

УДК 535.215.1:621.311

ОТЛИЧИЯ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ СЕРИЙНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сычев В.А.

ТОО «Alatau Service Technologies», Алматы, e-mail: vitaliy.sychev@astech.kz

В данной статье кратко рассмотрены некоторые теоретические аспекты принципа фотоэлектрического преобразования и указан один из основных его параметров – энергия возбуждения электронов. Приведены количественные данные этого параметра для наиболее распространенных материалов и методов изготовления фотоэлектрических преобразователей. Указаны теоретические пределы эффективности такого преобразования (предел Шокли – Квэзе) и приведены примеры практических достижений в отрасли. Приведены ссылки на справочные данные по современным достижениям эффективности фотоэлектрического преобразования. Даны некоторые практические показатели готовых изделий в зависимости от технологии изготовления и применяемых материалов, такие как ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, пиковая мощность. Объяснена и обоснована необходимость использования такого параметра, как массовый коэффициент атмосферы для практического использования параметра пиковой мощности. Кратко приведены методы изготовления фотоэлектрических преобразователей и связанные с этим показатели относительной стоимости. Сделаны выводы о целесообразности применения той или иной технологии (монокристаллического, поликристаллического и аморфного кремния) в конкретных условиях и ограничениях. Сделаны выводы о спектральной чувствительности фотопреобразователей для разных технологий и связанной с этим параметром величины эффективности фотопреобразования. Статья может быть полезна в образовательных и ознакомительных целях.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, пиковая мощность, предел Шокли – Квэзе, кремний, фотоэлектрические панели, аморфный, поликристаллический, монокристаллический, фотоэлектрический, напряжение холостого хода, массовый коэффициент атмосферы, метаморфный, многопереходный

THE DIFFERENCES IN CHARACTERISTICS OF THE MASS PRODUCTION'S PHOTOELECTRIC CONVERTERS APPLIED FOR SOLAR POWER STATIONS DESIGNING

Sychev V.A.

Alatau Service Technologies Ltd., Almaty, e-mail: vitaliy.sychev@astech.kz

In this article, we briefly discuss some theoretical aspects of the principle of photoelectric conversion and indicate one of its main parameters, the excitation energy of electrons. Quantitative data of this parameter are given for the most common materials and methods for manufacturing photoelectric converters. The theoretical limits of the efficiency of such a transformation (the Shockley-Quasier limit) are indicated and examples of practical achievements in the industry are given. Reference is made to reference data on modern achievements of photoelectric conversion efficiency. Some practical indicators of finished products are given depending on the manufacturing technology and materials used, such as short-circuit current, open-circuit voltage, peak power. The necessity of using such a parameter as the mass coefficient of the atmosphere for the practical use of the peak power parameter is explained and justified. The methods of manufacturing photoelectric converters and associated relative cost indices are briefly described. Conclusions are made about the advisability of using this or that technology (monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon) under specific conditions and constraints. Conclusions are drawn about the spectral sensitivity of photoconverters for different technologies and the magnitude of the photoconversion efficiency associated with this parameter. The article can be useful for educational and educational purposes.

Keywords: photoelectric, single-crystal, polycrystalline, amorphous, silicon, photoelectric panels, Shockley – Quasier limit, peak power, short-circuit current, open-circuit voltage, mass atmosphere coefficient, metamorphic, multi-transitive

В последние годы большое значение и популярность приобретают альтернативные источники электроэнергии. Не всегда эта популярность экономически обоснована, но эта область науки и техники имеет огромное значение и большие перспективы. Особенно важно использование таких источников энергии там, где отсутствуют традиционные.

Одним из таких источников являются фотоэлектрические преобразователи (элементы). Основой большинства таких преоб-

разователей являются сплавы химических элементов, формирующих полупроводниковые структуры. Эти фотоэлектрические элементы используют энергию фотонов, излучаемых нашей ближайшей звездой – Солнцем для получения столь знакомой и удобной электрической энергии.

Самыми массовыми фотоэлектрическими преобразователями являются панели, собранные из нескольких (иногда нескольких десятков) единичных элементов, изготовленных из одного из самых распростра-

ненных веществ на планете – кремния (Si). Не такими массовыми, но стоящими упоминания являются германиевые (Ge), арсенид-галлиевые (AsGa), индий-фосфорные (InP) преобразователи и преобразователи на основе теллурида кадмия (CdTe). Последние занимают господствующие позиции на рынке тонкопленочных преобразователей. Разработаны и применяются более сложные методы фотоэлектрического преобразования, но в рамках данной статьи мы их опустим.

Чистый кремний не позволит эффективно преобразовать энергию падающих фотонов в электрическую энергию. Поэтому чистый кристаллический кремний легируют (слегка разбавляют) другими химическими элементами для получения нужной структуры. Сам элемент фотоэлектрического преобразователя состоит из как минимум двух слоев кремния, легированных разными химическими элементами (например, бор (B) и фосфор (P)), создавая таким образом полупроводниковую структуру. Процессу и теоретическим основам такого легирования уделим минимум внимания. А вот метод изготовления рассмотрим подробнее. От них зависят несколько параметров фотоэлектрического преобразователя – общий КПД преобразования, спектральная отдача преобразования, напряжение холостого хода, плотность тока и ток короткого замыкания. От метода изготовления зависит и цена конечного продукта, а следовательно, экономические характеристики преобразования одного вида энергии в другой.

Попробуем описать основные принципы преобразования одного вида энергии в другой и основные методы изготовления каждого вида панелей. Исходя из этого попытаемся определить основные критерии выбора фотоэлектрических преобразователей для конкретных целей.

В солнечных фотопанелях используется фотовольтаический эффект, открытый в 1839 году А.Э. Беккерелем. Этот эффект преобразования одного вида энергии в другой – световой энергии Солнца в электрическую – основан на факте возбуждения электронов кристаллической решетки вещества взаимодействующим с ним фотоном до уровня, при котором электроны смогут перейти на следующий энергетический уровень, покинуть кристаллическую решетку и стать свободным. Свободные электроны под действием внутреннего электростатического поля начинают перемещаться к аноду цепи, а компенсирующий положительный заряд, так называемая «дырка» движется в противоположном направлении. В замкнутой цепи эти заряды рекомбинируют, совершая

работу. Тем самым энергия Солнца (энергия падающих фотонов) превращается в электрическую (энергию движущихся электронов). Поиск наиболее эффективных материалов для такого преобразования ведется в том числе и с учетом спектра излучения нашей звезды, то есть с учетом типичных энергий излучаемых фотонов.

Необходимо пояснить и то, что энергия возбуждения электрона квантуется, то есть для перехода электрона с одного, низкоэнергетического уровня к другому – высокоэнергетическому, требуется определенная, точно известная энергия, выраженная в электрон-вольтах (eV). Если возбуждающий фотон имеет энергию меньше энергии возбуждения электрона, то при их взаимодействии такой электрон останется на своем энергетическом уровне. А энергия фотона уйдет либо на нагрев вещества, либо будет потеряна. В противоположном случае, когда энергия фотона больше энергии возбуждения электрона, такой электрон при взаимодействии перейдет на следующий энергетический уровень, станет свободным (произойдет разделение электрона и «дырки») и сможет участвовать в генерировании электрической энергии. В этом случае мы можем говорить о поглощении энергии фотона и преобразовании его в электрическую. К сожалению избыток энергии фотона будет так же преобразован в тепло. То есть для получения наиболее эффективных фотопреобразователей мы должны использовать материалы, имеющие энергию перехода электронов в возбужденное состояние, равную или близкую (меньшую) энергии большей части фотонов, достигающих Земли. На практике это очень трудно сделать, и мы можем только приблизиться к максимально возможным практическим показателям.

Таким образом, существуют некие рамки эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, так как с одной стороны, мы имеем достаточно узкий диапазон энергий доходящих до нас фотонов, определяемых «окном прозрачности» атмосферы, а с другой стороны, для массового производства мы используем достаточно дешевые материалы, имеющие узкие рамки энергий возбуждения собственных электронов и сравнительно простые технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей.

Максимально достижимый теоретический коэффициент полезного действия фотоэлектрического преобразования для полупроводниковой структуры с одним p-n переходом (наиболее массовый тип фотоэлектрических преобразователей) выведен

совместно Вильямом Шокли и Хансом-Хоакимом Квазье в 1961 году [1] и имеет величину 33,7%. Этот пик достигается при энергии возбуждения электронов вещества в 1,34 eV. Наиболее популярный материал для производства фотоэлектрических преобразователей кремний (Si) имеет энергию возбуждения электронов в 1,12 eV (соответствует длине волны 1107 nm), что приводит к максимальной теоретической эффективности преобразования в 32% [2]. Эта предельная величина, называемая пределом Шокли – Квазье является фундаментальной в отрасли производства фотоэлектрических преобразователей, и ее определение рассматривается как наиболее важное достижение в отрасли. Хотя в более поздних работах максимальный коэффициент эффективности кристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей оценивается в 29,4% [3]. На рис. 1 показан график зависимости эффективности фотоэлектрического преобразователя от энергии возбуждения электронов вещества.

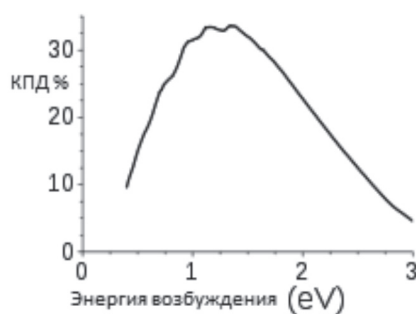


Рис. 1. Зависимость эффективности фотопреобразователей от энергии возбуждения электронов вещества

Для повышения эффективности фотоэлектрического преобразования прибегают к таким методам, как, например, создание многопереходных полупроводников, тем самым увеличивая вероятность поглощения фотонов с более широким диапазоном энергий (каждый p-n переход поглощает энергию «своих» фотонов), или использование фотолюминесцентных покрытий [4], преобразующих «бесполезные» высокоэнергетические фотоны в менее энергетические, но «полезные» (фактически «перекрашивая» их), которые могут быть поглощены нашим материалом. Такие технологии достаточно дороги и используются только там, где эффективность фотоэлектрического преобразования – преобладающий или главный фактор для заданных целей. Например, для космических аппаратов.

Пояснив качественные принципы фотоэлектрического преобразования, можно

указать и на количественные. Основной задачей отрасли производства фотоэлектрических преобразователей был и остается поиск такой комбинации веществ и элементов, при котором коэффициент полезного действия такого преобразования будет максимальным. В данном случае КПД определяется как отношение мощности электрической энергии, вырабатываемой единичной площадью элемента к мощности падающего на такой элемент солнечного света. Стандартным методом измерения является облучение тестового образца световым потоком мощностью 1000 Вт/м², со спектром излучения, соответствующим солнечному. Полученная электрическая мощность, приведенная на 1 м² образца, и будет показателем эффективности. В настоящее время КПД самых современных экспериментальных фотопреобразователей достигает 44% (2012 г. метаморфные материалы с тройным p-n переходом), а наиболее распространенные преобразователи на основе монокристаллов кремния имеют КПД не более 17–20%. В книге [5] приводится графическая таблица от авторитетной исследовательской лаборатории Министерства энергетики США NREL по эффективности преобразования всех известных на сегодняшний момент методов.

Практическим показателем, по которому можно судить об эффективности целой фотоэлектрической панели, является пиковая электрическая мощность W_p при массовом коэффициенте атмосферы 1,5 (AM – air mass) [6, 7]. Этот коэффициент введен для практических целей. Он учитывает наклон оси земли на своей орбите и, соответственно то, что Солнце не светит перпендикулярно земной поверхности в большинстве стран в средних широтах. Этот коэффициент означает полуторное расстояние от поверхности земли до края атмосферы (при отклонении оси «Солнцесповерхность Земли» от нормали в 48,2°). Таким образом учитывается средний уровень поглощения солнечного света атмосферой на средних широтах в течение года. Поэтому пиковая мощность фотопанели, указанная в паспорте как $W_p = 100$ Вт (AM = 1,5), например, на географической широте города Алматы, Республика Казахстан 22 июня в 13 часов (максимально возможный угол солнца над горизонтом), будет составлять 141 Вт, а 22 декабря в то же время (минимально возможный угол солнца над горизонтом в истинный полдень [8]) будет составлять 59 Вт. Но для практических расчетов, учитывая среднегодовую инсоляцию, удобно использовать как раз этот параметр W_p (AM 1,5). На рис. 2 представлена фотография ти-

пичного шильдика монокристаллической фотопанели, где указаны основные электрические параметры – пиковая мощность (P_{max}), пиковый ток (I_{mp}), пиковое напряжением (V_{mp}), ток короткого замыкания (I_{sc}) и напряжение холостого хода (V_{oc}). Указано также, что все технические данные приведены для стандартных условий испытания ($AM = 1,5$, мощность светового потока 1000 Вт/м^2).

Solar Module	
Rated Max Power (P_{max})	100W
Current at P_{max} (I_{mp})	5.36A
Voltage at P_{max} (V_{mp})	18.0V
Short-Circuit Current (I_{sc})	6.11A
Open-Circuit Voltage (V_{oc})	22.4V
All technical data at standard test condition	
$AM=1.5 \quad E=1000 \text{ W/m}^2 \quad T_c=25^\circ\text{C}$	

Рис. 2. Типичный шильдик монокристаллической фотопанели производства Китая (фото автора)

Напряжение холостого хода V_{oc} (напряжение без нагрузки при стандартных тестовых испытаниях) указано в вольтах и ток короткого замыкания I_{sc} в амперах. Оба этих параметра напрямую зависят от используемых материалов и технологии изготовления фотоэлектрических преобразователей и указаны в паспорте каждой фотопанели.

В настоящее время в мире для производства массовых серийных фотоэлектрических преобразователей используют три основные технологии их изготовления. Эти технологии применяются для получения монокристаллических, поликристаллических и аморфных фотоэлектрических элементов. В названии каждого из этих видов заключен и метод изготовления. В последнее время можно найти немало статей, опубликованных на интернет-сайтах, где авторы не всегда корректно рекомендуют какой-либо тип фотопанелей как наиболее экономически эффективные. Одни утверждают, что нет лучше монокристаллических панелей, другие – что поликристаллические (или аморфные) лучше работают при низкой освещенности и поэтому предпочтительнее использовать их. Попробуем разобрать все три метода изготовления массовых фото-

электрических преобразователей и присущие им достоинства и недостатки.

Первый метод – естественная кристаллизация расплава кремния в контролируемых условиях. Этот метод, названный по имени его изобретателя – Яна Чохральского, используется для получения монокристалла кремния, который в дальнейшем делится на тонкие пластины, обрабатывается соответствующим образом и служит основой для единичного фотоэлектрического преобразователя [9]. Сложность (высокая температура, постоянный контроль процесса движения затравки, контролируемая атмосфера) и длительность изготовления напрямую влияют на цену готового продукта, поэтому такие фотопреобразователи наиболее дорогие из массовых. Но благодаря химической чистоте, правильной, почти идеальной кристаллической структуре, коэффициент полезного действия таких фотопреобразователей самый высокий среди массовой серийной продукции. Энергия возбуждения в таком материале, как указывалось выше, $1,1 \text{ eV}$. Соответственно, напряжение холостого хода V_{oc} составляет $0,67 \text{ В}$, а плотность тока доходит до 40 mA/cm^2 . Благодаря тому, что готовый кристалл имеет цилиндрическую форму, готовые фотоэлектрические элементы имеют форму квадрата со скошенными краями. В мире 90 % фотоэлектрических преобразователей монокристаллические. На рис. 3 представлен вид монокристаллического фотоэлемента. Отличительная особенность – скошенные края, так как такие элементы вырезаются из цилиндрической заготовки.



Рис. 3. Монокристаллический фотоэлемент

Второй метод изготовления, наиболее распространенный для производства поликристаллического кремния – это процесс осаждения поликристаллического кремния из газовой фазы [10, 11]. Этот метод ме-

нее энергоемок и требует меньше времени. Но в итоге получается состав, состоящий из множества микрокристаллов кремния. Дополнительные потери на границах отдельных кристаллов приводят к ухудшению показателей эффективности. Но стоимость фотоэлектрических панелей на базе пластин из поликристаллического кремния ниже. Типичные показатели таких фотопанелей – $V_{oc} = 0,4 - 0,6 \text{ V}$, в зависимости от размеров микрокристаллов; I_{sc} – немного меньше, так же как и плотность тока. Общая эффективность едва более 10%. Готовые фотоэлектрические элементы имеют форму правильного прямоугольника, как на рис. 4.

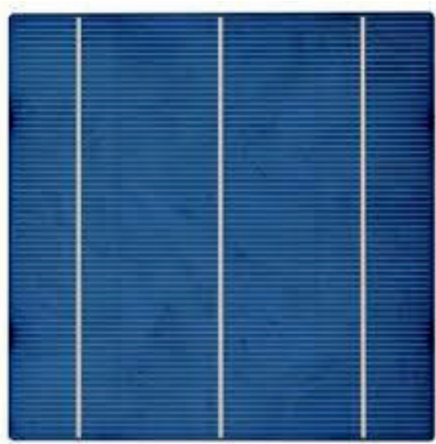


Рис. 4. Поликристаллический фотоэлемент

Третий метод – использование аморфного кремния в виде тонких пленок, нанесенных на практически произвольную подложку, в том числе гибкую [12, 13]. Фотоэлектрические панели с использованием аморфного кремния могут быть в виде большой единой монопанели, как показано на рис. 5, или даже рулонного типа. Обобщенные показатели таких фотопанелей следующие – энергия возбуждения 1,6–1,8 eV, плотность тока 17–18 mA/cm^2 , $V_{oc} = 0,8 \text{ V}$, а общая эффективность 6–8%. Благодаря своим свойствам коэффициент поглощения видимого света аморфного кремния много больше, чем кристаллического, поэтому толщина пленки может быть намного меньше (в десятки раз), но из-за несовершенства кристаллической структуры остальные показатели много меньше. Еще одним эффектом фотоэлектрических панелей на базе тонких пленок является меньшая чувствительность к длинноволновой части спектра и более высокая к коротковолновой. На практике это приводит к интересному эффекту – такие фотоэлектрические панели в пасмурный день или на закате теряют

эффективность медленнее, чем панели на базе кристаллического кремния. Так как более высокочастотное излучение (более высокоэнергетические фотоны) меньше ослабляются облаками и вообще атмосферой. Но общая среднесуточная или среднегодовая эффективность остается низкой и несравнима по этим показателям с монокристаллическими фотопанелями. Это важно указать, так как в некоторых источниках, например [14], говорится о том, что «...при слабом или рассеянном освещении панели из аморфного кремния генерируют до 20% больше энергии...», что не совсем верно. При одинаковой площади массовых серийных фотоэлектрических преобразователей именно монокристаллические генерируют максимальное среднесуточное и среднегодовое количество электроэнергии.



Рис. 5. Фотоэлектрическая панель из аморфного кремния

Таким образом, исходя из качественных показателей каждого вида фотоэлектрических преобразователей, можно сделать общие рекомендации при их выборе для конкретных условий использования. Если есть ограничения по весу или площади или требуется максимальная экономическая эффективность, то для установки фотопанелей для общего бытового использования или генерации больших объемов электроэнергии необходимо рассматривать фотопанели на базе монокристаллов кремния. Для вспомогательных целей электрогенерации, при достаточной площади можно использовать фотопанели на базе поликристаллического или аморфного кремния, или с использованием тонкопленочных покрытий других соединений, например на базе CdTe.

Список литературы

1. Shockley William, Queisser Hans. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells // *Journal of Applied Physics*. – 1961. – Vol. 32 (March 1961). – P. 510–519; DOI: 10.1063/1.1736034.
2. Ruhle S. Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells // *Solar Energy*. – 2016. – no. 130. – P. 139–147. Bibcode:2016 SoEn..130..139R. DOI:10.1016/j.solener.2016.02.015.
3. Richter A., Hermle M., Glunz S.W. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells // *IEEE Journal of Photovoltaics*. – Oct 2013. – no.3(4). – P. 1184–1191. DOI:10.1109/JPHOTOV.2013.2270351.
4. Sunovia, EPIR demonstrate optical down-conversion for solar cells / Editor Lillian B. 14.11.2008. URL: <https://solarindustry.com/sunovia-epir-demonstrate-optical-down-conversion-for-solar-cells> (дата обращения: 06.03.2018).
5. Arno Smets, Klaus Jager, Olindo Isabella, Miro Zeman, Rene van Swaaij. *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion // Technologies and Systems*. ISBN-10: 1906860327. ISBN-13: 978-1906860325. UIT Cambridge, 2016. – 462 p.
6. Arthur N. Cox/ *Allen's Astrophysical Quantities*, 4th ed., ISBN-10: 1461211867, ISBN-13: 9781461211860. Springer, Mar 19, 2015. – 721 p.
7. Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173. The ASTM G-173 standard measures solar intensity over the band 280 to 4000 nm. URL: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html> (дата обращения: 06.03.2018).
8. Самойлов К.И. *Морской словарь*. – М.-Л.: Государственное Военно-морское издательство НКВМФ Союза ССР, 1941. – 644 с.
9. Czochralski J. Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle [A new method for the measurement of the crystallization rate of metals] // *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. – 1918. – no. 92. – P. 219–221.
10. Кремний «солнечного качества»: производство в России. – 2009. URL: <http://www.abercade.ru/research/analysis/1920.html> (дата обращения: 06.03.2018).
11. Особенности технологии кремниевых основ для получения поликристаллического кремния / Ю.В. Реков, И.Ф. Червоный, С.Г. Егоров // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – Т. 5, № 8(59). – С. 47–51.
12. Minnaert Ben. *Thin film solar cells: an overview*. Universiteitsbibliotheek Gent. – 2008. Object id: 1854/LU-4238935 handle. Permalink: <https://lib.ugent.be/catalog/pug01:4238935>.
13. Shah A. editor. *Thin-film silicon solar cells*. EPFL Press. – 2010. – 430 p. ISBN-10:1420066749, ISBN-13: 9781420066746.
14. Аморфные солнечные батареи. – 2015. URL: <http://www.solnpanels.com/amorfnye-solnechnye-batarei> (дата обращения: 06.03.2018).