

Характеристики кремниевых многопереходных солнечных элементов с вертикальными $p-n$ -переходами

© Е.Г. Гук, Т.А. Налет, М.З.Шварц, В.Б.Шуман

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 21 ноября 1996 г. Принята к печати 25 ноября 1996 г.)

Для изготовления многопереходных кремниевых солнечных элементов с вертикальными $p-n$ переходами разработана относительно простая технология (без применения фотолитографии), основанная на диффузионной сварке и ионно-плазменном осаждении диэлектрического покрытия. Эффективный коэффициент сбора таких структур не зависит от длины волны падающего света в интервале длин волн $\lambda = 340 \div 1080$ нм.

Еще на начальном этапе развития полупроводниковой солнечной энергетики обсуждался вопрос о том, как целесообразнее располагать $p-n$ -переходы по отношению к направлению падающего света — перпендикулярно или параллельно [1,2]. Расчеты и эксперименты показали, что при параллельном расположении $p-n$ -перехода относительно падающего излучения рекомбинация генерированных светом носителей заряда на освещенной поверхности играет существенно большую роль, чем при перпендикулярном. Поскольку долгое время решение задачи пассивации поверхности наталкивалось на неразрешимые трудности, КПД кремниевых солнечных элементов (КСЭ) с вертикальными $p-n$ -переходами был мал — 0.8% [3], 8% [4]. Поэтому планарная конструкция стала основной. Вместе с тем ранее отмечалось [1,2], что КСЭ с вертикальными $p-n$ -переходами имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с планарной конструкцией:

1) отсутствуют взаимно противоречивые требования к слоевому сопротивлению эмиттера, спектральной чувствительности, площади контактной сетки и т.д.;

2) поскольку на фронтальной и тыльной поверхности таких КСЭ нет металлизации, они прозрачны в длинноволновой области спектра за краем основной полосы поглощения. Поэтому равновесная рабочая температура их должна быть ниже, чем у планарного аналога;

3) они являются двухсторонними и могут служить составной частью каскадных солнечных элементов (СЭ);

4) КСЭ с вертикальными $p-n$ -переходами генерируют, в отличие от планарных, высокое напряжение (за счет последовательного соединения элементов) и малый ток при той же мощности. Это приводит к повышению эффективности батареи, собранной из таких элементов, за счет снижения потерь, возникающих при создании сильноточных элементов.

Ясно, что реализовать эти преимущества можно только с учетом последних достижений технологии кремниевых приборов. Цель настоящей работы — разработка эффективной технологии изготовления многопереходных концентраторных солнечных элементов с вертикальными $p-n$ -переходами. Так, например, формирование p^+-p-n^+ -структуры осуществлялось диффузией из полимерных источников, хорошо зарекомендовавших себя

при изготовлении планарных КСЭ [5]. Для успешной пассивации поверхности необходимо было исключить пайку мягким припоем при соединении пластин, использованную в [3,4], и заменить ее методами, применяемыми в силовой технике и микроэлектронике (например, диффузионной сваркой [6]). Для пассивации поверхности было применено широко используемое в настоящее время осаждение диэлектрических пленок SiO_2 [7].

В настоящей работе для изготовления КСЭ использованы пластины кремния p -типа (КДБ-12) диаметром $40 \div 60$ мм, толщиной 300 мкм, на которых путем последовательной диффузии бора и фосфора из полимерных источников [8] получена p^+-p-n^+ -структура. Толщина диффузионных слоев составляла 1 мкм. После диффузии фосфора проводился 15-часовой отжиг пластин при 720°C для геттерирования примесей с глубокими уровнями. Эта технология обеспечивает время жизни электронов (измеряемое методом Лэкса [9]) в пределах $45 \div 55$ мкс, т.е. диффузионная длина электронов превышала толщину базы. После травливания окисных слоев на поверхность пластины напылялся алюминий при 350°C . Диффузионная сварка проводилась двумя способами. В первом случае для проведения диффузионной сварки пластины складывались в стопку, во втором варианте пластины чередовались с силуминовыми прокладками толщиной $30 \div 40$ мкм. Дальнейшие исследования показали, что характеристики полученных образцов близки, но в первом варианте "затенение" составляло $\sim 1\%$, а во втором $\sim 10\%$. Диффузионную сварку проводили в вакууме при 550°C с приложением давления, достаточного для создания необходимой пластической деформации алюминия и силумина. Далее проводили резку сформированной стопки пластин алмазным диском на отдельные элементы, схематически показанные на рис. 1, размером $5 \times 1.2 \times 1$ мм. Наружный слой с нарушенной в результате резки кристаллической структурой удалялся последовательными шлифовкой, механической полировкой и кислотным травлением.

Пассивирующее покрытие (слой SiO_2 толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$) и двухслойное четвертьволновое просветляющее покрытие, состоящее из Si_3N_4 и SiO_2 , получали в установке ионно-плазменного распыления триодного типа методом ионно-плазменного реактивного распыле-

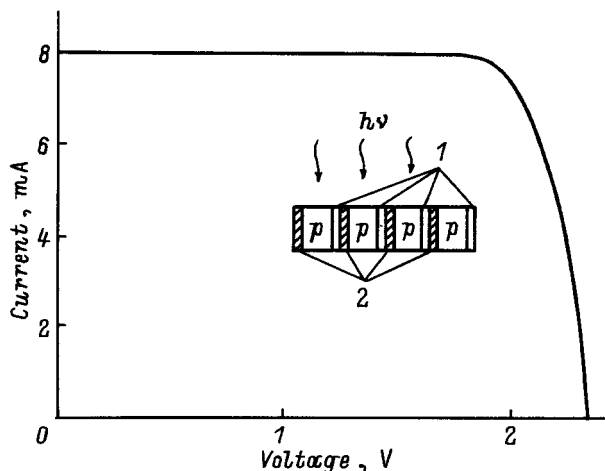


Рис. 1. Нагрузочная характеристика КСЭ, содержащего 4 последовательно соединенных $p-n$ -перехода, при интенсивности освещения 22 солнца. На врезке изображена структура КСЭ: 1 — p^+ -слой, 2 — n^+ -слой.

ния кремниевой мишени в атмосфере кислорода (для формирования слоя SiO_2) или азота (для напыления слоя Si_3N_4) при рабочих давлениях $(5 \div 7) \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. Для получения высокого вакуума и формирования рабочей газовой среды использована безмасляная гетеро-ионная откачка магнито-разрядным титановым насосом. Эти насосы обеспечивают высоковакуумную откачку рабочей камеры и эффективную очистку рабочей газовой среды от неконтролируемых газовых примесей-окислителей (вода, кислород). Такая очистка газовой среды обусловлена высокой эффективностью откачки, присущей этому типу насосов. Например, скорость откачки кислорода приблизительно в 10 раз выше скорости откачки азота и почти в 100 раз выше скорости откачки аргона. Разработанная технология позволяет получать слои Si_3N_4 с коэффициентом преломления $n_2 = 1.96 \pm 0.02$ и слои SiO_2 с $n_1 = 1.48 \pm 0.02$. Слои наносились на просветляемую поверхность в едином вакуумном цикле. Их толщина определялась требованием оптимального просветления поверхности в области длины волны $\lambda \approx 800$ нм. Использование пассивирующего и просветляющего покрытия привело к росту фототока примерно вдвое по сравнению с образцами, имевшими механически полированную поверхность.

Спектральная зависимость коэффициента отражения (R) одного из образцов представлена на рис. 2 кривой 3. Двухслойное просветляющее покрытие дает по сравнению с однослойным покрытием более широкую спектральную область малых значений коэффициента отражения — в интервале $\lambda = 710 \div 1010$ нм значение R не превышает 5%. Спектральная зависимость коэффициента сбора носителей (Q) для того же образца показана на рис. 2 (кривая 2), а эффективного коэффициента сбора — $Q(1-R)$ — кривой 1 того же рисунка. Как видно из приведенных данных,

сформированные многопереходные КСЭ имеют высокую чувствительность и в инфракрасной (ИК), и в ультрафиолетовой (УФ) областях спектра. В ИК области высокое собирание неосновных носителей обусловлено уменьшением расстояния (по сравнению с планарной структурой), которое носители проходят до их разделения вертикальными $p-n$ -переходами. В УФ области спектра наблюдается высокое собирание носителей, связанное с тем, что УФ излучение поглощается не в сильно легированном эмиттере, а непосредственно в слабо легированной базе, имеющей большую диффузионную длину и низкую скорость поверхностной рекомбинации. Таким образом, эффективный коэффициент сбора носителей практически не зависит от длины волны в широком диапазоне длин волн ($340 \div 1080$ нм). Этот эффект был ранее предсказан из общих соображений [10].

Для измерения абсолютной токовой чувствительности КСЭ использовался малогабаритный имитатор солнечного излучения, калиброванный на условия освещения АМО. При этом ток короткого замыкания (I_{sc}), рассчитанный на фотоактивную поверхность одной структуры, имел величины в интервале $27.5 \div 30$ мА/см² (АМО, 25°C). Нагрузочные характеристики КСЭ, состоящих из 4-х последовательно соединенных $p-n$ -переходов, измерялись под импульсным имитатором концентрированного солнечного излучения (АМО, 25°C). Характеристика одного из образцов при концентрации солнечного излучения $K = 22$ приведена на рис. 1. Напряжение холостого хода (U_{oc}) на этом КСЭ достигало 2350 мВ, $I_{sc} = 8$ мА, а коэффициент заполнения (FF) составил 0.8. Высокая величина FF свидетельствует о малом последовательном сопротивлении ($\sim 10^{-2}$ Ом/□) в расчете на одну структуру, достигнутом благодаря сплошной металлизации сильно легированных p^+ - и n^+ -слоев. Кпд преобразования излучения (η) при 22 солнца составлял более 11% (АМ 1.5).

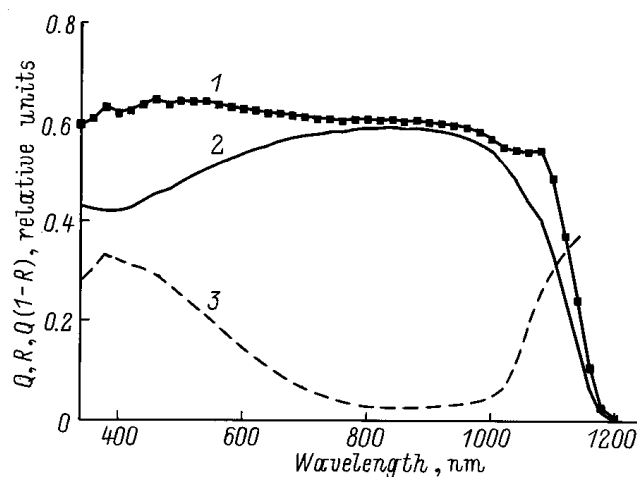


Рис. 2. Спектральные характеристики КСЭ: 1 — эффективный внутренний коэффициент сбора; 2 — внешний коэффициент сбора; 3 — коэффициент отражения от лицевой поверхности.

Таким образом, разработанная технология впервые позволила получить на основе промышленного кремния концентраторные солнечные элементы с вертикальными $p-n$ -переходами, имеющие вполне удовлетворительные характеристики. Высокая чувствительность в УФ области позволяет использовать эти структуры в качестве датчиков в этой области спектра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 96-02-17903).

Список литературы

- [1] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы. Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987) с. 182.
- [2] М.М. Колтун. *Оптика и метрология солнечных элементов* (М., Наука, 1985) с. 30.
- [3] А.П. Ландсман, Д.С. Стребков. *ФТП*, **4**, 1922 (1970).
- [4] С. Goradia, M.G. Goradia. *12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (Buton Rouge, La, 1976) p. 789.
- [5] Е.Г. Гук, Н.С. Зимогорова, М.З. Шварц, В.Б. Шуман, Н.А. Токранова. *Письма ЖТФ*, **21**, 40 (1995).
- [6] Г.Н. Сурженков, Е.Д. Хуторянский, О.М. Корольков. В сб.: *Технология силовых полупроводниковых приборов* (Таллин, Валгус, 1987) с. 47.
- [7] *Технология СБИС*, под ред. С. Зи (М., Мир, 1986) т. 1, с. 125.
- [8] Е.Г. Гук, А.В. Ельцов, В.Б. Шуман, Т.А. Юрре. *Фоторезисты-диффузаны в полупроводниковой технологии* (Л., Наука, 1984) с. 47.
- [9] D. Lax, S.F. Neustadter. *J. Appl. Phys.*, **25**, 1148 (1954).
- [10] В.М. Андреев, В.А. Грилихес, В.Д. Румянцев. *Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989) с. 116.

Редактор В.В. Чалдышев

Characteristics of silicon multijunction solar cells with vertical $p-n$ junctions

E.G. Guk, T.A. Nalet, M.Z. Shwartz, V.B. Shuman

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A relatively easy technique (without a photolithography) based on the diffusion welding and ion-plasma deposition of a dielectric coating is developed for manufacturing multijunction silicon solar cells with vertical $p-n$ -junctions. The external quantum yield of such structures does not depend on the illumination wavelength in the wavelength region $\lambda = 340 \div 1080$ nm.