

06;07;12

Многoperеходные кремниевые концентраторные солнечные элементы, изготовленные с помощью диффузионной сварки

© Е.Г. Гук, Н.С. Зимогорова, М.З. Шварц, В.Б. Шуман

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 18 декабря 1995 г.)

Солнечные элементы, предназначенные для преобразования концентрированного солнечного излучения, разрабатываются уже много лет [1,2]. Важнейшая проблема, возникающая при большой концентрации солнечного излучения, — получить последовательное сопротивление концентраторного солнечного элемента (КСЭ) не выше $10^{-2} - 10^{-3}$ Ом·см². При разработке традиционных структур с $p - n$ -переходами, перпендикулярными падающему световому потоку, неизбежно возникают взаимно противоречивые требования к слоевому сопротивлению эмиттера, спектральной чувствительности, затемнению, создаваемому контактной сеткой, и т.д. Поэтому при таком конструктивном исполнении КСЭ получить малые величины R_s не удается и КПД таких элементов растет с увеличением интенсивности освещения примерно до 60–80 солнц, а затем спадает. Помимо традиционных структур с "горизонтальными" $p - n$ -переходами предлагались структуры многoperеходных КСЭ с вертикальными $p - n$ -переходами [1], которые, как нам представляется, гораздо лучше отвечают требованиям, предъявляемым к КСЭ.

Помимо отсутствия упомянутых выше взаимно противоречивых требований (так как нет необходимости в контактной сетке и т.д.) такие структуры имеют еще ряд преимуществ. Например, поскольку на фронтальной и тыльной поверхностях этих элементов нет металлизации, то они должны быть прозрачны в длинноволновой части спектра за краем основной полосы поглощения. Вследствие этого равновесия рабочая температура такого КСЭ должна быть ниже, чем у планарного аналога. Кроме того, многoperеходные элементы являются двусторонними, так как могут преобразовывать и свет, падающий с тыльной стороны, а также могут служить составной частью каскадных солнечных элементов. Важнейшей проблемой, возникающей при использовании КСЭ, является снижение электрических потерь на последовательных сопротивлениях контактов и подводящих цепей. За счет потерь на соединении сильноточных элементов КПД традиционной батареи намного ниже, чем КПД отдельного элемента. Эта проблема легче решается в случае использования многoperеходных КСЭ, поскольку они в отличие от планарных генерируют высокое напряжение за счет последовательного соединения элементов и малый

ток при той же выходной мощности. Это приводит к повышению эффективности батареи, собранной из таких элементов.

Однако практическая реализация многoperеходных КСЭ с вертикальными $p - n$ -переходами требует решения ряда технологических проблем, наиболее актуальными из которых являются обеспечение низкого последовательного сопротивления и пассивации поверхности. Именно этим объясняется малое число работ, посвященных таким КСЭ, а также невысокие результаты, полученные их авторами. Так, в ранней работе [3] многoperеходные элементы получены путем пайки мягкими припоями кремниевых пластин с $p - n$ -переходом, пассивация вообще не проводилась, а КПД был равен 8%. В более поздней работе [4] в результате использования достаточно сложной технологии, включающей анизотропное травление, многократную фотолитографию и термическое окисление для пассивации, получены элементы в виде секции длиной 5 мм, высотой 200 мкм, шириной 125 мкм. При этом отдельные секции соединялись последовательно с помощью приваренных проводов, а сами элементы для механической прочности закреплялись на стеклянной подложке. КПД таких элементов составлял 12.8 (АМ1) и 19% при 300 солнц.

Таким образом, многoperеходные КСЭ имеют ряд преимуществ, но дальнейшее продвижение вперед в этом направлении возможно лишь за счет улучшения технологии. Цель настоящей работы — исследовать возможность использования диффузионной сварки при создании многoperеходных КСЭ.

Согласно [5], диффузионная сварка материалов в твердом состоянии — это способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов. Для нужд силовой электроники промышленная технология диффузионной сварки кремниевых выпрямительных элементов впервые была разработана в [6]. Она включала в себя химическую подготовку поверхности свариваемых элементов, сборку элементов в кассеты и диффузионную сварку в вакууме при заданных режимах давления, нагрева и

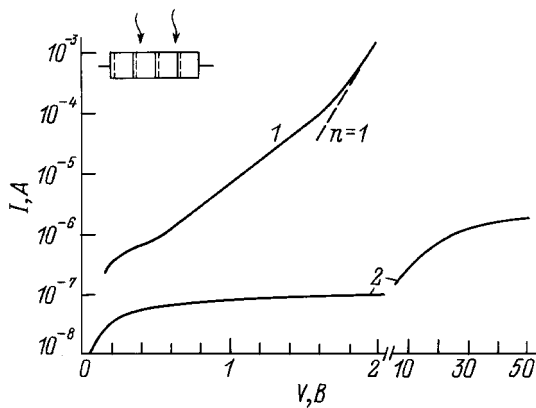


Рис. 1. Экспериментальные вольт-амперные характеристики концентраторного солнечного элемента (25°C), содержащего 4 последовательно включенных $p-n$ -перехода, и его схема (вставка). 1 — прямая вольт-амперная характеристика, 2 — обратная темновая вольт-амперная характеристика.

продолжительности процесса в автоматизированном диффузионно-сварочном комплексе. При этом соединение кремниевой p^+nn^- либо p^+npn^+ -структуры (диаметром до 80 мм) с вольфрамовым термокомпенсатором осуществлялось в твердой фазе через алюминиевую прокладку толщиной 100 мкм. Одновременно в том же процессе проводилась металлизация другой (свободной) поверхности кремниевой структуры алюминиевой фольгой толщиной 30 мкм. Сопротивление полученных контактов было менее 10^{-4} Ом·см² и отличалось хорошей воспроизводимостью.

В настоящей работе для изготовления КСЭ использованы пластины p -Si (КДБ-10) диаметром 40 мм, толщиной ~ 270 мкм, на которых в результате последовательной диффузии бора и фосфора из полимерных источников [7] была получена p^+nm^+ -структура. Толщина диффузионного p^+ -слоя, снижающего эффективную скорость рекомбинации, составляла ~ 1 мкм, его слоевое сопротивление $R_B = 6-8$ Ом/□. $p-n$ -переход был сформирован глубиной 1 мкм, со слоевым сопротивлением эмиттерного слоя 15–20 Ом/□. После диффузии фосфора проводился 15-часовой отжиг пластин при 720°C для гетерирования примесей с глубокими уровнями. Применяемая технология обеспечивает время жизни электронов в пределах 20–55 нс (время жизни неосновных носителей заряда измерялось методом Лэкса [8]). После травливания окисных слоев на поверхность пластин в вакууме напылялся алюминий при 350°C .

Для проведения диффузионной сварки 4 пластины складывали в стопку, чередуя их с силуминовыми прокладками толщиной 30–40 мкм. Диффузионную сварку проводили при 550°C в вакууме с применением давления, достаточного для создания необходимой пластической деформации силумина и алюминия.

Затем на наружные поверхности пластин наносили омические контакты путем химического никелирования (в принципе возможно провести металлизацию наружных поверхностей алюминиевой фольгой при диффузионной сварке). Далее проводили резку стопки пластин алмазным диском на отдельные элементы, схематически показанные на рис. 1, размером $5 \times 1.2 \times 1$ мм. Слой с нарушенной кристаллической структурой удаляли последовательными шлифовкой, механической полировкой и травлением, после чего на открытую поверхность кремния наносили пассивирующее покрытие, состоящее из нитрида кремния.

Образцы имели, таким образом, по четыре фотоактивных поверхности, каждая из которых имела площадь $4.8 \times 0.25 = 1.2$ мм². На рис. 1 (кривая 1) приведена вольт-амперная характеристика КСЭ, снятая при импульсном освещении кварцевой лампой накаливания. Избыточные токи утечки составляют $\sim 10^{-7}$ А, диффузионный ток равен $\sim 10^{-12}$ А, а коэффициент качества приближается к единице ($n \approx 1.05$) при токе меньше 10^{-3} А. Темновая обратная вольт-амперная характеристика приведена на том же рисунке (рис. 1, кривая 2). Для измерения аб-

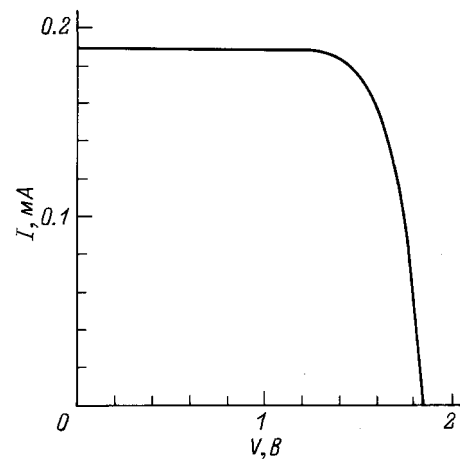


Рис. 2. Экспериментальная нагрузочная характеристика КСЭ при односолнечном освещении (АМО, 25°C).

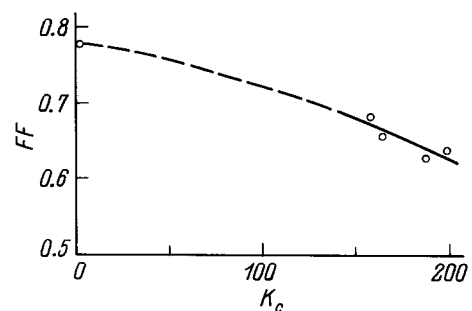


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента заполнения (FF) нагрузочной характеристики от степени концентрирования солнечного излучения (K_C) при условии АМО, 25°C .

солнотной токовой чувствительности КСЭ использован малогабаритный имитатор солнечного излучения, калиброванный на условия освещения АМО. В условиях однократного освещения в образцах, состоящих из 4 последовательно соединенных $p-n$ -переходов, плотность тока на фотоактивную поверхность достигала 15.5 mA/cm^2 (АМО, 25°C), напряжение холостого хода $U_{0c} = 1.85 \text{ В}$. Коэффициент заполнения нагрузочной характеристики (FF) для различных образцов находится в пределах $0.75-0.78$. Нагрузочная характеристика при односолнечном освещении приведена на рис. 2. Нагрузочные характеристики КСЭ измерялись под импульсным имитатором концентрированного солнечного излучения (АМО, 25°C). При концентрации солнечного излучения $K_C = 200$ солнце напряжение холостого хода достигает 2.7 В , ток короткого замыкания более 50 mA . Зависимость коэффициента заполнения нагрузочной характеристики от степени концентрирования солнечного излучения приведена на рис. 3. Разброс характеристик КСЭ, полученных из одной стопки пластин, не превышал 5% . Последовательное сопротивление КСЭ составляло $0.16 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, т.е. на одну структуру, входящую в элемент, $\sim 0.04 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, что гораздо меньше, чем у планарных структур, имеющих обычно последовательное сопротивление $0.5-1 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. КПД многопереходных концентраторных солнечных элементов, полученных с помощью диффузионной сварки, составляет при АМ1.5 $\sim 9\%$. Следует отметить, что, хотя плазменное нанесение покрытия в виде пленки нитрида кремния хорошо совмещается с технологией диффузионной сварки, все же эффективность пассивации поверхности оказалась недостаточной. Дальнейшая работа по совершенствованию процесса пассивации и нанесения антиотражающего покрытия должна значительно повысить КПД элемента. Таким образом, использование диффузионной сварки позволяет реализовать очень простую технологию изготовления кремниевых концентраторных солнечных элементов, имеющих низкое последовательное сопротивление и удовлетворительные характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 94-02-0579-а.

Список литературы

- [1] Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1987. 278 с.
- [2] Андреев В.М., Гримальес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрические преобразователи солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.
- [3] Goradia C., Goradia M.G. // Proc. 12th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. P. 789–792.
- [4] Frank R.J., Karlow R. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 34. N 1. P. 65–67.
- [5] Диффузионная сварка материалов. Справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.
- [6] Сурженков Г.Н., Хуторянский Е.Д., Королюков О.М. // Технология силовых полупроводниковых приборов. Таллинн: Валгус, 1987.
- [7] Гук Е.Г., Ельцов А.В., Шуман В.Б., Юрре Т.А. Фоторезисты-диффузаны в полупроводниковой технологии. Л.: Наука, 1984. 116 с.
- [8] Lax D., Neustadter S.F. // J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25. N 9. P. 1148–1154.