

06.2;06.3;07;12

©1995

КРЕМНИЕВЫЕ КОНЦЕНТРАТОРНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ДИФФУЗАНТОВ

*Е.Г.Гук, Н.С.Зимогорова, М.З.Шварц,
В.Б.Шуман, Н.А.Токранова*

Разработка солнечных элементов (СЭ), предназначенных для работы с концентраторами солнечной энергии, позволяет снизить затраты на преобразование солнечной энергии вследствие экономии полупроводникового материала и повышения КПД СЭ при росте интенсивности светового потока. Наиболее эффективные концентраторные солнечные элементы (КСЭ) созданы на основе GaAs^[1,2]. Однако, учитывая дороговизну GaAs и ограниченные возможности его производства, следует признать за кремниевыми КСЭ большое будущее. Рекордное значение КПД для кремниевых КСЭ при облучении солнечным потоком кратностью $C = 140$ солнц равно 26.5% (AM1.5, $C = 140$)^[2]. Этот результат получен на структурах, изготовленных с использованием чрезвычайно сложного технологического процесса из монокристаллов Si с уникальными характеристиками^[3]. Поэтому остается актуальной разработка технологии КСЭ на основе промышленного Si: это является целью данной работы.

В работе получены КСЭ на основе p -Si с удельным сопротивлением 1–3 Ом·см (марки КДБ-1, КДС-3) и исследованы их характеристики. Структуры имели антиотражающее покрытие.

Обычно мелкие p - n переходы в кремнии формируют либо диффузией из газовой фазы или растворных стекол, либо ионным внедрением. Очевидно, что при малых временах диффузии методы, которые позволяют наносить диффузанта непосредственно на пластины кремния, могут иметь определенные преимущества. В настоящей работе в качестве источника диффузии примесей были использованы бор- и фосфорсодержащие полимерные композиции на основе полиэфиркарборанадипина и полифосфорнитриланилида соответственно. Эти диффузаны ранее использовались только для создания глубоких ($x_j \gg 10$ мкм) p - n переходов^[4] и

продемонстрировали существенные преимущества по сравнению с растворными стеклами на основе тетраэтоксилана. Последние имеют два недостатка:

1) они нестабильны во времени (в особенности нестабильны растворы, содержащие соединение фосфора), так как в них протекает неконтролируемый гидролиз тетраэтоксилана;

2) недостаточно гомогенный раствор дает пленку неоднородного состава.

В ходе настоящей работы показано, что задачи воспроизводимого нанесения контролируемого количества легирующей примеси и получения диффузионных слоев толщиной 0.5–1 мкм с малым разбросом поверхностной концентрации примеси на пластинах большой площади успешно решаются благодаря применению композиций полимерных диффузавтов. Новые диффузавты способны формировать элементоорганические полимерные слои, включающие атомы легирующего элемента непосредственно в состав трехмерной сетки, то есть химически связанные и равномерно распределенные в ней. Их применение позволяет воспроизводимо получать заданные величины поверхностной концентрации с разбросом не более 10% по площади пластины. Формирование полимерной пленки на подложке проводилось пентрифугированием (как для фоторезистов), после чего пластины подвергались термодеструкции при 450°C и диффузии на воздухе. Термодеструкция органических соединений происходит с образованием окислов легирующего элемента, которые формируют на подложке ровную однородную пленку. Поверхностная концентрация примеси в данном методе определяется режимом диффузии и количеством нанесенного диффузавта (толщиной пленки и ее составом) и регулируется в широких пределах. Это позволяет оптимизировать слоевое сопротивление применительно к выбранной контактной сетке.

Толщина диффузионного p^+ слоя, снижающего эффективную скорость рекомбинации на тыльной поверхности, составляла 1 мкм, слоевое сопротивление $R_B = 5 - 9 \text{ Ом}/\square$. Диффузия фосфора проводилась в двух режимах — более глубокий $p-n$ переход создавался под контактной сеткой ($x_j = 1-2 \text{ мкм}$, $R_{P1} = 10 - 25 \text{ Ом}/\square$), что позволило повысить температуру вжигания никеля, а на остальной площади эмиттера $x_j \approx 0.5 \text{ мкм}$, слоевое сопротивление регулировалось в пределах $R_{P2} = 50-90 \text{ Ом}/\square$. С целью геттерирования примесей с глубокими уровнями вслед за последней диффузией фосфора проводился 12–15-часовой отжиг пластин при 720° С. Время жизни неосновных носителей заряда измерялось методом Лэкса [5] и составляло

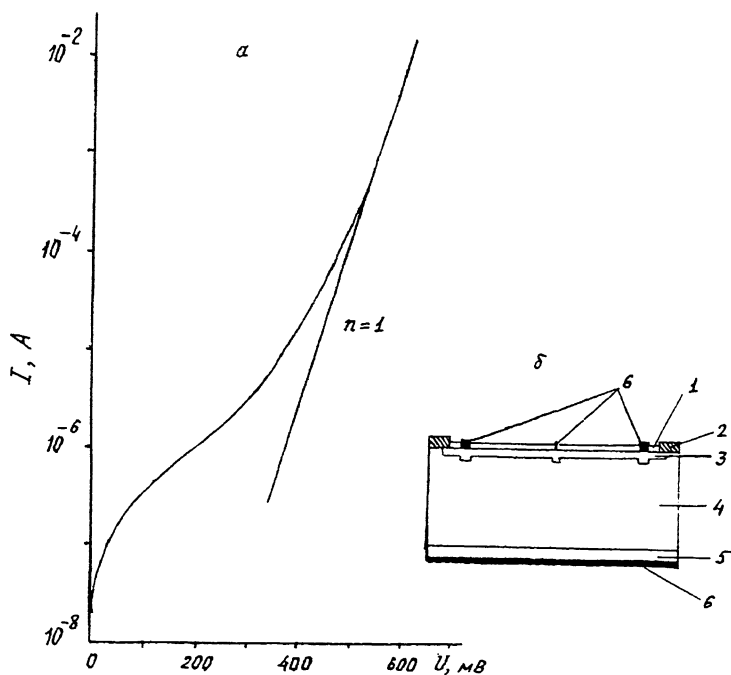


Рис. 1. Экспериментальная вольт-амперная характеристика солнечного элемента (а) и его схематическое изображение (б).

1 — антиотражающее покрытие, 2 — слой SiO_2 , 3 — n^+ -эмиттер, 4 — p -база, 5 — p^+ -слой, 6 — металлические контакты.

4–20 мкс. Контактная сетка выполнена с шагом 200 мкм (рис. 1, б), ширина металлизированных полос 10 мкм, размер контактных площадок для монтажа 500×500 мкм. Размер структуры 4.6×4.6 мм, фотоактивная площадь 17.8 мм^2 . Размеры структуры выбирались в расчете на радиатор с естественным охлаждением (без принудительной вентиляции). При этом для оценки допустимой степени концентрации солнечной энергии можно воспользоваться тепловыми характеристиками силовых кремниевых диодов с площадью $\approx 1 \text{ см}^2$, имеющих плоский алюминиевый радиатор [6]. В стационарном режиме при естественном охлаждении внутреннее тепловое сопротивление таких диодов $R_T(\theta_{pn} - \theta_0)/P < 10^\circ\text{C}/\text{Вт}$, где θ_{pn} — превышение температуры структуры над температурой окружающей среды θ_0 , P — мощность потерь. Поэтому можно полагать, что

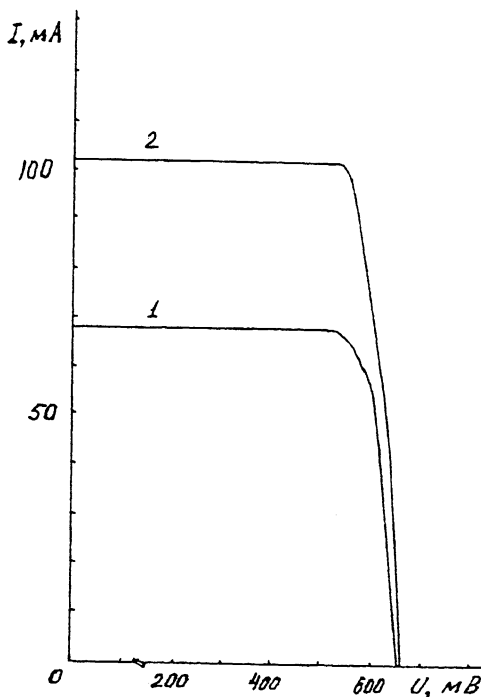


Рис. 2. Экспериментальные нагрузочные характеристики КСЭ (АМО; 25°C) с облучаемой поверхностью 10.3 мм².

1 — $C = 20$, $FF = 0.83$, $\eta = 12.9\%$; 2 — $C = 30$, $FF = 0.82$, $\eta = 13\%$.

перегрев КСЭ в режиме $C = 10-20$ солнц не превысит 10–20°C. Коэффициент отражения R от эмиттерной поверхности имел минимум в области 580–640 нм. У образцов, имевших на этой поверхности слой фосфорносиликатного стекла толщиной ≈ 0.1 мкм, $R_{\min} \approx 0.6\%$, а у образцов, имевших антиотражающее покрытие в виде пленки SiO либо Si_3N_4 (близких по оптическим свойствам, $n \approx 1.9$) толщиной 800–850 Å, $R_{\min} \approx 1 - 1.5\%$. В последнем случае сборание носителей лучше, и ток короткого замыкания I_{SC} возрастал на 15–16%.

Исследование статических вольт-амперных характеристик показало, что избыточные токи утечки $\leq 10^{-7}$ А, диффузионный ток составляет $\approx 10^{-12}$ А/см², а коэффициент качества приближается к единице ($n = 1.00 - 1.03$) при плотности тока $j \geq 10^{-2}$ А/см² — (рис. 1, а). Для измерения

абсолютной токовой чувствительности КСЭ использовался малогабаритный имитатор солнечного излучения, калиброванный на условия освещения АМО. В условиях однократного освещения в образцах с антиотражающим покрытием SiO плотность тока на фотоактивную поверхность достигала 33–35 мА/см² (АМО, 25° С), напряжение холостого хода U_{OC} 580–590 мВ. Нагрузочные характеристики КСЭ (рис. 2) измерялись под импульсным имитатором концентрированного солнечного излучения (АМО, 25° С). Предложенная технология кремниевых КСЭ позволяет получить КПД преобразования излучения $\eta > 13\%$ (АМО), а $U_{OC} = 650–660$ мВ при $C = 30$. Высокое значение коэффициента заполнения ВАХ (FF) свидетельствует о малом сопротивлении контактов. Разброс характеристик КСЭ, полученных из одной пластины, невелик (по $I_{SC} - 5\%$, по $U_{OC} \pm 2\%$).

Таким образом, использование полимерных диффузоров позволяет получать из промышленного кремния КСЭ, имеющие вполне удовлетворительные характеристики, близкие к тем, которые получены при использовании диффузии из газовой фазы [7] или ионного внедрения [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Код 94-02-0579-а.

Список литературы

- [1] Андреев В.М., Грилигес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.
- [2] Green M.A., Emery K. // Solar Cell Efficiency Tables (Version 3). Progress in Photovoltaics Research and Applications. 1994. V. 2. P. 27–34.
- [3] Sinton R.A., Clark J., Gan Y., Svanson R.M. // IEE. El. Dev. Lett. 1986. V. EDL-7. N 10. P. 567–569.
- [4] Гук Е.Г., Ельцов А.В., Шуман В.Б., Юрре Т.А. Фоторезисторы — диффузоры в полупроводниковой технологии. Л.: Наука, 1984. 116 с.
- [5] Lax D., Neustadter S.F. // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. N 9. P. 1148–1154.
- [6] Чебовский О.Г., Мусеев Л.Г., Сахаров Ю.В. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. М.: Энергия, 1975. 512 с.
- [7] Nasby R.D., Garner C.M., Sexton F.W., Rodriguez J.L., Rose B.H., Weaver H.T. // Solar Cells. 1982. N 6. P. 49–58.
- [8] Kirkpatrick A.R., Minnucci J.A., Greenwald A.C. // IEEE Trans. on El. Dev. 1977. V. ED-24. N 4. P. 429–432.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
16 ноября 1994 г.