

СИДДИКОВ И.Х., САТТАРОВ Х.А., ХУЖАМАТОВ Х.Э., ДЕХКОНОВ О.Р.

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР С КРЕМНИЕВЫМИ
ФОТОЭЛЕМЕНТАМИ - ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ**

Данная работа посвящена к вопросам исследования основные характеристики и элементы фотоэлектрического генератора с кремниевыми фотоэлементами, широко применяемые в качестве возобновляемых источников энергии. Известно, что фотоэлектрические устройства представляют собой источники электрической энергии, работающие от потока солнечного излучения и преобразующие элементы генерируют электрический ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности. Эффективность использования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи.

Ключевые слова: фотоэлектрический генератор, кремниевый фотоэлемент, электрический ток, солнечная энергия, суточные, сезонные и случайные изменение облученности.

И.Х. Сиддиков, Х.А. Саттаров, Х.Э. Хужаматов, О.Р. Дехконов

**Кремний фотоэлементли фотоэлектр генератор –
қайта тикланувчан энергия манбаси**

Ушбу мақола қайта тикланувчан энергия манбалари сифатида кенг қўлланилаётган кремний фотоэлементи асосидаги фотоэлектр генераторининг асосий таснифлари ва элементларини тадқиқ этиш масалаларига бағишланган. Маълумки, фотоэлектр қурилмалар қуёш нурланиши оқими асосида ишловчи электр энергияси манбаларининг ўзгартириш элементлари бўлиб, нурланишнинг кунлик, мавсумий ва ихтиёрий ўзгариши негизида электр токини ишлаб чиқади. Қуёш энергиясининг самарали фойдаланилиши нафақат фотоэлементнинг ф.и.к.сидан балки унинг ташқи занжиридаги динамик электр юклама билан мослаштирилганлигига ҳам боғлиқ.

Калит сўзлар: фотоэлектр генератор, кремнийли фотоэлемент, электр ток, қуёш энергияси, нурланишнинг кунлик, мавсумий ва ихтиёрий ўзгариши.

THE PHOTOVOLTAIC GENERATOR WITH SPC – RENEWABLE ENERGY SOURCE

This article is devoted a results of research of the main characteristics and elements of photovoltaic generator with the SPC widely used as renewable energy source. It is known that photovoltaic devices are sources of electrical power, running on solar flux and transform elements generate an electric current in direct proportion to the daily, seasonal and random variations in irradiance. The efficiency of solar energy depends not only on the efficiency of the photo detector, but also on the consistency of the dynamic load in the external circuit.

Keywords: photovoltaic generator, a silicon solar cell, electricity, solar power, daily, seasonal and random variation of irradiance.

Фотоэлемент — электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию. Подразделяются на электровакуумные и полупроводниковые фотоэлементы. Действие прибора основано на фотоэлектронной эмиссии или внутреннем фотоэффекте. Первый фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте, создал Александр Столетов в конце XIX века [1-2].

Фотоэлектрический эффект — испускание электронов веществом под действием света (или любого другого электромагнитного излучения). В конденсированных (твёрдых и жидких) веществах выделяют внешний и внутренний фотоэффект.

Законы Столетова для фотоэффекта [2]:

Формулировка 1-го закона фотоэффекта: Сила фототока прямо пропорциональна плотности светового потока.

Согласно 2-му закону фотоэффекта, максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3-й закон фотоэффекта: для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света (или максимальная длина волны λ_0), при которой ещё возможен фотоэффект.

Теоретическое объяснение этих законов было дано в 1905 году Эйнштейном. Согласно ему, электромагнитное излучение представляет собой поток отдельных квантов (фотонов) с энергией $h\nu$ каждый, где h — постоянная Планка. При фотоэффекте часть падающего электромагнитного излучения от поверхности металла отражается, а часть

проникает внутрь поверхностного слоя металла и там поглощается (Рис.1). Поглотив фотон, электрон получает от него энергию и, совершая работу выхода φ , покидает металл: где — максимальная кинетическая энергия, которую имеет электрон при вылете из металла.

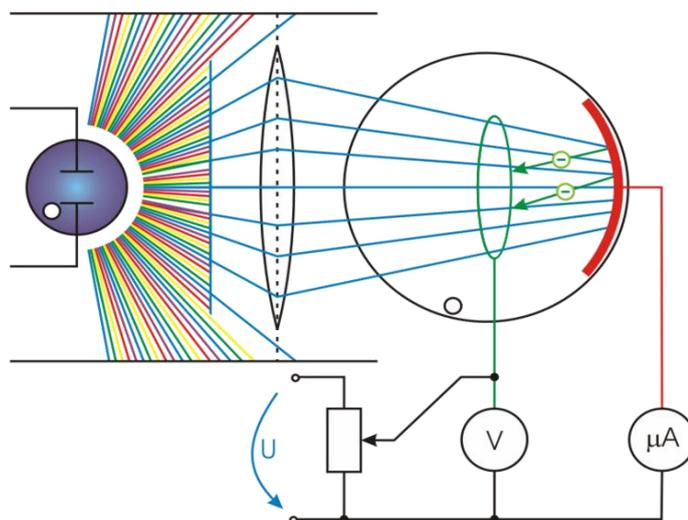


Рис.1. Схема эксперимента по исследованию фотоэффекта.

Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений. Электроны, вылетающие из вещества при внешнем фотоэффекте, называются фотоэлектронами, а электрический ток, образуемый ими при упорядоченном движении во внешнем электрическом поле, называется фототоком.

Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твёрдых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта.

На солнечных электростанциях (СЭС) можно использовать разные типы ФЭП, однако не все они удовлетворяют комплексу требований к этим системам [1,3,4]:

высокая надёжность при длительном (до 25—30 лет) ресурсе работы;

высокая доступность сырья и возможность организации массового производства;

приемлемые с точки зрения сроков окупаемости затрат на создание системы преобразования;

минимальные расходы энергии и массы, связанные с управлением системой преобразования и передачи энергии (космос), включая ориентацию и стабилизацию станции в целом;

удобство техобслуживания.

Некоторые перспективные материалы трудно получить в необходимых для создания СЭС количествах из-за ограниченности природных запасов исходного сырья или сложности его переработки. Отдельные методы улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик ФЭП, например за счёт создания сложных структур, плохо совместимы с возможностями организации их массового производства при низкой стоимости и т. д. [1].

Наиболее вероятными материалами для фотоэлементов СЭС считаются кремний, $Cu(In,Ga)Se_2$ и арсенид галлия ($GaAs$), причём в последнем случае речь идёт о гетерофотопреобразователях (ГФП) со структурой $AlGaAs-GaAs$.

Фотоэлементы всё ещё остаются дорогими преобразователями. Стоимость фотоэлемента – порядка 4 долларов за 1 Вт максимальной установленной мощности, стоимость вспомогательного оборудования – 2 доллара за 1 Вт. Долговечность – 20 лет. При этих условиях стоимость выработанной энергии составляет 0,16 доллара за 1 кВт·час (при облучённости местности $5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в день или приблизительно $0,5 \text{ кВт}/\text{м}^2$).

Устройство и принцип действия фотоэлемента рассмотрим на примере самого распространённого в настоящее время фотоэлемента на основе кремния. Кремниевые фотоэлементы изготавливают путём диффузии фосфора из газовой среды в монокристалл кремния p -типа, получая тонкий слой с n -проводимостью (рис.2.). Кристалл кремния толщиной 300-400 мкм с примесью бора, обладающий p -проводимостью с одной стороны подвергают химическому травлению, при котором формируется тонкий слой материала с проводимостью n -типа путем диффузии доноров (фосфора) в поверхностный слой. Кристалл для этого нагревается в вакуумной камере до 1000°C в атмосфере азота с добавкой хлористо-кислого фосфора.

В кристалле полупроводника созданы 1 и 2 области – с n -проводимостью (электронная проводимость) и p -проводимостью (дырочная проводимость) (рис.2.).

Электрические контакты изготавливаются методом фотолитографии. Вначале для создания низкоомного контакта с кремнием испаряют и наносят титан 3, затем тонкий слой палладия 4, чтобы предупредить химическое взаимодействие титана с серебром, затем осаждают слой серебра 5 для получения токопроводящей сетки.

Последними в процессе вакуумного испарения наносят противоотражательные слои – алюминиевое напыление. На него наносится электрический металлический контакт 6.



Рис.2. Фотоэлемент. Принцип действия полупроводникового фотоэлемента.

При облучении фотоэлемента световым потоком или при его нагревании в материале появляются дополнительные свободные носители. Под действием электрического поля p - n перехода они перемещаются через переход. Если замкнуть цепь, то по ней потечёт ток, пропорциональный световому потоку. Таким образом, фотоэлемент является источником Э.Д.С.

Внутреннее поле кремниевого фотоэлемента создаёт разность потенциалов $0,5 В$ и допускает плотность тока до $200 А/м^2$ при солнечном излучении $1 кВт/м^2$ (табл.1).

Таблица 1

Вольт-амперная характеристика фотоэлемента:

$G, кВт/м^2$	$U, В$	$\Delta I, А/м^2$
1,0	0,5	200
0,8	0,5	160
0,6	0,5	120
0,4	0,5	80
0,2	0,5	40

К.П.Д. фотоэлемента равен $10\pm 20\%$. Фотоэлементы соединяют последовательно, образуя модули, модули соединяются параллельно, образуя батареи. Обычно модуль состоит из 30-35 фотоэлементов. Такое соединение имеет недостатки. При выходе из строя одного из элементов или неравномерном освещении его, он переходит в режим диода с прямым или обратным смещением и может перегреться. Для предотвращения лавинного пробоя параллельно фотоэлементам устанавливают шунтирующие диоды. Фотоэлементы располагают в инертном наполнителе под прозрачной, герметичной, водонепроницаемой крышкой.

Основные технические требования к фотоэлементам [1]:

- Исходный материал должен быть химически чистым с устойчивыми свойствами.
- Фотоэлементы должны серийно выпускаться и иметь минимальную стоимость.

- Срок службы должен быть не менее 20 лет в условиях воздействия окружающей среды при температурах от -30 до $+200^{\circ}\text{C}$. Электрические контакты должны быть стабильными и защищёнными от коррозии, влаги.

- Разрушение одного элемента не должно приводить к выходу из строя всей системы (параллельное, последовательное соединение, шунтирующие диоды).

- Сборные модули должны быть транспортабельны.

Фотоэлементы формируются при контакте металла с полупроводником. Для этого металл осаждается в виде тонкой плёнки на основной материал и образуется *p-n* переход. Недостаток такой конструкции хорошее отражение от металлической поверхности и большие рекомбинационные потери в зоне перехода. При изготовлении такого фотоэлемента образуется тонкий слой окисла между металлом и полупроводником, который является изолятором. Так могут быть получены фотоэлементы с хорошими свойствами (металл-оксид-полупроводник или металл-диэлектрик-полупроводник). В качестве лицевой поверхности фотоэлемента используется жидкий электролит. Это обеспечивает хороший электрический контакт, но отличается сложностью изготовления, низким К.П.Д. и быстрым загрязнением.

Для получения коэффициента концентрации облучения менее 5 используют следящие за солнцем системы, которые используют энергию как прямого, так и рассеянного излучения.

Преобразователей солнечной энергии в электрическую энергию можно назвать:

- термоэлектрические устройства типа термопары, в которых Э.Д.С. возникает в цепи, состоящей из разнородных проводников, контакты между которыми имеют разную температуру,

- термоэлектрические генераторы при нагревании полупроводниковых переходов и др.

Солнечные элементы генерируют ток в прямой зависимости от суточных, сезонных и случайных изменений облученности. Эффективность использования солнечной энергии зависит не только от КПД фотоэлемента, но и от согласованности динамической нагрузки во внешней цепи.

Большинство солнечных элементов представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды (рис. 3.).

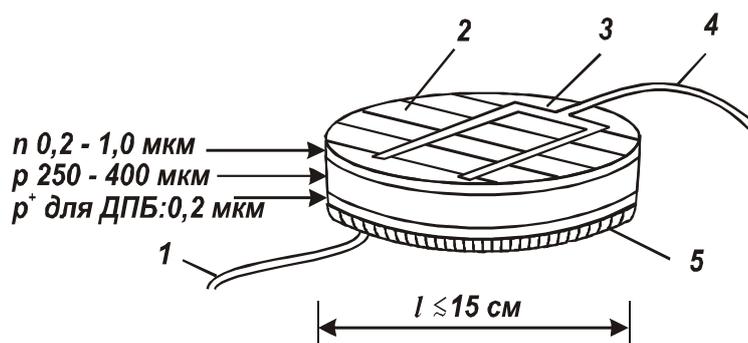


Рис. 3. Типичная структура солнечного элемента с $p-n$ - переходами: ДПБ – добавочный потенциальный барьер: 1 – от лицевой поверхности предыдущего элемента; 2 – противоотражательное покрытие; 3 – лицевой контакт; 4 – к тыльному контакту следующего элемента; 5 – металлический контакт с тыльной стороны.

Стоимость фотоэлектрических установок примерно 7-10 долларов за Vm . Стоимость электроэнергии, вырабатываемой модулями, колеблется в пределах 20-30 центов/кВтчас, что значительно превышает стоимость электроэнергии от традиционных источников. Эти показатели позволяют конкурировать солнечным батареям с дизельными генераторами, особенно в отдаленных районах при мощности примерно до 20 kVm .

Солнечные элементы, как и любые другие генераторы тока, можно использовать для получения электроэнергии. На рис. 4 показана эквивалентная схема цепи, содержащей солнечный элемент [1-2].

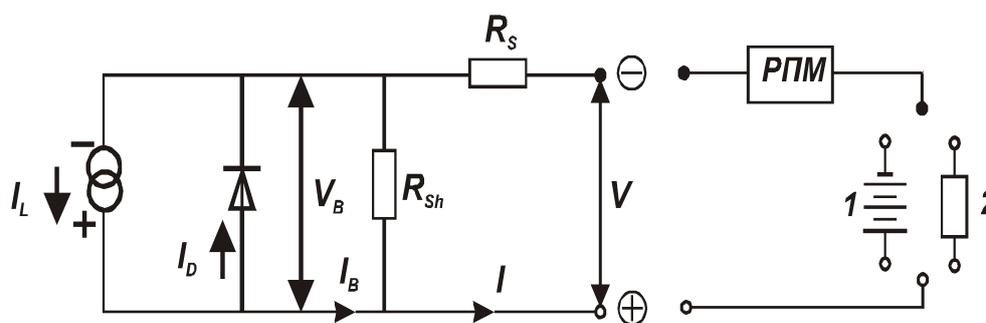


Рис. 6. Эквивалентная схема солнечного элемента: РПМ – устройство регулировки по максимальной мощности; 1 – батарея аккумуляторов; 2 – активная нагрузка

При любой нагрузке, включая аккумуляторы, наилучшее сочетание параметров достигается все же при использовании устройств регулировки нагрузки по максимальной мощности. Эти устройства представляют собой преобразователи постоянного тока. Применение их в цепи позволяет достигать полезного потребления в нагрузке 95%

максимальной выходной мощности при различных условиях облученности солнечной батареи.

Заключение. На основе разработанной авторами данной работы методики осуществлен расчет основных величин и параметров фотоэлектрического генератора с кремниевыми фотоэлементами с продолжительностью работы в течении 8 часов в день, питающий нагрузку 1 кВт, с выходным напряжением - 150 В и который заряжает аккумуляторную батарею (АКБ). В течении ночи – от АКБ питается нагрузка и разряжает АКБ на половину её ёмкости. Полная ёмкость АКБ - 60 Ампер·часов. Расчетные основные величины и параметры фотоэлектрического генератора: номинальная мощность - 1,56 кВт, КПД - 9,8%, количество фотоэлементов - 9000, рабочая площадь - 15,9м².

На основе проведенных исследований установлено, что эффективность солнечных элементов ограничена вследствие различного рода потерь; некоторые из них можно избежать, а другие заключены в физической природе самих элементов фотоэлектрического генератора. Одни ограничения очевидны и могут контролироваться независимо, другие являются сложными и не могут контролироваться без воздействия на материалы.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев К.Р., Сиддиков И.Х. и др. Электрическая часть станции и подстанции (2-издание), (Станция ва подстанцияларнинг электр қисми (2 - нашр)). Тошкент, Чулпон НМИУ, 2015.- 304 с.

2. Хиленко В.И., Хиленко А.В. Электропитание устройств связи. Учебное пособие. М.: Радио и связь, 1998. – 290 с.

3. Сиддиков И.Х. Автоматика электрических станции и электроэнергетических систем. – ТашГТУ, -Ташкент, 2007.–35 с.

4. Siddikov I.Kh., Nazarov F.D., Gafurov J.F., Gaziev B.A., Khakimov M.Kh. Energy management and energy audit in energy sector of Republic Uzbekistan //Control of power system – 04: Thesis's VI – int. conf. June 16-18 2004. - Slovak Rep., High Taras, Strbske Pleso, 2004. – p.p. 230-235.

Тошкент ахборот технологиялари университети, Тошкент.

Ташкентский университет информационных технологий, Ташкент.

Tashkent university of information technologies, Tashkent.