

# Курсовая работа «Солнечные батареи III поколения»

студента 2-ого курса ФФ МГУ Сергей Г.В

Для чего нужны солнечные батареи.

Сегодня перед человечеством стоят такие глобальные проблемы как глобальное потепление, изменение климата, загрязнение атмосферы и гидросферы, а также истощение источников углеводородного сырья. Одной из основных причин этих зол является чрезмерно активное использование углеводородного топлива для нужд транспорта и энергетики.

Сегодня Европейский Союз ведет политику по уменьшению зависимости от нефти и газа, поэтому в Европе наблюдается интенсивное развитие альтернативной энергетики: использование ветрогенераторов, гидроэлектростанций, а также солнечных электростанций. Солнечная энергетика — самая перспективная, т. к. наше солнце каждую секунду посылает на Землю в среднем около  $635 \text{ Вт/м}^2$ . В ясный солнечный день интенсивность излучения на уровне моря равна в среднем примерно  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . За год солнечная иррадиация на квадратный метр поверхности земли на уровне моря может достигать от  $1000 \text{ кВт*ч/м}^2$  для северо-европейских стран до  $2500 \text{ кВт*ч/м}^2$  в пустынях.

Таким образом можно добывать значительное количество электроэнергии, используя солнечные батареи с большой площадью покрытия в условиях интенсивного солнечного освещения. Несомненно, важное значение имеет расположение солнечных электростанций, так как для максимальной эффективности необходима максимальная солнечная иррадиация.

Здесь возможны несколько вариантов их оптимального размещения:

- 1) Помещать их в климатические зоны с большим количеством безоблачных дней, например, в пустыни или в горы выше уровня облаков.
- 2) Строить солнечные электростанции на земной орбите. Добываемую электроэнергию отправлять потребителям при помощи высококогерентных лазеров. Также можно делать это механически, доставляя на планету заряженные аккумуляторы, при этом, конечно, необходимо, чтобы энергия в аккумуляторах окупала все издержки на их доставку.
- 3) Строить солнечные ЭС на стороне Луны, обращенной к Земле. Энергию можно транспортировать теми же способами что и в предыдущем пункте.

История солнечной энергетики.

Многие из нас не подозревают, что способ получения электроэнергии из солнечного света известен около 130 лет. Явление фотоэффекта впервые наблюдал Эдмон Беккерель в 1839г. Это случайное открытие оставалось незамеченным вплоть до 1873г., когда Уиллоуби Смит обнаружил подобный эффект при облучении светом селеновой пластины. И хотя его первые опыты были далеко несовершенны, они знаменовали собой начало истории полупроводниковых солнечных элементов. В поисках новых источников энергии в лаборатории Белла был изобретен кремниевый солнечный элемент, который стал предшественником современных солнечных фотопреобразователей. Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии, который ученые называют наиболее перспективным в долгосрочном развитии мировой энергетики, на самом деле - довольно стар, просто сегодня он получил новый импульс. Первая научная работа по селеновому фотоэлементу была опубликована в 1876 году, в Британии. Лишь в начале 50-х годов 20-го века солнечный элемент достиг относительно высокой степени совершенства. На современном этапе все началось с Альберта Эйнштейна. Многие помнят, что этот ученый был удостоен в 1921 году Нобелевской премии. Но мало кто знает, что получил он ее не за создание теории относительности, а за объяснение законов внешнего фотоэффекта. Еще в 1905 году он опубликовал работу, в которой, описал как именно и в каких количествах кванты света «вышибают» из металла электроны. Получить электрический ток с помощью фотоэффекта впервые удалось советским физикам в 30-е годы прошлого века. Произошло это в Физико-техническом институте, руководил которым знаменитый академик А.Ф. Иоффе. Правда, КПД тогдашних солнечных сернисто-талиевых элементов еле дотягивал до 1%, то есть в электричество обращался лишь 1% падавшей на элемент энергии, но задел был положен.

В 1954 году американцы Пирсон, Фуллер и Чапин запатентовали первый элемент с приемлемым (порядка 6%) КПД.

А с 1958 года кремниевые солнечные батареи стали основными источниками электричества на советских и американских космических аппаратах. К середине 70-х годов КПД солнечных элементов приблизился к 10-процентной отметке и... почти на два десятилетия замер на этом рубеже. Для космических кораблей этого вполне хватало, а для наземного использования производство весьма дорогих солнечных батарей (1 кг кремния необходимого качества стоил тогда до 100 долларов) по сравнению с сжиганием дешевой нефти выглядело непозволительной роскошью. Как следствие-большинство исследований по разработке новых технологий в области солнечной энергетики было свернуто, а финансирование оставшихся сильно сокращено. В начале 90-х годов нынешний лауреат Нобелевской премии академик Жорес Алферов на собрании АН СССР заявил, что если бы на развитие альтернативной энергетики было бы потрачено хотя бы 15% из тех средств, что

мы вложили в энергетику атомную, то АЭС нам бы сейчас вообще бы ли не нужны. Судя по тому, что даже на тех крохах, которые выделялись «на Солнце», удалось к середине 90-х поднять КПД солнечных элементов до 15%, а к началу нового века - до 20%, утверждение академика недалеко от истины.

Исторически сложилось так, что на проектирование зданий влияли местные климатические условия и доступность строительных материалов. Позднее человечество отделило себя от природы, идя по пути господства и контроля над ней. Этот путь привел к однотипному стилю зданий практически для любой местности. В 100 году н. э. историк Плиний Младший построил летний домик в Северной Италии, в одной из комнат которого были окна из тонкой слюды. Комната была теплее других, и для ее обогрева требовалось меньше дров. В известных римских банях в I-IV ст. н. э. специально устанавливались большие окна, выходящие на юг, для того чтобы больше солнечного тепла поступало в здание. К VI ст. солнечные комнаты в домах и общественных зданиях стали настолько обычны, что Джастиниан Коуд ввел "право на солнце", чтобы гарантировать индивидуальный доступ к солнцу. В XIX веке были очень популярны оранжереи, в которых было модно прогуливаться под сенью пышной растительной листвы.

Из-за перебоев с электроэнергией во время второй мировой войны к концу 1947 года в США здания, пассивно использующие солнечную энергию, пользовались таким огромным спросом, что "Libbey-Owens-Ford Glass Company" издала книгу под названием "Ваш Солнечный Дом", в которой были представлены 49 лучших проектов солнечных зданий. В середине 50-х годов XX века, архитектор Франк Брайджерс разработал первое в мире пассивное солнечное здание для офисного помещения. Установленная в нем солнечная система для горячего водоснабжения работает с того времени бесперебойно. Само же здание "Брайджерс-Пэксон" занесено в национальный исторический регистр страны как первое в мире офисное здание, обогреваемое при помощи энергии Солнца.

Низкие цены на нефть после второй мировой войны отвлекли внимание населения от солнечных зданий и вопросов энергоэффективности. Начиная с середины 1990-х, рынок меняет свое отношение к экологии и использованию возобновляемой энергии, и в строительстве появляются тенденции, для которых характерно сочетание проекта будущего здания с окружающей природой.

### Недостатки солнечной энергетики.

Для строительства солнечных электростанций требуются большие площади земли через теоретические ограничения для фотоэлементов первого и второго поколения. К примеру, для электростанции мощностью 1 ГВт может понадобиться участок площадью несколько десятков квадратных километров. Строительство солнечных электростанций такой мощности может привести к

изменению микроклимата в прилегающей местности, поэтому устанавливают в основном фотоэлектрические станции мощностью 1-2 МВт недалеко от потребителя или даже индивидуальные и мобильные установки [5].

Фотоэлектрические преобразователи работают днем, а также в утренних и вечерних сумерках (с меньшей эффективностью). При этом пик электропотребления приходится именно на вечерние часы. Кроме этого, произведенная ими электроэнергия может резко и неожиданно колебаться из-за изменений погоды. Для преодоления этих недостатков на солнечных электростанциях используются эффективные электрические аккумуляторы. На сегодняшний день эта проблема решается созданием единых энергетических систем, объединяющих различные источники энергии, которые перераспределяют производимую и потребляемую мощность.

Сегодня цена солнечных фотоэлементов сравнительно высокая, но с развитием технологии и ростом цен на ископаемые энергоносители этот недостаток постепенно преодолевается. Поверхность фотопанелей и зеркал (для тепломашинных ЭС) очищают от пыли и других загрязнений.

Эффективность фотоэлектрических элементов падает при их нагреве (в основном это касается систем с концентраторами), поэтому возникает необходимость в установке систем охлаждения, обычно водяных. В фотоэлектрических преобразователях третьего и четвертого поколений для охлаждения используют преобразования теплового излучения в излучение наиболее согласовано с поглощающим материалом фотоэлектрического элемента (т.н. up-conversion), что одновременно повышает КПД. Через 30 лет эксплуатации эффективность фотоэлектрических элементов начинает снижаться. Отработав свое, фотоэлементы, хотя и незначительная их часть, содержат кадмий, который нельзя выбрасывать на свалку. Нужно дополнительно расширять индустрию по их утилизации.

### Экологические проблемы.

При производстве фотоэлементов уровень загрязнения не превышает допустимого уровня для предприятий микроэлектронной промышленности. Применение кадмия при производстве некоторых типов фотоэлементов ставит сложный вопрос их утилизации. Этот вопрос не имеет пока с экологической точки зрения приемлемого решения, но такие элементы имеют незначительное распространение и соединения кадмия в современном производстве уже найдена замена.

### Новые виды фотоэлементов.

В последнее время активно развивается производство тонкопленочных фотоэлементов, которые содержат лишь около 1% кремния в отношении массы подложки, на которую наносятся тонкие пленки. Из-за незначительного расхода материалов на поглощающий слой тонкопленочные кремниевые фотоэлементы дешевле в производстве, но пока имеют меньшую эффективность и

неустранимую деградацию характеристик во времени. Кроме того, развивается производство тонкопленочных фотоэлементов на других полупроводниковых материалах, в частности CIS и CIGS.

Солнечная энергия широко используется как для производства электроэнергии, так и для нагрева воды. Солнечные коллекторы изготавливаются из доступных материалов: сталь, медь, алюминий и т.д., без применения дефицитного и дорогого кремния. Это позволяет значительно сократить стоимость оборудования и произведенной на нем энергии.

## Процесс преобразования световой энергии в электрическую

Под действием света атомы полупроводника возбуждаются и в кристалле в  $n$ - и в  $p$ -областях возникают дополнительные избыточные пары электрон-дырка, как это показано внизу (см. следующую страницу). Образовавшиеся электроны и дырки, участвуя в тепловом движении, перемещаются в различных направлениях, в том числе и по направлению к  $p$ - $n$  переходу.

Благодаря наличию потенциального барьера электронно-дырочный переход будет разделять главным образом диффундирующие к нему неосновные избыточные носители тока.

В ходе такого разделения в  $n$ -области кристалла будут скапливаться избыточные электроны, а в  $p$ -области – избыточные дырки. Скопление избыточных электронов в  $n$ -области и дырок в  $p$ -области фотопреобразователя будет приводить к компенсации объемного заряда, сосредоточенного у  $p$ - $n$  перехода, т.е. к созданию электрического поля, направленного в сторону, противоположную тому полю, что имелось там раньше.

Образованное светом электрическое поле зарядит левый слой  $p$ -типа положительно, а правый слой  $n$ -типа – отрицательно. Между  $n$ - и  $p$ -областями пластинки возникает фото-ЭДС. Концентрация образованных светом избыточных носителей заряда у  $p$ - $n$  перехода, а следовательно, и величина фото-ЭДС зависят от величины светового потока и величины нагрузочного сопротивления  $R_n$ , включенного во внешнюю цепь фотопреобразователя.

Если в фотопреобразователе цепь разомкнута как это показано на рисунке «г» внизу, то все избыточные, разделенные переходом носители тока скапливаются у  $p$ - $n$  перехода и на максимально возможную величину компенсируют потенциальный барьер на переходе, создавая максимальное значение фото-ЭДС, равное напряжению холостого хода  $J_{х.х.}$ .

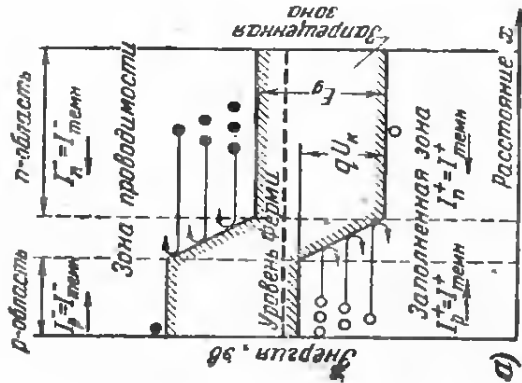
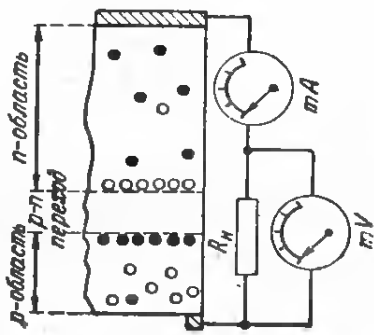
Чтобы не усложнять схему внизу, условно изображены только те носители заряда, которые создают потенциальный барьер, т.е. скопление равновесных носителей тока.

Если фотопреобразователь замкнут накоротко ( $R_n = 0$ ), как показано на схеме, то избыточные, разделенные переходом носители тока будут иметь возможность циркулировать через эту короткозамкнутую цепь, создавая максимально возможное значение тока – ток короткого замыкания  $I_{к.з.}$ .

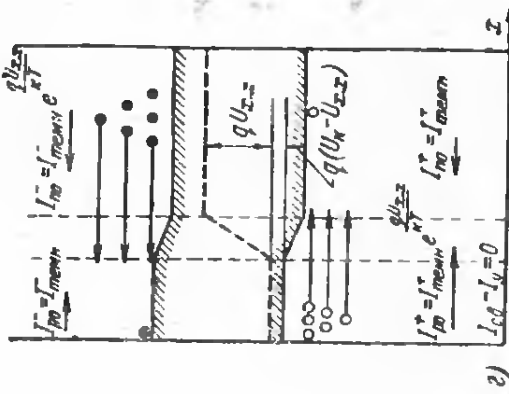
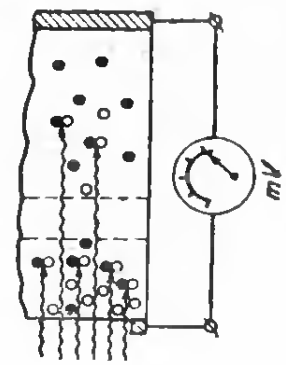
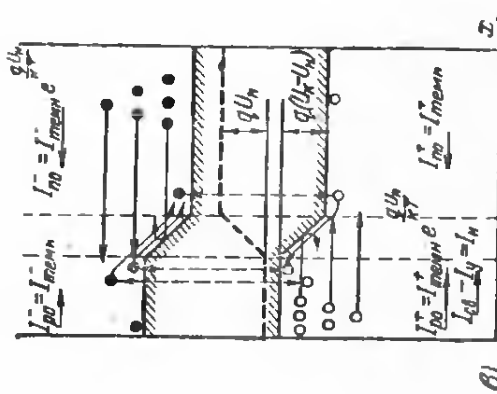
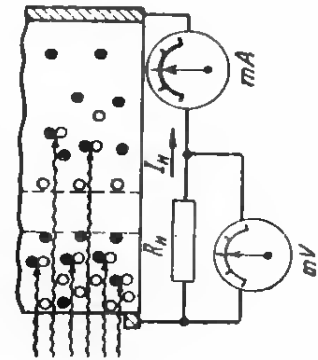
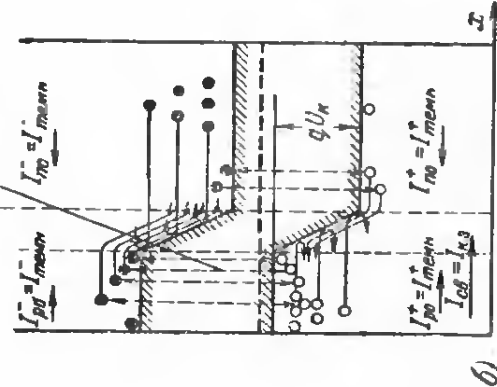
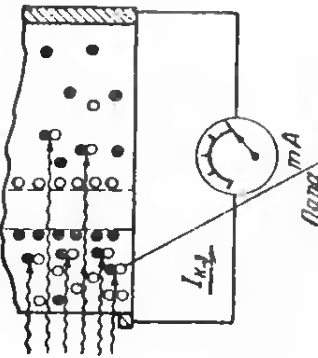
При этом у  $p$ - $n$  перехода не произойдет избыточного скопления зарядов.

Величина потенциального барьера будет такой же как в темноте, и фото-ЭДС преобразователя будет равна нулю.

В темноте



При освещении



Схемы, поясняющие работу фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии.

а — в темноте ток основных носителей через *p-n*-переход компенсируют друг друга, суммарный ток равен нулю; б — в режиме короткого замыкания все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, проходят через него и, поскольку внешняя цепь замкнута, возмужают на циркуляция тока; в — в режиме, когда внешняя цепь замкнута на сопряженные нагрузки  $R_n$ , все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, частично израсходованы для снижения потенциального барьера на переходе; вторая их часть участвует в образовании тока через переход и внешнюю нагрузку; г — в режиме холостого хода все возникшие под действием света избыточные неосновные носители тока, которые за время своего существования успели дойти до *p-n*-перехода, затрачены на снижение потенциального барьера.



Как уже было сказано, в темноте в равновесном состоянии потоки основных и неосновных носителей заряда компенсируют друга друга. Поэтому приняв направление слева направо за положительное, можно написать:

$$I_p - I_n = 0;$$

$$I_p^+ - I_n^+ = 0;$$

Или

$$I_p^+ + I_p - I_n - I_n^+ = 0$$

где  $I_n$  – абсолютное значение тока электронов из n-области в p-область (основные носители),  $I_p$  – абсолютное значение тока электронов из p-области в n-область (неосновные носители),  $I_p^+$  – абсолютное значение тока дырок из p-области в n-область,  $I_n^+$  – абсолютное значение тока дырок из n-области в p-область. На рисунке «а» (см. выше) величины этих токов и их направления можно обозначить стрелками, причем токи электронов указаны в зоне проводимости, а токи дырок – в заполненной зоне. Длина стрелок пропорциональна величине токов.

Для равновесных значений токов в темноте введем обозначения:

$$I_n = I_p = I_{\text{темн}};$$

$$I_n^+ = I_p^+ = I_{\text{темн}}^+;$$

Поскольку все эти токи в темноте обусловлены равновесными, а не избыточными носителями, то ток во внешней цепи фотопреобразователя протекать не будет.

Допустим, что p-область освещена. Под действием энергии поглощенных фотонов в ней начнут возникать пары (электрон-дырка) избыточных неравновесных носителей тока. С увеличением под действием света и без того большой концентрации дырок в p-области можно пренебречь. Поэтому действие освещения приведет лишь к увеличению концентрации неосновных носителей, т.е. электронов, в результате чего возрастает электронный ток, идущий из p-области в n-область. Приращение этого электронного тока, вызванного освещением обозначим через  $I_{\text{св}}$ .

Иными словами,  $I_{\text{св}}$  есть ток, создаваемый преобразователем при его освещении, равный эффективному току электронов и дырок, созданных светом и не успевших рекомбинировать до подхода к p-n переходу и, следовательно, разделенных переходом. Причем величина этого тока определяется интенсивностью и спектральным составом излучения).

Возникновение тока  $I_{\text{св}}$  нарушает равновесие. Избыточный электронный ток неосновных носителей, идущий из p-области, приводит к частичной компенсации положительного объемного заряда, сосредоточенного со стороны p-n-перехода со стороны n-области, и, таким образом приводит к снижению потенциального барьера на p-n-переходе.

Уровни Ферми, которые в обеих областях полупроводника изображены так, чтобы расстояния от них до границ по-прежнему определяли тепловую энергию для носителей тока уже не совпадают в обеих зонах. Разрыв между ними по энергетической шкале равен произведению  $qU$ , где  $q$  – заряд электрона, а  $U$  – разность потенциалов, возникшая в результате освещения.

На рисунке «в» выше  $U = U_n$ , где  $U_n$  это падение напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_n$

Для определения величины фото-ЭДС или  $U_{\text{х.х}}$  (напряжение холостого хода) рассмотрим случай разомкнутой цепи.

Снижение потенциального барьера при освещении приводит к возрастанию потока

основных носителей (дырок из p-зоны в n-зону и электронов из n-зоны в p-зону). Число основных носителей заряда, которые могут преодолеть сниженный барьер, тем больше чем ниже высота этого барьера.

По мере снижения высоты потенциального барьера на переходе (когда  $U$  возрастает до величины  $U_{x,x}$ ) заряжающее действие фототока, состоящего из разделенных переходом основных носителей, все в большей мере компенсируется соответствующим возрастанием тепловых потоков основных носителей. В стационарном состоянии потоки зарядов через p-n-переход в обоих направлениях уравниваются друг друга и, так как внешняя цепь разомкнута, общий ток равен нулю.

Для определения соответствующей этому состоянию фото-ЭДС можно, учитывая направления токов написать:

$$I_{св} + I_{рo}^+ + I_{рo}^- - I_{но}^+ - I_{но}^- = 0.$$

Здесь индексом «о» обозначены токи равновесных носителей при освещении)

Поскольку приращение избыточных неосновных носителей, вызванное действием освещения, учтено током  $I_{св}$ , токи равновесных неосновных носителей при освещении становятся равными своим значениям в темноте

$$I_{но}^+ = I_{п}^+ = I_{темн}^+;$$

$$I_{рo}^- = I_{п}^- = I_{темн}^-.$$

С другой стороны, как уже говорилось, токи основных носителей заряда при освещении в результате снижения потенциального барьера на p-n-переходе увеличиваются и становятся равными:

$$I_{но}^- = I_{п}^- e^{qU_{x,x}/kT} \quad a^2 + b^2 = c^2$$

