

**Межшкольный биологический центр  
Ганновер**

Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover

Тел.: 0511-168-47665/7

Факс: 0511-168-47352

email: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

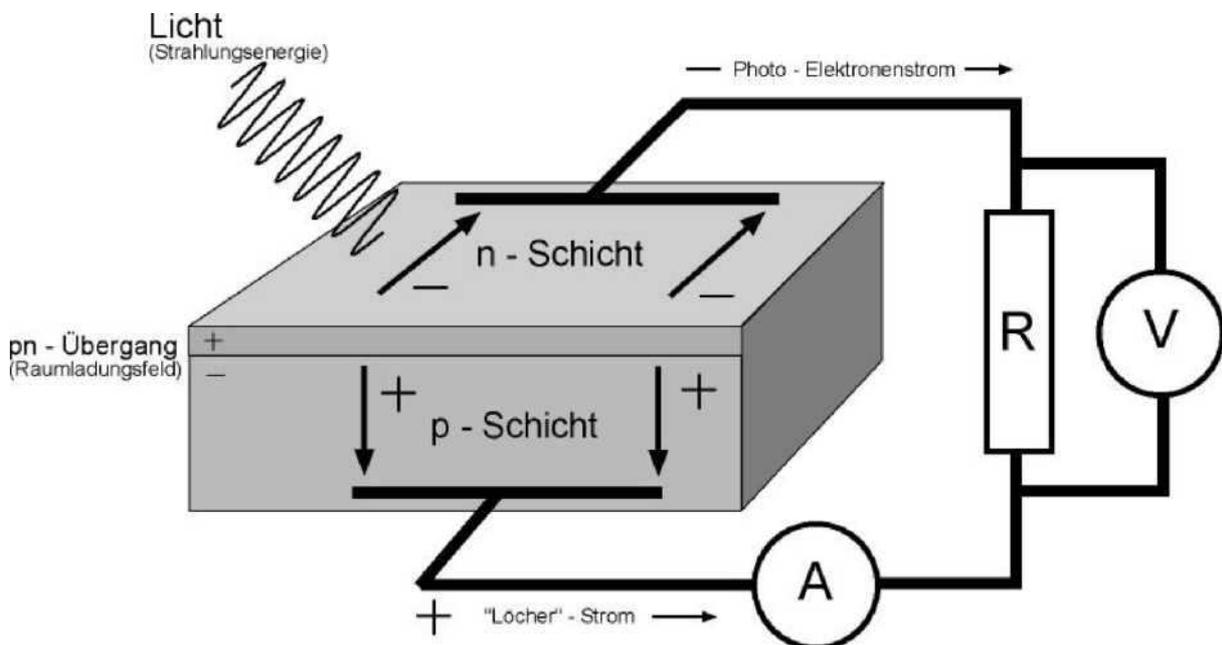
**Учебные проекты о природе и технике**

**19.16**

**Базовая информация**

для кружков и проектных недель:

**Электричество от солнца:**



**Как работает фотоэлемент?**

Фотоэлемент преобразовывает солнечный свет, это значит – энергию солнца, в электрический ток. Фотоэлементы сегодня поставляют энергию для разнообразнейших потребителей. Они, как и раньше, обходятся дорого: преобразованная мощность стоит дорого, исходя из стоимости изготовления элемента. Чтобы понять принцип действия фотоэлемента, нам нужно сначала отправиться в небольшое путешествие к солнцу, чтобы понять физические процессы в центре Солнца и природу электромагнитного излучения. Это не так важно для понимания принципа работы фотоэлемента. Но Солнце – это не только звезда, но и поставщик энергии. Поэтому немного понимания не повредит.

## Термоядерный реактор Солнце и энергия излучения

Электромагнитное излучение является сочетанием электрических и магнитных полей, которые распространяются со скоростью света. Свет является более коротковолновым и при этом более насыщенным энергией собратом излучений, которые создаются рентгеновскими установками, мобильными телефонами, радио- и телепередатчиками, микроволновыми печами и индукционными плитами. Электромагнитное излучение имеет, в зависимости от точки зрения, корпускулярную или волновую природу, что видно при исследовании света специальными приборами.

Солнце, или точнее сказать, его ядро, представляет собой огромный термоядерный реактор, в котором при температуре около 15 миллионов градусов каждый раз четыре ядра водорода превращаются в ядро гелия. Масса получившихся ядер гелия немножко меньше, чем масса четырех ядер водорода. Эта небольшая разница (так называемый дефект массы) преобразовывается по известному соотношению  $E=mc^2$  в энергию. Множитель  $c$  – это скорость света в вакууме. В секунду Солнце теряет таким образом с излучением около 4 млн. тонн своей массы, это значит, оно постоянно становится легче. Это излучение, свет и тепло, является энергетической основой жизни на Земле.

При температуре ядра около 15 миллионов градусов Цельсия возникают внутри Солнца коротковолновое рентгеновское и гамма-излучение. На долгом зигзагообразном пути к поверхности Солнца длина волны становится больше. Это означает для нас то, что излучение теряет свою энергию. Температура на поверхности фотосферы находится в пределах «всего лишь» 6000 К (Кельвин), что соответствует примерно 5700 градусам Цельсия. Большая часть излучения попадает в диапазон 483 нанометров. Это видимая часть спектра, человеческий глаз в ходе эволюции приспособился к этой длине волны и воспринимает ее в зелено-голубом цвете.

То, что достигает нашей планеты, является смесью различных излучений и энергии. Красное, длинноволновое излучение несет нам тепло, «фиолетовые» лучи улучшают кожу, если мы не намажемся кремом от загара.

Солнечный спектр сдвигается из-за воздействия атмосферы в сторону с большей длиной волны: ультрафиолетовое излучение задерживается озоновым слоем, а определенные участки инфракрасного водяным паром и углекислым газом. Атмосфера изменяет качественный состав света.

Диаметр:	1 392 000 км
Масса:	$1,99 \times 10^{33}$ г или 332270 масс Земли
Объем:	$1,412 \times 10^{18}$ км <sup>3</sup> или 1301000-кратный объем Земли
Расстояние до Земли:	147,1 (перигелий) – 152,1 (афелий) млн. км (8,2 световых минут)
Температура поверхности:	около 6000 К или 5700°C
Температура ядра:	около 15 млн. К

### **Некоторые данные о Солнце:**

#### **Сильно упрощенный принцип работы фотоэлемента**

Фотоэлемент состоит из двух разных по толщине слоев из кремния высокой степени очистки. Кремний по характеру своей электрической проводимости относится к изоляторам. Оба слоя под строгим контролем загрязняются (дотируются) небольшим количеством других атомов. Дотированный кремний уже не является изолятором, но все еще и не проводник, как медь. Такие материалы называются полупроводниками.

Принцип действия фотоэлемента (в сильном упрощении) состоит в том, что электроны, которые в виде так называемых валентных электронов отвечают за связь атомов кремния в кристаллическую решетку, возбуждаются попадающим на них солнечным излучением, переходят на более высокий энергетический уровень и могут отделиться от ядра. Оторвавшиеся электроны становятся подвижными и могут теперь переносить электрический заряд. Из изолятора образуется полупроводник.

Заряды (положительный и отрицательный) перемещаются под воздействием электростатических качеств введенных атомов на одну из сторон. Благодаря этому на контактах фотоэлемента возникает электрическое напряжение. С одной стороны переизбыток заряженных частиц (минус), а с другой недостаток (плюс). Если подключить к элементу нагрузку, то между разъемами (от минуса к плюсу) потечет электрический ток, пока будет наблюдаться разность потенциалов. Если фотоэлемент освещать, то разность потенциалов будет и дальше поддерживаться. Благодаря этому появляется электрический ток. Один фотоэлемент может дать около 0,6-0,8 Вольта постоянного напряжения (U).

«Солнечный» ток достигает в зависимости от освещенности элемента 2,5 ампер. Более высокое напряжение получается последовательным включением элементов, а более высокий ток – параллельным. Типичный фотоэлемент сегодня рассчитан на выработку электротока с напряжением в 12 вольт. Напряжение без нагрузки, когда к элементу не подключен потребитель, достигает примерно 17 вольт. Оно падает при подключении нагрузки. Важным показателем является ток короткого замыкания. Он возникает, если положительный и отрицательный полюса напрямую (без какой-либо нагрузки) соединить вместе. Напряжение падает в этом случае до очень низких значений.

Мощность модуля (P в ваттах) исчисляется как произведение напряжения (U в вольтах) и силы тока (I в амперах):  $P = U \times I$ . Это уравнение верно лишь тогда, когда мощность нагрузки и модуля хорошо согласованы друг с другом.

Для углубленного изучения для тех, кто хочет знать больше и имеет физико-химическую подготовку.

### **Проводники, полупроводники и изоляторы**

Электрический ток начинает течь, если носители электрического заряда (электроны) направляются в электрическом поле в определенном направлении. Электрический ток в металлических проводниках базируется на том, что валентные электроны, которые в обычном состоянии отвечают за связь соседствующих атомов, настолько слабо связаны с ядром, что даже обычных тепловых колебаний достаточно, чтобы оторвать большую часть электронов. Внутри кристаллической решетки металла по своей сути находится электронный газ. Если приложить электрическое напряжение, то отрицательно заряженные электроны будут передвигаться от отрицательного к положительному полюсу со средней скоростью в несколько миллиметров в секунду. При этом они будут

Что такое «возбуждение» мы сначала проиллюстрируем на примере простейшего химического элемента, водорода (H). Атом водорода состоит лишь из одного положительно заряженного протона и вращающегося вокруг него электрона. У электрона есть множество орбит с различными энергетическими уровнями. Если электрон встречается с квантом света, то он может (но не обязательно должен) перейти на более «высокую» орбиту. При этом переходе электрон принимает на себя энергию кванта. Если этой энергии недостаточно и не хватает для перехода или же ее больше, чем нужно для единичного перехода на следующий уровень, то электрон перепрыгивает целевой уровень и возвращается на исходную позицию. Энергия излучения, измеренная в электронвольтах возрастает с ростом частоты, меры колебаний кванта.

подталкивать находящиеся перед ними электроны в определенном смысле вперед. Из-за этого скорость распространения электрического тока будет достигать скорости света: если замкнуть выключатель, то лампочка начнет светиться даже без самой маленькой задержки.

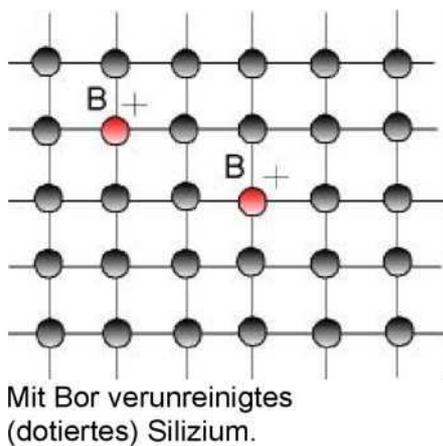
У изоляторов валентные электроны связаны с ядром очень крепко, свободных электронов практически нет. Повышение температуры приводит, правда, к более сильным колебаниям электронов, так что некоторые из электронов срываются со своих орбит. Таким образом, абсолютных изоляторов при возрастающей температуре не бывает.

Одним из таких изоляторов является, например, базовое вещество фотоэлементов: кремний. Это четырехвалентный элемент, это значит, что у него внешняя электронная оболочка включает в себя четыре валентных электрона, но завершенной она была бы при наличии восьми. Отсутствующие электроны перехватываются у соседних атомов. В результате это означает, что каждый из атомов кремния вступает в тесную связь с еще четырьмя атомами. В этом случае абсолютно отсутствуют электроны, которые могли бы свободно передвигаться.

В высокоочищенном состоянии каждый из валентных электронов связан, свободных электронов практически нет, а проводимость стремится к нулю. Что же делает из изолятора полупроводник?

### Кремний дотируется чуждыми атомами

У дотированного фосфором кремния это приводит к тому, что при приложении напряжения к кристаллической решетке этот лишний электрон будет стремиться в сторону положительно заряженного полюса. Отданный электрон является причиной положительного заряда атома. У положительно заряженного протона больше нет



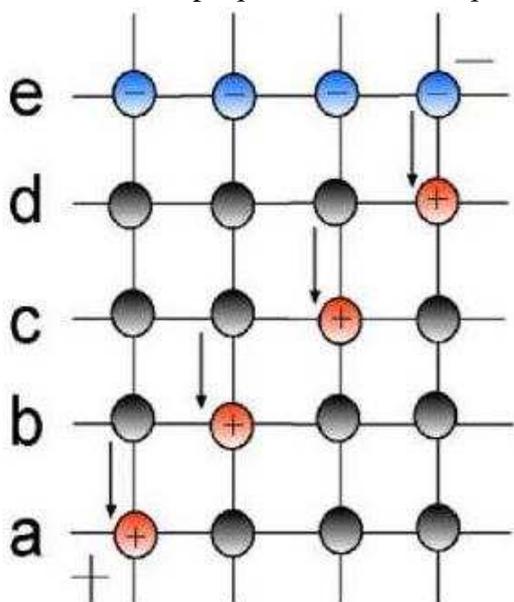
Кремний высокой степени очистки намеренно загрязняется примесями, которые рабочему веществу придают определенную проводимость. Чуждые атомы фосфора или бора вносятся в минимальных количествах. Фосфор является пятивалентным, у него пять валентных электронов. У бора, напротив, только три валентности. Фосфор и бор включаются наряду с атомами кремния в кристаллическую решетку, при этом у фосфора будет один лишний электрон, а у бора будет одного

своего электрона. Таким образом получается «дырка», в которую может попасть другой электрон под действием притяжения лишнего протона. Этот электрон отрывается у соседнего атома кремния. Этот атом в свою очередь лишается на краткое время электрона, получает положительный заряд и спешит воспользоваться электроном своего соседа. И та продолжается дальше. Передвижение электронов в электрическом поле значит то, что материал приобрел проводимость.

Так как электроны несут отрицательный заряд, то речь здесь ведется о n-проводимости. В то же самое время «дырки» (или на более научном языке дефектные электроны) перемещаются в сторону отрицательного полюса. Весь же полупроводник сохраняет свой уравновешенный нейтральный заряд.

Повышение проводимости благодаря дотированию очень высоко. Один пятивалентный атом, помещенный в кристаллическую решетку из 108 атомов кремния, повышает концентрацию свободных электронов в десять раз по сравнению с чистым кремнием.

Дотированный бором кремний проявляет другой тип проводимости и становится p-проводимым материалом. Бор имеет три валентности и вступает в связь с атомами кремния своими тремя валентными электронами. В тетраэдре решетки кремния не хватает в этом случае одного электрона, здесь появляется переизбыток положительного заряда, «дырка». Если мы приложим напряжение, то электрон соседнего атома попадет в эту «дырку». Из-за этого возникает новая дырка, которая заполняется следующим электроном. «Дырки» передвигаются в сторону положительного полюса. При этом весь объем p-проводимого материала остается электрически нейтральным.



Упрощенная схема перемещения дырок и электронов на pn-переходе

очередь отбирает электрон у д4. Эта вакансия восполняется благодаря свободному атому фосфора в отрицательно дотированной части полупроводника. Вдоль горизонтальной оси мы наблюдаем перемещение заряда от а1 до д4 к негативно дотированной области. Электроны при этом перемещаются к позитивно дотированному слою.

В фотоэлементе тонкий слой n-проводящего материала накладывается на слой p-проводящего материала примерно десятикратной толщины. На так называемом p-n-переходе даже в темноте из-за диффузионных процессов наблюдается перемещение электронов и дырок из p-зоны в n-зону и обратно в зависимости от заряда слоя.

Обозначенные красном атомы бора и синим фосфора в дотированной пространственной решетке кремния. Позитивно заряженный бор (а1) отбирает у соседнего нейтрального атома кремния (б1) один электрон, б1 получает из-за этого положительный заряд и отбирает у с3 один электрон, а с3 в свою очередь отбирает электрон у д4. Эта вакансия восполняется благодаря свободному атому фосфора в отрицательно дотированной части полупроводника. Вдоль горизонтальной оси мы наблюдаем перемещение заряда от а1 до д4 к негативно дотированной области. Электроны при этом перемещаются к позитивно дотированному слою.

## **Электроны, дырки и попытка припарковаться:**

Представим себе разрез фотоэлемента как улицу, которая ведет на пляж. Всем хочется припарковать машину как можно ближе к пляжу.

Небольшое количество самых близких к пляжу мест будут, конечно же, самыми привлекательными. Степень привлекательности мест у пляжа и в отдалении соответствую электрическому напряжению. И если кто-то освобождает место, то только для того, чтобы занять расположенное чуть дальше другое. Как только место освобождается, оно тут же будет занято. Автомобили (электроны) двигаются к пляжу, парковочные места (дырки) «передвигаются» благодаря движению автомобилей в обратном направлении. В определенный момент в конце улицы образуется затор (из электронов) в конце улицы, и с ним можно справиться только, если открыть боковые проезды, по которым движение будет идти в обратную сторону. Обратное движение – это течение электротока. Изнуренные водители могут тогда снова искать место для парковки у самого начала дороги.

Инго Меннерих, август 1994

Новое издание с изменениями, март 2005

Винфрид Ноак, переработанное и сокращенное издание, июль 2011