

# Сонячні батареї



# Солнечная батарея

- Солнечная батарея - один из генераторов так называемых альтернативных видов энергии, превращающих солнечное электромагнитное излучение в электричество. Является объектом исследования гелиоэнергетики (гелио... (греч. Ἥλιος, Helios — солнце). Производство солнечных батарей развивается быстрыми темпами в самых разных направлениях.

# *Використання*

- Солнечные батареи используются очень широко в тропических и субтропических регионах с большим количеством солнечных дней. Особенно популярны в странах Средиземноморья, где их помещают на крыши жилых зданий для нагрева воды, получения электричества. В перспективе они, вероятно, будут применяться для подзарядки автомобилей.
- На один квадратный метр приходится около 1000 ватт солнечной энергии. С помощью наиболее распространённых солнечных батарей можно преобразовать эту энергию в электричество с КПД 9-14%. При этом цена батареи составит около 3 долл. за Ватт.
- Сообщается, что в отдельных лабораториях получены солнечные элементы с КПД 44%. В 2007 году появилась информация, о изобретении российскими учёными (г. Дубна) элементов с КПД 54%.

## ***Напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі***

- Наиболее эффективными, с энергетической точки зрения, устройствами для превращения солнечной энергии в электрическую являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), поскольку это прямой, одноступенчатый переход энергии. При характерной для ФЭП равновесной температуре порядка 300—350 Кельвинов и  $T_{\text{солнца}} \sim 6000 \text{ К}$  их предельный теоретический КПД  $>90 \%$ . В лабораторных условиях уже достигнут КПД 40 %, а его увеличение до 50 % представляется вполне реальным.

# Фізичний принцип роботи сонячних батарей

- Преобразование энергии в ФЭП основано на фотовольтаическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения.
- Неоднородность структуры ФЭП может быть получена легированием одного и того же полупроводника различными примесями (создание p-n переходов) или путём соединения различных полупроводников с неодинаковой шириной запрещённой зоны - энергии отрыва электрона из атома (создание гетеропереходов), или же за счёт изменения химического состава полупроводника, приводящего к появлению градиента ширины запрещённой зоны (создание варизонных структур). Возможны также различные комбинации перечисленных способов.
- Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств ФЭП, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость. Она обусловлена явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

## Основні незворотні втрати енергії в ФЭП пов'язані з:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя,
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нём,
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов,
- рекомбинацией образовавшихся фотопар на поверхностях и в объёме ФЭП,
- внутренним сопротивлением преобразователя.

## Для зменшення всіх видів втрат енергії в ФЭП розроблюються та успішно застосовуються різні заходи:

- використання напівпровідників з оптимальною для сонячного випромінювання шириною забороненої зони;
- напрямлене покращення властивостей напівпровідникової структури шляхом її оптимального легування та створення вбудованих електричних полів;
- перехід від однорідних до гетерогенних та варізонних напівпровідникових структур;
- оптимізація конструктивних параметрів ФЭП (глибини залягання р-п переходу, товщини базового шару, частоти контактної сітки тощо);
- застосування багатофункціональних оптичних покриттів, що забезпечують просвітлення, терморегулювання та захист ФЭП від космічної радіації;
- розробка ФЭП, прозорих в довгохвильовій області сонячного спектра за межами основної смуги поглинання;
- створення каскадних ФЭП з спеціально підібраних за шириною забороненої зони напівпровідників, що дозволяють перетворювати в кожному каскаді випромінювання, що пройшло через попередній каскад, і т.д.;

- **Також суттєвого підвищення ККД ФЭП вдалося досягти за рахунок:**
- - создания преобразователей с двухсторонней чувствительностью (до +80 % к уже имеющемуся КПД одной стороны);
- - применения люминесцентно переизлучающих структур;
- - предварительного разложения солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных плёночных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра отдельным ФЭП и т. д.



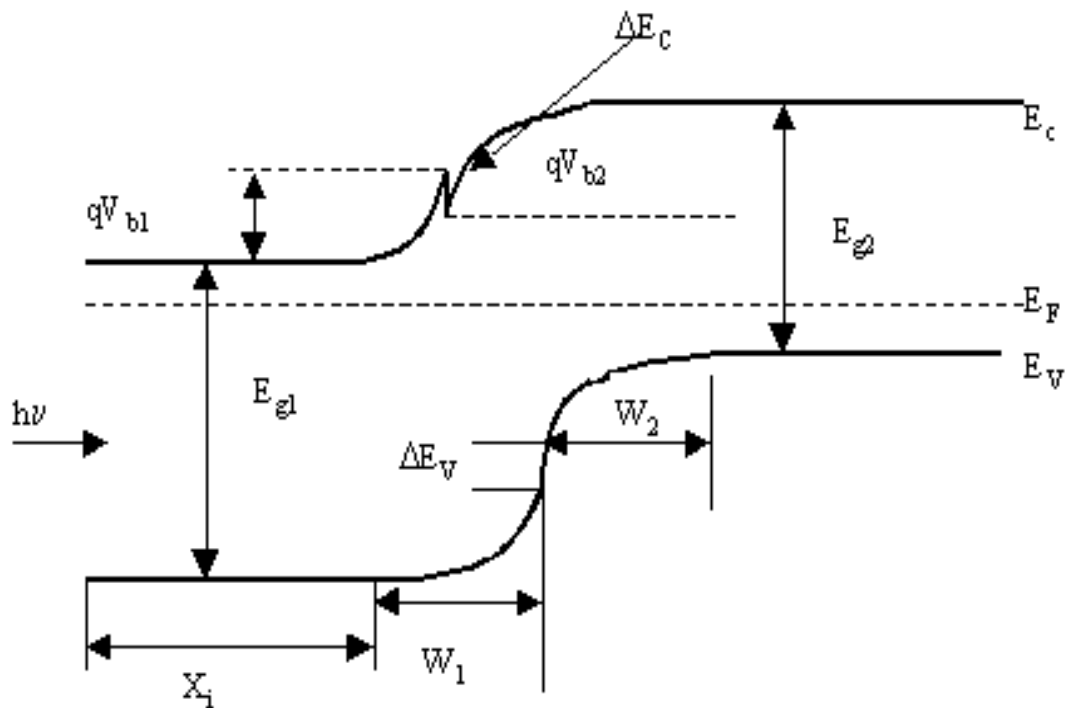
**В системах перетворення енергії СЕС (сонячних електростанцій) можуть бути використані будь-які створені типи ФЕП, а також ті типи ФЕП, що розроблюються у сьогоднішній час, з різною структурою, на базі різних напівпровідникових матеріалів, однак не всі вони задовольняють комплексу вимог к цим системам:**

- высокая надёжность при длительном (десятки лет!) ресурсе работы;
- доступность исходных материалов в достаточном для изготовления элементов системы преобразования количестве и возможность организации их массового производства;
- приемлемые с точки зрения сроков окупаемости энергозатраты 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.

- В качестве наиболее вероятных материалов для фотоэлектрических систем преобразования солнечной энергии СЭС в настоящее время рассматривается кремний и арсенид галлия (GaAs), причём в последнем случае речь идёт о гетерофотопреобразователях (ГФП) со структурой AlGaAs-GaAs.
- Гетероструктурные СЭ на основе GaAs имеют более высокий КПД, чем кремниевые (монокристаллические и особенно - аморфного кремния). КПД арсенид-галлиевых солнечных батарей достигает до 35-40%. Их максимальная рабочая температура - до +150 оС, в отличие от + 70С - у кремниевых батарей.
- Их теоретический КПД выше, так как ширина запрещённой зоны у них практически совпадает с оптимальной шириной запрещённой зоны для полупроводниковых преобразователей солнечной энергии 1,4 эВ. У кремниевых этот показатель 1,1 эВ.

## Энергетична діаграма n-p- гетероперехода

Гетеропереходи представляють собою переходи, образующиеся при контакте двух различных полупроводников.



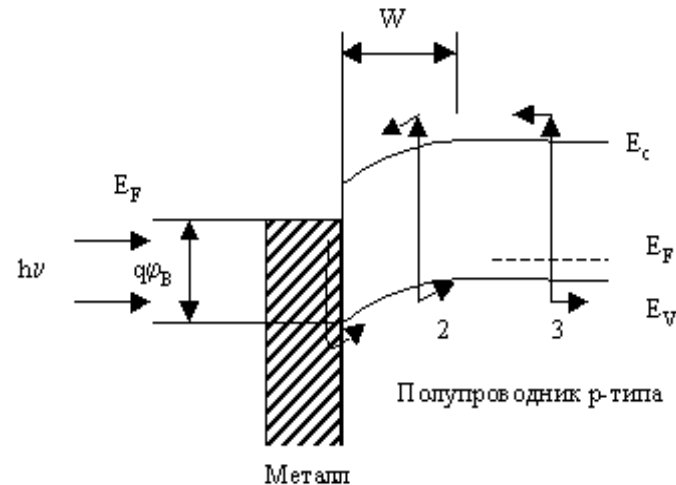
Діаграма енергетических зон n - p-гетеропереходов в стані термодинамічного рівноваги.

Фотони с енергією, меншею  $E_{g1}$ , но більшою  $E_{g2}$ , будуть проходити через слой першого полупроводника, который играет роль оптического окна, и поглощаются во втором полупроводнике. Носители, генерируемые излучением внутри обедненного слоя и в электронейтральном объеме полупроводника в пределах диффузионной длины от перехода, будут коллектироваться переходом подобно тому, как это имеет место в солнечных элементах с n - p-гопереходами. Фотони с енергією, більшою  $E_{g1}$ , поглотяться в первом полупроводнике, и переход будет коллектировать носители, генерируемые этим излучением на расстоянии от перехода, не превышающем диффузионную длину, либо непосредственно в области пространственного заряда.

- Переваги сонячних елементів с гетеропереходами перед звичайними сонячними елементами с р - n-переходами складаються в наступному:
  - 1) в увеличении спектрального отклика в коротковолновом диапазоне при условии, что энергия  $E_{g1}$  достаточно велика и фотоны с высокой энергией поглощаются в обедненном слое второго полупроводника;
  - 2) в понижении последовательного сопротивления при условии, что первый полупроводник можно сильно легировать, не ухудшая при этом условия прохождения света через него;
  - 3) в высокой радиационной стойкости, если первый слой полупроводника достаточно толстый и полупроводник имеет широкую запрещенную зону.

# Сонячні елементи на бар'єрах Шоттки.

- На рис. представлена діаграма енергетических зон освітненого сонячного елемента з бар'єром Шоттки. При цьому шар металу повинен бути достатньо тонким, щоб основна частина світла досягла напівпровідника. Можливо виділити три компоненти фототоку. Одна з них обумовлена поглинанням в металі фотона з енергією  $h\nu \geq q\phi_B$  ( $q\phi_B$  - висота бар'єра), що викликає збудження дірок через бар'єр в напівпровідник (ця компонента на рис. 26 позначена цифрою 1). Падаючий в напівпровідник короткохвильовий світ поглинається головним чином в обедненому шарі (сопоставлюючий фототок на рис. 26 позначен цифром 2). Длинноволновий світ, поглинається в нейтральному об'ємі напівпровідника, створює електронно-дірочні пари; потім електрони, так само як і в випадку звичайного p-n - переходу, дифундують до краю обедненого шару, де відбувається їх колектування (цей фототок на рис. 26 позначен цифрою 3). В умовах, типових для роботи сонячних елементів, збудження світлом носіїв з металу в напівпровідник складає менше 1% повного фототоку, і тому цим процесом можна пренебрати.



Діаграма енергетических зон освітненого сонячного елемента з бар'єром Шоттки

# Преимущества солнечных элементов с барьерами Шоттки:

- 1) изготовление таких элементов при низких температурах, поскольку отпадает необходимость в проведении высоковольтной операции - диффузии;
- 2) применение данной технологии при создании поликристаллических и тонкопленочных солнечных элементов;
- 3) высокая радиационная стойкость элементов, поскольку вблизи их поверхности существует сильное электрическое поле;
- 4) большой выходной ток и хороший спектральный отклик, что также обусловлено непосредственным примыканием обеднённого слоя к поверхности полупроводника, вследствие чего ослабляется негативное влияние малых времен жизни и высокой скорости поверхностной рекомбинации.

Две основные компоненты спектрального отклика и фототока связаны с генерацией носителей в обедненном слое и в электронейтральной базовой области.

Сильное поле в обеднённом слое выносит из него генерируемые светом носители еще до того, как они успевают рекомбинировать, вследствие чего фототок оказывается равным  $J_{dr} = qT(\lambda)F(\lambda)[1 - \exp(-\alpha \cdot W)],$

Выражение для фототока базовой области:  $J_n = qT(\lambda)F(\lambda)[\alpha L_n / (\alpha L_n + 1)] \exp(-\alpha W)$

Полный фототок равен сумме этих выражений. Для увеличения фототока следует повышать коэффициент пропускания и диффузионную длину. Однако его величина при любой заданной энергии фототока оказывается несколько меньше за счет отражения и поглощения света металлической пленкой. Коэффициент пропускания света золотыми пленками (толщиной 10-100 ангстрем) с просветляющим покрытием может достигать 90-95 %.

# Нанокристалісні сонячні батареї

- **Нанокристаллические солнечные батареи** - солнечные батареи, основанные на кремниевой подложке, с покрытием из нанокристаллов.
- Пока предыдущие методы создания квантовых ячеек полагаются на дорогостоящие эпитаксиальные процессы, производство с использованием коллоидного синтеза позволило повысить ценовую эффективность. Тонкие плёнки нанокристаллов получают в процессе, известном как «спин-покрытие». Он включает размещение квантовых ячеек в виде раствора на плоском субстрате, который затем вращается с большой скоростью. Раствор распределяется равномерно, а субстрат вращается до тех пор, пока не будет достигнута требуемая толщина слоя.
- Фотоэлектрические ячейки, основанные на цветосенсибилизированных коллоидных плёнках  $\text{TiO}_2$  были открыты в 1991 году и оказались многообещающими по своей эффективности в преобразовании световой энергии в электрическую. В связи с низкой стоимостью материалов они невероятно обнадеживают в поиске коммерчески жизнеспособных возобновляемых источников энергии.
- Несмотря на то, что исследования до сих пор находятся в зачаточном состоянии, в будущем квантовые ячейки, основанные на фотоэлектричестве, могут обладать преимуществами, такими, как механическая подвижность (квантовые ячейки на основе полимерных композитов), низкая стоимость, при производстве «чистой» энергии.



# Полимерні сонячні батареї

- **Полимерные солнечные батареи** - разновидность солнечных батарей; которые производят электричество из солнечного света. Относительно новая технология, активно исследуемая в университетах, национальных лабораториях и нескольких компаниях по всему миру. Демонстрируются устройства-прототипы с эффективностью конверсии энергии 5%.
- В сравнении с устройствами, основанными на кремниевой технологии, полимерные солнечные батареи легки, (что важно для автономных датчиков малых размеров), доступны, недороги в производстве, гибки, оказывают незначительное влияние на окружающую среду, однако энергетический выход едва достигает 1/4 обычных кремниевых солнечных батарей. Полимерные солнечные батареи также страдают значительным эффектом деградации: их эффективность снижается под воздействием окружающей среды. Хорошие защитные покрытия до сих пор не разработаны.
- Открытым вопросом остаётся степень коммерческой конкуренции с кремниевыми солнечными батареями. Несмотря на то, что полимерные ячейки относительно дешёвы в производстве, индустрия кремниевых солнечных батарей имеет важное промышленное преимущество, будучи способной использовать кремниевую инфраструктуру, развитую для компьютерной индустрии. Однако, производители солнечных батарей находятся в невыгодном положении, поскольку вынуждены конкурировать с (более крупной) компьютерной индустрией в снабжении высококачественным кремнием.
- Эффективность остаётся проблемой для этого типа технологии. Традиционные кремниевые батареи достигают эффективности 15%. Наивысшая эффективность достигнута для солнечных батарей, используемых для питания космических спутников. Такие батареи демонстрируют эффективность до 40% однако, соответственно, на два порядка выше по магнитуде кремниевых батарей.

# Кольоровосенсибілізовані солчні батареї

- **Цветосенсибилизованные солнечные батареи** - фотоэлектрохимические ячейки, в которых используются фотосенсиблизованные мезопористые оксидные полупроводники с широкой запрещённой зоной. Эти ячейки открыты в 1991 году М.Гретцелем (Michael Graetzel) и др., по имени которого и получили название ячеек Гретцеля.
- Солнечные батареи этого типа многообещающи, поскольку изготавливаются из дешёвых материалов и не требуют сложной аппаратуры при производстве. Ячейки имеют простую структуру, состоят из двух электродов и йодсодержащего электролита. Один электрод состоит из высокопористого насыщенного красителем нанокристаллического диоксида титана ( $\text{nc-TiO}_2$ ), нанесённого на прозрачную электропроводящую подложку. Другим электродом является просто прозрачная электропроводящая подложка. Работа ячейки часто сравнивается с фотосинтезом, поскольку оба процесса используют окислительно-восстановительную реакцию, протекающую в электролите. Эффективность преобразования энергии в ячейке ещё не достигла уровня кремниевых солнечных батарей. В настоящее время она составляет около 10%. Теоретически возможно достичь уровня в 33%.

# Принцип дії

- Солнечный свет поступает сквозь электропроводящий стеклянный электрод, насыщенный красителем, где поглощается. Когда краситель поглощает свет, один из электронов его молекулы переходит из основного состояния в возбуждённое состояние. Это явление называется «фотовозбуждение». Возбуждённый электрон перемещается от красителя в зону проводимости  $TiO_2$ . Переход происходит очень быстро; он занимает только 10-15секунды. В  $TiO_2$  электрон диффундирует через  $TiO_2$ -плёнку, достигает стеклянного электрода и далее по проводнику стекает во второй электрод. Молекула красителя с потерей электрона окисляется. Восстановление молекулы красителя в первоначальное состояние происходит путём получения электрона от йодид-иона, превращая его в молекулу йода, которая в свою очередь диффундирует к противоположному электроду, получает от него электрон и снова становится йодид-ионом. По такому принципу цветосенсибилизированная солнечная батарея преобразует солнечную энергию в электрический ток, протекающий по внешнему проводнику.

# Нові досягнення

- В качестве альтернативы традиционной неорганической фотоэлектроэнергетике, цветосенсибилизированные солнечные батареи используют слой инкапсулированных наночастиц в сочетании с высокопроводящей ионной жидкостью. К сожалению, ионные жидкости, показывающие высокую эффективность конверсии при использовании в этих новых солнечных батареях, термически и химически не стабильны и способны терять эффективность. Но исследователи из Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (Лозанна, Швейцария) достигли успеха, используя в качестве новой устойчивой ионной жидкости - 1-этил-3-метилимидазолтетрацианоборат (EMIB(CN)<sub>4</sub>), достигли уровня эффективности преобразования энергии 7% при полной освещённости даже после термического или светового старения.
- Для подтверждения химической и термической стабильности их солнечных батарей исследователи подвергли устройство нагреванию до 80°C в темноте на протяжении 1000 часов, а затем на свету при 60°C в течение тех же 1000 часов. После нагревания в темноте и на свету 90% исходной фотоэлектрической эффективности сохранилось - впервые такая превосходная термическая стабильность наблюдалась для жидкого ионного электролита с высокой эффективностью конверсии. В противоположность кремниевым солнечным батареям, чья производительность падает с ростом температуры, цветосенсибилизированные солнечные батареи испытывают лишь незначительное изменение, когда их температура возрастает от комнатной до 60°C.