

ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Полупроводници су материјали чије особине свакодневно користимо, а да тога можда нисмо ни свесни. То што радимо на рачунару, телефону-рамо, гледамо телевизију или у дискотеци уживамо у музици и светлосним ефектима, у ствари су нам омогућиле неке особине полупроводника. Какви су то материјали и како је могуће да је њихова примена тако широка и разноврсна?

Полупроводници обухватају велику материјала који се по електричној проводности налазе између проводника и диелектрика. Њихова проводност је знатно мања од проводности добрих проводника, али је знатно већа него код добрих изолатора ($\rho = 10^6$ до $10^{10} \Omega \text{m}$). То су материјали који, хемијски чисти и без дефеката, под нормалним условима на собној температури (20°C), нису проводници. Међутим, пошто им је енергетски процеп узан ($E_g \leq 3,5 \text{ eV}$), са променом спољашњих услова или додавањем примеса они релативно лако могу да постану проводници, због чега су и добили назив полупроводници. Специфична електрична отпорност чистих полупроводника тежила би бесконачности када би температура тежила апсолутно нули. Другим речима, полупроводници имају негативан температурни коефицијент специфичне електричне отпорности ($\alpha < 0$).

Очигледно је да специфична електрична отпорност полупроводника умномме зависи од чистоте материјала и несавршености кристала, те од промена спољашњих услова – много више него код метала. Оваква осветљивост полупроводника на промене изазване спољашњим утицајима као што су температура, светлост или електрично поље знатно проширује могућности њихове примене. Захваљујући томе, као и напном развоју савремених технологија за добијање чистих полупроводника у облику монокриснала, развила се тако брзо и електроника, пре свега микроелектроника.

Типични полупроводници су елементи четврте групе периодног система, као што су **германијум (Ge)** и **силицијум (Si)**. Прве диоде (1945. год.) и први транзистори (1948. год.) били су направљени од германијума (Ge). Године 1956. амерички научњаци Бардин (Bardeen), Бротејн (Brattain) и Шокли (Shockley) добили су за проналазак транзистора и Нобелову награду.

Шездесетих година XX века, са напним развојем микроелектронике, нарочито интегрисаних кола, прешло се скоро потпуно на силицијумску технологију. Само неки типови транзистора израђују се од германијума (Ge). Интересовање за германијум (Ge) поново се повећало услед развоја термоелектрије. Данас је однос примене различитих полупроводника следећи: силицијум (Si) – 94%, германијум (Ge) – 3%, остали полупроводници – 3%. Ову последњу групу полупроводника чине полупроводничка јединица и лезуре.

Полупроводничка јединица настала следећавањем елемената III и V групе периодног система елемената имају најширу практичну примену. Значајну улогу ови материјали су добили са развојем оптичелектронике, тј. нас се највише користи галијум-арсенид (GaAs). Поред тога, галијум-арсенид има и најбољу перспективу када је реч о будућој примени у новим технологијама израде транзистора. Ипак, извесно је да ће силицијум (Si) још неко време бити основни материјал полупроводничке технологије.

Особине полупроводника имају и материјали који се називају полупроводничке лезуре. Комбиновањем полупроводничких елемената или јединица у различитим процентним односима могуће је, под извесним условима, добити нове материјале – полупроводничке лезуре. То су синтетички добијени материјали, унапред одређених, жељених особина. Обично је потребно направити нове полупроводничке материјале одређене величине и типа енергетског процела, што се може постићи инжењерингом енергетског процела.

Полупроводници се углавном користе врло чисти и са монокрystalном структуром. Треба нагласити да је напном напретку електронике доприносило и брзо развој, као и даље усавршавање технологија за израду монокриснала и полупроводничких компонената. Иако су неке особине полупроводника уочене прилично давно, њихова практична реализација не би била могућа без савремених технолошких решења.

ХЕМИЈСКИ ЧИСТИ ССПСТВЕНИ ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Полупроводници су материјали велике специфичне електричне отпорности ($\rho = 10^6$ до $10^{10} \Omega \text{m}$), па на собној температури, хемијски чисти – без примеса и дефеката, нису проводници. Имају узан енергетски процеп, $E_g \leq 3,5 \text{ eV}$. То значи да под нормалним условима у полупроводнику нема наелектрисаних честица које би могле да се крећу у електричном пољу, па нема ни електричне проводности (таб. 5.1).

Табела 5.1. – Полупроводнички елементи

Група периодног система	III	IV	V	VI
Полупроводнички елементи	B (1,39)	Si (1,11)	P (1,5)	S (2,6)
		Ge (0,67)	As (1,2)	Se (1,6)
		Sn (0,09)	Sb (0,11)	Te (0,36)

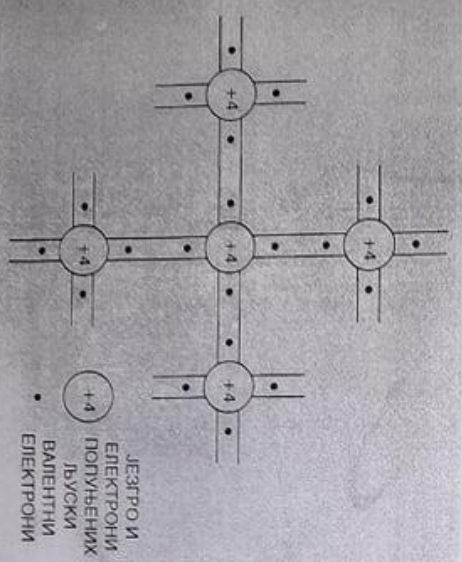
Напомена. – У заградама су дате вредности енергетског процела E_g (eV) на собној температури (20°C).

Објаснимо ово детаљније на примеру типичног полупроводника – **силицијума (Si)** или **германијума (Ge)**, који су хемиски чисти, без примеса и дефека-та. Оба елемента се налазе у *четвртој групи периодног система елемената*. Силицијум има атомски број 14, а гер-манијум 32. То значи да силицијум има 14, а германијум 32 електрона. Код си-лицијума (Si) попуњене су прва и друга љуска, а трећа, валентна, остаје непо-пуњена и има само четири електрона. Код германијума (Ge) попуњене су пр-ве три љуске, а у четвртој, валентној, такође има четири електрона. Оба еле-мента су, дакле, *четворовалентна*, тј. у последњој, валентној љусци имају по четири валентна електрона. Зато се и налазе у четвртој групи периодног система елемената. Као и сви остали елементи четврте групе, они граде ковалентне везе, образујући *заједничке електронске парове*. То су врло јаке везе.



Слика 5.1 – Тетраедарска структура кристала силицијума или германијума

Атоми силицијума (Si) и германијума (Ge) имају *кристалну структуру*. Они граде *тетраедар* (сл. 5.1) у коме сваки атом силицијума или германијума симетрично окружују четири суседна атома. Посматрани атом налази се у средини тетраедра. Низ ових тетраедара образују *двумантску кубну кристалну решетку* (сл. 5.2), типичну за силицијум (Si) и германијум (Ge).



ЛЕЗГРО И ЕЛЕКТРОНИ ПОПУЊЕНИХ ЉУСКИ ВАЛЕНТНИ ЕЛЕКТРОНИ

Слика 5.2 – Двумантска кубна решетка кристала силицијума или германијума

На температури близу апсолутне нуле сви валентни електрони везани су ковалентним везама са суседним атозима, тако да нема слободних елек-трона, тј. слободних носилаца наелектрисања. Пошто у кристалу нема слободних електрона, под дејством спољашњег електричног поља у ње-му се не може ни образovati струја, па нема ни електричне проводности. Силицијум (Si) и германијум (Ge) на ниским температурама се понашају као *изолатори*.

Уколико се, међутим, затребава или ако им се на неки други начин дово-ди енергија (осветљавају се и сл.), постаје проводници. Наиме, довође-њем енергије вибрације у чворовима решетке постају веће, а везе слабе, да би се на некој одређеној температури и раскингле. Електрон из раски-нуте ковалентне везе постаје *слободан електрон* и почиње хаотично да се креће кроз кристал уколико нема спољашњег електричног поља, а у присуству поља се креће усмерено, што доводи до појаве електричне струје. На месту тог електрона у раскинutoј ковалентној вези остаје „шупљина“, која се због јаке тежње ка стварању електронског пара, тј. ко-валентне везе, попуњава електронима са суседних атома, остављајући за собом нову шупљину. Дакле, шупљине ће прелазити од једног атома до другог, крећући се хаотично ван електричног поља, односно усмерено у електричном пољу. Кретање шупљина у електричном пољу одвија се у супротном смеру у односу на кретање електрона, па се каже да се шупљине понашају као позитивни носιοци наелектрисања.

Стварање пара слободан електрон – шупљина довођењем енергије назива се *генерација*. Према томе, електрична проводност силицијума (Si) или германијума (Ge) последица је генерације. То се може приказати на следећи начин:



У чистим кристалима полупроводника концентрација слободних електро-на и шупљина је иста:

$$n = p,$$

при чему је:

n – концентрација слободних електрона,

p – концентрација шупљина.

Полупроводници код којих је број слободних електрона и шупљина исти називају се *чисти или сопствени полупроводници*.

Проводност чистог силицијума (Si) или германијума (Ge), тј. сопствених полупроводника врло је мала јер се електрони крећу супротно од смера поља, а шупљине – у смеру поља:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p$$

при чему је:

σ – специфична електрична проводност,

n , p – покретљивост слободних електрона,

μ_p – покретљивост шупљина.

3. Процес супротан процесу генерације назива се **рекомбинација**. Токм овог процеса електрон попуњава шупљина грађени поново ковалентну везу. Том приликом нестaje један слободан електрон и једна шупљина. Процес рекомбинације праћен је ослобађањем енергије.

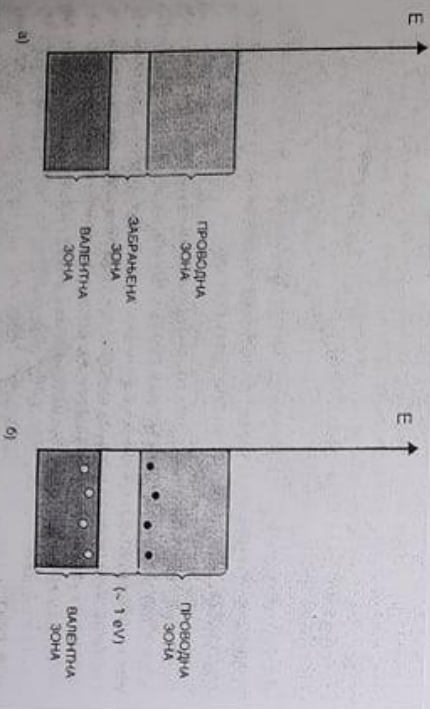
На одређеној температури успоставља се динамичка равнотежа између генерације и рекомбинације електрона. Производ концентрација слободних електрона и шупљина је тада константан:

$$np = \text{const} = f(T).$$

Вредност константе мења се са променом температуре јер се са повишењем температуре повећава и концентрација носилаца наелектрисања.

Процеси генерације и рекомбинације могу се објаснити и енергетски. Наиме, сви валентни електрони полупроводника, у нашем примеру силицијума (Si) или германијума (Ge), који учествују у стварању чврстих ковалентних веза, по количини енергије коју имају налазе се у валентној зони. На вишем енергетском нивоу је проводна зона. Уколико би електрон имао енергију проводне зоне, био би слободан и способан за провођење. Између ове две зоне налази се релативно узан енергетски процеп (E_g).

Међутим, на температури апсолутне нуле проводна зона силицијума или германијума је празна – нема слободних електрона, па нека ни проводности. Тиме се објашњава понашање силицијума и германијума као изолатора (сл. 5.3а).



Слика 5.3. – Енергетске зоне: а) чисти силицијум, б) чисти германијум. Енергетске зоне чистог полупроводника на 0К, с) сопствених полупроводника при повишеној температури

Када се температура повишава, повећава се и енергија електрона, па је и могућност раскидања ковалентних веза у силицијуму или германијуму већа. Неки електрони са врха валентне зоне могу да добију довољно енергије да „прескоче“ забрањену зону, тј. енергетски процеп, да пређу на дно проводне зоне. Ковалентне везе се раскидају, а електрон прелази у проводну зону и постаје слободан електрон (сл. 5.3б). Код силицијума (Si) за овакав прелазак потребна је енергија од 1,11 eV (~ 200°C), а код германијума (Ge) 0,67 eV (~ 90°C).

Празно место у валентној зони настало одласком електрона назива се шупљина. Ако валентни електрон из неке друге ковалентне везе попуни шупљину, ствара се нова шупљина на месту где се налазио тај електрон. Ефекат је исти као када би се позитивно наелектрисање, исте величине као и наелектрисање електрона, померило на ново место. Зато се каже да се шупљине понашају као позитивни носиоци наелектрисања. Већ је речено да се процес стварања пара слободан електрон – шупљина назива генерација. Код чистих, сопствених полупроводника њиховој проводности доприносе и слободни електрони и шупљине.

Процес супротан процесу генерације назива се рекомбинација – када електрон из проводне зоне попуњава шупљину у валентној зони, уз ослобађање енергије, најчешће у виду светлости различите боје, односно таласне дужине. Начин провођења код полупроводника само је на први поглед потпуно другачији него код проводника, односно метала. У суштини је исти, с тим што код полупроводника под дејством електричног поља долази до кретања не само слободних електрона већ и шупљина. Електрони се крећу у супротном смеру од смера електричног поља, а шупљине – у смеру електричног поља. У ствари, полупроводници као да имају две компоненте проводности: једну због кретања слободних електрона и другу – због кретања шупљина. Обе компоненте доприносе проводности, али не и поделедако, што је успостављено мањом покретљивошћу шупљина у валентној зони у односу на покретљивост слободних електрона у проводној зони.

Да бисте боље разумели начини провођења електричне струје код полупроводника, наведимо један сликовит пример.

Гаража за аутомобиле има два спрата. Донji спрат је потпуно попуњен аутомобилима, док је горњи спрат празан. Кретање је, практично, неморне на оба спрата: на доњем – јер нема места, а на горњем – јер нема аутомобила. Ако се сада један аутомобил пребаци на горњи спрат, кретање ће бити могуће. Аутомобил на горњем спрату ће се кретати, и то врло лако. Такође ће се кретати и аутомобили на доњем спрату, али тако што ће један да се помери на празно место, остављајући за собом „шупљину“. То сада празно место, тј. „шупљину“, попуниће други аутомобил, поново остављајући иза себе „шупљину“. Померају се, практично, аутомобили, али нама који посматрамо са стране чини се да се празно место – „шупљина“ – појављује негде другде, као да се и она помера.