

## Лекция 5.3

### ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МОДУЛИ И ИХ МАТЕРИАЛЫ

**Фотоэлектрический солнечный элемент (СЭ) (фотоэлемент)** - это полупроводниковый прибор, который служит для преобразования световой энергии в электрическую. В основе этого преобразования лежит явление фотоэффекта, открытое в 1887 году Генрихом Герцем.

Развитие солнечной энергетики идёт по пути увеличения КПД СЭ, параллельно решая такие задачи, как снижение их стоимости, увеличение срока службы и стабильности работы при изменяющихся внешних условиях (влажность, облачность, перепады температур).

Исторически первыми фотоэлектрическими СЭ (далее - СЭ) с эффективностью, много большей 1 % (а именно, 6 %), стали элементы на основе кристаллического кремния. Эти элементы (наравне с СЭ на основе германия) принято считать **элементами первого поколения**, которые в настоящее время составляют 90 % всего рынка производства коммерческих СЭ и обладают в среднем КПД около 20 %. Такие элементы имеют ряд недостатков: это высокая стоимость производства, токсичность процесса изготовления, большое количество токсичных отходов и др..

Попытки избавиться от этих недостатков привели к созданию альтернативных СЭ, в том числе тонкоплёночных, которые сегодня называются **элементами второго поколения**. Такие СЭ изготавливаются из аморфного, микрокристаллического или поликристаллического кремния, а также многокомпонентных полупроводников различных групп и типов.

У СЭ второго поколения устранили ряд проблем, которые были у СЭ первого поколения. Для их изготовления требуется меньше сырья, их производство проще, чем в случае СЭ на основе кристаллического кремния, и потребляется меньше энергии. Многие солнечные батареи на основе таких СЭ являются гибкими или пластичными тонкими плёнками и могут размещаться на неплоских поверхностях. Эти достоинства привели к бурному развитию СЭ второго поколения, однако переход к ним оказался не совсем удачным. Коммерческие СЭ второго поколения со средним КПД в 15 %, начиная с 1980-х годов, заняли всего 10 % рынка, и серьёзного роста в настоящее время не происходит. Причин этой относительной неудачи много: здесь и высокая токсичность производства многокомпонентных полупроводников и ряда исходных материалов, и зависимость работы от условий окружающей среды (необходимость очистки от снега и загрязнений, снижение выходной мощности при освещении рассеянным светом), и нестабильность СЭ на основе аморфного кремния, и, наконец, отсутствие ясности в вопросе о том, на какие именно материалы надо ориентироваться крупным инвесторам.

Следующим этапом усовершенствования солнечной фотовольтаики стало создание органических СЭ - **элементов третьего поколения**. При создании таких элементов стараются решить уже известные проблемы: снизить токсичность производства и отходов, себестоимость, материальные и энергетические затраты, увеличить скорость изготовления и упростить этот процесс, а также достичь максимальной стабильности работы солнечной батареи в различных погодных условиях.

**СЭ третьего поколения** - это довольно широкий класс элементов на основе проводящих полимеров, в том числе органических, СЭ на основе пигментов (органических красителей) и органо-неорганических полупроводников, а также квантовых точек, СЭ на горячих электронах и, наконец, СЭ с разделением солнечного спектра. К последним относятся так называемые каскадные, или многопереходные, СЭ, в которых фотоэлектрический материал образован многослойной структурой с общей толщиной 1-5 мкм, содержащей несколько (на практике от 2 до 4) полупроводниковых переходов. Такая структура есть не что иное, как последовательное соединение оптически тонких СЭ, каждый из которых оптимизирован для

своего сравнительно узкого спектрального поддиапазона солнечного излучения. Именно для таких СЭ получены рекордные значения КПД 45-46 %. Эти элементы создаются из наиболее высококачественных материалов.

Ввиду того, что стоимость изготовления СЭ *третьего поколения* очень высока и они применяются в основном для электропитания космических аппаратов, а ряд перспективных элементов пока ещё не вышли на уровень промышленного производства, в данном пособии рассматриваются наиболее используемые СЭ, установки и системы на их основе, применяемые в гражданских, бытовых и промышленных целях.

Солнечные элементы (СЭ) изготавливаются из материалов, которые напрямую преобразуют солнечный свет в электричество. Большая часть из выпускаемых в настоящее время СЭ изготавливается из **кремния** (химический символ Si). Кремний - это полупроводник. Он широко распространен на земле в виде песка, который является диоксидом кремния (SiO<sub>2</sub>), также известного под названием «кварцит». Другая область применения кремния - электроника, где кремний используется для производства полупроводниковых приборов и микросхем.

На рисунке 24 представлена структура солнечного элемента из кремния.

Строение простого солнечного элемента из кремния и основной принцип его действия следующие. Берется обычный полупроводник - две пластины, присоединенные друг к другу. Они изготовлены из кремния с добавлением в каждую из них определенных примесей, благодаря которым получают элементы с нужными свойствами: первая пластина имеет избыток валентных электронов, у второй же, наоборот, их недостаточно. В итоге в полупроводнике есть слой отрицательно заряженный и слой положительно заряженный, т. е. слои «п» и «р».

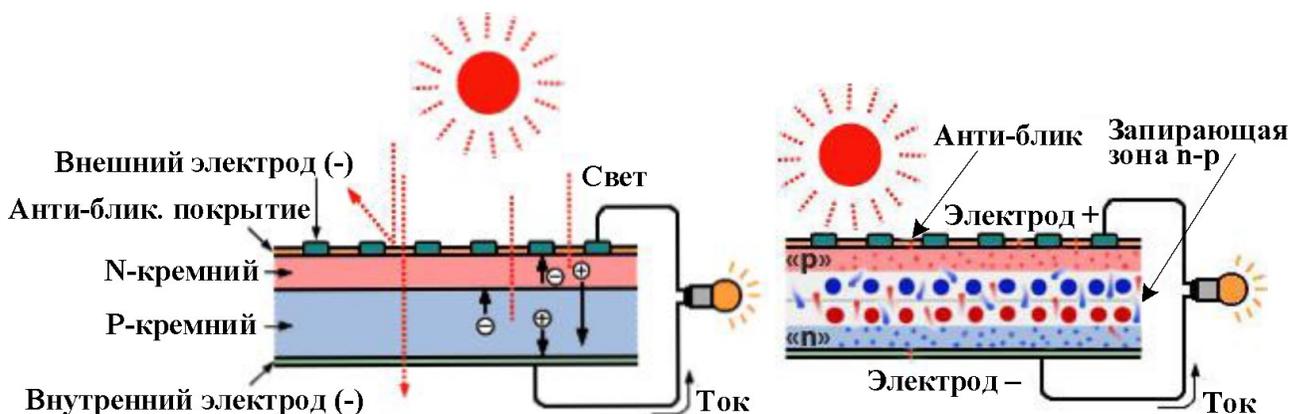


Рисунок 24 - Строение солнечного фотоэлемента из кремния

Максимальная мощность отбирается в том случае, когда солнечный элемент находится в режиме, отмеченном точкой а на рисунке 25

Максимальная мощность, снимаемая с единицы площади солнечного элемента, вычисляется по формуле:

$$P_{\max} = U_{\text{ТММ}} \cdot I_{\text{ТММ}} = FF \cdot I_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{ХХ}}$$

$U_{\text{ТММ}}$  - напряжение в точке максимальной мощности (точка а, рис. 25), В;  $I_{\text{ТММ}}$  - ток в точке максимальной мощности (точка а, рис. 25), А; FF - коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики;  $I_{\text{КЗ}}$  - ток короткого замыкания, А;  $U_{\text{ХХ}}$  - напряжение холостого хода, В.

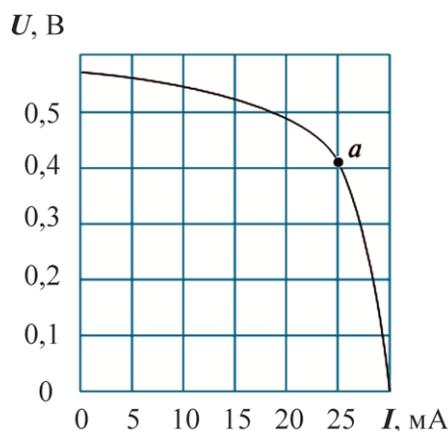


Рисунок 25 - Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

### Характеристики солнечного элемента

- Напряжение холостого хода - это максимальное напряжение, создаваемое солнечным элементом, возникающее при нулевом токе (рис. 26). Оно равно прямому смещению, соответствующему изменению напряжения р-п-перехода при появлении светового тока. Напряжение холостого хода обычно обозначается  $U_{ХХ}$  или  $V_{oc}$ . Напряжение холостого хода монокристаллических солнечных элементов высокого качества достигает 730 мВ при условии АМ1.5. В коммерческих устройствах оно обычно находится на уровне 600 мВ. Напряжение холостого хода солнечного элемента мало меняется при изменении освещенности.



Рисунок 26 - Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и напряжение холостого хода

- Ток короткого замыкания - это ток, протекающий через солнечный элемент, когда напряжение равно нулю (то есть когда солнечный элемент замкнут накоротко) (рис. 27). Ток короткого замыкания обычно обозначается  $I_{КЗ}$  или  $I_{sc}$ . Он возникает в результате генерации и разделения сгенерированных светом носителей. В идеальном солнечном элементе при условии умеренных резистивных потерь он равен световому току. Поэтому ток короткого замыкания можно считать максимальным током, который способен создать солнечный элемент. Кроме того, он прямо пропорционально зависит от интенсивности света.

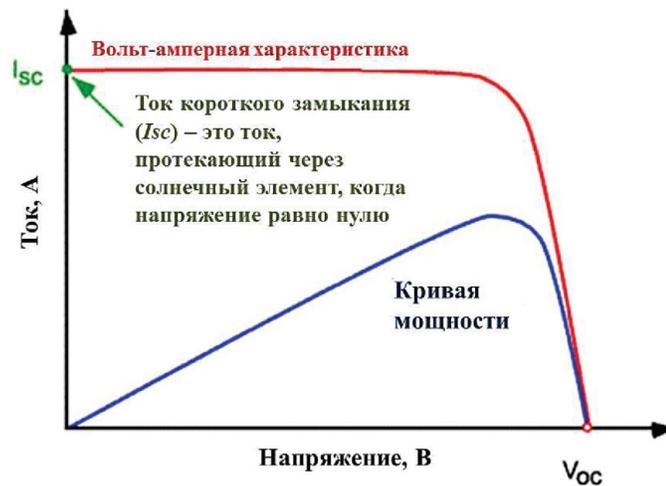


Рисунок 27 - Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и ток короткого замыкания

- На практике солнечный элемент работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточная мощность. Лучшее их сочетание называется точкой максимальной мощности (ТММ), соответствующие напряжение и ток обозначаются  $U_{ТММ}$  и  $I_{ТММ}$ .
- Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента (fill factor,  $FF$ ). Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода - это максимальные ток и напряжение, которые можно получить от солнечного элемента. Однако, при напряжении холостого хода и токе короткого замыкания мощность солнечного элемента равна 0

$$FF = \frac{(U_{ТММ} \cdot I_{ТММ})}{U_{ХХ} \cdot I_{КЗ}}$$

где  $U_{ТММ}$  - напряжение в точке максимальной мощности (ТММ), В;  $I_{ТММ}$  - ток в ТММ, А;  $U_{ХХ}$  - напряжение холостого хода, В;  $I_{КЗ}$  - ток короткого замыкания, А.

Графически коэффициент заполнения представляет собой меру квадратичности солнечного элемента и равен максимальной площади прямоугольника, который можно вписать в вольт-амперную кривую (рисунок 28).

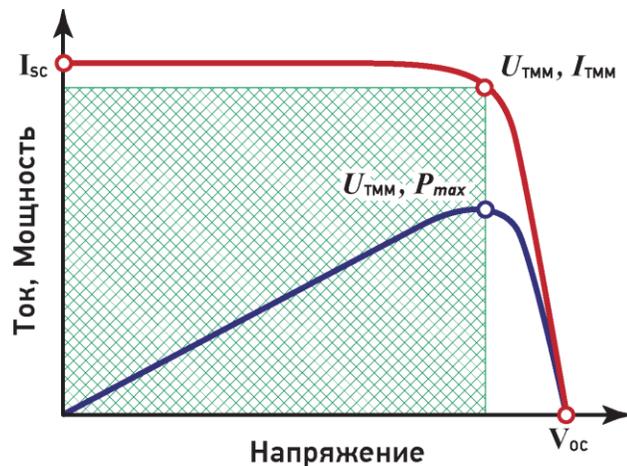


Рисунок 28 - Графическое представление коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента

Так как коэффициент заполнения является мерой квадратичности вольт-амперной кривой, солнечный элемент с более высоким напряжением будет иметь и более высокий возможный коэффициент заполнения, поскольку закругленная часть кривой занимает меньше места.

Коэффициент заполнения ВАХ является одним из основных параметров, по которому можно судить о качестве фотоэлектрического преобразователя. Типичные качественные серийно выпускаемые солнечные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ более 0,7. Бракованные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ от 0,4 до 0,65. У аморфных элементов и других тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей коэффициент заполнения ВАХ 0,4-0,7. Чем больше коэффициент заполнения ВАХ, тем меньше потери в элементе из-за внутреннего сопротивления.

График на рисунке 29 иллюстрирует ВАХ элементов с различным коэффициентом заполнения. Как видно, обе кривые имеют одинаковые значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, однако элемент с меньшим коэффициентом заполнения ВАХ (нижний график) вырабатывает меньше мощности в ТММ.

При изготовлении каждый солнечный элемент тестируется и при этом измеряется его ВАХ и коэффициент заполнения. Если последний меньше 0,7, то элемент классифицируется как Grade B и продается производителям супердешевых панелей, которые должны уведомлять покупателей о низком качестве элементов.

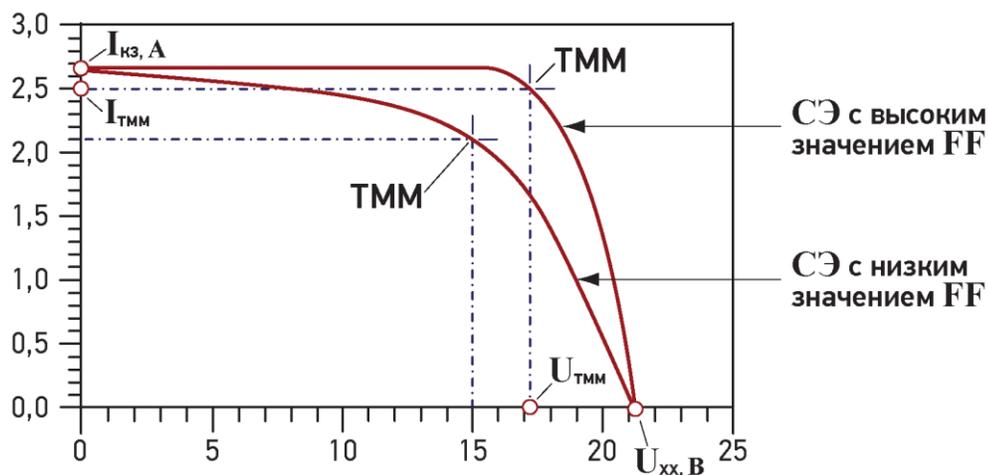


Рисунок 29 Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечных элементов с различным коэффициентом заполнения

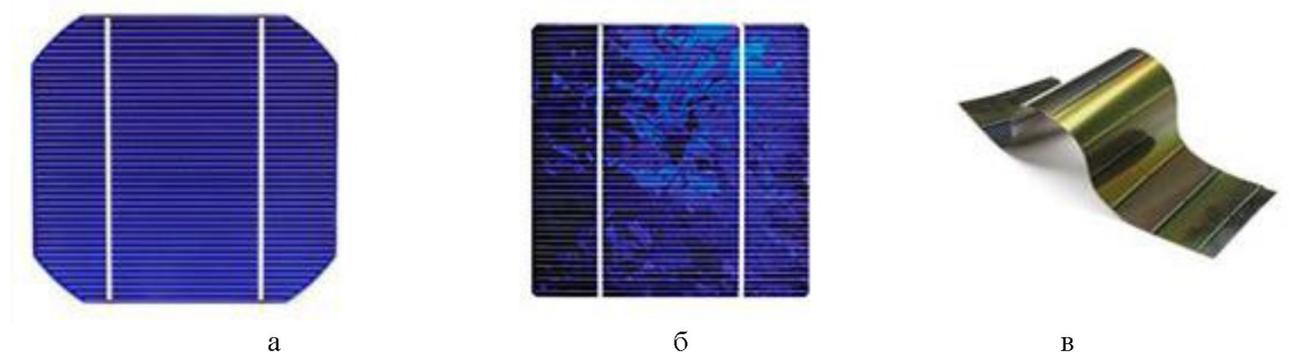
- Коэффициент полезного действия (КПД) является самым распространенным параметром, по которому можно сравнить производительность двух солнечных элементов. Он определяется как отношение мощности, вырабатываемой солнечным элементом, к мощности падающего солнечного излучения. Кроме собственно производительности солнечного элемента, КПД также зависит от спектра и интенсивности падающего солнечного излучения и температуры солнечного элемента. Поэтому для сравнения двух солнечных элементов нужно тщательно выполнять принятые стандартные условия. КПД солнечного элемента определяется как часть падающей энергии, преобразованной в электричество:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{пад}} \cdot 100\%$$

где  $P_{\max}$  - максимальная мощность солнечного элемента, Вт  $P_{\text{пад}}$  - мощность падающего солнечного излучения, Вт.

В настоящее время чаще используются следующие типы солнечных элементов: монокристаллические, поликристаллические и аморфные (тонкопленочные) солнечные элементы (рисунок 30).

Различие между этими типами элементов в том, как организованы атомы кремния в кристалле. Различные СЭ имеют разный КПД преобразования энергии света. Моно- и поликристаллические элементы имеют почти одинаковый КПД, который выше, чем у солнечных элементов, изготовленных из аморфного кремния.



а - монокристаллический; б - поликристаллический; в - аморфный (тонкопленочный)

Рисунок 30 – Типы солнечных элементов

В таблице 1 приведены основные отличия монокристаллических и поликристаллических модулей.

Таблица 1 - Основные отличия монокристаллических и поликристаллических модулей

| Параметр                 | Монокристаллические солнечные элементы   | Поликристаллические солнечные элементы                                 |
|--------------------------|--|--|
| Технология производства  | Монокристаллические цилиндры кремния нарезаются на пластины, затем пластины обрезаются до почти квадратной формы | Поликристаллические заготовки прямоугольной формы режутся на пластины. |
| Температура изготовления | 1400 °С  | 800~1000°С   |
| Форма                    | Прямоугольная, с обрезанными углами (квазипрямоугольные)   | Прямоугольные или квадратные, различной формы                          |
| Толщина                  | < 300 мкм  | 300~500 мкм  |
| Цвет                     | Черный   | Темно-синий  |
| КПД                      | 15-23 %  | 12-17 %  |
| Стабильность параметров  | Высокая стабильность   | Высокая стабильность, но ниже, чем у монокристаллических элементов     |
| Цена                     | Относительно высокая   | Относительно высокая, но ниже, чем у монокристаллических элементов     |
| Окупаемость по энергии   | 2 года   | 2~3 года   |

Тонкопленочные солнечные элементы обычно бывают 4 основных типов:

- из аморфного кремния (a-Si) или тонкопленочного кремния (TF-Si);
- из теллурида кадмия (CdTe);
- из деселенида галлия-меди-индия (CIG или CIGS);
- из синтетических материалов с органическими добавками.

Тонкопленочные солнечные модули состоят примерно из 6 слоев. Прозрачное покрытие закрывает антиотражающий слой, затем идут полупроводники P- и N-типа, затем контактный слой и подложка. Принцип работы тонкопленочных солнечных элементов тот же самый, что и у кристаллических солнечных элементов.

В таблице 2 приведены основные особенности и отличия в применении тонкопленочных и кристаллических фотоэлектрических модулей.

Таблица 2 - Сравнение тонкопленочных и кристаллических фотоэлектрических модулей

| Технология  | Кристаллический кремний  | Тонкопленочные модули   |
|---|--|---|
| 1   | 2  | 3   |
| Разновидности технологии  | Монокристаллический кремний (с-Si)<br>Поликристаллический кремний (pc-Si / mc-Si)                    | Аморфный кремний (a-Si)<br>Теллурид кадмия (CdTe)<br>Деселенид галлия-меди-индия (CIG / CIGS)<br>Органические фотоэлементы (OPV / DSC / DYSC)   |
| Отношение напряжения в рабочей точке к напряжению холостого хода ( $V_{mp} / V_{oc}$ )<br>(выше - лучше, т. к. меньше разница между $V_{oc}$ и $V_{mp}$ ) | 80-85 %  | 72-78 %   |
| Температурные коэффициенты (низкий температурный коэффициент лучше при работе при высоких температурах окружающей среды)                                  | Выше (-0,4-0,5 %/градус)   | Ниже (-0,1-0,2 %/градус)  |
| Заполнение вольтамперной характеристики (идеальный элемент имеет 100 % заполнение)  | 73-82 %  | 60-68 %   |
| Конструкция модуля  | В раме из анодированного алюминия  | Без рамы, между 2 стеклами – цена ниже, вес больше на гибком основании - легче, дешевле   |
| КПД модуля  | 13-19 %  | 4-12 %  |
| Совместимость с инверторами   | Чем меньше температурный коэффициент, тем лучше.<br>Можно использовать бестрансформаторные инверторы | Проектировщик должен учитывать такие факторы, как температурный коэффициент, отношение $V_{oc} / V_{mp}$ , сопротивление изоляции и т. п. Обычно для тонкопленочных модулей требуется инвертор с гальванической развязкой |
| Монтажные конструкции   | Типовые  | Типовые, но могут потребоваться специальные зажимы или крепеж. Во многих случаях стоимость установки намного меньше   |
| Соединения постоянного тока   | Типовые  | Типовые, иногда может потребоваться больше разветвителей и предохранителей  |

| 1                          | 2  | 3   |
|----------------------------|--|---|
| Типовое применение         | Жилые дома<br>Коммерческие объекты<br>Генерация в сеть   | Жилые дома<br>Коммерческие объекты<br>Генерация в сеть  |
| Требуемая площадь          | около 150 Вт/м <sup>2</sup>  | Может потребоваться до 50 % больше площади для той же мощности солнечной батареи  |
| Себестоимость производства | Себестоимость производства зависит от цен на сырье - поликремний                                   | При производстве используется в 200 раз меньше кремния, что обеспечивает значительное снижение себестоимости производства         |
| Восприятие света           | Восприятие только прямого света, необходимость установки дополнительных систем слежения за солнцем | Лучшее восприятие рассеянного света, меньший температурный коэффициент (меньшее снижение эффективности при повышении температуры) |
| Развитие технологии        | Технология с ограниченным потенциалом развития   | Новая технология с перспективой развития (повышение КПД, уменьшение себестоимости, применение в строительстве и архитектуре)      |
| Сегмент потребителей       | Генерирующие компании, крупные и бытовые потребители   | Генерирующие компании, девелоперы, крупные и бытовые потребители  |

Как видно из таблицы 2, основное отличие кристаллических и тонкопленочных элементов - в их КПД. Также у кристаллических элементов дольше срок службы. Расходы на установку кристаллических модулей меньше, так как для одной и той же мощности нужно устанавливать примерно в 2 раза меньше по площади модулей. К недостаткам кристаллических модулей можно отнести высокую стоимость исходного материала (кристаллического кремния), его хрупкость.

В настоящее время стоимость поликристаллических модулей примерно на 15-20 % ниже, чем стоимость монокристаллических. Даже, несмотря на то, что монокристаллы более стабильны на протяжении срока службы модуля, более низкая стоимость поликристалла может стать определяющим фактором при принятии решения о покупке солнечной панели.

Последние технологии используют гибридные методы. Так, появились элементы, которые имеют как кристаллический переход, так и тонкий полупрозрачный аморфный переход, расположенный над кристаллическим. Так как кристаллы и аморфный кремний наиболее эффективно преобразуют только часть спектра света, и эти спектры немного отличаются, применение таких гибридных элементов позволяет повысить общий КПД солнечного элемента.

**Фотозлектрический солнечный модуль (батарея)** - это батарея взаимосвязанных солнечных элементов, заключенных под стеклянной крышкой.

Солнечные батареи бывают различного размера: от встраиваемых в микрокалькуляторы до занимающих крыши автомобилей и зданий. Солнечные батареи сохраняют работоспособность при:

- диапазоне температур от -50 до +75 °С;
- атмосферном давлении 84-106,7 кПа;
- относительной влажности до 100 %;

- интенсивности дождя до 5 мм/мин.;
- снеговой, ветровой нагрузке до 2000 Па.

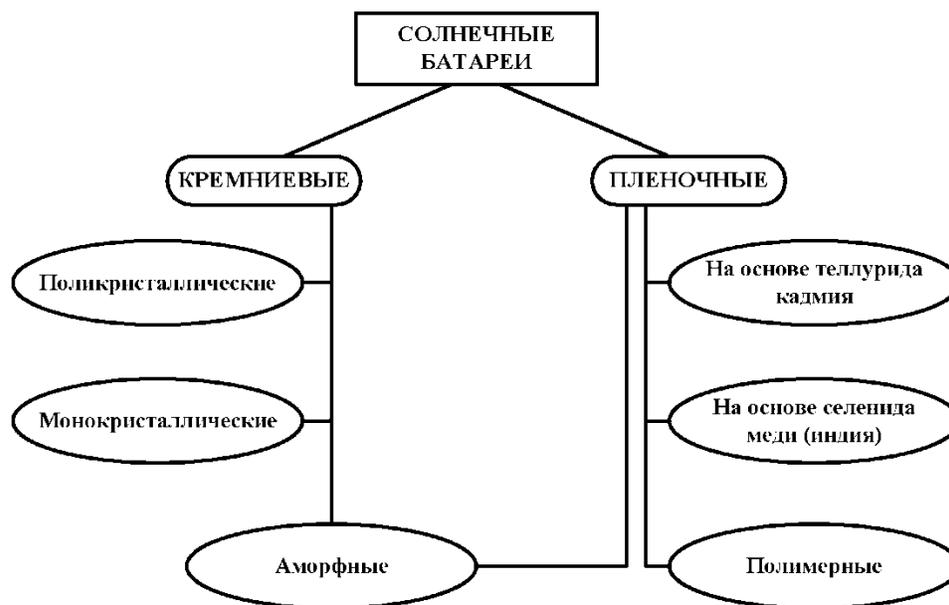


Рисунок 31 – Классификация солнечных батарей

Если проводить классификацию (рисунок 31) в зависимости от используемого материала, то аморфные батареи можно относить к кремниевым, а если в зависимости от технологии производства - к пленочным.

Для того чтобы выбрать подходящие солнечные батареи, необходимо знать их точные характеристики.

1. Солнечные батареи *на основе кремния*. Батареи, основой которым служит кремний, на сегодняшний день являются наиболее популярными. Объясняется это широким распространением кремния в земной коре, его относительной дешевизной и высоким показателем производительности, в сравнении с другими видами солнечных батарей. Кремниевые батареи производят из моно- и поликристаллов кремния (Si) и аморфного кремния.

*Монокристаллические* солнечные батареи представляют собой силиконовые ячейки, объединенные между собой. Для их изготовления используют максимально чистый кремний, получаемый по методу Чохральского. (Метод Чохральского - метод выращивания монокристаллов путём вытягивания их вверх от свободной поверхности большого объёма расплава с инициацией начала кристаллизации путём приведения затравочного кристалла (или нескольких кристаллов) заданной структуры и кристаллографической ориентации в контакт со свободной поверхностью расплава). После затвердевания готовый монокристалл разрезают на тонкие пластины толщиной 250-300 мкм, которые пронизывают сеткой из металлических электродов. Используемая технология является сравнительно дорогостоящей, поэтому и стоят монокристаллические батареи дороже, чем поликристаллические или аморфные. Выбирают данный вид солнечных батарей из-за высокого показателя КПД (порядка 17-22 %).

Для получения *поликристаллов* кремниевый расплав подвергается медленному охлаждению. Данная технология требует меньших энергозатрат, следовательно, и

себестоимость кремния, полученного с ее помощью, меньше. Единственный минус: поликристаллические солнечные батареи имеют более низкий КПД (12-18 %). Причина заключается в том, что внутри поликристалла образуются области с зернистыми границами, которые и приводят к уменьшению эффективности элементов.

В таблице 3 приведены основные различия между моно- и полисолнечными элементами.

Таблица 3 - Основные различия между моно- и полисолнечными элементами

| Показатель                | Моноэлементы  | Полиэлементы   |
|---------------------------|---|--|
| 1                         | 2   | 3  |
| Кристаллическая структура | Зерна кристалла параллельны. Кристаллы ориентированы в одну сторону | Зерна кристалла не параллельны. Кристаллы ориентированы в разные стороны |
| Температура производства  | 1400 °С   | 800-1000 °С  |
| Цвет                      | Черный  | Темно-синий  |
| Стабильность              | Высокая   | Высокая, но меньше, чем у моноэлементов                                  |
| Цена                      | Высокая   | Высокая, но меньше, чем у моноэлементов                                  |
| Период окупаемости        | 2 года  | 2-3 года   |

2. В случае изготовления панелей из *аморфного кремния*, используется не кристаллический кремний, а силан, или кремневодород, который тонким слоем наносится на материал подложки. КПД таких батарей составляет всего 5-6 %, у них очень низкий показатель эффективности, но они имеют и ряд достоинств:

- Показатель оптического поглощения в 20 раз выше, чем у поли- и монокристаллов.
- Толщина элементов меньше 1 мкм.
- Имеет более высокую производительность при пасмурной погоде.
- Повышенная гибкость.

3. Батареи *на основе теллурида кадмия*. Сегодня батареи на основе теллурида кадмия являются одними из самых перспективных в солнечной энергетике. Так как кадмий является кумулятивным ядом, то возникает вопрос: он токсичен или нет? Исследования показывают,

что уровень кадмия, высвобождаемого в атмосферу, ничтожно мал. Значение КПД составляет порядка 11 %. Стоимость ватта мощности таких батарей на 20-30 % меньше, чем у кремниевых.

4. Батареи *на основе селенида меди-индия*. В качестве полупроводников используются медь, индий и селен, иногда некоторые элементы индия замещают галлием. Такая практика объясняется тем, что большая часть производящегося на сегодня индия требуется для производства плоских мониторов. Именно поэтому с целью экономии индий замещают на галлий, который обладает схожими свойствами. Пленочные солнечные батареи на основе селенида меди-индия имеют КПД, равный 15-20 %. Следует иметь в виду, что без использования галлия эффективность солнечных батарей возрастает примерно на 14 %.

5. Батареи *на основе полимеров*. В качестве светопоглощающих материалов используются органические полупроводники, такие как полифенилен, углеродные фуллерены, фталоцианин меди и другие. Толщина пленок составляет 100 нм.

Полимерные солнечные батареи имеют на сегодняшний день КПД всего 5-6 %. Однако при этом имеют ряд достоинств:

- низкая стоимость производства;
- легкость и доступность;
- отсутствие вредного воздействия на окружающую среду.

Применяются полимерные батареи в областях, где наибольшее значение имеет механическая эластичность и экологичность утилизации.

Помимо описанных выше видов кремниевых солнечных батарей, существуют и их гибриды. Так для большей стабильности элементов используют двухфазный материал, представляющий собой аморфный кремний с включениями нано- или микрокристаллов. По свойствам полученный материал сходен с поликристаллическим кремнием.

В таблице 4 приведены обобщенные данные о КПД разных видов солнечных батарей.

Таблица 4 - КПД разных видов солнечных батарей

| КПД солнечных батарей, выпускаемых в производственных масштабах | КПД     |
|---|---------|
| Монокристаллические   | 17-22 % |
| Поликристаллические   | 12-18 % |
| Аморфные (из аморфного кремния)                                 | 5-6 %   |
| На основе теллурида кадмия                                      | 10-12 % |
| На основе селенида меди-индия                                   | 15-20 % |
| На основе полимеров   | 5-6 %   |