

## ГЕТЕРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

**Наркулов Сайдулла Каримович**

Джизакский политехнической институт

**Тошпулатова Дилдора Хайдаркуловна**

Джизакский Государственный Педагогический Университет

E mail: [dildoratoshpulatova987d@gmail.com](mailto:dildoratoshpulatova987d@gmail.com)

**Аннотаци.** Проведен сравнительный анализ перспектив создания сверхтонких, легких и высокоэффективных солнечных элементов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. Предложено микронное утонение гетероструктур AlGaAs/GaAs с использованием эффективных технологических приемов, позволяющее значительно увеличить процент выхода солнечных элементов.

**Ключевые слова:** гетероструктура, солнечная энергетика, альтернативные источники энергии, электричество, фотовольтаика, солнечный элемент.

В настоящее время необходимость повышения энерго-массовых характеристик солнечных батарей приобретает актуальное значение. Основными путями решения этой проблемы являются повышение характеристик солнечных элементов на основе соединений AlGaAs/GaAs, обладающих наибольшей эффективностью, а также уменьшение их габаритов и массы. Для достижения такой цели требуются новые оптимизированные архитектуры фотоэлектрических систем и высококачественные полупроводниковые материалы. В мире ведутся интенсивные исследования по повышению КПД солнечных элементов до 35% в перспективных гетероструктурах за счет увеличения числа р-п-переходов в полупроводниках до четырех, пяти и даже шести. В настоящее время кремний является основным материалом для солнечных батарей. КПД солнечных элементов на основе кремния составляет 15-16% при прямом облучении в условиях околоземного космического пространства. Солнечные элементы на основе гетероструктур обеспечивают высокий КПД и обладают высокой радиационной стойкостью. Важным преимуществом гетеро-фотопреобразователей является их способность эффективно преобразовывать высоко-концентрированное солнечное излучение (до 1000 - 2000 раз), что открывает перспективу значительного уменьшения площади и стоимости солнечных элементов (пропорционально уровню концентрации) и, как результате, приводит к снижению цены на «солнечную» электроэнергию.

Солнечные элементы на основе гетероструктур GaAs впервые были представлены А.Ф. Иоффе и он был создан в Физико-техническом институте. Использование широкозонного «окна» из тонкого слоя твердого раствора AlGaAs, практически полностью прозрачного для солнечного излучения, обеспечивает увеличению поверхности фотоактивной области. Многослойные гетероструктуры AlGaAs/GaAs были созданы методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии [1-5], что обеспечило рекордную эффективность для солнечных элементов с одиночным р-п-переходом. Такие рабочие показатели были достигнуты за счет уменьшения толщины лобового слоя AlGaAs/GaAs до 30-50 нм, кристаллизации высококачественного материала в активной области и создания тыльного потенциального барьера из GaAs. В последние годы метод МОП-гидридной эпитаксии (эпитаксии металлоорганической фазы) широко используется для получения

гетероструктур AlGaAs/GaAs для солнечных элементов [6]. Большой интерес представляет полученный этим методом гетероструктурный солнечный элемент с брэгговским зеркалом (рис.1). В результате повышается радиационная стойкость солнечных элементов. Солнечные элементы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs в настоящее время широко используются в фотоэлементах благодаря их высокому КПД и повышенной радиационной стойкости.

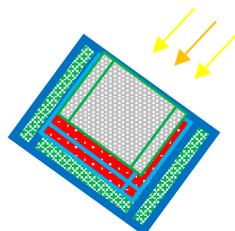


Рис 1. Гетероструктурированный фотоэлемент

### 1. Каскадные солнечные элементы

Дальнейшее повышение эффективности обеспечивают каскадные солнечные элементы, изготовленные на основе многослойных гетероструктур с двумя и более p-n-переходами в материалах с различной шириной запрещенной зоны (рис.2). В этой конструкции используется GaAs в качестве материала широкозонного элемента и InGaAs или GaSb в качестве узкозонного элемента. В таких элементах «верхний» p-n-переход, изготовленный из более широкозонного материала, предназначен для эффективного преобразования коротковолновой части солнечного излучения в энергию, а «нижний» p-n-переход — узкозонный материал, оптимизирован для преобразования длинноволнового излучения, проходящего через широкополосный элемент. Теоретические расчеты показывают, что в таких сложных фотопреобразователях может быть достигнута энергоэффективность более 40%.

Как уже упоминалось выше, одним из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных элементов является арсенид галлия. Арсенид галлия и фотоэлемент на его основе могут состоять из нескольких слоев-гетероструктур разного состава. Обычно в качестве зеркала гетероструктуры на основе GaAs (GC) получают очень тонкий слой AlGaAs. Но главный недостаток арсенида галлия — его высокая стоимость. Чтобы удешевить производство, необходимо формировать солнечные элементы на других более дешевых подложках.

Диселениды меди и индия ( $\text{CuInSe}_2$ ) обладают чрезвычайно высокой способностью поглощать солнечное излучение — 99% света поглощается первым микроном этого материала (ширина запрещенной зоны 1,0 эВ) [2,5]. В настоящее время начаты интенсивные работы по производству стекла для солнечных батарей на основе  $\text{CuInSe}_2$ . Иногда к сульфиду кадмия добавляют цинк для улучшения прозрачности стекла.  $\text{CuInSe}_2$  увеличивает ширину запрещенной зоны в слое, что приводит к увеличению напряжения холостого хода и, как следствие, к повышению КПД устройства.

### Физические процессы в фотоэлементах

Большинство солнечных элементов представляют собой р-п-переходы большой площади. Когда на них падает свет, они могут генерировать ток и напряжение. Причина, по которой это происходит, кроется в материалах р-типа и п-типа. — генерируемое электрическое поле. Сначала посмотрим, что произойдет, если кремниевый солнечный элемент (р-п-переход) имеет провод с низким сопротивлением, подключенный снаружи между р- и п-контактами. В темноте солнечный элемент не генерирует ток. Когда свет падает на солнечный элемент, ток течет по проводу со стороны р-типа на сторону п-типа (обычный ток). У света достаточно энергии, чтобы разорвать некоторые химические связи в кристалле кремния. Это означает, что электроны, обычно участвующие в кремниевой связи, переходят в более высокое энергетическое состояние под воздействием света, и связь разрывается. Интенсивность солнечного света на поверхности земли достаточно сильна, чтобы разорвать примерно 1 связь на каждые 100 миллионов атомов кремния в солнечном элементе. Возбужденные электроны аналогичны электронам дополнительных атомов фосфора — они свободно перемещаются по материалу. Точно так же вакансии, созданные светом, действуют как дырки, точно так же, как неспаренные электроны в связях между атомами кремния и бора. И эти отверстия также могут свободно перемещаться в материале. Созданные таким образом электроны и дырки физически близки друг к другу: каждому электрону, возбужденному светом, создается соответствующая дырка. Эти электроны и дырки могут оставаться возбужденными лишь короткое время. В процессе рекомбинации возбужденные электроны подходят очень близко к дыркам, и оба занимают связанные позиции. Когда происходит этот процесс, электрическая энергия пары теряется в виде тепла. Если рекомбинации слишком много, эффективность солнечного элемента снижается.

В солнечном элементе возбужденные светом электроны и дырки появляются по всему объему материала, в р-области, п-области и в области поля, где существует генерируемое электрическое поле. Благодаря «установленному» электрическому полю электроны притягиваются к положительному заряду со стороны материала р-типа. Точно так же дырки притягиваются к отрицательному заряду на стороне материала п-типа. Это разделение зарядов заставляет ток течь через переход. Направление тока (условный ток) совпадает с движением дырок (поскольку они заряжены положительно). То есть ток течет по полю со стороны п-типа на сторону р-типа. Теперь есть напряжение на солнечном элементе, но нет тока от солнечного элемента. «Напряжение холостого хода» измеряется путем помещения вольтметра на освещенный солнечный элемент. Например, для солнечного элемента оно измеряет около 0,6 вольта при сильном солнечном свете. Когда солнечный элемент с открытым переходом освещается, генерируемые светом электроны и дырки, вращающиеся вокруг перехода, разделяются «встроенным» электрическим полем. Электроны выталкиваются в область п-типа, а дырки — в область р-типа. Ток, создаваемый светом, зависит только от того, насколько интенсивен солнечный свет и сколько рекомбинаций происходит внутри солнечного элемента. Этот зарядный блок создает напряжение на солнечном элементе. Можно представить, что это разделение заряда продолжается бесконечно, что приводит к бесконечному напряжению на солнечном элементе.

Для выработки большого количества энергии из солнечных элементов достаточно соединить несколько солнечных элементов вместе. Фактически, многие

солнечные элементы могут быть соединены вместе, чтобы создать большую солнечную электростанцию. Большинство современных солнечных элементов имеют одиночный p-n-переход. В таком элементе свободные носители заряда генерируются только фотонами с энергией, большей или равной ширине запрещенной зоны. Иными словами, фотоэлектрическая реакция одиночного переходного элемента ограничена частью солнечного спектра с энергией выше ширины запрещенной зоны, и низкоэнергетические фотоны не используются. Это ограничение может быть преодолено многослойными структурами из двух или более элементов с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются *каскадными или тандемными* [2].

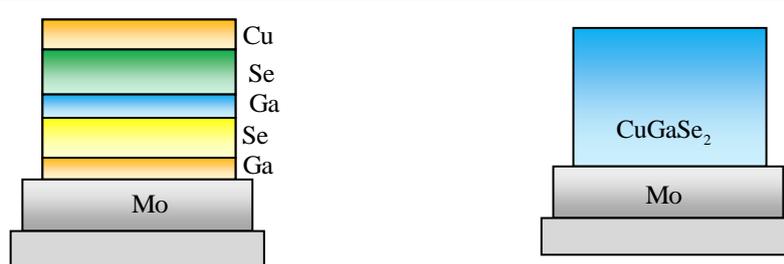


Рис 2. Конструкция гетероструктурированного фотоэлемента

Каждый фотоэлемент характеризуется рядом параметров и свойств, определяющих не только его характеристики, но и пределы его использования в технике: вольт-амперная, световая, частотная и спектральная чувствительность, КПД. Точно так же гетероструктурированные фотопроводники обладают указанными выше физическими свойствами. Исследования показали, что эти физические свойства имеют почти одинаковый смысл в обоих случаях. Вольт-амперные и вольт-мощные характеристики рассматриваемой системы на приведены на рис. 3. Из графика видно, что протекание фототока в элементе зависит от постоянной температуры излучения. Однако по мере увеличения освещенности фототок и напряжение увеличиваются. Это приводит к увеличению общей мощности. В этом случае для характеристик гетероструктурной системы при повышении рабочей температуры выход по току увеличивается незначительно, а выход по напряжению резко уменьшается, что влияет на уменьшение полезной мощности с ростом температуры. Номинальное напряжение и ток исследуемой нами структуры описываются следующими общими формулами

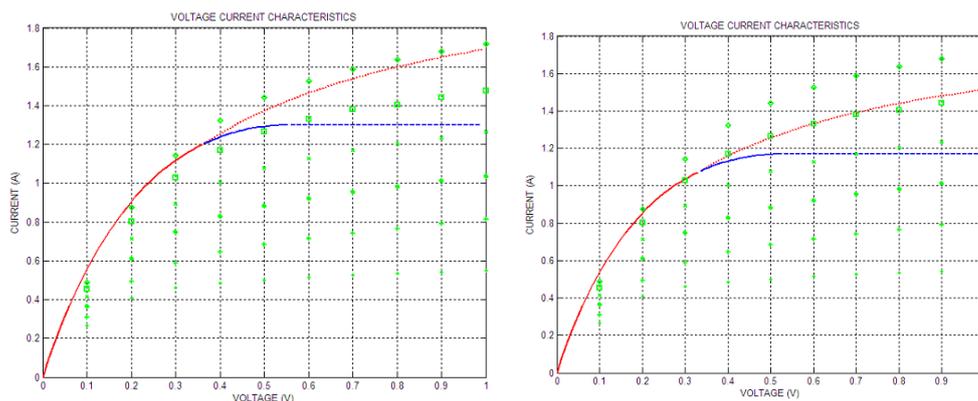
$$I = I_{ph} \frac{\alpha \Gamma \frac{\partial}{\partial T} \exp\left(\frac{qE_g}{kA} \frac{1}{T}\right)}{T} \quad (1)$$

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha \Gamma^2}{T + \beta}$$

где  $T_r$  представляет начальную температуру и постоянный фототок элемента;  $I_{ph} q$  — заряд электрона;  $E_g$  - основной энергетический уровень проводника,  $T$  - температура элемента (К). Номинальное напряжение элемента выражается следующей формулой

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} + I. \quad (2)$$

$I_s$  выходной ток массива;  $U$  выходное напряжение массива. На рисунке ниже показаны характеристические кривые элемента для данного уровня солнечной радиации и температуры.



### 3. Вольт-амперные характеристики системы при переменном излучении с температурой 25 ° - 30 °.

Сегодня ячейки, состоящие из гетероструктурированных фотоэлектрических систем, таких как  $A_3V_5$ , составляют 80% систем, установленных во всем мире. Их КПД составляет 35-40 процентов. Позднее фотоэлектрические системы на гетероструктурах GaAs-AlGaAs стали изготавливаться в виде тонких пленок аморфного кремния, теллурида кадмия. Их КПД составляет около 9 процентов, но они дешевле в производстве, чем фотоэлементы из моно- или поликристаллического кремния [3,7]. Например, пусть гетероструктурный солнечный фотоэлемент состоит из нескольких сотен (например, 100) ячеек. Пусть его мощность будет 1,5 Вт. В данном случае размер фотоэлемента составляет 20·30 см. Примем плотность тока в фотоэлементе  $E = 500 \text{ Вт/м}^2$  и найдем полезный КПД фотоэлемента. В этом случае находим КПД фотоэлемента по следующей формуле

$$\eta = \frac{P}{ES}.$$

Здесь  $P$  – мощность аккумулятора, которая рассчитывается по следующей формуле

$$P = n \cdot 15.$$

Здесь  $n$  — общее количество фотоэлементов в гетероструктурном солнечном элементе. Подставляя значения необходимых величин в формулы  $P = 900 \cdot 15 = 1350 \text{ Вт}$ ,  $S = 0.06 \text{ м}^2 \cdot 900 = 54 \text{ м}^2$  находим полезный КПД фотоэлемента

$$\eta = 1350 / 54 \cdot 500 = 0.05\%$$

Величина КПД фотоэлемента определяется потерями энергии, которые зависят от используемых материалов и конструкции фотоэлемента, а также выбора режима работы фотоэлемента (нагрузочное сопротивление, свет и температура). В процессе преобразования энергии излучения в электрическую энергию, выделяющуюся в нагрузку фотоэлемента, потери энергии можно разделить на

световые и энергетические. Потери света в основном связаны с отражением светового потока от поверхностного фотоэлемента и зависят от длины волны падающего света. Они также определяются фотоэлектрическим неактивным поглощением света: поглощение возбуждения, генерация фотонов, поглощение с возбуждением в пределах полосных переходов, поглощение доли светового потока, прошедшей на большую глубину вместе с нижним металлическим электродом.

**Литература:**

1. Местников, А.Е. Тепловая защита зданий на суровых условиях: материал, дизайн, конструкция. А. Э. Местников, П. С. Абрамова. М.: Издательство ABC, 2009. – 5 – 10 с.
2. Христофорова Т.А. Мы внедряем новые энергоэффективные технологии. Т.А. Христофорова. Энергосбережение в Якутии. 2017. № 6 (12). С. 10-11.
3. Narkulov S. K. EFFECT OF DUST DEPOSITION ON THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC PANELS. <http://journals.nuu.uz> Natural sciences (infofaktr) Milliy-2024