

Фотовольтаика

Фотовольтаика — область науки и технологий, изучающих и использующих совокупность явлений, связанных с возникновением электрического тока в результате преобразования энергии электромагнитного излучения, в частности, с преобразованием солнечной энергии в электричество путем использования фоточувствительных элементов.



Рис. 1. Солнечная батарея



Dear Vladimir,

Last week I received the OAI (USA) one of the best Solar simulator (Class A+AA) in the world and all the necessary for:

- IV measurement
- temperature control and stabilization
- power meter and calibrated cell
- 0.2 to 1.2 SUN (continue and pulse)
- LabVIEW possibilities to be controled ...etc.

If your team need same measurements we will be ready to do it !

We can add also NOISE measurements with a Stanford Research system and LOW TEMPERATURES (8K to 325 K) with a JANIS USA system.

Yours DORU

Prof.dr. Doru Ursutiu

IAOE President

<http://www.online-engineering.org>

University "Transylvania" of Brasov

Str. Oltenia nr.2A

RO-500209, Brasov, Romania



Место среди других дисциплин



Рис. 2. Место фотовольтаики среди других дисциплин

С

ВЕЩЕСТВОМ

Современное производство широко использует различные оптические приборы и устройства для совершенствования существующих и создания новых технологий, позволяющих целенаправленно воздействовать на вещество, управлять происходящими в нем физическими процессами. Выполняемые с этой целью оптические исследования – это, прежде всего, изучение *физики взаимодействия света с веществом*.

Существуют три уровня рассмотрения этого взаимодействия:

классический – оптическое излучение представляют в виде световых лучей или электромагнитных волн соответствующего диапазона частот, а вещество описывают в рамках аппарата механики сплошных сред, термодинамики, классической электродинамики;

полуклассический - предполагает квантовый подход при описании вещества (принимаются во внимание - структура энергетических уровней атомов и молекул, энергетическая зонная структура кристаллов, статистика заселения различных квантовых состояний) с сохранением классической трактовки света;

квантовый – осуществляется квантование не только вещества, но и излучения с использованием аппарата квантовой электродинамики.

ОБЩАЯ СХЕМА

применения полуклассического подхода

$$\nabla \times \vec{B}_\mu = \frac{1}{c} \vec{E}_\mu + \frac{4\pi}{c} \vec{j}_\mu,$$

$$\nabla \times \vec{E}_\mu = -\frac{1}{c} \dot{\vec{B}}_\mu,$$

$$\nabla \cdot \vec{E}_\mu = 4\pi \rho_\mu,$$

$$\nabla \cdot \vec{B}_\mu = 0,$$

$$\vec{j}_\mu(\vec{r}, t) = \sum_n e_n \vec{r}_n \delta(\vec{r} - \vec{r}_n)$$

$$\rho_\mu(\vec{r}, t) = \sum_n e_n \delta(\vec{r} - \vec{r}_n)$$

$$\vec{f}_n = e_n \vec{E}_\mu(\vec{r}_n, t) + \frac{e_n}{c} \vec{r}_n \times \dot{\vec{B}}_\mu(\vec{r}_n, t)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \dot{\vec{B}},$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi \rho,$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{1}{c} \dot{\vec{E}} + \frac{4\pi}{c} \vec{J},$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0.$$

$$\vec{D} = \hat{\epsilon} \vec{E},$$

$$\rho + \nabla \cdot \vec{J} = 0,$$

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P},$$

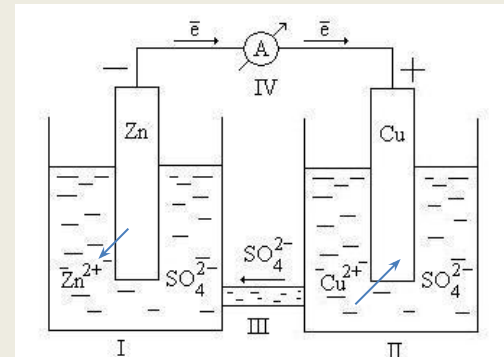
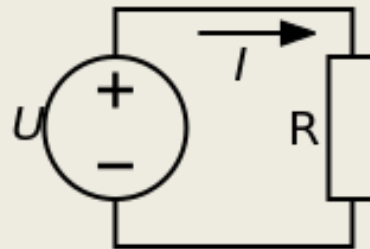
$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi \vec{M},$$

$$\vec{J} = \dot{\vec{P}} + c \nabla \times \vec{M},$$

$$\hat{\epsilon} = \hat{I} + 4\pi \hat{\alpha}.$$

$$\vec{J} = \hat{\sigma} \cdot \vec{E},$$

$$I = U / R, \quad R = \rho l / s$$



Проблема ЭДС

Теоретическое описание свойств твердых

Согласно ТЭП современным представлениям, кристалл есть совокупность электрически заряженных частиц: электронов и атомных ядер (при не очень больших плотностях и кинетических энергиях, когда еще не происходит рождение и уничтожение электрон-позитронных пар). Все частицы, благодаря электромагнитному взаимодействию (которое, в основном, и обуславливает физические, химические свойства кристаллов), совершают сложное движение, приводящее к образованию определенной (упорядоченной) структуры среды.

Существует **два способа теоретического описания свойств твердых тел** и явлений в них:

1 Твердое тело считают совокупностью отдельных атомов с заданными свойствами. А различные явления, протекающие в нем, рассматривают, исходя из атомных локальных процессов, «подправленных» за счет размещения атомов в кристаллической решетке. Каждый атом испытывает поляризацию во внешнем по отношению к нему поле. Вследствие взаимодействия атомов локальные возбуждения распространяются по твердому телу.

2 Важнейшей особенностью твердого тела считают объединение атомов в решетку с заданной структурой. И различные явления в твердом теле рассматривают на основе коллективных свойств твердого тела, его элементарных возбуждений. Общим для коллективных возбуждений кристалла является тот факт, что каждому состоянию в их энергетическом спектре соответствует определенное значение волнового вектора, тогда как место-положение состояния является неопределенным. В этом смысле они локализованы. Также (дополнительно) относятся квантовые состояния твердого тела.

Основные типы химической связи:

Ионная (электровалентная) – образуется при переносе валентных электронов с одного атома на другой и стабилизируется электростатическим взаимодействием между возникающими при этом ионами (например, в кристалле $NaCl$ ионами Na^+ и Cl^-).

Ковалентная – образуется при обобществлении электронов парой соседних атомов (например, в кристалле алмаза или кремния). Понижение энергии в таком случае выражается обменными интегралами, поэтому ковалентное взаимодействие иногда называют обменным взаимодействием. Кратность ковалентной химической связи равна числу обобществленных электронных пар (если число пар равно 2 или 3, то химическую связь называют соответственно двойной или тройной).

В природе не существует чисто полярных или чисто валентных связей, можно лишь говорить о преимущественно ионном или ковалентном характере связи. Если химическая связь частично ионная, а частично – ковалентная, то ее называют **семиполярной**.

В металлах реализуется – **металлическая связь**, которая обусловлена большой концентрацией электронов проводимости. Отрицательно заряженный

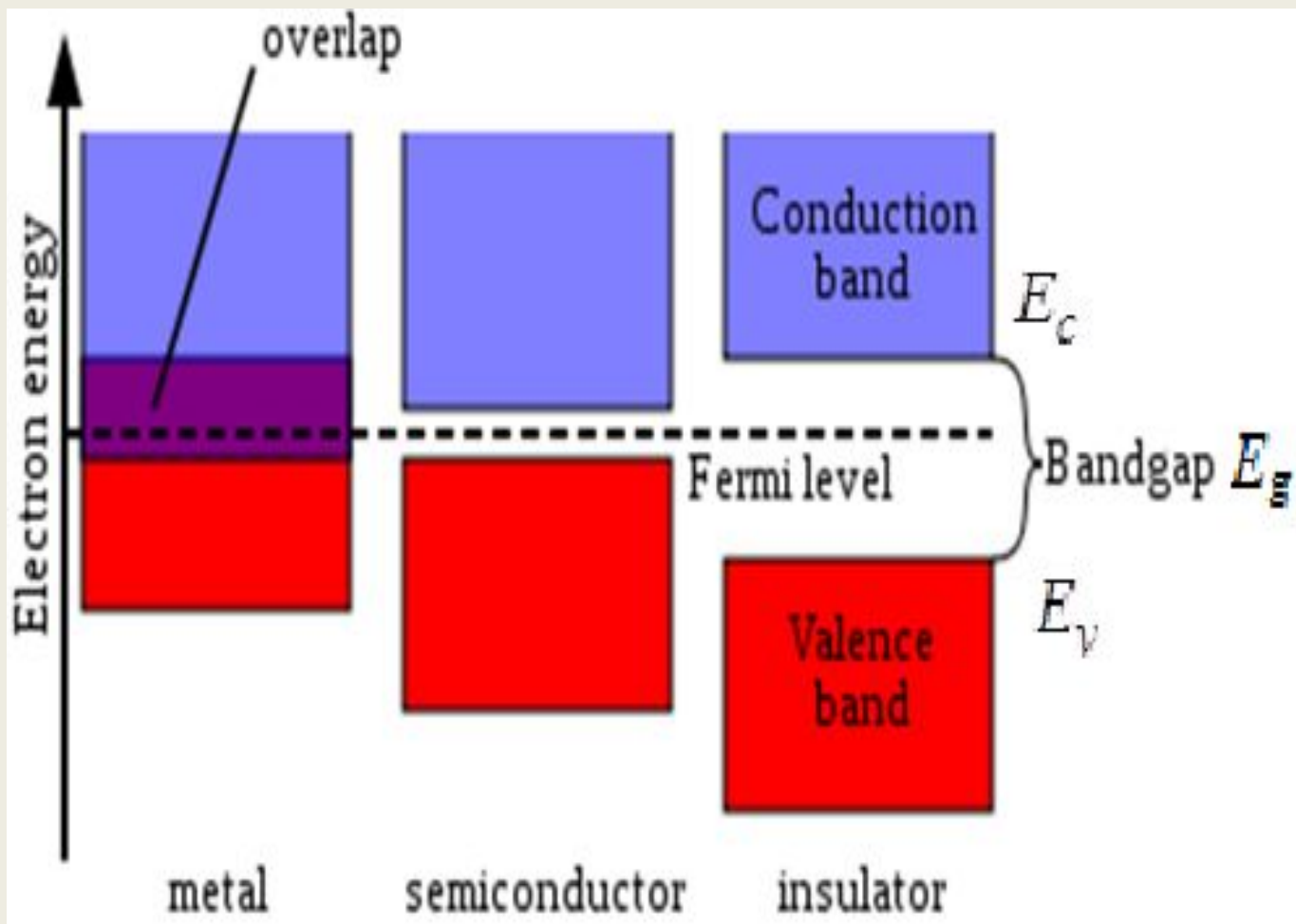


Рис. 3. Упрощённая зонная диаграмма для проводников, полупроводников и диэлектриков

УРОВЕНЬ ФЕРМИ

Граничная фермиевская энергия – **уровень Ферми** – максимальная энергия фермиевских частиц или квазичастиц (частиц, подчиняющихся статистике Ферми-Дирака) при абс нуле температуры.

Согласно статистике Ф-Д, в тв.теле в каждом энергетическом состоянии может находится не более одного электрона. При $T=0$ электроны будут последовательно заполнять самые низкие возможные уровни энергии вплоть до некоторой максимальной энергии, зависящей от плотности электронов.

Вольт-амперная характеристика – зависимость тока от приложенного к элементу эл. цепи напряжения.

Если сопротивление элемента цепи не зависит от тока, то в.-а. х. – прямая линия, проходящая через начало координат (*закон Ома*). В полупроводниках в.-а. х. отклоняется от линейного закона из-за зависимости подвижности носителей заряда и их концентрации от эл поля.

собственные и примесные.

Собственные полупроводники – полупроводники, в которых нет примесей. Собственная концентрация - концентрация носителей заряда в собственном проводнике (электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, причем). При $T=0$ в собственном полупроводнике свободные носители отсутствуют. При $T>0$ часть электронов забрасывается из валентной зоны в зону проводимости. Эти электроны и дырки могут свободно перемещаться по энергетическим зонам. **Дырка** – это способ описания коллективного движения большого числа электронов (примерно 10^{23} см^{-3}) в не полностью заполненной валентной зоне. Причем электрон – частица (его можно инжектировать из полупроводника или металла наружу, например, с помощью фотоэффекта), а дырка – квазичастица (она может «существовать» только внутри полупроводника).

Примесные полупроводники получают в результате *легирования* - внедрения примеси. Пусть имеется полупроводник 4-й группы (например, кремний или германий). Если ввести в него примесь – элемент 5-й группы, то получим **донорный** полупроводник -типа, он обладает *электронным типом проводимости*, а если – элемент 3-й группы, то получим **акцепторный** полупроводник -типа, он имеет *дырочный тип проводимости*.

Величина запрещённой зоны между зонами валентности и проводимости **является ключевой величиной в зонной теории**, она *определяет оптические и электрические свойства материала*.

Поскольку одним из основных механизмов передачи электрону энергии является *тепловой*, то проводимость полупроводников очень сильно зависит от **температуры**. Также проводимость можно увеличить, создав разрешенный энергетический уровень в запрещённой зоне путём **легирования**. С помощью легирования создаются все полупроводниковые приборы: солнечные элементы (преобразователи света в электричество), *диоды, транзисторы, твердотельные лазеры* и другие.

Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости называют *процессом генерации носителей заряда* (отрицательного — электрона, и положительного - дырки), обратный переход — *процессом рекомбинации*.

Из истории фотовольтаики

В 1839 году Александр **Беккерель** наблюдал явление фотоэффекта в электролите.

В 1873 году Уиллоуби **Смит** обнаружил, что селен является фотопроводящим. Затем эффект изучался

В 1887 году Генрихом **Герцем** при работе с открытым резонатором заметил, что если посветить ультрафиолетом на цинковые разрядники, то прохождение искры заметно улучшается.

Первые фундаментальные исследования фотоэффекта выполнены А. Г. Столетовым (1888). Он установил, что в возникновении фототока в цепи, содержащей металлические электроды и источник напряжения, существенную роль играет освещение отрицательного электрода и что сила фототока пропорциональна интенсивности света.

Ленард (1899) доказал, что при освещении металлов из них испускаются электроны.

Первое теоретическое объяснение законов фотоэффекта дал А. **Эйнштейн** (1905) на основе гипотезы Макса **Планка** о квантовой природе света.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{out} + E_k \quad (1)$$

:

Фотовольтаический эффект —

возникновение *электродвижущей силы (эдс)* под действием электромагнитного излучения.

Фотовольтаический эффект начал использоваться для непосредственного преобразования энергии солнечной радиации в электрическую энергию лишь в 1954 году

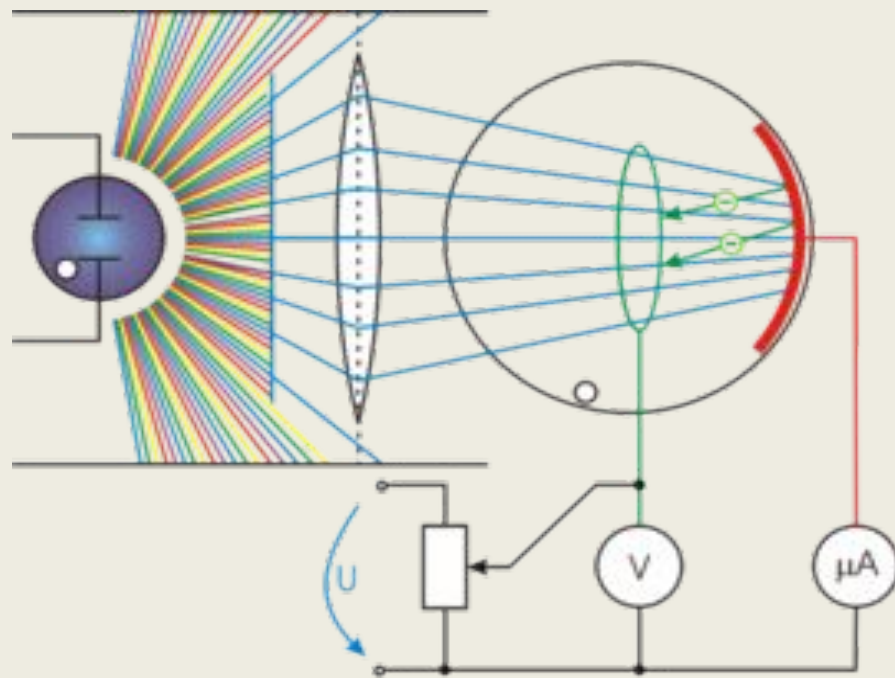


Рис. 4. Схема эксперимента по исследованию фотоэффекта

Фотоэффе́кт — это испускание электронов вещества под действием света (и, вообще говоря, любого электромагнитного излучения). В конденсированных веществах (твёрдых и жидких) выделяют **внешний и внутренний фотоэффект**.

Законы фотоэффекта

1 закон фотоэффекта: количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за единицу времени на данной частоте, прямо пропорционально световому потоку, освещающему металл.

2 закон фотоэффекта: максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3 закон фотоэффекта: для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света ν_0 (или максимальная длина волны λ_0), при которой ещё возможен фотоэффект, и если ν_0 , то фотоэффект уже не происходит.

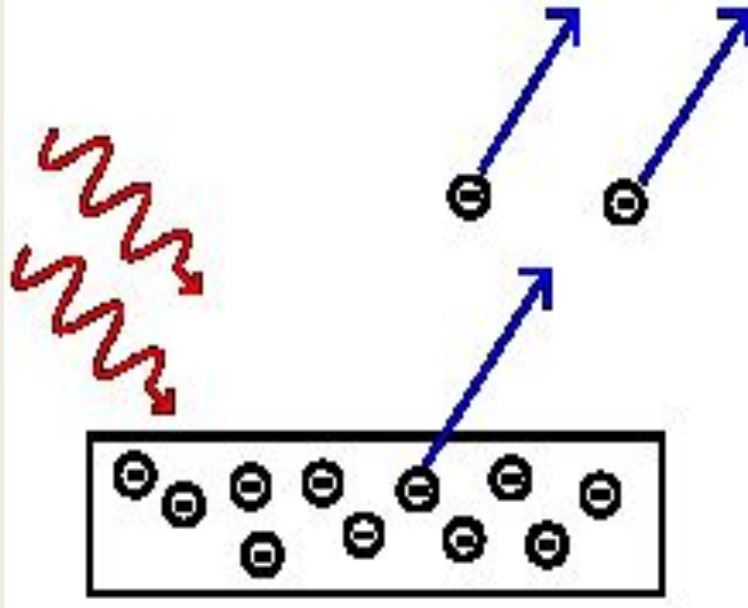
Закон Столетова:

при неизменном спектральном составе электромагнитных излучений, падающих на фотокатод, фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности катода (т.е. число фотоэлектронов, выбиваемых из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности излучения). Максимальная начальная скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Основные закономерности фотоэлектронной эмиссии

Фотоэлектронная эмиссия - внешний фотоэффект - испускание электронов твёрдыми телами и жидкостями под действием электромагнитного излучения (фотонов) в вакуум или другие среды. Практическое значение в большинстве случаев имеет фотоэлектронная эмиссия из твёрдых тел (металлов, полупроводников, диэлектриков) в вакуум.

Фотоэффект – квантовое явление, его открытие и исследование сыграли важную роль в экспериментальном обосновании квантовой теории: только на её основе оказалось возможным объяснение закономерностей фотоэффекта.



Фотокатод — электрод вакуумного электронного прибора, непосредственно подвергающийся воздействию электромагнитных излучений и эмитирующий электроны под действием этого излучения. Зависимость спектральной чувствительности от частоты или длины волны электромагнитного излучения называют *спектральной характеристикой фотокатода*.

Рис. 5. Схема внешнего фотоэффекта

Основные закономерности фотоэлектронной

эмиссии состоят в следующем:

- 1) количество испускаемых электронов пропорционально интенсивности излучения;
- 2) для каждого вещества при определенном состоянии и температуре $T = 0$ К существует порог – минимальная частота ω_0 (или максимальная длина волны λ_0) излучения, за которой фотоэлектронная эмиссия не возникает;
- 3) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой излучения и не зависит от его интенсивности.

Фотоэлектронная эмиссия – результат трех последовательных процессов:

- поглощения фотона и появления электрона с высокой (по сравнению со средней) энергией;
- движения этого электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеяться;
- выхода электрона в др. среду через поверхность раздела. Количественной характеристикой фотоэлектронной эмиссии является квантовый выход Y – число вылетевших электронов, приходящееся на 1 фотон излучения, падающего на поверхность тела. Величина Y зависит от свойств тела, состояния его поверхности и энергии фотонов.

Фотопроводимостью называется увеличение электрической проводимости вещества под действием излучения

Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта.

Вентильный фотоэффект или **фотоэффект в запирающем слое** — явление, при котором фотоэлектроны покидают пределы тела, переходя через поверхность раздела в другое твёрдое тело (полупроводник) или жидкость (электролит).

Ядерный фотоэффект - при поглощении гамма-кванта ядро получает избыток энергии без изменения своего нуклонного состава, а ядро с избытком энергии является составным ядром. Как и другие ядерные реакции, поглощение ядром гамма-кванта возможно только при выполнении необходимых энергетических и спиновых соотношений. Если переданная ядру энергия превосходит энергию связи нуклона в ядре, то распад образовавшегося составного ядра происходит чаще всего с испусканием нуклонов, в основном нейтронов. Такой распад ведёт к ядерным реакциям, которые и называются *фотоядерными*, а явление испускания нуклонов (нейтронов и протонов) в этих реакциях — *ядерным фотоэффектом*. Таким образом, ядерным фотоэффектом называется поглощение γ -кванта атомным ядром, сопровождающееся его перестройкой

Фотоэдс - электродвижущая сила, возникающая в полупроводнике при поглощении в нём электромагнитного излучения (фотонов).

Появление фотоэдс (*фотовольтаический эффект*) обусловлено пространственным разделением генерируемых излучением носителей заряда (*фотоносителей*). Разделение фотоносителей происходит в процессе их диффузии и дрейфа в электрическом и магнитном полях из-за неравномерной генерации, неоднородности кристалла, воздействия внешнего магнитного поля, одноосного сжатия и др.

Вентильная (барьерная) фотоэдс возникает в неоднородных по химическому составу или неоднородно легированных примесями полупроводниках, а также на контакте полупроводника с металлом. В области неоднородности в полупроводнике существует внутреннее электрическое поле, которое ускоряет генерируемые излучением неосновные и замедляет основные неравновесные носители заряда. В результате фотоносители разных знаков пространственно разделяются. Разделение электронов и дырок внутренним полем эффективно, когда неоднородность не слишком плавная, так что на длине порядка диффузионной длины неосновных носителей заряда разность химических потенциалов превышает kT/e (при комнатной температуре $kT/e = 0,025$ эв).

Вентильная фотоэдс может возникать в полупроводнике под действием света, генерирующего и электроны, и дырки или хотя бы только неосновные носители.

Для практических применений особенно важна *вентильная фотоэдс*, возникающая в электронно-дырочном переходе или полупроводниковом гетеропереходе. Она используется в фотоэлектронных приборах (фотовольтаических элементах, солнечных элементах). По величине вентильной фотоэдс также обнаруживают слабые неоднородности в полупроводниковых материалах.

Фотопьезоэлектрический эффект - *фотоэдс* в однородном полупроводнике при одновременном одноосном сжатии и освещении. *Фотоэдс* в данном случае появляется на гранях, перпендикулярных направлению сжатия, её величина и знак зависят от направления сжатия и освещения относительно кристаллографических осей. Фотоэдс пропорциональна давлению и интенсивности излучения. В этом случае фотоэдс обусловлена анизотропией коэффициентом диффузии фотоносителей, вызванной одноосной деформацией кристалла.

Тензорезистивный эффект – возникновение фотоэдс при неоднородном сжатии и одновременном освещении полупроводника. Эта фотоэдс обусловлена неодинаковым в разных частях кристалла изменением ширины запрещенной зоны под действием давления.

Эффект Кикоина – Носкова.

В полупроводнике, помещенном в магнитное поле и освещенном сильно поглощающим светом так, что градиент концентрации фотоносителей (и их диффузионный поток) возникает в направлении, перпендикулярном магнитному полю, электроны и дырки разделяются вследствие их отклонения магнитным полем в противоположных направлениях

Б. И. Давыдов (1937) установил, что **фотоэдс возникает и при генерации только основных носителей заряда** (или при поглощении электронами проводимости излучения), если энергия фотоносителей заметно отличается от энергии др. носителей заряда. Обычно такая фотоэдс возникает в чистых полупроводниках с высокой подвижностью электронов при очень низких температурах. Фотоэдс в этом случае обусловлена зависимостью подвижности и коэффициента диффузии электронов от их энергии. Фотоэдс этого типа имеет заметную величину в InSb n-типа, охлажденном до температуры жидкого гелия.

При поглощении излучения свободными носителями заряда в полупроводнике вместе с энергией фотонов поглощается их импульс. В результате электроны приобретают направленное движение относительно кристаллической решётки и на гранях кристалла, перпендикулярных потоку излучения, появляется **фотоэдс светового давления**. Она мала, но вместе с тем очень мала и её инерционность (порядка 10-11сек). Фотоэдс светового давления используется в быстродействующих приёмниках излучений, предназначенных для измерения мощности и формы импульсов излучения лазеров.

Диффузионная фотоэдс (эдс Дембера) - Объёмная фотоэдс в однородном полупроводнике, обусловленная неодинаковой генерацией в нём фотоносителей.

При *неравномерном освещении* полупроводника или облучении его сильно поглощающим (и быстро затухающим в глубине кристалла) излучением концентрация фотоносителей велика вблизи облучаемой грани и мала или равна нулю в затемнённых участках. *Фотоносители* диффундируют от облучаемой грани в область, где их концентрация меньше, и если подвижности электронов проводимости и дырок неодинаковы, в объёме полупроводника возникает пространственный заряд, а между освещённым и затемнённым участками – фотоэдс Дембера:

$$E_{1,2} = \frac{kT}{e} \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

где k – Больцмана постоянная, e – заряд электрона, T – температура, μ_n, μ_p подвижности электронов и дырок, σ_1 и σ_2 – электропроводность в точках 1 и 2. Фотоэдс Дембера при данной интенсивности освещения тем больше, чем больше разность μ_n чем μ_p меньше электропроводность полупроводника в темноте.

Излучение, генерирующее в полупроводнике только основные носители заряда, не создаёт фотоэдс Дембера, так как в этом случае эдс в объёме компенсируется равной ей по величине и противоположной по знаку эдс, образующейся на контакте полупроводника с электродом. Фотоэдс Дембера в обычных полупроводниках мала и практического применения не имеет.

Современные исследования

Как показали эксперименты в национальном метрологическом институте Германии Physikalisch-Technische Bundesanstalt (2009), в мягком рентгеновском диапазоне длин волн при плотности мощности на уровне нескольких петаватт (10¹⁵ Вт) на квадратный сантиметр общепринятая теоретическая *модель фотоэффекта может оказаться неверной.*

Сравнительные количественные исследования различных материалов показали, что *глубина взаимодействия между излучением и веществом существенно зависит от структуры атомов этого вещества и корреляции между внутренними электронными оболочками.*

В случае с ксеноном, который использовался в экспериментах, воздействие пакета фотонов в коротком импульсе приводит, по всей видимости, к одновременной эмиссии множества электронов с внутренних оболочек