

# Использование фотоэлектрических преобразователей

## 1. Прямое превращение солнечной энергии в электрическую энергию

Прямое превращение энергии солнечной радиации в электричество осуществляется с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), которые являются основой одной из наиболее современных экологически чистых возобновляемых энергетических систем (рисунок 1).

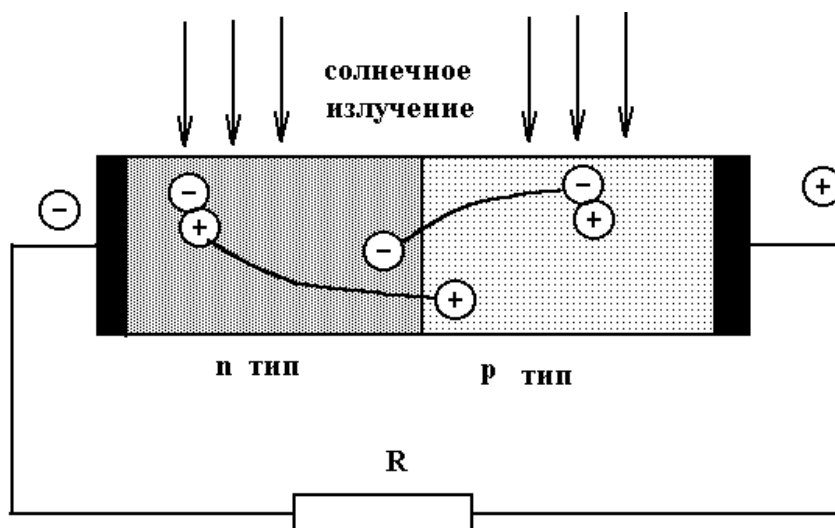
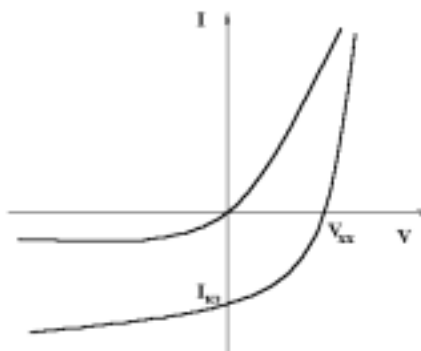


Рисунок 1. Принцип действия ФЭП

Фотоэлектрические преобразователи работают на принципе внутреннего фотоэффекта, при котором фотоны, поглощающиеся в базовом полупроводниковом слое ФЭП, передают свою энергию непосредственно электронам. В результате этого электроны становятся свободными, что приводит к увеличению числа свободных носителей заряда в полупроводниках. На месте свободным от электронов остаются положительно заряженные дырки. Таким образом, поглощение света в идеальном полупроводнике приводит к появлению электрон-дырочной пары. Которая существует в полупроводнике некоторое время, определяемое временем жизни, которое в свою очередь зависит от структурного совершенства полупроводникового материала. Процесс аннигиляции электро-дырочных пар называется рекомбинацией. Не всякое излучение из светового диапазона вызывает генерацию электрон-дырочной пары, а только то, чья энергия достаточна чтобы разрушить связь электрона с ядром атома. Поэтому не все полупроводники являются чувствительными к солнечному излучению в наземных условиях. По своему строению наиболее подходящими являются Si, GaAs, CdTe, CuInSe<sub>2</sub>.

Как и в любом источнике электропитания на его выходе поддерживается постоянная разность потенциалов, которая при подключении его к внешней нагрузке вызывает протекание тока в цепи. Таким образом, генерированные электрон-дырочные пары необходимо разделить. Разделение положительных и отрицательных заряд происходит в результате фотоэлектрического эффекта. Фотоэлектрический эффект

возникает в полупроводниковых диодных структурах (рисунок 2) при наличии в них энергетического барьера который осуществляет разделение отрицательных и положительных носителей заряда. Энергетический барьер большинства ФЭП представляет собой встроенное электрическое поле, возникающее на границе двух полупроводниковых материалов, отличающихся типом электропроводности (электронной - n-тип и дырочной - p-тип). При поглощении фотонов происходит генерация неравновесных электрон-дырочных пар, разделение которых встроенным электрическим полем приводит к формированию фото-э.д.с (рисунок 2), которое существует до тех пор пока полупроводниковая структура освещается светом.



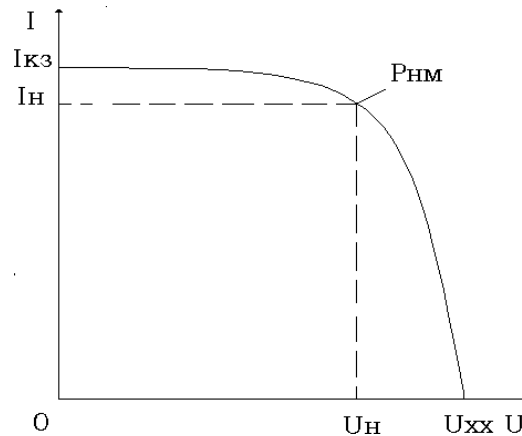
**Рисунок 2. Фотоэлектрический эффект**

Как и для любого преобразователя одного вида энергии в другой вид основной эксплуатационной характеристикой ФЭП является коэффициент полезного действия (к.п.д.). К.п.д. преобразователя солнечной энергии представляет собой отношение электрической мощности производимой при работе ФЭП к мощности солнечного излучения падающего на его поверхность при стандартной плотности солнечной радиации  $1\text{кВт/м}^2$  ( $1000\text{Вт/м}^2$ ). Так, например, при к.п.д. 10% с  $1\text{м}^2$  ФЭП можно получить 100Вт электрической мощности. Коэффициент полезного действия ФЭП ( $\eta$ ) определяется из его нагрузочной световой вольт-амперной характеристики.

Темновая вольт-амперная характеристикам ФЭП подобна ВАХ обычного полупроводникового диода (рисунок 3). Если ФЭП осветить светом его ВАХ изменится (рисунок 3). Нагрузочной световой ВАХ фотопреобразователя является зависимость тока нагрузки  $I_n$ , протекающего через сопротивление  $R_n$  подключенной к клеммам освещаемого ФЭП внешней нагрузки (см. рисунок 2), от падения напряжения  $U_n$  на этом сопротивлении при монотонном изменении величины  $R_n$  от нуля до бесконечности. Из зависимости  $I_n = f(U_n)$  могут быть получены и рассчитаны выходные параметры: напряжение холостого хода  $U_{xx}$ , ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , фактор заполнения FF, максимальная электрическая мощность  $P_{\text{нmax}}$ , коэффициент полезного действия  $\eta$ :

$$\eta = P_{\text{нmax}} / W = (U_{xx} * I_{кз} * FF) / W, \quad (1)$$

где  $W$  - мощность падающего светового потока.  $U_{xx}$ - напряжение холостого хода,  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания, FF - фактор заполнения световой ВАХ.



**Рисунок 3. ВАХ элемента**

## **2. Конструктивно-технологические решения ФЭП на основе монокристаллического кремния**

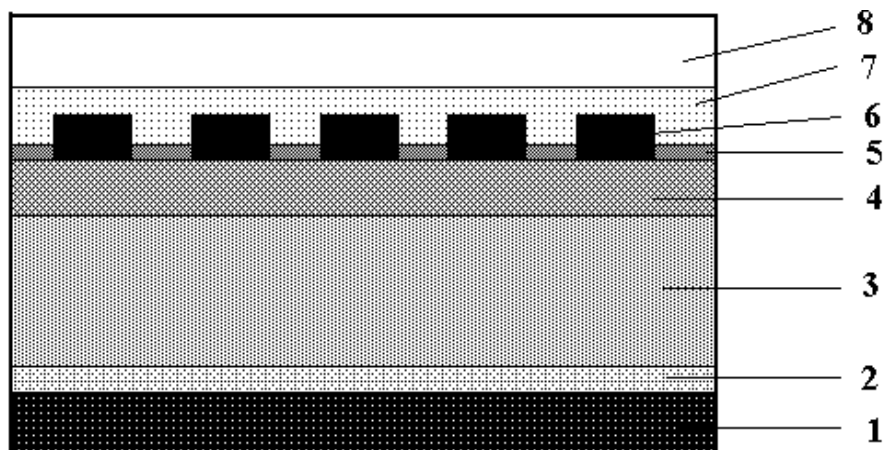
По своему конструктивно-технологическому решению фотоэлектрические преобразователи представляют собой наукоемкие изделия электронной техники. Самыми распространенными, надежными и долговечными являются ФЭП на основе монокристаллического кремния, которые впервые были применены десятки лет назад для электроснабжения космических аппаратов. В 2000 году было выпущено ФЭП на основе монокристаллов общей мощностью 200 МВт для наземного применения.

В результате рассмотрения основных процессов, происходящих внутри ФЭП при преобразовании оптического излучения в электроэнергию, показано следующее.

Эффективность работы фотоэлектрического преобразователя зависит от оптических и электрофизических свойств полупроводникового материала:

1. Коэффициента отражения света от поверхности полупроводника, чем больше света проникает вглубь базового слоя тем выше к.п.д.
2. Квантового выхода полупроводника, который показывает отношение числа поглотившихся фотонов в числу генерированных при этом электронов. Этот коэффициент всегда меньше единицы так как часть фотонов поглощается на различных структурных несовершенствах полупроводника, что не приводит к генерации электрон-дырочной пары.
3. Диффузионной длины носителей заряда, которая должна обеспечить возможность диффузии пар к энергетическому барьеру, на котором происходит их разделение. Соотношения между диффузионной длиной носителей заряда, глубиной залегания р-п-перехода относительно освещаемой поверхности и толщиной находящегося за ним полупроводникового слоя должно быть совместно оптимизировано.
4. Спектрального положения основной полосы поглощения солнечного излучения
5. От выпрямляющих характеристик р-п-перехода, которые определяют эффективность разделения носителей заряда.
6. Степени легирования областей полупроводника по обе стороны р-п-перехода, что совместно с требованием минимизации сопротивления других слоев ФЭП, формы и места расположения токосъемных контактов обеспечивает низкое внутренне последовательное электросопротивление источника тока.

Желание примирить часто взаимно исключаящие требования и найти оптимальное компромиссное техническое решение привело разработчиков к выбору исходной конструкции ФЭП, изображенной на рисунке 4. Для фотоэлектрических преобразователей из монокристаллического кремния с гомогенным p-n-переходом, занимающих в настоящее время ведущее положение при применениях, как в космических, так и в наземных условиях, такой конструктивный подход, оптимизируемый под конкретные применения, используется наиболее часто.



- 1 – тыльный сплошной токосъемный электрод;
- 2 – слой кремния p<sup>+</sup>-типа проводимости;
- 3 – кремний n-типа проводимости;
- 4 – слой кремния n<sup>+</sup>-типа проводимости;
- 5 – просветляющее покрытие;
- 6 – фронтальный гребенчатый токосъемный электрод;
- 7 – клеящий слой прозрачного кремнийорганического каучука;
- 8 – защитное боросиликатное стекло

**Рисунок 4. Схематическое изображение вертикального сечения монокристаллического кремниевого ФЭП**

Основой монокристаллического кремниевого ФЭП является пластина из монокристалла кремния n-типа проводимости толщиной 200-350 мкм. Толщина пластины выбирается, исходя из критерия наиболее полного собирания неосновных носителей заряда, генерированных квантами света в слое, находящемся между p-n переходом и тыльным контактом, с учетом обеспечения фотоэлектрически активного поглощения не менее 90 % квантов света в этом слое при их прохождении через последний в прямом направлении.

Слой n-типа проводимости толщиной не более 1 мкм со стороны освещаемой (фронтальной) поверхности ФЭП создают диффузионным способом. При этом в результате диффузии атомов фосфора или мышьяка из газообразных диффузانتов PH<sub>3</sub>, POCl или AsH<sub>3</sub>, содержащихся в газе-носителе формируется p-n переход. Затем на обе поверхности пластины наносят электрические контакты, а на фронтальную поверхность - просветляющее покрытие. На тыльную поверхность кремниевой пластины методом термического испарения в высоком вакууме вначале наносят тонкий слой алюминия. Для инициирования диффузии части слоя алюминия

проводят термический отжиг. Образующийся при этом  $p^+$ -слой снижает контактное сопротивление. Для создания достаточно тонкого  $p^+$ -слоя толщиной 0,2 мкм требуется отжиг при 700-800°C в течение 4 часов. При этом одновременно образуется электрическое поле, снижающее влияние поверхностной рекомбинации на тыльной поверхности. Затем наносят многослойный Ti-Pd-Ag-контакт.

Лицевой контакт в виде сетки или гребенки имеет аналогичную трехслойную структуру Ti-Pd-Ag. Наилучшим материалом для контакта могло бы стать серебро, однако оно имеет плохую адгезию к чистой поверхности кремния. Для ее улучшения используют промежуточный слой Ti толщиной 40 нм. Однако во влажной среде между Ti и Ag происходит электрохимическая реакция, поэтому между ними для предотвращения коррозии часто вводят слой Pd толщиной 20 нм. Лицевой контакт вместе с тыльным отжигают при 500-600 °C в течение 5-30 мин. Для уменьшения сопротивления растекания фронтального контакта толщина слоя серебра в нем должна быть большой (около 5 мкм). Для уменьшения последовательного сопротивления  $R_{\text{п}}$  фотоэлектрического преобразователя на верхние металлические слои лицевого и тыльного контактов дополнительно наносят припой Pb-Sn, образуя ФЭП в соответствующий расплав. В зависимости от удельного сопротивления и толщины  $p$ -слоя полосчатые элементы лицевого контакта разделены зазором от 0,03 до 0,3 см и соединены общим токосъемом. Контактная сетка, либо гребенка и общий токосъем занимают от 5 до 10 % общей площади ФЭП.

Поскольку в используемом спектральном диапазоне (от 0,35 до 1,1 мкм) коэффициент отражения чистого кремния принимает значение 33-54 %, на его поверхность необходимо наносить просветляющие покрытия. Оптимальное однослойное покрытие снижает коэффициент отражения в этом интервале примерно до 10 %, а двухслойное - до 3 %. Для изготовления просветляющих покрытий наиболее часто используют слои  $MgF_2$ ,  $SiO_x$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnS$ ,  $Ta_2O_5$ .

Нанесением просветляющего покрытия заканчивается изготовление фотоэлектрического преобразователя. В дальнейшем, в зависимости от области применения ФЭП, прибор дополняется вспомогательными конструктивными элементами, обеспечивающими его защиту от радиационного воздействия, перегрева, а также от коррозии.

К.п.д. таких современных единичных ФЭП обычно составляет 20%. При этом напряжение холостого хода составляет 0,7В, а плотность тока короткого замыкания достигает 40мА/см<sup>2</sup>. Стоимость этих ФЭП определяется высокой ценой пластин монокристаллического кремния толщиной 300 мкм., используемых в его конструкции. Такие пластины из Si получают разрезкой выращенного при температуре более 1000°C монокристалльного цилиндра диаметром до 150 мм. При резке на пластины почти половина этого дорогостоящего материала уходит в стружку.

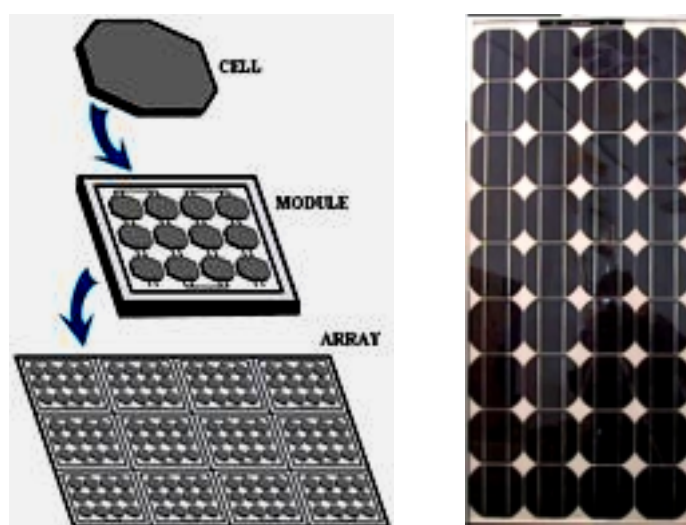
### **3. Технические характеристики солнечных модулей на основе монокристаллического кремния**

Так как потребителей не устраивает напряжение и токи, вырабатываемые единичными ФЭП, то их соединяют последовательно и параллельно в солнечные модули (рисунок 5) имеющие более существенные электрические параметры. В настоящее время различными фирмами производится огромное количество солнечных модулей. Лидером

производства солнечных модулей является фирма Siemens. Этой фирмой выпускаются солнечные модули мощностью 36, 50, 55, 75, 90, 100 Вт. Экономические и технические характеристики модулей приведены в таблице :

**Таблица. Экономические и технические характеристики модулей фирмы Siemens**

Тип Модуля	Мощность, Вт	Ток нагрузки, А	Напряжение на нагрузке, В	Цена, \$
SR-36	36	2.1	17	229
SR-90	90	5.4	17	459
SR-100	100	5.9	17	459

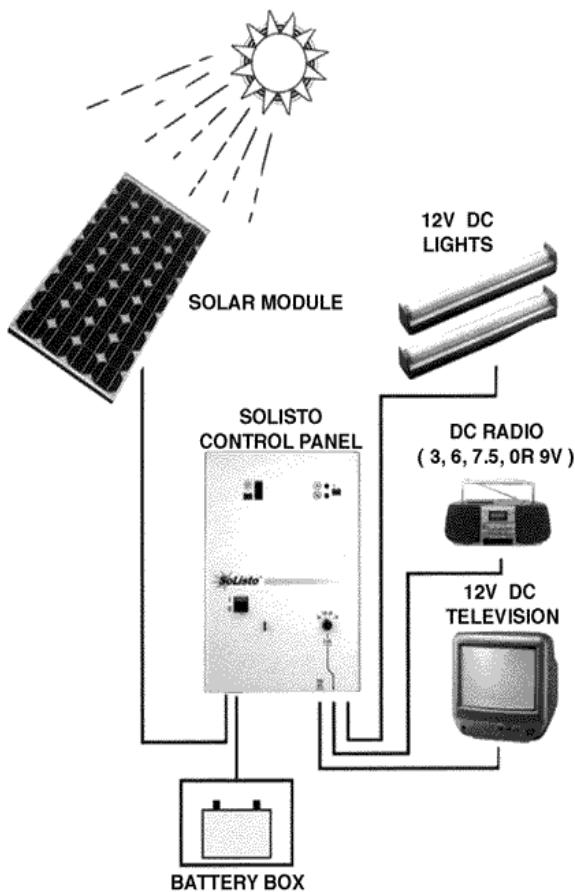


**Рисунок 5. Солнечный модуль фирмы Siemens**

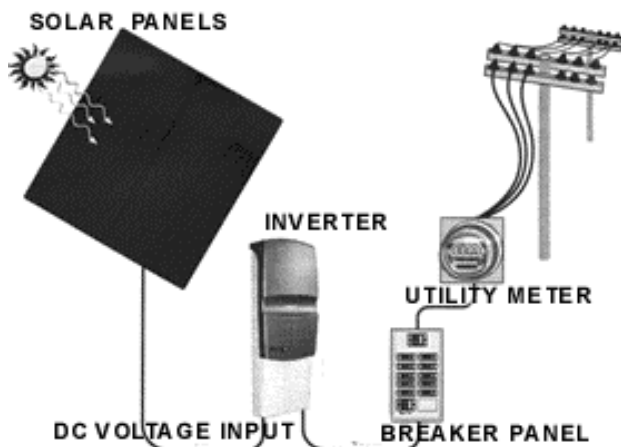
#### **4. Энергетические системы на основе солнечных модулей**

На рынке энергетических систем на основе солнечных модулей предлагается огромное количество систем различающихся по своей мощности и, следовательно, функциональному назначению. Так как солнечный модуль производит электроэнергию в дневное время, а используется она и в вечерний период, то энергетическая система должна содержать как минимум три основных элемента: солнечный модуль, батарею для накопления электроэнергии, автоматизированное устройство управления энергетической системой, в состав которой может входить и инвертор, так как солнечный модуль вырабатывает только постоянное напряжение. В зависимости от мощности цена на энергетические установки может достигать десятков тысяч долларов.

Одна из наиболее экономичных небольших по мощности систем, которые предназначены для питания постоянным напряжением маломощных потребителей являются системы использующие устройство управления Solisto (см. рисунок 6).



**TYPICAL SOLISTO CONFIGURATION  
SHOWN WITH OPTIONAL MODULE AND BATTERY**



**Рисунок 6. Типичная конфигурация  
системы СОЛИСТО**

50Вт система включает в себя кроме управляющего блока, один 50Вт солнечный модуль Siemens и батарею мощностью 100 А\*час. Стоимость системы составляет 739\$. На управляющем устройстве системы имеются выходы постоянного напряжения 12, 9, 7.5, 6, 3 В. По мере увеличения мощности системы ее стоимость возрастает. Так система мощностью 200 Вт включает два 100Вт солнечных модуля Siemens и две батареи емкостью 100А\*час. Стоимость системы 1600 \$. Если использовать модифицированный блок управления, то можно получать переменное напряжение 120В, 60Гц наряду с постоянным напряжением. При этом стоимость системы увеличивается на 250\$.

Энергетические системы RPS охватывают диапазон мощности 360 до 600 Вт. Они могут производить переменное напряжение 120 В, 60 Гц. В состав 600 Вт системы входит зарядное устройство. Стоимость системы 9.965 \$.

В Европе и США распространены энергетические системы для дома мощностью от 1 кВт до 2.5 кВт которые подсоединены к центральной электрической системе и не содержат накопителей электроэнергии. 25 февраля 2000 года в Германии был принят закон, согласно которому правительство приобретает электроэнергию, вырабатываемую ФЭП в дневное время, по цене 0.99DM за 1кВт\*ч. у собственников фотоэлектрических солнечных модулей, подключенных через инверторы со счетчиками в государственную электрическую сеть, а вечером и ночью отдает своим гражданам необходимое им количество электроэнергии по цене 0.2 DM за кВт\*ч.

Этот закон в сочетании с существующей в Германии программой 100 000 солнечных крыш привел к тому, что только в два последние дня Апреля 2000 года поступили заявки на ФЭП модули общей мощностью 20 МВт – это пятая часть общего годового производства ФЭП в Европе и в два раза больше, чем предсказывалось ранее для Германии на весь 2000 год.

При этом для покупателей ФЭП модулей мощностью до 5kWp предлагается практически беспроцентный кредит на 10 лет. Таким образом, правительство стимулирует немцев приобретать фотоэлектрические солнечные модули. Стоимость 1 кВт системы 7000 \$, а 1.5 кВт –10 000\$. Для автономного энергоснабжения деревень,

сельского здравоохранения разработаны системы PS 900, PS 2400 вырабатывающие переменное напряжение 220Вт. Мощность систем составляет 900 Вт и 2400Вт соответственно. Стоимость систем от 20 000\$ до 33 500\$.

## 5. Перспективы снижения стоимости энергетических установок на основе солнечных модулей

Высокая цена установок определяется высокой стоимостью солнечных модулей. При производстве монокристаллических кремниевых ФЭП затрачивается такое количество энергии и труда, которое не окупится в течение всего времени их эксплуатации (20-25 лет). В то же время ФЭП на основе поликристаллической кремниевой ленты являются достаточно коммерчески привлекательными, несмотря на более низкие значения к.п.д., так как в течение их эксплуатации они вырабатывают электроэнергию значительно больше, чем было затрачено на их производство. По мнению большинства ученых наиболее перспективными для наземного использования являются тонкопленочные ФЭП, низкая стоимость которых при массовом производстве и при достаточной эффективности определяется уменьшением толщины ФЭП в 100 раз. Наибольшую эффективность демонстрируют солнечных элементы на основе пленок полупроводниковых поликристаллических соединений  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ ,  $\text{CdTe}$  толщиной порядка нескольких мкм и пленок гидрогенизированного аморфного кремния  $\text{aSi:H}$ . Типичное конструктивно-технологическое решение таких ФЭП приведено на рисунке 9. С 1976 года по 1996 год стоимость ФЭП в US \$, обладающих мощностью 1Вт при интенсивности солнечного излучения  $1000\text{Вт/м}^2$  (\$/Вт\*пик), снизилась на 80%. По прогнозам к концу 2000 года стоимость ФЭП при их массовом производстве может быть снижена почти в два раза по сравнению с 1997 году.

**Снижение стоимости тонкопленочных ФЭП до 1\$/Вт\*пик, которое прогнозируется к 2010 году, сделает фотоэлектричество конкурентно-способным с электроэнергией, производимой на тепловых электростанциях.**

Снижению себестоимости должно способствовать и увеличение эффективности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

Рекордные в 2000 году значения эффективности для лабораторных образцов единичных ФЭП на основе аморфного кремния 13%, пленочных слоев  $\text{CdTe}$  составляли 16%, на основе  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  - 18%. Эффективность моделей составляет (10-12)%. В 2000 году было выпущено несколько десятков МВт пленочных ФЭП (см. таблицу)

**Таблица. Стоимость ФЭП (\$/Вт\*пик) : состояние и прогноз\* .**

Материал ФЭП	1997 г.	2000г.	2010 г.
Поликристаллический Кремний	3.9 – 4.25	1.50 - 2.50	1.20 - 2.00
$\text{CdTe}$	-	1.20 - 2.00	0.75 - 1.25
a-Si	2.50 - 4.50	1.20 - 2.00	0.75 - 1.25
$\text{Cu(InGa)Se}_2$	-	1.20 - 2.00	0.75 - 1.25

\* Прогноз стоимости ФЭП на 2010 год представляет минимальный предел стоимости при существующих технологиях.

**Таблица. К.п.д. (%) солнечных модулей: состояние и прогноз**

Материал ФЭП	1998	2000	2010
Поликристаллический Кремний	13-15	16	20
$\alpha$ -Si	6-8	10	14
CdTe	7-8	12	14
Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	7-8	12	14

**Таблица. Объем производства пленочных солнечных модулей в 2000 году**

Тип	Компания	Объем
$\alpha$ -Si	ASE, Germany	1 МВт*пик
	BP Solar (Solarex), USA	10 МВт*пик
	United Solar, USA	5 МВт*пик
	Kaneka, Japan	20 МВт*пик
	Sharp, Japan	24 МВт*пик
CdTe	ANTEC-Solar, Germany	10 МВт*пик
	BP Solar, USA	10 МВт*пик
CIS	Siemens Solar Industries, USA and Germany	0.5 МВт*пик
	Global Solar, USA	10 МВт*пик
	Würrth Solar/ ZSW, Germany	1 МВт*пик
	ISET. USA	0.02 МВт*пик