

# Солнечные батареи

## Введение

- В настоящее время солнечные батареи являются наиболее важным источником энергии для спутников и космических кораблей при длительных полетах. Они успешно применяются также и на Земле. В связи с увеличением потребления энергии во всем мире запасы обычных источников энергии (различных видов ископаемого топлива) должны истощиться в не слишком отдаленном будущем. Поэтому необходимо разрабатывать и использовать альтернативные источники энергии, и особенно наш единственный практически неисчерпаемый естественный источник энергии — Солнце.
- Альтернативные и возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнечного света, гидро- и геотермальная энергия, во всем мире привлекают все больше внимания. Растущий интерес к ним вызван экологическими соображениями, с одной стороны, и ограниченностью традиционных земных ресурсов — с другой. Особое место среди альтернативных и возобновляемых источников энергии занимают фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии, изучение которых превратилось в отдельное научное направление — фотовольтаику.



Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция – каждую секунду на Солнце  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  кг водорода превращается в гелий. Дефект массы при этом составляет 4000 кг, что согласно соотношению Эйнштейна  $E=mc^2$  приводит к выделению  $4 \cdot 10^{20}$  Дж энергии. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне 0,2–3 мкм. Поскольку полная масса Солнца  $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг, оно должно пребывать в достаточно стабильном состоянии свыше 10 млрд. лет с постоянным выделением энергии. Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной радиацией. Ее величина – 1353 Вт/м<sup>2</sup>. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется в основном из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения – озоном и рассеяния излучения частицами атмосферной пыли и аэрозолями. Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, называется “воздушной массой” (AM). AM определяется как секанс угла между Солнцем и зенитом.

На практике для превращения энергии излучения в электрическую энергию применяются полупроводниковые фотоэлементы с p–n-переходом, действие которых основано на внутреннем фотоэффекте. Большое распространение получили кремниевые фотоэлементы, используемые для преобразования энергии солнечного излучения, получившие название солнечных батарей. [Солнечная.swf](#)

Элемент солнечной батареи представляет собой пластинку кремния n-типа, окруженную слоем кремния p-типа толщиной около одного микрона, с контактами для присоединения к внешней цепи (рис. 643). Вспомним, что при этом все нескомпенсированные заряды будут сосредоточены в p–n-переходе, а p-область, так же как и n-область, окажется электрически нейтральной.

При освещении поверхности элемента в тонком наружном слое p-типа генерируются пары «электрон-дырка», большинство которых вследствие тонкости слоя, не успев претерпеть рекомбинации, попадает в p–n-переход. Под действием поля электроны перемещаются к n-области, а дырки — к p-области. Это означает, что при освещении между электродами возникает э. д. с, величина которой достигает 0,5 в. При замыкании электродов элемент может создавать ток до 25 мА с каждого квадратного сантиметра освещаемой поверхности.

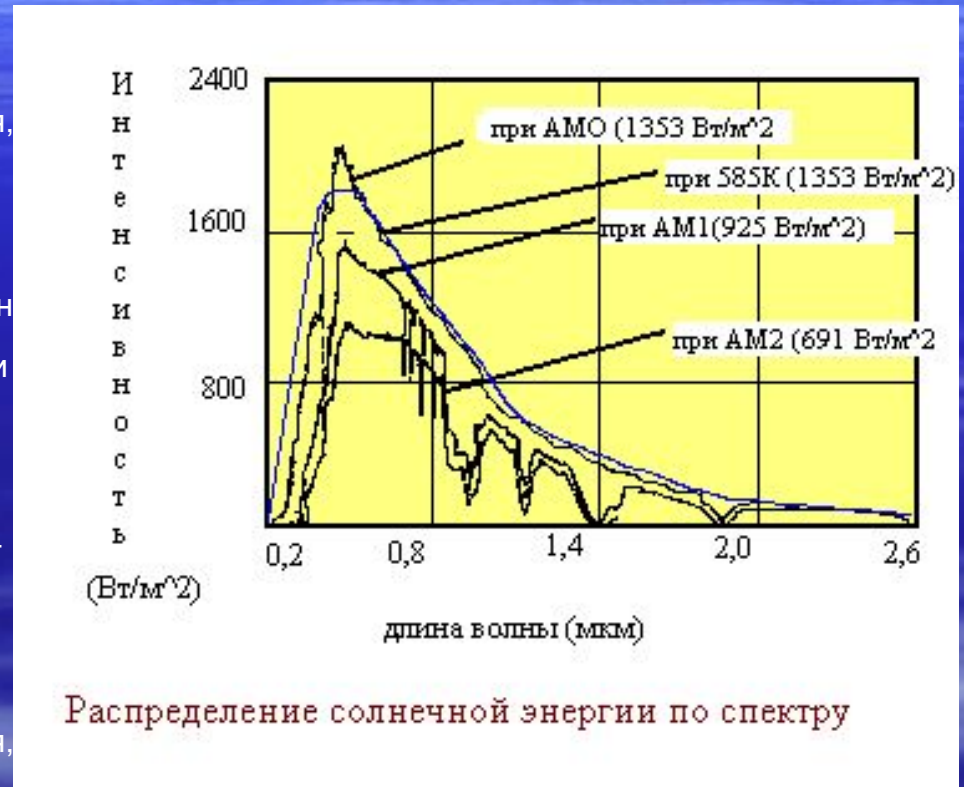
Наибольшая чувствительность кремниевых фотоэлементов приходится на зеленые лучи, т. е. на те длины волн, которым соответствует максимум энергии солнечного излучения, чем, в частности, и объясняется их довольно высокий к. п. д. Солнечные батареи, устанавливаемые на искусственных спутниках Земли и космических кораблях, дают электрическую энергию, необходимую для работы бортовой аппаратуры.

К инфракрасному излучению германиевые фотоэлементы более чувствительны, чем кремниевые.



# Солнечное излучение

- Спектр AM1 - когда солнце стоит в зените; при этом  $P \sim 925 \text{ Вт/м}^2$ . Спектр AM2 реализуется при  $\theta = 60^\circ$ ; при этом  $P \sim 691 \text{ Вт/м}^2$ . Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения, прошедшего через воздушную массу AM1,5; при этом составляет  $P \sim 844 \text{ Вт/м}^2$ . На рис.1 приведены четыре кривые, иллюстрирующие спектральное распределение интенсивности солнечного излучения (мощность на единицу площади в единичном интервале длин волн). Верхняя кривая соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы, т.е. при нулевой воздушной массе (AM0). Это распределение можно аппроксимировать распределением интенсивности черного тела при температуре 5800 К. Спектр AM0 определяет работу солнечных батарей на спутниках и космических кораблях. Спектр AM1 соответствует распределению солнечного излучения на поверхности Земли, когда солнце стоит в зените; при этом полная мощность излучения составляет  $\sim 925 \text{ Вт/м}^2$ .
- Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения, прошедшего через воздушную массу, равную 1,5, что соответствует положению Солнца под углом  $45^\circ$  к горизонту.



# Солнечные элементы на p-n – переходах.

- В этом разделе рассмотрены прежде всего кремниевые солнечные элементы с p– n-переходами, поскольку они служат как бы эталонным прибором для всех солнечных батарей. Жат основным источником питания при длительных полетах. При этом главными проблемами являются эффективность преобразования и надежность элемента, поскольку под влиянием частиц с высокой энергией на внешних орбитах характеристики элемента ухудшаются со временем. В наземных условиях можно применять как плоские солнечные батареи, так и системы солнечных батарей с концентраторами. При этом наряду с проблемами повышения эффективности преобразования и надежности элемента на первом плане оказывается проблема снижения его стоимости, поскольку необходимо, чтобы наземные солнечные системы оказались в конце концов конкурентоспособными с другими источниками энергии.
- Работы по наземным плоскочелельным системам направлены в основном на максимально возможное снижение стоимости батарей при одновременном сохранении к. п. д. преобразования на уровне не менее 10 %. Для этой цели используются такие методы создания подложек, как выращивание ленты через фильеру или способом “пластина к пластине” и выращивание дендритных лент. Для снижения стоимости подложек также применяется выращивание поликристаллического кремния на керамике либо на металлургическом кремнии. К наиболее вероятным кандидатам для использования в плоскочелельных системах следует отнести солнечные элементы на аморфном кремнии и на тонких пленках. Работы по созданию концентрирующих систем направлены в основном на увеличение к. п. д. преобразования в условиях высокой концентрации солнечной энергии и на минимизацию стоимости всей системы как целого. В следующем разделе мы проанализируем основные рабочие характеристики солнечных элементов с p - n-переходами.

# Условия эффективной работы солнечных элементов:

Для эффективной работы солнечных элементов необходимо соблюдение ряда условий:

- 1) оптический коэффициент поглощения ( $\alpha$ ) активного слоя полупроводника должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить поглощение существенной части энергии солнечного света в пределах толщины слоя;
- 2) генерируемые при освещении электроны и дырки должны эффективно собираться на контактных электродах с обеих сторон активного слоя;
- 3) солнечный элемент должен обладать значительной высотой барьера в полупроводниковом переходе;
- 4) полное сопротивление, включенное последовательно с солнечным элементом (исключая сопротивление нагрузки), должно быть малым для того, чтобы уменьшить потери мощности (джоулево тепло) в процессе работы;
- 5) структура тонкой пленки должна быть однородной по всей активной области солнечного элемента, чтобы исключить закорачивание и влияние шунтирующих сопротивлений на характеристики элемента.

Производство структур на основе монокристаллического кремния, удовлетворяющих данным требованиям, – процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому внимание было обращено на такие материалы, как сплавы на основе аморфного кремния ( $a\text{-Si:H}$ ), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники.

# Преимущества GaAs:

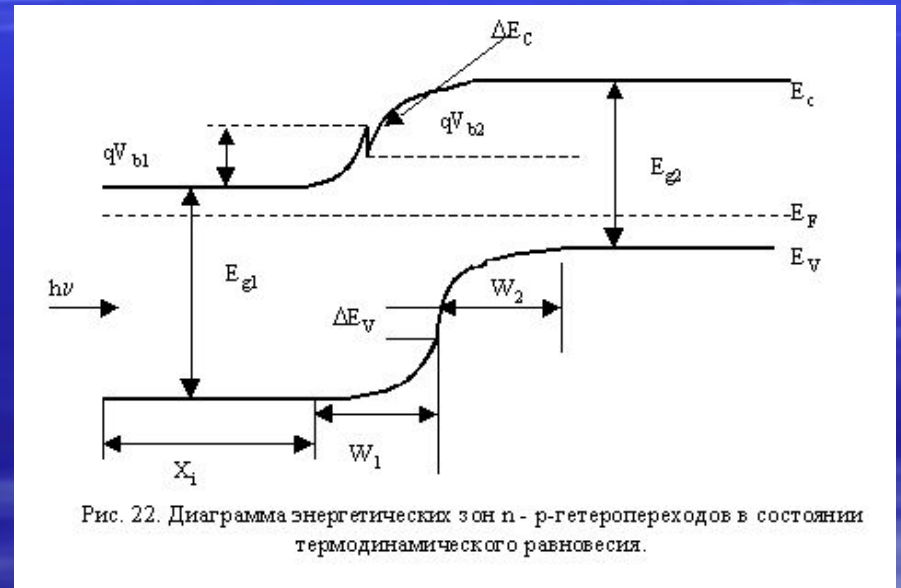
Один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей — арсенид галлия. Это объясняется такими его особенностями, как:

- 1) почти идеальная для однопереходных солнечных элементов ширина запрещенной зоны 1,43 эВ;
- 2) повышенная способность к поглощению солнечного излучения: требуется слой толщиной всего в несколько микрон;
- 3) высокая радиационная стойкость, что совместно с высокой эффективностью делает этот материал чрезвычайно привлекательным для использования в космических аппаратах;
- 4) относительная нечувствительность к нагреву батарей на основе GaAs; . характеристики сплавов GaAs с алюминием, мышьяком, фосфором или индием дополняют характеристики GaAs, что расширяет возможности при проектировании СЭ

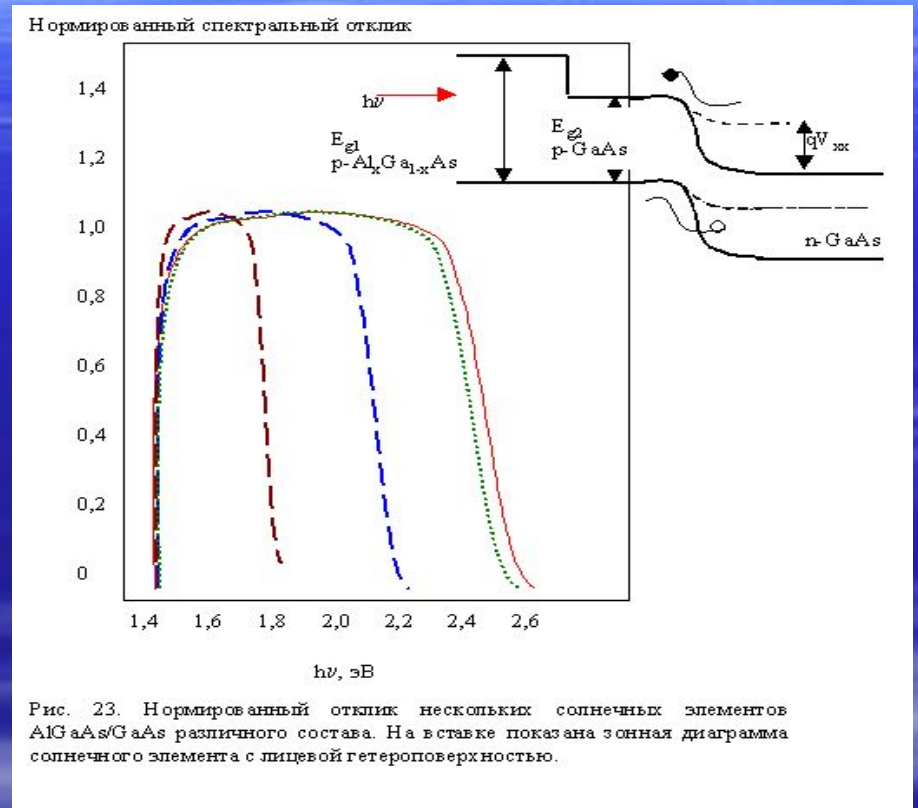
Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе — широкий диапазон возможностей для дизайна СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых СЭ ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный СЭ на основе GaAs состоит из очень тонкого слоя AlGaAs в качестве окна.

## Солнечные элементы с гетеропереходами.

- Гетеропереходы** представляют собой переходы, образующиеся при контакте двух полупроводников с различными энергетическими положениями запрещенной зоны.
- Типичная энергетическая диаграмма n-p-гетероперехода, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, показана на рис. 22. Фотоны с энергией, меньшей  $E_{g1}$ , но большей  $E_{g2}$ , будут проходить через слой первого 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-гомопереходами. Фотоны с энергией, большей  $E_{g1}$ , поглощаются 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 перехода.
- Преимущества солнечных элементов с гетеропереходами перед обычными солнечными элементами с p - n-переходами состоят в следующем:
  - 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.



- На рис. 23 показана зонная диаграмма элемента  $p\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/p\text{-GaAs}/n\text{-GaAs}$ . Широкозонный полупроводник здесь используется в качестве оптического окна, пропускающего фотоны с энергией, меньшей  $E_{g1}$ . Фотоны с энергиями в диапазоне  $E_{g2} - E_{g1}$  создают носители в гомопереходе. Если коэффициент поглощения света в узкозонном полупроводнике большой, генерация носителей будет происходить в обедненном слое или в близлежащей области и эффективность сбора носителей окажется высокой. Если полупроводниковый материал лицевой гетеропереходности имеет не прямую запрещенную зону лицевой гетеропереходности имеет не прямую запрещенную зону (как, например,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  при  $x > 0,4$ ) и его достаточно тонкий, то многие фотоны с энергией  $h\nu > E_{g1}$  будут проходить через этот слой и генерировать носители непосредственно в узкозонном полупроводнике. На рис. 23 приведены нормированные зависимости спектрального отклика для нескольких солнечных элементов из  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - \text{GaAs}$ , имеющих одинаковые уровни легирования и одинаковую глубину перехода. При увеличении  $x$  ширина запрещенной зоны  $E_{g1}$  увеличивается, поэтому возрастает спектральный отклик в коротковолновой области спектра.





- Интересным примером солнечного элемента с гетеропереходом является гетеропереход проводящее стекло - полупроводник. К проводящим стеклам относятся окисные полупроводники, такие как окисел индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$  с  $E_g=3,5$  эВ и электронным сродством  $\chi=4,45$  эВ), окисел олова ( $\text{SnO}_2$  с  $E_g=3,5$  эВ и электронным сродством  $\chi=4,8$  эВ) и окисел сплава индия и олова (ITO, смесь  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SnO}_2$  с  $E_g=3,7$  эВ и электронным сродством  $\chi$  от 4,2 до 4,5 эВ). Эти окисные полупроводники в виде тонких пленок обладают значительным сочетанием хорошей электрической проводимости и высокой оптической прозрачности. Поэтому они играют роль части гетероперехода и просветляющего покрытия.
- На рис. 24 показана зонная диаграмма солнечного элемента ITO - Si. Верхним слоем служит окисел ITO n-типа. Толщина слоя равна  $4000 \text{ \AA}$ , а его удельное сопротивление составляет  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . В качестве подложки выбран кремний p-типа с удельным сопротивлением  $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Все кривые на рис. 24 при плотностях тока порядка  $1 \text{ мА/см}^2$  параллельны друг другу. Наклон  $d(\ln J)/dV$  составляет  $\sim 24 \text{ В}^{-1}$  и не зависит от температуры. Такой наклон соответствует многоступенчатому туннелированию внутри гетероперехода. Значения к. п. д. лежат в диапазоне 12 - 15 %. Для солнечных элементов n-ITO/p-InP в условиях AM2 к. п. д.  $\approx 14$  %.
- Для получения высокой эффективности преобразования был предложен каскадный солнечный элемент с гетеропереходами. Прибор состоит из широкозонного ( $E_g=1,59$ ) и узкозонного ( $E_g=0,95$  эВ) элементов, последовательно соединенных туннельным диодом на гетеропереходе. Туннельный диод создается во время единого цикла изготовления такой монокристаллической структуры. Лицевая гетероповерхность, которая служит оптическим окном и позволяет снизить потери от поверхностной рекомбинации. Свет, который проходит первый элемент, не поглощаясь в нем, не поглотится также в сверхтонком туннельном диоде, а приведет к генерации и коллектированию носителей в узкозонном элементе. Оптимизировав соотношение между запрещенными зонами этих двух элементов, можно уравнивать значения их работ токов. При этом предельное теоретическое значение к. п. д. при комнатной температуре оказывается выше 30 %.

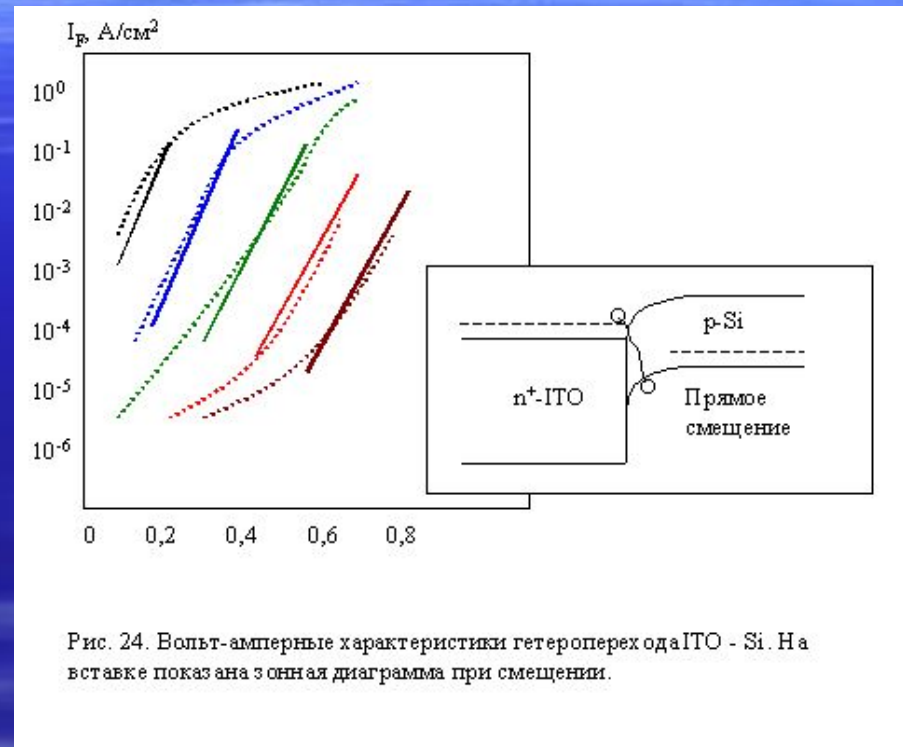


Рис. 24. Вольт-амперные характеристики гетероперехода ITO - Si. На вставке показана зонная диаграмма при смещении.

# Солнечные элементы на барьерах Шоттки.

На рис. 26 представлена диаграмма энергетических зон освещённого солнечного элемента с барьером Шоттки. При этом слой металла должен быть достаточно тонким, чтобы основная доля света достигла полупроводника. Можно выделить три компоненты фототока. Одна из них обусловлена поглощением в металле фотонов с энергией  $h\nu \geq q\phi_B$  ( $q\phi_B$  - высота барьера), что вызывает возбуждение дырок через барьер в полупроводник (эта компонента на рис. 26 обозначена цифрой 1). Попадающий в полупроводник коротковолновый свет поглощается главным образом в обеднённом слое (соответствующий фототок на рис. 26 обозначен цифрой 2). Длинноволновый свет, поглощается в нейтральном объёме полупроводника, создаёт электронно-дырочные пары; затем электроны, так же как и в случае обычного p-n - перехода, диффундируют к краю обеднённого слоя, где происходит их коллектирование (этот фототок на рис. 26 обозначен цифрой 3). В условиях, типичных для работы солнечных элементов, возбуждение светом носителей из металла в полупроводник составляет менее 1% полного фототока, и поэтому этим процессом можно пренебречь.

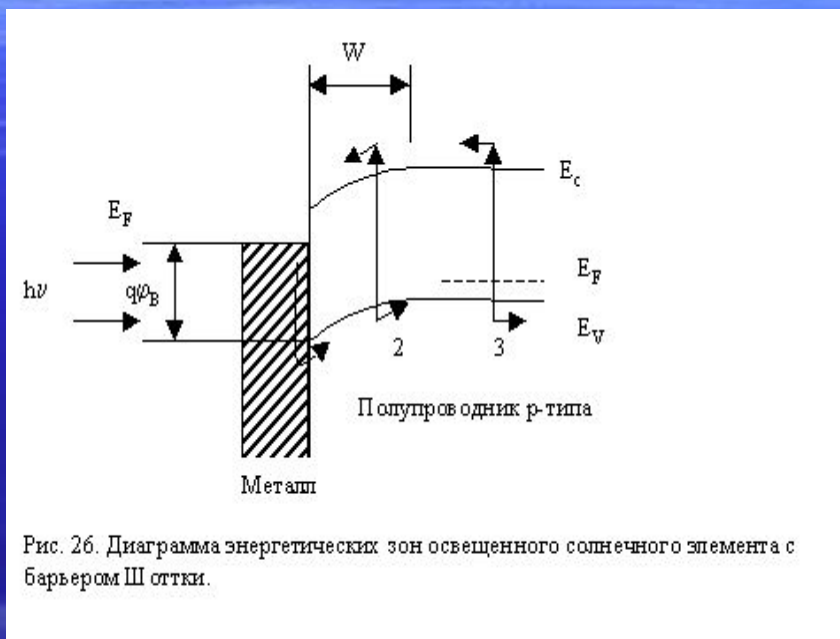


Рис. 26. Диаграмма энергетических зон освещенного солнечного элемента с барьером Шоттки.

## 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 тонкоплёночных 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 обеднённом 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

$$J_{av} = qT(\lambda)F(\lambda)[1 - \exp(-\alpha^*W)],$$

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 %.

# Зависимость высоты барьера от уровня легирования

Чтобы получить большую высоту барьера Шоттки, обычно для полупроводников n-типа используют металлы с высокой работой выхода, а для полупроводников p-типа - металлы с низкой работой выхода. Например, для Si p-типа используется двухслойный электрод (слой меди и хрома составляет 50 ангстрем), в котором хром служит для создания барьера Шоттки, а медь используется в качестве защитного покрытия. Для большинства систем металл - полупроводник, создаваемых на однородных подложках, максимальная высота барьера составляет  $\sim 2/3E_g$ . Однако отношение высоты барьера к ширине запрещенной зоны может быть увеличено, если между металлом и полупроводниковой подложкой ввести сильнолегированный слой (толщиной 100 ангстрем и с противоположным по отношению к подложке типом легирования). На рис. 28 (вставка) показана зонная диаграмма барьера Шоттки в системе - p+ - n-полупроводник. Тогда эффективная высота барьера равна

$$q\phi_B = q\phi_m - qV_{pm}$$

где  $q\phi_m$  - работа выхода из металла,  $\phi$  - электронное сродство полупроводника,  $V_{pm}$  - высота максимума потенциала в полупроводнике, равная

$$V_{pm} = \left(\frac{q}{2\epsilon_s N_A}\right)(N_A W_p - N_D W_n)^2$$

Эти выражения получены в предположении  $N_A W_p \gg N_D W_n$ , что соответствует полной ионизации тонкого p-слоя и существованию максимума потенциала внутри этого слоя. При перестановке n- и p-слоев получается комплементарный прибор со структурой металл - p+ - p-полупроводник. На рис. 28 приведены также вычисленные зависимости высоты барьера от  $N_A$  и  $W_p$  в GaAs при  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

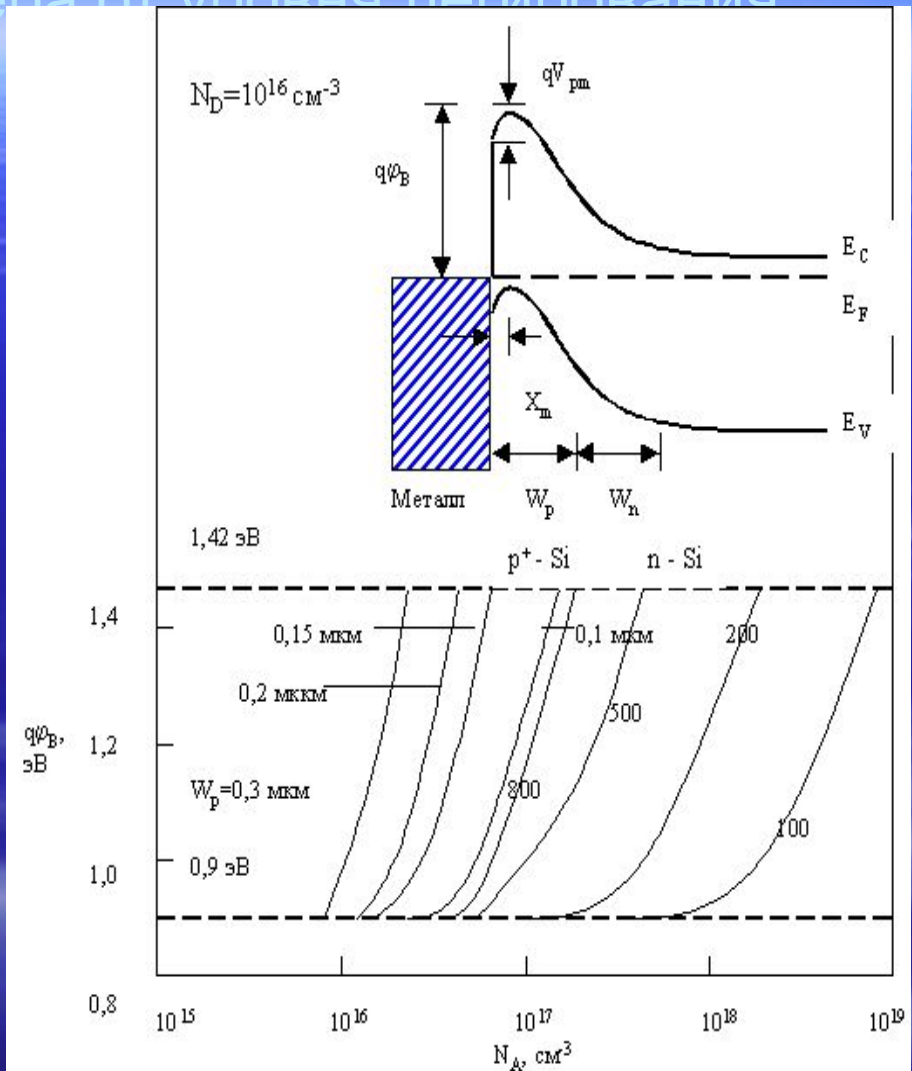
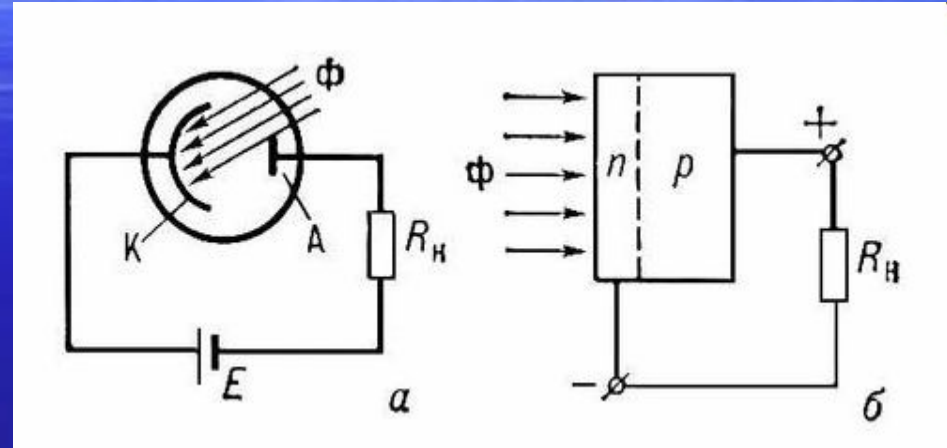


Рис. 28. Зависимость высоты барьера от уровня легирования и толщины p-слоя в солнечных элементах с барьерами Шоттки Au - GaAs. На вставке показана диаграмма энергетических зон элемента со структурой металла - p+ - n-полупроводник.

# Конструкции прибора.

- Солнечная батарея состоит в основном из фотоэлементов: электронных приборов, в которых в результате поглощения энергии падающего на них оптического излучения генерируется фототок. Действие фотоэлементов основывается на фотоэлектронной эмиссии или на внутреннем фотоэффекте.
- Фотоэлемент, действие которого основано на фотоэлектронной эмиссии, представляет собой (рис., а) электровакуумный прибор с 2 электродами – фотокатодом и анодом (коллектором электронов), помещенными в вакуумированную либо газонаполненную стеклянную или кварцевую колбу. Световой поток, падающий на фотокатод, вызывает фотоэлектронную эмиссию с его поверхности; при замыкании цепи фотоэлемента в ней протекает фототок, пропорциональный световому потоку. В газонаполненных фотоэлементах в результате ионизации газа и возникновения несамостоятельного лавинного электрического разряда в газах фототок усиливается. Наиболее распространены фотоэлементы с сурьмяно-цезиевым и кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодами.
- Фотоэлемент, действие которого основано на внутреннем фотоэффекте, – полупроводниковый прибор с гомогенным электронно-дырочным переходом (p–n-переходом) (рис., б), полупроводниковым гетеропереходом или контактом металл-полупроводник. Поглощение оптического излучения в таких фотоэлементах приводит к увеличению числа свободных носителей внутри полупроводника. Под действием электрического поля перехода (контакта) носители заряда пространственно разделяются, в результате между слоями возникает фотоэдс; при замыкании внешней цепи фотоэлемент через нагрузку начинает протекать электрический ток. Материалами, из которых выполняют полупроводниковые фотоэлементы, служат Se, GaAs, CdS, Ge, Si и др.



Основные параметры и характеристики фотоэлемента

- 1) Интегральная чувствительность – отношение фототока к вызывающему его световому потоку. Для определения этой чувствительности используют, как правило, эталонные источники света.
- 2) Спектральная чувствительность – величина, определяющая диапазон значений длин волн оптического излучения, в котором практически возможно использовать данный фотоэлемент
- 3) Вольтамперная характеристика – зависимость фототока от напряжения на фотоэлементе при постоянном значении светового потока.
- 4) Кпд, или коэффициент преобразования солнечного излучения – отношение электрической мощности, развиваемой фотоэлементом в номинальной нагрузке к падающей световой мощности.



Конструктивно солнечные батареи обычно выполняют в виде плоской панели из солнечных элементов, защищенных прозрачными покрытиями. Число этих элементов в батарее может достигать нескольких сотен тыс., площадь панели - десятков м<sup>2</sup>, генерируемая мощность - нескольких десятков кВт.

Достоинства солнечных батарей - их простота, надёжность и долговечность, малая масса и миниатюрность солнечных элементов, генерирование энергии без загрязнения окружающей среды;

Основной недостаток, ограничивающий развитие солнечной фотоэнергетики, - их пока ещё высокая стоимость.

Солнечные батареи являются альтернативным источником получения электроэнергии и используются наряду с другими восстанавливаемыми источниками, такими как ветряные мельницы, во многих странах мира.

