

УДК 621.315

ДВУСТОРОННИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НА ОСНОВЕ ИЗОТИПНЫХ ПЕРЕХОДОВ

*А. Симашкевич¹, Е. Бобейко², Л. Брук¹, П. Морвилло²,
Ю. Усатый¹, В. Фёдоров¹, Д. Шербан¹.*

1 — Институт Прикладной Физики АНМ, ул. Академическая 5, MD 2028, Кишинев, Молдова,
тел. (37322)738054, e-mail: Alexey.Simashkevich@phys.asm.md, serban@mail.md,

bruk@usm.md, usaty1980@mail.ru

2 — ENEA CR, Portici, loc.Granatello, 80055, Na., Italy, e-mail: eugenia.bobeico@portici.enea.it,
morvillo@portici.enea.it

Аннотация

ДВУСТОРОННИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СВЕТОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НА ОСНОВЕ ИЗОТИПНЫХ ПЕРЕХОДОВ

А. Симашкевич, Е. Бобейко, Л. Брук, П. Морвилло, Ю. Усатый, В. Фёдоров, Д. Шербан.

Разработан способ получения двусторонних солнечных элементов $n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO$ на основе изотипных переходов методом пиролитической пульверизации. Область спектральной чувствительности разработанной структуры расположена в интервале длин волн 350–1200 нм и не зависит от направления освещения. Основные параметры для элемента на основе КЭФ-4,5 следующие: при фронтальном освещении $V_{xx}=0,425В$, $I_{кз}=32,63\text{мА/см}^2$, $FF=68,3\%$, к.п.д.=9,47%; при тыльном освещении $V_{xx}=0,392В$, $I_{кз}=13,20\text{мА/см}^2$, $FF=69,3\%$, к.п.д.=3,60%.

Ключевые слова: двусторонний солнечный элемент, изотипный переход, слои ITO, пиролитическая пульверизация.

Анотація

ДВУСТОРОННІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ СВІТЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНУ НА ОСНОВІ ИЗОТИПНИХ ПЕРЕХОДІВ

А. Симашкевич, Е. Бобейко, Л. Брук, П. Морвилло, Ю. Усатый, В. Федоров, Д. Шербан.

Розроблено спосіб отримання двосторонніх сонячних елементів $n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO$ на основі ізотипних переходів методом піролітичної пульверизації. Область спектральної чутливості розробленої структури розташована в інтервалі довжин хвиль 350-1200 нм і не залежить від напрямку освітлення. Основні параметри для елемента на основі КЭФ-4,5 наступні: при фронтальному освітленні $V_{xx}=0,425В$, $I_{кз}=32,63\text{мА/см}^2$, $FF=68,3\%$, к.к.д.=9,47%; при тыльному освітленні $V_{xx}=0,392В$, $I_{кз}=13,20\text{мА/см}^2$, $FF=69,3\%$, к.к.д.=3,60%.

Ключові слова: двосторонній сонячний елемент, ізотипний перехід, шари ITO, піролітична пульверизація.

Annotation

THE BIFACIAL CONVERTER OF SOLAR ENERGY IN ELECTRICAL ON THE BASE OF ISOTYPE HETEROJUNCTION

A. Simashkevich, E. Bobeico, L. Bruk, P. Morvillo, Ju. Usatii, V. Fedorov, D. Sherban

The method of $n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO$ bifacial solar cells fabrication by pyrolytical spraying was elaborated. This structure contains only isotype junctions. The spectral sensitivity is situated in the 350–1200nm wavelength region and is independent on the illumination direction. The photoelectrical parameters of solar cells obtained on silicon wafer (4,5 Ohm.cm) are following: at frontal illumination $V_{oc}=0,425V$, $I_{sc}=32,63mA/cm^2$, $FF=68,3\%$, $E_{ff}=9,47\%$; at rear illumination $V_{oc}=0,392V$, $I_{sc}=13,20mA/cm^2$, $FF=69,3\%$, $E_{ff}=3,60\%$.

Key words: bifacial solar cells, ITO layers, silicon wafers, pyrolytic pulverization.

Двусторонние солнечные элементы являются перспективными полупроводниковыми приборами, так как способны преобразовывать в электрическую энергию солнечное излучение, падающее на обе стороны элементов, что приводит к увеличению их эффективности. Разработаны и исследованы различные конфигурации двусторонних солнечных элементов, конструкции которых в соответствии с числом и типом переходов могут быть разделены на следующие группы [1]:

- а) структура с двумя анизотипными р-п переходами;
- б) структура с одним анизотипным р-п переходом и одним изотипным $n-n^+$ или $p-p^+$ переходом;
- в) структура с одним анизотипным р-п переходом.

Каждая из перечисленных конструкций имеет свои недостатки. Так, двусторонние солнечные элементы с конструкцией первого типа не удобны в практическом использовании, так как вырабатываемая каждым переходом энергия не суммируется, а вычитается и на выходе регистрируется их разница. Конструкция двусторонних элементов второго типа слишком сложна, а третьего типа не обеспечивает достаточную эффективность элемента при его тыльном освещении. Кроме того, все указанные структуры содержат р-п переходы, которые формируются диффузией примесей в пластину кремния. Процесс диффузии является сложным из-за необходимости в случае наиболее распространенной конструкции двусторонних солнечных элементов типа б) осуществления одновременной диффузии примесей фосфора и бора, влияющих противоположным образом

на свойства кремния, требует значительных энергетических затрат, специальных условий и точного регулирования.

Традиционный р-п переход, электрическое поле которого разделяет генерированные светом неравновесные носители заряда, может быть заменен в солнечных элементах структурой типа полупроводник-диэлектрик-полупроводник (ПДП). Такие структуры могут быть получены сравнительно простым и более низкотемпературным методом пиролизической пульверизации [2-5].

Целью настоящей работы является разработка и исследование солнечного элемента с двусторонней чувствительностью на основе только изотипных переходов $n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO$, изготовление которого устраняет значительную часть вышеперечисленных проблем. В этом случае осуществляется только один процесс диффузии для формирования перехода n^+Si/nSi . Второй переход $nSi/SiO_2/n^+ITO$ формируется пульверизацией с последующим пиролизом спиртовых растворов хлоридов индия и олова на поверхность пластины кремния.

Взяв за основу физические параметры кремниевой пластины КЭФ 4,5 и тонких слоёв ITO, смоделирована и построена энергетическая зонная диаграмма изотипной структуры $n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO$, представленная на Рис.1. Области пространственного заряда обоих переходов, равные 0,52мкм и 0,36мкм соответственно расположены в nSi . Для уменьшения влияния разрывов зон и поверхностных состояний на границе раздела фронтального гетероперехода перед его формированием на поверхности nSi необходимо создать промежуточный диэлек-

трический слой SiO_2 , туннельно-прозрачный для носителей заряда.

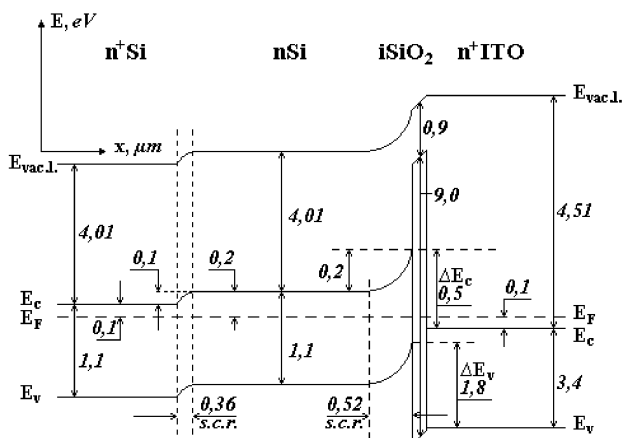


Рис.1. Зонная диаграмма структуры $n^+\text{Si}/n\text{Si}/\text{SiO}_2/n^+\text{ITO}$.

При освещении фронтальной поверхности структуры кванты света с меньшей энергией, чем энергетическая ширина запрещенной зоны ИТО, не поглощаясь в этом материале (также как и в слое SiO_2) попадают на поверхность базового материала $n\text{Si}$. Фотоны с энергией в интервале 1,1...3,4эВ поглощаются в базовом материале и генерируют электронно-дырочные пары. Неравновесные носители заряда пространственно разделяются полем перехода $n\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ITO}$, область пространственного заряда которого практически полностью расположена в $n\text{Si}$, так как концентрация носителей заряда в нем на 5-6 порядков меньше чем в слое ИТО. Полем перехода $n^+\text{Si}/n\text{Si}$, область пространственного заряда которого по той же причине также полностью расположена в $n\text{Si}$, электроны увлекаются к тыльному контакту, а дырки, туннелируя через тонкий слой SiO_2 , рекомбинируют с основными носителями заряда в ИТО и заряжают фронтальную контактную металлическую сетку положительно. Таким образом, на электродах рассматриваемого двустороннего солнечного элемента при его освещении возникает разность потенциалов. Тот же эффект наблюдается и при освещении элемента с тыльной стороны. Солнечное излучение, поглощенное в объеме $n\text{Si}$, ограниченной границей раздела фронтального перехода и расстоянием d от этой границы, равно $d=w+L_p$, где w -область пространственного заряда и L_p -длина диффузии дырок в $n\text{Si}$, генерирует электронно-дырочные пары, которые разделяются

полем гетероперехода $n\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{ITO}$. Разделенные неравновесные носители проходят к металлическим электродам уже описанным путем, следовательно, при освещении элемента одновременно с двух сторон потоки разделенных носителей заряда будут суммироваться.

На основе вышеуказанной структуры изготовлен солнечный элемент $\text{Cu}/n^+\text{Si}/n\text{Si}/\text{SiO}_2/n^+\text{ITO}/\text{Cu}$, схематическое изображение которого представлено на Рис.2.



Рис.2. Схематическое изображение структуры $n^+\text{Si}/n\text{Si}/\text{SiO}_2/n^+\text{ITO}$

В качестве основной компоненты были использованы пластины кремния КЭФ-4,5 и КЭФ-1, ориентированные в плоскости (100), электронной проводимости и толщиной 350мкм и 250мкм соответственно. Для формирования перехода $n^+/n\text{Si}$, был использован метод диффузии фосфора из жидкого источника POCl_3 . Процесс диффузии осуществляли в течение 30 мин при температуре 850°C с последующим отжигом пластины при температуре 940°C в течение 180 мин. Сформированный потенциальный барьер с энергетической высотой, равной 0,1эВ, расположен на глубине 0,8-1 мкм от тыльной поверхности пластины кремния. Далее на противоположной поверхности пластины кремния n типа проводимости методом пиролитической пульверизации раствора хлоридов индия и олова в этаноле состава $1\text{MInCl}_3:1\text{MSnCl}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ в пропорции 9:1:10 наносили слой ИТО при 450°C в температурном режиме, обеспечивающем на границе раздела кремний-слой ИТО образование диэлектрического слоя толщиной 30-40Å, состоящего из

собственного окисла базового полупроводникового материала. Тонкие слои ИТО имели толщину 0,3-0,4 мкм, обладали поверхностным сопротивлением 10-12 Ом/□ и энергетической шириной запрещенной зоны E_g , равной 3,4эВ. Установка для получения слоев ИТО приведена в [5]. Омические контакты в виде коллекторных сеток к слою ИТО и n^+Si были получены термическим испарением меди в вакууме через специальные маски.

Нагрузочные характеристики изготовленного изотипного солнечного элемента с двусторонней чувствительностью, измеренные в стандартных условиях АМ 1,5 ($1000\text{Вт}/\text{м}^2$) при освещении образца со стороны тыльного и фронтального переходов, представлены на Рис.3а,б.

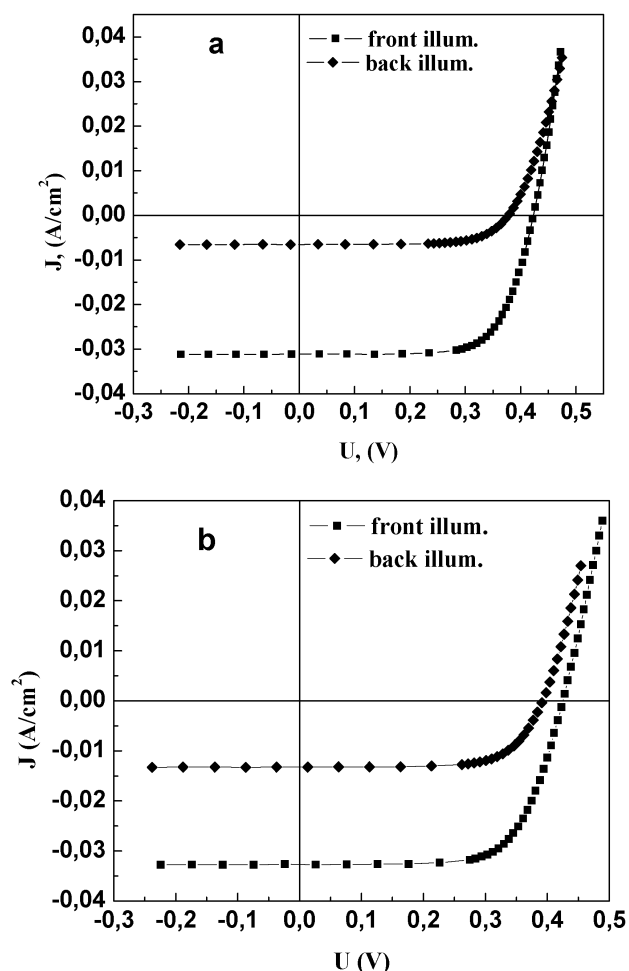


Рис.3. Нагрузочные характеристики структуры $\text{Cu}/n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO/\text{Cu}$ на основе КЭФ-1 (а) и КЭФ-4,5 (б).

Основные фотоэлектрические параметры элемента, изготовленного на базе КЭФ-1, имеют следующие значения: $V_{xx}=0,423\text{В}$,

$I_{k3}=31,1\text{мА}/\text{см}^2$, $FF=70,3\%$ и к.п.д.=9,24% при освещении с фронтальной стороны и $V_{xx}=0,378\text{В}$, $I_{k3}=5,63\text{мА}/\text{см}^2$, $FF=69,1\%$ и к.п.д.=1,70% при освещении с тыльной стороны. Эти же параметры для элемента на основе КЭФ-4,5 равны: $V_{xx}=0,425\text{В}$ и $0,392\text{В}$, $I_{k3}=32,63\text{мА}/\text{см}^2$ и $13,20\text{мА}/\text{см}^2$, $FF=68,3\%$ и $69,3\%$, к.п.д.=9,47% и 3,60%. Видно, что при использовании в качестве базового материала КЭФ-1 ($n=4,5 \cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$) параметры двустороннего солнечного элемента при обоих направлениях освещения хуже, чем те же параметры элемента на основе КЭФ-4,5 ($n=10^{15}\text{см}^{-3}$). Этот факт может быть объяснен меньшими значениями в этом элементе ширины области пространственного заряда и длины диффузии основных носителей. Отметим также, что эффективность изучаемых структур, освещаемых с тыльной стороны, составляет до 40% от их эффективности при освещении с фронтальной стороны.

Исследование спектрального распределения эффективного внутреннего квантового выхода ($Q_{\text{эф}}$) показало (Рис.4), что область чувствительности разработанной структуры расположена в интервале длин волн 350–1200нм и не зависит от направления освещения. От этого направления зависит величина $Q_{\text{эф}}$, которая близка к единице в случае фронтального освещения и равна 0,2–0,3 при тыльном освещении.

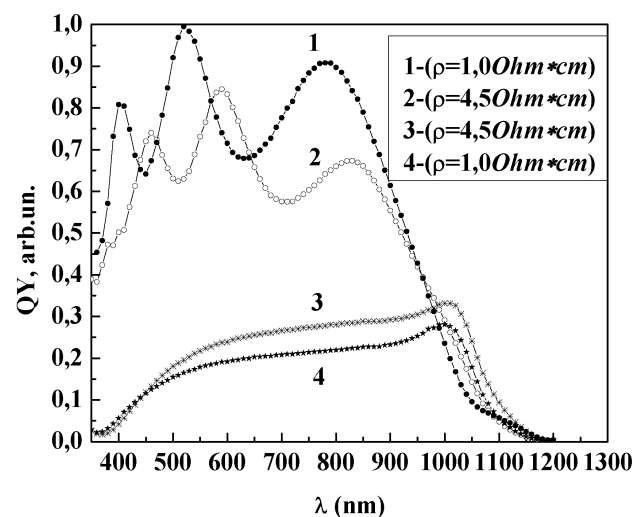


Рис.4. Спектральное распределение квантового выхода (QY) структуры $\text{Cu}/n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO/\text{Cu}$

Наличие ряда максимумов на кривой при фронтальном освещении связано с интерференцией света за счет слоя ИТО. По ним, согласно известному выражению [6]

$$D = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) 2n,$$

где D — толщина слоя ИТО; λ_1, λ_2 — длины волн, при которых расположены два соседних максимума/минимума; n — показатель преломления, равный для ИТО 1,8, были определены толщины слоев ИТО в исследуемых двусторонних элементах, интервал значений которых указан выше.

В результате проведенной работы были изготовлены двусторонние солнечные элементы, содержащие только изотипные переходы. С этой целью были использованы пластины кремния n -типа толщиной 250 мкм и 350 мкм, на которые, для образования фронтального перехода, методом пиролитической пульверизации наносился слой ИТО толщиной 0,3–0,4 мкм. На тыльной стороне пластины кремния формировался n^+/n переход методом диффузии фосфора. Наибольшая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую двусторонним изотипным солнечным элементом $Cu/n^+Si/nSi/SiO_2/n^+ITO/Cu$, измеренная в условиях АМ1,5, получена при использовании пластин КЭФ 4,5 и равна 9,47% при фронтальном освещении и 3,67% при тыльном освещении элемента.

Приведенные результаты, хотя и являются неоптимальными, убедительно свидетельствуют о возможности изготовления фотоэлектрической структуры на основе только изотипных

переходов. Намечены пути и способы оптимизации параметров этой структуры.

Работа выполнена в рамках Совместного Проекта Исследований между АНМ и РФФИ, код проекта 06.14CRF.

Литература

1. Cuevas A., The Early History of Bifacial Solar Cells //Proc of the 20 European PV Solar Energy Conf. — Barcelona. — 2005. — p.801-805.
2. Adeeb N., Kretsu I., Sherban D., Sushkevich V., Simashkevich A., Spray deposited ITO-CdTe solar cells //Sol. Energy Mater. — vol. 15. — N1. — 1987. — p.9-19.
3. Do Quoc Hung, Bobeico E., Gorcheac L., Sherban D., Simashkevich A., Solar Cells Based on SIS Structures //Proc. Of the Third Int. Workshop on Material Sciences. — Hanoi. — 1999. — part 1. — p.56-59.
4. Gagara L., Gorcheac L. Radu C. Sherban D. Simashkevich A., Photovoltaic Converters of Solar Energy on the Base of SIS Structures //Proc. of the Int. Conf. "Euro-Sun 96". — Munchen. — 1996. — V.2. — p.665-669.
5. Simashkevich A., Sherban D., Bruk L., Bobeico E., Coval A., Fedorov V., Usaty Iu., Spray Deposited ITO-nSi Solar Cells With Enlarged Area //Proc. of the 20 European PV Solar Energy Conf. — Barcelona. — 2005. — p.980-982.
6. Moss T.S., Barrel G.J., Ellis B., Semiconductor Opto-Electronics. — Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. — 1973, 431p.