



**ИнфоМайн** 

**исследовательская группа**

Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов,  
металлургии и химической промышленности

---

# Обзор рынка солнечных фотоэлементов на не-кремниевой основе и материалов для их производства в мире

*Демонстрационная версия*

**Москва  
Июль 2011**

Internet: [www.infomine.ru](http://www.infomine.ru)

e-mail: [info@infomine.ru](mailto:info@infomine.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АННОТАЦИЯ.....</b>	<b>10</b>
<b>Введение .....</b>	<b>11</b>
<b>I. Технология производства, конструктивные особенности и основные характеристики не-кремниевых ФЭП. ....</b>	<b>13</b>
1.1. Основные принципы работы солнечных батарей .....	13
1.2. Основные типы ФЭП. Технология производства, конструктивные особенности и характеристики не-кремниевых ФЭП .....	17
1.2.1. ФЭП на слоях теллурида кадмия (CdTe) .....	19
1.2.2. ФЭП на слоях диселенида меди-индия (CIGS) .....	21
1.2.3. ФЭП на основе GaAs .....	22
1.3. Коэффициент полезного действия (к.п.д.) ФЭП – история и прогноз.....	25
<b>2. Сырье для выпуска не-кремниевых солнечных фотоэлементов.....</b>	<b>30</b>
2.1. Кадмий .....	31
Мировые запасы металла .....	31
Источники получения .....	31
Динамика производства .....	31
Страны-производители .....	32
Цены.....	34
Области потребления .....	35
2.2. Теллур .....	37
Мировые запасы металла .....	37
Источники получения .....	37
Динамика производства .....	37
Страны-производители .....	37
Цены.....	38
Области потребления .....	40
Соединения кадмия и теллура.....	41
Теллурид кадмия.....	41
Теллурид цинка-кадмия .....	42
2.3. Селен .....	46
Мировые запасы металла .....	46
Источники получения. ....	46
Динамика производства .....	46
Страны-производители .....	47
Цены.....	49
Области потребления .....	50

2.4. Индий.....	52
<i>Мировые запасы металла</i> .....	52
<i>Источники получения</i> .....	52
<i>Динамика производства</i> .....	52
<i>Страны-производители</i> .....	53
<i>Цены</i> .....	55
<i>Области потребления</i> .....	56
2.5. Мышьяк .....	58
<i>Мировые запасы металла</i> .....	58
<i>Источники получения</i> .....	58
<i>Динамика производства</i> .....	58
<i>Основные страны-производители</i> .....	59
<i>Цены</i> .....	59
<i>Области потребления</i> .....	60
2.6. Галлий.....	62
<i>Мировые запасы металла</i> .....	62
<i>Источники получения</i> .....	62
<i>Динамика производства</i> .....	62
<i>Страны-производители</i> .....	64
<i>Цены</i> .....	65
<i>Области потребления</i> .....	66
2.7. Германий .....	70
<i>Мировые запасы металла</i> .....	70
<i>Источники получения</i> .....	70
<i>Динамика производства</i> .....	72
<i>Страны-производители</i> .....	73
<i>Цены</i> .....	75
<i>Области потребления</i> .....	76
<b>3. Мировой рынок не-кремниевых солнечных фотоэлементов – оценочные объемы производства, распределение по видам, доля в общей солнечной энергетике.....</b>	<b>82</b>
3.1. Динамика развития ТП не-кремниевых ФЭП и прогноз.....	82
3.2. Снижение стоимости производства не-кремниевых ФЭП и прогноз.....	86
3.3. Основные производители не-кремниевых ФЭП .....	87
<i>ФЭП на CdTe</i> .....	87
<i>Источник: Инфомайн</i> .....	87
<i>ФЭП на основе CIS/CIGS</i> .....	88
<i>ФЭП на основе <math>A_3B_5/Ge</math> с концентраторами</i> .....	91
<i>Производители германиевых подложек</i> .....	93

<b>4. Российский рынок не-кремниевых солнечных ФЭП по состоянию на начало 2011 г.</b> .....	<b>95</b>
<b>5. Перспективы рынка не-кремниевых солнечных фотоэлементов (прогноз до 2025 года) с точки зрения сырьевой базы</b> .....	<b>106</b>
5.1. Сырьевая база для ФЭП на слоях теллурида кадмия .....	108
5.2. Сырьевая база для ФЭП на слоях диселенида меди-индия (CIGS).....	110
5.3. Сырьевая база для ФЭП на $A_3B_5$ с концентраторами солнечного света	111
<b>Заключение</b> .....	<b>117</b>
<b>Приложение 1. Список основных источников</b> .....	<b>118</b>
<b>Приложение 2. Адресная книга основных производителей не-кремниевых тонкопленочных ФЭП в мире и России</b> .....	<b>119</b>

### Список таблиц

- Таблица 1. Основные компании-производители не-кремневых ФЭП на тонких пленках
- Таблица 2. Методы производства ФЭП на основе CdTe различными производителями
- Таблица 3. Ключевые проблемы и пути повышения к.п.д. ФЭП
- Таблица 4. Основные технико-экономические параметры ФЭП различных типов, история и прогноз до 2020 г.
- Таблица 5. Основные производители соединений кадмия и теллура
- Таблица 6. Динамика цен высокочистого порошка CdTe для ФЭП в 2004-2014 гг., долл./мм<sup>3</sup>
- Таблица 7. Общий мировой потенциальный спрос на германий до 2012 гг. (т в пересчете на Ge)
- Таблица 8. Крупнейшие производители ФЭП в 2010 г.
- Таблица 9. Основные производители ФЭП на CdTe и их мощности на 2011 г., МВт
- Таблица 10. Наиболее крупные компании, выпускающие ФЭП на CIGS
- Таблица 11. Характеристики германиевых подложек, произведенных методом Чохральского
- Таблица 12. Динамика рынка ФЭП в России в 2006-2010 гг., млн долл.
- Таблица 13. Основные направления развития солнечной энергетики в России
- Таблица 14. Сводная таблица лимитирующих элементов для производства не-кремниевых тонкопленочных ФЭП

## Список рисунков

- Рисунок 1. Структура и внешний вид ФЭП
- Рисунок 2. Схематическое изображение зонной структуры полупроводника
- Рисунок 3. Зонная модель разомкнутого p-n-перехода
- Рисунок 4. Коэффициент поглощения полупроводников, применяемых в солнечной энергетике
- Рисунок 5. Классификация типов тонкопленочных ФЭП
- Рисунок 6. Производство ФЭП по технологиям в 2010 г. (в МВт и %%)
- Рисунок 7. Структура и внешний вид ФЭП на основе теллурида кадмия
- Рисунок 8. Структура и внешний вид ФЭП на основе CIGS
- Рисунок 9. Получение структуры CIGS
- Рисунок 10. Структура, внешний вид и схематическое изображение ФЭП на основе GaAs
- Рисунок 11. Динамика развития CPV-фотовольтаики
- Рисунок 12. История роста к.п.д. ФЭП различных типов в 1975-2010 гг.
- Рисунок 13. Рекордные значения к.п.д. ФЭП различных типов (2011 г.)
- Рисунок 14. Динамика в 2009-2010 гг., прогноз до 2015 г. роста к.п.д. ФЭПов по различным технологиям
- Рисунок 15. Снижение к.п.д. ФЭПов, изготовленных по разным технологиям, при повышении температуры на 40 °С
- Рисунок 16. Мировое производство кадмия (1983-2010 гг.), тыс. т/год
- Рисунок 17. Производство кадмия в мире по странам в 2010 г.
- Рисунок 18. Крупнейшие мировые экспортеры кадмия в 2009 г., т
- Рисунок 19. Динамика цен на кадмий в 1975-2010 гг., \$/кг
- Рисунок 20. Структура применения кадмия по областям в 2009-2010 гг., %
- Рисунок 21. Динамика мировых цен на теллур в 1970-2010 гг., \$/кг
- Рисунок 22. Динамика цен на теллур в 2010 г., \$/кг
- Рисунок 23. Структура применения теллура (2009-2010 гг.), %
- Рисунок 24. Динамика производства селена в мире в 1959-2009 гг., т
- Рисунок 25. Основные производители селена в 2010 г.
- Рисунок 26. Крупнейшие мировые экспортеры селена в 2009 г., т
- Рисунок 27. Динамика мировых цен на селен технический 1980-2010 гг.
- Рисунок 28. Структура применения селена по отраслям (2009-2010 гг.), %
- Рисунок 29. Динамика производства индия (1996-2010 гг.), т
- Рисунок 30. Динамика производства индия в Китае (2001-2010 гг.) и структура производства по провинциям
- Рисунок 31. Динамика мировых цен на индий (1959-2010 гг.), \$/кг
- Рисунок 32. Структура потребления индия по отраслям (2009-2010 гг.)
- Рисунок 33. Динамика производства мышьяка (в пересчете на трехокись) 2006-2010 гг. (тыс. т)
- Рисунок 34. Производство мышьяка в 2010 г. по странам (в пересчете на трехокись)
- Рисунок 35. Динамика цен на технический мышьяк в 2007-2010 гг. (\$/кг)
- Рисунок 36. Схема получения галлия и его применение

- Рисунок 37. Динамика цен на технический галлий в 1980-2010 гг., \$/кг
- Рисунок 38. Структура потребления галлия по отраслям (2009-2010 гг.)
- Рисунок 39. Динамика продаж светодиодов на основе GaAs, GaN (2006-2012 гг.), млн шт.
- Рисунок 40. Прогноз потребления галлия до 2020 г.
- Рисунок 41. Основные этапы производства германия и его применение
- Рисунок 42. Производство первичного германия в мире в 1990-2010 гг.
- Рисунок 43. Структура производственных мощностей по выпуску германия (максимальных) по странам
- Рисунок 44. Производители германия по странам в 2010 г.
- Рисунок 45. Динамика мировых цен на германий (1959-2010 гг.)
- Рисунок 46. Структура потребления германия по отраслям в 2009-2010 гг., %
- Рисунок 47. Схема работы оптического волокна
- Рисунок 48. Применимость различных материалов для высокоскоростных ИС
- Рисунок 49. Динамика производства мобильных телефонов в 1997-2009 гг., млн шт.
- Рисунок 50. Динамика роста доли тонкопленочных ФЭП и прогноз до 2017 г., мВт/год
- Рисунок 51. Распределение введенных «солнечных» мощностей в 2010 г. по странам, %
- Рисунок 52. Динамика производства ФЭП по технологиям в 2007-2009 гг., МВт
- Рисунок 53. Прогноз мощностей крупнейших мировых производителей тонкопленочных ФЭП к 2012 г.
- Рисунок 54. Динамика производства ФЭП по странам 2007-2009 гг., МВт
- Рисунок 55. Прогноз снижения удельной стоимости изготовления модулей по различным технологиям (Si, CdTe, CIGS) до 2015 г.
- Рисунок 56. Внешний вид станции Frankenfelder Berg Landfill с модулями Nanosolar мощностью 1,1 МВт
- Рисунок 57. Внешний вид и принцип действия SIGC-модуля Solindra
- Рисунок 58. Рост мировых мощностей по производству подложек и прогноз (2008-2012 гг.), млн шт
- Рисунок 59. Прогноз производства солнечных батарей в России на период до 2015 г, МВт
- Рисунок 60. Установка МОСГФЭ наноструктур мультикаскадных ФЭП в турбулентном потоке VEESO 450 Turbodisk
- Рисунок 61. Внешний вид солнечной батареи «Orbcomm» (GaAs/Ge)
- Рисунок 62. Структура ФЭП на основе Al<sub>3</sub>B<sub>5</sub>/Ge-подложке в проекте «Солнечный поток»
- Рисунок 63. Технологическая схема производства ФЭП «Солнечный поток»
- Рисунок 64. Образцы продукции в рамках проекта «Солнечный поток»
- Рисунок 65. Эволюция структуры рынка ФЭП и прогноз до 2025, %
- Рисунок 66. Объем рынка CdTe для производства ФЭП, история и прогноз (2005-2012 гг.)
- Рисунок 67. Возможная добыча теллура (без учета и с учетом рециклинга обработанных ФЭП CdTe) в 2010-2100 гг., т

- Рисунок 68. Потребление индия для солнечной энергетики до 2012 г., т
- Рисунок 69. Динамика роста потребления германиевых подложек (2007-2011 гг.)
- Рисунок 70. Сценарий развития не-кремниевых ФЭП по типам до 2025 г.
- Рисунок 71. Потребность в сырье по сценарию EPIA
- Рисунок 72. Реалистичный сценарий развития ТП ФЭП до 2025 г.
- Рисунок 73. Потребность в сырье до 2025 г. при реализации реалистичного сценария
- Рисунок 74. Качественная оценка соотношения различных технологий к 2025 г.



## АННОТАЦИЯ

Настоящий отчет посвящен исследованию мирового рынка солнечных фотоэлементов на не-кремниевой основе (теллурид кадмия – CdTe, диселенид меди-индия-CIS/CIGS, двойные полупроводниковые соединения элементов третьей и пятой подгрупп таблицы Менделеева –  $A_3B_5$ ), серийно выпускаемых в настоящее время. В отчете проводится анализ тенденций развития данного рынка до 2025 гг. а также исследование сырьевых аспектов развития солнечной энергетики на не-кремниевой основе. Отчет состоит из введения, 6 глав и заключения, содержит 120 страниц, в том числе 14 таблиц, 74 рисунка и 2 приложения. Данная работа является кабинетным исследованием. В качестве источников использовались данные Федеральной службы государственной статистики РФ, Федеральной таможенной службы РФ, научно-технической литературы, отраслевой, региональной и международной прессы, а также интернет-сайтов предприятий-производителей ФЭП и сырья для их производства

В первой главе изложены основные принципы работы солнечных фотоэлементов, приведены основные их типы. В данной главе описаны также основные направления применения солнечных фотоэлементов, рассмотрены их характеристики, недостатки и преимущества.

Вторая глава посвящена описанию рынков сырья, необходимых для производства не-кремниевых ФЭП – индия, галлия, сурьмы, мышьяка, германия и пр.

Третья глава посвящена описанию мирового рынка не-кремниевых ФЭП. В ней приведены оценочные объемы их производства, распределение по видам, доля в общей солнечной энергетике

Четвертая глава представляет основных мировых производителей не-кремниевых ФЭП, приведено их описание, перечислены реализованные и предполагаемые проекты

Пятая глава посвящена российскому рынку не-кремниевых ФЭП

Шестая глава посвящена сырьевым аспектам развития «не-кремниевой» тонкопленочной солнечной энергетике в мире. Определены потребности в сырьевых материалах для выпуска не-кремниевых ФЭП. Приведен расчет «методом максимальных оценок» возможных диапазонов роста ФЭП на основе CdTe, CIS/CIGS, а также  $A_3B_5/Ge$  на период до 2025 г. Сделаны важные выводы о реалистичности различных сценариев развития фотовольтаики, исходя из сырьевых ограничений.

В приложениях даны адресная книга основных мировых производителей не-кремниевых ФЭП и перечень используемых источников информации.

## Введение

Быстрый рост энергопотребления является одной из наиболее характерных особенностей технической деятельности человечества в начале XXI века. Увеличение производства энергии в XX веке происходило в основном за счет роста добычи нефти и газа, наиболее удобных для производства электроэнергии. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией истощения своей традиционной сырьевой базы. В начале 70-х годов XX века энергетический кризис разразился во многих странах. Одной из причин этого кризиса явилась ограниченность ископаемых энергетических ресурсов. Кроме того, нефть, газ и уголь являются также ценнейшим сырьем для интенсивно развивающейся химической промышленности. Поэтому сейчас все труднее сохранить высокий темп развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии.

Кроме того, загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемых источников, в первую очередь угля, является причиной ухудшения экологической обстановки на Земле. Существенным является также и «тепловое загрязнение» планеты, происходящее при сжигании любого вида топлива. Допустимый верхний предел выработки энергии на Земле, по оценкам ряда ученых, всего на два порядка выше нынешнего среднего мирового уровня. Стремительный рост энергопотребления может в ближайшие десятилетия привести к увеличению температуры на поверхности Земли примерно на один градус. Нарушение энергобаланса планеты в таких масштабах может дать необратимые опасные изменения климата. Эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии, широкое использование которых не приведет к нарушению экологического баланса Земли.

Большинство возобновляемых видов энергии – гидроэнергия, механическая и тепловая энергия мирового океана, ветровая и геотермальная энергия – характеризуется либо ограниченным потенциалом, либо значительными трудностями широкого использования. Суммарный потенциал большинства возобновляемых источников энергии позволит увеличить потребление энергии с нынешнего уровня всего лишь на порядок. Но существует еще один источник энергии – Солнце.

Известно, что количество солнечной энергии, которая поступает на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана. Долгое время солнечная энергетика считалась экономически невыгодной. Однако, если рассматривать все составляющие, то солнечная энергия является серьезной альтернативой традиционной энергетике уже в настоящее время. Поэтому, один за другим реализуются масштабные проекты в сфере наземной солнечной энергетике.

Солнечные электростанции могут быть использованы для решения, как локальных энергетических задач, так и глобальных проблем энергетике.

Солнечные электростанции на основе полупроводниковых фотоэлектропреобразователей (ФЭП) обладают рядом преимуществ перед обычными электростанциями, работающими на ископаемом топливе. Например, при использовании ФЭП с К.П.Д. 12% потребность России в электроэнергии теоретически может быть полностью покрыта за счет солнечных электростанций общей занимаемой площадью 4000 км<sup>2</sup> (0,024% территории страны), при этом не расходуются невозобновляемые виды топлива и полностью отсутствуют вредные выбросы в атмосферу.

В настоящее время все произведенные ФЭП можно разделить на две категории:

- ФЭП на основе кристаллического кремния – монокристаллические слитки кремния, мульти-кристаллические слитки кремния и ленты кремния (иногда обозначаются с-Si) – всего около 86%;

- тонкопленочные ФЭП (ТП ФЭП) – пленки аморфного кремния ( $\alpha$ -Si), теллурида кадмия (CdTe), дисульфида меди-индия (CuInSe<sub>2</sub>) и другие – около 14% всех производимых ФЭП.

Целью настоящего обзора является описание рынка не-кремниевых ТП ФЭП – на основе CdTe, CuInSe<sub>2</sub> (на различных подложках), а также ФЭП на основе соединений элементов III и V групп таблицы Менделеева – A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> (на германиевых подложках с концентраторами солнечного света).

В данной работе не рассматриваются кремниевые ТП ФЭП, а также органические ФЭП.

Описаны рынки основных материалов, используемых для не-кремниевых ТП ФЭП – кадмия, теллура, селена, индия, галлия, германия и пр., определены лимитирующие материалы для реализации планов развития. Проведены расчеты динамики потенциальной потребности в материалах для не-кремниевых ТП ФЭП, сделаны выводы относительно возможности удовлетворения этих потребностей.

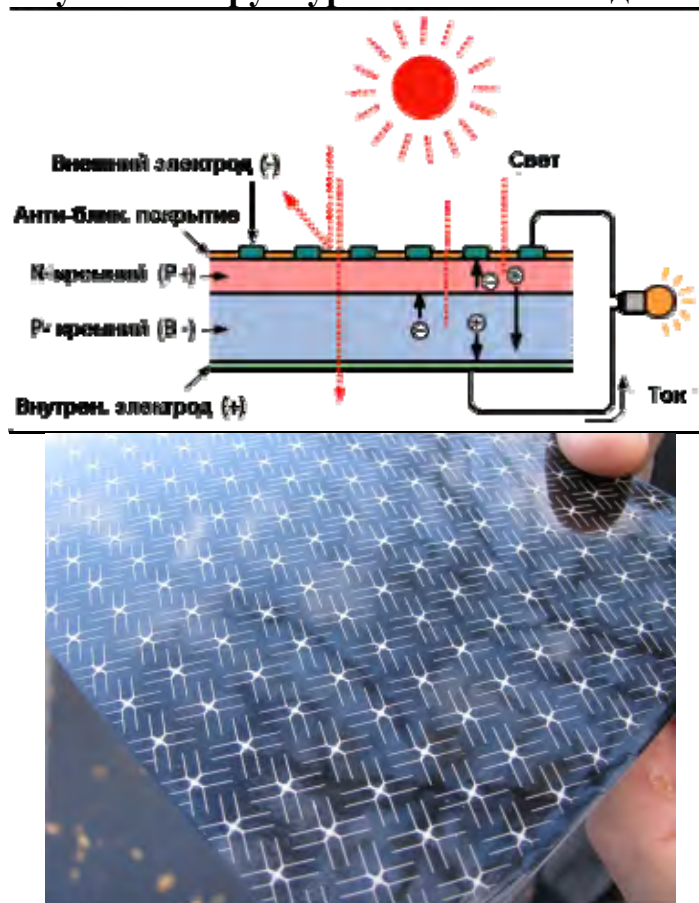
## I. Технология производства, конструктивные особенности и основные характеристики не-кремниевых ФЭП.

Практическое использование для энергетических целей солнечных батарей началось с запуском в 1958 г. искусственных спутников Земли – советского «Спутник-3» и американского «Авангард-1». С этого времени уже более 50 лет полупроводниковые солнечные батареи являются основным источником энергоснабжения космических аппаратов и тяжелых орбитальных станций. Последние 15 лет быстро развивается наземная солнечная энергетика.

### 1.1. Основные принципы работы солнечных батарей

Фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП) называют прибор для преобразования энергии солнечного излучения в электрический ток. Конструкция ФЭП показана на рисунке 1. На малой глубине от поверхности полупроводниковой пластины р-типа сформирован р-n-переход (терминология от английских слов positive – положительный и negative – отрицательный). На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт. Изображенный на рисунке 1 слой n-типного полупроводника иногда называют «оконным», а р-типного полупроводника – «поглощающим».

Рисунок 1. Структура и внешний вид ФЭП



Источник: анализ научно-технической литературы

Полупроводниками, как известно, являются вещества, ширина запрещённой зоны которых составляет порядка нескольких электрон-вольт (эВ). Запрещённой зоной называют область энергий, отделяющую полностью заполненную электронами валентную зону (при  $T=0$  К) от незаполненной зоны проводимости. В этом случае шириной запрещённой зоны (см. рисунок 2) называется разность энергий между дном (нижним уровнем) зоны проводимости и потолком (верхним уровнем) валентной зоны.

**Рисунок 2. Схематическое изображение зонной структуры полупроводника**



*Источник: научно-техническая литература*

Характерные значения ширины запрещённой зоны в полупроводниках составляют 0,1-4 эВ.

К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур и другие), огромное количество сплавов и химических соединений (арсенид галлия и др.).

При соединении в одном кристалле полупроводников р- и n-типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника n-типа в полупроводник р-типа и, наоборот, поток дырок из р- в n-полупроводник. Таким образом, вблизи р-n перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. В результате двух процессов, действующих в противоположные стороны, устанавливается стационарное, равновесное состояние: на границе возникает заряженный слой, препятствующий проникновению электронов из n-полупроводника, а дырок из р-полупроводника, т.е. возникает энергетический (потенциальный) барьер, для преодоления которого электроны из n-полупроводника и дырки из р-полупроводника должны затратить определенную энергию.

При поглощении света в полупроводнике возбуждаются электронно-дырочные пары. Генерированные вблизи р-n перехода «неосновные» носители (дырки в n-полупроводнике и электроны в р-полупроводнике) диффундируют к р-n переходу, подхватываются полем р-n перехода и выбрасываются в полупроводник, в котором они становятся основными носителями: электроны

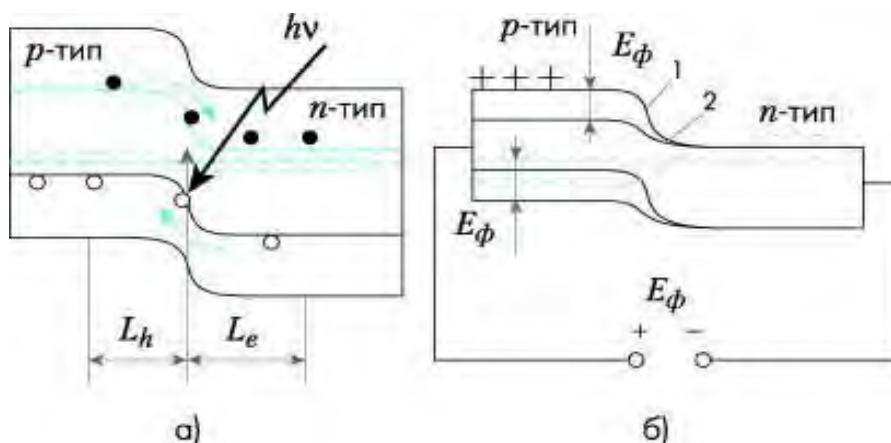


будут локализоваться в полупроводнике n-типа, а дырки – в полупроводнике p-типа (рисунок 3).

В результате полупроводник p-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник n-типа – отрицательный. Между n- и p-областями фотоэлемента возникает разность потенциалов – фотоЭДС. Полярность фотоЭДС соответствует «прямому» смещению p-n перехода, которое понижает высоту барьера и способствует инжекции дырок из p-области в n-область и электронов из n-области в p-область. В результате действия этих двух противоположных механизмов при разной интенсивности света устанавливается разная величина фотоЭДС. При этом величина фотоЭДС растет пропорционально интенсивности света.

Большинство современных ФЭП обладают одним p-n-переходом. В таком элементе свободные носители заряда создаются только теми фотонами, энергия которых больше или равна ширине запрещенной зоны. Другими словами, фотоэлектрический отклик однопереходного элемента ограничен частью солнечного спектра, энергия которого выше ширины запрещенной зоны, а фотоны меньшей энергии не используются. Преодолеть это ограничение позволяют многослойные структуры из двух и более ФЭП с различной шириной запрещенной зоны. Такие элементы называются многпереходными, каскадными или тандемными. Поскольку они работают со значительно большей частью солнечного спектра, эффективность фотоэлектрического преобразования у них выше.

**Рисунок 3. Зонная модель разомкнутого p-n-перехода**



а) – в начальный момент освещения;

б) – изменение зонной модели под действием освещения и возникновение фотоЭДС

Источник: научно-техническая литература

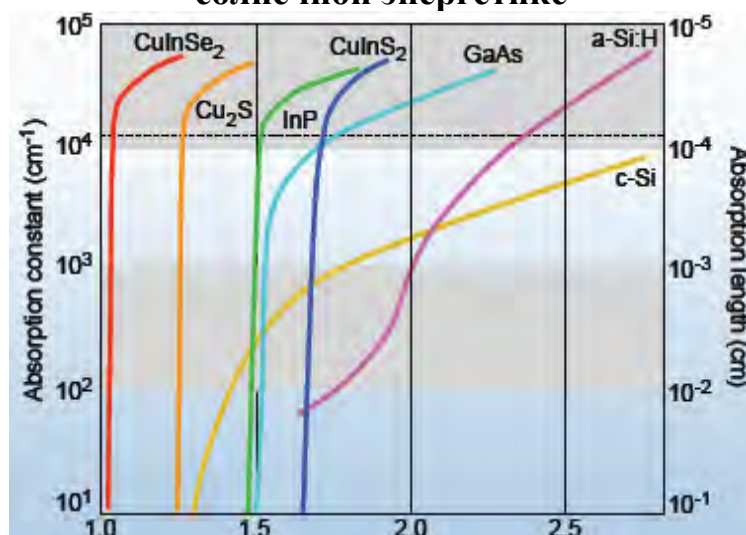
В полупроводниковой пластине создаются области с p- и n- типами проводимости. Затем изготавливаются нижний (внутренний) и верхний (внешний) электроды, как правило, нижний контакт – сплошной, а верхний выполняется в виде гребенчатой структуры (тонкие полосы, соединенные относительно широкой токосборной шиной). Часть открытой поверхности ФЭП между полосами токосборных шин закрывается

антибликовым (просветляющим) покрытием для уменьшения коэффициента отражения солнечных лучей от поверхности ФЭП. При коротком замыкании освещенного р-п перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар.

Каждая промышленная солнечная батарея состоит из 36, 72 или 96 солнечных элементов, которые соединяются проводами, после чего размещаются между защитными стеклянными пластинами и полимерными плёнками

На рисунке 4 приведены коэффициенты поглощения полупроводников, применяемых в современной солнечной энергетике. Коэффициент поглощения определяет, насколько глубоко может проникнуть в материал свет определенной длины волны до того, как он будет поглощен. Коэффициент поглощения зависит также от длины волны излучения. В материалах с низким коэффициентом поглощения свет поглощается плохо и, если рабочий слой сделать достаточно тонким, он окажется прозрачным для данной длины волны. Это приведет к тому, что фотон света выйдет из зоны р-п перехода, не совершив полезной работы, а его энергия потратится на нагрев элемента. Из рисунка 4 следует, что все материалы типа GaAs, CdTe, CIGS с высоким коэффициентом поглощения, существенно более эффективны для производства ФЭП, чем кремний.

**Рисунок 4. Коэффициент поглощения полупроводников, применяемых в солнечной энергетике**



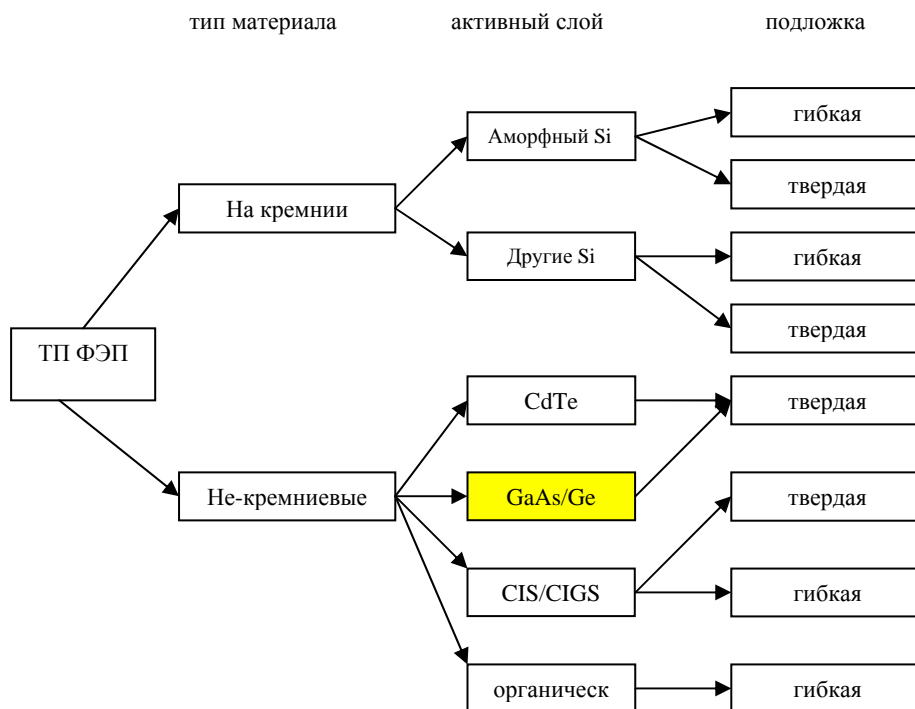
*Источник: научно-техническая литература*

В настоящем обзоре рассматриваются ФЭП на полупроводниковых материалах CdTe, GaAs/Ge, CIS/CIGS и сырьевые рынки перечисленных материалов.

## 1.2. Основные типы ФЭП. Технология производства, конструктивные особенности и характеристики не-кремниевых ФЭП

ТП ФЭП разделяются по типу материала на кремниевые и не-кремниевые. Кремниевые ФЭП могут быть однослойными аморфными (они возникли исторически первыми) или более сложной структуры (например, аморфно-микроморфными), появившимися позднее. ТП ФЭП изготавливаются на твердых или гибких подложках. На рисунке 5 приведена классификация ТП ФЭП по типам применяемых материалов и подложкам. Областью зеленого цвета выделены не-кремниевые тонкопленочные ФЭП, рассматриваемые в настоящем обзоре. ФЭП на органической основе не рассматриваются в связи с крайне малым промышленным распространением.

Рисунок 5. Классификация типов тонкопленочных ФЭП



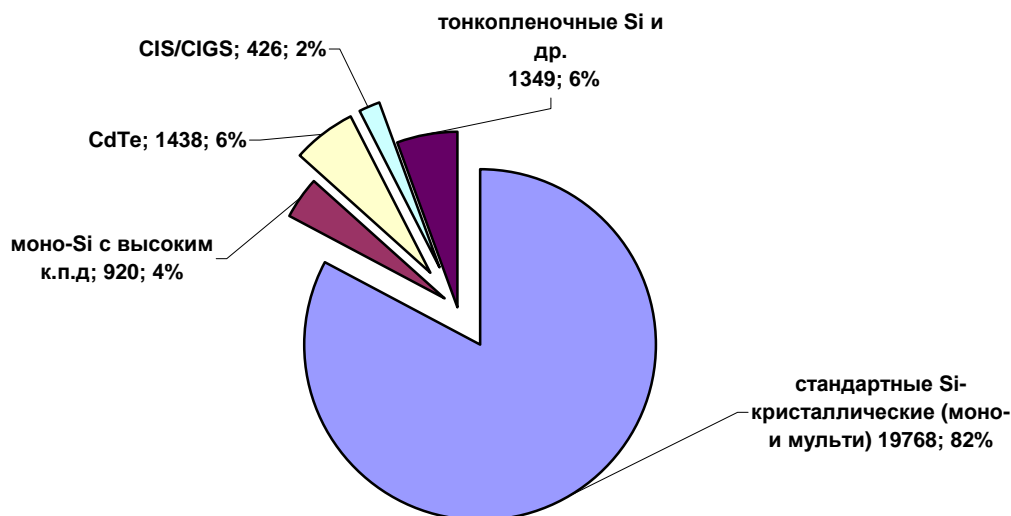
Источник: Инфомайн

Основным материалом для получения солнечных элементов в мире сегодня является кремний. В 2011 г. исследовательская компания GTM Research, исследуя распределение производства ФЭП в мире в 2010 г. по типам технологий, определила долю кремниевых ФЭП (моно- и мульти-кремниевых) составившую 86% (рисунок 6). ТП на аморфном кремнии составили 6%.

Оставшаяся часть ФЭП производилась в 2010 г. в виде тонких пленок таких материалов как теллурид кадмия (CdTe) – 6%, диселенид меди и индия (CIS/CIGS) – 2%. Эта часть, наряду с ФЭП на основе GaAs/Ge (не более 0,1-0,2%), является предметом настоящего обзора.



**Рисунок 6. Производство ФЭП по технологиям в 2010 г. (в МВт и %%)**



Источник: GTM Research, 2011

Основные преимущества ТП ФЭП, по сравнению с кремниевыми кристаллическими ФЭП, состоят в следующем:

- Более низкая удельная стоимость.
- Более низкий расход материалов.
- Возможность производства устройств больших площадей.
- Меньшее количество технологических операций.
- Способность принимать рассеянный и слабый солнечный свет (когда солнце, скажем, скрыто за облаками) намного более эффективно, чем кристаллические батареи.

В таблице 1 приведены основные производители не-кремниевых ФЭП на тонких пленках.