



1.4.2 ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Фотоэлемент - электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию. Подразделяются на электровакуумные и полупроводниковые фотоэлементы. Действие прибора основано на фотоэлектронной эмиссии или внутреннем фотоэффекте. Первый фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте, создал Александр Столетов в конце XIX века.

Кремниевые солнечные элементы с эффективностью фотопреобразования в 24,7% производятся на основе монокристаллического кремния, выращенного методом плавающей зоны. Используя монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского, который существенно дешевле, чем монокристаллический кремний, полученный методом плавающей зоны, компания Sanyo (Япония) освоила промышленное производство солнечных панелей со средней эффективностью ~20%, а на элементах размером ~100 см² была достигнута эффективность в 21,5%. Особенностью этих элементов является наличие дополнительных слоев широкозонного полупроводника (в случае элементов Sanyo - это аморфный кремний, осажденный методом PECVD) с обеих сторон кремниевой пластины, что повышает их эффективность [1].

Внешний фотоэффект был открыт в 1887 году Генрихом Герцем. При работе с открытым резонатором он заметил, что если осветить ультрафиолетом на цинковые разрядники, то прохождение искры заметно облегчается:

$$hv = A + mv^2/2,$$

где: A - работа выхода (минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из вещества;

$mv^2/2$ - максимальная кинетическая энергия вылетающего электрона;

ν - частота падающего фотона с энергией $h\nu$;

h - постоянная Планка.

Из этой формулы следует существование красной границы фотоэффекта при $T = 0$ К, то есть существование наименьшей частоты $h\nu_{min} = A$, ниже которой энергии фотона уже недостаточно для того, чтобы «выбить» электрон из металла. Энергия фотона расходуется на ионизацию атома вещества и на работу, необходимую для «вырывания» электрона, а остаток переходит в кинетическую энергию электрона.



Внутренним фотоэффектом называется явление возрастания электропроводности и уменьшения сопротивления, вызванное облучением.

Он объясняется перераспределением электронов по энергетическим состояниям в твёрдых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений, проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта.

Фотопроводимостью называется увеличение электрической проводимости вещества под действием излучения.

Фото электрическое преобразование - преобразование энергии основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Неоднородность структуры может быть получена легированием одного и того же полупроводника различными примесями (создание p-n переходов) или путём соединения различных полупроводников с неодинаковой шириной запрещённой зоны - энергии отрыва электрона из атома (создание гетеропереходов), или же за счёт изменения химического состава полупроводника. Возможны комбинации перечисленных способов.

Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств ФЭП, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость обусловленная явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

Основные необратимые потери энергии в ФЭП связаны с:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нём;
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов;
- рекомбинацией образовавшихся фото-пар, на поверхностях и в объёме ФЭП;
- внутренним сопротивлением преобразователя, и некоторыми другими физическими процессами.

Для уменьшения всех видов потерь энергии в ФЭП:



- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещённой зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путём её оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варијзонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров ФЭП (глубины залегания р-n перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту ФЭП от космической радиации;
- разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;
- создание каскадных ФЭП из специально подобранных по ширине запрещённой зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад, и пр.

Существенного повышения КПД ФЭП удалось добиться за счёт создания преобразователей с двухсторонней чувствительностью (до +80 % к уже имеющемуся КПД одной стороны), применения люминесцентно-переизлучающих структур, линз Френеля, предварительного разложения солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных плёночных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра отдельным ФЭП.

Из-за своей низкой эффективности, которая в лучшем случае достигает 20 процентов, солнечные батареи сильно нагреваются. Остальные 80 процентов энергии солнечного света нагревают солнечные батареи до средней температуры около 55°C.

С увеличением температуры фотоэлемента на 1°, его эффективность падает на 0,5 %. Эта зависимость нелинейна и повышение температуры элемента на 10° приводит к снижению эффективности почти в два раза. Активные элементы систем охлаждения (вентиляторы или насосы), перекачивающие хладагент, потребляют значительное количество энергии, требуют периодического обслуживания и снижают надёжность всей системы.



Пассивные системы охлаждения обладают очень низкой производительностью и не могут справиться с задачей охлаждения солнечных батарей.

Частичное затемнение панели вызывает падение выходного напряжения за счёт потерь в неосвещённом элементе, который начинает выступать в роли паразитной нагрузки. От данного недостатка можно избавиться путём установки байпаса на каждый фотоэлемент панели. В облачную погоду при отсутствии прямых солнечных лучей крайне неэффективными становятся панели, в которых используются линзы для концентрирования излучения, так как исчезает эффект линзы.

Из рабочей характеристики фотоэлектрической панели видно, что для достижения наибольшей эффективности требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого фотоэлектрические панели не подключают напрямую к нагрузке, а используют контроллер управления фотоэлектрическими системами, обеспечивающий оптимальный режим работы панелей. Во многих видах ЭА находят применение солнечные батареи, которые используются для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию. В темное время суток (ночью или в тени) солнечные батареи не производят энергии. Для непрерывного обеспечения нагрузки электроэнергией необходимо запастись некоторую часть энергии, производимой солнечной батареей в период освещения, и отдавать ее в нагрузку в темное время суток. Поэтому автономная система электроснабжения должна содержать кроме солнечной также аккумуляторную батарею, которая разряжается на нагрузку в темное время суток и в случае пиковых нагрузок.

На рис. 1.4.6 приведена типовая схема включения солнечной (СБ) и аккумуляторной (АБ) батарей. В схеме предусмотрен развязывающий диод VD1 для предотвращения разрядки батареи аккумуляторов через солнечную батарею. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента показана на рис. 1.4.7.

Для получения требуемой мощности солнечные элементы объединяют в модули, а модули – в панели. Солнечные элементы, по существу, являются полупроводниковыми приборами большой площади с неглубоким *p-n*-переходом, удельным сопротивлением базы 10 Ом·см и относительно низкими значениями напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Коэффициент полезного действия солнечных элементов обычно составляет 10...14 % [9].

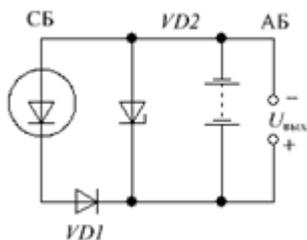


Рис. 1.4.6. Типовая схема включения солнечной и аккумуляторной батарей.

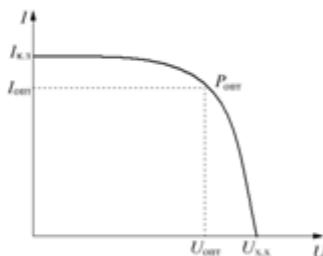


Рис 1.4.7. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента: $I_{к.з}$ - ток короткого замыкания; $U_{х.х}$ - напряжение холостого хода; $I_{опт}$, $U_{опт}$ и $P_{опт}$ – наилучшие ток, напряжение и мощность соответственно.

В условиях излучения наблюдается деградация солнечных элементов, для снижения которой элементы покрывают слоем защитного стекла. Стекло крепится к элементам при помощи клея, стойкого к ультрафиолетовым лучам. Иногда используют солнечные элементы с интегрированным защитным покрытием из кварцевого или сапфирового стекла. Такое защитное покрытие содержит антиотражающий слой на фронтальной поверхности элемента. Для достижения лучших характеристик температуру солнечных элементов следует поддерживать по возможности низкой.

С целью увеличения выходного напряжения элементы, согласованные по току, соединяют последовательно. Для обеспечения требуемого тока элементы, согласованные по напряжению, соединяют параллельно.

Использование некондиционных полированных пластин при изготовлении микросхем для получения солнечных элементов позволяет отказаться от применения вакуумных установок для создания контактной системы и просветляющего слоя Ta_2O_5 , что уменьшает стоимость изготовления пластин.

Выпуск солнечных элементов методом трафаретной печати позволяет создавать контактную систему на передней поверхности элемента, металлизацию заднего контакта и антиотражающее покрытие.



Для снижения стоимости производства полупроводниковых фотопреобразователей проводятся работы по созданию солнечных элементов на основе тонких пленок. Их преимуществом является высокое оптическое поглощение видимого света и возможность изготовления тонких пленок большой площади. Исследования показали, что выбор барьерного металла и введение туннельно-тонкого диэлектрического слоя Nb_2O_5 позволяет создать солнечные элементы на основе МДП-структур с гидрогенизированным аморфным кремнием с КПД до 10 %.

С целью уменьшения доли отраженного света на лицевую поверхность кремниевой пластины наносят оптически просветляющий слой, например, двуокиси кремния, или рельефный полимерный слой для обеспечения эффективного поглощения света в полупроводнике при больших углах падения. Другим способом решения этой проблемы является рельефное травление кремния или придание поверхности кремния бархатистой структуры путем специального травления.

Омические контакты и токосъемные шины располагают обычно с противоположных сторон пластины. При этом для уменьшения затенения полупроводника и увеличения сечения токосъемных шин последние помещают в предварительно протравленные канавки (рис. 1.4.8). Кремниевые пластины выполняются либо круглой формы, либо с обрезанными краями (в виде псевдоквадрата) для увеличения плотности заполнения при компоновке панели.

Современные серийные пластины на основе $p-i-n$ -структуры площадью 100 x 100 мм при освещенности 100 мВт/см² имеют следующие параметры: коэффициент полезного действия 11...12 %; напряжение холостого хода 0,45 В; ток короткого замыкания 2,2 А.

Механическая прочность панелей обеспечивается применением прочного стекла для крепления кремниевых пластин и профильной металлической рамки (рис. 1.4.9). Герметизация, как правило, осуществляется климатоустойчивыми полимерными термосплавами. Во всех вариантах конструкции герметиком заполняется также и промежуток между кремниевыми пластинами и стеклом. Конкретные материалы панели (металл, стекло, герметик) и технологические режимы ее изготовления выбирают с учетом конкретных требований по условиям эксплуатации.

Если для стационарной ЭА необходима система электроснабжения мощностью 50 Вт постоянного тока, то для получения такой



мощности необходима активная площадь панели около $0,5 \text{ м}^2$. Основной конструкции может быть рамка из алюминиевого сплава стандартного профиля. В качестве основы для размещения кремниевых пластин используется листовое кварцевое (выщелоченное) стекло толщиной $2...3 \text{ мм}$. В качестве герметика целесообразно применить полиметилбутеральную пленку. Сравнительная эффективность преобразователей приведена в таблице 1.4.4.

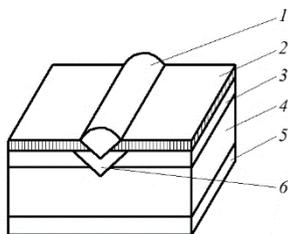


Рис. 1.4.8. Структура углубленных токосъёмных шин:

1, 5 – токосъёмные шины; 2 – дву-
окиси кремния; 3 – n^- -
диффузионный слой; 4 – p^- -
кремний; 6 – n^+ -слой

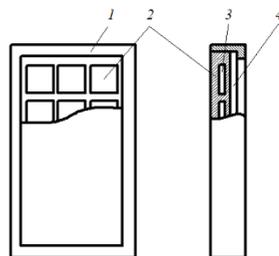


Рис. 1.4.9. Конструкция панели с металлической рамкой:

1 – металлическая рамка; 2 – кремниевая пластина; 3 – герметик; 4 – стекло

Мощность потока солнечного излучения на входе в атмосферу Земли, составляет около 1366 ватт на квадрат. В то же время, удельная мощность солнечного излучения в Европе в очень облачную погоду даже днём может быть менее 100 Вт/м^2 . Возможно преобразовать эту энергию в электричество с эффективностью $9\text{—}24 \%$.

В 2009 году компания Spectrolab (дочерняя фирма Boeing) продемонстрировала солнечный элемент с эффективностью $41,6 \%$

В 2011 году калифорнийская компания Solar Junction добилась КПД фотоэлемента размером $5,5 \times 5,5 \text{ мм}$ в $43,5 \%$,

В 2012 году компания Morgan Solar создала систему Sun Simba из полиметилметакрилата (оргстекла), германия и арсенида галлия, объединив концентратор с панелью, на которой установлен фотоэлемент. КПД системы при неподвижном положении панели составил $26\text{—}30 \%$ (в зависимости от времени года и угла, под которым находится Солнце), в два раза превысив практический КПД фотоэлементов на основе кристаллического кремния.



В 2013 году компания Sharp создала трёхслойный фотоэлемент размером 4×4 мм на индиево-галлий-арсенидной основе с КПД 44,4 %, а группа специалистов из Института систем солнечной энергии общества Фраунгофера, компаний Soitec, CEA-Leti и Берлинского центра имени Гельмгольца создали использующий линзы Френеля фотоэлемент с КПД 44,7 В 2014 году Институт солнечных энергосистем Фраунгофер создали солнечные батареи, в которых благодаря фокусировке линзой света на очень маленьком фотоэлементе КПД составил 46 %.

Таблица 1.4.4.

Коэффициент фотоэлектрического преобразования для различных видов преобразователей

Тип	Коэффициент ФП , %
Кремниевые	
Si (кристаллический)	24,7
Si (поликристаллический)	
Si (тонкопленочная передача)	
Si (тонкопленочный субмодуль)	10,4
GaAs (кристаллический)	25,1
GaAs (тонкопленочный)	24,5
GaAs (поликристаллический)	18,2
InP (кристаллический)	21,9
Тонкие плёнки халькогенидов	
CIGS (фотоэлемент)	19,9
CIGS (субмодуль)	16,6
CdTe (фотоэлемент)	16,5



Аморфный/Нанокристаллический Si	
Si (аморфный)	9,5
Si (нанокристаллический)	10,1
Фотохимические	
На базе органических красителей	10,4
На базе органических красителей (субмодуль)	7,9
Органический полимер	5,15
Многослойные	
GaInP/GaAs/Ge	32,0
GaInP/GaAs	30,3
GaAs/CIS (тонкопленочный)	25,8
a-Si/mc-Si (тонкий submodule)	11,7

В 2014 году испанские учёные разработали фотоэлектрический элемент из кремния, способный преобразовывать в электричество инфракрасное излучение Солнца.

Перспективным направлением является создание фотоэлементов на основе наноантенн, работающих на непосредственном выпрямлении токов, наводимых в антенне малых размеров (порядка 200—300 нм) светом (то есть электромагнитным излучением частоты порядка 500 ТГц). Наноантенны не требуют дорогого сырья для производства и имеют потенциальный КПД до 85 %.

Также, в 2018 году, с открытием флексо-фотовольтаического эффекта, обнаружена возможность увеличения КПД фотоэлементов. За счёт продления жизни горячих носителей (электронов) теоретический предел их эффективности поднялся до 66 %.

Как правило, напряжение и род тока на выходе солнечной батареи не соответствуют требуемым значениям буферных аккумуляторов. Автономные источники электроэнергии обычно содержат преобразователи напряжения постоянного тока в постоянный (конверторы) или постоянного тока в переменный (инверторы).



Кроме того, необходим контроллер управления зарядом и разрядом аккумуляторной батареи. В светлое время суток он должно обеспечить заряд аккумуляторной батареи до заданного уровня, а в процессе разряда предотвращает разряд батареи ниже определенного уровня [11].