

Почему популярны фотоэлектрические модули из кристаллического кремния?

Гринь Г. В., Голотюк В. Н., Янчук И. В.

Безусловным мировым лидером среди возобновляемых источников энергии по скорости внедрения стали фотоэлектрические преобразователи энергии солнечного света (ФЭП), собранные в фотоэлектрические солнечные панели (модули), благодаря их экологической чистоте, неисчерпаемости источника и удобству эксплуатации. Особенности технологии производства, преимущества и недостатки фотомодулей из кристаллов кремния – предмет обсуждения в данной статье

Существует несколько основных видов фотоэлектрических (фотовольтаических) модулей с использованием различных технологий изготовления фотопоглощающих электрогенерирующих материалов: органические; тонкопленочные фотоэлектрические модули; панели на основе материалов АЗВ5 или других полупроводников; на основе аморфного кремния; кремниевые кристаллические (на основе моно- или мультикристаллического кремния) ячейки. Больше об этом см. статью в журнале AW-Therm № 5-2016 «Насколько подешевеет солнечное электричество?».

Тонкопленочные и органические фотопреобразующие материалы имеют ряд достоинств – низкая цена, возможность адаптации на любой поверхности, упрощенный монтаж и т. д. Однако на сегодня они распространены незначительно из-за невысокого КПД (около 12-14%) и быст-

рой деградации. Фотоэлектрические модули на основе полупроводников АЗВ5 имеют высокие значения КПД, однако также пока не получили широкого распространения из-за дороговизны и чаще всего используются в специальных областях.

Поэтому сегодня наибольшее распространение в «бытовой энергетике» получили кристаллические (кремниевые) фотоэлектрические модули, удачно сочетающие в себе высокие значения КПД, долговечность и разумное сочетание цена/качество. По разным оценкам доля кремниевых кристаллических модулей, применяемых сейчас для PV-генерации в мире, составляет до 90%.

Одним из основных недостатков «кристаллических» модулей является жесткость плоской конструкции, усложняющая их применение в проектах размещения на криволинейных поверхностях.

Также, важным недостатком этих модулей есть довольно высокий коэффициент температурного снижения мощности, приводящий к потере до 20% генерируемой мощности в летний период из-за нагрева модуля.

Следует отметить, однако, что последний недостаток характерен также и для других типов модулей.

Различают два подвида кремниевых кристаллических модулей: монокристаллические и мульткристаллические. К последним также относятся т. н. «квази-монокристаллические» модули, в которых используется мульткристаллический кремний с особо крупными зернами кристаллов.

В основе работы фотоэлектрического преобразователя (PV-элемента) лежит известный с начала прошлого века физический эффект: высвобождение электрона из атома в кристалле при поглощении кванта солнечного света. Одновременно с этим, в полупроводниковом материале в приграничной к р-п переходу области возникает область пространственного разделения заряда, благодаря чему в этой зоне создается разность электрического потенциала (электрическое напряжение), под воздействием которого свободные электроны приобретают направленное движение (электрический ток). Другими словами, фотоэлектрический преобразователь (солнечный элемент) является полупроводниковым диодом большой площади, генерирующим электрический ток под воздействием фотонов солнечного света.

Работа любого полупроводникового прибора (диода, транзистора, интегральной микросхемы) в первую очередь зависит от чистоты и структурного совершенства исходного монокристалла, в связи с чем в микроэлектронике степень чистоты кремния достигает уровня «шести девяток» – 99,9999%. При этом в монокристалле не допускается наличия структурных дефектов (отклонений от монокристалличности) по всему объему кристалла.

Поэтому развитие технологий производства фотоэлектрических преобразователей нача-



Рис. 1. Фото процесса выращивания монокристалла

лось именно с использования высокочистых монокристаллов кремния (наиболее распространенный в электронной промышленности и солнечной энергетике полупроводник, получаемый выращиванием из расплава методом Чохральского).

Более половины производителей ФЭП и сегодня продолжают использовать монокристаллы кремния для серийных ФЭП, достигая при этом КПД на уровне 21-22%.

В таблице 1 показано сравнение параметров монокристаллов кремния, производимого предприятием «Пролог Семикор», и используемого для собственного производства монокристаллических модулей, с параметрами монокристаллов, используемых этим предприятием для изготовления полированных монокристаллических кремниевых подложек и экспортируемых предприятием для производителей микроэлектронных приборов во всем мире. Из таблицы можно легко увидеть



Рис. 2. Фото выращенного слитка кристаллического кремния

Таблица 1. Сравнение параметров монокристаллов кремния

Наименование параметра	Значение для кремния электронного качества	Значение для кремния солнечного качества
Тип/легирующая примесь	p (Бор), n (Фосфор, Сурьма, Мышьяк)	p (Бор), n (Фосфор)
Ориентация кристаллографической оси кристалла	(100), (111), (110)	(100)
Удельное электрическое сопротивление (у. э. с.), Ом·см	0,001-140 Ом·см	0,5-3,0 Ом·см
Содержание оптически активных атомов кислорода, ат/см ³	(7-9)·10 ¹⁷	<9·10 ¹⁷
Содержание оптически активных атомов углерода, ат/см ³	<5·10 ¹⁶	<5·10 ¹⁶
Радиальный разброс (у. э. с.), %	<10%	<15%
Время жизни неравновесных носителей заряда, мкс	>10	>10
Плотность микродефектов, см ⁻²	<2·10 ⁵	<2·10 ⁵
Плотность дислокаций, см ⁻²	<10	<10

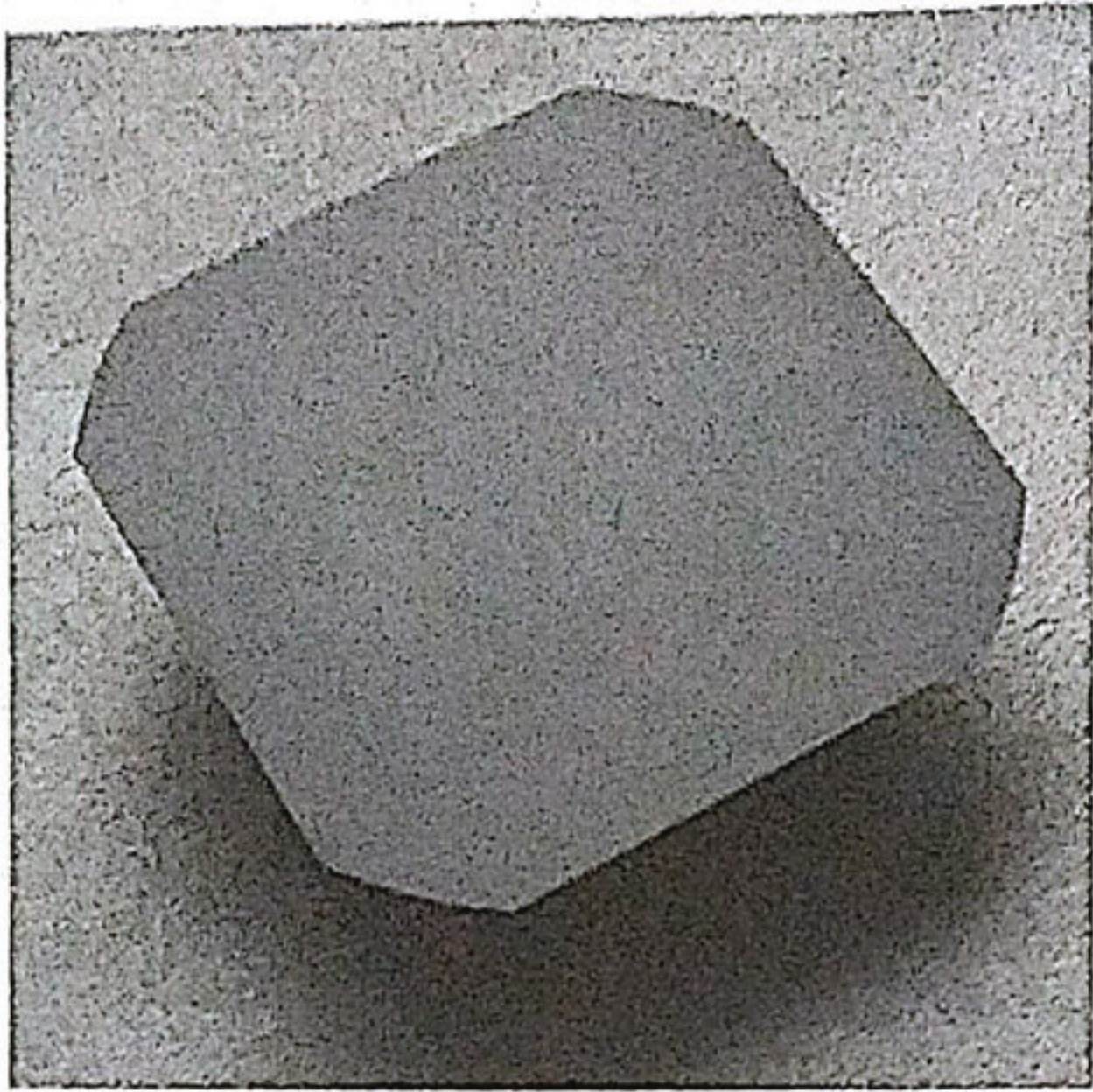


Рис. 3. Пластина монокремния (слева) и мультикремния (справа)

идентичность главных электрофизических, примесных и структурных параметров кристаллов.

Однако бурный рост в солнечной индустрии в 2005-2010 гг. вызвал дефицит монокристаллического кремния и быстрый рост его цены. Одновременно резко выросла цена на сырье, используемое для его производства – высокочистый поликристаллический кремний. В связи с этим быстро начали развиваться технологии производства мультикристаллического кремния, получаемого из расплава методом направленной кристаллизации.

По своей структуре мультикристаллический кремний является поликристаллом с большим количеством монокристаллических зерен большого размера, в отличие от монокристалла, сохраняющего регулярную структуру во всем объеме. Наличие в объеме мультикристалла разориентированных зерен и, соответственно, межзеренных границ приводит к существенному снижению эффективности ФЭП, изготовленных из них, из-за фактического исключения области границ между зернами из процесса генерации. КПД лучших образцов ФЭП на мультикристаллическом кремнии составляет не более 18-19%, что примерно на 10-15% ниже КПД ФЭП из монокристаллического кремния. Типичные фото подложек для ФЭП монокремния и мультикремния показаны на рис. 3.

Более того, благодаря структурному совершенству и устойчивости структуры монокристалла деградация электрофизических параметров ФЭП на монокристалле составляет не

более 0,5-0,8% в год, то есть за 10-15 лет эксплуатации падение электрической мощности солнечной панели не превысит 5-12%.

Поскольку в мультикристалле границы между зернами – это области с нарушенной регулярностью кристаллической струк-

туры, то вокруг них в монокристаллических зернах дополнительно возникают объемные поля упругих деформаций, которые со временем вынуждают атомы примесей (в том числе легирующих примесей) перераспреде-

ляться в объеме кристалла. Таким образом, границы между зернами со временем приобретают вредные «шунтирующие свойства». В результате деградация модулей из мультикристаллического кремния составляет до 2% в год, что в 3-4 раза выше показателя ФЭП из монокристаллического кремния.

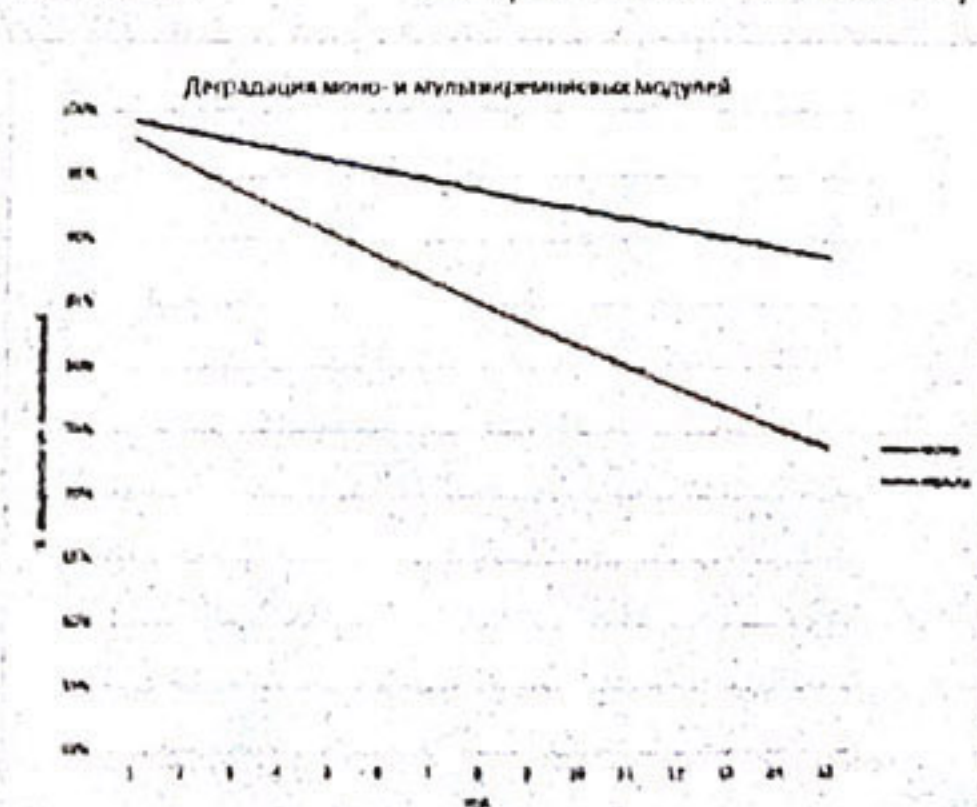
Графики деградации модулей на моно- и мульти кристаллическом кремнии приведены на рис. 4.

Кроме того, монокристаллический кремний, имея бездислокационную структуру, создает наилучшие условия для работы р-п перехода, а единая кристаллографическая ориентация поверхности значительно упрощает и повышает эффективность создания развитой поверхности для эффективного поглощения солнечного излучения.

Помимо этого, кремний имеет достаточно активную поверхность и требует нанесения в процессе производства т. н. пассивирующих слоев. Следует отметить, что среди современных технологий распространен процесс пассивации тыльной стороны, так называемая PERC-технология. Учитывая специфику данного процесса, он эффективно применяется для монокремниевых солнечных элементов и имеет огромные проблемы для мультикремниевых, так как требует высокой механической прочности пластины, что мультикремний не обеспечивает из-за нерегулярной и напряженной структуры. Еще одно достоинство монокристаллических модулей по сравнению с мультикристаллическими – более низкий температурный коэффициент снижения мощности при возрастании температуры.

Однако мультикристаллические модули имеют ряд преимуществ, сохраняющих их паритетное место на мировом рынке. Главное их достоинство, безусловно, – меньшая цена по сравнению с монокристаллическими модулями, и, при отсутствии ограничений по площади земельных участков и при высоких уровнях инсоляции (например, в пустынных районах африканских или азиатских стран),

Рис. 4. Дegradация мощности PV-модулей на моно- и мультикристаллическом кремнии



мультикристаллические модули находят своего потребителя.

Следует также отметить, что использование дешевых мультикристаллических модулей в Украине не означает, что будет получен лучший экономический результат. В связи с неуклонным снижением стоимости модулей в последние годы их доля в стоимости солнечной станции снизилась с 60-70% в начале десятилетия до 40-45% сегодня. В то же время, доля расходов на подготовительные работы, кабельную продукцию, монтажные изделия за это время выросла, в связи с чем удельная стоимость этих затрат на установленный ватт станции из мультикристаллических модулей возросла по сравнению с монокристаллическими установками, а полная стоимость всей станции осталась практически прежней.

Очень важным для надежной работы фотоэлектрических модулей является качество используемых материалов при его производстве. Учитывая, что модули используются в естественных, а не в лабораторных условиях, устойчивость к внешним агрессивным воздействиям (перепады температур, влажность, осадки, ультрафиолетовые лучи) имеет критическую важность.

В мире существует всего несколько лабораторий, которые могут профессионально проверить характеристики надежности модуля. Самыми критичными (прим. имеется в виду наиболее важный материал с точки зрения обеспечения надежности модуля) материалами являются т. н. «инкапсулянт», т. е. пленка, обеспечивающая герметизацию модуля и исключающая попадание влаги в саму панель. Это так называемая этил-винил-ацетатная пленка (ЭВА). Помимо инкапсулирующих свойств, пленка должна обладать устойчивостью к ультрафиолету. В мире насчитывается всего несколько компаний, обладающих технологией изготовления высококачественных стойких пленок.

Также критичным для надежности элементом солнечной установки является распределительная коробка, обеспечивающая надежную и эффективную передачу генерируемой электроэнергии от модуля к инвертору.

Высокие требования к герметичности панели, способность выдерживать механические нагрузки, надежность распределительной коробки одинаково важны как для монокристаллических, так и для мультикристаллических модулей. Поэтому, выбирая тип модуля и поставщика, необходимо всегда помнить о длительном сроке эксплуатации модуля (до 25 лет). То есть, возможность надежного контроля качества материалов, технологии производства и выходного качества модулей, а также надежность исполнения гарантийных обязательств производителем должны иметь для потребителя решающее значение при выборе.



11-13 КВІТНЯ
КИЇВ, УКРАЇНА

ОРГАНІЗАТОР

КОНФЕРЕНЦІЯ:

11 КВІТНЯ, ГОТЕЛЬ «ХІЛТОН»

ВИСТАВКА:

12-13 КВІТНЯ, «АККО ІНТЕРНЕТШНЛ»

CISOLAR 2018

7-а МІЖНАРОДНА
КОНФЕРЕНЦІЯ ТА ВИСТАВКА
СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
В ЦЕНТРАЛЬНІЙ ТА СХІДНІЙ ЄВРОПІ

ЗУСТРІЧАЙТЕ
НАЙПЕРСПЕКТИВНІШІ
РИНКИ ЄВРОПИ

ЧОМУ ВАРТО
ВЗЯТИ УЧАСТЬ У CISOLAR 2018:



НЕТВОРКІНГ:

комунікації та налагодження ділових стосунків з галузевими професіоналами та фінансовими інституціями.



ВИВЧЕННЯ:

Дізнайтесь про останні тенденції та прогнози в енергетиці від тих, хто безпосередньо причетний до цих процесів.



ВІДКРИТТЯ:

дізнайтесь, що є можливим, коли передові технології та блискучі професіонали збираються разом.



СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ:
підготовка до майбутнього сонячної енергії та джерело важливої інформації, яка забезпечить чисте середовище та успішний бізнес.

(044) 383-03-56

CISOLAR@IBCENTRE.ORG