СОЛНЕЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Солнечный преобразователь или солнечный фотоэлемент, представляет собой полупроводниковый прибор, преобразующий оптическое солнечное излучение в электрическую энергию.

Совокупность солнечных преобразователей, объединенных в единой, как правило, плоской, панельной конструкции называется солнечной батареей. Солнечные батареи являются основным источником энергии на спутниках и космических энергоустановках различной мощности.

Поскольку солнечные преобразователи (СП) предназначены для преобразования солнечной энергии, необходимо стремиться идеально, согласовать их спектральные характеристики со спектром излучения Солнца. На Рис.1 приведено распределение солнечной энергии по спектру: кривая 1 соответствует солнечному спектру в свободном пространстве за пределами атмосферы, т.е. в условиях работы СП на спутниках и космических летающих аппаратах; 2 солнечный спектр на поверхности Земли, когда Солнце находится в зените. Для первого случая (кривая 1) полная мощность излучения составляет 1353 Вт/м², для второго - 925 Вт/м².



Рассмотрим основные физические процессы, протекающие в солнечном

преобразователе.

В основе устройства обычного солнечного элемента лежит освещаемый p-n переход, работающий без внешнего электрического смещения. В солнечных элементах используется собственное поглощение¹, при этом на ионизацию одного атома достаточно энергии $hv=\Delta E_3$. Остальная энергия фотонов переходит в тепло. Скорость генерации при удалении от поверхности уменьшается,



при этом короткие волны поглощаются в более верхних слоях по сравнению с более длинными. Скорость генерации электронно-дырочных пар в функции расстояния от поверхности солнечного элемента (Рис.2.а) для длинноволнового и коротковолнового излучения приведены на Рис.2.б, где заштрихованная часть соответствует р-п переходу. Поскольку в верхних слоях образуется множество фотоносителей, за счет диффузии они начинают перемещаться в сторону обедненной

области перехода, где разделяются внутренним полем p-n перехода. Электроны остаются в n- области, а дырки, для которых поле перехода является ускоряющим, перебрасываются в p- область. Электроны и дырки, появляющиеся в обедненном слое под действием света, выносятся из него сильным электрическим полем перехода, практически не рекомбинируя. Поэтому фототок обедненного слоя, определяется числом фотонов, поглощаемых в этом слое в единицу времени.

Полный фототок, возникающий в фотоэлементе при поглощении света, равен сумме дырочного и электронного токов, протекающих через границы перехода, и дрейфового фототока, рожденного непосредственно в p-n переходе.

Если цепь элемента разомкнута, фотоносители накапливаются в соответствующих областях и компенсируют часть объемного заряда ионов примеси в обедненной области² p-n перехода. Потенциальный барьер на переходе умень-

¹ Собственное поглощение – связано с переходом электронов под действием падающего излучения из валентной зоны в зону проводимости.

² Обедненная область – это область с пониженной концентрацией подвижных носителей (электронов).

шается пропорционально величине компенсации этого заряда, и на выводах элемента возникает напряжение холостого хода Uxx. Это явление называется фотогальваническим эффектом (см. лекцию «Фотодиоды»).

Если цепь замкнуть накоротко (**R**_H=0), в ней потечет ток короткого замыкания **I**кз, обусловленный фотоносителями . При наличии нагрузки, т.е. когда **R**_H не равно 0, в цепи протекает ток меньше **I**кз и на **R**_H создается падение

напряжения **Uн.** Если на освещенный элемент подавать внешнее обратное смещение, к фототоку добавляется обратный ток p-n перехода, т.е. при обратном смещении полный ток равен **Iкз+Iобр.** При прямых смещениях, больших **Uxx**, ток инжекции через переход начинает преобладать над фототоком, и освещаемый переход работает как обычный p-n переход.

Существует достаточно много разнообразных конструкций солнечных элементов. Рассмотрим в качестве примера устройство кремниевого солнечного элемента (Рис.3), по-



скольку эти приборы являются своеобразным эталоном при создании всех солнечных батарей.

Принцип действия СП на p-n переходах

Солнечный элемент, изображенный на Рис.3.а,б состоит из p-n перехода 1, сформированного у поверхности; лицевого (поверхностного) полоскового омического контакта 2; просветляющего покрытия на лицевой поверхности 3; тылового сплошного омического контакта 4. Рис.3.б иллюстрирует структуру полоскового электрода 2 на виде сверху. Недостаток этой конструкции - наличие тени металлических контактов, уменьшающее эффективность прибора, и большой коэффициент отражения света от поверхности элемента.

Одним из лучших по своим характеристикам является солнечный элемент, показанный на Рис.4, где 1 - текстурированная поверхность с повышенным уровнем легирования донорами - \mathbf{n}^+ ; 2 - **р**-область элемента; 3 - металлические контакты \mathbf{n}^+ коллектора; 4 - металлические выводы базы. Сверху элемент имеет просветляющее покрытие (на рисунке не изображено). В рассматриваемом элементе отсутствует тень от металлических электродов, и проще ре-

3

ализуются межсоединения элементов, поскольку здесь электроды располагаются на тыловой поверхности. Этот прибор функционирует подобно биполярному транзистору \mathbf{n}^+ - \mathbf{p} - \mathbf{n}^+ типа с изолированным \mathbf{n}^+ эмиттером, расположенным на текстурированной лицевой поверхности.

Неравновесные электронно-дырочные пары, рожденные светом в **n**⁺



эмиттере (1) или **p** - базе (2), движутся (подобно обычному транзистору) к **n**⁺ коллектору и разделяются коллекторным переходом. В **n**⁺ коллектор поступают электроны, а дырки остаются в **p** - базе, выводы которой (4) осуществляются через **p**⁺ области. В этом фотоэлементе вблизи тыловой (нижней на Рис.4) поверхности перед металлическими омическими контактами созданы сильноле-гированные полупроводниковые слои **p**. Между двумя базовыми областями **p**⁺ и **p** возникает потенциальный барьер препятствующий выходу электронов из **p** - области.

В результате резко снижается скорость поверхностной рекомбинации электронов Si вблизи тыловой поверхности, т.е. уменьшаются потери фотоносителей. Плотность тока короткого замыкания возрастает, повышается и напряжение холостого хода за счет роста **І**кз, уменьшения рекомбинационно-



го тока тылового контакта и из-за дополнительного потенциального барьера между \mathbf{p}^+ и \mathbf{p} - областями. Таким образом, наличие текстурированной поверхности, уменьшающей потери на отражение, и высоколегированных областей на тыловой поверхности позволяет получить КПД 20% и более.

Характеристики и параметры СП на р-п переходах

Для анализа электрической цепи, в которую включен фотоэлемент, используют его эквивалентную схему, которая представлена на Рис.5. Генератор тока **Іф** определяет генерацию неравновесных носителей за счет облучения светом, диод VD моделирует идеализированный p-n переход, BAX которого описывается на Рис.6 (кривая 1); параллельное сопротивление **R**у обусловлено токами утечки (в действительности **R**у имеет большое сопротивление, поэтому его влиянием на выходную мощность можно пренебречь); последовательное сопротивление **R**к определяется в основном сопротивлением высокоомной базовой области. **R**к солнечного элемента зависит от глубины залегания перехода, концентрации примесей в n- и p- областях и от конструкции лицевого оми-



ческого контакта (см. Рис.3). Его влияние очень значительно, даже при значениях, меньших одного ома. Так при **R**к=5 Ом выходная мощность уменьшается более чем на 30% по сравнению с мощностью при **R**к=0.

На Рис.6 проиллюстрировано влияние **R**к на ВАХ, там же показан заштрихованный прямоугольник, площадь которого определяет максимальную мощность, производимую фотоэлементом при

R κ =5 0м (P = 0,27Bт), и не заштрихованный прямоугольник для мощности при **R** κ =0 (P = 1Bт).

В реальных солнечных элементах в отличие от идеальных прямой ток может определяться рекомбинацией носителей в p-n переходе, при этом КПД

преобразования падает. В кремниевых солнечных элементах при комнатной температуре рекомбинационный ток приводит к снижению эффективности преобразования на 25%.

Повышение температуры также уменьшает эффективность преобразования (КПД) в основном из-за уменьшения **Uxx** вызванного увеличением обратного тока насыщения **Іобр** при больших температурах.

ВАХ СП на р – п переходах определяется выражением:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Ioop}[\mathbf{e}^{\mathbf{q}\mathbf{U}/\mathbf{k}\mathbf{T}} - \mathbf{1}] - \mathbf{I}\boldsymbol{\phi} \tag{1}$$

где Іобр - обратный ток идеального р-п перехода; Іф- фототок.

СП на гетеропереходах

Гетеропереходы представляют собой переходы, которые образуются при контакте двух полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Если верхний слой, на который падает свет, сделать у фотоэлемента из полупроводника с широкой запрещенной зоной ΔE_{31} , а нижний - с узкой ΔE_{32} , то при облучении фотонами с энергией $\Delta E_{31} < hv < \Delta E_{32}$ они проходят через слой первого полупроводника и поглощаются во втором. Первый слой с широкой запрещенной зоной ΔE_{32} играет роль оптического окна.

Основные преимущества солнечных элементов с гетеропереходами: 1) повышается спектральный отклик³ на коротких длинах волн при условии, что $hv < \Delta E_{31}$ и фотоны поглощаются в обедненном слое второго полупроводника; 2) появляется возможность получения низкого последовательного сопротивления за счет сильного легирования верхнего слоя; 3) высокая радиационная стойкость при достаточно толстом и широкозонном верхнем слое полупроводника.

³ Спектральный отклик - представляет собой число генерируемых фотоэлектронов в полном токе прибора, приходящихся на один падающий фотон при облучении монохроматическим светом с длиной волны λ. Спектральный отклик определяется как отношение полного фототока к плотности потока поглощенных фотонов в единичном спектральном интервале.

Солнечные элементы ALGaAs-GaAs с подложкой

Зонная энергетическая диаграмма солнечных элементов (СЭ) представлена на Рис.7, где слой pAlxGa1-xAs является достаточно толстым (20...30 мкм) (индексы х и 1-х показывают долевой массовый состав каждого компонента, х – лежит в диапазоне от 0 до 1). Для получения указанной структуры СЭ в качестве подложек применяли nGaAs. Толщина диффузионной области pGaAs обычно находилась в пределах 1...3 мкм. Концентрация носителей в pAlxGa1xAs составила (1..5)-10¹⁸ см⁻³.

Параметры солнечных элементов ALGaAs - SaAs с подложкой

Типичная нагрузочная характеристика, измеренная при световом потоке мощностью 1375 Вт/м, представлена на Рис.8. На образцах



мА/см² и КПД=10...11%.

Такие СЭ с толстым широкозонным "окном" обладают минимальным последовательным сопротивлением. Они могут работать в условиях концентрированного солнечного излучения вплоть до 1000 солнечных постоянных. Дальнейшее усовершенствование технологии изготовления СЭ с толстым "окном", применение просветляющих покрытий и оптимизированной контактной сетки привело к повышению КПД до 21,6%.

Тонкопленочные солнечные элементы (ТСЭ) AlGaAs - GaAs



Рис.9

Тонкопленочные солнечные элементы изготовляются из поликристаллических или неупорядоченных полупроводниковых пленок, нанесенных или выращенных на электрически активных или пассивных подложках (керамика, металл, стекло, пластмасса, кремний и т.д.). Они находят широкое применение из-за низкой стоимости, обусловленной простотой техно-

логией и дешевизной используемых материалов. Однако эти приборы имеют низкий КПД и деградацию характеристик во времени, обусловленные тем, что пока не удается изготовить высококачественные пленки, слабо реагирующие с окружающей средой.

В последнее время в качестве одного из основных материалов для изготовления тонкопленочных солнечных элементов используют аморфный кремний, который называется **a-Si**. Кристаллический и аморфный кремний сильно различаются. В отличие от кристаллического, аморфный кремний близок по своим свойствам к прямозонному полупроводнику с шириной запрещенной зоны - 1,6 эВ. СЭ на основе гетеропереходов AlGaAs-GaAs являются наиболее эффективными из всех известных в настоящее время. Однако их массовое использование задерживается высокой стоимостью, которая в значительной мере определяется стоимостью монокристаллической подложки GaAs.

Физические процессы, определяющие работу СЭ (генерация и разделение электронно-дырочных пар контактным полем перехода), происходят обычно на глубине порядка нескольких микрометров, поэтому подложка в основном выполняет роль несущей и обеспечивает механическую прочность на различных стадиях изготовления прибора. Наиболее простым путем уменьшения стоимости СЭ на основе AlGaAs-GaAs гетеропереходов является уменьшение расхода пластин GaAs на подложечный материал. Этого можно достигать отделением от подложки готовой структуры и многократным использованием

8

подложки для роста ТСЭ.

Схематическое изображение не отделенной от подложки структуры ТСЭ представлено на Рис.9.



Здесь слой 2 служит для отделения структуры ТСЭ от подложки путем его травления в плавиковой или соляной кислотах (т.е. одну и ту же подложку можно использовать много раз для выращивания ТСЭ).

Во время роста 4 слоя за счет диффузии цинка формируется рабочий р-п переход в nGaAs (штриховая линия на Рис.9). Слой 6 необходим для обеспечения омичности контакта к pAl_{0,6}Ga_{0,4}As. Готовая эпитаксиальная структура (3, 4, 5) с

контактами к р- области 7 приклеивается к стеклу 8 при помощи эпоксидной смолы (слой 6).

Параметры ТСЭ.

- Спектральное распределение фоточувствительности⁴ (Q, %) представлено на Рис.10: для 1 – ТСЭ AlGaAs/GaAs; 2 – Si фотоэлемента; 3 – Si фотоэлемента, покрытого ТСЭ AlGaAs/GaAs; 4 – Si фотоэлемента покрытого слоем Al0,25Ga0,76As (d=10мкм);

- Спектры пропускания структур (Т, %) 5-7 – стекло - эпоксидная смола – ТСЭ AlGaAs/GaAs; 8 – стекло – эпоксидная смола – слой Al0,25-Ga0,76As; 9, 10 – стекло – эпоксидная смола – стекло без термоотжга (7,10) и после термоотжига при температуре; 6 – 250 С°; 9 - 320 С°.

⁴ Спектральное распределение чувствительности – это изменение чувствительности химического элемента от изменения частоты излучения.

Материалы, применяемые для изготовления СП

Идеальная эффективность преобразования КПД (**η**) оптического излучения в электрическую энергию реализуется при таком выборе и изготовлении материала, когда обратный ток будет минимальным, КПД определяется отношением максимальной выходной мощности к мощности падающего излучения. Предельные значения идеального КПД можно получить, если допустить, что потери в фотоэлементе обусловлены только излучательной рекомбинацией.

Казалось бы, для получения максимального КПД необходимо иметь минимальные значения **Іобр** и, следовательно, целесообразно использовать полупроводники с возможно более широкой запрещенной зоной. Однако между шириной запрещенной зоны и энергией фотона существуют оптимальные соотношения для каждого реального кристалла. Если **hv>** Δ **E**₃, то разность энергий **hv-** Δ **E**₃ переходит, в основном, в тепло. Кроме того, как видно из Рис.1, в спектре излучения солнца большая часть потока фотонов обладает энергией порядка одного электрон-вольта. С учетом этого на основании проведенных расчетов было показано, что максимальный КПД достигается при Δ **E**₃=1,35 эВ. На Рис.11 приведена зависимость КПД **η**=**f**(Δ **E**₃) для солнечного элемента, расположенного на Земле при **T**=300 К и при освещении Солнцем, находящимся под углом 45° к горизонту. Если осуществить тысячекратную концентрацию солнечного света, то максимальный КПД возрастет с 31% до 37%, что связано с увеличением **Uxx**. Стрелками на рисунке указаны значения ширины запрещенной зоны для некоторых полупроводников – германия Ge, кремния Si, арсенида



оказывает квантовая эффективность.

галлия GaAs и др. В реальных солнечных преобразователях максимальный КПД заметно ниже идеального из-за влияния сопротивления высокоомной базовой области, различных видов рекомбинации, потерь на сопротивление и ряда других факторов. Определяющее влияние на КПД рассматриваемых приборов В преобразователях с p-n переходом применяются кремний и арсенид галлия, но предпочтение отдано кремнию. Это связано с тем, что технология изготовления кремниевых СП хорошо отработана, их параметры стабильны в диапазоне температур (-150...+150С). Пленка из монооксида кремния образует на поверхности кристалла просветляющее покрытие и уменьшает коэффициент отражения. Диффузионная длина неосновных носителей в кремнии больше, чем в арсениде галлия, поэтому КПД и **І**кз кремниевого преобразователя выше.

Перспективы развития

Радикальным способом повышения эффективности СЭ является создание каскадных элементов.

Конструкция каскадного солнечного элемента представляет собой последовательное соединение СЭ, выполненных на основе различных полупроводниковых материалов. Последние расположены в порядке уменьшения ширины запрещенной зоны таким образом, что верхний элемент, преобразуя коротковолновое излучение, более длинноволновое пропускает через себя и преобразуется нижним элементом. Выработанные ЭДС элементов суммируются, а общий ток определяется минимальным током любого элемента каскада. Для эффективной работы КСЭ необходимо согласование по току каждого элемента. Теоретический анализ максимально возможного КПД, при двух последовательно соединенных элементах, составил 50%. Дальнейшее увеличение количества переходов приводит к малому росту КПД, и при 36 переходах максимум КПД равен 72%.

Рассмотрим некоторые экспериментальные результаты, полученные при разработке КСЭ. На Рис.12 представлены две конструкции, часто используемые при создании КСЭ, на основе монолитной конструкции (а) и транзисторной структуры (б), где:

1 – подложка nGaAs; 2 – слой pGaAs:Ge; 3,4,5 – слои Al_{0,2}Ga_{0,8}As; 6 – слой Al_{0,9}Ga_{0,1}As; 1`– подложка pGaAs; 2`– буферный слой pGaAs:Ge; 3`–



$nGaAs; 4^{-} nAl_{0,2}Ga_{0,8}As; 5^{-} pAl_{0,2}Ga_{0,8}As; 6^{-} pAl_{0,9}Ga_{0,1}As$

Монолитная структура КСЭ (Рис.12.а) представляет собой подложку nGaAs, на поверхности которой выращены последовательно слои 2 - 6. Слой 2 и подложка образуют узкозонный элемент каскада. Слои 5 и 6 образуют широкозонный элемент каскада, а связующим элементом является туннельный диод, образованный слоями 3 и 4. Полученные таким способом значения КПД находится в пределах 15 - 20%.

Транзисторная структура КСЭ (Рис.12.б) представляет собой подложку pGaAs,на поверхности которой выращены буферный слой pGaAs (2) и эпитаксиальный слой nGaAs (3). Широкозонный элемент каскада образован слоями 4 и 5, где p-n-переход сформирован в твердом растворе Al_{0,2}Ga_{0,8}As Слой 5 сформирован диффузией во время роста слоя 6. В таких конструкциях КСЭ КПД достигает 20,5% и 26% для 10-кратного концентрирования солнечного излучения.

Широкое использование СЭ в народном хозяйстве задерживается из-за высокой стоимости. Для уменьшения стоимости солнечных элементов в настоящее время в мире ведется поиск дешевых материалов, а также новых технологий и конструктивных решений. Известно, что монокристаллические кремниевые СЭ в настоящее время обладают КПД ~18%, а теоретический предел эффективности составляет 22%.

Первые сообщения об уменьшении стоимости СЭ относятся к созданию тонкопленочных СЭ на основе гомопереходов (\mathbf{n}^+ - \mathbf{p} - \mathbf{p}^+) в поликристаллическом арсениде галлия, осажденном на покрытые графитом вольфрамовые подложки и на алюминиевые подложки. На СЭ площадью ~1 см величина КПД составляет 8,1%. При создании СЭ на алюминиевых подложках с применением Ga в качестве растворителя можно получить КПД порядка 14%.

Для сохранения высокой эффективности СЭ на основе GaAs и одновременного снижения их стоимости ведутся исследования роста монокристаллических слоев GaAs на кремниевых подложках с подслоем германия. Это позволяет уменьшить массу СЭ, поскольку Si имеет в 0,44 раза меньшую плотность, чем GaAs, что представляется важным при создании солнечных батарей космического назначения.