



# Практическа електроника

Част шеста

**Полупроводници.**

**P-N преход. Полупроводникови диоди, видове.**

инж. Б. Чакъров – гр. Лом – 5.3.2018 г.

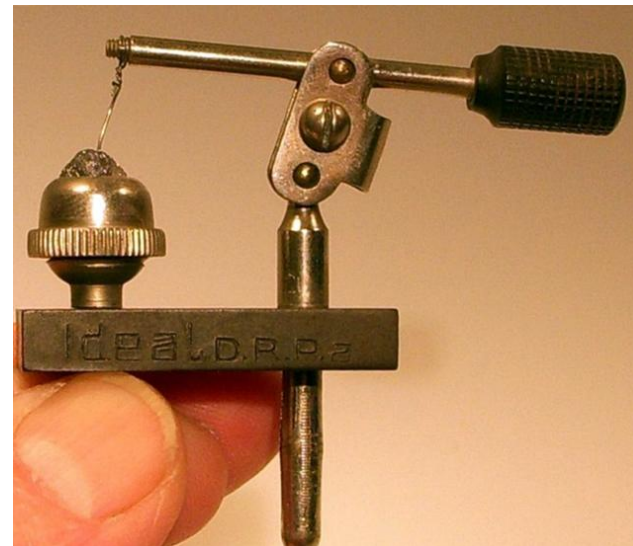
## 1. Полупроводници.

Вероятно си мислите, че преди откриването на полупроводниковите технологии, изобретяването на диодите и транзисторите, хората не са ползвали подобни прибори. Ако мислите така – грешите. В наречената от мен „Лампова ера”, когато цялата електроника е била на базата на вакуумни прибори, а дори и преди нея са откривани странни свойства на някои минерали (галенит, пирит), когато се допре към тях метална игла да пропускат ток само в едната посока, а в другата да го спират. Така е изобретен Кристалният детектор още в 19-ти век.

Изобретяването на вакуумните диоди, генераторни и усилвателни лампи решава проблемите на тогавашната електроника и свойствата на кристалния детектор остават необяснени и непроучени.

Овладейвайки все по-високите радиочестоти, обаче, лампите се оказват все по-непригодни. Затова в средата на 20-ти век започва развитието на полупроводниковите прибори и съответните схеми за тяхната употреба. Всички те са на база на полупроводници - обширна група вещества, които по своята електрическа проводимост заемат средно място между проводниците и изолаторите. Към тях спадат силиций, германий, селен, меден окис, кадмиев сулфит, силициев карбид, галиев арсенид, индиев антимонид, оловен сулфид и др. Основните полупроводници силиций и германий се намират в 4-та група на периодичната система и имат, съответно, четвърта валентност. Останалите споменати вещества не са чисти полупроводници, просто имат такива свойства и се ползват като добавки към чистите полупроводници, за да се получат някои допълнителни свойства.

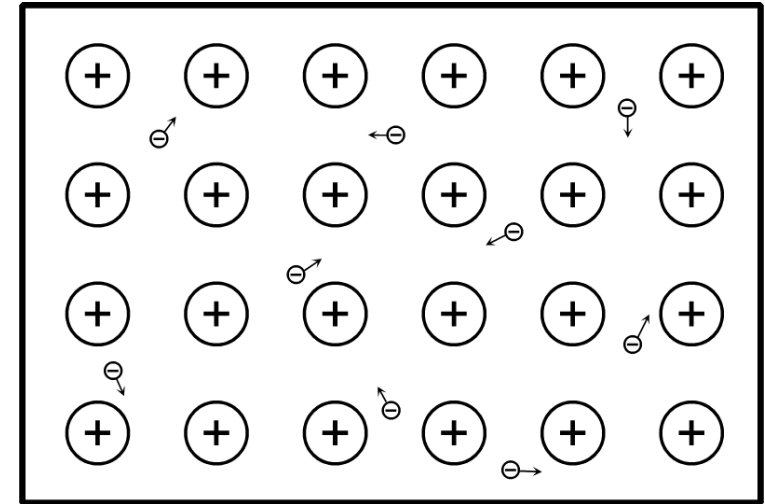
Но няма да се задълбочаваме повече в технологията. За нас е важно да обясним принципа на действие на полупроводниковите прибори. Първите прибори са произвеждани от германий поради по-лесната технология. Той, обаче има някои недостатъци и въпреки по-сложната технология се преминава към разработки на силициеви прибори, които днес са основа на цялата електроника.



Теорията на полупроводниците и преходите и нейната математика са много сложни. Обяснението на физическите им свойства също. Затова ще се опитам да направя едно съвсем опростено обяснение, като в същото време се надявам то да остане научно вярно.

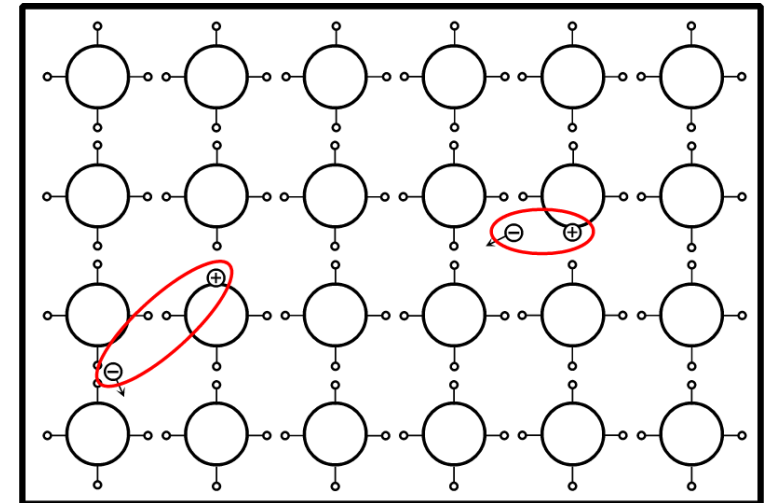
## 1.1. Проводимост на проводниците

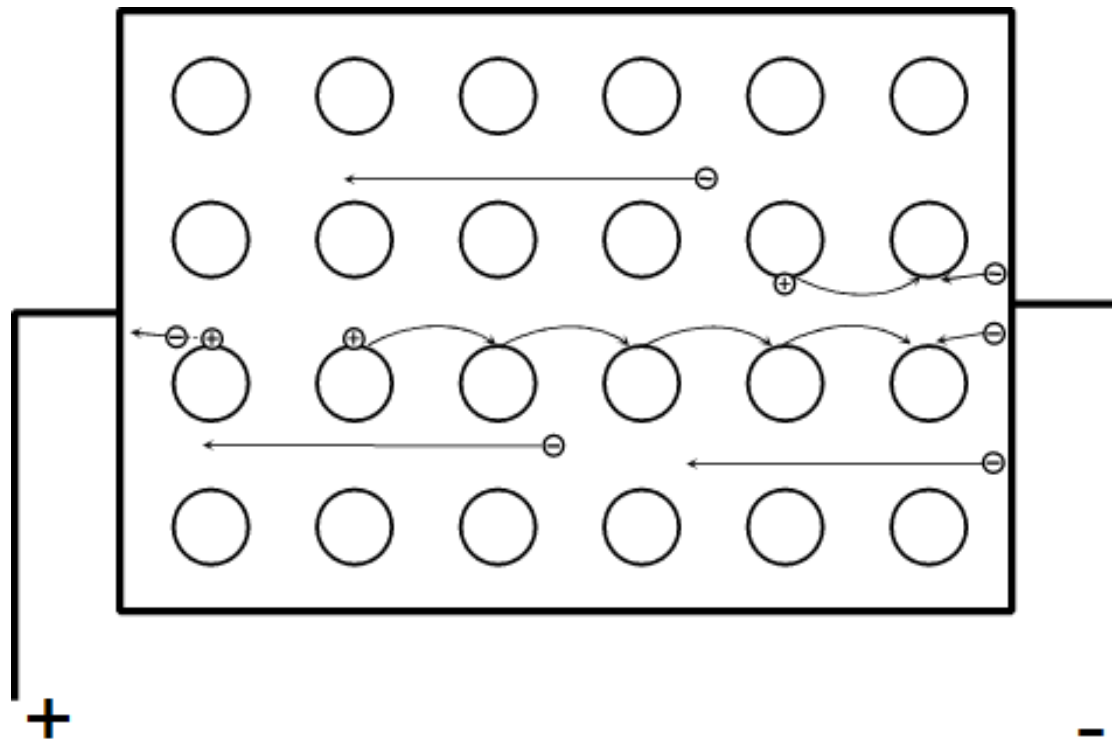
Вижте упростената фигура. Обикновен метален проводник. Имаме атоми и свободни електрони. Повечето от атомите са положително заредени поради загубата на електроните си, но са неподвижни в кристалната решетка на метала. Основните и единствени токоносители са електроните. При подаване на външно напрежение те просто ще започнат да се движат насочено от + към - на захранващия източник.



## 1.2. Проводимост на полупроводниците.

На фигурата виждате схематично представен полупроводников кристал. Четиривалентните атоми са свързани в кристална решетка – всеки с 4 съседни. При температура на абсолютната нула полупроводникът е чист изолатор. Това се случва, само когато кристалът е наистина много чист – без никакви примеси. При стайна температура някои от валентните електрони, в резултат от квантови явления, напускат местата си и стават свободни електрони. Т.е. те стават токоносители и увеличават проводимостта на кристала – той не е вече изолатор. Местата, които електроните са напуснали остават с положителен заряд и са наречени „дупки“. Дупките също са подвижни – електрон от съседен атом може да прескочи на освободеното място, при което дупката се мести в съседния атом. Това означава, че дупките също могат да се приемат за токоносители, но с положителен заряд. Вижте фигура на полупроводников кристал, в краищата на който е подадено напрежение.





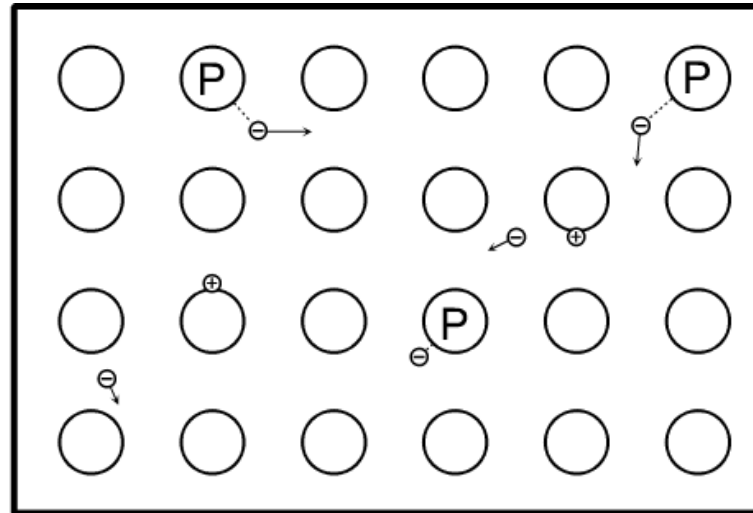
Ток през чист полупроводник.  
 Свободните електрони се движат от - към +.  
 Дупките прескачат от атом към атом от + към - и в края на кристала рекомбинират с електрони идващи от токозахранващия източник.  
 Нови дупки се раждат в другия край на кристала, губейки електрони, които отиват към положителния полюс на източника.

В практиката чистият монокристален силиций след сложна технология по пречистване служи само за основа на полупроводниковите прибори. Истински ценните и интересни свойства силицият придобива, като му се добавят точно определени количества примеси. Главните примеси са обикновено от вещества от III и V валентност.

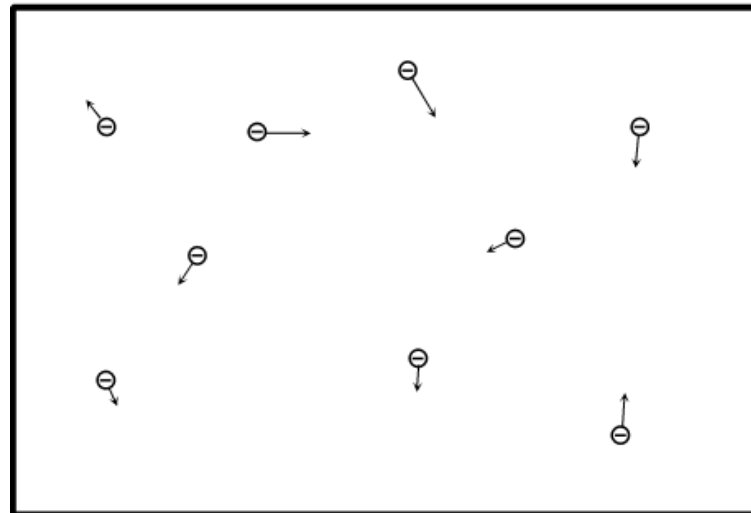
### 1.3. Добавяне на донорни примеси към полупроводник.

Фосфорът е донор от V валентност. Всеки атом фосфор добавя на практика нови свободни електрони, които стават основни токоносителни в полупроводника.

Такъв полупроводник се нарича „полупроводник с електронна проводимост” или „n – полупроводник”



"n" - полупроводник - електронна проводимост



"n" - полупроводник - опростено представяне

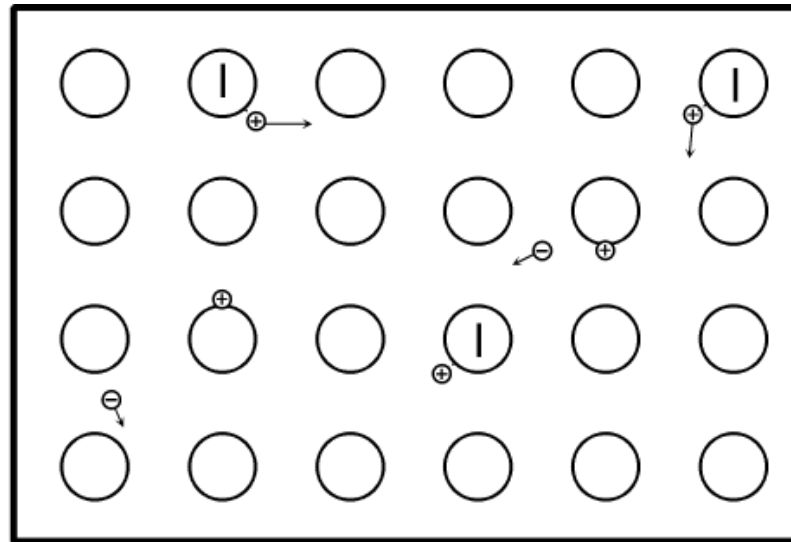
P - атоми фосфор - V валентност  
Фосфорът е донор - добавя свободни електрони в кристала, които стават основни токоносителни за n-полупроводника.

В опростеното представяне не са показани несъществените елементи: атомите, донорите, и дупките, които в този случай се явяват неосновни токоносителни.

## 1.4. Добавяне на акцепторни примеси към полупроводник.

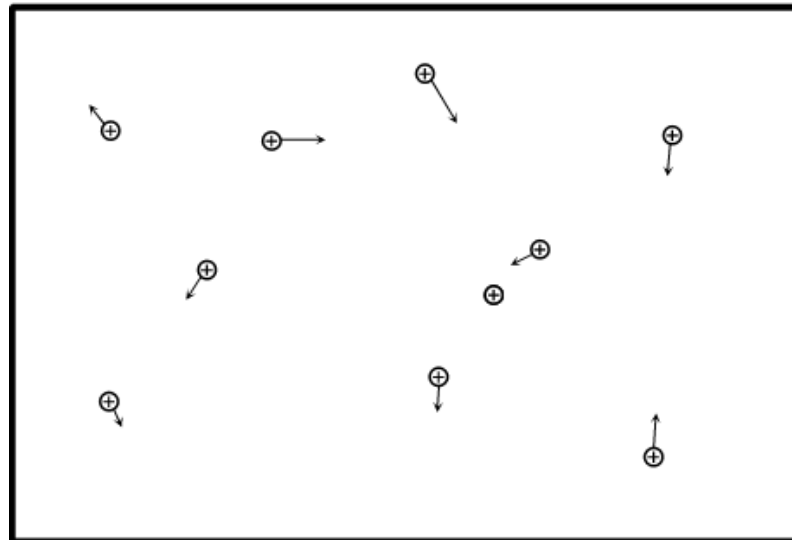
Индият е акцептор от III валентност. Всеки атом индий добавя на практика нови дупки, които стават основни токоносители в полупроводника.

Такъв полупроводник се нарича „полупроводник с дупчеста проводимост“ или „р – полупроводник“



"р" - полупроводник - дупчеста проводимост

I - атоми индий - III валентност  
Индият е акцептор - добавя дупки в кристала, които стават основни токоносители за р-полупроводника.

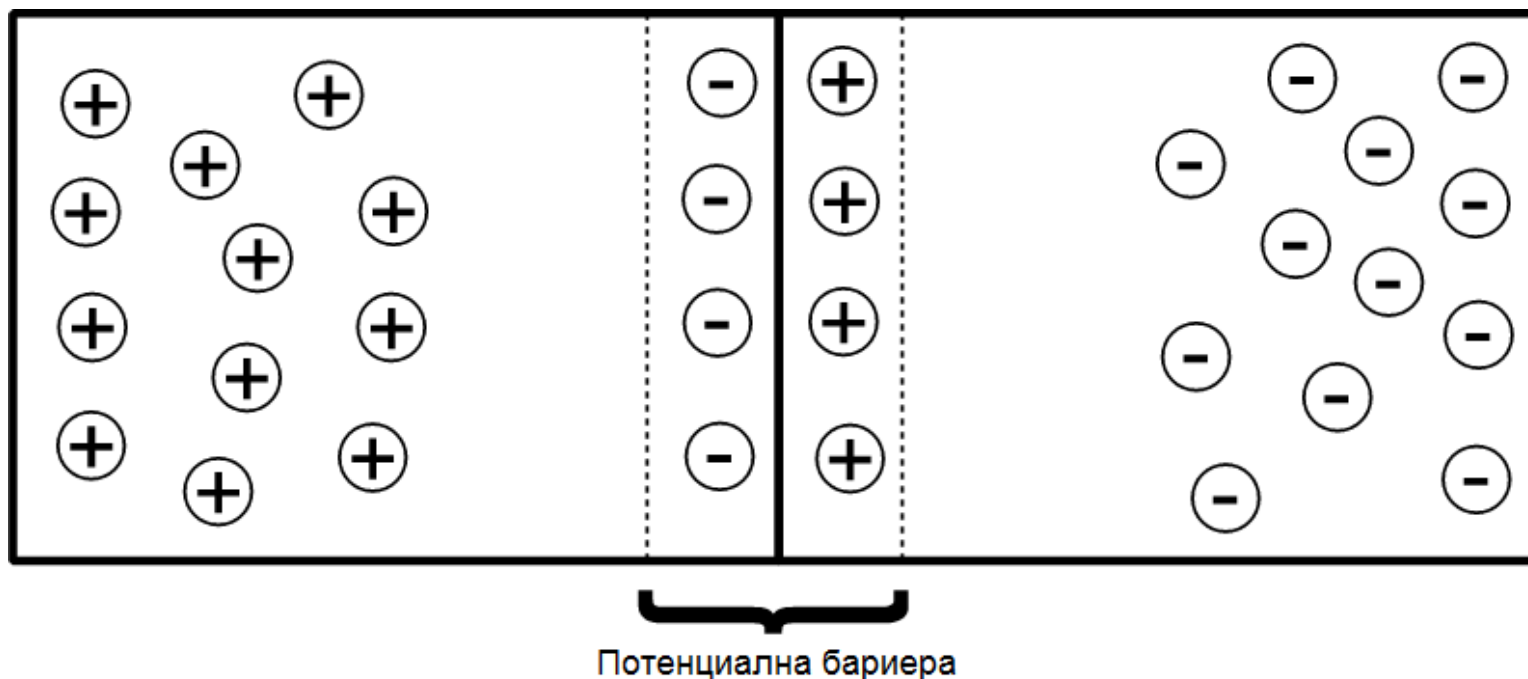


"р" - полупроводник - опростено представяне

В опростеното представяне не са показани несъществените елементи: атомите, акцептора, и електроните, които в този случай се явяват неосновни токоносители.

## 1.5. P-N преход

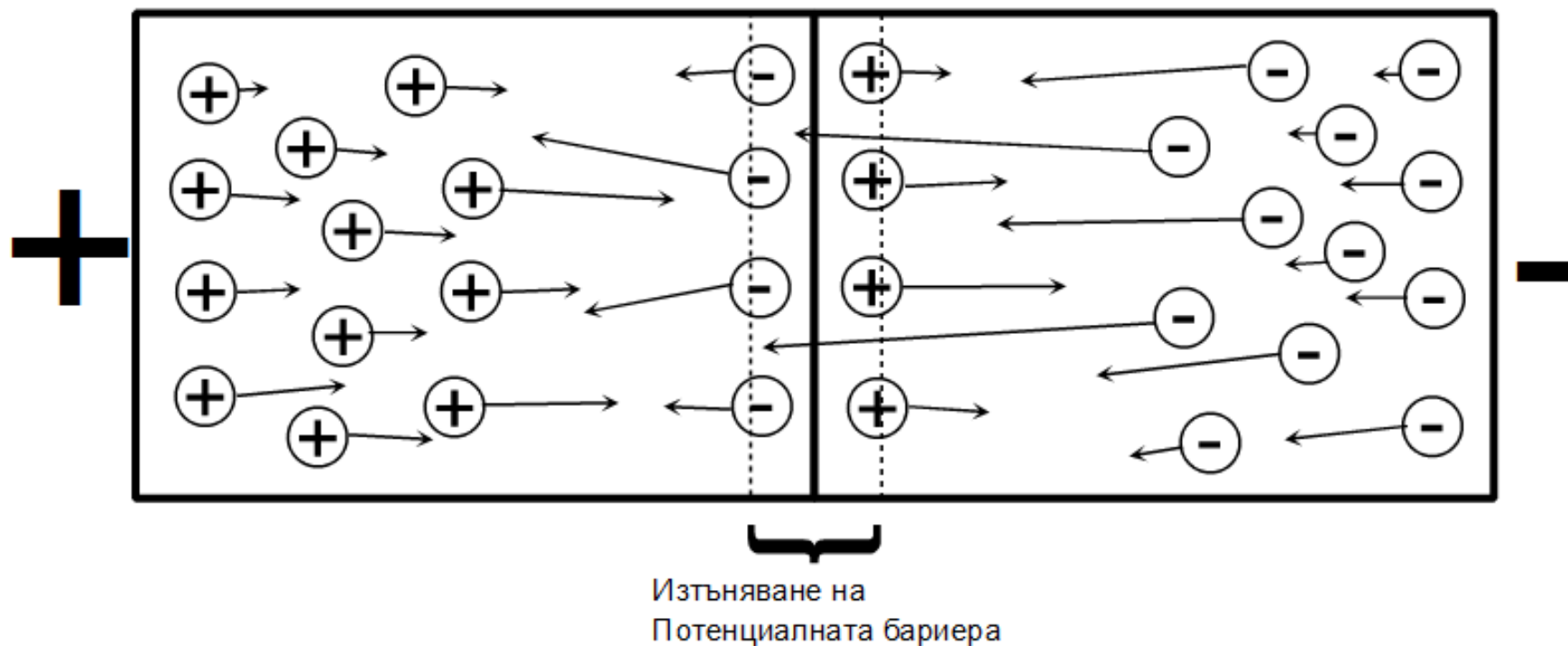
Чрез специални технологии, включително такива наподобяващи заваряване, двата типа кристали с различна проводимост се съединяват един с друг. При това на атомно ниво протичат следните процеси:



Дупки от "р" областта чрез дифузия проникват в "n" областта. Също електрони от "n" проникват в "р" областта. Този процес продължава до достигане на равновесие и създаване на потенциална бариера, която предотвратява по нататъшна дифузия.

## 1.6. Поляризиране на р-п прехода в права посока:

### Поляризиране на р-п преход в права посока

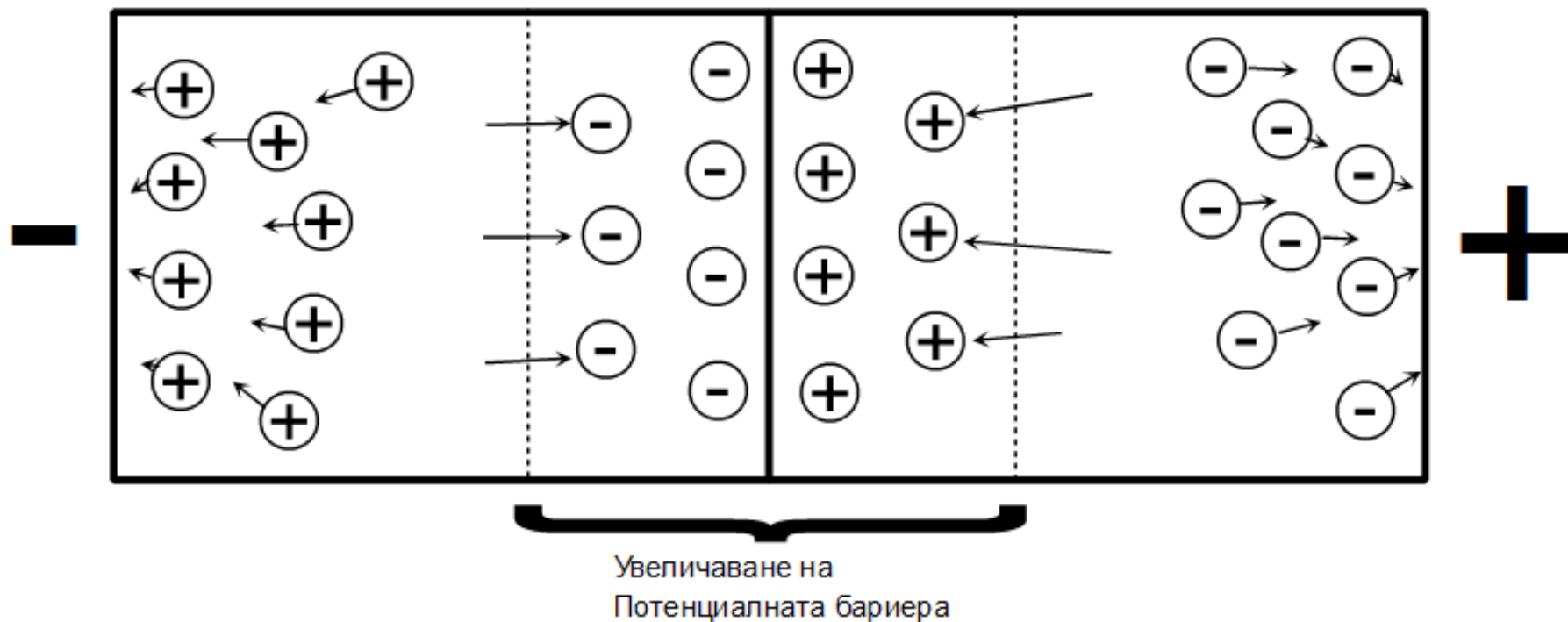


При подаване на напрежение от "р" към "n" областта електроните и дупките от дифузната област (зоната на потенциалната бариера) започват да рекомбинират и да се движат към съответните полюси на захранването. Това води до намаляване и изчезване на потенциалната бариера и протичане на ток..



## 1.7. Поляризиране на р-п прехода в обратна посока:

### Поляризиране на р-п преход в обратна посока



Дупките от "р" областта се придвижват към отрицателния полюс на източника, при което освобождават електрони, които се натрупват в зоната на потенциалната бариера и я уголемяват. Същият процес протича и в "n" областта. Увеличава се концентрацията на дупки до прехода. Уголемената потенциална бариера възпрепятства всякакво по-нататъшно насочено движение на токоносителите - ток не протича.

## 2. Полупроводников диод

На фигурата виждате няколко стари диоди и условният знак за диод по статия стандарт – със запълнена вътрешност на триъгърничето.

Отдолу има снимка на съвременен изправителен диод и условното обозначение по новия стандарт.



Съвременен диод -  
маркировка и означение

### 2.1. Волтамперна характеристика на изправителен диод

Идеалният диод пропуска ток в права посока с нулево съпротивление, а в обратна посока е идеален изолатор – не пропуска никакви токове.

На практика, в резултат от полупроводниковата технология и квантовите явления в кристала реалният диод има някои особености и гранични токови и напреженови характеристики.

$U_{R\max}$  – максимално-допустимо напрежение в обратна посока. Не бива да включвате диоди във вериги с по-голямо напрежение от това.

$I_R$  – обратен ток – ток на утечка в обратна посока – дължи се на квантови и други явления в кристала, които позволяват на токоносители все пак да преминат през широката бариера. Той е от порядъка на няколко наноампера за силициевите диоди. При германиевите диоди може да достигне няколко микроампера.



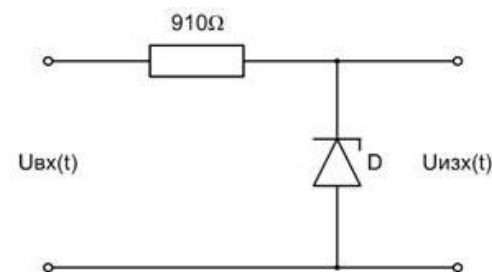
$U_F$  – Максимално напрежение в права посока, при което през диода тече максимално-допустимия ток -  $I_{Fmax}$ , над който преходът ще се повреди. Напрежението в права посока е фактически падът на напрежение върху диода в работен режим и е до около 1 волт. Токът в права посока е работният ток на диода и за маломощните диоди е няколкостотин милиампера до 1 ампер, а мощните могат да работят с токове до стотици амperi.

Много е важно да разберете параметъра  $U_0$  – това е началното напрежение, при което диодът се „отпушва”. За германиевите диоди стойността е около 0,2 волта. За силициевите тя е около 0,6 волта. Физическият смисъл на това напрежение е, че то е нужно за да бъде преодоляна потенциалната бариера, да стане тя толкова тънка, че токоносителите да започнат да преминават през нея. Това начално напрежение, също така означава, че НЕ МОЖЕТЕ да изправяте сигнали с напрежение под 0,6 волта със силициев диод. Означава също, че във верига, в която ползвате диод трябва да предвидите, че върху него ще падне част от напрежението – тези 0,6 волта.

## 2.2. Видове диоди

**2.2.1. Изправителни диоди** – тези, които разгледахме току що. Ползват се за изправяне на променливи токове, защита на уреди от погрешно включване на захранването, температурни датчици (напрежението им в права посока зависи от температурата) и други.

**2.2.2. Ценеров диод** – произвежда се по особена технология, която му позволява при превишаване на максимално-допустимото обратно напрежение да не се повреди, а да получи обратим пробив. Това го прави идеален за стабилизиране на напрежения, затова второто му име е силициев стабилитрон. Стабилитрони се произвеждат за напрежения от няколко до няколко десетки волта.



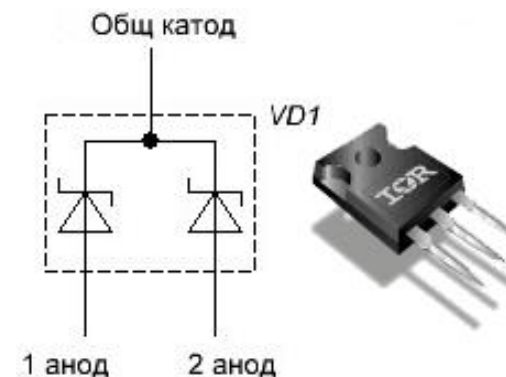
Фиг.10

Условно означение и типична схема на включване на ценеров диод

### 2.2.3. Често напоследък се ползват т.нар. „Шотки диоди” или „Диод на Шотки”.

Те се изготвят по технология метал-полупроводник (а не полупроводник-полупроводник), което им позволява драстично да повишат скоростта си на превключване, което ги прави много подходящи за цифрови и импулсни схеми и приложения.

На фигурата виждате два шотки диода в един корпус.



### 2.2.4. Тунелни диоди.

Имат особена част от характеристиката си „с отрицателно динамично съпротивление”, което позволява да се използват за генериране на променливи напрежения и токове.



### 2.2.5. Варикапи.

Името идва от varу – промяна и сар – съкратено от кондензатор. С две думи това са диоди с пренастройваем кондензатор. Ма какъв кондензатор? В Диода!? Погледнете упростената схема на р-п прехода. Не прилича ли на кондензатор? Две проводими плочи и между тях изолираща потенциална бариера. Варикапът се поляризира (включва) в обратна посока. В съответствие с формулата за изчисляване на кондензатор, колкото по близо един до друг са електродите, толкова по-голям е кондензаторът, а колкото по-отдалечени са – толкова е по-малък. Увеличавайки напрежението в обратна посока на р-п прехода потенциалната бариера се разширява – т.е. плочите на кондензатора се раздалечават – кондензаторът намалява. По този начин варикапите могат да регулират кондензатори от няколко до няколко десетки пикофаради.



### 2.2.6. Тиристор – управляем диод.

Тиристорите са специални диоди с няколко p-n прехода и три електрода. Допълнителният електрод е управляващ. Ако на него не е подадено напрежение диодът е запушен, дори да е поляризиран в права посока.

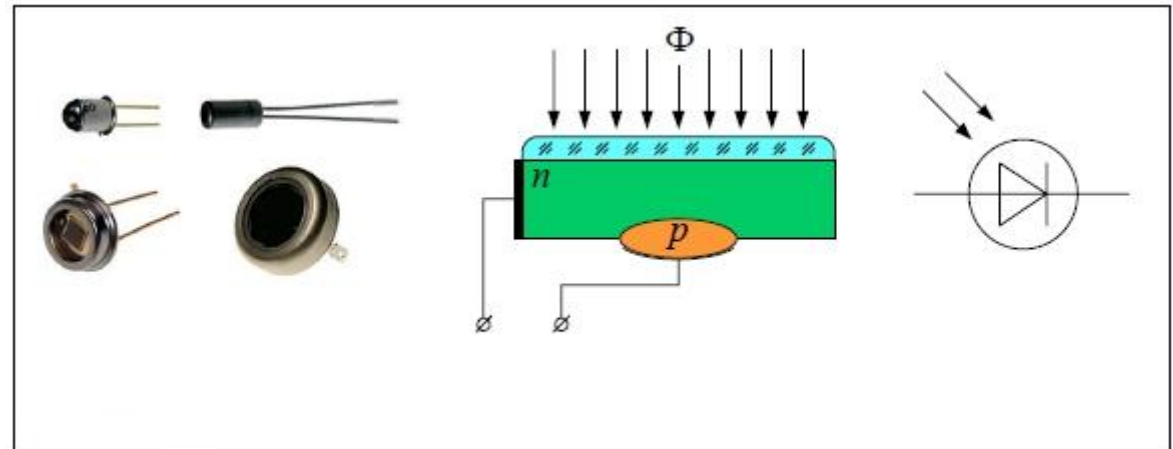
При подаване на напрежение на управляващия електрод диодът се отпушва и управлява многократно по-голям ток от този, който го е отпушил.



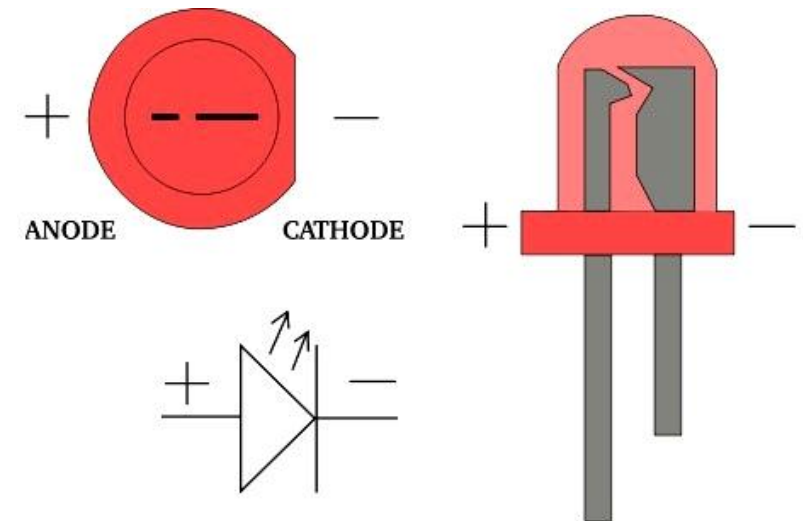
На база на тиристорите днес има огромно разнообразие от подобни, управляеми устройства, с чиято помощ с нищожни управляващи токове и напрежения могат да се включват и изключват киловатови консуматори. На подобен принцип са и твърдотелните релета, които споменах в другите лекции, в които с помощта на светодиод, захранен с няколко милиампера от Ардуиното можем да включваме и изключваме нагреватели до няколко десетки киловати.

### 2.2.7. Фотодиод – диод, управляван от светлина.

Може да се ползва като датчик за светлина. Работи на принципа на полупроводниковия фотоефект, на който работят и фотосоларните панели. Фотоните на светлината предизвикват раждането на токоносителни и тяхната поляризация към двата електрода на диода – при което се появява напрежение между двата извода. Фотодиодите могат да реагират на различни видове светлина – видима с различен цвят или бяла, и невидима – инфрачервена и ултравиолетова.



**2.2.8. Светодиод** – обратното на фотодиода – протичането на ток в права посока предизвиква светенето на полупроводниковите преходи в кристала. Обикновено светодиодите се правят от различни материали – не от чист силиций, и от тях зависи цветът на светене. Преди 20 години достъпни бяха само червен, жълт, зелен и инфрачервен светодиоди. Днес вече имаме и син, бял и ултравиолетов, с които покриваме целия видим и невидим спектър на светлината. Разновидност на светодиодите са и полупроводниковите лазери. Днес всеки може да има такъв в джоба си, но само преди 30-40 години това звучеше като все едно да си имаш адронен колайдер. Огромни лазерни съоръжения имаха само най-богатите световни лаборатории.



**2.2.9. Точков диод.** И накрая на този урок да се върнем към кристалния детектор, с който започнахме в началото. Съвременният му аналог е така нареченият „точков диод“ по името на технологията за производството му. Взема се кристал с n-проводимост, и към него в една точка се споява игла. Между иглата и кристала се образува малка зона с p-проводимост и съответно p-n преход. Тези диоди са маломощни, обикновено германиеви и могат да изправят малки сигнали. Те се ползват основно като детектори в радиоприемните устройства. Най-простият детекторен приемник се състои от само един такъв диод като активен елемент (няма транзистори, няма интегрални схеми).



Това, разбира се, не са всички видове диоди и прибори с p-n преход. Но е добро начало. На база на полупроводниците съществуват още множество прибори и датчици, като например датчика на Хол, който е чувствителен към магнитни полета. Важното е, когато попаднете на нещо интересно – да го разучите подробно; днес, благодарение на Интернет, това става все по-лесно.

Източник и препоръчвана литература: Шишков А., Първи стъпки в радиоелектрониката.