кисню $N_o < 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та часом життя неосновних носіїв заряду $\sim 50 \text{ мкс}$. Пластини після різки мали товщину $330 \pm 30 \text{ мкм}$ та орієнтацію поверхні (100).

Пошкоджений шар кремнію для пластин з груп I, II та III видалявся шляхом ізотропного травлення в висококонцентрованому розчині NaOH (30% по вазі). Пластини з групи IV підвергалися поліруючому кислотному травленню в розчині CP-4. Текстурування проводи-

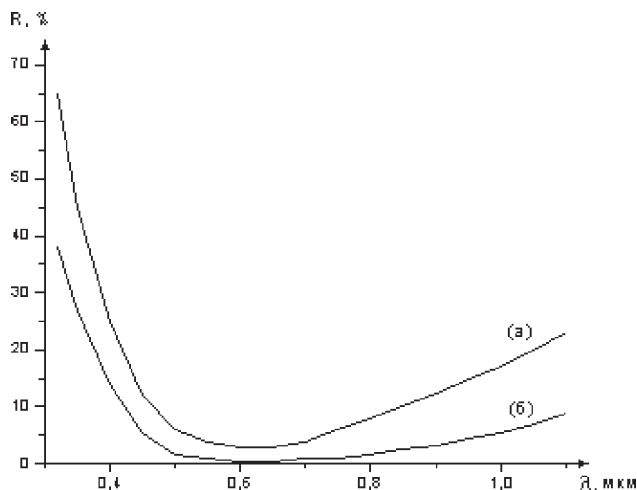


Рис. 1. Спектральна залежність коефіцієнту оптичного відбиття фотоперетворювачів з плоскою (а) та текстурованою (б) поверхнею з одношаровим антивідбиваючим покриттям [4].

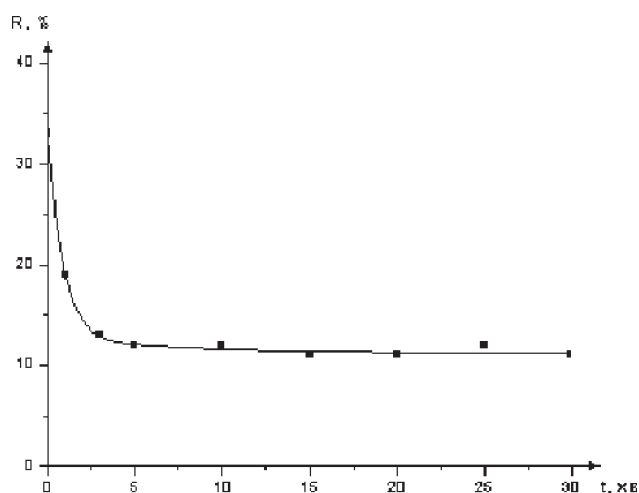


Рис. 2. Залежність інтегрального коефіцієнту відбиття кремнієвих пластин від терміну травлення у водному розчині 2% NaOH та 9% ізопропілового спирту [3].

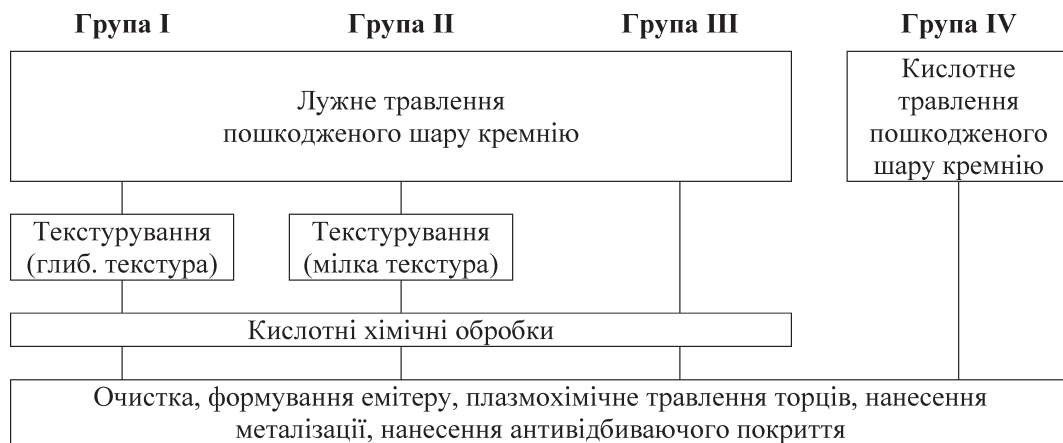


Рис. 3. Послідовність технологічних операцій для різних маршрутів виготовлення ФЕП.

лось в водному розчині 2% NaOH та 9% 2-пропанолу при температурі +80 °С. Термін текстурування вибирався таким чином, щоб отримати глибоку (група I) та мілку текстуру (група II). Для оцінки отриманого приросту ефективності пластини з групи III та групи IV не текстурувалися. Пластини з груп I, II та III, що пройшли лужне травлення, додатково підвергалися кислотним обробкам (HNO₃, HCl) для зниження концентрації фонових домішок на поверхні та в об'ємі кремнію. Після цього всі пластини проходили очистку в розчинах SC-1 (NH₄OH + H₂O₂ + 4·H₂O), SC-2 (HCl + H₂O₂ + 4·H₂O) та в 1% розчині плавикової кислоти.

Мілкий емітерний n⁺p-перехід було сформовано за допомогою фосфорної дифузії з PCl₃ при температурі +830 °С. Поверхневий

опір, що вимірюється на контрольних пластинах, склав 40–45 Ом/□. Ізоляція лицьового та тильного n⁺p-переходів проводилася методом плазмохімічного травлення торців пластин.

Контактна металізація ФЕП формувалась за допомогою трафаретного друку металічних паст з наступним їх сушінням та випалюванням зв'язуючого матеріалу. На тильну поверхню пластин наносилася алюмінієва паста, а на лицьову — срібна паста у вигляді сітки. Обидва контакти одночасно відпалювалися у високошвидкісній конвеєрній ІЧ-пічці при піковій температурі +740 °С. Термін обробки при температурі вище +600 °С складав 20 с.

Антивідбиваюче покриття формувалося шляхом нанесення на пластини емульсії на основі сполук титану та наступної термообробки при температурі +180 °С. Емульсія наноси-

лася на поверхню пластин за допомогою центрифугування.

Через малу глибину різкості оптичних систем вивчення рельєфу поверхні проводилося на растровому електронному мікроскопі (РЕМ). Виміри коефіцієнту відбиття проводилися за допомогою спектрофотометра [7]. Електрофізичні параметри ФЕП вимірювалися на тестері класу А з ксеноновою імпульсною лампою при інтенсивності світла 1 кВт/м^2 , повітряній масі АМ 1,5 та температурі $+25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аналіз рельєфу поверхні текстурованих

пластин показав, що сформована текстура є рівномірною та однорідною по всій площі пластини. Отриманий на РЕМ фрагмент текстурованої поверхні показаний на рис. 4. Розмір зерна лежить в діапазоні від 0,5 до 8 мкм. Піраміди травлення мають правильну форму (рис. 5). Для пластин з групи I максимальна висота окремих пірамід досягає 10 мкм, загальна маса пірамід по висоті вкладається в 7...8 мкм. Для пластин з групи II максимальна висота пірамід досягає 4 мкм, загальна маса пірамід має висоту 2...3 мкм.

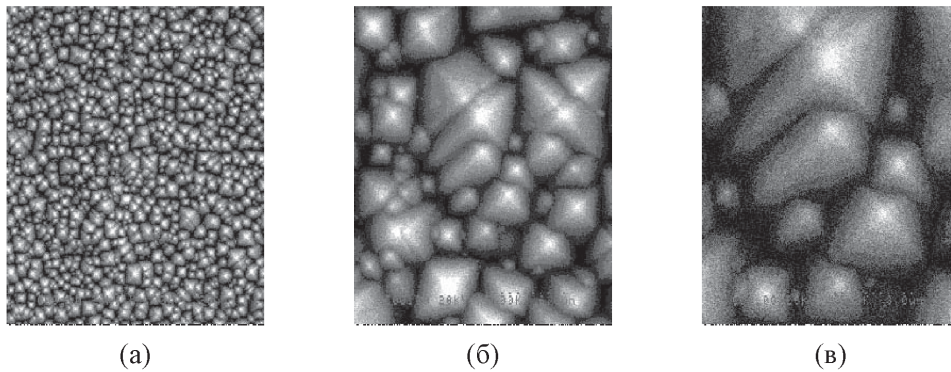


Рис. 4. Зображення текстурованої поверхні зі збільшенням $\times 1000$ (а), $\times 5000$ (б) та $\times 10000$ (в).

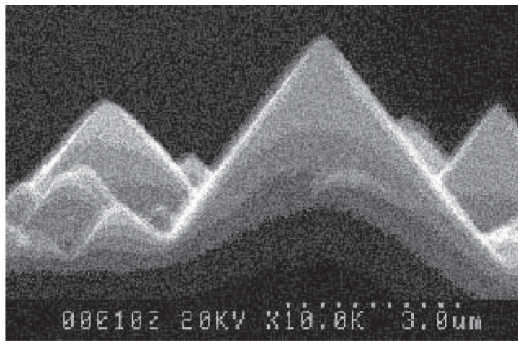


Рис. 5. Приклад зображення розтину текстурованої пластини при збільшенні $\times 10000$.

Для оцінки оптичних характеристик ФЕП з текстурованою поверхнею були проведені виміри інтегрального коефіцієнту оптичного відбиття після операції текстуровання, а також після нанесення антивідбиваючого покриття. Результати для пластин з групи II наведені на рис. 6. Як видно, текстуровані пластини мають коефіцієнт оптичного відбиття близько 10%, що співпадає з даними наведеними в роботі [3]. Після нанесення антивідбиваючого покриття коефіцієнт відбиття зменшився до 4,5 %.

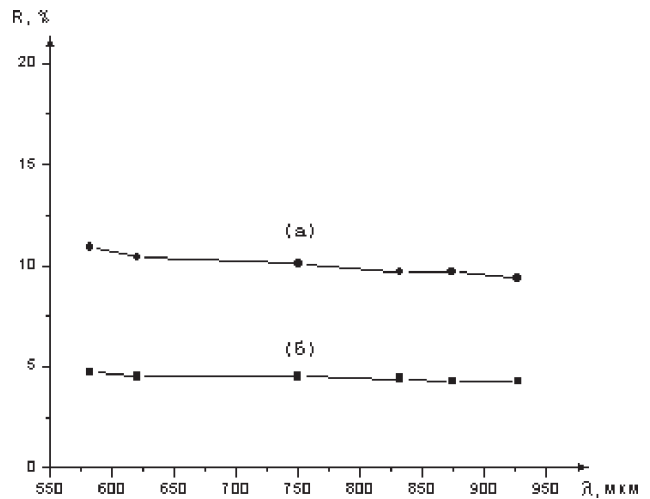


Рис. 6. Спектральна залежність коефіцієнту оптичного відбиття для пластин з текстурою 2,5...3,0 мкм без антивідбиваючого покриття (а) та з нанесеним антивідбиваючим покриттям (б).

Усередненні результати вимірювань електрофізичних параметрів ФЕП наведені в таблиці. Як видно з результатів експерименту, текстуровання поверхні ФЕП призвело до збільшення струму короткого замикання на 20% у порівнянні з хімічно полірованою поверхнею. В той же час, приріст струму короткого зами-

кання у порівнянні з ФЕП групи III склав всього близько 10%. Це можливо пояснити тим, що поверхня фотоперетворювачів групи III є більш розвинутою у порівнянні з поверхнею ФЕП групи IV. Тому втрати на відбиття для таких ФЕП також менші.

Значення напруги холостого ходу для текстурованих ФЕП декілька вище, чим для приладів з хімічно полірованою поверхнею. Низьке значення U_{xx} в групі III можливо пояснити неповним зняттям пошкодженого шару кремнію та, як слідство, підвищеною швидкістю поверхневої рекомбінації на лицьовій стороні.

Низькі значення коефіцієнту заповнення ВАХ (Fill Factor — FF) для фотоперетворювачів з групи I пов'язані, очевидно, з особливостями нанесення антивідбиваючого покриття на текстуровану поверхню. Зі збільшенням висоти пірамід також зростає нерівномірність плівки АВП — покриття має різну товщину на вершинах пірамід та між пірамідами. Це призводить до зниження якості контакту на лицьовій поверхні ФЕП та збільшенню сумарних втрат.

Таблиця

Параметри ФЕП в залежності від підготовки поверхні

Група	ККД, %	$J_{кз}$, мА/см ²	U_{xx} , мВ	FF, %
I	14,2	31,1	622	72,6
II	14,5	30,7	626	75,4
III	12,5	27,9	599	74,4
IV	11,2	25,7	621	69,5

Таким чином, як показали дослідження, текстуровання поверхні привело до покращання електрофізичних характеристик готових фотоперетворювачів та до зростання їх ККД

приблизно на 25%. Дані, що отримано, підтвердили ефективність операції текстуровання поверхні ФЕП. Вибір раціональних режимів текстуровання, що запропоновані у статті, дозволяє обґрунтовано підходити до розробки технології крупносерійного виготовлення високоефективних кремнієвих ФЕП.

Література

1. Green M.A. Crystalline silicon solar cells: status and prospects for laboratory, commercial and thin-film cells // *Optoelectronics — Devices and Technologies*. — 1994. — Vol. 9, N4. — P. 423–434.
2. Мокрицький В.А., Дранчук С.М., Андріянов О.В., Ленков С.В., Зубарев В.В. Фізико-технічні основи мікроелектроніки. — Одеса: ТЕС, 2002. — 712 с.
3. Marques F.C., Cartaxo S.J.M. Sprayed SnO₂ anti-reflective coating on textures silicon solar cells // *Proc. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. — Amsterdam (The Netherlands). — 1994. — Vol. 1. — P. 1014–1017.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984, т.2. — 453 с.
5. Николаенко Ю.Е., Вакив Н.М., Круковський С.И. и др. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. — 2001. — №3. — С. 21–30.
6. Spitzer M.B., Keavnay C.I., Geofray I.M. Theoretical and experimental consideration for high silicon solar cell performance // *Solar Cells*. — 1986. — №1. — P. 135–149.
7. Гаркавенко О.С., Зубарев В.В., Ленков С.В., Лукомський Д.В., Мокрицький В.А. Нові лазерні методи, заходи і технології. — Одеса: Астропринт, 2002 — 280 с.