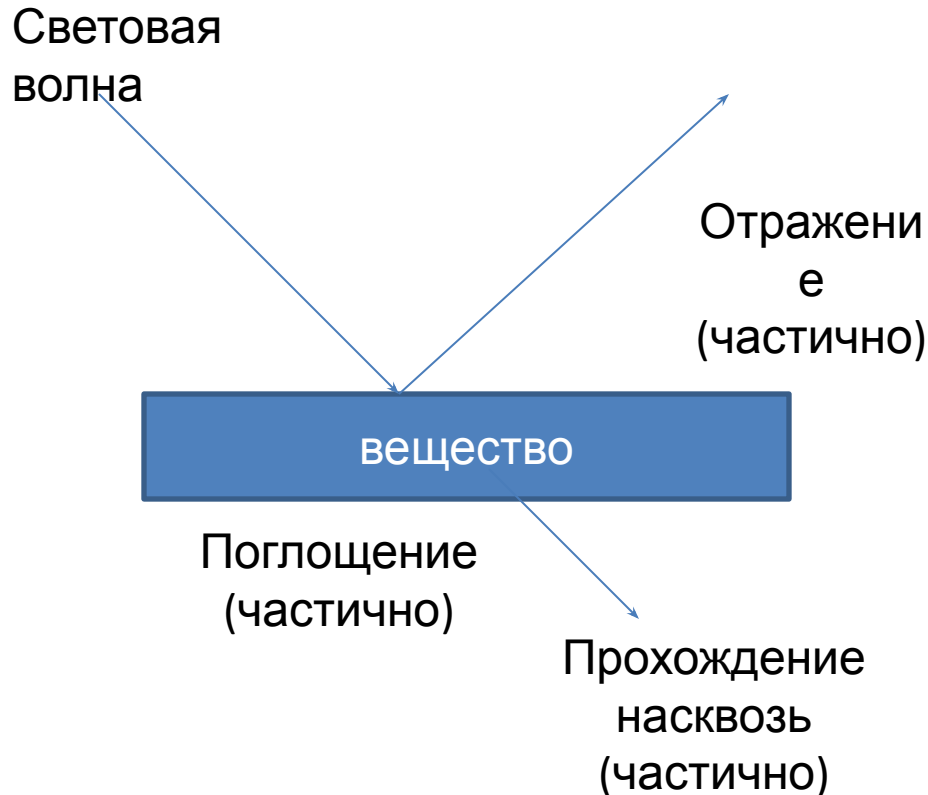


Законы фотоэффекта.  
Квантовые свойства вещества и  
света.

# Фотоэффект

В большинстве случаев энергия поглощенной световой волны переходит во внутреннюю энергию вещества = нагревание вещества



нередко

часть этой поглощенной энергии вызывает другие явления

1

фотоэффект

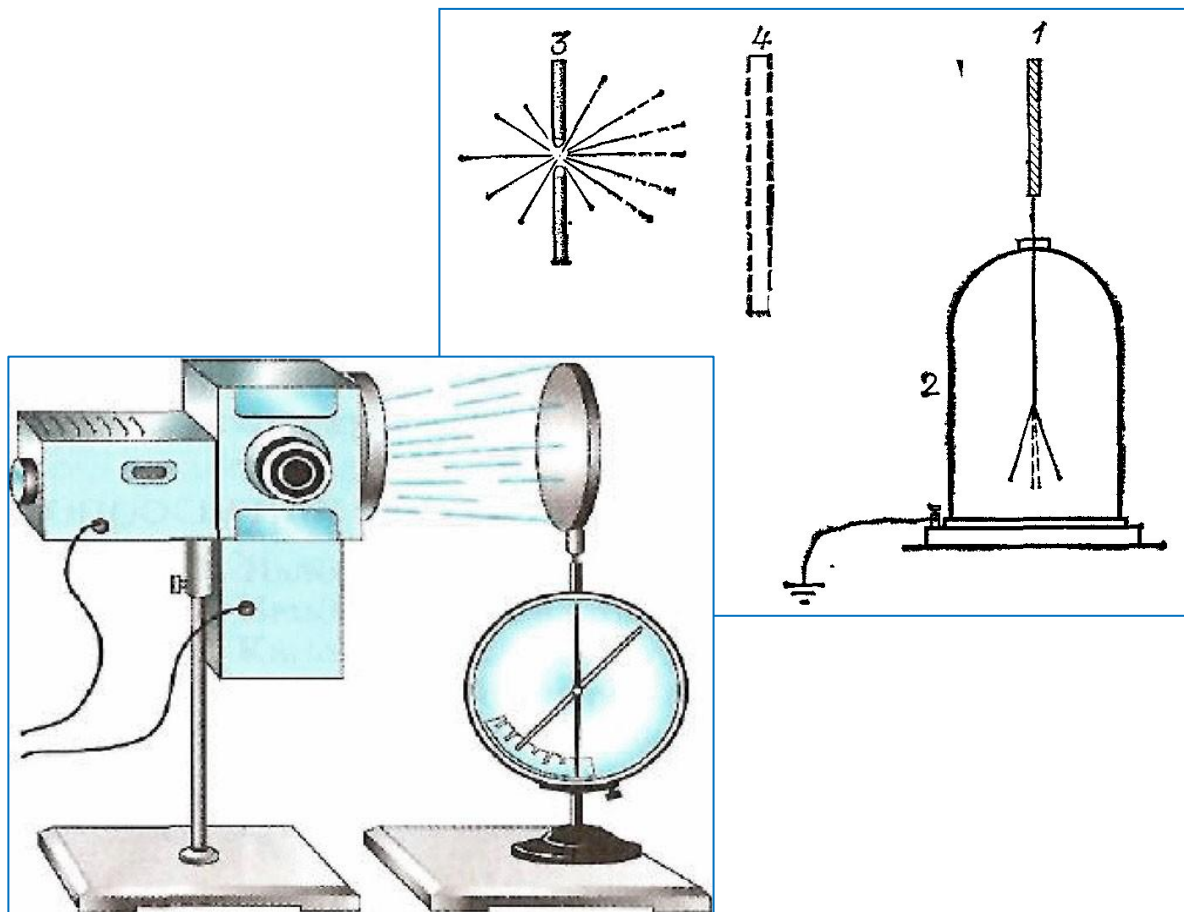
2

фотолюминесценция

3

Фотоэлектрические превращения

# Фотоэффект



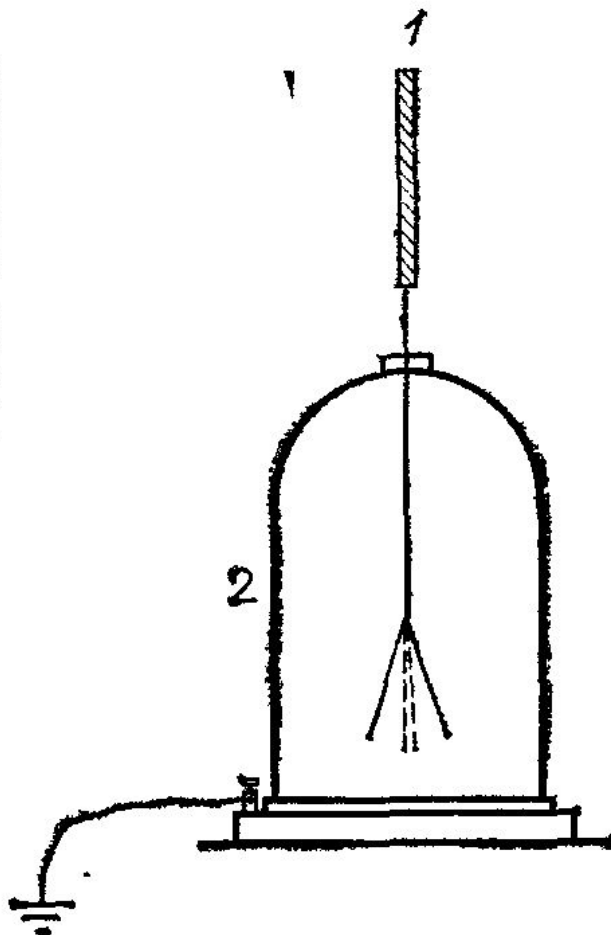
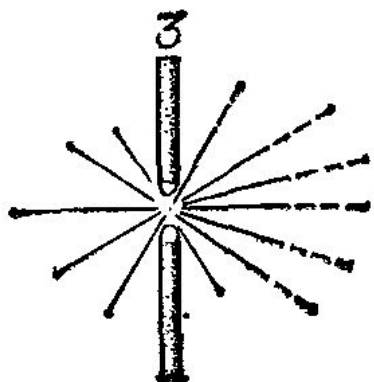
1 – хорошо очищенная цинковая пластинка  
2 – электроскоп

3 - источник света, богатый ультрафиолетовым излучением (электрическая дуга или кварцевая ртутная лампа)

4 – стекло, задерживающее ультрафиолетовое излучение

Фотоэффект: под действием света металл теряет отрицательные заряды

# Фотоэффект



Если электроскоп  
заряжен  
отрицательно



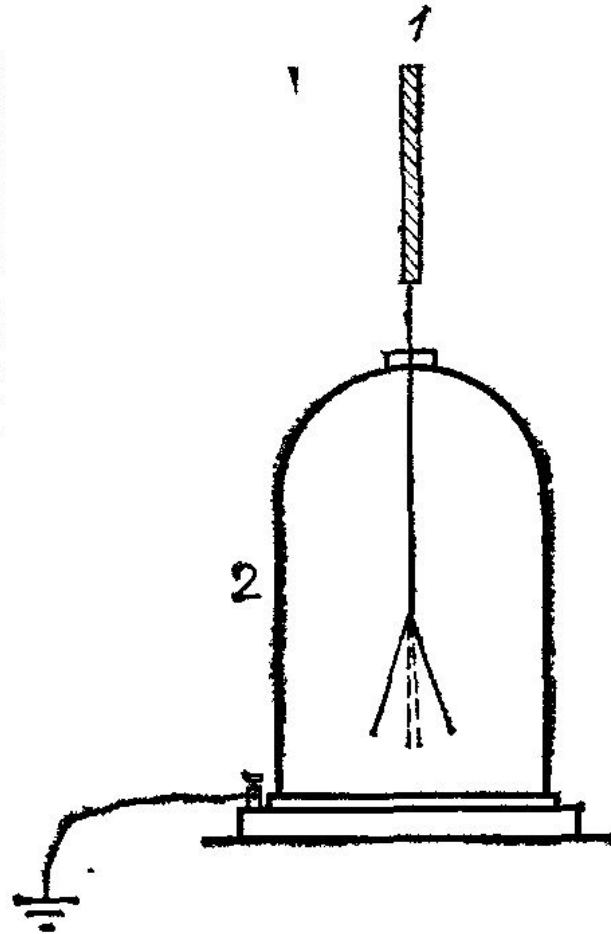
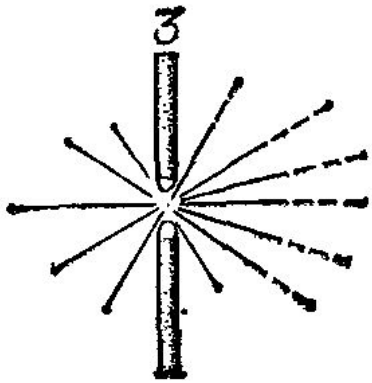
под действием света  
ртутной лампы он  
разряжается



Чем больше  
освещенность  
пластинки, тем  
быстрее происходит  
разряд электроскопа

Фотоэффект: под действием света металл теряет отрицательные заряды

# Фотоэффект



Если электроскоп  
заряжен  
положительно



Заряд сохраняется



несмотря на  
освещение

Фотоэффект: под действием света металл теряет отрицательные заряды

# Фотоэффект

## ВЫВОД:

Установил Александр Григорьевич Столетов – русский физик



Отрицательный заряд теряется с поверхности металла при освещении

Положительный заряд сохраняется на поверхности металла несмотря на освещение

# Фотоэффект



**Столетов Александр  
Григорьевич**  
(1839-1896 гг.)

**Столетов Александр Григорьевич** - русский физик. Александр Григорьевич Столетов является одним из основоположников русской физики. Ему принадлежат капитальные исследования в области магнетизма и фотоэлектрических явлений, в которых он вскрыл важнейшие закономерности этих явлений, создал методику экспериментального исследования магнитных свойств материалов и электрического разряда в газах. Его исследования магнитных свойств железа легли в основу рациональных методов расчёта электрических машин. Благодаря этому А. Г. Столетов является также и одним из основателей современной электротехники. Исследовал фотоэффект.

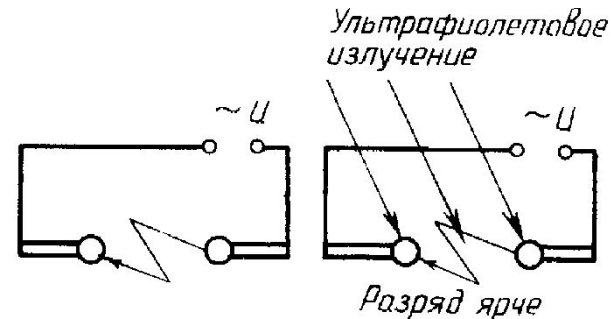
# Фотоэффект

## Генрих Рудольф Герц

- немецкий физик. Родился 22 февраля 1857 в Гамбурге. Учился в Высшей технической школе в Дрездене, в Мюнхенском, а затем в Берлинском университете, по окончании которого в 1880 защитил докторскую диссертацию и стал ассистентом Г. Гельмгольца.

1887 г.

Обнаружил что, освещение ультрафиолетовым светом отрицательного электрода искрового промежутка, находящегося под напряжением, облегчает проскакивание искры между



**Генрих Рудольф Герц**  
(1857-1894 гг.)

Не обратил на это явление серьезного внимания, поэтому первые исследования этого явления принадлежат другим ученым



# Фотоэффект

## Сущность обнаруженного явления

При освещении ультрафиолетовыми лучами отрицательно заряженного металлического тела оно теряет отрицательный заряд

При освещении этими же лучами положительно заряженного тела – такого эффекта нет

Если освещать незаряженное тело, то оно заряжается положительно

После открытия электрона было доказано, что при освещении тела теряют электроны.



**Генрих Рудольф Герц**  
(1857-1894 гг.)

# Фотоэффект

## Фотоэффект

- это явление выбивания электронов из вещества



2 вида



внешний фотоэффект

электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду, в частности в вакуум (вылетают за пределы вещества)



внутренний фотоэффект

возбужденные электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая его электрическую нейтральность

электроны  
вырванные под  
действием света  
=  
фотоэлектроны

# Фотоэффект

## ГИПОТЕЗА ФОТОНОВ

для обоснования имеет значение лишь внешний  
фотоэффект

Середина 19 века



окончательно доказано

свет имеет волновую  
природу  
(свет =  
электромагнитная  
волна)

**НО!**

волновая теория  
не могла  
объяснить всю  
совокупность  
оптических  
явлений!!!

# Фотоэффект



Макс Планк

## ГИПОТЕЗА

излучение и поглощение света  
веществом происходит не  
непрерывно, а конечными порциями,

или квантами  
энергия кванта, излучаемая или  
поглощаемая

$$\mathcal{E} = h\nu$$

$h$  – постоянная Планка  
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с

часто  
используют

$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$  постоянная Дирака

$$\mathcal{E} = \hbar\omega$$

# Фотоэффект



**Макс Планк**

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА



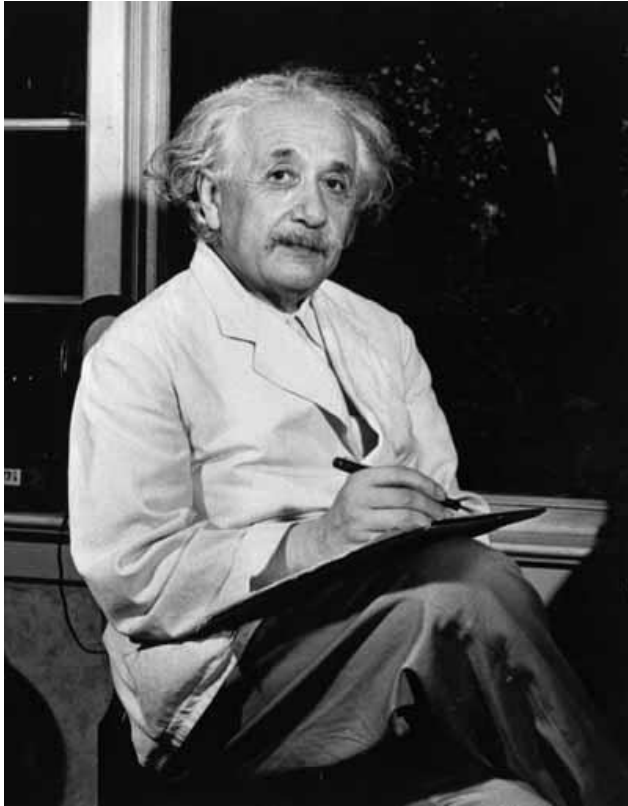
проявляются только в процессах  
излучения и поглощения,  
т. е. при взаимодействии света с  
веществом

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА



при распространении света в  
пространстве

# Фотоэффект



**Альберт  
Эйнштейн**

при распространении в  
пространстве свет ведет себя также  
подобно совокупности каких-то

частиц



энергия каждой частицы  
определяется

$$\mathcal{E} = h\nu$$

такие частицы получили название

**ФОТОНЫ**

# Фотоэффект

**ФОТОНЫ**



на них нельзя смотреть как на обычные частицы света, аналогичные материальным точкам классической механики, движущимся по определенным траекториям в

пространстве  
им свойственна



**интерференция**

перераспределение интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких когерентных световых волн



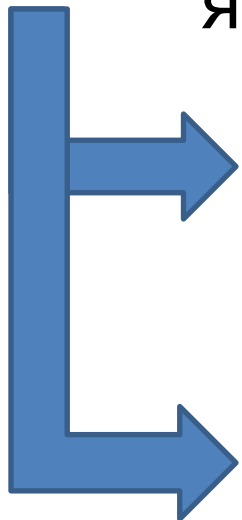
**дифракция**

явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий

# Фотоэффект

характеризуется

я



числом электронов, освобожденных за единицу времени (т. е. силой фототока)

скоростью освобожденных из металла электронов

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

$m$  – масса электрона

$U$  - напряжение, создающее тормозящее поле, через которое должен пролететь электрон

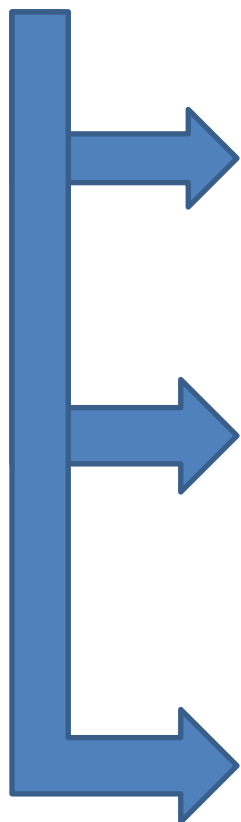
$e$  – заряд электрона

$v$  – скорость электрона



# Фотоэффект

## ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА



число электронов, освобожденных светом за единицу времени (т. е. ток насыщения), прямо пропорционально световому потоку

скорость вылетающих фотоэлектронов не зависит от освещенности, а определяется частотой света

для каждого вещества существует минимальная частота света, называемая красной границей фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен

# Фотоэффект

ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ, СООБЩАЕМАЯ ЭЛЕКТРОНУ СВЕТОМ  
ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ЧАСТОТЕ СВЕТА

$$W = A + \frac{1}{2} m v^2 = h \nu$$

уравнение  
Эйнштейна для  
фотоэффекта

A – работа выхода электрона из металла

h – постоянная Планка

каждому веществу соответствует своя работа выхода



Каждый металл характеризуется определенной энергией, которую необходимо сообщить электрону, для того чтобы он мог преодолеть силы, удерживающие его внутри металла

## Фотоэлектрическая генерация

**Фотоэлектрическая генерация** – это процесс прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию.

Данный процесс становится возможным при использовании фотоэффекта – явления, происходящего в веществах при их освещении (т. е. воздействием электромагнитным излучением).

Фотоэффект делится на два вида:

- фотоэлектрическая эмиссия (внешний фотоэффект) – выход электронов из металлов;

- вентильный фотоэффект (внутренний фотоэффект) – перемещение зарядов через границу раздела проводников с различными типами проводимости. Фотоэлектрическая генерация основана на существовании вентильного фотоэффекта, который возникает при использовании полупроводников.

# Электропроводимость полупроводников

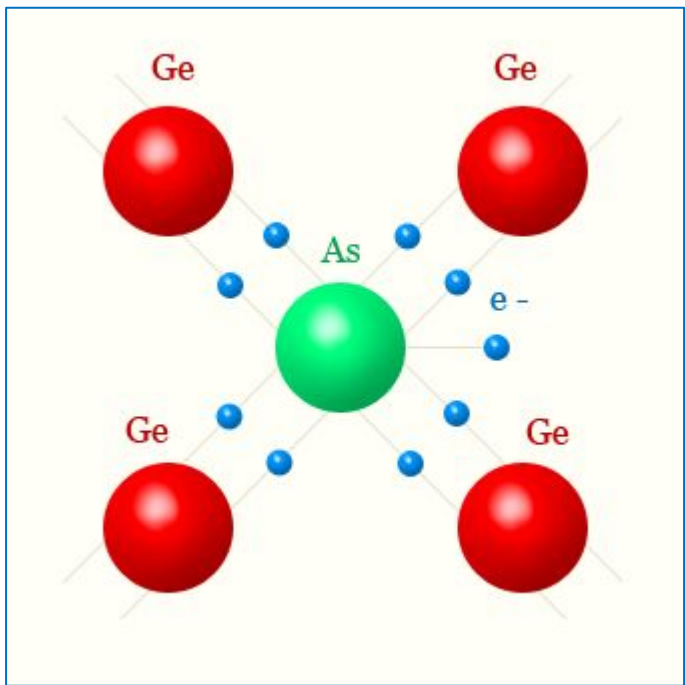
**Полупроводники** — материалы, по своей удельной проводимости занимающие промежуточное место между проводниками и диэлектриками, и отличающиеся от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводников является увеличение электрической проводимости с ростом температуры

Полупроводниками являются кристаллические вещества, ширина запрещённой зоны которых составляет порядка электрон-вольта (эВ). Например, алмаз можно отнести к *широкозонным полупроводникам* (около 6 эВ), а арсенид индия — к *узкозонным* (0,35 эВ). К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и другие), огромное количество сплавов и химических соединений (арсенид галлия и др.).

Атом другого химического элемента в чистой кристаллической решётке (например, атом фосфора, бора и т. д. в кристалле кремния) называется **примесью**.

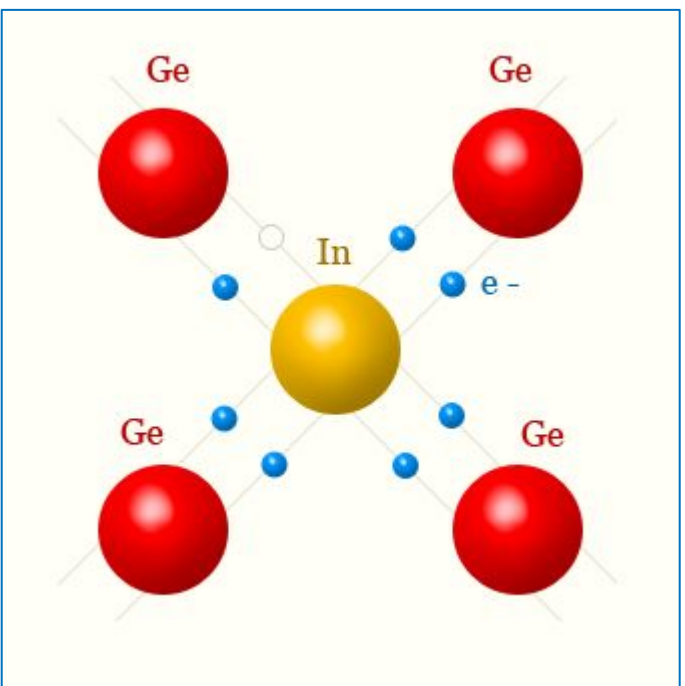
В зависимости от того, отдаёт ли примесной атом электрон в кристалл (в вышеприведённом примере – фосфор) или захватывает его (бор), примесные атомы называют **донорными** или **акцепторными**. Характер примеси может меняться в зависимости от того, какой атом кристаллической решётки она замещает, в какую кристаллографическую плоскость встраивается.

Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры. Вблизи



Проводимость полупроводника можно увеличить добавлением атомов других элементов (легирование). При введении в решетку полупроводника примесей возникает **примесная проводимость** (в отличие от собственной проводимости). Например, при легировании четырехвалентного германия пятивалентным мышьяком (или сурьмой, или фосфором) в месте нахождения атома примеси появляется лишний свободный электрон.

В данном случае перенос заряда осуществляется электроном, а не дыркой, то есть данный вид полупроводников проводит электрический ток подобно металлам. Примеси, которые добавляют в полупроводники, вследствие чего они превращаются в полупроводники **n-типа**, называются **донорными**.



Проводимость полупроводника можно увеличить, легируя его элементами с меньшей валентностью. Если, например, легировать германий трехвалентным индием (либо бором, либо галлием), то в месте нахождения атома примеси возникает лишняя дырка.

Каждый атом примеси устанавливает ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. Для установки связи с четвертым атомом кремния у атома индия нет валентного электрона, поэтому он захватывает валентный электрон из ковалентной связи между соседними атомами германия и становится отрицательно заряженным ионом, вследствие чего образуется дырка. Примеси, которые добавляют в этом случае, называются **акцепторными**, (**p-тип**)

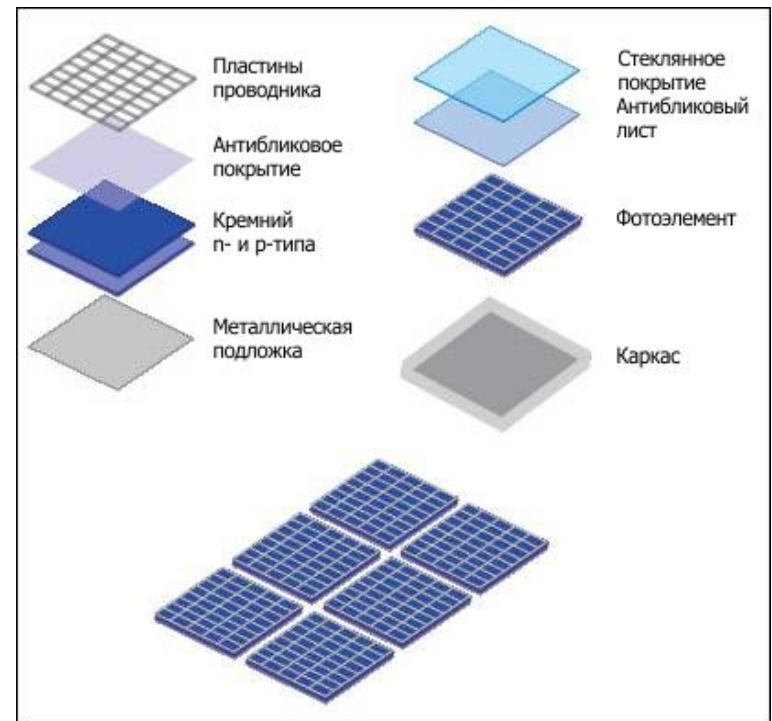
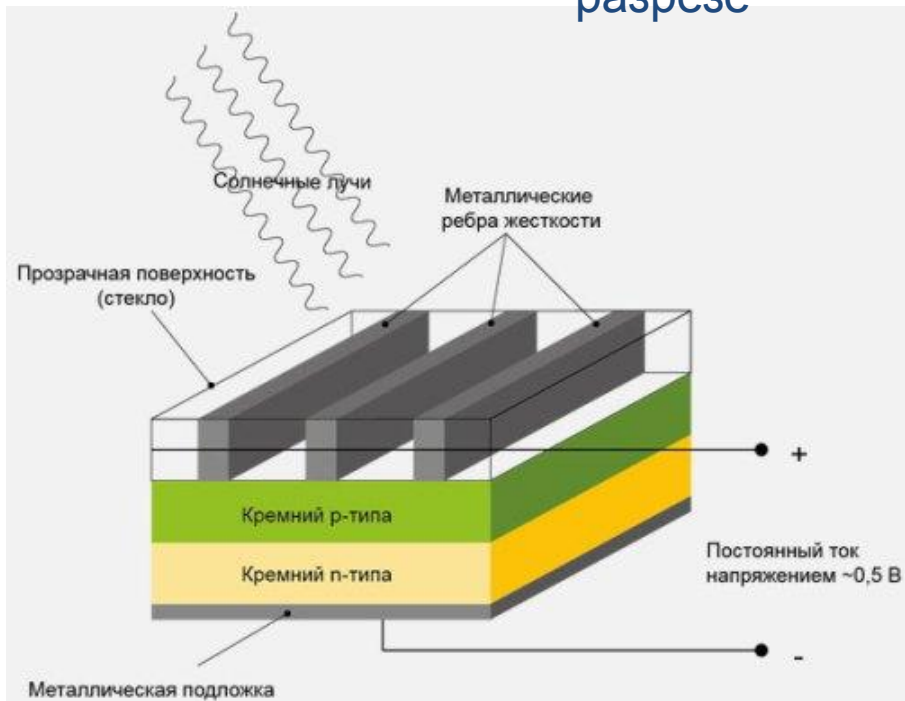
**Солнечные элементы (СЭ)** изготавливаются из материалов, которые напрямую преобразуют солнечный свет в электричество.

Большая часть из коммерчески выпускаемых в настоящее время СЭ изготавливается из кремния (химический символ Si).

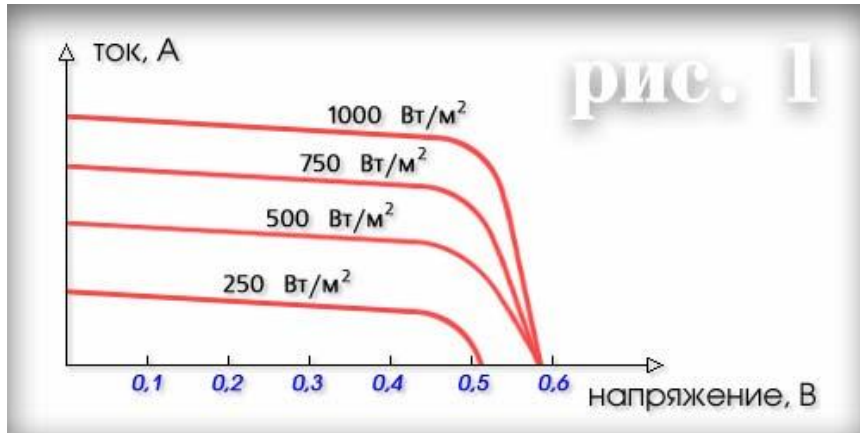
Кремний - полупроводник. Он широко распространен на земле в виде песка, который является диоксидом кремния ( $\text{SiO}_2$ ), также известного под именем «кварцит».

Другая область применения кремния — электроника, где кремний используется для производства полупроводниковых приборов и микросхем.

### Схема солнечного элемента в разрезе



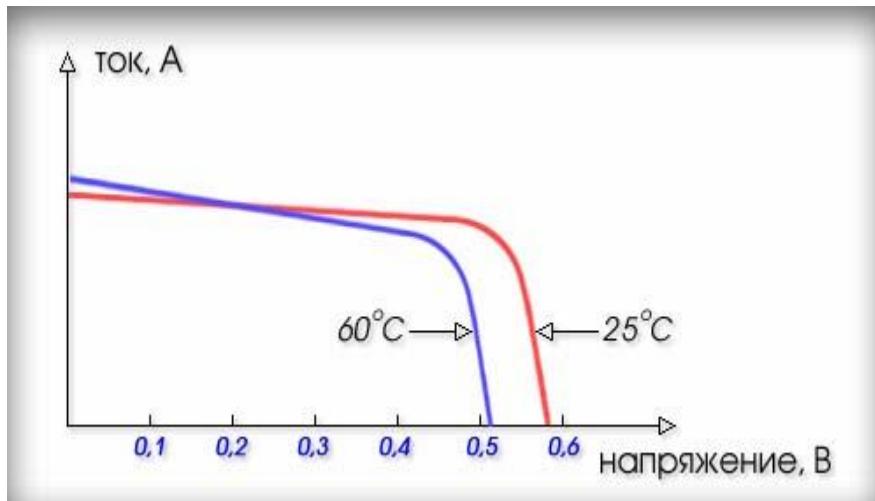
Кремниевые СЭ являются нелинейными устройствами и их поведение нельзя описать простой формулой типа закона Ома. Вместо нее для объяснения характеристик элемента можно пользоваться семейством простых для понимания кривых - вольтамперных характеристик (ВАХ).



### Вольтамперная характеристика ФСЭ

Напряжение холостого хода, генерируемое одним элементом, слегка изменяется при переходе от одного элемента к другому в одной партии и от одной фирмы изготовителя к другой и составляет около 0,6 В. Эта величина не зависит от размеров элемента.

- По иному обстоит дело с током. Он зависит от интенсивности света и размера элемента, под которым подразумевается площадь его поверхности. Нагружая элемент, можно построить график зависимости выходной мощности от напряжения.



Важным моментом работы ФСЭ является их зависимость от температуры. При нагреве элемента на один градус выше 25° С он теряет в напряжении 0,002 В, т.е. 0,4 %/°С.

## Типы солнечных элементов

СЭ может быть следующих типов:

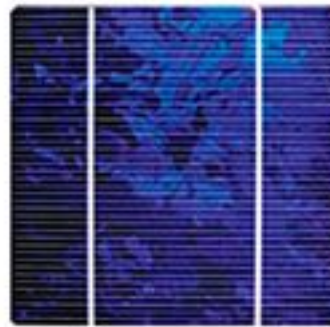
- монокристаллический,
- поликристаллический
- аморфный (тонкопленочный).

Различие между этими формами в том, как организованы атомы кремния в кристалле. Различные СЭ имеют разный КПД преобразования энергии света.

Моно- и поликристаллические элементы имеют почти одинаковый КПД, который выше, чем у солнечных элементов, изготовленных из аморфного кремния.



Монокристаллический



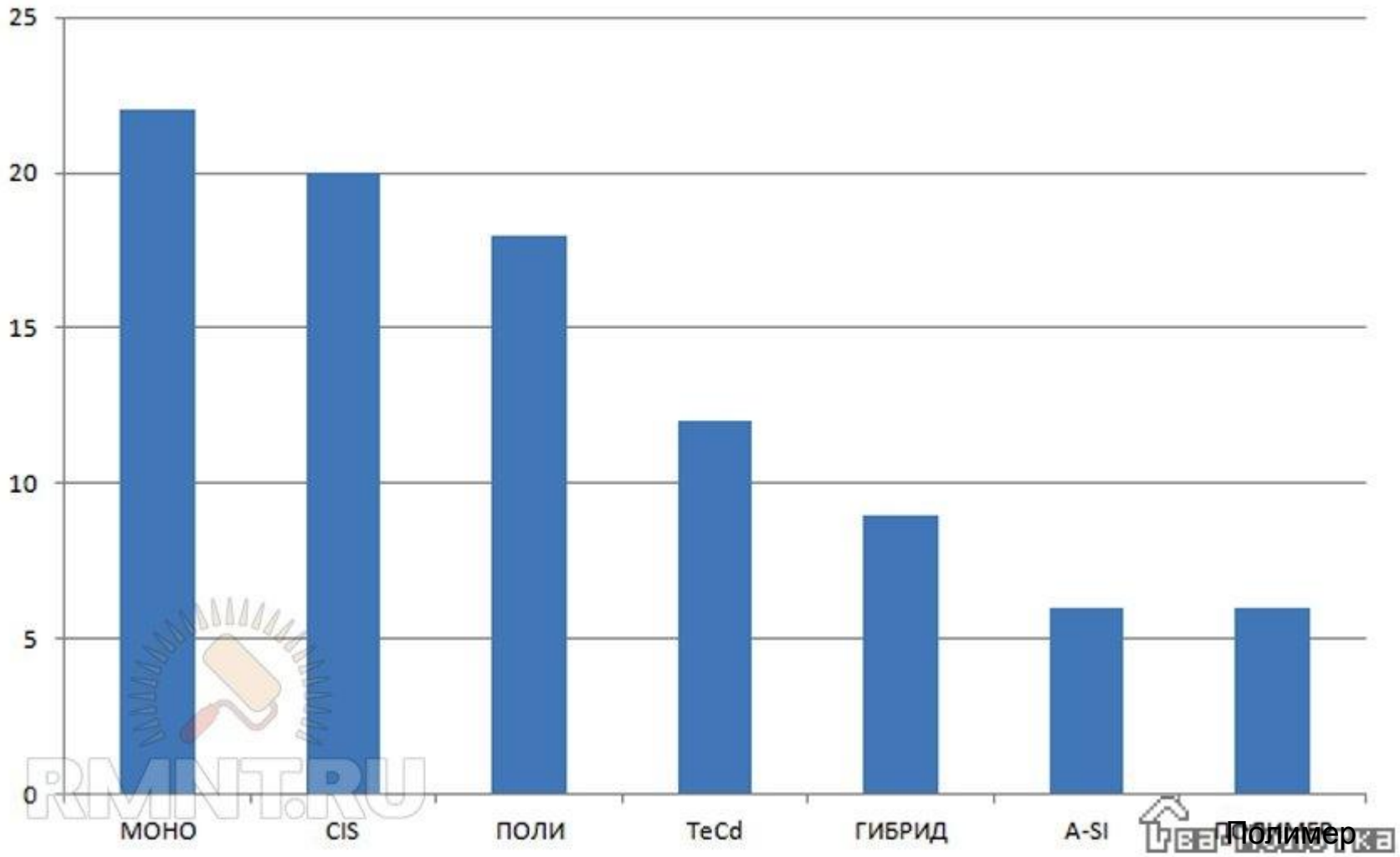
Поликристаллический



Аморфный  
(тонкопленочный)



# КПД, %



## Монокристаллический кремний



Наиболее эффективными и распространенными для широкого потребления являются **монокристаллические кремниевые элементы**.

Для изготовления таких элементов кремний очищается, плавится и кристаллизуется в слитках, от которых отрезают тонкие слои. Внешне монокристаллические элементы выглядят как однотонная поверхность темно-синего или почти черного цвета.

Сквозь кремний проходит сетка из металлических электродов. Эффективность такого элемента составляет от 16 до 19% в стандартных условиях тестирования (прямой солнечный свет, +25 °С).

## Поликристаллический кремний



Технология принципиально не отличается от монокристаллических элементов, но разница состоит в том, что для изготовления используется менее чистый и более дешевый кремний. Внешне это уже не однотонная поверхность, а узор из границ множества кристаллов. Эффективность такого элемента составляет от 14 до 15%. Тем не менее эти панели пользуются примерно такой же популярностью на рынке, что и монокристаллические, поскольку пропорционально эффективности снижается цена производства.

## Тонкопленочные солнечные элементы



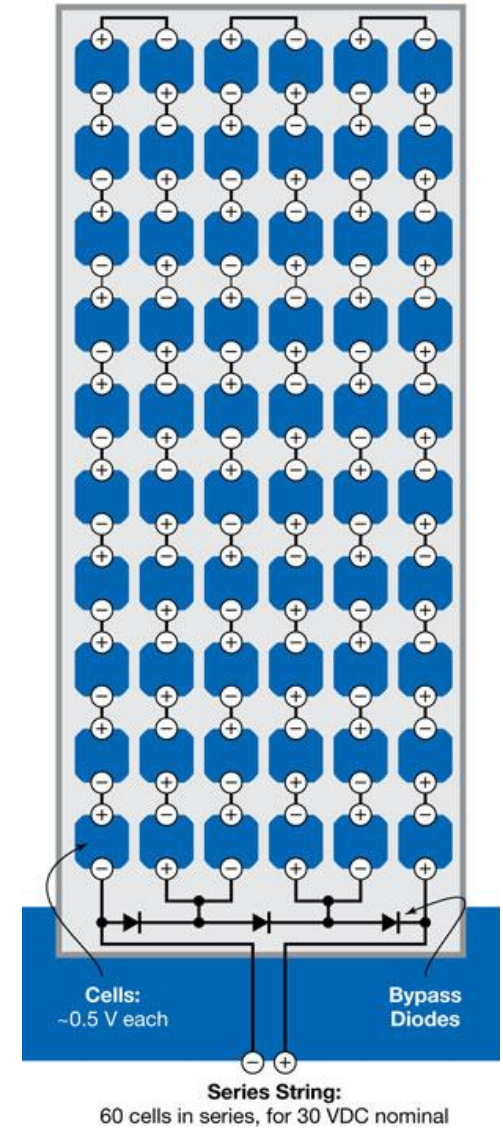
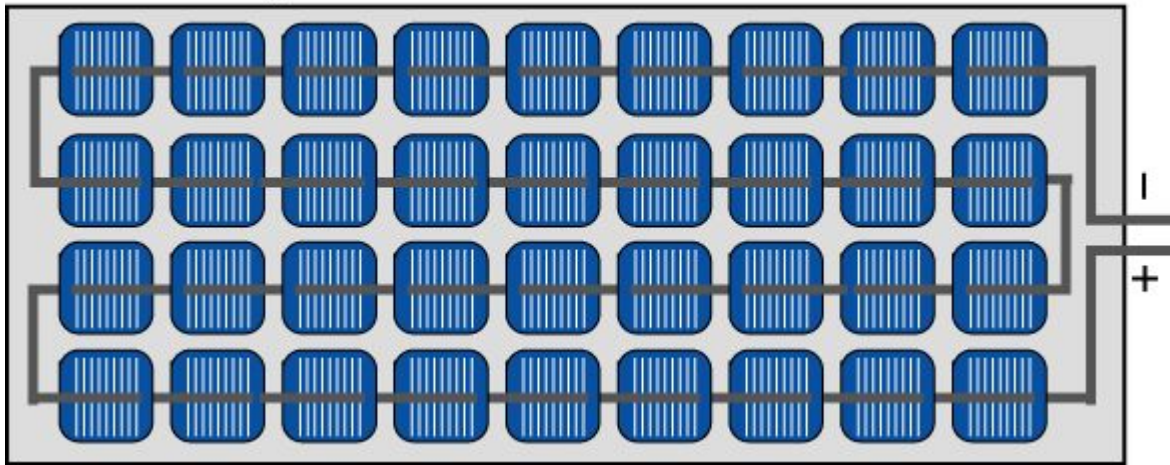
Тонкопленочные солнечные фотоэлектрические элементы могут производиться из разных веществ.

Чаще всего из аморфного кремния. Но также могут быть из медно-галлиевые, теллур-кадмиевые и другие. Тонкопленочные технологии солнечных элементов обладают следующими преимуществами:

- их можно использовать для создания гибких модулей, которые можно складывать или сворачивать, что удобно для поездок, хотя и повышает риск порчи элементов и сокращает срок их службы
- тонкие слои производящего электричество вещества можно наносить на стекло, которое будет прозрачным и в то же время производить энергию, правда количество этой энергии довольно мало и поэтому такое применение мало практично.
- изначально тонкопленочные технологии разрабатывались для удешевления производства солнечных элементов в то время как моно и поли кристаллические элементы были дорогими, но с ростом рынка стоимость производства тонкопленочных модулей оказалась незначительно

# PV Module Wiring

A typical module has 36 cells connected in series



### «Освещение» - 50 Вт

Номинальная мощность солнечной генерации: 50 Вт

Запас энергии: 0,4 кВтч

Пиковая мощность потребления: 300 Вт

Номинальное напряжение системы: 12 В

Маленькая автономная система солнечной энергии, предназначенная главным образом для освещения, а также зарядки телефона, работы радио и т.п.

- Солнечная панель 50 Вт (Опция - панель 100 Вт + 5 тыс. руб.)
- Контроллер заряда
- Инвертер 300 Вт
- Аккумулятор 12В 50Ач

Цена основной комплектации – 19 тыс. руб.



### Мини-системы солнечных батарей

Небольшие системы из одной или нескольких солнечных батарей. Предназначены главным образом для освещения, а также малопотребляющих приборов: зарядки телефонов, ноутбуков, радио и т. п.

- Освещение 60 Вт - 13,6 тыс. руб. (без аккумулятора)
- Дачный 200 Вт - 41 тыс. руб.
- Дачный 2 400 Вт - 78 тыс. руб.

### Малые системы солнечных батарей (для дома)

Системы электроснабжения на солнечных батареях, предназначенные для нормального обеспечения электричеством отдельных объектов: жилых домов, производственных объектов и т.п. Мощность систем зависит от необходимого объема потребления электроэнергии.

- 2 кВт - 370 тыс. руб.
- 4 кВт гибридный солнечно-ветровой - 600 тыс. руб.
- 5 кВт - 812 тыс. руб.
- 7 кВт гибридный солнечно-ветровой - 914 тыс. руб.
- 10 кВт - 1,56 млн. руб.
- 20 кВт - 3,08 млн. руб.