Основни свойства на полупроводниците. Собствена и примесна проводимост. Фотопроводимост

Проводници, диелектрици и полупроводници

Най-високата разрешена енергетична зона в даден кристал, която е изцяло запълнена с електрони при $T = 0$ K, се нарича валентна зона. Зоната, която се намира непосредствено над нея, се нарича зона на проводимост. Тази зона (при $T = 0$ K) може да е частично запълнена с електрони, които бяха наречени електрони на проводимост. Наличието или отсъствието на електрони в тази зона определя дали даденият кристал е проводник или не.

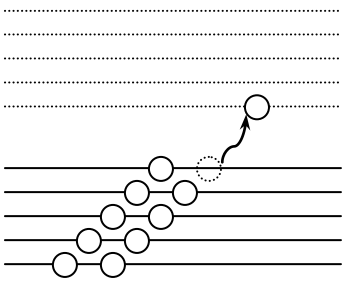
Според зонната теория разделянето на кристалите на проводници, диелектрици и полупроводници се извършва в зависимост от широчината на забранената зона, намираща се между валентната зона и зоната на проводимост и от наличието на електрони в зоната на проводимост.

Проводници на електричен ток са тези кристали, за които при $T = 0$ K зоната на проводимост е частично запълнена или валентната зона и зоната на проводимост се припокриват, т.е. образува се хибридна зона и между валентната зона и зоната на проводимост няма забранена зона. В тези случаи електроните могат да преминават лесно на незаети нива в зоната на проводимост, т.е. да се движат свободно в кристала.

Ако в зоната на проводимост няма електрони кристалът е диелектрик или полупроводник. Разделението на диелектрици и полупроводници е в известна степен условно и зависи от широчината ΔE на забранената зона между валентната зона и зоната на проводимост. Ако широчината на забранената зона е до 3÷4 eV кристалът се класифицира като полупроводник, а ако е по-голяма – като диелектрик. Това е свързано с възможността електрони от валентната зона да получат достатъчно енергия (по-голяма от широчината на забранената зона) и да преминат в зоната на проводимост. При температура $T = 0$ K всички полупроводници са диелектрици. При температури на кристала около 300 K електроните придобиват допълнителна кинетична енергия от порядъка на няколко електронволта и ако веществото е полупроводник те вече могат да „прескочат“ забранената зона – кристалът ще придобие електропроводност.

Собствена и примесна проводимост на полупроводниците. Фотопроводимост

Полупроводниците са едни от най-разпространените вещества в природата. Към тях се причисляват химичните елементи около оста B–Te в периодичната система, както и много съединения – оксидите на металите, повечето сулфиди, селениди, телуриди и др. Най-използваните като полупроводници чисти вещества са Ge, Si и Te. От химичните съединения най-добри полупроводникови свойства, особено за нуждите на оптоелектрониката, имат съединенията на химични елементи от III и V група на периодичната система – GaAs, InSb, InP, AlN и др. В последните години в различни видове дисплеи и соларни елементи се използват и органични полупроводници. Затова ще разгледаме по-подробно механизмите, чрез които един полупроводник може да придобие електропроводност.



фиг. 1

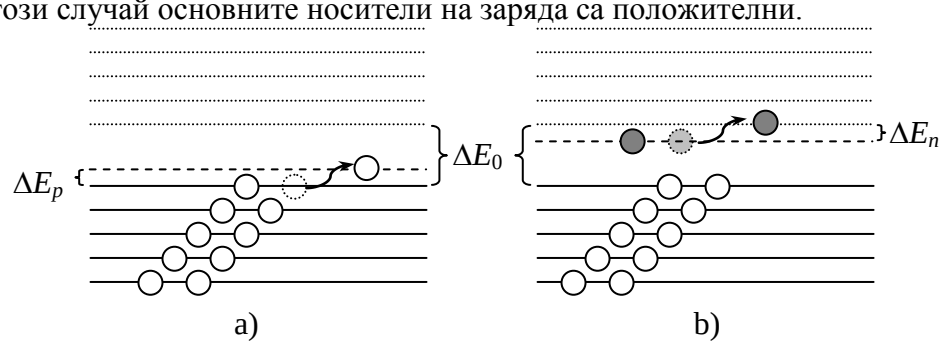
При чистите полупроводници (напр. Ge или Si), без примеси на други елементи може да възникне само т.нар. собствена проводимост. Германият и силицият са елементи от IV група и имат по четири валентни електрона. В кристала обаче тези електрони са свързани с ковалентна връзка, затова при 0 K в него няма свободни електрони. При повишаване на температурата се повишава средната енергия на електроните. Ако електронът придобие енергия, по-голяма от широчината на забранената зона ΔE, той може да премине в зоната на проводимост (фиг. 1). Тази енергия ΔE се нарича още енергия на активация на полупроводника. По този начин в зоната на проводимост вече има електрони и кристалът става проводник на електричен ток. При увеличаване на температурата все повече електрони могат да придобият енергия, по-голяма от енергията на активация и да преминат в зоната на проводимост. Това обяснява защо при повишаване на температурата проводимостта на полупроводниците се увеличава (т.е. съпротивлението намалява) за разлика от металните проводници, при които зависимостта е обратна.

От фиг. 1 се вижда още, че преминаването на електрон в зоната на проводимост е свързано с освобождаване на място за електрон (ваканция) във валентната зона. Тази ваканция може да бъде заета от друг електрон от тази зона – ваканцията ще се премести на друго място във валентната зона. От друга страна липсата на един отрицателен заряд е равностойно на създаване на едни положителен заряд. Следователно ваканцията ефективно има положителен заряд. Такава ваканция, създадена във

валентната зона, се нарича „дупка“. Възможността за движение на положително зареденатa дупка във валентната зона има същия ефект както движението на електрона в зоната на проводимост – повишаване на електропроводността на полупроводника.

Ако кристалът е поставен във външно електрично поле, електроните на проводимост и дупките ще започнат да се движат (дупките в посоката на интензитета на външното поле, а електроните – в противоположна посока). Следователно собствената проводимост на полупроводниците се обуславя от движението на електроните в зоната на проводимост и дупките във валентната зона.

При въвеждане на примесни атоми в идеалния кристал на чист полупроводник възниква т.нар. примесна проводимост на полупроводника, тъй като се появяват допълнителни енергетични нива в забранената зона. В зависимост от вида на примесните атоми, те могат да допринасят по различен начин за повишаване на проводимостта – чрез внасяне на допълнителни електрони в зоната на проводимост или чрез създаване на допълнителни дупки във валентната зона. В първия случай примесната проводимост се нарича електронна проводимост, а примесният полупроводник – полупроводник от *n*-тип, тъй като основните носители на заряда са отрицателни. Когато се появяват допълнителни дупки във валентната зона проводимостта се нарича дупчеста, съответно полупроводникът е от *p*-тип, тъй като в този случай основните носители на заряда са положителни.



фиг. 2

Ако напр. в кристал на Ge (от 4 валентност) са внесени атоми от тривалентен елемент (B, Al, In), трите валентни електрона на примесния елемент образуват ковалентни връзки с електроните на атома Ge, но една от неговите възможности за връзка остава свободна. Там може да се премести електрон от друг атом. По този начин в полупроводника се премества дупка. Това е еквивалентно на създаване на допълнителни енергетични нива, наречени акцепторни, близо над горния край на валентната зона на Ge (фиг. 2a). Така енергията на активация е много по-малка, $\Delta E = \Delta E_p$, вместо ΔE_0, каквато е в безпримесния полупроводник. Основните токови носители в този случай са дупките във валентната зона, затова тези полупроводници са от *p*-тип.

Когато примесният елемент е от пета валентност, четири от неговите валентни електрони образуват ковалентни връзки с Ge, а петият електрон остава по-слабо свързан (почти свободен) и може да се движи в кристала. Така в забранената зона се създават допълнителни нива, на които има разположени електрони (т.нар. донорни нива), които лесно могат да преминат в зоната на проводимост (фиг. 2b). Енергията на активация и в този случай е много по малка, $\Delta E = \Delta E_n$. Основните токови носители са електроните и полупроводникът е от *n*-тип. Следователно в примесните полупроводници, за разлика от собствените, има преобладаващ тип токови носители (електрони или дупки).

Специфичната електропроводност на полупроводниците се обуславя от два типа носители и е сума от електронната σ_n и дупчестата σ_p проводимост. Всяка от тях зависи от концентрацията *n* на токовите носители и тяхната подвижност μ, както и от електричния им заряд $q = e$: $\sigma = en\mu$. В собствените полупроводници концентрацията на електрони и дупки е една и съща, $n_n = n_p = n$, но подвижността μ_n на електроните и μ_p на дупките е различна. За сумарната проводимост на собствения полупроводник се получава

(1) $\sigma = en\left(\mu_n + \mu_p\right)$.

Концентрацията на различните типове носители в примесните полупроводници е различна, затова за тях проводимостта

(2) $\sigma = e\left(n_n\mu_n + n_p\mu_p\right)$,

където n_n и n_p са концентрациите съответно на електроните на проводимост и дупките.

Концентрацията на носителите, както и подвижността на електроните и дупките, зависят от температурата. Температурната зависимост на σ може да се получи чрез квантово-механични пресмятания за промените в концентрацията и подвижността на носителите, при използване на

статистиката на Ферми–Дирак. Така формули (1) и (2) придобиват общия вид

(3) $\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right)$,

където ΔE е енергията на активация на полупроводника, k е константата на Болцман, а T – термодинамичната температура. Величината σ_0 зависи от свойствата на полупроводника, от внесените примеси, но не зависи от температурата. Ако няма примеси (собствен полупроводник) енергията на активация във формула (3) е $\Delta E = \Delta E_0$. В примесните полупроводници $\Delta E = \Delta E_p$ за полупроводниците от p-тип и $\Delta E = \Delta E_n$ за полупроводници от n-тип. При ниски температури в примесните полупроводници основна роля играе примесната проводимост, но при високи температури преобладаваща е собствената му проводимост.

От формула (3) следва също и фактът, че проводимостта на полупроводниците се увеличава с увеличаване на температурата (съответно съпротивлението им намалява), което е в съгласие с експерименталните данни.

Електропроводността на даден полупроводник може да се повиши и при облъчване с видима или ултравиолетова светлина. Това е т.нар. фотопроводимост и се обуславя от вътрешния фотоелектричен ефект (фотоволтаичен ефект). Обяснението на явлението е същото, както и на външния фотоефект. Ако падащият фотон има по-голяма енергия от енергията на активация на полупроводника, електрон от валентната зона може да „прескочи“ в зоната на проводимост вследствие на взаимодействието си с него.