

РГГМУ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра "ФИЗИКИ"

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему «Сравнительный анализ эффективности
преобразователей солнечной энергии»

Исполнитель студент гр. Ф-Б13-1
Васильев Егор Максимович

Руководитель проф. каф. физики, д.т.н., доцент
Дьяченко Наталия Владимировна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
канд.ф.-м.н., доцент
Бобровский Анатолий Петрович

« » _____ 2017 г.

Санкт-Петербург

2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ.....	9
1.1 Теоретические сведения.....	9
1.2 Эффективность.....	11
1.3 Способы повышения эффективности.....	15
Глава 2. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	18
2.1 Теория явления.....	18
2.2. КПД и область применения.....	20
2.3 Возможности повышения эффективности.....	20
Глава 3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ.....	25
3.1 Вентильный эффект.....	30
3.2 Эффективность фотоэлектрических преобразователей.....	30
3.3 Современные фотоэлектрические преобразователи	33
3.3.1 Кремний, Si.....	33
3.3.2 Гетероструктуры с арсенидом галлия AlGaAs/ GaAs.....	35
3.3.3 Органические материалы для фотоэлектрических преобразователей.....	37
3.3.3.1 Принципы работы органических фотоэлементов..	37
3.3.3.2 Типы органических солнечных фотоэлементов.....	40

3.3.3.3 Ячейки, сенсibilизированные органическим красителем (B88C).....	41
Глава 4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ И В МИРЕ.....	44
4.1 Российская солнечная энергетика.....	44
4.2 Мировая солнечная энергетика.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Основная энергия, используемая человечеством в настоящее время, добывается из, так называемых, невозобновляемых источников, к которым относятся нефть, газ, уголь, ядерное топливо. Эти источники образовывались миллионы лет в результате процессов, сопровождавших эволюции Земли. С ростом экономического развития ресурсы этих источников стремительно сокращаются и могут закончиться в недалеком будущем [1]. Кроме того сжигание топлива приводит к экологическим нарушениям окружающей среды и, в глобальном масштабе, ведет к увеличению концентрации парниковых газов. Использование ядерного топлива также не лишено экологических проблем в связи с необходимостью захоронения отработанных ядерных отходов и контроля безопасности работы атомных электростанций.

Вместе с тем сокращение потребления электроэнергии не представляется возможным, т.к. потребление энергии на душу населения является одним из критериев экономического развития государства. В связи с этим на первое место выходит задача получения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), не имеющих ограничений во времени, не создающих экологических проблем и обеспечивающих устойчивое развитие.

Большинство ученых сходятся во мнении, что изменения климата неизбежно обусловлены антропогенной составляющей, что было наглядно проиллюстрировано на Парижской конференции по проблемам климата. Соглашение об ограничении углеродных выбросов подписали 127 государств из 194 существующих. Соглашение вступило в действие 4 ноября 2016 года [2].

Ведущие европейские державы и Соединенные Штаты Америки уже давно интенсивно развивают технологии, основанные на ВИЭ. По данным отчета Департамента энергетики США 43% рабочей силы, занятой в сфере

энергетики, приходится на солнечную энергетику и только 22% рабочих мест – на электростанциях, работающих на ископаемом топливе.

В таблице 1 представлены имеющиеся в настоящее время возможности преобразования источников первичной энергии во вторичную энергию, пригодную для потребления.

Таблица 1 - Возможности преобразования источников первичной энергии во вторичную энергию, пригодную для потребления.

Источники первичной энергии	Естественное преобразование энергии	Техническое преобразование энергии	Вторичная потребляемая энергия
Земля	Геотермальное тепло Земли	Геотермальная электростанция	Электричество
Солнце	Испарение атмосферных осадков	Гидроэлектростанции (напорные и свободнопоточные)	
	Движение атмосферного воздуха	Ветроэнергетические установки	
	Морские течения	Морские электростанции	
	Движения волн	Волновые электростанции	
	Таяние льдов	Ледниковые электростанции	
	Фотосинтез	Электростанции на биомассе	
	Поглощение света. Нагрев теплоносителя	Солнечные коллекторы	Теплота
Планеты	Поглощение света. Нагрев контактов	Термоэлектричество	Электричество
	Поглощение света	Солнечные электростанции	
	Приливы и отливы	Приливные электростанции	

В России на текущий момент электроэнергетика на основе ВИЭ, к сожалению, не играет существенной роли в энергетической системе страны,

обеспечивая менее 1% совокупного объема выработки электроэнергии. В Таблице 2 представлены существующие в настоящее время ВИЭ по направлениям генерации.

Таблица 2 - ВИЭ в России по направлениям генерации.

Вид генерирующих объектов	Установленная мощность, МВт	Компании
геотермальная энергия с использованием природных подземных теплоносителей	62,0	ОАО "Геотерм" (62 МВт)
фотоэлектрическое преобразование энергии солнца	60,3	ООО «Авелар Солар Технолоджи» (30 МВт) ПАО «Плюс» (25 МВт) ПАО «Красноярская ГЭС» (5,2 МВт) ООО «АльтЭнерго» (0,1 МВт)
на основе использования энергии ветра	10,9	«Башкирская генерирующаяКомпания» (2,2 МВт) ООО «ЭкоСельЭнерго» (0,9 МВт) ООО "АльтЭнерго" (0,1 МВт)
на основе использования энергии потоков воды (в том числе энергии сточных вод)	8,3	ООО ЗАО «Норд Гидро» (6,4 МВт) ЗАО «Фотон» (1,2 МВт) «Башкирская генерирующаякомпания» (0,4 МВт) ОАО «Ичалковская ГЭС» (0,3 МВт)
использование биомассы	6,0	ОАО «Промышленная мини-ТЭЦ «Белый ручей»» 6,0 МВт)
использование биогаза	3,6	ООО "АльтЭнерго" (3,6 МВт)
использование газа, выделяемого отходами производства и потребления на свалках таких отходов	2,4	ООО "Вирео Энерджи" (2,4 МВт)
энергия приливов	1,7	АО «Ленинградская ГАЭС» (1,7 МВт)
Всего	155,2	

Из таблицы видно, что суммарный объем установленной мощности генерирующих объектов на основе ВИЭ по состоянию на конец 2015 г. оценивается в 155,2 МВт, что и составляет примерно 1% установленной мощности в Единой энергетической системе России. Однако учитывая опережающие разработки развития ВИЭ в зарубежных странах, можно считать работы в этом направлении весьма актуальными и для нашей страны.

По итогам 2013-2015 гг. можно сделать вывод о том, что **фактически** наиболее активно реализуются проекты на основе **фотоэлектрического преобразования энергии солнца**, несмотря на то, что целевые параметры государственных программ предусматривают более 60% генерации ВИЭ на основе энергии ветра, а также 13% - на основе малой гидрогенерации (мощностью до 25 МВт).

Причины весьма незначительной доли солнечной энергетики в общем энергетическом объеме, по-видимому, связаны с небольшими коэффициентами полезного действия (КПД) преобразователей. Вместе с тем нельзя не отметить, что в некоторых областях деятельности человека невозможно использование, практически, никаких других источников энергии, кроме солнечной энергии. Это касается, например, исследований космоса, Арктики и пр. В связи с этим усовершенствование разработанных и создание новых, высокоэффективных преобразователей солнечной энергии представляет собой важную и актуальную научную, техническую и технологическую задачу.

Целью настоящей работы является анализ эффективности различных способов преобразования солнечной энергии существующих путей повышения этой эффективности по отечественным и зарубежным разработкам.

В задачи работы входит анализ потерь энергии, полученной от Солнца, в существующих к настоящему моменту трех крупных направлениях солнечной энергетики – солнечных коллекторах, термоэлектрических генераторах и фотоэлектрических преобразователях.

Структурно работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы и поставлена задача исследования.

В первой главе рассмотрено устройство и принцип работы солнечного коллектора с вакуумными трубками. Выявлены источники необратимых потерь энергии в этом устройстве и обсуждены способы их минимизации. Проведено сравнение эффективности данного современного типа коллектора с эффективностью других коллекторов.

Во второй главе рассмотрен принцип действия термоэлектрического генератора, его КПД и влияние на него электрических и тепловых параметров используемых термоэлектродов.

Третья глава посвящена рассмотрению и сравнительному анализу огромного класса разрабатываемых в настоящее время фотоэлектрических преобразователей. Выявлены источники необратимых потерь энергии и обсуждены способы их устранения.

В четвертой главе приведено современное состояние развития солнечной энергетики в России и за рубежом.

ГЛАВА 1. СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

1.1 Принцип действия коллектора

Впервые солнечный водонагреватель был разработан в 1767 году в Швейцарии. Создавший его швейцарский ботаник Орас Бенедикт де Соссюр с помощью полученной энергии смог вскипятить воду и приготовить суп.

Прототипом современных водонагревателей служит разработанный в 1953 г. и усовершенствованный в 1955 г. в Израиле солнечный водонагреватель с вакуумным коллектором. На рисунке 1.1 показано, как выглядит такой солнечный коллектор.



Рис.1.1 - Внешний вид солнечного коллектора

Простейшая обогревательная система состоит из двух основных блоков:

- наружного блока— солнечных вакуумных коллекторов;
- внутреннего блока— основной контур обогревательной системы.

Наружный блок состоит из вакуумных трубок с нанесенным с внутренней стороны специальным покрытием. Данное покрытие имеет самое важное

значение в работе солнечных коллекторов. На рисунке 1.2 представлена общая схема устройства вакуумной трубки солнечного коллектора.



Рис.1.2 - Схема устройства вакуумной трубки коллектора.

Вакуумная трубка выполнена по принципу термоса: это две коаксиальные трубки, вставленные одна в другую, между которыми создается вакуум, предотвращающий потери тепла. Внутренняя трубка покрыта специальным слоем, который хорошо поглощает солнечную энергию. Медная трубка запаяна и содержит небольшой объем легкокипящей жидкости.

На рисунке 1.3 показана схема передачи тепла к теплоносителю. Под действием поглощенного солнечного излучения жидкость испаряется и забирает тепло вакуумной трубки. Пары поднимаются в верхнюю часть – наконечник, где конденсируются и передают тепло теплоносителю основного контура (незамерзающей жидкости). Конденсат стекает вниз, и процесс «испарения–конденсации» повторяется. Испарение жидкости начинается при достижении температуры внутри трубки $+30^{\circ}\text{C}$. При меньшей температуре трубка "запирается" и дополнительно сохраняет тепло.

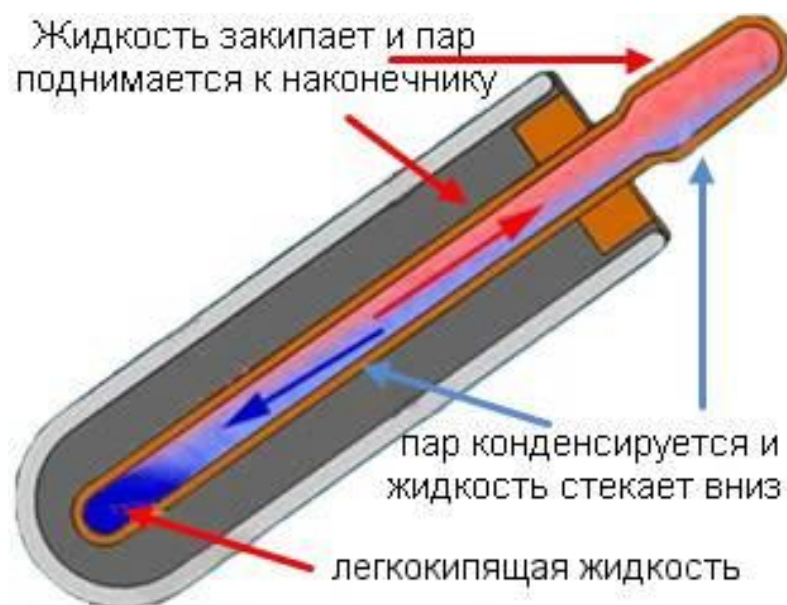


Рис.1.3 - Схема передачи тепла теплоносителю.

Далее тепло передается элементам внутреннего блока (основного контура), которые могут иметь самые разные конструктивные особенности, и здесь не рассматриваются.

1.2 Эффективность солнечного коллектора

Эффективность солнечного коллектора, в основном, определяется коэффициентом полезного действия (КПД) его селективного покрытия [3]. измеряется коэффициентом поглощения (α) солнечной энергии, относительной излучающей способностью (ϵ) длинноволновой тепловой радиации и отношением поглощательной и излучательной (α/ϵ) способности. В таблице 1.1 приведены некоторые виды селективных покрытий и характеристики их поглощения и излучения.

Таблица 1.1 - Характеристики селективных покрытий.

Поверхность	Поглощательная способность для солнечной энергии, α	Излучательная способность для длинноволнового излучения поверхностей, типичных для плоских солнечных коллекторов, ϵ
«Черный никель»; содержит окиси и сульфиды Ni и Zn на полированном Ni	0,910,94	0,11
«Черный никель» на оцинкованном железе	0,89	0,160,18
«Черный никель» 2 слоя поверх гальванопокрытия из Ni на мягкой стали (α и ϵ после 6-часового погружения в кипящую воду)	0,94	0,07
CuO на Ni; медь в качестве электрода с последующим окислением	0,81	0,17
Co ₃ O ₄ на серебре; методом осаждения и окисления	0,90	0,27
CuO на Al; методом набрызгивания разбавленного раствора Cu(NO ₃) ₂ на горячую алюминиевую пластину с последующей горячей сушкой	0,93	0,11
«Черная медь» на Cu; методом обработки Cu раствором NaOH и NaClO ₂	0,89	0,17
«Эбанол С» на Cu; промышленная обработка чернением Cu, обеспечивающая покрытия в основном на CuO	0,90	0,16
CuO на анодированном Al; обработка Al горячим раствором Cu(NO ₃) ₂ —KMnO ₄	0,85	0,11
Горячая сушка Al ₂ O ₃ —Mo—Al ₂ O ₃ Mo—Al ₂ O ₃ Mo—Al ₂ O ₃ ; промежуточные слои на Mo (ϵ измеряется при 260°C)	0,91	0,085
Кристаллы PbS на Al	0,89	0,20

На рисунке 1.4 схематично приведены возможные потери энергии в солнечном коллекторе.

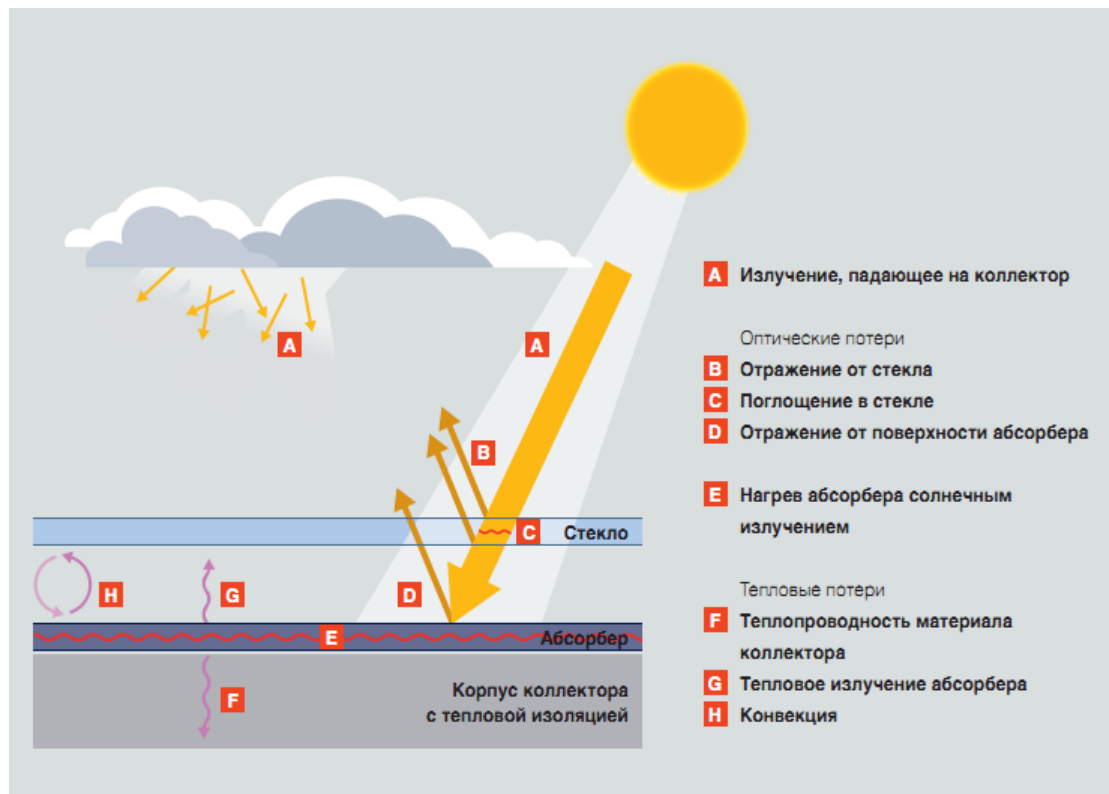


Рис.1.4 - Потери энергии в солнечном коллекторе.

КПД солнечных коллекторов в первом приближении может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k \cdot \Delta T}{E}, \quad (1.1)$$

где η_0 - номинальный (оптический) КПД установки при нормальных условиях,

k — коэффициент, зависящий от типа и теплоизоляции коллектора,

ΔT — разность температур теплоносителя и окружающего воздуха ($^{\circ}\text{C}$),

E — освещенность поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Помимо вакуумных коллекторов используются и некоторые другие, представленные на рисунке 1.5.



Рис.1.5 - Различные виды коллекторов.

Данные по эффективности для некоторых типов коллекторов приведены в таблице 1.2

Таблица 1.2 - КПД коллекторов различного типа.

Тип коллектора	Номинальный КПД, η_0 , %	Коэффициент k
Плоский солнечный коллектор	72-75	3-5
Вакуумный солнечный коллектор с тепловыми трубками	70-75	0,7-1,1
Пластиковый солнечный коллектор	50-60	до 80

1.3 Способы и возможности повышения КПД солнечного коллектора

Величина КПД солнечного коллектора определяется формулой (1.1). Изменяя величины параметров, входящих в эту формулу, можно добиться повышения КПД.

Во-первых, можно увеличить значение E – освещенности поглощающей поверхности коллектора. Конечно, в первую очередь, необходимо устанавливать коллектор на южную сторону крыши дома. Это позволяет значительно повысить получаемую мощность, а, кроме того, снизить расходы за счет уменьшения площади пластин коллектора. Во-вторых, известно, что наибольшее поглощение происходит при перпендикулярном падении солнечных лучей на поверхность. Чтобы добиться этого эффекта солнечные коллекторы устанавливают на крышах домов, приближая направление нормали к плоскости крыши к направлению солнечного луча. Сложность состоит в том,

что в разные периоды года Солнце в наших широтах поднимается на разные углы над горизонтом, поэтому желательно иметь возможность изменять угол наклона плоскости коллектора по отношению к земле от 30° в летнее время до 70° в зимнее время. В-третьих, можно использовать коллекторы-концентраторы путем введения параболо-цилиндрических отражателей [4], проложенных под поглощающими элементами. Это позволяет повысить эксплуатационную температуру до $120\div 250^{\circ}\text{C}$, однако подобная конструкция требует установки устройства слежения за Солнцем.

Во-вторых, на производительность солнечного коллектора влияет скорость потока теплоносителя. Снижение скорости потока способствует уменьшению гидравлических потерь и позволяет использовать менее мощные насосы и меньшие диаметры труб. Вместе с тем снижение скорости потока теплоносителя приводит к повышению температуры абсорбера, что увеличивает тепловые потери солнечного коллектора в окружающую среду, таким образом, часть полезного тепла просто теряется, не доходя до теплового аккумулятора.

В-третьих, в соответствии с формулой (1.1) возможно повышение η_0 за счет подбора соответствующего состава и технологии изготовления селективного покрытия. Данные таблицы 1.2 позволяют произвести оптимальный выбор такого покрытия.

В-четвертых, из формулы (1.1) следует, что можно повысить эффективность, понижая разность температур ΔT , т.е. понижая температуру теплоносителя при возвращении в зону поглощения солнечного излучения. На рисунке 1.6 приведены зависимости КПД коллекторов от этой разности температур. Из рисунка явно следует, что при малых значениях ΔT у всех типов коллекторов весьма высокий КПД.

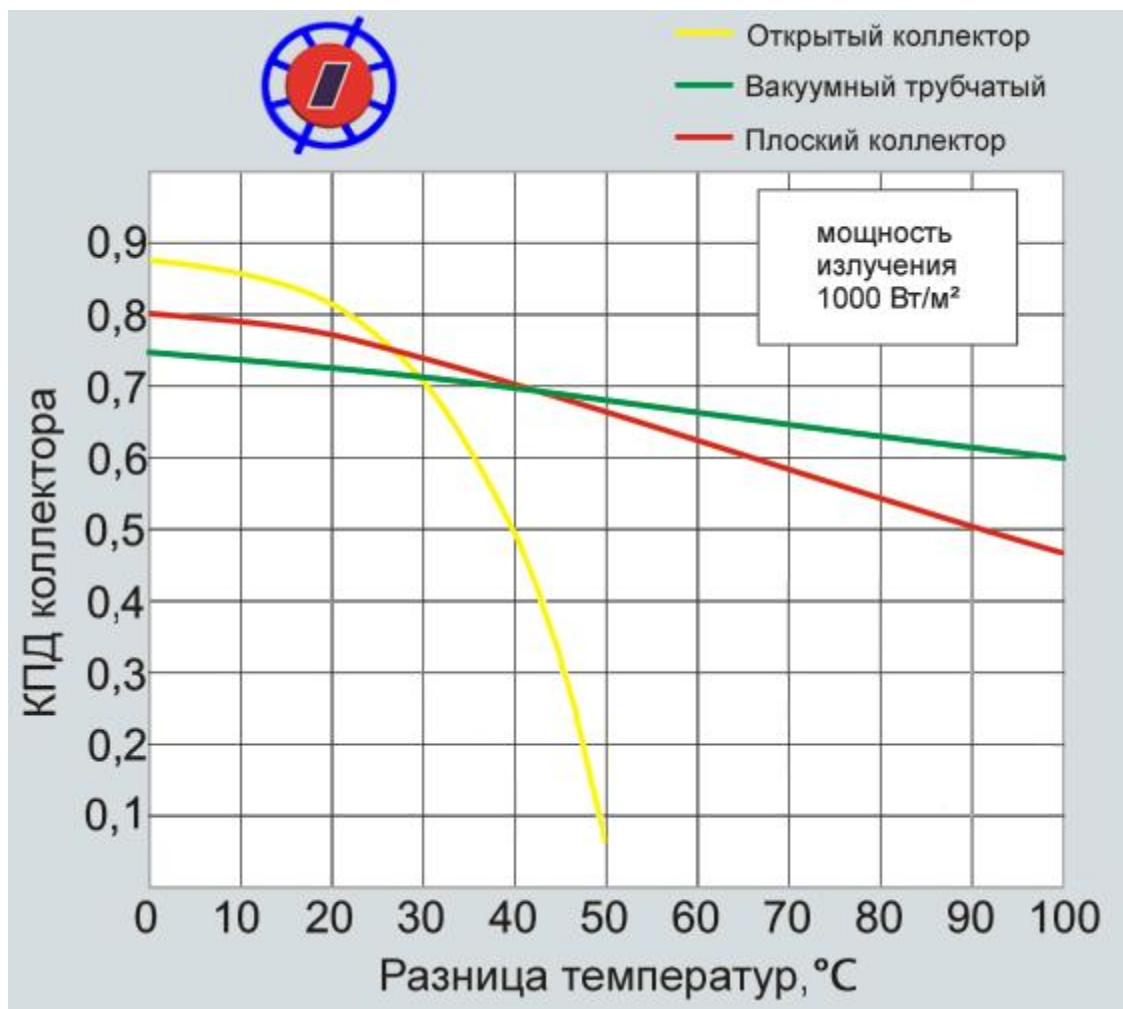


Рис. 1.6 - Зависимость КПД коллекторов различного типа от разности температур теплоносителя и окружающей среды ΔT .

Таким образом, гелиосистемы, построенные на основе солнечных коллекторов, являются весьма эффективными устройствами, позволяющими получить КПД более 70%.

ГЛАВА 2. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1 Теория явления Зеебека

В 1821 г. немецкий физик Зеебек обнаружил существование явления, впоследствии названного термоэлектрическим. Суть его заключалась в том, что если составить цепь из нескольких разнородных проводников и затем места контактов поддерживать при разных температурах, то на их свободных концах появится термоэлектродвижущая сила [5]. На рисунке 2.1 приведен пример такой цепи. Замкнув такую цепь на миллиамперметр, мы будем регистрировать электрический ток до тех пор, пока температуры контактов не выровняются.

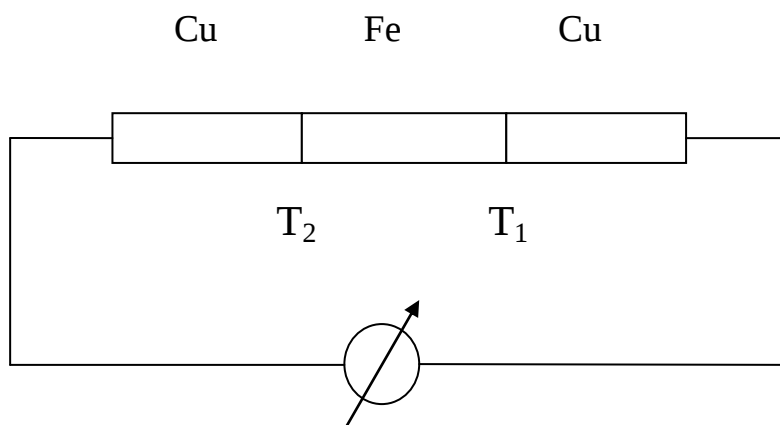


Рис.2.1 - Термоэлектрическая цепь.

Оказалось, что величина термоэлектродвижущей силы $\mathcal{E}$ зависит от разности температур между горячим и холодным спаем и от термоэлектрических свойств ветвей цепи. Для металлических термопар величина термо-э.д.с. $\mathcal{E}$ может быть представлена следующей формулой

$$\mathcal{E} = \alpha (T_2 - T_1), \quad (2.1)$$

где α – коэффициент термоэлектродвижущей силы, численно равный разности потенциалов, возникающей при разности температур в один градус.

Для большинства металлов значения α невелики и не превышают нескольких десятков микровольт на градус. С развитием полупроводниковой физики оказалось возможным значительно повысить значение термо-э.д.с. Представим себе, что мы нагреваем один конец полупроводниковой проволоочки, а другой конец охлаждаем. Носители электричества (электроны или дырки) начнут диффундировать из области с высокой температурой, в которой как их концентрации, так и их кинетическая энергия имеют большие значения, в область с пониженной температурой, где эти значения ниже. С другой стороны, происходит и перемещение носителей из холодного конца в горячий. В самом начале процесса, до установления термодинамического равновесия, число носителей, перемещающихся от горячего конца к холодному, будет больше, чем в обратном направлении. Это перемещение зарядов приведет к быстрому возникновению избытка положительных зарядов на одном конце и отрицательных – на другом. Возникновение этих объемных зарядов приведет к появлению внутреннего электрического поля. Возрастающее электрическое поле будет тормозить диффузию зарядов от горячего конца к холодному, что, в конце концов, приведет к равновесному состоянию: потоки от горячего конца к холодному и обратно сравняются. Возникшая при этом разность потенциалов и будет термоэлектродвижущей силой.

В отличие от металлов коэффициент термоэлектродвижущей силы у полупроводников значительно выше, чем у металлов. Связано это с тем, что у металлов энергия свободных электронов весьма слабо зависит от температуры, а их концентрация постоянна при любых условиях. Слабо зависит от температуры и положение химического потенциала. У полупроводников все перечисленные параметры имеют сильную температурную зависимость. Все это вместе и обуславливает высокую термоэлектрическую активность.

2.2 Эффективность термоэлектрических преобразователей

Сначала термоэлектрический эффект Зеебека использовался только в опытах с измерением температур – термометрии. Для измерения температур использовались термопары из металлов, КПД которых, определяемый как отношение полученной электрической мощности к подведенной тепловой мощности, по вышеупомянутым причинам не превышал долей процента. В 50-х годах прошлого века академик А.Ф.Иоффе предложил использовать вместо металлов полупроводники, была разработана теория термоэлектрического эффекта в полупроводниках и синтезированы весьма эффективные материалы.

Согласно этой теории КПД термоэлектрического генератора вычисляется по формуле [6]

$$\eta = \frac{T_{\Gamma} - T_x}{T_{\Gamma}} \cdot \frac{M - 1}{M + T_x/T_{\Gamma}}, \quad (2.2)$$

$$\text{где } M = \sqrt{1 + zT_{\text{ср}}}, \quad z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}.$$

Здесь z – добротность полупроводникового материала ($^{\circ}\text{K}^{-1}$), α – приведенная дифференциальная термо-э.д.с. ветвей термоэлементов ($\text{мкВ}/^{\circ}\text{K}$), σ и λ – приведенные электропроводность и теплопроводность ветвей термоэлементов соответственно ($(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ и $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{K}$), T_{Γ} – температура горячего спая ($^{\circ}\text{K}$), T_x – температура холодного спая ($^{\circ}\text{K}$), $T_{\text{ср}}$ – средняя температура ветви термоэлемента $T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Gamma} + T_x}{2}$ ($^{\circ}\text{K}$), M – критерий Иоффе.

2.3 Возможности повышения эффективности работы термоэлектрических преобразователей

Приведенная формула (2.2) содержит два сомножителя, первый из которых – термический КПД обратимого цикла Карно, а второй – коэффициент необратимых потерь энергии [7]. На рисунке 2.2 приведена схема термоэлектрического преобразователя. Повышение эффективности работы термоэлектрического преобразователя возможно достичь двумя путями: увеличением термического КПД преобразователя (КПД цикла Карно) и снижением необратимых потерь энергии во всех элементах энергоустановки. Первый путь возможен, так как концентрированное излучение позволяет получать очень высокие температуры. Соединяя между собой отдельные термоэлементы, можно создать достаточно мощные термобатареи, одна из которых показана на рис. 2.2,б. Батарея размещена в фокальной плоскости концентратора (3); ее горячие спаи (1) непосредственно обогреваются солнечной концентрированной радиацией, а отвод тепла от холодных спаев (2) осуществляется излучением. Однако при этом сильно возрастают требования

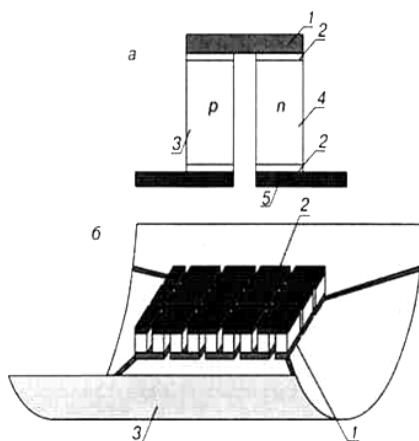


Рис. 2.2 - Схема термоэлектрического преобразователя: а - отдельный термоэлемент, б - термоэлектрический модуль на концентраторе.

к точности систем слежения за Солнцем, что для громадных по размерам концентрирующих систем вряд ли достижимо. Поэтому предпочтительнее заниматься снижением необратимых потерь.

Внутренние необратимые потери связаны с оттоком тепла по 3 и 4 ветвям от горячих (1) к холодным (5) спаям, т.е. за счет обычного явления теплопроводности. Спаи выполняются из меди, и, в целях уменьшения теплопроводности, отделены антидиффузионными слоями (2). Для уменьшения необратимых потерь по этой причине необходимы материалы с возможно меньшей теплопроводностью. При этом определенные ограничения накладываются на длину и поперечное сечение термоэлементов.

Кроме потерь на теплопроводность часть энергии будет теряться за счет омических потерь в самих электродах. Эти потери зависят от размеров электродов и их удельного сопротивления и уменьшаются с уменьшением удельного сопротивления электродов.

Для повышения КПД необходимо иметь возможно больший коэффициент термо-э.д.с., чтобы указанные факторы снижения КПД имели меньшее значение.

Как следует из формулы, КПД реального термоэлемента зависит от комплекса физических свойств материала термоэлектродов и определяется добротностью z . Чем выше добротность, тем ближе КПД реального термоэлемента к КПД цикла Карно. Первые термоэлементы имели очень низкие характеристики, т.к. у металлов добротность не превышала $(10 \div 8) \cdot 10^{-7} (^{\circ}\text{K}^{-1})$.

Исследование полупроводников показало, что у некоторых из них добротность доходит до $0,001 (^{\circ}\text{K}^{-1})$, т.е. в десятки тысяч раз выше, чем у металлов. Это позволяет получать КПД термоэлементов до 10-15%. Кроме того,

у полупроводников коэффициент термо-Э.д.с в сотни и тысячи раз выше. Наилучшие термоэлектрические свойства получаются тогда, когда в качестве термоэлектродов выбираются два полупроводника с различным типом проводимости. Теплопроводностью и электропроводностью таких полупроводников можно управлять, вводя соответствующие примеси или применяя специальную технологическую обработку.

В таблице 2.1 приведены некоторые характеристики современных термоэлектродов [7].

Таблица 2.1 - Некоторые характеристики современных термоэлектродов.

Группа термоэлектродов	Диапазон рабочих температур, °K	Состав термоэлектродов	Добротность, °K ⁻¹	КПД, %
Низкотемпературные	400-600	Теллурид висмута, твердые растворы теллура, висмута, селена, раствор висмут-олово	0,001	8-10
Среднетемпературные	600-950	теллуристый свинец, селенистый свинец, теллурид германия и др	0,001-0,002	15
Высокотемпературные	До 1500	Обе ветви выполняются из комбинаций полупроводников одного типа проводимости, но с разным диапазоном рабочих температур	0,003	31

В настоящее время получен интересный вариант термоэлектрического преобразователя на основе сульфида самария (SmS) [8]. В этом термоэлектроде происходит изменение валентности ионов металла самария, при котором скачкообразно увеличивается количество свободных электронов, образуя ЭДС. Особенность этого метода заключается в том, что: 1. Генерация развивается скачком при достижении некоторого (критического) значения параметров - температуры и концентрации свободных электронов; 2. Генерируемое напряжение состоит из большого числа отдельных импульсов,

соответствующих коллективному изменению валентности ионов самария в различных областях преобразующего элемента, имеющих различную концентрацию свободных электронов ввиду различной степени легирования SmS; 3. Генерация напряжения продолжает развиваться после выключения источника внешнего нагрева, что является следствием саморазогрева SmS, возникающего в процессе генерации и не дающего в течение некоторого времени опуститься температуре ниже критического значения.

Несмотря на довольно низкий КПД термоэлектрические генераторы нашли широкое применение для питания переносных устройств электроники, что объясняется простотой их эксплуатации, высокой надежностью и относительно небольшой стоимостью.

Термоэлектрические генераторы находят применение в удаленных точках Земли, например в Арктике, и в космосе, где от источника питания требуются большая долговечность, малые размеры, отсутствие движущихся механических деталей и пониженная чувствительность к условиям окружающей среды.

ГЛАВА 3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

3.1 Вентильный фотоэффект

Явление возникновения электродвижущей силы (ЭДС) при освещении материала светом было открыто в 1876 г. Адамсом и Деєм и получило название вентильного фотоэффекта. В системе, состоящей из двух разных материалов, при поглощении световых квантов возникает ЭДС [9]. Если использовать металл и полупроводник, то такой контакт называется контакт Шоттки, если два полупроводника с различным типом проводимости - то *p-n*-переход, а если два полупроводника, различных по химическому составу, то –гетероструктура.

Для возникновения вентильного фотоэффекта необходимо осуществление двух процессов – внутреннего фотоэффекта и пространственного разделения порожденных светом неравновесных электронно-дырочных пар.

Внутренний фотоэффект происходит, если энергия освещающего кванта превосходит некоторую характерную для материала энергию и называется энергией «красной границы фотоэффекта» $\varepsilon_{\text{красн}}$

$$h\nu \geq \varepsilon_{\text{красн}},$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ – постоянная Планка. В случае собственной фотопроводимости полупроводника эта энергия равна ширине запрещенной зоны E_G

$$\varepsilon_{\text{красн}} \geq E_G ,$$

а в случае примесной проводимости - энергии ионизации примесного центра E_I

$$\varepsilon_{\text{красн}} \geq E_I$$

Второй этап – это разделение электронно-дырочной пары на отдельные, не связанные друг с другом носители. Такой эффект достигается в системе,

состоящей из p и n полупроводников или в гетероструктуре. Контакт p -и- n полупроводников приводит к образованию между ними контактной разности потенциалов. Если работа выхода дырочного полупроводника больше работы выхода электронного (что бывает всегда в полупроводниках одного и того же химического состава), то контактное электрическое поле направлено от электронного полупроводника к дырочному.

Освобожденные светом неосновные носители тока, т.е. электроны в дырочном полупроводнике и дырки в электронном, свободно перемещаются по всем направлениям. Однако при подходе к p - n переходу один вид носителей (электрон или дырка) под действием контактного поля будет переходить через запирающий слой из одного полупроводника в другой. Противоположный вид носителей перейти не сможет и останется в освещаемом полупроводниковом слое.

Пусть освещается дырочный полупроводник, изображенный на рисунке 3.1, где представлена схема p - n перехода. Возникшие в нем под действием света пары при подходе к p - n переходу разделятся – дырки (как основные носители) останутся в дырочном полупроводнике, а электроны (неосновные носители), подхваченные контактным электрическим полем, перейдут через запирающий слой в полупроводник с электронным типом проводимости. По мере перехода неосновных носителей тока из одного полупроводника в другой будет увеличиваться их накопление в одной части рассматриваемой системы, в то время как в другой части будет происходить накопление основных носителей. Таким образом, образованные светом пары начнут разделяться: электроны будут концентрироваться в электронном полупроводнике, а дырки – в дырочном. Это накопление носителей не может продолжаться бесконечно, т.к. вместе с возрастанием дырок в дырочном полупроводнике и электронов в электронном возрастает создаваемое ими электрическое поле, препятствующее переходу неосновных носителей через запирающий слой в другой полупроводник. По мере возрастания этого поля будет возрастать и обратный

ток неосновных носителей. Так будет продолжаться до тех пор, пока не установится динамическое равновесие, когда сравняются потоки неосновных носителей через запирающий слой в обоих направлениях. В это момент между электродами и установится окончательная разность потенциалов, которая и будет представлять собой фото-ЭДС.

Для вентильного фотоэффекта характерны следующие особенности:

Число неосновных носителей N , перемещающихся за единицу времени из освещаемого полупроводника через запирающий слой

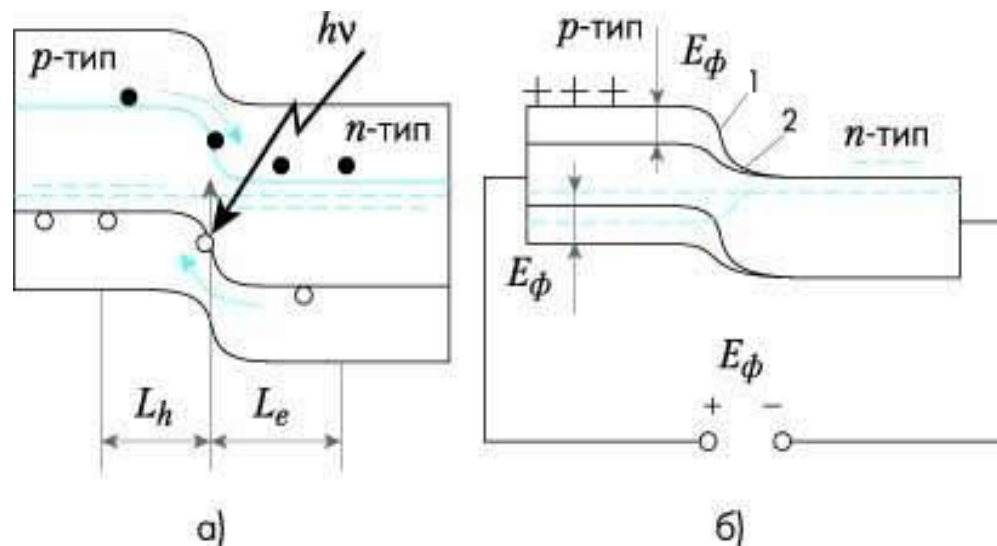


Рис.3.1 - Зонная модель p-n-перехода: а) - в начальный момент освещения; б) - изменение зонной модели под действием постоянного освещения и возникновение фото-ЭДС E_ϕ .

в другой полупроводник, зависит от интенсивности светового потока. С его возрастанием увеличивается значение N . Сначала это увеличение идет по линейному закону, а затем замедляется и, наконец, наступает насыщение. Следовательно, с изменением N в зависимости от светового потока изменяется и величина фото-ЭДС.

Если включить такую систему в цепь с некоторой внешней нагрузкой R , представленную на рисунке 3.2, то при данном уровне освещения этой системы в цепи нагрузки установится некоторый ток I , определяемый разностью потоков носителей, идущих через p - n переход в одном и другом направлении. В полупроводниковых системах, образующих один p - n переход, величина E_{ϕ} при больших освещенностях может достигать значений от сотых и десятых долей до одного вольта и выше. Максимальное значение фото-ЭДС определяется, в основном, шириной запрещенной зоны E_G того или иного полупроводникового вещества: величина фото-ЭДС тем больше, чем больше E_G . Максимальное значение фото-ЭДС не может быть больше E_G .

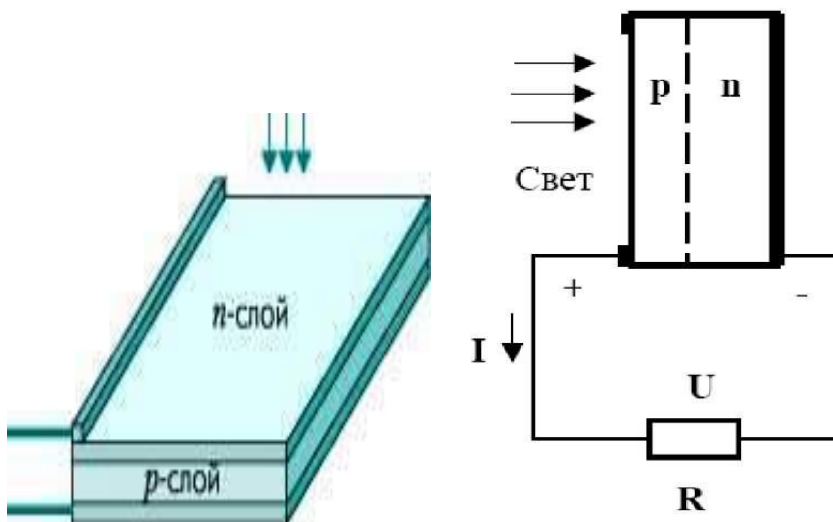


Рис. 3.2 - Фотоэлектрический преобразователь (вентильный элемент sp - n -переходом)и его включение в режиме солнечной батареи.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводниковой системы с p - n -переходом может быть представлена аналитической формулой

$$I = I_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) - I_L,$$

где I –ток во внешней цепи, I_s –ток насыщения через неосвещенный p - n -переход, e –заряд электрона, V - внешняя разность потенциалов на p - n -переходе, k –постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, I_L – ток, созданный возбужденными светом носителями. Семейство кривых, отражающих эту зависимость, изображено на рисунке 3.3. Каждая из кривых соответствует определенному значению I_L . Точки ВАХ, лежащих на оси токов, дают значения величин токов короткого замыкания $I_{к.з.}$, когда $R = 0$.

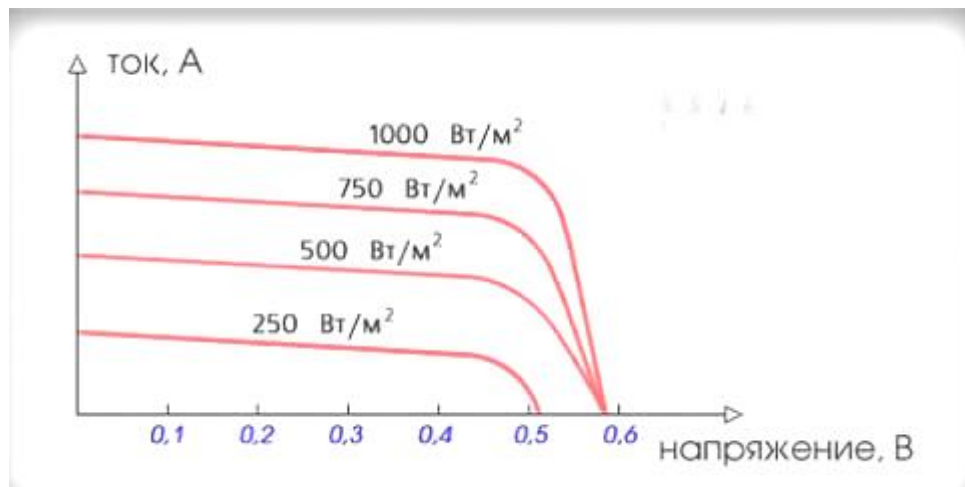


Рис.3.3 - Пример ВАХ p - n -перехода при различных освещенностях.

Точки, лежащие на оси напряжений, отражают те случаи, когда внешняя цепь разомкнута ($R = \infty$) и соответствуют напряжению холостого хода системы V_{xx}

$$V_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_s} + 1 \right).$$

- Для вентильного фотоэффекта характерно, что его чувствительность резко зависит от спектрального состава излучения. В большинстве случаев спектральная характеристика имеет один ярко выраженный максимум.

- Вентильный фотоэффект особенно активно протекает в полупроводниковых системах с большой диффузионной длиной неосновных носителей тока и, соответственно, большим временем их жизни, на рисунке 3.1.1 они обозначены как L_h и L_e . Электроны и дырки не могут блуждать в кристалле как угодно долго. Появившись в некоторой точке К, носитель тока по истечении промежутка времени τ попадает в точку М, где и рекомбинирует. С момента рождения и до рекомбинации он переместится на расстояние КМ, которое и называется диффузионной длиной неосновного носителя заряда. Чем больше диффузионная длина, тем большее количество неосновных носителей достигнет области p - n -перехода. Если бы можно было создать поглощающий слой очень тонким, чтобы его толщина не превышала бы по своей толщине диффузионную длину, тогда все носители, созданные в этом слое, достигли бы p - n -перехода. По ряду причин делать такой тонкий слой нецелесообразно, поэтому стремятся увеличивать диффузионную длину. В обычных полупроводниках по порядку величины диффузионная длина не превышает тысячных долей сантиметра, однако в особо чистых германии и кремнии она достигает нескольких миллиметров.

3.2. Эффективность фотоэлектрических преобразователей

Фотоэлектрический эффект является уникальным способом превращения энергии Солнца непосредственно в электрическую энергию без каких-либо промежуточных этапов, поэтому должен быть наиболее энергетически выгоден. Вместе с тем КПД вентильных фотоэлементов имеют весьма скромные значения в 10—15 %, обусловленные природой самого эффекта [10].

Идеальный фотоэлемент на каждый падающий фотон создавал бы одну пару электрон-дырка, и эти носители все до одного достигали бы соответствующих электродов без потерь своих энергий. Если определить КПД фотоэлемента как отношение созданной электрической мощности W к мощности падающего светового потока Φ , $\eta = \frac{W}{\Phi}$, то фотоэлемент работал бы с максимальной эффективностью в 100%. На самом деле в фотоэлементе неизбежны энергетические потери. Все эти потери можно разделить на две группы – это так называемые «световые потери» и потери в самом фотоэлементе.

Световые потери складываются из следующих частей:

1. Часть падающего на поверхность фотоэлемента светового потока Φ – отражается и, следовательно, не участвует в создании носителей тока. Обозначим ее $\Phi_{\text{отр}}$.
2. Вторая часть светового потока Φ проходит сквозь всю толщу полупроводника, доходит до заднего металлического электрода, поглощается в нем и, таким образом, в фотоэлектрическом смысле становится бесполезной. Обозначим ее через $\Phi_{\text{пр}}$
3. Третья часть, обозначим ее $\Phi_{\text{н}}$, поглощается толщиной полупроводника, но при этом носители тока не создаются. Это фотоэлектрически неактивный вид поглощения.

Итак, световые потери $\Phi_{\text{св}} = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{пр}} + \Phi_{\text{н}}$. По общей оценке для некоторых фотоэлементов они достигают 60% от падающего на фотоэлемент светового потока Φ . Поэтому борьба идет за снижение каждой из этих составляющих.

Рассмотрим теперь энергетические потери, возникающие в результате образования пар и движения носителей тока в толще фотоэлемента. Они также складываются из нескольких частей:

1. Часть фотоактивного лучистого потока $\Phi - \Phi_{\text{св}}$, поглощаемого полупроводником, создает пары электрон-дырка. Однако не все электроны и дырки доходят до своих электродов. В процессе их передвижения часть из них обязательно рекомбинирует, при этом происходит передача части энергии кристаллической решетке.
2. Движение электронов и дырок сквозь толщу полупроводника и через контакты фотоэлемента также сопровождается потерей энергии.
3. В каждом фотоэлементе есть шунтирующие сопротивления. В процессе движения фотоносителей через шунтирующее сопротивление происходит утечка, как фотоэлектронов, так и фотодырок.
4. Движение фотоносителей сопровождается их переходом в пределах одной и той же энергетической зоны с вышележащих энергетических уровней на нижележащие. Этот процесс обусловлен столкновениями фотоносителей с атомами вещества.

Если подсчитать все эти потери, то они достигают почти 100% по отношению к поглощенной энергии $\Phi - \Phi_{\text{св}}$. Теперь можно сформулировать требования к конструкции и веществу фотоэлемента, позволяющие поднять его КПД:

1. В веществе, из которого создается фотоэлемент, время жизни фотоносителей должно быть максимальным.
2. Необходимо создавать *p-n*-переход, находящийся от верхнего электрода на расстоянии, меньшем диффузионной длины.
3. Конструкция фотоэлемента должна предусматривать оптимальное соотношение между глубиной залегания *p-n*-перехода, диффузионной длиной и скоростью рекомбинации на поверхности

фотоэлемента. Выполнение этих соотношений позволит большему числу носителей достигнуть своего электрода.

4. Ширина запрещенной зоны полупроводника должна иметь оптимальное значение, равное энергии квантов облучения.

3.3 Современные фотоэлектрические преобразователи и способы повышения КПД

Среди огромного множества материалов для создания солнечных батарей можно выделить две основных группы – это материалы на основе кремния Si и материалы на основе гетероструктур арсенида галлия AlGaAs/GaAs и его композиций.

3.3.1 Кремний, Si

Кремний рассматривается в виде двух модификаций – кристаллический и аморфный гидрогенизированный α -Si:H [11-13]. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического, поэтому возможно использование очень тонких аморфных пленок толщиной 0,1 – 0,5 мкм, тогда как кристаллические пленки для того же поглощения должны иметь толщину 300 мкм. В настоящее время достигнутый КПД солнечных преобразователей на аморфном кремнии составляет 12%, что несколько ниже, чем на кристаллическом (15%). Усовершенствование технологии изготовления солнечных батарей на основе аморфного кремния в скором времени позволит достигнуть теоретический предел КПД в 16%.

Более высокой эффективностью обладают фотоэлементы на основе аморфного кремния с *p-i-n*-структурой, где посередине находится нелегированная область, поглощающая существенную долю света, рисунок 3.4.

Вместе с тем, диффузионная длина дырок в α -Si:H очень мала (~ 100 нм), поэтому носители заряда достигают электродов, в основном, только благодаря внутреннему электрическому полю, т.е. за счет дрейфа. В фотоэлементах на основе кристаллических полупроводников носители заряда, имеют большую диффузионную длину (100 - 200 мкм) и достигают электродов в отсутствие электрического поля. Поскольку в простом p - n -переходе в α -Si:H область сильного электрического поля очень узка и диффузионная длина носителей заряда мала, в большей части полупроводника не происходит эффективного разделения носителей заряда, генерируемых при поглощении света. Следовательно, для получения эффективных фотоэлементов на основе p - i - n -структуры аморфного гидрогенизированного кремния необходимо добиться во всей i -области однородного мощного внутреннего электрического поля, достаточного для достижения длины дрейфа носителей, соизмеримого с размерами области поглощения.

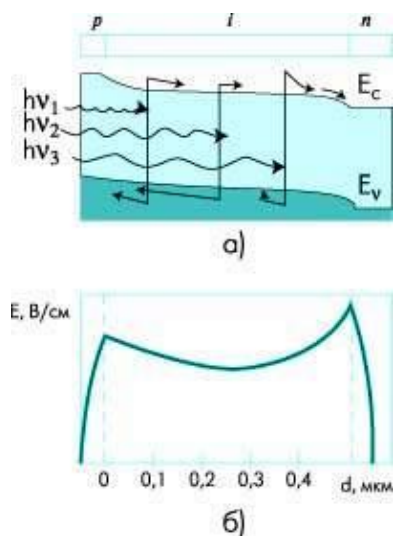


Рис. 3.4 - Энергетическая зонная диаграмма p - i - n -структуры (а) и расчетное распределение электрического поля (б).

Такое поле можно создать, используя определенные технологические приемы, например, формировать сначала p -слой малой толщины (10 нм), чтобы основное поглощение происходило в нелегированной i - области.

3.3.2 Гетероструктуры с арсенидом галлия AlGaAs/ GaAs

Теоретический КПД фотоэлектрических преобразователей на основе соединений мышьяка с галлием более высок, чем у кремниевых, благодаря оптимальной для поглощения солнечного излучения ширине запрещенной зоны, которая равна 1,4 эВ, тогда как у кремниевых фотоэлементов она равна только лишь 1,1 эВ. В арсениде галлия поглощение происходит прямыми оптическими переходами, поэтому высокий КПД может быть достигнут при значительно меньшей толщине фотопреобразователя, чем в случае кремния. Для достижения КПД 20% достаточно иметь толщину арсенида галлия 5-6 мкм, тогда как толщина кремния должна быть не менее 50-100 мкм [14].

Следующим неоспоримым преимуществом гетероструктур на основе арсенида галлия является малая чувствительность их КПД к температуре, обусловленная большой шириной запрещенной зоны [15]. Так повышение температуры до 180 °С не приводит к существенному снижению КПД, тогда как у кремниевых фотоэлементов повышение температуры до 60 °С приводит к снижению КПД в двое. Благодаря этому замечательному свойству фотоэлементы с арсенидом галлия можно использовать совместно с концентраторами солнечной энергии.

Гетероструктуры на основе арсенида галлия обладают повышенной радиационной устойчивостью, мало подвержены разрушению потоками протонов и электронов высоких энергий. Радиационные дефекты если и появляются, то могут быть уничтожены после термической обработки (отжига).

Вследствие высокого уровня поглощения в гетероструктурных фотоэлементах КПД достаточно высок, несмотря на малое время жизни и диффузионную длину неосновных носителей.

На рисунке 3.5 показана гетероструктура на основе арсенида галлия с КПД 37,7%, достигнутым к настоящему времени японской компанией

Sharp[16]. Подобного показателя удалось достигнуть за счет использования трех слоев, поглощающих свет различной длиной волны. Достижение было подтверждено в институте AIST. Первый верхний слой фотоэлемента изготовлен из фосфида галлия-индия, второй - из арсенида галлия, нижний слой - из арсенида галлия-индия.

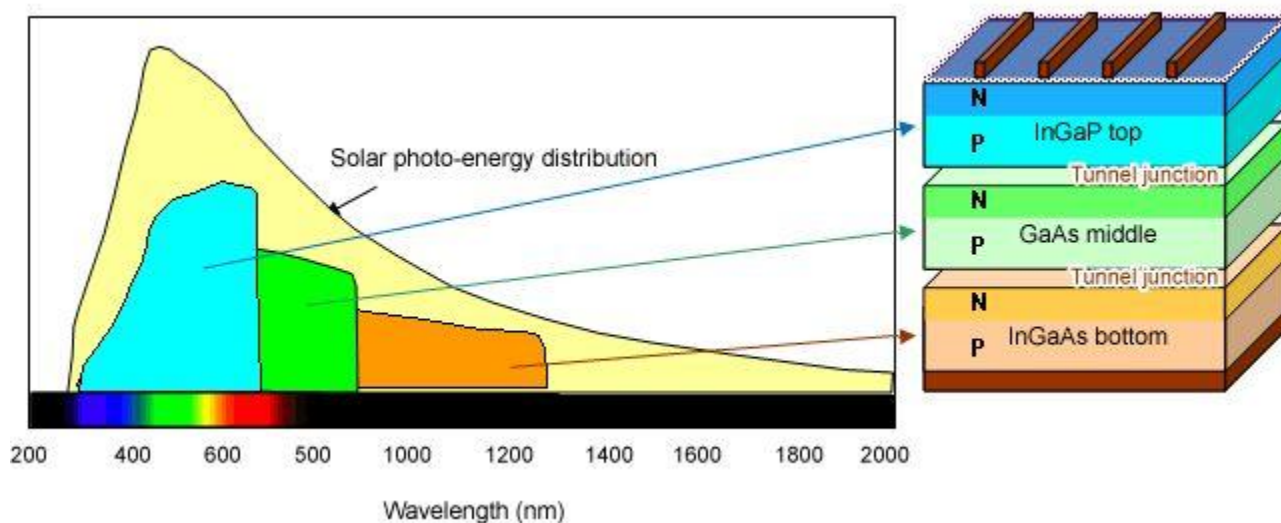


Рис.3.5 - Гетероструктура на основе арсенида галлия с КПД 37,7%.

Можно заключить, что энергетические, массовые и эксплуатационные характеристики фотоэлементов на основе арсенида галлия в большей степени, чем на основе кремния, соответствуют задачам солнечной земной и космической энергетики. Проблема состоит в том, что кремний широко распространен на Земле, доступен и прост в обработке, тогда как арсенид галлия считается весьма дефицитным материалом и добывается в основном из бокситов.

Таким образом, в настоящее время трудно до конца отдать явное предпочтение одному из двух рассмотренных полупроводниковых материалов - кремнию или арсениду галлия, и лишь дальнейшее развитие технологии их

производства покажет, какой вариант окажется более рационален для наземной и космической солнечных энергетик.

3.3.3 Органические материалы для фотоэлектрических преобразователей

Широкое применение неорганических солнечных фотоэлементов (СФЭ) сдерживает достаточно дорогая технология производства и обработки неорганических полупроводников. В связи с этим возрастает интерес к органическим полупроводникам, т.к. пример фотосинтеза позволяет рассчитывать на возможность создания дешевых материалов для фотовольтаники. Кроме того, органические соединения не содержат редких химических элементов и могут быть весьма технологичны, а значит, заметно дешевле неорганических материалов.

3.3.3.1 Принципы работы органических фотоэлементов

При поглощении кванта света органическим полупроводником не образуется сразу же два носителя электрон и дырка, а образуется некое связанное состояние, которое называют экситон. Для диссоциации экситона на свободные заряды необходимо приложить некоторую энергию E_b (энергию связи), которая для различных органических полупроводников составляет величину $0,2 \div 1$ эВ [17].

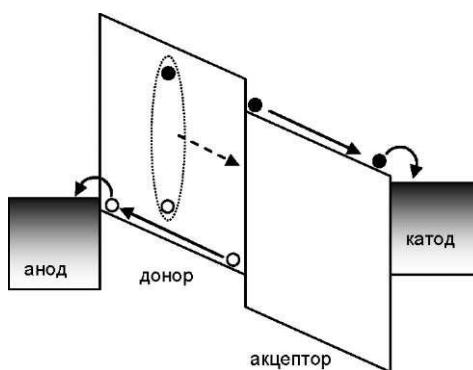


Рис. 3.6 - Схема диссоциации экситона на границе донорного и акцепторного полупроводников.

Диссоциация экситонов может эффективно происходить на границе двух органических полупроводников (гетеропереходе), выполняющих функции донора и акцептора, рисунок 3.6. Если экситон возбуждается в донорном полупроводнике, и разность энергий низших вакантных молекулярных орбиталей донора E_D и акцептора E_A превышает энергию связи экситона $E_D - E_A > E_b$, то он с высокой вероятностью будет диссоциировать на свободные заряды e^- и h^+ , в результате чего электрон e^- окажется на доноре, а дырка h^+ — на акцепторе. Разделенные таким образом заряды должны двигаться к соответствующим электродам. С использованием этого принципа *планарного гетероперехода* был получен двухслойный органический фотоэлемент на основе фталоцианина и производной перилена с КПД около 1% [18].

Вместе с тем, диффузионная длина, проходимая экситоном за время его жизни, в органических пленках обычно порядка 10 нм. Это приводит к тому, что достигают донорно-акцепторной границы только те экситоны, которые родились в ее непосредственной близости. Следовательно, вклад в фототок могут дать только фотоны, поглощенные на расстоянии диффузионной длины экситонов вблизи плоскости гетероперехода. Характерная длина поглощения в органических материалах около 100 нм, поэтому на диффузионной длине

экситонов поглощается от силы 10% фотонов, которые могут дать вклад в фототок

А. Хигеру и соавторам удалось с помощью концепции объемного гетероперехода, предложенной для полимер-фуллереновых фотоэлементов, преодолеть ограничение на КПД органических материалов, связанное с малой диффузионной длиной экситонов [19]. Схема объемного гетероперехода показана на рисунке 3.7. Идея объемного гетероперехода состоит в распространении границы донор-акцептор по всему объему рабочего слоя таким образом, чтобы экситон, возбужденный в любой точке объема гетероперехода, мог достичь границы раздела полупроводников и диссоциировать на свободные заряды.

Заряды носителей тока в органических солнечных фотоэлементах должны иметь достаточную подвижность, чтобы доходить до электродов прежде рекомбинации. Полагают, что необходимая величина подвижности зарядов как в доноре так, и в акцепторе должна быть не менее 10^{-3} — 10^{-4} см²/В·с.

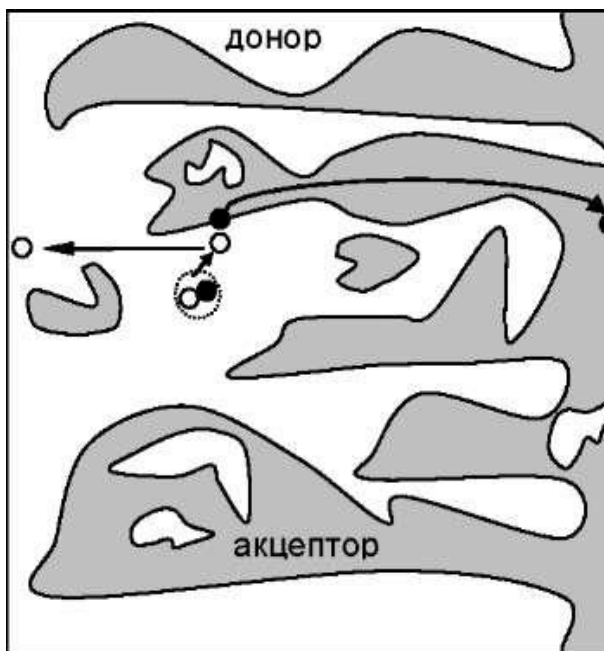


Рис. 3.7 - Схема объемного гетероперехода.

Таким образом, для эффективной работы органического СФЭ необходимо: сильное поглощение света рабочим слоем, оптимальная разность энергетических уровней донора и акцептора, достаточная подвижность носителей в доноре и акцепторе и омические контакты акцептора (донора) с катодом (анодом).

3.3.3.2 Типы органических солнечных фотоэлементов

Существенно увеличить КПД удалось с появлением высокорастворимого метанофуллерена C₆₀ PCBM, рисунок 3.8 [20-25] и получением полимер-фуллереновых композитов из растворов с высоким соотношением [полимер]:[фуллерен] (1:1 и выше по массе). Значительная доля фуллерена в композите необходима для достижения баланса подвижностей электронов и дырок в объемном гетеропереходе. Максимальные значения КПД для активного слоя на основе производных РРУ и PCBM составили 2,5—2,9%

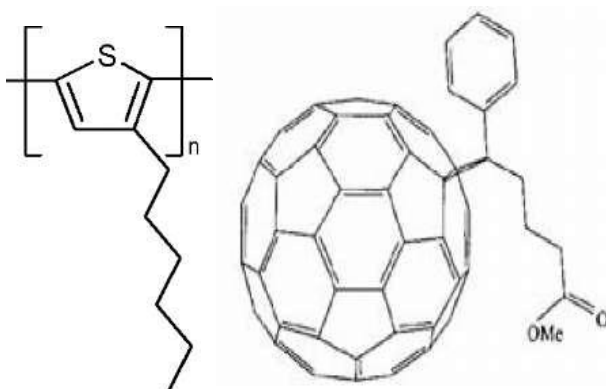


Рис. 3.8 - Структурные формулы P3HT и PCBM.

В таблице 3.1 приведены параметры современных органических материалов для солнечных фотоэлементов

3.3.3.3 Ячейки, сенсibilизированные органическим красителем (Б88С)

Лауреатом Международной энергетической премии «Глобальная энергия» 2017 года стал 72-летний швейцарский физико-химик Михаэль Гретцель. Эту награду он получил «за выдающиеся заслуги в разработке экономичных и эффективных фотоэлементов, известных как «ячейки Гретцеля», предназначенных для создания недорогих, производительных солнечных электростанций.

В работе [26] продемонстрирована возможность эффективной электрохимической солнечной ячейки с КПД более 7% на основе нанокристаллического оксида титана TiO_2 , металлокомплексного красителя на основе рутения и йодного электролита. Схема такой ячейки представлена на рисунке 3.9.

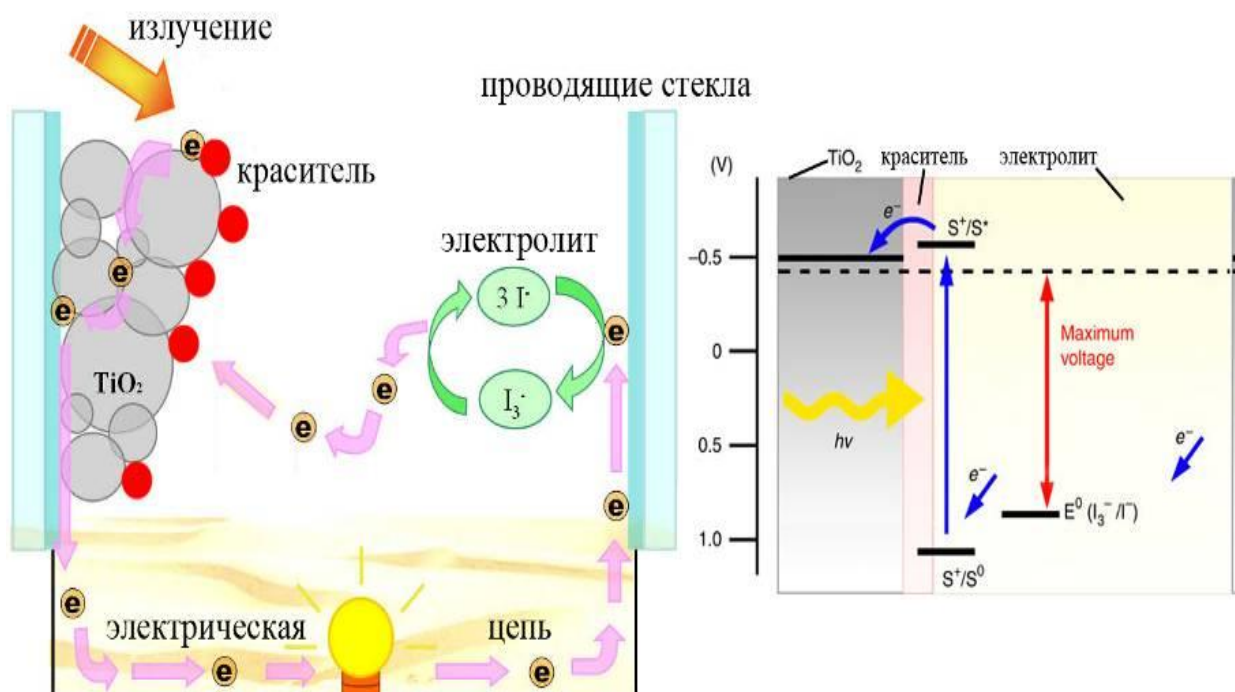


Рис.3.9 - Схема работы ячейки Гретцеля.

Таблица 3.1 - Параметры современных органических материалов для солнечных фотоэлементов.

Тип СФЭ	Тип гетероперехода	Активный слой донор/акцептор	КПД %	$I_{кз}$, мА/см	V_{xx}
					В
Полимер-фуллерен	Объемный	РСРБТВТ/PCBM[C ₇₀]	5,5	16,2	0,62
		РЗНТ/PCBM	4,0	10,0	0,60
		РЗНТ/PCBM	4,4	10,6	0,61
		РЗНТ/PCBM	5	9,5	0,63
		МЕН-РРУ/PCBM	2,9	8,4	0,87
Полимер	Объемный	МБМО-РРУ/PCBM[C ₇₀]	3,0	7,6	0,77
		МБМО-РРУ/сополимер полифлуорена (PT1CUTP)	1,5	3,0	1,4
Полимер	Объемный	Сополимер полифлуорена (Т8ВТ)/РЗНТ	1,8	4	1,25
Низкомолекулярный	Планарный	CuPc/C ₆₀	3,6	18,8	0,58
	Упорядоченный объемный	CuPc/PTCB1	2,7	11	0,49
Гибрид	Объемный	РЗНТ/наностержни CdSe	1,7	5,7	0,7
Гибрид	Объемный	OSC10-РРУ/ тетраподы CdSe	2,8	0,76	0,76
Гибрид	Объемный	Поли[3-октилтиофен]/углеродные нанотрубки	0,22	0,5	0,75
Тандем	Объемный	РСРБТВТ/PCBM + РЗНТ/PCBM[C ₇₀]	6,5	7,8	1,24
Тандем	Планарный	СиРс/СиРс:C ₆₀ /C ₆₀ /PTCB1 + СиРс/СиРс:C ₆₀ /C ₆₀	5,7	9,7	1,03
Б88С		«Черный» краситель/TiO ₂	11,1	21	0,74
Б88С		«Черный» краситель/расплав эвтектика	8,2	14,3	0,74

Поглощение света происходит молекулами красителя, закрепленными на поверхности наночастиц TiO₂.. Поглотившие фотон молекулы инжектируют

электроны в наночастицы, которые затем передаются во внешнюю электрическую цепь. Электролит с ионами йода восстанавливает окисленные молекулы красителя. В настоящее время КПД ячеек такого типа превышает 11% (см. таблицу) .

Один из основных недостатков электрохимических ячеек Гретцеля — жидкий электролит, который испаряется при длительной работе, что ухудшает их работу. Поэтому актуальна задача по созданию СФЭ такого типа без растворителей — на основе твердого электролита или расплавов эвтектик. На основе последнего подхода удалось получить образцы Б88С с КПД более 8% и высокой стабильностью (см. таблицу). Еще один существенный недостаток ячеек Гретцеля с точки зрения масштабных применений состоит в том, что краситель, наиболее эффективно поглощающий солнечный свет, т.н. «черный» краситель, содержит комплекс редкого на Земле элемента платиновой группы рутения. Поэтому ведутся разработки «черных» красителей другого состава, например органических.

ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ И В МИРЕ

В настоящее время сложились три крупные направления солнечной энергетики, основанной на фотоэлектрических элементах, представленные на рисунке 4.1. Направления выделены по области применения – земной и космической.



Рис.4.1 - Направления развития солнечной энергетики.

4.1 Российская солнечная энергетика

По данным Института Энергетической стратегии [27], теоретический потенциал солнечной энергетики в России составляет более 2300 млрд. тонн условного топлива, что само по себе благоприятно для ее развития. Однако благодаря необъятным просторам России уровень солнечной радиации существенно варьируется: от 810 кВт-час/м² в год в отдаленных северных районах до 1400 кВт-час/м² в год в южных районах. На уровень солнечной радиации оказывают влияние и большие сезонные колебания: на ширине 55 градусов солнечная радиация в январе составляет 1,69 кВт-час/м², а в июле – 11,41 кВт-час/м² в день [28].

Наиболее перспективные регионы в плане использования солнечной энергетики: Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область и другие регионы на юго-западе, Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия и другие регионы на юго-востоке.

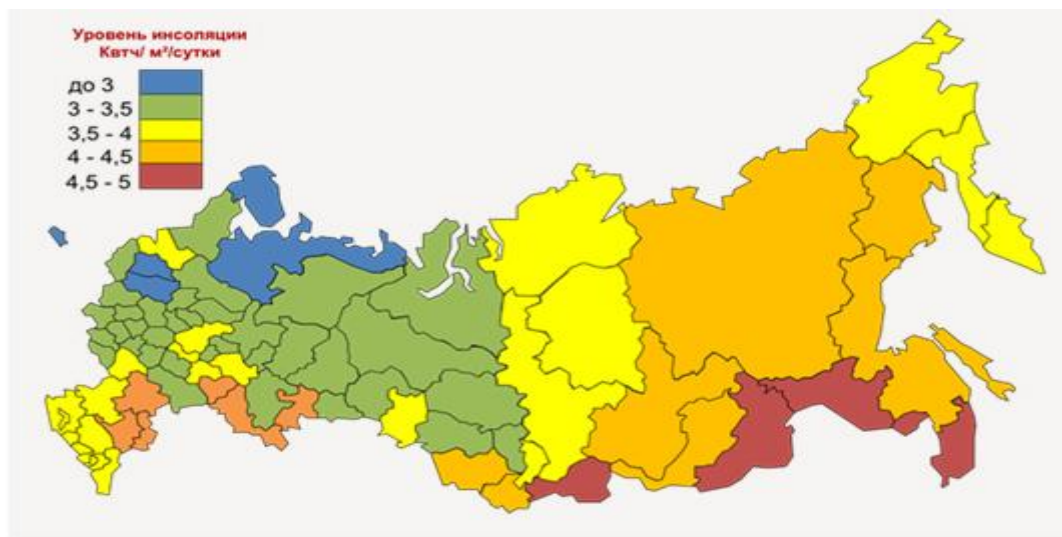


Рисунок 4.2 - Потенциал солнечной энергетики в России[31].

На сегодняшний день Россия обладает передовыми фотоэлектрическими технологиями. Есть ряд предприятия, которые разработали и уже совершенствуют технологии фотоэлектрических преобразователей: как на кремниевых, так и на многопереходных структурах. Есть ряд разработок использования концентрирующих систем для солнечных электростанций.

Главное препятствие для развития солнечной энергетики в России заключается в том, что стоимость солнечной энергии значительно превышает стоимость газа. Большие сроки окупаемости и невысокая рентабельность солнечной энергии в сравнении с ценами на традиционные источники энергии являются причиной малой заинтересованности этой отраслью.

Несмотря на это первые шаги по развитию законодательной базы солнечной энергетики уже сделаны, это

- Постановление Правительства №426 от 3 июля 2008г.: «О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии»;

- Распоряжение Правительства РФ N 1-р от 8 января 2009г.: «Об Основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.»

Были утверждены целевые показатели по увеличению к 2015 и 2020 годам доли ВИЭ в общем уровне российского энергобаланса до 2,5% и 4,5% соответственно.

Развитие солнечной энергетики в России обусловлено рядом факторов:

- 1) Климатические условия: от климатических условий зависит выбор той технологии солнечной установки, которая наилучшим образом подходит для конкретного региона;

- 2) Государственная поддержка: наличие законодательно установленных экономических стимулов солнечной энергетики оказывает решающее значение на её развитие;
- 3) Стоимость солнечных фотоэлектрических установок: с увеличением КПД и применением новых, более дешевых, материалов для фотоэлементов, стоимость энергии, выработанной солнечными батареями, дешевеет, становясь более конкурентоспособной;
- 4) Экологические нормы: ужесточение экологических норм (ограничения и штрафы) может стимулировать рынок возобновляемой энергии, в том числе солнечной;

На сегодняшний день наиболее развитым регионом нашей страны в отрасли солнечной энергетики можно назвать Крым. На данный момент, общая мощность солнечных электростанций в Крыму составляет 297 МВт. Из них самая крупная – Перово. Она состоит из 440000 фотоэлектрических модулей, расположенных на более чем 200 га площади, и способна производить порядка 132,5 млн кВт*ч электроэнергии в год.

4.2 Мировая солнечная энергетика

Общая мощность мировых коммерческих фотоэлектрических солнечных электростанций, превысила 50 ГВт в 2015 году. На рисунке 4.3 приведено распределение доли стран в мировой солнечной энергетике.

По данным BloombergNewEnergyFinance в 2014 году впервые за всю историю стало выгоднее инвестировать в проекты возобновляемой энергетики, а не традиционной топливной, поскольку темпы роста этих отраслей сравнялись. Объём введенных мощностей солнечной энергетики также достиг

самого высокого уровня за всю историю, составив 75 ГВт, по данным доклада BNEF «Глобальные тенденции инвестирования в развитие ВИЭ в 2017 г.»

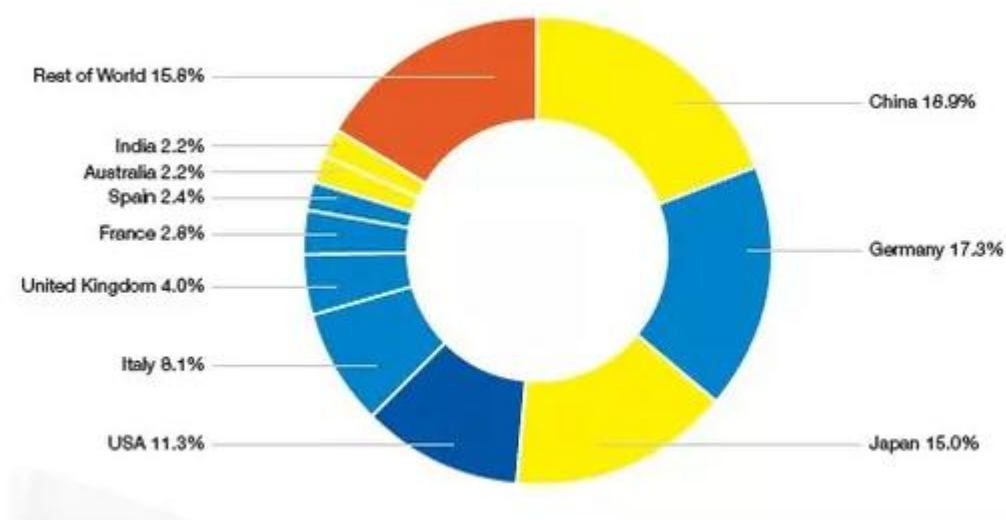


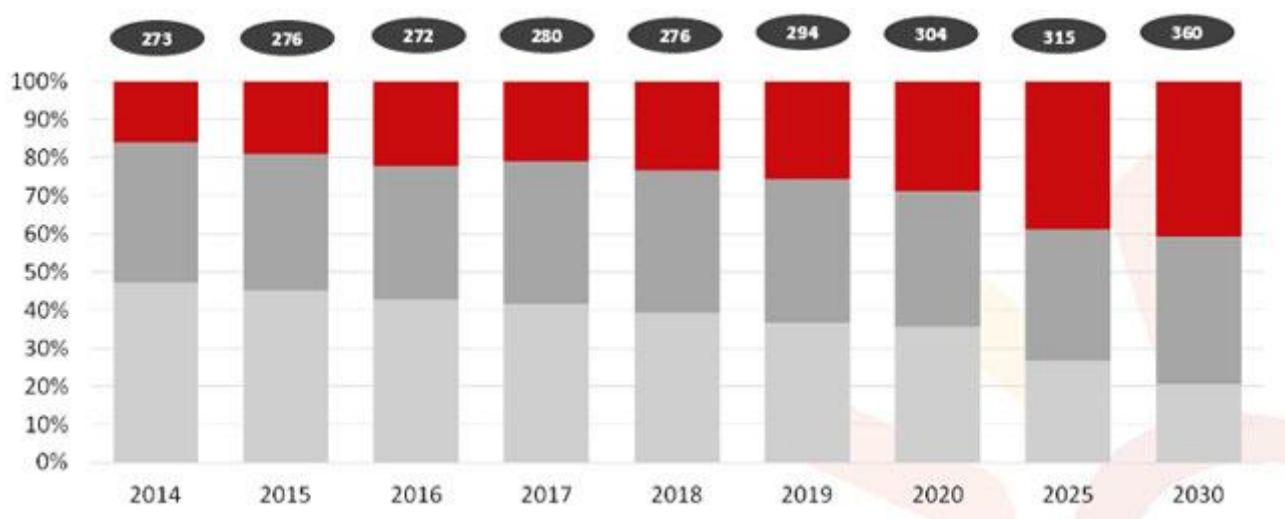
Рис. 4.3 - Величина установленной мощности СЭС в мире [29].

По данным доклада МЭА в 2016 году цены на солнечную энергию по долгосрочным контрактам на будущие проекты в Чили и Арабских Эмиратах уже опустились до уровня ниже 30 долл. США за мегаватт-час (МВт/ч), что является самым низким уровнем в мире. В Мексике цены на контракты по строительству фотоэлектрических солнечных электростанций составили 28-55 долл. США за МВт/ч.

Как ожидается, солнечная энергетика увеличит свои объемы с нынешнего менее 1% всего мирового производства электроэнергии до более 10% (совокупно более 1800 ГВт мощностей) к 2030 году. Ожидается, что в будущем именно солнечная энергетика будет расти наиболее быстро: в ближайшие 20 лет совокупный доход от этой отрасли ожидается на уровне 5 трлн. долларов

Благодаря разработке дешевых фотоэлектрических материалов стоимость производства энергии из преобразованного солнечного света неуклонно падает и будет продолжать эту тенденцию, в то время как стоимость энергии,

полученной при помощи сжигания ископаемого топлива, будет расти, в связи с меньшим использованием и экологическими издержками. Так, цена на фотоэлектрическую энергию снизится, по прогнозу NewEnergyOutlook 2016, в ближайшие 25 лет на 60%, сделав ее самым дешевым видом энергии в мире уже к 2030 году[30].



Красная область — фотоэлектрическая энергетика, темно-серая область — другие источники возобновляемой энергии, светло-серая область — традиционная топливная энергетика. (поданным Bloomberg New Energy Finance, Deutsche Bank, Canadian Solar)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. По всеобщему признанию солнечная энергетика является перспективной областью развития энергетических технологий благодаря «бесплатной» энергии Солнца и экологической чистоты процесса преобразования в электричество или тепло.

2. Обсуждение эффективности того или иного способа преобразования солнечной энергии необходимо проводить в связи с областью применения солнечного преобразователя, так для «земных» отопительных нужд целесообразно использовать солнечные коллекторы с жидким теплоносителем, тогда как для «космических» целей – солнечные батареи на основе гетероструктур арсенида галлия.

3. Для питания маломощной техники в энергетически труднодоступных регионах, например в Арктике, целесообразно применять термоэлектрические преобразователи с солнечными концентраторами.

4. «Внутри» большой группы материалов, использующих фотоэлектрический эффект, тоже важно производить выбор того или иного преобразователя, сообразуясь с решаемыми с помощью него задачами. Так для многих задач важна гибкость источника, что возможно осуществить только с преобразователями на аморфном кремнии или на основе полупроводниковых органических полимеров. «Ячейки» Гретцеля не подходят для решения космических задач, т.к. содержат жидкий электролит, который испаряется со временем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергоэффективная Россия [интернет-ресурс] // 2017, URL: www.energy2020.ru (Дата обращения: 28.05.2017)
2. Национальное рейтинговое агентство [интернет-ресурс] // 2017 URL: www.ranational.ru (Дата обращения: 28.05.2017)
3. Митина И.В.: Повышение эффективности солнечных коллекторов с вакуумированными стеклопакетами. // Дисс.канд.т.н., М.: 2009
4. Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев: Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии // ТПУ, 2009 -294 с.
5. Бернштейн А.С.: Термоэлектрические генераторы // ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1956 - 47 с.
6. Анатычук Л.И.: Физика термоэлектричества // Институт Термоэлектричества, Черновцы, 2008 - 376 с.
7. Анатычук Л.И.: Термоэлектрические преобразователи энергии // Институт Термоэлектричества, Черновцы, 2003 - 376 с.
8. Каминский В.В., Соловьев С.М., Голубков А.В.: Генерация электродвижущей силы при однородном нагреве полупроводниковых образцов моносulfида самария // Письма в ЖТФ , т.28, в.6, 2002 - 29-34 с.
9. Ансельм А.И.: Введение в теорию полупроводников //Москва, Наука,1978 - 618 с.
10. Стриха В.И.: Контактные явления в полупроводниках // Киев, Высшая школа, Головное издательство, 1982 – 224 с.

11. Случинская И.А.: Основы материаловедения и технологии // полупроводников. М., 2002. – 376 с.
12. Фалькевич Э.С.: Технология полупроводникового кремния // М.: Металлургия, 1992 - 408 с.
13. Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н.: Кремний - материал нанoeлектроники // Москва.: Техносфера, 2007 - 351 с.
14. Шарма Б.Л., Пурухит Р.К.: Полупроводниковые гетеропереходы // Перевод с англ. Под ред. Ю. В. Гуляева . М.: Советское радио, 1979 - 232 стр.
15. Таран А.А., Воронин Н.М.: Эффективность фотоэлектрических преобразователей в концентрированном солнечном излучении // Вестник аграрной науки Дона , 3 (15) , 2011 - 35-39 стр.
16. Zhelezyaka [интернет ресурс] // 2017 г, URL: <http://zele.ru/> (Дата обращения: 29.05.2017)
17. Паращук Д.Ю., Кокорин А.И.: Современные фотоэлектрические и фотохимические методы преобразования солнечной энергии // Рос. хим. ж., т. LII, № 6, 2008 - 107-117 с.
18. Tang C.W.: Applied Physics letters // vol.48№2. 1986 - p.183-185
19. Yu G., Pakbaz K., Heeger A.J. Ibid :Semiconducting polymer diodes: Large size, low cost photodetectors with excellent visible ultraviolet sensitivity // Appl. Phys. Lett.V. 64.-№ 25.1994 - 3422—3424 P.
20. Barry C. Thompson; Petr P. Khlyabich; Beate Burkhart; Alejandra E. Aviles, Andrey Rudenko, Ginger V. Shultz, Christi F. Ng and Lorenzo B. Mangubat: Polymer Based Solar Cells: State of the Art Principles for the Design of Active Layer

Components // L.A., Department of Chemistry and Loker Hydrocarbon Research Institute, Green, Vol. 1, 2011 - 29–54 P.

21. Petr P. Khlyabich, Beate Burkhart, and Barry C. Thompson: Efficient Ternary Blend Bulk Heterojunction Solar Cells with Tunable Open-Circuit Voltage // J. Am. Chem. Soc., 133, 2011 - 14534–14537 P.

22. Petr P. Khlyabich, Beate Burkhart, and Barry C. Thompson : Compositional Dependence of the Open-Circuit Voltage in Ternary Blend Bulk Heterojunction Solar Cells Based on Two Donor Polymers // J. Am. Chem. Soc., 134, 2012 - 9074–9077 p.

23. Robert A. Street, Steven A. Hawks, Petr P. Khlyabich, Gang Li, Benjamin J. Schwartz, Barry C. Thompson and Yang Yang: Electronic Structure and Transition Energies in Polymer–Fullerene Bulk Heterojunctions // J. Phys. Chem. C, 118, 2014 - 21873–21883 p.

24. Beate Burkhart, Petr P. Khlyabich, and Barry C. Thompson: Influence of the Ethylhexyl Side-Chain Content on the Open-Circuit Voltage in rr-Poly(3-hexylthiophene-co-3-(2-ethylhexyl)thiophene) Copolymers // J. Am. Chem. Soc.: Macromolecules, 45, 2012 - 3740–3748 P.

25. Petr P. Khlyabich, Andrey E. Rudenko, Barry C. Thompson, and Yueh-Lin Loo: Structural Origins for Tunable Open-Circuit Voltage in Ternary-Blend Organic Solar Cells // Adv. Funct. Mater., 25, 2015, - 5557–5563 P.

26. Gretzel M.J.: Journal of Photochemistry and Photobiology A // Vol. 64 №1-3. 2004 - p. 3-14

27. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации [интернет ресурс] // 2017 г, URL: <http://ac.gov.ru> (Дата обращения: 01.06.2017)

28. Германович В., Турилин А.: Альтернативные источники энергии и энергосбережения // Спб, «Наука и техника», 2014 - 320 с.
29. СтэнГибилиско: Альтернативная энергетика без тайн. //Пер.с англ.- Москва.:Эксмо-прес, 2010 - 368 с.
30. Возобновляемая энергия и ресурсы [интернет ресурс] // 2017 г. URL:<http://renewnews.ru> (Дата обращения: 01.06.2017)
31. Hevelsolar [интернет ресурс] // 2017 г. URL:<http://www.hevelsolar.com/solar> (Дата обращения: 01.06.2017)