

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ В КОНСТРУКЦИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение

В связи с увеличением потребления энергии во всем мире запасы ископаемого топлива быстро истощаются, в то время как процессы их естественного пополнения требуют неизмеримо более длительного времени. Поэтому сейчас все более пристальное внимание уделяется солнечной энергии – экологически чистому и практически неистощимому энергетическому ресурсу человечества.

В статье рассматриваются солнечные батареи – наиболее перспективный поставщик солнечной энергии, поскольку они преобразуют солнечный свет непосредственно в электричество с высоким коэффициентом преобразования, создают почти постоянную мощность при низких эксплуатационных расходах и практически не загрязняют окружающую среду. В то же время один из основных недостатков солнечных элементов – экономическая невыгодность использования их в больших масштабах. Данный недостаток связан с несовершенством конструкции этих приборов. Одним из путей его преодоления является применение многокомпонентных полупроводниковых систем.

Цель статьи – анализ перспектив использования неоднородных полупроводниковых структур в устройствах преобразования солнечной энергии промышленного и бытового назначения.

Теоретические сведения

Одной из общепринятых является следующая классификация преобразователей солнечной энергии:

1. Фотоэлектрические преобразователи (солнечные элементы, СЭ) – полупроводниковые устройства, прямо преобразующие солнечную энергию в электричество.
2. Гелиоэлектростанции (ГЕЭС) – солнечные установки, использующие энергию высококонцентрированного солнечного излучения для приведения в действие тепловых и других машин (паровой, газотурбинной, термоэлектрической и т.п.).
3. Солнечные коллекторы (СК) – солнечные нагревательные низкотемпературные установки.
4. Органические батареи – устройства преобразующие солнечные лучи в электричество с помощью генетически модифицированных клеток, напечатанных на тонком пластике с проводником.

Кремниевые солнечные элементы с *p-n* переходом служат эталонными приборами для всех солнечных батарей. На рис. 1 схематически представлен типичный солнечный элемент, который состоит из мелкого *p-n* перехода, созданного у поверхности лицевого омического полоскового контакта, тылового омического сплошного контакта и просветляющего покрытия на лицевой поверхности. Идеализированная схема замещения солнечного элемента представлена на рис. 2.

Параллельно переходу введен источник постоянного тока I_L , описывающий возбуждение неравновесных носителей солнечным излучением, при этом I_L – ток насыщения диода; R_L – нагрузочное сопротивление. Данная цепь построена из предположения, что солнечный элемент имеет идеальную вольтамперную характеристику, определяемую выражением

$$I = I_s \cdot \left(e^{q \cdot V / k \cdot T} - 1 \right) - I_L. \quad (1)$$

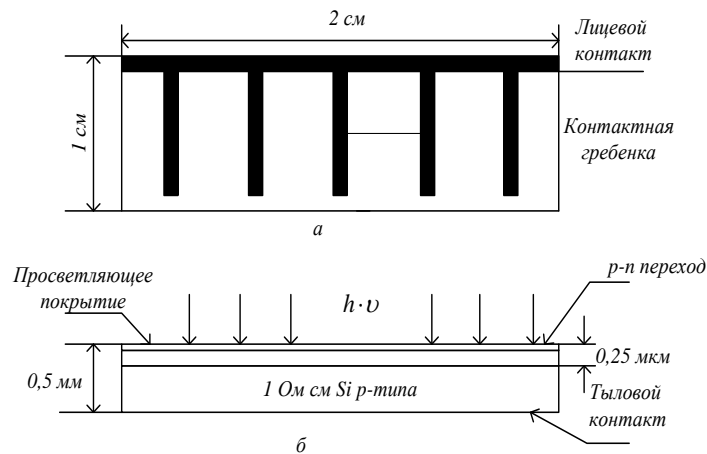


Рис. 1. Схематическое изображение кремниевого солнечного элемента с $p-n$ переходом (a – вид сверху, b – вид сбоку)

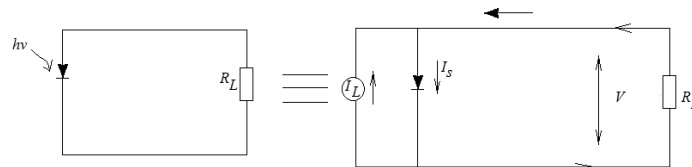


Рис. 2. Идеализированная эквивалентная схема солнечного элемента

В формуле (1):

$$J_S = \frac{I_S}{A} = q \cdot N_e \cdot N_v \cdot \left(\frac{1}{N_A} \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \cdot \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) \cdot e^{\frac{-E_g}{k \cdot T}}, \quad (2)$$

где A – площадь прибора. Типовые значения входящих в (1) и (2) величин: $I_L=100$ мА, $I_S=1$ мА, $A=4$ см², $T=300$ К.

График ВАХ, определяемый выражением (1), представлен на рис. 3, a . Поскольку ВАХ проходит через четвертый квадрант, то это означает, что прибор служит источником энергии. Чаще всего ВАХ изображают, как показано на рис. 3, b .

Для реальных солнечных элементов в эквивалентную схему включается последовательное сопротивление, обусловленное омическим падением напряжения на лицевом контакте, и шунтирующее параллельное сопротивление, обусловленное токами утечки [1].

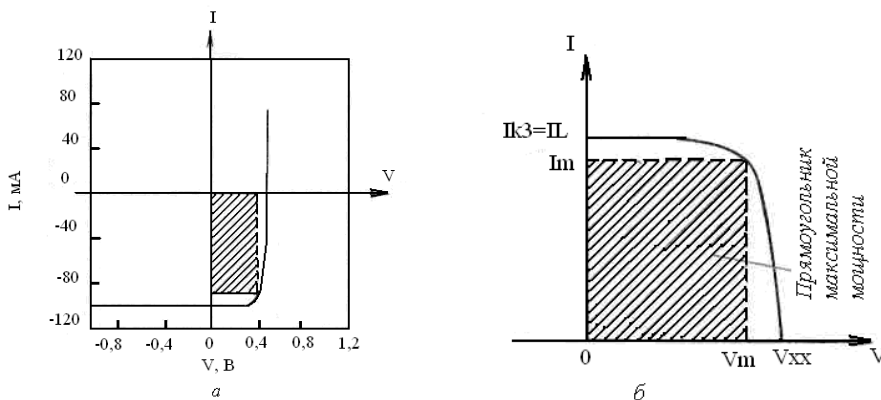


Рис. 3. Вольтамперная характеристика освещенного солнечного элемента

Для эффективной работы солнечных элементов необходимо соблюдение ряда условий:

- оптический коэффициент поглощения активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии солнечного света в пределах толщины слоя;
- генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон активного слоя;
- солнечный элемент должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;
- полное сопротивление, включенное последовательно с солнечным элементом (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности на выделение тепла в процессе работы;
- структура тонкой пленки должна быть однородной по всей активной области солнечного элемента, чтобы исключить закорачивание и влияние шунтирующих сопротивлений на характеристики элемента.

Основное внимание в производстве структур, удовлетворяющих данным требованиям, уделяется таким материалам, как сплавы на основе аморфного кремния (α -Si:H), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники [2]. Один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей – арсенид галлия. Это объясняется такими его особенностями, как:

- почти идеальная для однопереходных солнечных элементов ширина запрещенной зоны 1,43 эВ;
- повышенная способность к поглощению солнечного излучения;
- высокая радиационная стойкость и высокая эффективность;
- характеристики сплавов GaAs с алюминием, мышьяком, фосфором или индием дополняют характеристики GaAs, что расширяет возможности при проектировании СЭ.

Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе – широкий диапазон возможностей для дизайна СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава, что позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда. Для удешевления производства предлагается формировать СЭ на более дешевых подложках; выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования [2].

Основные конструкции солнечных элементов

Солнечные элементы с барьерами вблизи тыловой поверхности (БТП) имеют большее выходное напряжение, чем обычные элементы. Лицевая поверхность изготавливается обычным способом, но вблизи тыловой поверхности перед металлическим омическим контактом создается сильнолегированный полупроводниковый слой. На (рис. 4, а) представлена конструкция текстурированного элемента, лицевая поверхность которого покрыта пирамидами, которые создаются с помощью анизотропного травления поверхности. Даная конструкция позволяет свету, падающему на боковую поверхность одной из пирамид, отражаться на другую пирамиду, что приводит к уменьшению оптических потерь. Если же нанести дополнительное просветляющее покрытие, то потери на отражение снизятся на несколько процентов.

Солнечные элементы с использованием анизотропного травления поверхности. Этот элемент состоит из ряда отдельных $p^+ - p - n^+$ диодов, которые соединены последовательно (рис. 5). Трапецидальная форма отдельных диодов получается за счет анизотропного травления поверхности.

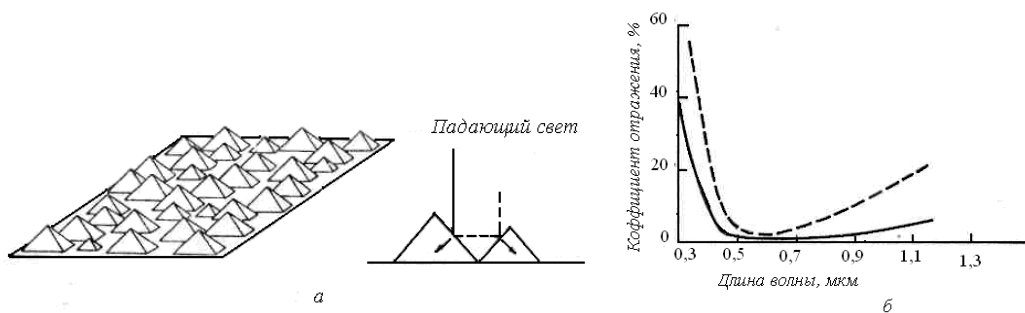


Рис. 4. *а* – текстурированный элемент с пирамидальной поверхностью, *б* – зависимость от длины волны коэффициента отражения солнечного элемента с плоской поверхностью и просветляющим покрытием (штриховая линия) и текстурированного солнечного элемента с просветляющим покрытием (сплошная кривая)

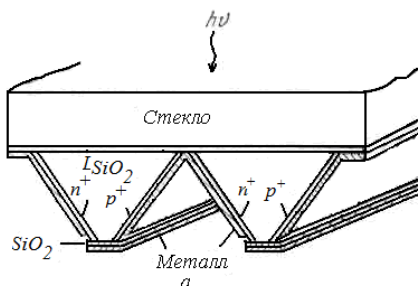


Рис. 5. Многопереходной солнечный элемент на V-канавках

Также существуют солнечные элементы со спаренными переходами, в которых сочетаются концепции элемента с БТП и текстурированного элемента. В этой конструкции нет тени от металла и облегчаются проблемы межсоединений благодаря тому, что p^+ и n^+ контакты создаются на тыловой поверхности. Прибор работает как биполярный транзистор с изолированным n^+ эмиттером на лицевой поверхности (рис.6, б). Электроны, генерируемые светом в эмиттере или в базе, собираются n^+ коллектором, подобно тому, как это имеет место в транзисторе.

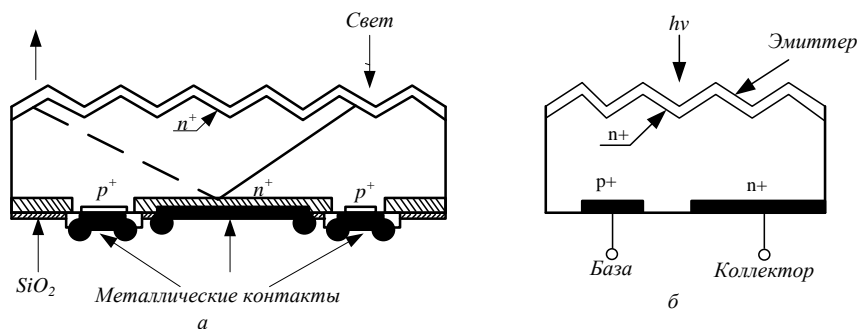


Рис. 6. Поперечное сечение солнечного элемента со спаренными переходами

В солнечных элементах с вертикальными переходами поверхность переходов и металлические поверхности расположены перпендикулярно поверхности элемента (рис. 7).

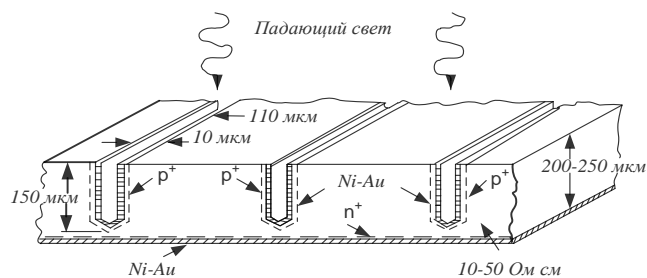


Рис. 7. Солнечный элемент со спаренными переходами

Диффузионные и металлические контакты расположены в глубоко вытравленных канавках, перпендикулярных поверхности и созданных благодаря анизотропному травлению поверхности. Расстояние между канавками 140 мкм, что равно диффузионной длине неосновных носителей. В этом случае диффузия с лицевой поверхности не проводится, а доля

затемненной поверхности благодаря небольшой ширине канавок (10 мкм) не превышает 7%. Ток протекает непосредственно через диффузионные p^+ -области и металлический слой, расположенный на стенках канавок, и вводится через контактные полосы, лежащие на боковой поверхности элемента. Эти полосы соединяют все элементы параллельно. Практически все из выше названных конструкций используются в условиях высокой интенсивности излучения [1]. Солнечные элементы с гетеропереходами имеют ряд преимуществ:

- спектральный отклик увеличивается в коротковолновом диапазоне при условии, что энергия достаточно велика и фотоны с высокой энергией поглощаются в обедненном слое второго полупроводника;
- последовательное сопротивление понижается при условии, что первый полупроводник можно сильно легировать, не ухудшая при этом условия прохождения света через него;
- высокая радиационная стойкость, если первый слой полупроводника достаточно толстый и полупроводник имеет широкую запрещенную зону.

Одним из примеров солнечного элемента с гетеропереходом можно назвать гетеропереход проводящее стекло – полупроводник.

На рис. 8 представлена диаграмма энергетических зон освещенного солнечного элемента с барьером Шоттки.

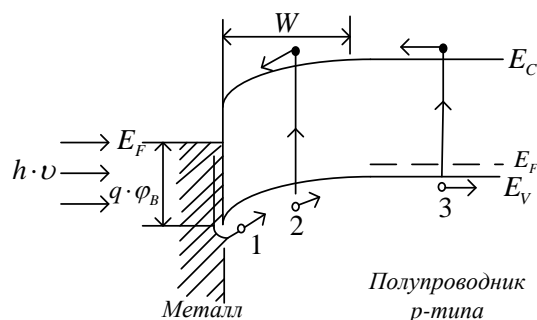


Рис. 8. Диаграмма энергетических зон освещенного солнечного элемента с барьером Шоттки

Слой металла достаточно тонкий, чтобы основная доля света достигала полупроводника. Выделяют три компонента фототока. Один из компонентов обусловлен поглощением в металле фотонов с энергией $h \cdot \nu \rightarrow q \cdot \phi_B$ ($q \cdot \phi_B$ – высота барьера), что вызывает возбуждение дырок через барьер в полупроводник (этот компонент обозначен 1 на (рис. 8)). Второй компонент – это падающий на полупроводник коротковолновый свет, который поглощается в основном в обедненном слое (обозначен цифрой 2). Третий компонент – длинноволновый свет, который поглощается в нейтральном объеме и создает электронно-дырочные пары,

затем электроны диффундируют к краю обедненного слоя, где происходит их коллектирование (фототок 3).

Солнечные элементы на барьерах Шоттки имеют свои преимущества:

- изготавливаются такие элементы при низких температурах, так как не требуется диффузия;
- данная технология применяется при создании поликристаллических и тонкопленочных солнечных элементов;
- высокая радиационная стойкость, поскольку вблизи их поверхности существует сильное электрическое поле;
- большой выходной ток и спектральный отклик, что объясняется непосредственным примыканием обедненного слоя к поверхности полупроводника, вследствие чего ослабляется негативное влияние малых времен жизни и высокой скорости поверхностной рекомбинации.

В солнечных элементах на МДП-структурах между металлом и полупроводниковой подложкой создается тонкий изолирующий слой. Преимущество таких элементов связано с тем, что в них имеется сильное электрическое поле вблизи поверхности полупроводника, которое направлено так, что помогает коллектированию носителей, создаваемых коротковолновым светом; кроме того, в активной области таких элементов нет кристаллических дефектов, возникающих при диффузии примесей и присущих солнечным элементам с диффузионными $p-n$ переходами.

На рис. 9 представлена структура, в которой используется гребенка в виде МДП-структуры с толстым металлом.

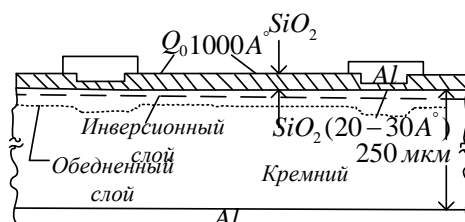


Рис. 9. Поперечное сечение солнечного элемента с гребенчатой МДП-структурой

Между отдельными полосками полупроводник покрыт прозрачным диэлектрическим слоем, который служит и прозрачным диэлектрическим слоем и просветляющим покрытием. Поскольку при создании таких структур не надо проводить диффузию, а выращивание окисла возможно и при низких температурах, предполагается, что именно такие структуры, изготавливаемые на поликристаллических и аморфных подложках, окажутся экономически наиболее выгодными источниками энергии.

В тонкопленочных солнечных элементах активными полупроводниковыми слоями являются поликристаллические или неупорядоченные пленки, которые наносятся или выращиваются на электрически активных или пассивных подложках. Тонкие пленки наносятся с помощью газовой эпитаксии, плазменного распыления и осаждения. Если толщина слоя полупроводника превышает обратный коэффициент поглощения, большая часть света будет поглощаться в полупроводнике; если диффузионная длина превышает толщину пленки, большая часть генерируемых светом носителей может быть коллектирована. К основному достоинству стоит отнести низкую стоимость, поскольку технология их изготовления дешевая и используются сравнительно дешевые материалы. К недостаткам относится низкий КПД (частично обусловлен влиянием границ зерен и частично низким качеством полупроводникового материала, выращиваемого на различных подложках) и постепенная деградация характеристик, что связано с химическими реакциями, протекающими между полупроводником и окружающей атмосферой [1].

Перспективные технологии изготовления солнечных элементов

Особые надежды возлагаются на аморфные гетероструктуры, на основе которых возможна реализация фотоэлектрических устройств, в частности элементов солнечной

энергетики. Неоспоримыми преимуществами аморфных полупроводников являются простота их получения и более дешевая технология в совокупности с более широкой материальной базой и большими площадями нанесения. Особое место среди аморфных материалов занимает аморфный гидрогенизированный кремний и его соединения, прежде всего благодаря более широкому применению его в полупроводниковой оптоэлектронике и солнечной энергетике. Аморфный кремний по ряду параметров превосходит монокристаллический и является наиболее перспективным для солнечной энергетике. Основное достоинство данного материала – оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5 – 1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм подложек. Кроме того, благодаря существующим технологиям получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуется операции резки, шлифовки и полировки, необходимых для солнечных элементов на основе монокристаллического кремния. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300° С): можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз [4, 5].

Для оптимизации структуры фотопреобразователей необходимо создание строгой модели, которая адекватно учитывает основные особенности электрофизических процессов в сложных многослойных гетероструктурах на основе сплавов неупорядоченного и кристаллического кремния. Выходными данными для такой модели должны служить экспериментально определенные параметры слоев. Кроме того, модель должна позволять решать обратные задания с целью экстракции электрофизических параметров элементов структуры фотопреобразователя из его экспериментальных характеристик.

Выводы

Таким образом, современная технология фотоэлектрического преобразования световой энергии (фотовольтаика) характеризуется стремительным изменением соотношения объемов производимой энергии в пользу батарей на основе некристаллических тонкопленочных фотопреобразователей, а также фотопреобразователей на основе гетеропереходу a-Si/c-Si. На данный момент рекордное значение эффективности тонкопленочных фотопреобразователей порядка 15,2 %, а гетероструктурных a-Si/c-Si – 21 %.

Дальнейшее развитие гелиоэнергетики связано со снижением удельного ватта электроэнергии. Существуют следующие возможности для такого удешевления:

- повышение эффективности преобразования энергии за счет оптимизации конструкции, оптических и кинетических свойств материала контактных и активных слоев (в том числе расширение спектрального диапазона, снижения оптических потерь в контактных слоях, повышение эффективности сбора неравновесных носителей заряда);
- повышение стабильности электрофизических свойств активных слоев;
- совершенствование технологии изготовления батарей, которое должно быть связано в основном со снижением времени формирования структуры преобразователей за счет снижения количества технологических операций.

Список литературы: 1. *Зи, С.* Физика полупроводниковых приборов. – М. : Мир, 1984. – 449с.
2. *Мейтин, М.* Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы // *Электроника – НТ.* – 2000. – № 3. – С.13-23. 3. *Наумов, А.В.* Еще раз о развитии солнечной энергетике и рынке кремниевого сырья в 2007 – 2010 гг. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2007. – № 4. – С. 8-12.
4. *Глиберман, А.Я., Зайцева, А.К.* Кремниевые солнечные батареи. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961.
5. *Luque, A., Hegedus, S.* Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003.