

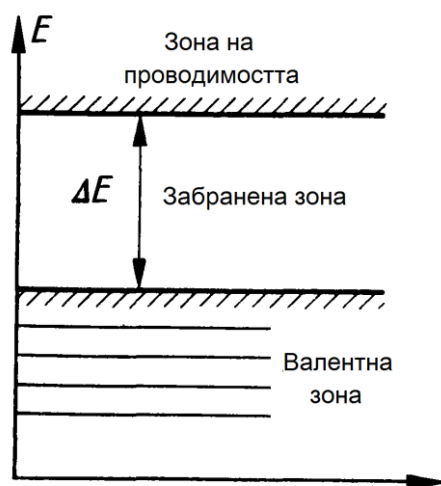
Полупроводниковите материали имат удивителни свойства, позволяващи създаването на разнообразни прибори за решаването на важни задачи в редица области на електронната и други техники. Най-голям практически интерес представляват полупроводниковите диоди, транзистори и оптоелектронни полупроводникови прибори, използвани в генериращите, усилващите, ключовите и квантовите електронни аналогови и цифрови системи.

Полупроводниковите прибори се характеризират с икономичност, дълговечност, висок КПД, малки размери, висока отдаваемост на полезна мощност. Те имат сравнително ниски входни и изходни съпротивления, относително малки толеранси на основните параметри при прибори от една и съща партида и влошаващи се показатели с повишение на работните честоти и температурата.

Ако описанието на процесите при вакуумните прибори (електронните лампи) трябва да бъде започнато с описание на тока във вакуум, то описанието на полупроводниците трябва да бъде започнато с физическото описание на тока в твърди тела. Съвременната физика, изучаваща явленията в микросвета, е установила, че произволни значения на енергийния си заряд могат да имат само изолирани частици. Ако един електрон е част от един атом, той вече може да има само твърдо определени дискретни енергийни нива. Колкото по-близо до ядрото преминава орбитата на електрона, толкова е по-малка неговата енергия. Тя може да се измени с определена стойност само при прехода на електрона на друга орбита.

Ако на електрон се придаде някаква порция енергия, той ще премине на по-отдалечена от ядрото *орбита*, където ще съхранява присъщата ѝ енергия. Ако на електрона се придаде още-повече енергия, например чрез нагряване на тялото или чрез облъчването му с мощен източник на електромагнитно излъчване, той може да преодолее притегателната сила на ядрото, да напусне атома и да премине в *свободно състояние*. В последния случай казваме, че електрона е преминал от свързано състояние в *зоната на проводимост*.

На външните слоеве на атомите се намират най-слабо свързаните с ядрото електрони, които най-лесно преминават към други атоми, като по този начин определят способността на дадения атом да *встъпва в химически реакции*. Броя на тези електрони определя т.нар. *валентност* на атома и по тази причина заеманите от тях нива наричаме *валентни*.



Схематичното разположение на енергитчните нива на електроните в атома може да видите на изображението в ляво. Разликата между най-енергичния електрон и този, който напуска атома (ΔE), наричаме забранена енергийна зона, тъй като в атома няма електрони, които биха имали енергийно ниво в този интервал. С други думи, за да може атом да премине от валентната зона в зоната на проводимостта трябва да му бъде придадена енергия E , превишаваща ширината на забранената зона ΔE .

Наборът от дискретни стойности на енергията в атомите се определя от взаимодействието на електроните с ядро на друг изолиран атом. Ако атомът участва в структурата на кристална решетка на твърдо тяло, то той и всички изграждащи го частици изпитват взаимодействието на *цял ансамбъл от окръжаващи ги други частици*. Всяко от тези взаимодействия води до образуването на нови разрешени дискретни енергийни нива в нашия атом, като броят им рязко нараства. Практически сливайки се, енергитчните нива образуват плътни *зони*. За самите тела можем качествено да ги разделим така, както и в самия атом, на *валентна, забранена и зона на проводимостта*.

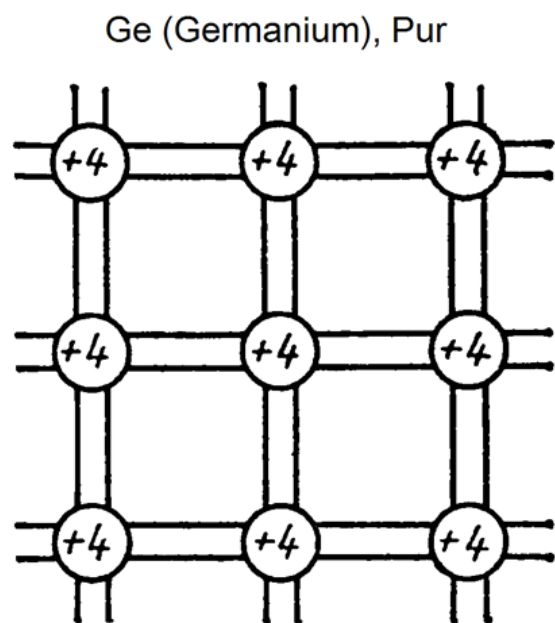
При металите забранената зона е толкова малка, че даже при нормални температури, електроните могат да преминават в зоната на проводимостта. Под действието на електрическо поле те могат да започнат *насочено движение*, което определя и проводимостта на металите.

При диелектриците (изолаторите), удържащото действие на атомните ядра е толкова силно, че забранената зона е много широка. Това определя отсъствието на проводимост при нормални условия. Ако обаче получат голяма порция енергия, валентните атоми на диелектрика могат да създадат електронен поток, какъвто например наблюдаваме при пробивите в изолациите при твърде високи напрежения.

При веществата, наречени *полупроводници*, енергитчните нива също се характеризират с наличието на *забранена зона*, но нейната широчна ΔE е по-малка, от колкото е при диелектриците – най-много до един електрон-волт (eV). Даже при стайна температура (около 300°K) част от електроните преминават в зоната на проводимост и през полупроводниците може да протича ток. В случай на загуба на енергия, например при охлаждане, електронът може да премине обратно във валентната зона и да престане

да участва в проводимостта на веществото. Това означава, че с понижаване на температурата проводимостта на полупроводниците намалява и *тяхното съпротивление се увеличава*. По това полупроводниците се отличават от металите. В технологията на полупроводниковите прибори основно се използват германий (Ge), силиций (Si), галиев арсенид (GaAs), галиев нитрид (GaN), силициев карбид (SiC) и др.

Германий (Ge) е елемент с последователен номер 32 от четвърта група по таблицата на Дмитрий Менделеев, притежаващ *четири валентни електрона в атома*. Останалите 28 електрона са здраво свързани с ядрото и имат твърде ниски енергитични нива, за да участват в реакции. Структурата на германия (както и на силиция) е кристална. Атомите са разположени по върховете на правилни геометрични фигури и образуват кристална решетка.

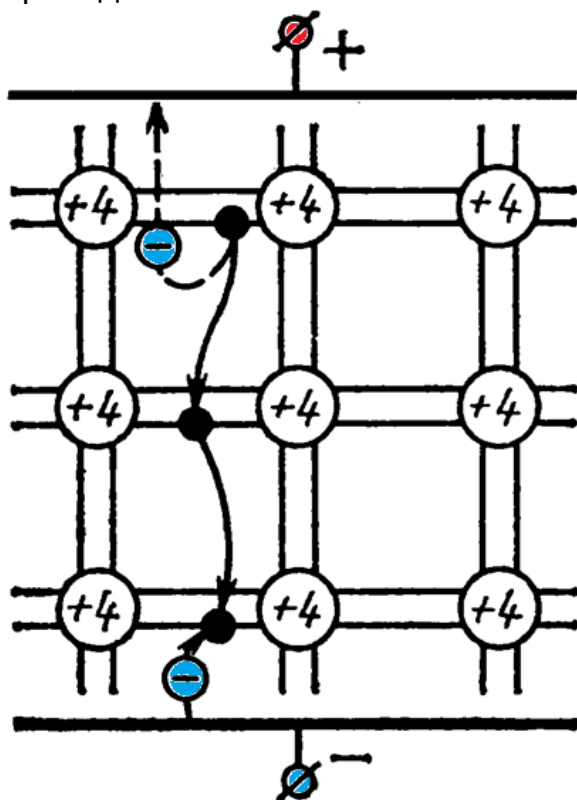


На фигурата атомите условно са представени като кръгчета, в които е упомената тяхната валентност. Валентните връзки са показани с линии между атомите. Всяка от връзките се осъществява от *ковалентни* електрони, по един от двата атома. Физически ковалентната връзка може да се представи като въртене по обвивни криви, общи за ядрата на двата атома. Тази структура с налични всички връзки между атомите се отнася само за *чистия* германий, който не съдържа примеси

при температура от 0°K (абсолютна нула).

Разкъсването на ковалентните връзки в кристалите е възможно. Една от причините за това може да бъде топлината – нагряване на полупроводника, усилващо колебанието на атомите около точките на равновесие в кристалната решетка. С получаването на порция енергия отвън, електроните могат да преодолеят силата на привличане от ядрата на атомите и да започнат хаотично движение в обема на кристалната решетка. Такива електрони наричаме *електрони на проводимостта* (за разлика от *свободните електрони* във вакуум). Ако в този момент към кристала приложим външно напрежение, електроните ще придобият момент на силата по посока обратна на силовите линии на външното поле, създавайки ток в полупроводника и източника. Това ще бъде собствената

проводимост на полупроводника за сметка на електроните на проводимостта.



Но ако има нарушение на валентните връзки и в даден атом остане незапълнена електронна орбита, този атом ще добие положителен заряд, равен по абсолютно значение на заряда на изгубения електрон. Този положителен заряд, обусловен от липса на електрон, е прието да наричаме *дупка*. Това състояние на атома е много неустойчиво. На мястото на дупката може да премине електрон от съседен атом, като положителния заряд бъде компенсиран. Но в съседния атом, на мястото на липсващия електрон ще се образува нов положителен заряд, нова дупка. Това означава, че дупките са *способни да се местят*.

Под действието на външно електрическо поле дупките ще се местят по посока на външните силови линии, от положителния полюс на източника към отрицателния. Такова движение обуславя *дупчестия ток*.

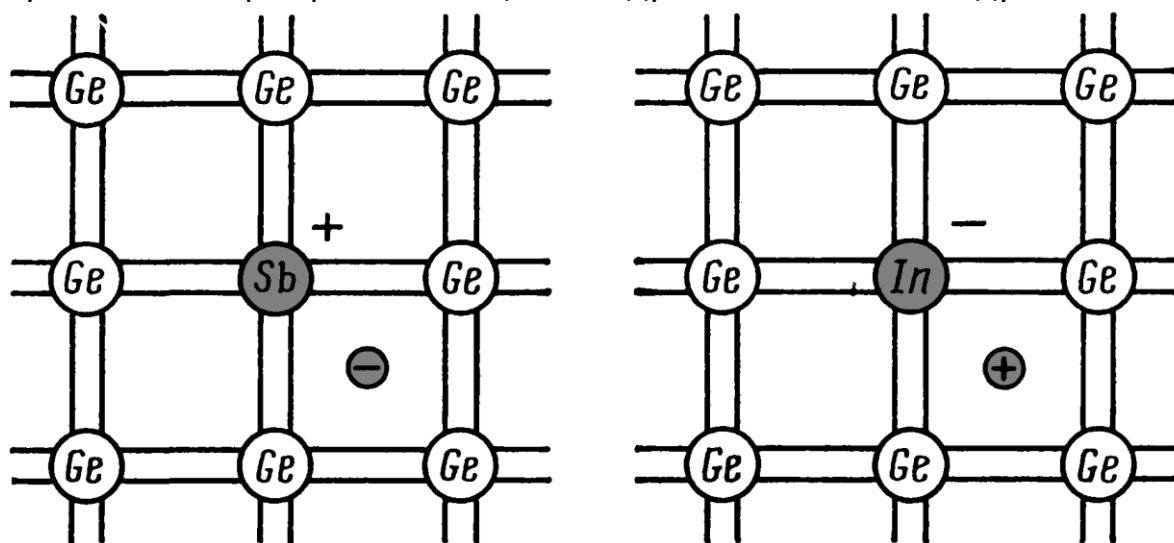
Токът през полупроводника, който би бил индициран от амперметър във веригата на външния източник, е равен на сумата от двата тока – на собствената проводимост и дупчестия. Именно в това се крие основната разлика между тока в полупроводниците и електронния ток във вакуум. Но не следва да забравяме две обстоятелства – на първо място, по същество *и двата тока* в полупроводника са *електронни* по своето естество; на второ място, дупките имат *малка подвижност*, поради факта, че се придвижват от атом на атом, а не напърно между електродите на външния източник, поради което *дупчестия ток е само малка част от общия ток* през полупроводника.

Броят на електроните на проводимостта и дупките е равен в чистия полупроводник, като заедно с възникването на *чифт носители на заряд* (т.е. електрон и дупка), произтича и тяхната *рекомбинация* в неутрални атоми. Следователно и концентрацията на носителите на заряд, или кличеството им в 1cm^{-3} , е еднаква за електроните и дупките – $n_i = p_i$, като тук с *n* (*negative*) и *p* (*positive*) обозначаваме двата вида заряди. Индексът *i* ни подсказва, че става дума за чист (*ideal*) полупроводников материал.

За германия например, тази концентрация при стайна температура е около 10^{13} cm^{-3} .

Такива са свойствата на собствената проводимост на полупроводниците. Общо взето тя е незначителна. За увеличаване на тока в чистите полупроводници се *въвеждат примеси*. Атомите на примесите заместват малка част от атомите на полупроводника в кристалната решетка и *съществено* изменят неговите свойства.

Ако като примес към германия въведем елемент от *пета* валентност (антимон (Sb), арсен (As), фосфор (P)), то 4 електрона от примесния атом ще създадат ковалентни връзки с 4 електрона на съседни германиеви атоми, а петия електрон ще се окаже излишен. Той може лесно да се отдели от своя атом и да стане електрон на проводимостта, а атомът му да се превърне в *положителен йон*. Това означава, че петвалентния примес рязко увеличава концентрацията на *n* токоносители, поради което го наричаме *донор* (отдаващ електрони), а самия полупроводник – от *n-тип*. Концентрацията на дупки *p* намалява толкова пъти, колкото се увеличава концентрацията на електрони *n*, така че $np = n_i^2 = p_i^2$. Намаляването на броя на дупките се обяснява с факта, че с повишаване на броя електрони, се увеличава и броя рекомбинации между тях и незапълнени дупки.



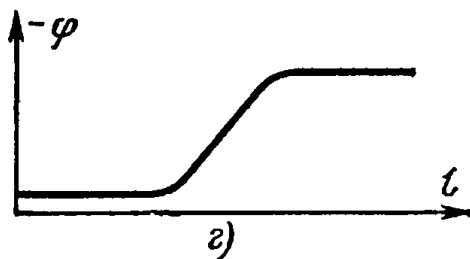
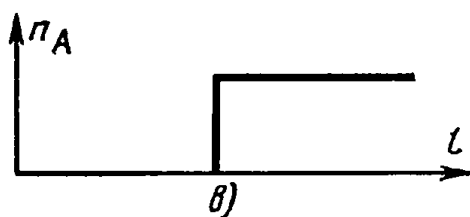
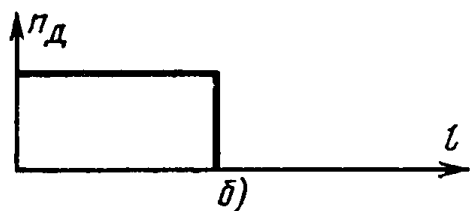
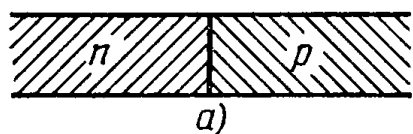
В случай, че въведем като примес елемент от *трета* валентност (индий (In), алуминий (Al), галий (Ga), бор (B)), то свойствата на монокристала (чистия кристал) ще се изменят в обратна посока. Атомите на примесите ще влезнат в три валентни връзки със съседни атоми на германия. За четвъртата връзка няма да има наличен електрон. Тогава се разкъсва една от валентните връзки на съседен германиев атом и се запълват всички връзки на примесите, който се превръща в *отрицателен йон*, а в германиевата структура се образува дупка. По тази причина тривалентния примес увеличава концентрацията на дупки и се нарича *акцептор* (отнемащ електрони), а самия полупроводник – от *p-тип*.

В него основните токоносители са дупките, а неосновните – електроните. Концентрацията на дупки се увеличава толкова пъти, колкото намалява концентрацията на електрони, като горната формула остава в сила.

Концентрацията на примесите трябва да бъде *милиарди пъти* по-малка от броя атоми на основното вещество. Получаването на чисти полупроводници и въвеждането на примеси в тях е сериозна технологична задача.

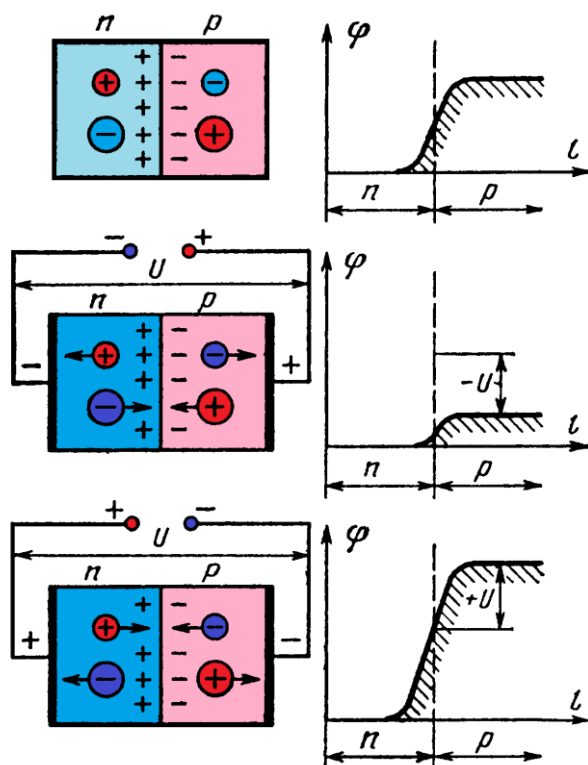
Ако към чист полупроводник от n или p-тип приложим поле от външен източник, токовете обусловени от неосновните токоносители в тях ще бъдат незначителни.

В един монокристал чрез въвеждане на съответните примеси могат да бъдат създадени две области – електронна и дупчеста. Слой на границата на тези две области наричаме **електронно-дупчест преход** или **p-n преход**. Такива преходи са в основата на повечето полупроводникови прибори.



Нека приемем, че концентрациите на електрони в лявата област и на дупки в дясната са еднакви или $n_d = n_a$. Електроните, които са в излишък в n-областта, проникват (**дифундират**) в p-областта, където тяхната концентрация е малка. Преносът на отрицателни заряди на дясно, довежда до отрицателно зареждане на граничната дупчеста зона и до положително зареждане на граничната електронна зона. В резултат на това, електростатичния потенциал на граничната електронна област става положителен от потенциала на p-областта. Така се образува *уравновесена зона, бедна на свободни токоносители, следователно с високо съпротивление*. Ако нарастващия отрицателен потенциал $-\phi$ представим като хълм, който възпрепятства движението на електроните, то може лесно да установим, че тази

контактна потенциална разлика ще прекрати до голяма степен протичането на електронен ток през прехода.



На фигурата основните за дадената зона токоносители са представени с големи кръгчета, а неосновните с малки. Ако с помощта на метални електроди към така уравновесения полупроводников преход приложим външно електрическо поле, в зависимост от неговата посока, физическите процеси могат да се развият по два начина. Нека приложим външно поле, чиято посока е *противоположна*, на посоката на *вътрешното поле на прехода*. Това включване ще компенсира до голяма степен потенциалната бариера и ще предизвика протичане

на **ток в права посока** през прехода. Основните токоносители за всеки от двата типа полупроводник, движейки се насрещно, ще могат лесно да преодолеят остатъчната незначителна потенциална бариера на прехода и да го преминат. С увеличаване на напрежението, техния брой ще нараства, обуславяйки нарастване на тока на проводимост.

Ако разменим полярността на външния източник, посоката на неговото електрическо поле ще бъде *еднаква*, с посоката на *вътрешното електрическо поле на прехода*. Тогава потенциалната преграда ще нарастне значително и към прехода ще се насочат *неосновните токоносители*, чиито ток е незначителен и се нарича **обратен ток**.

Това свойство на еднопосочна проводимост на p-n прехода позволява създаването на различни електронни прибори – диоди, транзистори от различен вид и структура, тиристори, триаци, динистори, диаци, трансили, светодиоди с разнообразни характеристики, полупроводникови лазери и още много разнообразни градивни елементи за електрониката, радиотехниката и ред други области.