

ПРООН/ГЭФ
Проект №00077154

«Повышение энергетической эффективности жилых зданий
в Республике Беларусь»

**Проектирование энергоэффективных зданий.
Энергообеспечение инженерных систем и мест общего пользования
солнечными фотоэлектрическими панелями**

Исполнитель,

Эксперт по вопросам внедрения
солнечных батарей в системах
энергообеспечения в жилом секторе

А.Б. Дюсьмикеев

г. Минск
февраль 2016 г.

Оглавление

Введение.....	3
1. Солнечные фотоэлектрические технологии	5
1.1 Сетевые СЭС	5
1.2 Гибридные СЭС (или автономные, соединённые с сетью).....	6
2. Состав оборудования фотоэлектрической станции	7
2.1 Инверторы	8
2.2 Система мониторинга.....	10
2.3 Аккумуляторные батареи	12
3. Солнечные модули. Первое поколение	15
3.1 Монокристаллический кремний	16
3.2 Поликристаллический кремний	18
3.3 Параметры солнечного модуля	21
4. Солнечные модули. Второе поколение	24
4.1 Фотоэлементы из аморфного кремния.....	24
4.2 - Фотоэлементы на основе кристаллических плёнок CdTe.....	26
4.3 Фотоэлементы на основе кристаллических плёнок Cu(In, Ga)Se ₂ (CIGS).....	27
4.4 Фотоэлементы на основе кристаллических плёнок III-V групп.....	28
4.5 Арсенид-галлиевые	29
4.6 Фосфид индия	30
5. Солнечные модули. Третье поколение	32
5.1 Фотоэлементы на основе органических материалов	32
5.2 Фотоэлементы на красителях	33
5.3 Квантовые точки.....	34

Введение

Источником энергии солнечного излучения являются термоядерные реакции, протекающие на Солнце. Поток мощности, излучаемый Солнцем в окружающее пространство, составляет $0,4 \cdot 10^{18}$ ГВт. Поток солнечной радиации, достигающей Земли через расстояние в 150 млн. километров, снижается до $0,12 \cdot 10^9$ ГВт, но все равно значительно превышает ресурсы всех других источников энергии, которыми мы располагаем на нашей планете. В настоящее время установленная мощность всех солнечных станций на планете уже приближается к $0,2 \cdot 10^3$ ГВт. Суммарная мощность фотоэлектрических преобразователей (PV-панелей), которые ежегодно производятся в мире, достигла 40 ГВт.

Солнечная энергетика все больше внедряется в различных отраслях экономики и используется различными потребителями, включая жилой сектор. За последние десять лет стоимость PV-панелей сократилась в четыре раза, и солнечная энергия становится доступной для ее использования в этом секторе. В ряде стран, например, в США, на долю энергообеспечения жилых зданий приходится уже более 20% всех установленных в стране солнечных панелей.

На сегодняшний день использование солнечной энергии в жилом секторе пока не предполагает замену традиционных источников энергии, а лишь позволяет получить экономию энергии на привод электрических устройств и приборов общего пользования. На реализацию этой возможности ориентируется проект ПРООН-ГЭФ «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь». Настоящее пособие представляет собой учебный материал в качестве раздела курса лекций «Проектирование энергоэффективных зданий», который предлагается проектом ПРООН-ГЭФ для включения в учебные программы профильных вузов.

В издании представлены базовые материалы, которые необходимы для проектирования солнечных электростанций (далее СЭС) для целей энергообеспечения жилых зданий. Рассматриваются СЭС только с фотоэлектрическим преобразованием (photovoltaic, фотовольтаик). Даны определения типов и состав СЭС различного типа, описание фотоэлектрических солнечных модулей, как основы для построения эффективных СЭС. Вопросы размещения, монтажа и установки, разновидности металлических конструкций и систем для монтажа СЭС будут рассмотрены в следующем пособии, которое будет представлять собой раздел еще одного курса лекций «Проектирование строительных конструкций с учетом энергоэффективных инженерных систем», также подготавливаемого проектом ПРООН-ГЭФ.

Предлагаемое пособие основано на технических отчетах, справочниках и руководствах, подготовленных проектом ПРООН-ГЭФ (<http://www.effbuild.by/>), и предназначено для повышения квалификации специалистов по проектированию и строительству в области промышленного и гражданского строительства, а также студентов электротехнических, энергетических, проектных и строительных специальностей.

1. Солнечные фотоэлектрические технологии

Существует четыре основных типа солнечных электростанций:

1) Автономные домашние станции – обеспечение электроэнергией домашних хозяйств и деревень, которые не подключены к промышленной системе электроснабжения ("Off-grid").

2) Автономные промышленные станции – электроснабжение для широкого круга потребителей, таких как телекоммуникационные станции, откачка воды и навигационные средства.

3) Местные сетевые станции – обеспечение электроэнергией конкретного, подключенного к сети, потребителя ("On-grid").

4) Промышленные сетевые станции – обеспечение электроэнергией больших групп потребителей, таких как поселки, города, заводы и др.

1.1 Сетевые СЭС

Простейшая схема сетевой солнечной электростанции (и простейшей СЭС вообще) представлена на рис. 1.1.

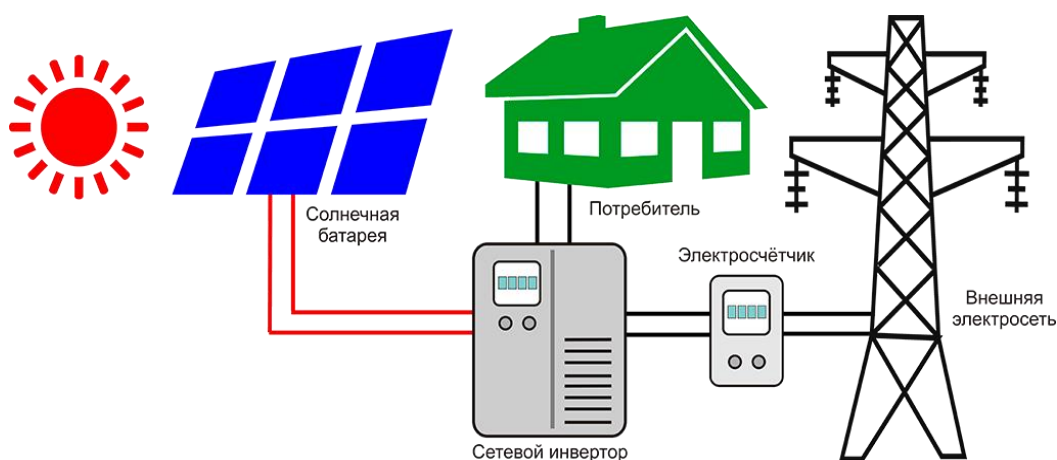


Рисунок 1.1 — Схема сетевой солнечной электростанции;

Для нормальной её работы необходимо подключение к внешней электросети. Наличие и качество внешней электросети (помимо солнца) имеет критическое значение для работы СЭС. При её отсутствии, или несоответствии нормам такая СЭС становится бесполезной даже в самую солнечную и безоблачную погоду. Эта зависимость от центрального электроснабжения является главным недостатком таких СЭС.

К достоинствам следует отнести относительную, но существенную дешёвость СЭС и более высокий общий КПД системы по сравнению с

другими типами СЭС. Эти два качества делают этот тип СЭС несомненно более привлекательным для выработки электроэнергии для её продажи по т.н. «зелёному тарифу».

1.2 Гибридные СЭС (или автономные, соединённые с сетью)

Представляет собой базовую схему сетевой СЭС с добавлением банка аккумуляторных батарей (АКБ), контроллера заряда и заменой сетевого инвертора на гибридный. Отличительной особенностью является возможность запастись частью выработанной в солнечный период электроэнергии в АКБ (рис. 1.2).

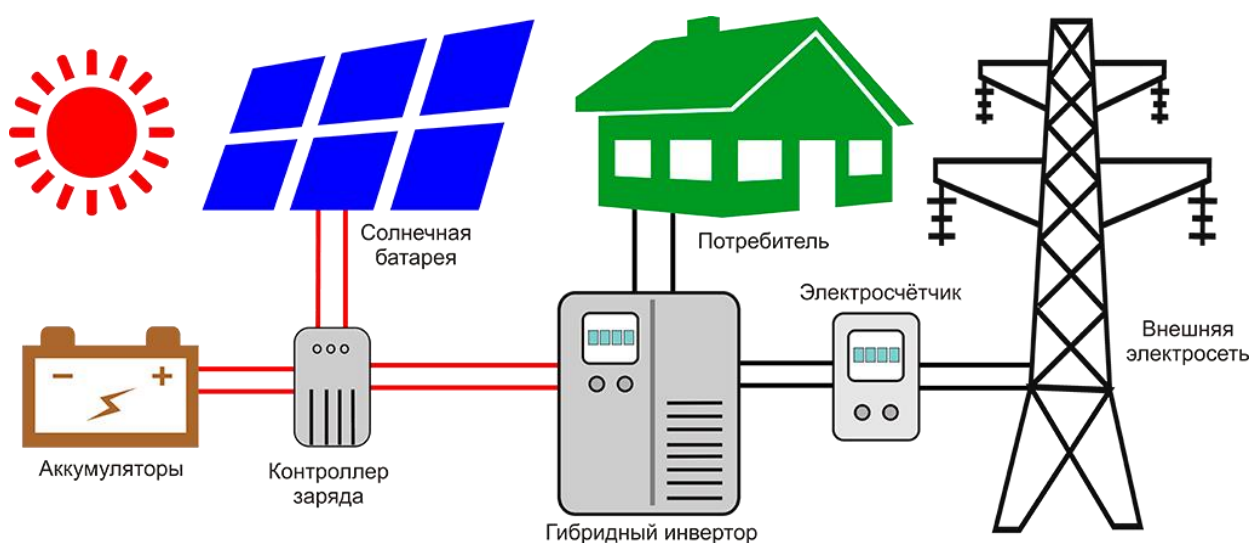


Рисунок 1.2 — Схема автономной, соединённой с сетью (гибридной) СЭС;

Благодаря наличию банка АКБ они менее зависимы от источника центрального электроснабжения. Такие СЭС применяют преимущественно как часть системы бесперебойного питания там, где центральное электроснабжение недостаточно или нестабильно.

К недостаткам следует отнести высокую цену системы, за счёт банка АКБ и мощности инвертора, которые должны быть тем больше, чем больше требуется времени бесперебойной работы и подключаемых нагрузок соответственно.

2. Состав оборудования фотоэлектрической станции

В состав сетевой фотоэлектрической системы входят следующие элементы (рис. 2.1):

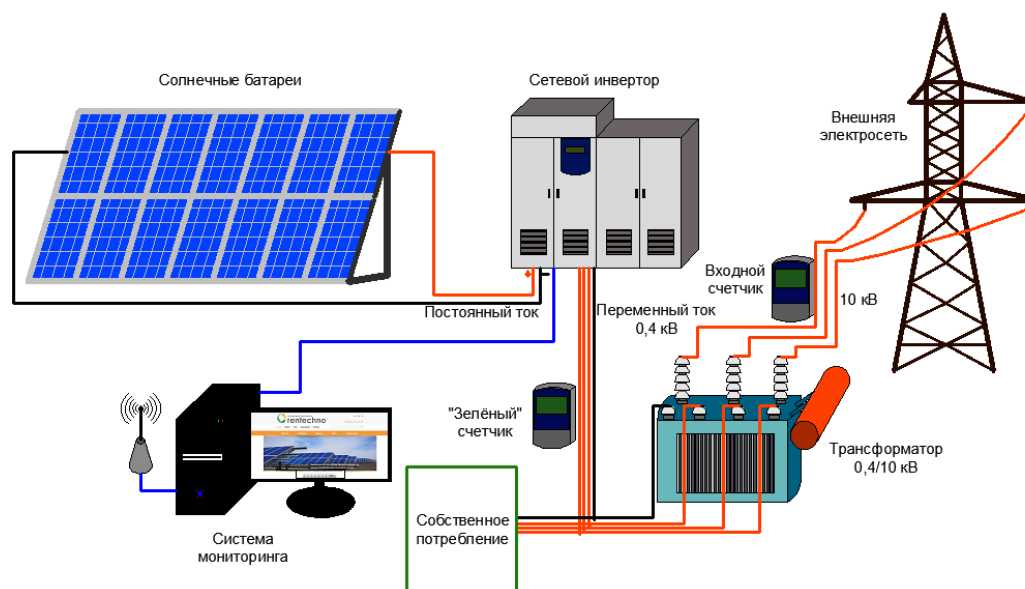


Рисунок 2.1 – Структурная схема типовой сетевой солнечной электростанции

- солнечные панели, вырабатывающие под действием солнечного излучения постоянный ток;
- сетевые инверторы, преобразующие постоянный ток (DC), генерируемый солнечными панелями, в переменный (AC);
- система мониторинга, позволяющая отслеживать параметры работы солнечной электростанции;
- счетчики, предназначенные для контроля производительности системы и продажи электроэнергии по "зеленому" тарифу и коммуникационное оборудование в виде АСКУЭ;
- опорные металлоконструкции и элементы крепления для размещения солнечных панелей на земельном участке, крыше здания и т.п. или подвижные поворотные трекеры;
- централизованная сеть - линия электропередач, к которой подсоединена электростанция;
- трансформаторы;
- собственные потребители электроэнергии (промышленные или бытовые электроприборы).

Возможные варианты дополнительной комплектации сетевых солнечных станций: (1) установка аккумуляторных батарей для питания резервированной нагрузки потребителя в случае отключения внешней электросети; (2) установка системы контроля недопустимости перетоков электроэнергии, генерируемой солнечной электростанцией, в общую сеть; (3) трекерная система слежения за Солнцем, которая позволяет удерживать солнечные модули в оптимальном положении относительно Солнца, максимально используя всю доступную солнечную энергию; (4) системы мониторинга, дистанционной диагностики, хранения данных и визуализации, в режиме реального времени отображающие полную информацию и сохраняющие данные о работе и состоянии системы.

2.1 Инверторы

Инвертор (DC/AC converter) — устройство для преобразования постоянного тока в переменный с изменением величины частоты и/или напряжения. Обычно представляет собой генератор периодического напряжения, по форме приближённого к синусоиде, или дискретного сигнала. Инверторы напряжения могут применяться в виде отдельного устройства или входить в состав источников и систем бесперебойного питания аппаратуры электрической энергией переменного тока.

Солнечный генератор (каким бы сложным и большим он не был) может вырабатывать лишь постоянный ток. К счастью, имеется много потребителей, использующих именно постоянный ток (зарядка аккумуляторов, освещение, радиоаппаратура и т.д.), но потребителей переменного напряжения 220 В не меньше. Для преобразования постоянного тока аккумуляторной батареи в переменный синусоидальной формы, нужен инвертор.

Инверторы - полупроводниковые приборы. Они могут быть поделены на два типа в соответствии с типом фотоэлектрических систем:

- инверторы для автономных систем солнечных панелей;
- инверторы для сетевого использования.

Выходной каскад у обоих типов во многом похож, а основное отличие в схеме управления. Первый тип имеет генератор частоты, а второй должен работать синхронно с промышленной сетью (и в качестве генератора частоты использует саму сеть).

Для всех типов инверторов ключевой параметр - КПД (который должен быть более 90%). Выходное напряжение автономных инверторов, как правило,

составляет 220 В (50/60 Гц), а в инверторах мощностью 10-100 кВт можно получать трехфазное напряжение 380 В. Все автономные инверторы трансформируют постоянный ток аккумуляторных батарей. Вследствие этого входное напряжение выбирается из ряда 12, 24, 48 и 120 В. Чем больше входное напряжение, тем проще инвертор и тем выше его КПД. При больших напряжениях существенно меньше потери на передачу энергии от солнечного генератора к аккумуляторной батарее, регулятору зарядки и инвертору, однако при этом усложняется конструкция солнечной электростанции и ее эксплуатация при опасных напряжениях (выше 40 В).

К форме выходного сигнала автономных инверторов предъявляются менее жесткие требования. В ряде случаев (если позволяет нагрузка) возможно использование инверторов с трапециевидным выходным сигналом. Такие инверторы стоят в 2-3 раза дешевле инверторов с синусоидальным выходным сигналом. Важный параметр автономных инверторов - зависимость КПД от мощности подключенной нагрузки. КПД не должен значительно снижаться при подключении нагрузки в десять раз меньшей (по потребляемой мощности), чем номинальная мощность инвертора. Вместе с тем инвертор должен выдерживать перегрузки в выходных цепях (при подключении электродвигателей и прочих динамичных нагрузок). Таким образом, к автономному инвертору предъявляются следующие требования:

- способность переносить перегрузки без последствий;
- маленькие потери при малых нагрузках и на холостом ходу;
- стабилизация выходного напряжения;
- низкий коэффициент гармоник;
- высокий КПД;
- отсутствие помех на радиочастотах.

Многие компании предлагают широкий ассортимент инверторов, специально разработанных для солнечных панелей. Такие инверторы уже имеют блок регулятора отбора максимальной мощности, блок регулятора заряда, а также дополнительный вход подключения дизель-генератора (для экстренной подзарядки аккумуляторной батареи).

К выходному сигналу сетевых инверторов предъявляются наиболее жесткие требования. Для понижения потерь на преобразование такие инверторы работают при высоких входных напряжениях. Поскольку их входные цепи запитываются напрямую от солнечной панели, инверторы имеют регулятор отбора максимальной мощности (встроенный в инвертор). Сетевые инверторы имеют также блок контроля мощности солнечной панели (и

включаются автоматически, как только мощность солнечной панели становится достаточной для формирования переменного сигнала).

2.2 Система мониторинга

Энергоэффективность СЭС зависит от степени надежности, экономичности эксплуатации и оптимизации работы всех компонентов системы. Для этого необходим непрерывный мониторинг эффективности работы оборудования, который позволяет своевременно обнаружить нарушения в работе солнечных панелей и других компонентов системы, а также контролировать доступ к отдельным модулям.

Солнечная установка состоит из модулей, регистрирующих сигналы датчиков тока, напряжения и температуры отдельных солнечных панелей, а также датчиков скорости ветра, положения Солнца, дверных датчиков или датчиков несанкционированного доступа к сетевым инверторам. Модули, рассчитанные на установку на DIN-рейку, в зависимости от их количества и других требований, встраиваются в соединительные коробки или в шкафы управления. Системные модули соединены с локальным контроллером, который, в свою очередь, связан с контроллером более высокого уровня по шине Modbus RS485 или CAN. Модульное построение обеспечивает высокую гибкость конфигурации и расширения системы. Благодаря этому модули подходят для применения как в солнечных парках, так и в небольших (мини) электростанциях. Пример работы системы мониторинга демонстрируется на рис. 2.2.

Система может регистрировать, например, затенения. Тень от трубы, которая регистрируется системой примерно в 11:00, показывает, что у одной ветви панелей наблюдается падение производительности (рис. 2.3). На производительность может влиять и перегрев панелей и отсутствия ветра. Из рис. 2.4 видно, что в 14:00-16:00 панели не работают с максимальной эффективностью. Об этом свидетельствует кривая солнечной радиации (зеленая). Возможная причина – недостаточная вентиляция между панелями и крышей. Повреждение панелей также может регистрироваться системой мониторинга. Это демонстрирует рис. 2.5, из которого видно, что после 13:00 одна ветвь панелей перестала работать. Причина – выход из строя одной соединительной коробки панели, что создает большие потери энергии. Инверторы также могут работать неэффективно из-за возможных неисправностей. На рис. 2.6 можно наблюдать работу СЭС с двумя инверторами, один из которых поврежден.

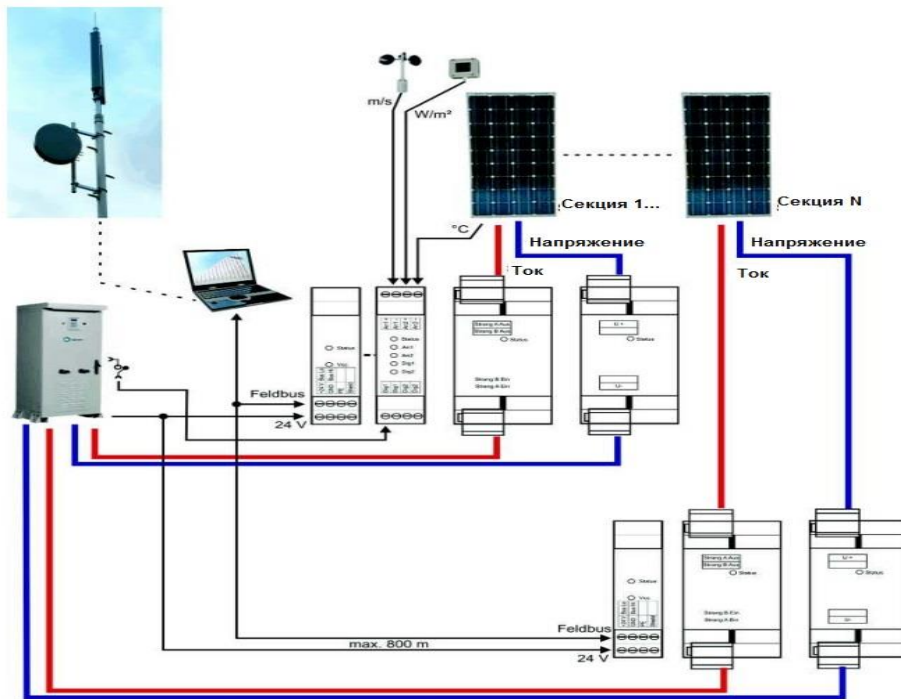


Рисунок 2.2 — Пример работы системы мониторинга



Рисунок 2.3 – Затененность панели

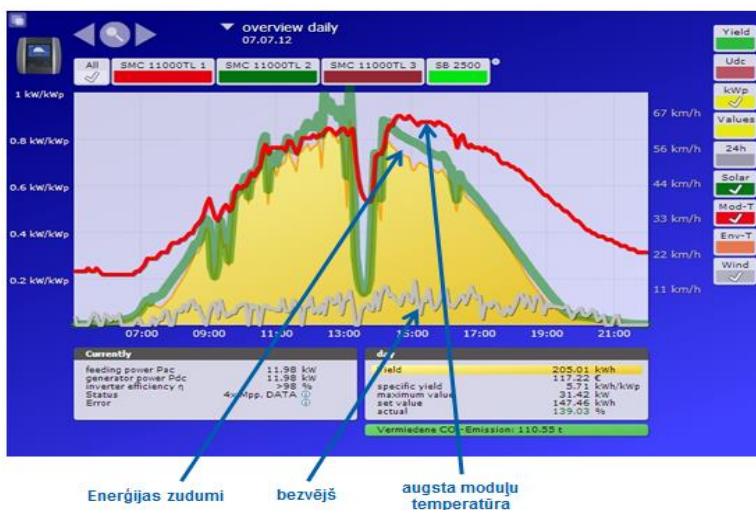


Рисунок 2.4 – Эффект перегрева панели

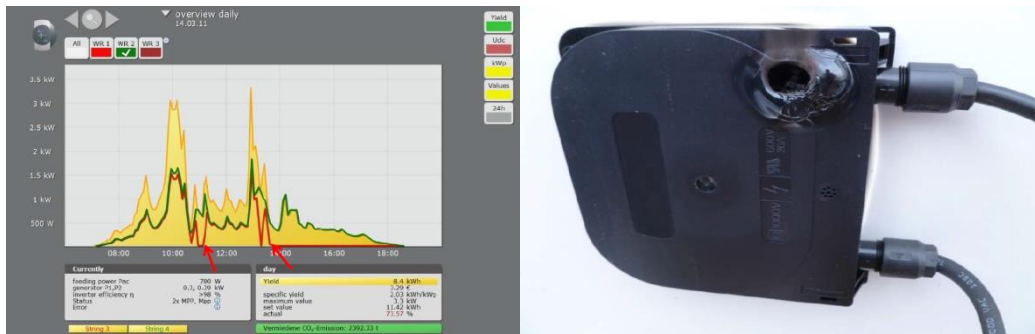


Рисунок 2.5 – Эффект повреждения соединительной коробки



Рисунок 2.6 – Работа СЭС с двумя инверторами, один из которых поврежден

2.3 Аккумуляторные батареи

Выработанную солнечной панелью энергию можно сохранять в разных формах:

- химическая энергия в электрохимических аккумуляторах;
- потенциальная энергия воды в резервуарах;
- тепловая энергия в тепловых аккумуляторах;
- кинетическая энергия вращающихся масс или сжатого воздуха.

Для солнечных панелей больше подходят электро-аккумуляторы, так как солнечные панели производят, а потребитель потребляет электроэнергию, которая непосредственно и запасается в аккумуляторе. Исключение - солнечные станции для водоснабжения, где потребляется вода, а энергия запасается в потенциальной энергии воды в водонапорной башне.

В большинстве фотоэлектрических систем применяют свинцово-кислотные аккумуляторы. Нужно сразу подчеркнуть, что аккумуляторы, специально предназначенные для солнечных панелей (и других подобных систем), существенно отличаются от стартерных автомобильных аккумуляторов, пусть даже имеющих в основе ту же технологию.

Главными условиями по выбору аккумуляторов являются:

- стойкость к циклическому режиму работы;
- способность переносить без последствий глубокий разряд;
- низкий саморазряд аккумулятора;
- нечувствительность к нарушению условий зарядки и разрядки;
- долговечность;
- простота в обслуживании;
- компактность и герметичность (важный критерий для переносных или периодически демонтируемых солнечных панелей).

Этим требованиям в полной мере удовлетворяют аккумуляторы, изготовленные по технологиям "dryfit" и AGM (адсорбированный электролит) или рекомбинационной технологии. Они характеризуются отсутствием эксплуатационных затрат и перекрывают диапазон емкостей 1-12000 А-ч, что позволяет удовлетворять требованиям всех потребителей. Эти аккумуляторы отличаются пониженным газовыделением и рекомбинацией кислорода. Вследствие этого вода электролита не электролизуется и не испаряется, и такие аккумуляторы не требуют доливки электролита.

К примеру, аккумуляторы одной из фирм с трубчатыми положительными пластинами, имеют следующие характеристики:

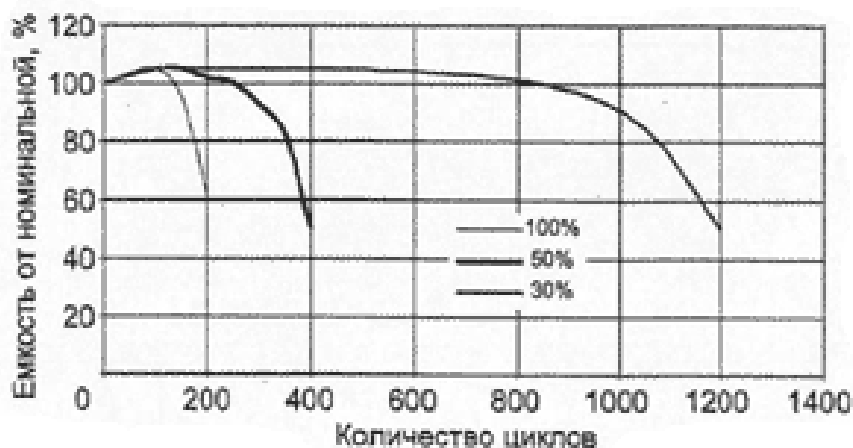
- большой срок службы – 15 лет;
- стойкость к циклическому режиму – более 1200 циклов;
- отсутствие необходимости обслуживания в течение всего срока службы;
- минимальное газовыделение (благодаря применению сплава без сурьмы и использованию технологии внутренней рекомбинации газа);
- саморазряд – примерно 3% в месяц.

Вследствие высокой стоимости таких аккумуляторов, появляется желание использовать обычные стартерные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (автомобильный аккумулятор). Срок службы таких аккумуляторов в составе солнечной электростанции – не более 3-5 лет. Вследствие этого за срок использования солнечной панели (15-20 лет и более) необходимо будет

менять аккумуляторы (к этому добавятся затраты на обслуживание аккумуляторов и оборудование помещений).

Ради продления срока службы аккумуляторов при циклическом режиме работы в солнечных панелях важно не допускать глубокого разряда. Уровень разряда характеризуется глубиной разряда, которая выражается в процентах от номинальной емкости аккумулятора. На рисунке 5 изображена зависимость емкости аккумулятора (в процентах от номинальной) от количества отработанных циклов при различной глубине разряда (аккумуляторы FIAMM GS). Таким образом, эксплуатация аккумуляторов при глубоком разряде ведет к их более частой замене и, соответственно, к удорожанию системы. Глубину разряда аккумуляторов солнечных панелей стараются ограничить на уровне 30-40%, что достигается отключением нагрузки (или снижением мощности) либо использованием аккумуляторов большей емкости.

Зависимость емкости аккумулятора от количества отработанных циклов при различной глубине разряда:



2.7 – Зависимость емкости аккумулятора от количества отработанных циклов при различной глубине разряда

Вследствие этого, для управления процессом зарядки и выбора оптимального режима, в состав солнечной электростанции обязательно включают контроллеры зарядки-разрядки аккумуляторной батареи.

3. Солнечные модули. Первое поколение

Образ кремниевого фотоэлемента это первое что приходит на ум большинству людей при упоминании слова солнечная панель. Это объясняется тем, что несколько лет назад кремний, как сырье для фотоэлектрической индустрии, составлял почти 100% рынка. Сегодня ситуация значительно изменилась. Кремний, как строительный блок солнечной панели все больше уступает место на рынке новым технологиям, называемым «тонкопленочные солнечные ячейки». В данной технологии фотоэлементы изготавливаются из очень тонкого слоя полупроводника. Есть более прогрессивные технологии, полностью лишенные классических полупроводников. Чтобы классифицировать эти технологии ввели понятие поколения фотоэлементов.

Первое поколение фотоэлементов (ФЭ) – это классические кремниевые элементы с традиционным p-n переходом, которые большинство из нас подразумевает под словом солнечные фотоэлементы. Как правило, это пластины из чистого монокристаллического или поликристаллического кремния толщиной 200-300 мкм. Они характеризуются высоким КПД (17-22%) и высокой себестоимостью. Срок их службы около 20 лет.

Элементы первого поколения имеют относительно толстый слой (как правило, монокристаллический) кремния, который укладывается поверх металлической основы (базовый контакт). Две стороны полупроводников присадочные, это значит, что к кремнию добавлены примеси в виде других химических элементов – с одной стороны полупроводник обогащается электронами (n-типа), путем добавления химического элемента с более высоким количеством электронов (как правило, фосфор) к кремнию, и элемент с малым количеством электронов (как правило, бор) к другой стороне (p-тип). Легирование проводится для улучшения проводящих свойств полупроводника путем создания так называемого p-n-перехода, где создается электрическое поле. Антиотражающее покрытие и очень тонкая металлическая сетка укладываются поверх p-n-перехода, к которому присоединяется провод, замыкающий цепь.

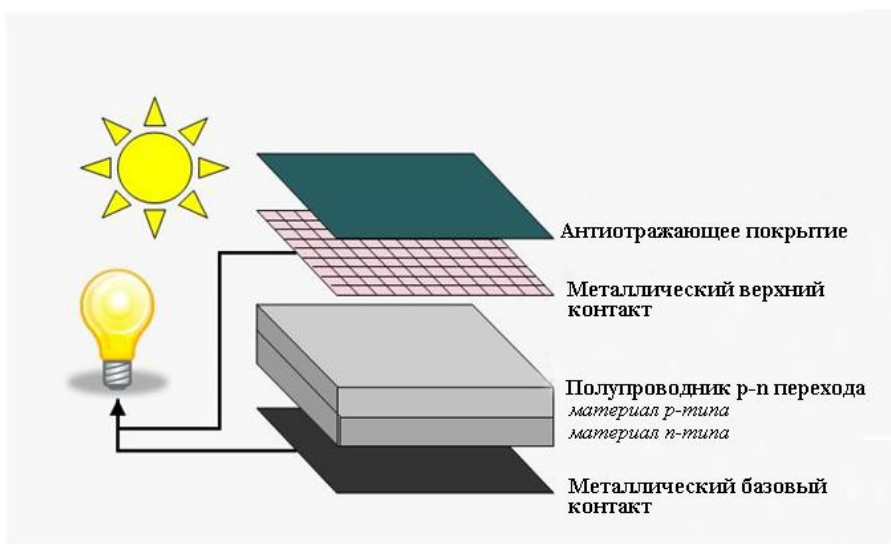


Рисунок 3.1 – Схема модуля первого поколения

Солнечные панели на основе кремния составляют на сегодняшний день порядка 90% всех выпускаемых солнечных панелей. Кремний – один из самых распространенных элементов земной коры и составляет по разным данным 27-29% по массе. Таким образом, нет никаких физических ограничений для производства значительной доли электроэнергии Земли с имеющимися запасами Si.

3.1 Монокристаллический кремний

Большинство ФЭ делают из кремниевых подложек, которые могут быть либо монокристаллическими, либо мульти-кристаллическими. Обычно монокристаллические подложки имеют лучшие характеристики, но и более высокую стоимость. Кристаллический кремний имеет упорядоченную кристаллическую структуру, в которой каждый атом находится в точно определенном месте. Поведение кристаллического кремния хорошо предсказуемо, однако, из-за медленности и сложности процесса производства он является самым дорогостоящим видом кремния.

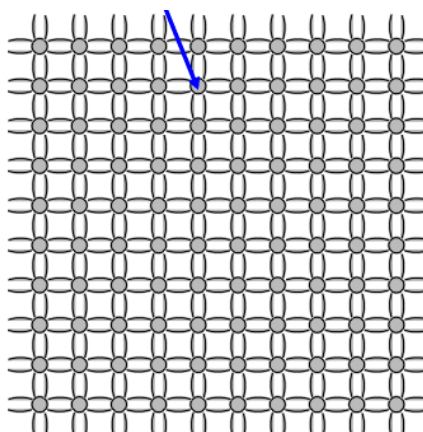


Рисунок 3.2 – Кристаллическая решетка монокристаллического Si

Монокристаллический кремний обычно выращивают в виде больших цилиндрических слитков методом Чохральского, из которых делают круглые или полуквадратные солнечные элементы. Полуквадратные подложки тоже когда-то были круглыми, но для более плотного расположения в прямоугольном модуле их края обрезали.

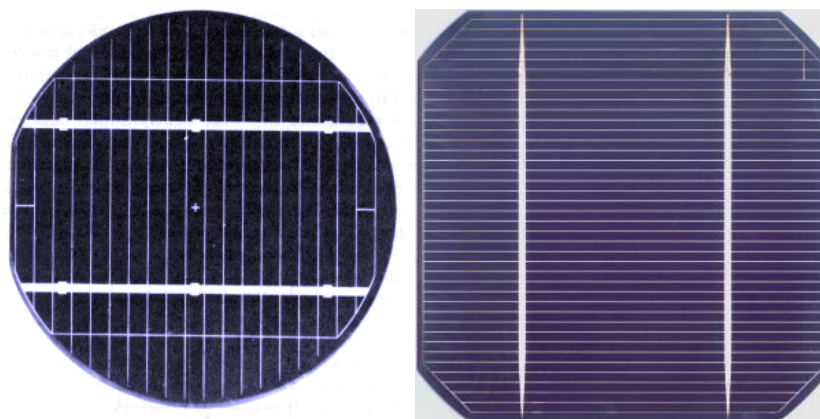


Рисунок 3.3 – Фотоэлементы из монокристаллического Si

Монокристалл кремния вырастает из семени, медленно вытягивающегося из кремниевого расплава. Полученные в результате стержни нарезаются на диски толщиной 0,2-0,4 мм. Затем диски подвергаются ряду производственных операций, которые превращают их в собственно монокристаллические фотоэлементы:

- обтачивание, очистка и шлифовка;
- защитные покрытия;
- металлизация.

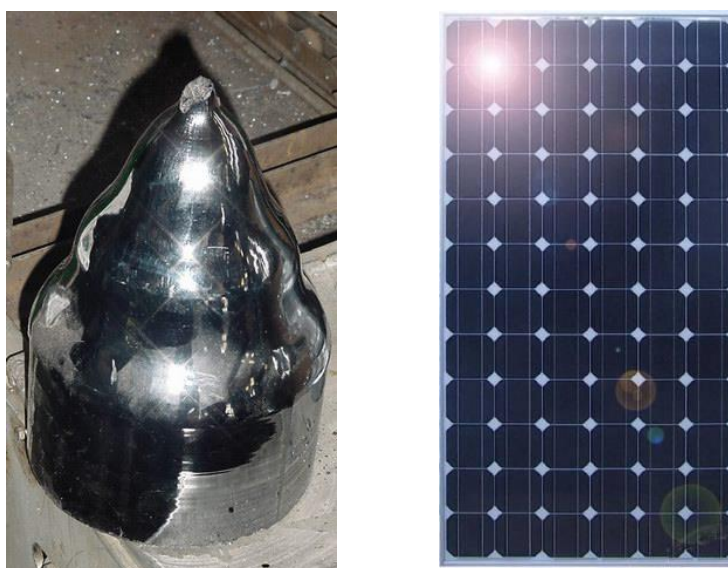


Рисунок 3.4 – Слиток, выращенный методом Чохральского и солнечный модуль из монокристаллического Si

Основной недостаток монокристаллических фотоэлементов – это высокая стоимость, 50-70% которой составляет цена самого кремния, обусловленная высокой энергоёмкостью его получения. Снижение мощности при затенении или сильной облачности - еще один существенный минус этих фотоэлементов

3.2 Поликристаллический кремний

В этом случае для производства ФЭ используется более дешевый кремний, произведенный по методу направленной кристаллизации в тигле (block-cast). Рост поликристаллических слитков достаточно простой процесс, где кремний плавится и охлаждается в тигле. Вначале тигель заполняется твердыми кусочками чистого кремния, затем тигель нагревают пока кремний не начинает плавиться. После полного плавления кремния, тигель медленно охлаждают, при этом происходит постепенный рост крупных зерен. Полученный слиток удаляется из тигля и разрезается на меньшие блоки, которые затем разрезают на пластины.

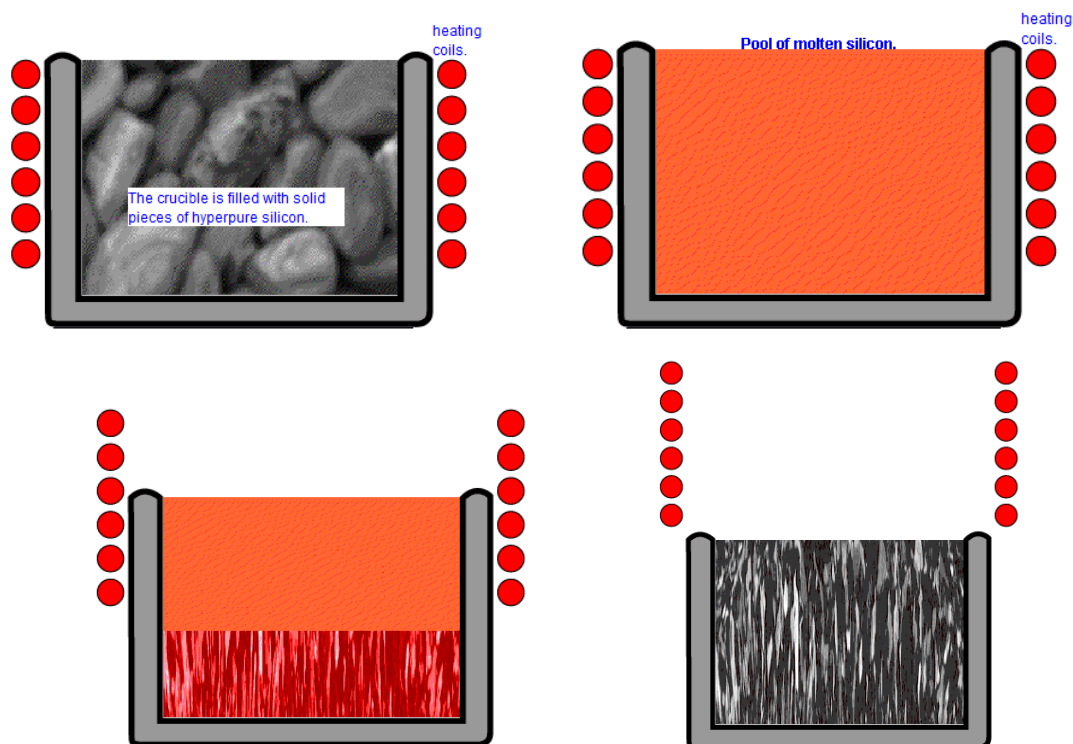


Рисунок 3.5 – Схема метода направленной кристаллизации в тигле



Рисунок 3.6 – Выращенная плита поликристаллического кремния

Получаемые в результате кремниевые пластины состоят из множества мелких разнонаправленных кристаллитов (типичные размеры 1-10мм) разделенных границами зерен. На границе между двумя кристаллическими зернами существует напряжение между связями, ухудшающее электронные свойства. Границы зерен создают дополнительные дефектные уровни в запрещенной зоне полупроводника, являясь локальными центрами с высокой скоростью рекомбинации, что приводит к уменьшению общего времени жизни неосновных носителей. Кроме того, границы зерен уменьшают производительность, препятствуя току носителей и создавая шунтирующие пути для тока, текущего через р-п переход. Подобные неидеальности кристаллической структуры (дефекты) приводят к снижению эффективности и меньшему сроку эксплуатации – до 10 лет, однако и стоимость их ниже за счет меньшего расхода энергии при изготовлении. К тому же, мощность поликристаллических фотоэлементов зависит от затенения в меньшей степени, чем монокристаллических.

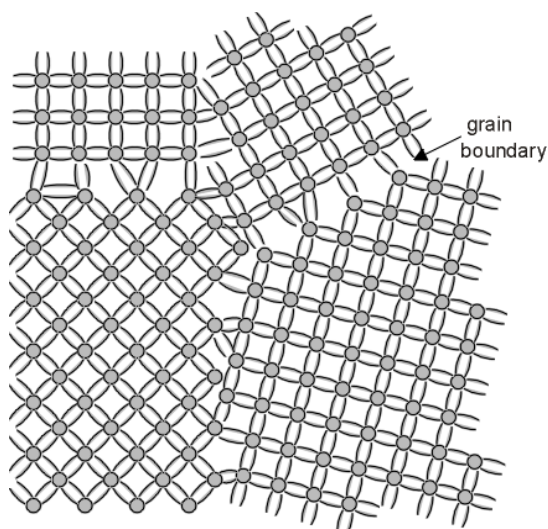


Рисунок 3.7 – Решетка поликристаллического Si

Чтобы избежать слишком больших рекомбинационных потерь на границах зерен, размер зерен должен быть как минимум несколько миллиметров. Это условие также означает, что размеры одного зерна будут больше, чем толщина солнечного элемента, что уменьшит сопротивление току носителей и общую протяженность пограничных областей в солнечном элементе. Такой поликристаллический кремний широко используется в коммерческих ФЭ.

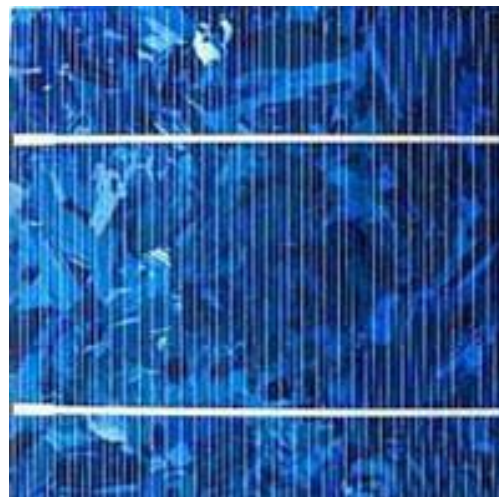
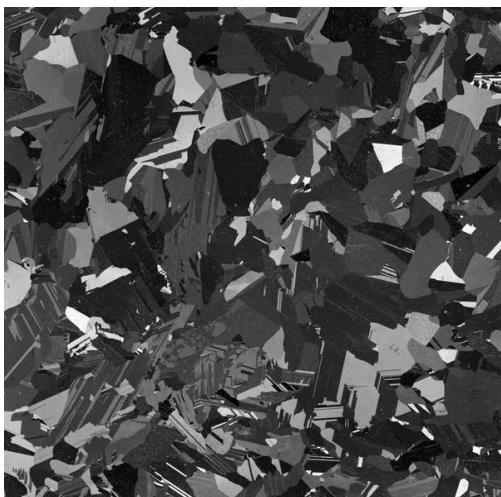
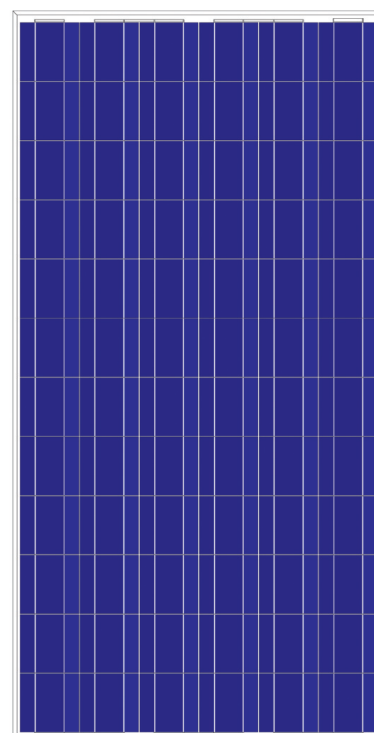


Рисунок 1.18 — Поликристаллический Si и модуль

Солнечные панели из моно- и поликристаллического кремния на данный момент являются наиболее востребованными на рынке возобновляемой энергетики по сравнению с остальными типами фотопреобразователей.

Главным поставщиком солнечных панелей является Китай, где функционируют компании, предлагающие солнечные панели с оптимальным соотношением цена/качество. В климатических условиях Беларуси популяризированы панели из поликристаллического кремния, что связано с достаточно высокими показателями производительности в условиях пасмурной погоды (рассеянного света). Как правило, используются панели номинальной мощностью 250-255 Вт для кровельных станций и 300-310 Вт для наземных станций.

На фото ниже представлена солнечная панель торговой марки «LEGINE» китайской компании ZHEJIANG LIANGJING NEW ENERGY.



Солнечные панели, выпускаемые промышленно для продажи, должны иметь Сертификат качества менеджмента системы (ISO), сертификаты подтверждения качества (CE, TUV), прилагаемые к ним протоколы испытаний.

3.3 Параметры солнечного модуля

Важными параметрами, которые характеризуют солнечный модуль являются механические и электрические. Последние включают в себя следующее:

- максимальная мощность при стандартных условиях испытания;
- ток короткого замыкания;
- напряжение холостого хода;
- сила тока в точке максимальной мощности;
- напряжение в точке максимальной мощности;
- эффективность одного отдельного элемента;
- эффективность солнечной панели.

Ток короткого замыкания – это ток, протекающий через ФЭ, когда напряжение равно нулю (то есть когда ФЭ замкнут накоротко). Этот параметр обычно обозначается как ISC. Ток короткого замыкания можно считать максимальным током, который способен создать ФЭ.

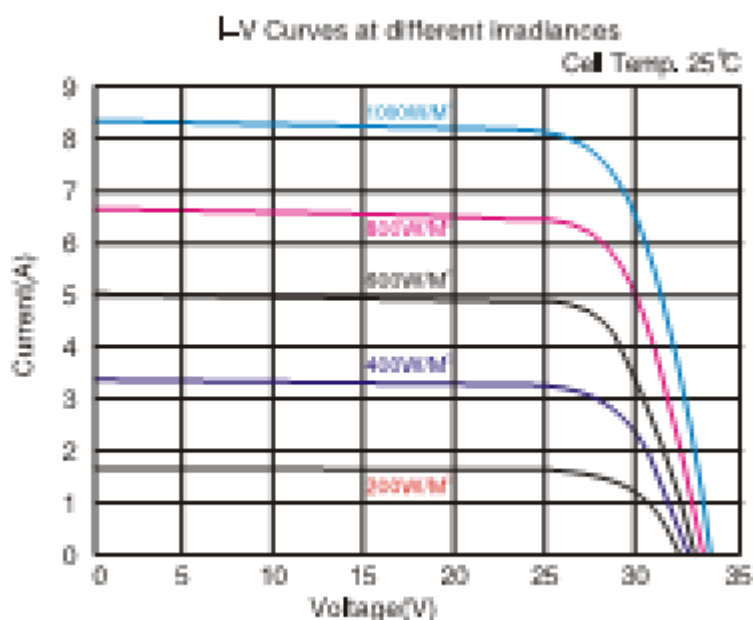
Напряжение холостого хода – это максимальное напряжение, создаваемое ФЭ, возникающее при нулевом токе. Напряжение холостого хода равно

прямому смещению, соответствующему изменению напряжения р-п перехода при появлении светового тока.

Важным параметром ФЭ является также температурная характеристика, которая характеризует изменение параметров производительности солнечной панели при изменении температуры на 1°C и включает в себя следующее:

- температурный коэффициент максимума мощности;
- температурный коэффициент напряжения холостого хода;
- температурный коэффициент тока короткого замыкания.

Вольтамперная характеристика солнечной панели при различных уровнях освещенности представлена на графике ниже:



Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода – это максимальные ток и напряжение, которые можно получить от ФЭ. Однако, мощность ФЭ в обеих этих точках равна нулю. Коэффициент заполнения, который обычно обозначается "FF", – это параметр, который в сочетании с V_{OC} и I_{SC} определяет максимальную мощность ФЭ. Параметр FF определяется, как отношение максимальной мощности ФЭ к произведению V_{OC} и I_{SC} . Графически FF представляет собой меру квадратичности ФЭ и равен максимальной площади прямоугольника, который можно вписать в вольт-амперную кривую (см. рис. 3.9).

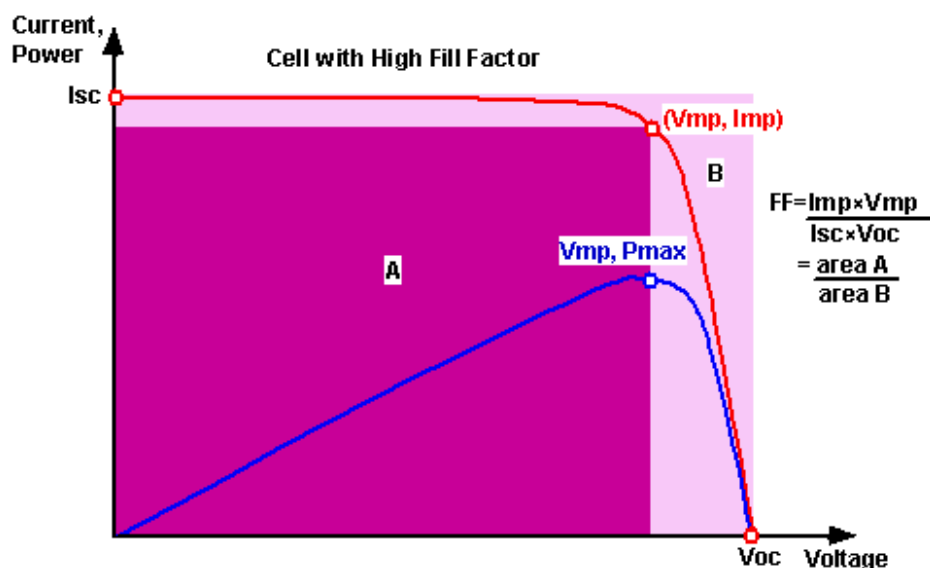


Рисунок 3.9 – Зависимость выходного тока (красная линия) и мощности (синяя линия) ФЭ от напряжения.

Увеличение температуры существенно влияет на солнечный модуль, уменьшая его напряжение, а, следовательно, и выходную мощность. Кроме того, увеличение температуры приводит к некоторым нежелательным последствиям. Так, оно увеличивает напряжение, связанное с термическим расширением, также увеличивает скорость деградации примерно в два раза на каждые 10 градусов температуры. Поэтому важным для рассмотрения при выборе солнечного модуля является график зависимости тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и максимальной мощности от температуры.

Параметром, наиболее подверженным изменению температуры, является напряжение холостого хода. Влияние увеличения температуры показано на рис. 3.10.

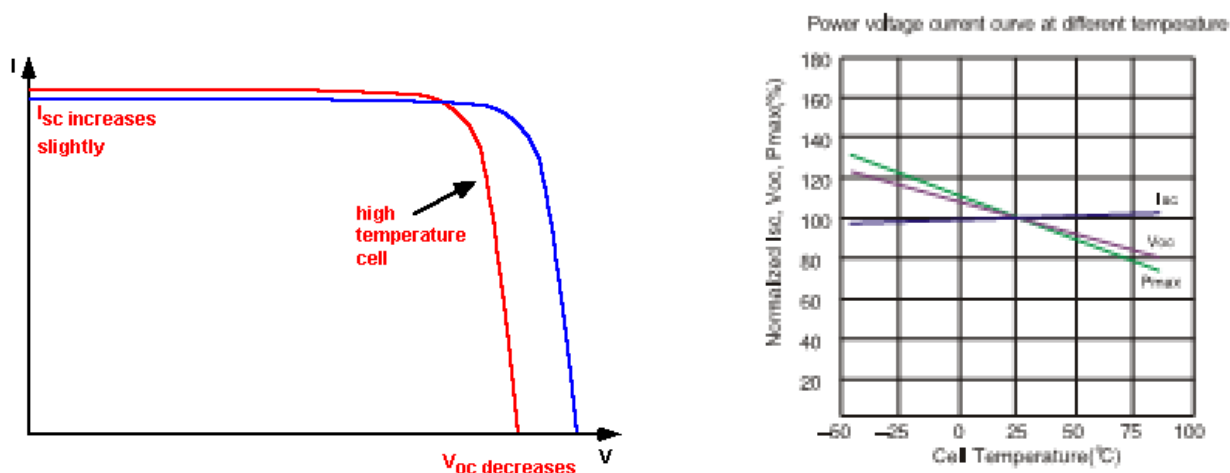


Рисунок 3.10 – Влияние температуры на вольт-амперную характеристику солнечного модуля

4. Солнечные модули. Второе поколение

Второе поколение ФЭ также основывается на использовании р-п перехода, однако не используют кристаллический кремний как основной материал. Обычно используются следующие материалы: теллур, кадмий (CdTe), смесь меди, индия, галлия, селена (CIGS) и аморфный кремний. Как правило, толщина поглощающего свет слоя полупроводника составляет всего от 1 до 3 мкм. Процесс производства таких фотоэлементов более автоматизирован и имеет значительно меньшую себестоимость. Основным недостатком второго поколения элементов является меньшая эффективность, чем элементы первого поколения, которая колеблется в зависимости от технологии от 7-15%.

4.1 Фотоэлементы из аморфного кремния

Аморфный кремний всегда содержит водород в количестве от 5 до 20 ат. %, который блокирует оборванные связи кремния, поэтому он является гидрогенизированной формой кремния. Гидрогенизированный аморфный кремний ($a\text{-Si:H}$) является прямым полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,7 эВ и высоким коэффициентом оптического поглощения. Это означает, что пленка толщиной всего несколько микрон (0,5-1,0 мкм) поглотит большую часть солнечного излучения. При легировании пленки аморфного кремния германием ширина запрещенной зоны уменьшается, а при добавлении углерода – увеличивается. Это позволяет создавать солнечные модули с двумя или тремя гетеропереходами, перекрывающими практически весь солнечный спектр. Эффективность фотопреобразования таких ФЭ достигает 12%. Недостатком является деградация физических свойств элемента под действием солнечного излучения – эффект Штеблера-Вронского (the Staebler-Wronski effect).

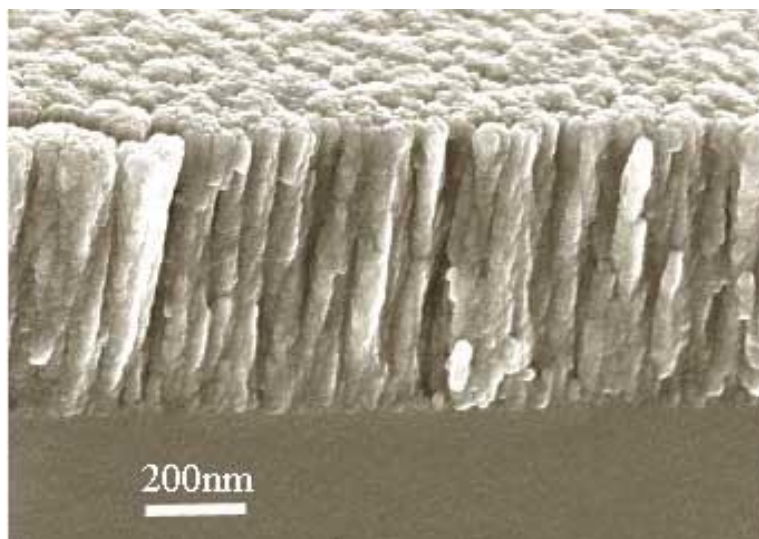


Рисунок 4.1 – Фотография аморфного кремния, полученная с помощью электронного микроскопа

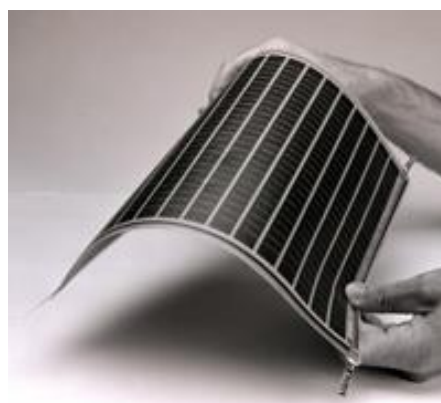


Рисунок 4.2 – Элемент и солнечный модуль из аморфного Si

Чтобы повысить стабильность свойств ФЭ в качестве полупроводника используют не аморфный кремний, но двухфазный материал, содержащий включения микро или нано кристаллов кремния в аморфной матрице, который в литературе называют «микроморфный» кремний.

Эти устройства обладают более высокой эффективностью и стабильностью, чем устройства на основе только аморфного кремния.

Тонкопленочный модуль представляет собой многослойную структуру: подложкой является float-стекло (термополированное), на нем контактный слой из оксида цинка (ZnO). Пленка служит промежуточным отражателем. Благодаря неровностям между оксидом и последующим кремниевым слоем, свет больше рассеивается и дольше остается внутри ФЭ, тем самым повышается его КПД. Кремниевый слой представляет собой тандем из аморфной и микроморфной форм этого материала. Благодаря такому сочетанию преобразуется практически весь спектр солнечного света:

аморфный кремний поглощает зеленый и синий свет, а микроморфный – красный и ближний ИК диапазон. Применяемая технология повышает в 1,5 раза эффективность ФЭ, а также позволяет использовать в 200 раз меньше кремния при производстве, что в итоге снижает стоимость конечного продукта.

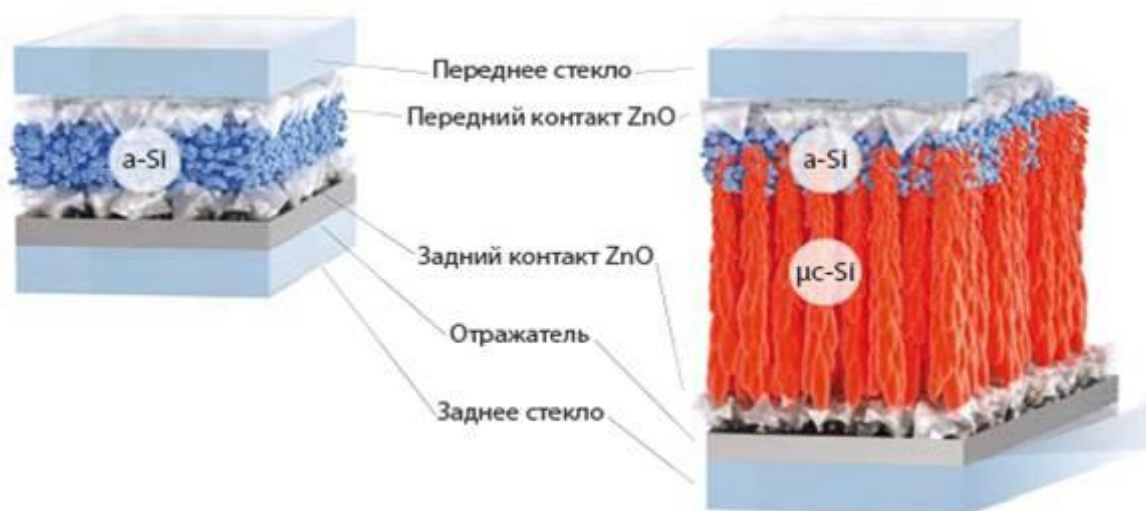


Рисунок 4.3 – Структура микроаморфного кремния

4.2 - Фотоэлементы на основе кристаллических пленок CdTe

Теллурид кадмия является одним из перспективных материалов для производства высокоэффективных и дешевых солнечных модулей. Этот материал является прямозонным полупроводником с большим коэффициентом оптического поглощения ($\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$) в видимом диапазоне и имеет почти идеальную ширину запрещенной зоны (1,5 эВ) для ячеек с одним переходом. Благодаря этому пленка CdTe толщиной всего несколько микрон поглощает $\sim 90\%$ солнечного излучения. Рекордная эффективность ячейки на основе CdTe составляет 16,5%, модуля коммерческого размера – 11%.

Пленки этого материала наносятся на стеклянную подложку, покрытую проводящим прозрачным слоем в вакууме в камере с малым расстоянием между источником и подложкой.

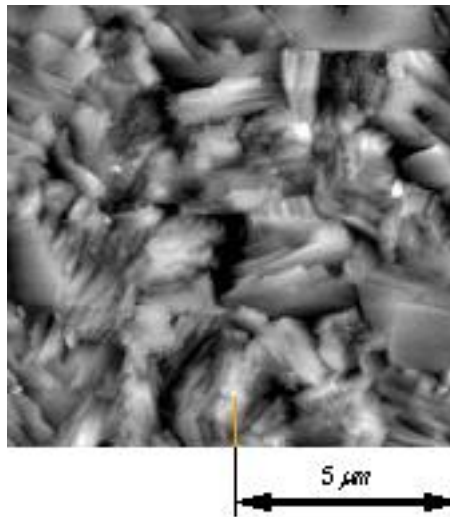


Рисунок 4.4 – Фотография поверхности пленки CdTe, нанесенной на стекло

Пленки CdTe достаточно дешевы в изготовлении. Кроме того, технологически несложно получать разнообразные сплавы CdTe с Zn, Hg и другими элементами для создания слоев с заданными свойствами.

Основными недостатками этих ФЭ являются экологические и медицинские проблемы, связанные с вредным влиянием кадмия. Однако проведенные исследования показывают, что все требования безопасного производства и утилизации этих ФЭ могут быть соблюдены при вполне умеренных затратах.

На изготовление ФЭ площадью 1 м² сегодня требуется около 10 г теллура и 9 г кадмия. Сегодня при КПД около 10% для генерации 1 ГВт требуется 100 т Те.

Тонкопленочные ФЭ на основе поликристаллических слоев CdTe стабильны и обладают эффективностью до 16.4% при освещенности АМ 1.5. Для этих панелей возможно получение низкого отношения вес/мощность.

Это позволяет говорить о возможности применения тонкопленочных панелей на основе CdTe в космосе. Для космического применения важно иметь модуль с легкой и одновременно гибкой подложкой.

4.3 Фотоэлементы на основе кристаллических пленок Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS)

Тонкопленочные ФЭ с активным слоем на основе поликристаллических пленок полупроводников Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), обладающих коэффициентом поглощения свыше 15 см⁻¹ в ближней ИК и видимой области спектра, являются фотопреобразователями нового поколения. Высокая способность к

поглощению солнечного излучения у плёнок CuInGaSe_2 (CIGS) позволяет создавать тонкопленочные ФЭ с КПД до 14.5%. CIGS-солнечные элементы на недорогих и стабильных керамических подложках являются перспективными с точки зрения снижения затрат на фотоэнергетику и разработку элементов строительных конструкций (например, крыша из «солнечных» плит), способных генерировать электрическую энергию.

Традиционные Si-солнечные элементы работают на прямом неконцентрированном солнечном излучении, что требует для их изготовления большого количества полупроводниковых материалов: для установки СЭС мощностью 1,0 МВт требуется площадь $100 \times 100 \text{ м}^2$ с общим весом кремниевых пластин 50 тонн. Для создания же СЭС такой же мощности на основе CuInSe_2 тонкопленочных ФЭ требуется 15 кг Cu, 27 кг In и 38 кг Se. Полупроводниковые соединения CIGS отвечают всем физическим критериям, необходимым для достижения высокого коэффициента преобразования. Эти материалы поглощают свет лучше, чем Si, даже в тонких пленках толщиной 2 мкм, и остаются стабильными при интенсивном облучении, имеют хорошую радиационную стойкость.

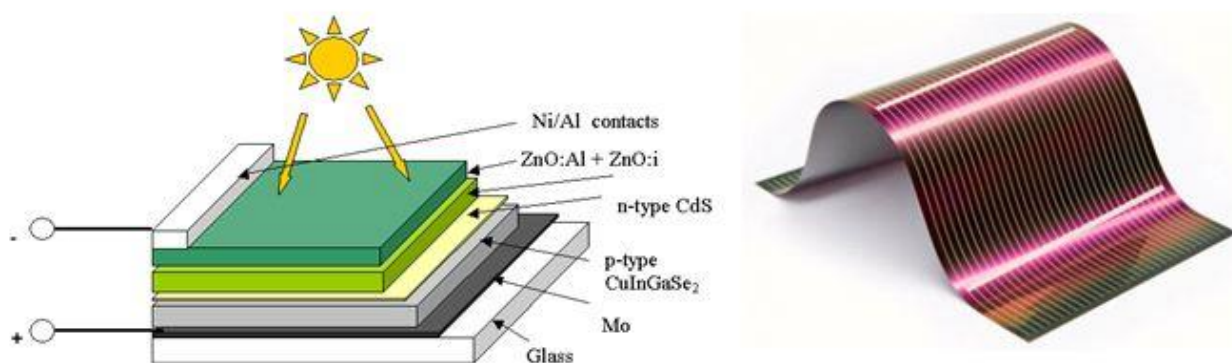


Рисунок 4.5 – Структура и внешний вид солнечного элемента на основе CIGS

Лимитирующим сырьевым фактором для CIGS-технологии станет индий. Расход индия на создание 1 ГВт составляет 20 т. Таким образом, если предположить, что к 2025 г. солнечная энергетика сможет получить 150-300 т индия (сегодня вся электроника потребляет около 110 тонн/год), то это позволит произвести модулей мощностью 15 ГВт. Это составит 9-10% общего выпуска в 2025 г.

4.4 Фотоэлементы на основе кристаллических пленок III-V групп

Полупроводниковые материалы на основе соединений групп III (Al, Ga, In) и V (N, P, As, Sb) известны с 1950 года, а в начале 1960-х годов были созданы и

первые ФЭ на основе арсенида галлия, которые тут же нашли применение в космических исследованиях, благодаря устойчивости к космическому излучению и высокой эффективности фотопреобразования. Из всех соединений групп III-V наиболее широко применяются InP (фосфида индия) и GaAs (арсенид галлия), поскольку они имеют почти идеальную ширину запрещенной зоны в 1,4 эВ. Наибольшая эффективность на структурах с одним переходом была достигнута на тонкопленочных устройствах, сформированных методом газовой эпитаксии: 25,8% для GaAs и 21,9% для InP.

4.5 Арсенид-галлиевые

Фотоэлектрические преобразователи на основе соединения мышьяка с галлием (GaAs), как известно, имеют более высокий теоретический КПД, чем кремниевые ФЭ.

Вследствие более высокого уровня поглощения солнечного излучения, определяемого прямыми оптическими переходами в GaAs, высокие КПД преобразователей на их основе могут быть получены при значительно меньшей толщине ФЭ по сравнению с кремнием. Принципиально достаточно иметь толщину преобразователя 5-6 мкм для получения КПД порядка не менее 20%, тогда как толщина кремниевых ФЭ не может быть менее 50-100 мкм без заметного снижения их КПД. Это обстоятельство позволяет рассчитывать на создание лёгких плёночных ФЭ, для производства которых потребуется сравнительно мало исходного материала

ФЭ на этой основе обладают также более благоприятными эксплуатационными характеристиками с точки зрения требований к преобразователям СЭС по сравнению с кремниевыми ФЭ. Так, в частности, возможность достижения малых начальных значений обратных токов насыщения в p-n-переходах благодаря большой ширине запрещённой зоны позволяет свести к минимуму величину отрицательных температурных градиентов КПД и оптимальной мощности ФЭ и, кроме того, существенно расширить область линейной зависимости последней от плотности светового потока. Экспериментальные зависимости КПД ФЭ от температуры говорят о том, что повышение равновесной температуры последних до 150-180°C не приводит к существенному снижению их КПД и оптимальной удельной мощности. В то же время для кремниевых ФЭ повышение температуры выше 60-70°C является почти критическим – КПД падает вдвое.

Также ФЭ на основе GaAs в значительно меньшей степени, чем кремниевые ФЭ, подвержены разрушению потоками протонов и электронов высоких

энергий вследствие высокого уровня поглощения света в GaAs, а также малых требуемых значений времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей. Более того, эксперименты показали, что значительная часть радиационных дефектов в ФЭ на основе GaAs исчезает после их термообработки (отжига) при температуре как раз порядка 150-180°C. Если ФЭ из GaAs будут постоянно работать при температуре порядка 150°C, то степень радиационной деградации их КПД будет относительно небольшой на протяжении всего срока активного функционирования станций (особенно это касается космических солнечных энергоустановок, для которых важны малые вес и размер ФЭ, высокий КПД).

В отличие от кремния, галлий является весьма дефицитным материалом, что ограничивает возможности производства ФЭ на основе GaAs в количествах, необходимых для широкого внедрения.

4.6 Фосфид индия

Индий – сравнительно дорогой металл, в земной коре содержится 0,14*10⁻⁴ процента этого металла. Фосфор, несмотря на распространенность и дешевизну в неочищенном виде, стоит после очистки дорого. Кристаллы InP выращивают методом Чохральского, причем во избежание нарушения стехиометрии над расплавом поддерживают высокое давление или покрывают его жидким защитным составом.



Рисунок 4.6 – Аллотропные модификации фосфора

Тонкие слои InP получают химическим осаждением из паров металлоорганических соединений, химическим осаждением из паровой фазы, испарением и планарным реактивным осаждением.

Недостатком устройств на пленках соединений III-V групп является высокая стоимость подложек, обеспечивающих эпитаксиальный рост этих материалов. Кроме этого, эффективность фотопреобразования пленок очень чувствительна к примесям и структурным дефектам, что не позволяет упростить технологию их осаждения и снизить стоимость производства ячеек. Выход из этой ситуации: использовать ячейки с несколькими переходами, обеспечивающими более полное поглощение солнечного спектра, а также использовать концентрирование солнечной энергии с большой площади на небольшой фотоэлемент. В этом случае вместо дорогостоящего ФЭ используется существенно более дешевое концентрирующее устройство, например, линза Френеля. В результате стоимость фотоэлемента снижается пропорционально степени концентрирования солнечного излучения. Современный рекорд эффективности фотопреобразования, достигнутый на структуре с тремя переходами при концентрировании в 364 раза, составляет 41,6%. Увеличение количества гетеропереходов больше трех приводит к значительному удорожанию фотоэлемента, поэтому основной рынок для высокоэффективных устройств с четырьмя и более гетеропереходами – аэрокосмическая промышленность.

5. Солнечные модули. Третье поколение

Третье поколение ФЭ также относятся к тонкопленочным технологиям, однако они лишены привычного понятия р-п перехода, следовательно, и использования полупроводников. В настоящее время это поколение включает в себя разнообразные технологии, однако основным направлением является фотоэлементы на основе органических полимерных материалов. Преимуществом фотоэлементов третьего поколения является низкая себестоимость и простота изготовления. Главным препятствием на пути популяризации является низкая эффективность, которая не превышает 7%.

5.1 Фотоэлементы на основе органических материалов

В последнее время ФЭ на основе органических материалов вызывают все больший интерес, как исследователей, так и компаний, производящих солнечные панели. Несмотря на то, что эффективность фотопреобразования органических фотоэлементов выглядит довольно скромно по сравнению с неорганическими фотоэлементами, эти устройства обладают целым рядом положительных свойств, благодаря которым они составляют реальную конкуренцию неорганическим элементам. К этим свойствам относятся малый расход и низкая стоимость материалов, их экологическая безопасность и дешевая утилизация, очень низкая стоимость производства, гибкость модулей и связанное с этим удобство транспортировки и монтажа.

Недостатком ФЭ на основе органических материалов, помимо невысокой эффективности фотопреобразования, является проблема стабильности свойств, присущая сопряженным полимерам.

Эффективность у данных панелей не велика до 7-8%, но это всё из-за того, что представленные выше органические материалы не поглощают во всём диапазоне длин волн. С одной стороны, это является проблемой, необходимо придумывать более хитрые схемы с двумя совмещёнными панелями, так называемые тандемные солнечные элементы (tandem solar batteries), либо просто сделать панель полупрозрачной и наклеить на окно.

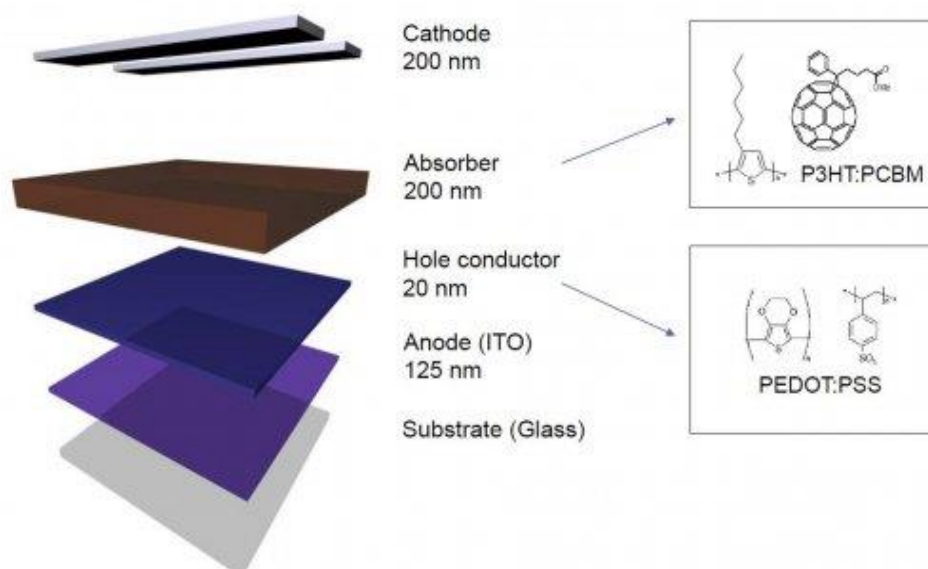


Рисунок 5.1 – Устройство отдельного органического солнечного элемента и материалы, используемые для его создания

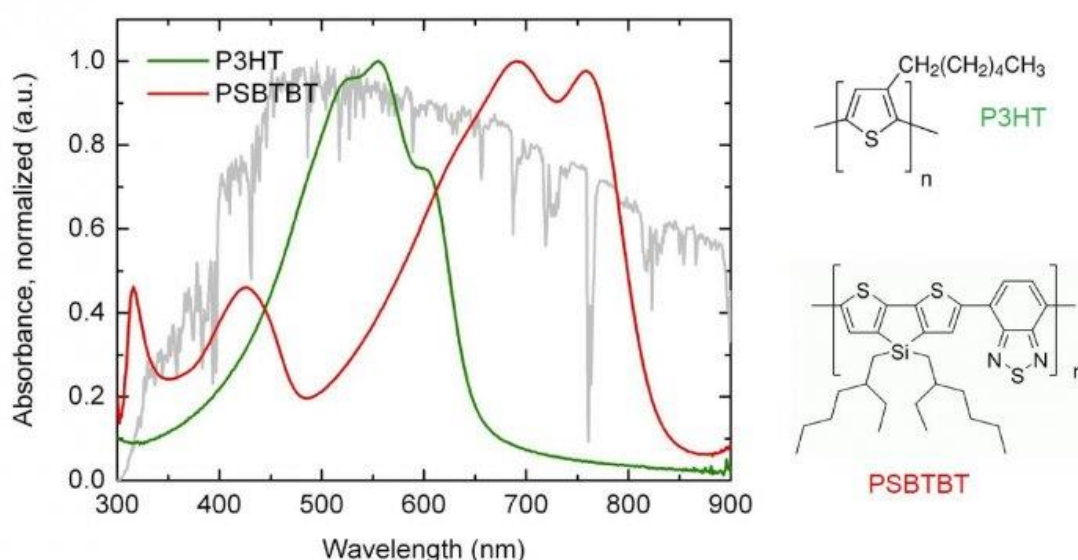


Рисунок 5.2 – Пример спектра поглощения двух органических веществ, используемых при производстве tandemных солнечных элементов

5.2 Фотоэлементы на красителях

Фотоэлементы на красителях также принадлежат к тонкопленочным солнечным элементам. Этот тип ФЭ был изобретен в 1991 году швейцарским ученым Гретцелем (Gratzel), и поэтому их еще называют «ячейка Гретцеля». Первая ячейка Гретцеля состояла из анода (толщиной 10 мкм) в виде высокопористого нанокристаллического диоксида титана, поверхность которого покрыта мономолекулярным слоем красителя и который был сформирован на стеклянной подложке, покрытой слоем прозрачного

проводящего оксида. Пористый анод пропитывался жидким йодным электролитом. Катодом являлась платина.

На рис. 5.3 представлена обычная конструкция цвето-сенсibilизированной солнечной панели: два электрода и электролит. Недостатками ячейки Гретцеля являются высокая коррозионная активность электролита и высокая стоимость платины. Однако эти проблемы не являются фатальными и могут быть найдены эффективные решения для них. Например, вместо Pt уже предложено использовать CoS, также предложены менее агрессивные органические электролиты.

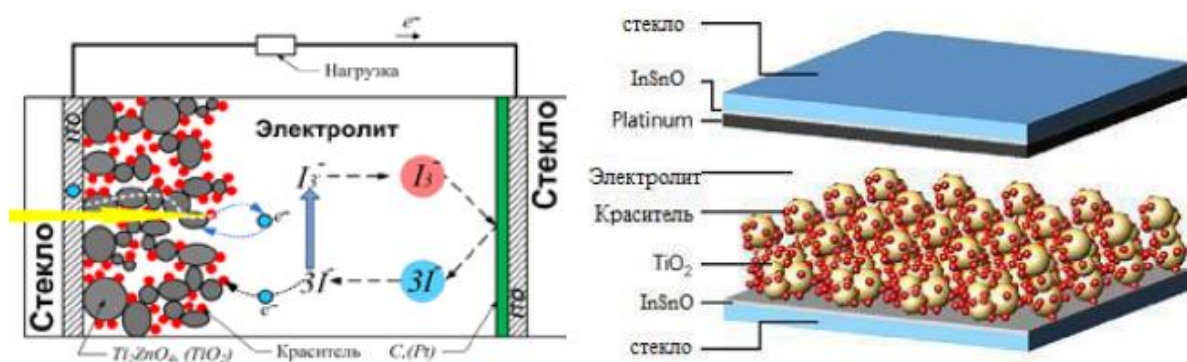


Рисунок 5.3 – Структура солнечной панели на основе красителя и электролита

Учитывая невысокую стоимость используемых материалов и простоту технологии, эти фотоэлементы являются привлекательными для массового применения.

Постоянно ведутся исследования по поиску новых более дешевых и/или более эффективных материалов, что позволяет надеяться на повышение эффективность этих структур.

5.3 Квантовые точки

Квантовая точка – фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по всем трём пространственным измерениям и содержащий электроны проводимости. Точка должна быть настолько малой, чтобы были существенны квантовые эффекты.

Объёмное изображение другой гетероструктуры, напоминающей пирамидку, показано на рис. 5.4.

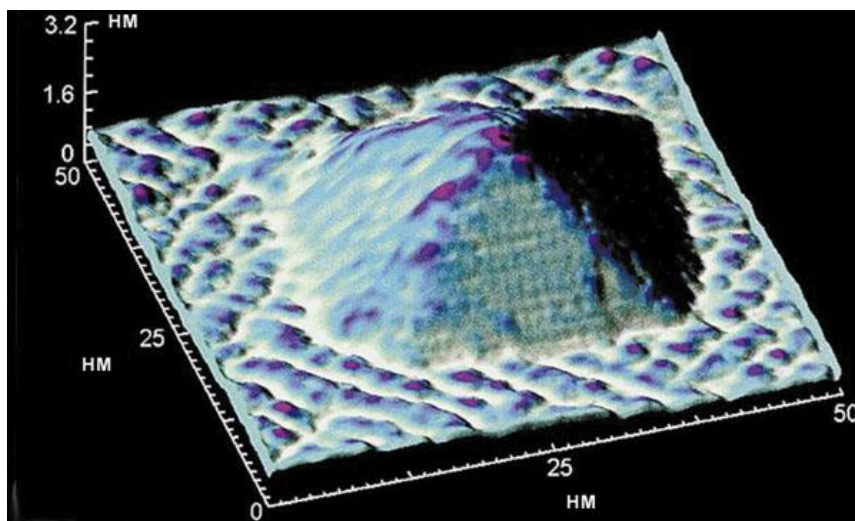


Рисунок 5.4 – Объёмное изображение квантовой точки, представляющей собой пирамидку их атомов германия, спонтанно образовавшуюся на кремниевой подложке

Своими свойствами квантовые точки напоминают атомы – «искусственные атомы» имеющие наноразмеры. Ведь электроны в атомах, переходя с одной орбиты на другую, тоже излучают квант света строго определённой частоты. Но в отличие от настоящих атомов, внутреннюю структуру которых и спектр излучения мы изменить не можем, параметры квантовых точек зависят от нас.

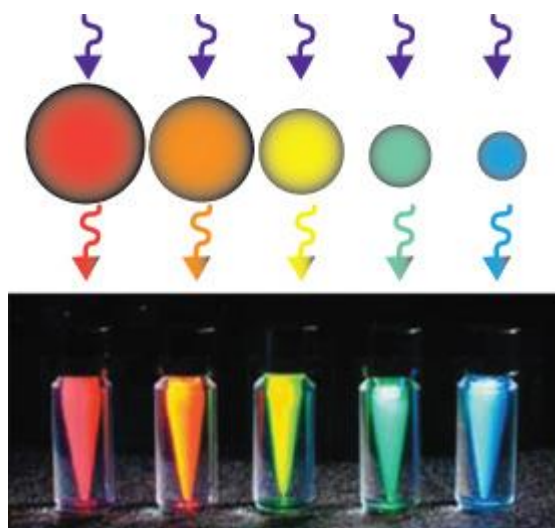


Рисунок 5.5 – Зависимость цвета, которым светятся квантовые точки, от их размера

Для создания солнечных панелей привлекательны следующие свойства коллоидных квантовых точек: возможность контроля эффективной ширины запрещенной зоны, т.е. возможность подстройки спектральных характеристик квантовых точек при варьировании размера под требуемые

длины волн; высокая фотостабильность, свойственная неорганическим материалам; растворимость с образованием золь, что позволяет легко манипулировать квантовыми точками.

У органических ФЭ имеется ряд преимуществ перед обычными кремниевыми ФЭ, производящимися промышленно. Эти преимущества заключаются не только в том, что органические ФЭ существенно тоньше и гибче кремниевых, а также тем, что их проще и дешевле производить промышленно. Органические ФЭ проще приспособить как для снабжения энергией электронных устройств для повседневного использования, так и для устройств и систем, которые могут не использоваться постоянно. В долгосрочной перспективе органические солнечные элементы могут понизить нашу зависимость от панелей, аккумуляторов и подводящих питание проводов.