

10. ПОЛУПРОВОДНИЧКИ МАТЕРИЈАЛИ

Полупроводнички материјали представљају посебну класу материјала, која се издваја по својим специфичним електричним особинама. Генерално, електричне особине материјала одређене су понашањем материјала у примењеном електричном пољу. Једна од карактеристичних величина која описује ово понашање је електрична проводност материјала, која дефинише механизам провођења наелектрисања.

На основу понашања у електричном пољу, односно на основу вредности електричне проводности, полупроводнички материјали се налазе између проводника и изолатора. Електрична проводност полупроводничких материјала је мања у односу на електричну проводност проводника и већа у односу на електричну проводност изолатора и има вредности у интервалу $(10^{-3} - 10^5) \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$.

10.1. СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ МАТЕРИЈАЛА

Полупроводнички елементи, од којих су најзначајнији силицијум Si и германијум Ge, имају кристалну решетку дијамантског типа¹, а атоми унутар решетке су међусобно повезани ковалентним везама. Атом силицијума садржи четрнаест електрона, од чега четири у последњој љусци, који учествују у формирању тетраедарских ковалентних веза у кристалној решетки. Атом германијума има укупно 32 електрона, од којих четири у последњој љусци као код силицијума.

За разлику од полупроводничких елемената, већина полупроводничких једињења има сфалеритну структуру, односно модификовану дијамантску, чија се елементарна ћелија састоји од две врсте атома.

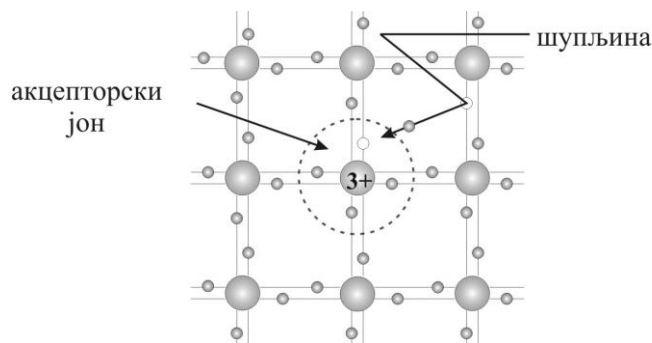
Полупроводнички материјали могу се успешно допирати примесамa, што доводи до промене веза између атома. У кристалну решетку чистог

¹ Дијамантски тип решетке, карактеристичан за елементарне полупроводнике, детаљно је објашњен у поглављу 1.3.1. Типови кубних структуре. У истом поглављу разматран је и сфалеритни тип кристалне структуре који се јавља код двокомпонентних полупроводничких једињења.

полупроводника додају се примесе, тако да валенца атома примесе треба да буде за један мања или за један већа од валенце атома чистог полупроводника. Дакле, атомима силицијума или германијума који припадају IV групи периодног система елемената могу се додати атоми из III или V групе.

10.1.1. Структура полупроводника р-типа

Уколико се кристалној решетки силицијума супституцијски додају примесни атоми из III групе периодног система елемената: бор (B), алуминијум (Al), галијум (Ga), индијум (In) или талијум (Tl) који имају по три валентна електрона, долази до замене појединих атома силицијума примесним атомима. У том случају једна ковалентна веза примесног атома са атомом силицијума ће остати незасићена (слика 10.1.).

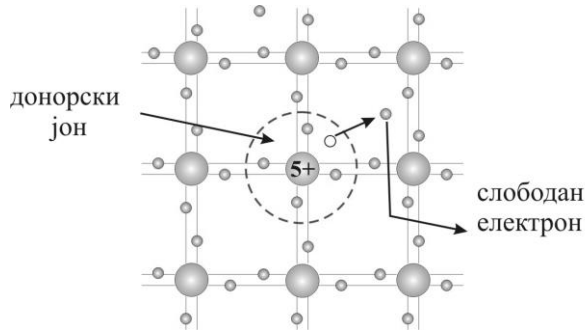


Слика 10.1. Шематски приказ дводимензионалне кристалне решетке полупроводника р-типа.

Овај недостатак једног електрона може се сматрати као **шупљина** или као вишак једног позитивног наелектрисања. Овако добијени примесни полупроводници, код којих долази до формирања шупљина називају се полупроводницима р-типа.

10.1.2. Структура полупроводника n-типа

Слично претходном, уколико се атом силицијума замени примесним атомом из V групе периодног система елемената, где спадају: фосфор (P), арсен (As) или антимон (Sb), који имају по пет валентних електрона, четири од ових електрона ће са електронима атома силицијума градити ковалентне везе, док ће један електрон бити везан за примесне атоме (слика 10.2.).

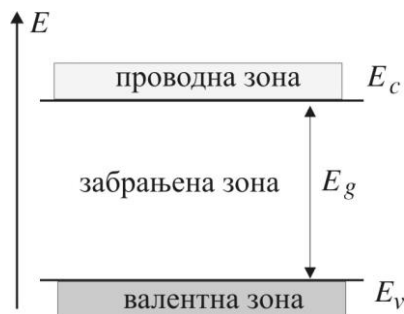


Слика 10.2. Шематски приказ дводимензионалне кристалне решетке полупроводника n-типа.

Овако добијени примесни полупроводници, код којих долази до појаве вишка слободних **електрона** називају се полупроводницима n-типа.

10.2. ОСОБИНЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ МАТЕРИЈАЛА

Електричне особине полупроводничких материјала и механизам провођења објашњавају се теоријом енергетских зона. Полупроводнички материјали се, слично диелектрицима, на температури у близини апсолутне нуле, одликују јасно издвојеном валентном зоном попуњеном електронима и непопуњеном проводном зоном (слика 10.3.), где је E_C енергија дна проводне зоне, а E_V енергија врха валентне зоне. Између валентне и проводне зоне налази се забрањена зона у којој се не могу налазити електрони. Она се карактерише **ширином забрањене зоне** $E_g = E_C - E_V$, односно енергетским процепом (енг. band gap) који представља енергију потребну да електрон из валентне пређе у проводну зону. Енергетски процеп зависи од врсте полупроводничког материјала и најчешће има вредност од неколико eV.



Слика 10.3. Енергетски дијаграм валентне, проводне и забрањене зоне полупроводника.

Електричне особине и механизам провођења полупроводничких материјала разликују се у односу на то да ли се ради о чистим-сопственим полупроводницима или примесним-допираним полупроводницима.

10.2.1. Електричне особине чистих полупроводника

Код сопствених полупроводника код којих не постоје примесе или је њихов утицај занемарљив, валентна зона је попуњена електронима, а проводна зона је празна. Ширина забрањене зоне је мала и износи око 2eV . На ниским температурама чист полупроводник се понаша као изолатор. У том случају, електрони у валентној зони немају довољну енергију за савладавање енергетског процепа и прелазак у проводну зону. На собној температури, енергија топлотног побуђивања електрона је довољна да један део електрона из валентне зоне може да савлада енергетски процеп и пређе у проводну зону. Електрони нису једини носиоци наелектрисања у полупроводницима који учествују у провођењу. На местима у кристалној решетки које су електрони напустили, јављају се шупљине, односно вишак позитивног наелектрисања, које такође доприноси проводности полупроводника.

Ако се на крајеве полупроводника доведе одговарајући електрични напон, електрон из валентне зоне може да пређе у проводну зону, а створена шупљина у валентној зони имаће наелектрисање једнако елементарном позитивном наелектрисању. У присуству електричног поља електрони и шупљине се крећу у супротним смеровима, тако да је укупна проводност σ у полупроводнику дата као збир проводности електрона и шупљина:

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \quad (10.1)$$

где је: n -број проводних електрона у јединици запремине, p -број шупљина у јединици запремине, μ_n -покретљивост електрона, μ_p -покретљивост шупљина и e -елементарно наелектрисање. Како је код сопствених проводника $n = p$, за проводност се добија следећи израз:

$$\sigma = ne(\mu_n + \mu_p) \quad (10.2)$$

при чему је покретљивост шупљина мања од покретљивости електрона ($\mu_p < \mu_n$). Код чистих полупроводничких материјала електрична проводност зависи само од температуре и ширине забрањене зоне.

За неке од полупроводничких материјала, дате су у табели 10.1. вредности константи њихових кристалних решетки a , као и ширина

забрањене зоне E_g , покретљивост електрона μ_n , покретљивост шупљина μ_p и диелектрична константа ϵ_r на собној температури ($T = 300 \text{ K}$).

Табела 10.1. Особине полупроводника.

материјал	константа решетке $a (10^{-10} \text{ m})$	E_g (eV)	μ_n ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	μ_p ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	ϵ_r
Ge	дијамантска 5.66	0.67	3900	1900	16.5
Si	дијамантска 5.43	1.11	1350	480	11.7
SiC	сфалеритна 4.36	3.10	400	-	10.0
GaAs	сфалеритна 5.65	1.42	8600	400	12.5
GaP	сфалеритна 5.45	2.27	120	120	10.0
InSb	сфалеритна 6.48	0.18	76000	5000	18.0
CdSe	сфалеритна 6.05	1.73	500	-	10.0

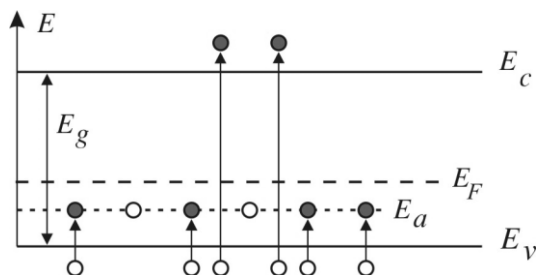
10.2.2. Електричне особине примесних полупроводника

Електричне особине полупроводника и механизам провођења зависе од услова у којима се полупроводник налази, као и од присуства примеса. Допирањем полупроводника може се променити електрична проводност оба типа полупроводника. Комерцијални полупроводници се допирају малом концентрацијом другог елемента, најчешће 10^{-12} атома/атому. Додавањем примеса у кристалну решетку чистог полупроводника долази до промене енергетских зона.

Полупроводник р-типа

Шематски приказ енергетских зона код полупроводника р-типа дат је на слици 10.4. Енергетски ниво шупљина примесних атома је за 0.01 eV виши од горње границе валентне зоне чистог полупроводника, тако да електрони из валентне зоне могу да пређу на енергетски ниво шупљина уколико им се дода енергија реда 0.01 eV , при чему се формирају шупљине у валентној зони. Ове шупљине учествују у провођењу струје кроз примесни полупроводник преносом јонизационе енергије у смеру

који је супротан од смера кретања електрона. Примесни атоми прихватају екситоване електроне из валентне зоне па се називају **акцептори**, а њихов енергетски ниво се назива акцепторски ниво, при чему је E_a -енергија акцепторског нивоа, а E_F -енергија Фермијевог нивоа². У односу на сопствене полупроводнике код којих се Фермијев ниво налази на средини забрањене зоне, код полупроводника р-типа енергија Фермијевог нивоа је ближа енергији врха валентне зоне.



Слика 10.4. Шематски приказ енергетских зона код полупроводника р-типа.

Код полупроводника р-типа, шупљине су већински, а електрони мањински носиоци струје. Концентрација позитивних шупљина је већа од концентрације слободних електрона, па је електрична проводност одређена само проводношћу већинских носилаца наелектрисања, односно шупљина:

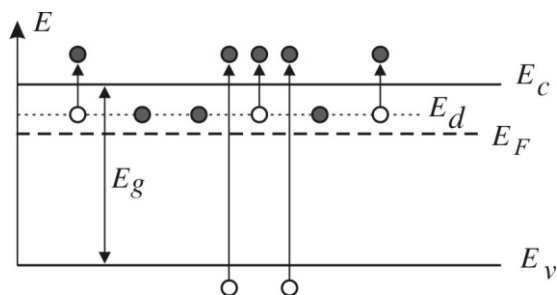
$$\sigma = p e \mu_p \quad (10.3)$$

Полупроводник n-типа

Шематски приказ енергетских зона код полупроводника n-типа дат је на слици 10.5. У овом случају је енергетски ниво електрона примесних атома за 0.01 eV нижи од доње границе проводне зоне чистог полупроводника. Ако се овим електронима дода енергија реда 0.01 eV , они ће прећи у проводну зону и учествоваће у провођењу струје кроз примесни

² Фермијев ниво, који је константа у Ферми-Дираковој функцији расподеле, је енергетски ниво са одређеним физичким значењем само код метала, где представља максимални ниво електрона на температури апсолутне нуле. Код полупроводника Фермијевом нивоу се не може дати одређена физичка интерпретација, али је његово увођење корисно при проучавању провођења струје у полупроводничким материјалима. Положај Фермијевог нивоа се одређује на основу услова да у полупроводнику постоји равнотежа позитивног и негативног наелектрисања. Може се сматрати да је енергија Фермијевог нивоа интеграциона константа која не зависи од расподеле енергије међу честицама, већ само од њиховог укупног броја. По аналогији са металима, где Фермијев ниво одражава термодинамичку енергију система, и код полупроводника Фермијев ниво мора бити континуалан на месту споја два полупроводника.

полупроводник. Примесни атоми повећавају број слободних електрона у полупроводнику па се називају **донори**, а њихов енергетски ниво E_d назива се донорски ниво. Код полупроводника n-типа енергија Фермијевог нивоа је ближа енергији дна проводне зоне.



Слика 10.5. Шематски приказ енергетских зона код полупроводника n-типа.

Код полупроводника n-типа електрони су већински, а шупљине мањински носиоци струје. Концентрација електрона је већа од концентрације шупљина, па је електрична проводност дата само проводношћу електрона као већинских носилаца наелектрисања:

$$\sigma = n e \mu_n \quad (10.4)$$

Електрична проводност оба типа полупроводника зависи од врсте примеса, њихове концентрације и температуре. Већа концентрација примеса повећава број носилаца наелектрисања, па на тај начин и проводност. Утицај температуре, међутим, није једнозначно одређен. Код сопствених полупроводника електрична проводност расте са повећањем температуре слично као код метала. За примесне полупроводнике слично понашање се запажа тек на температурама већим од 500°C .

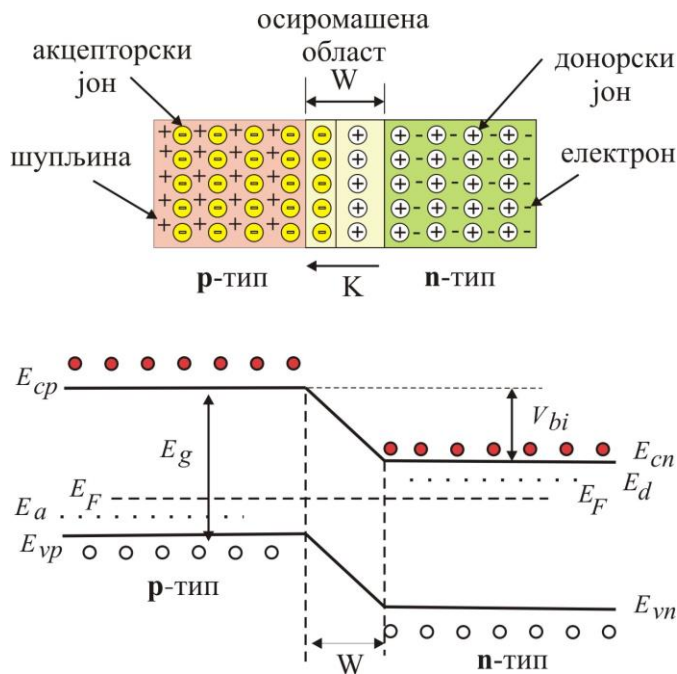
10.3. ПРИМЕНА ПОЛУПРОВОДНИЧКИХ МАТЕРИЈАЛА

На основу карактеристичних електричних особина полупроводника развијене су многе полупроводничке компоненте, од којих су најзначајније диоде и транзистори, затим микроелектронски системи и многи савремени електронски системи и уређаји. Основне предности полупроводничких уређаја су мале димензије, мала потрошња енергије и рад без загревања.

10.3.1. Полупроводничка диода, p-n спој

Полупроводничка диода настаје спајањем два полупроводника, једног p а другог n-типа, при чему долази до преласка шупљина из p у n

полупроводник и електрона из n у p полупроводник. Спонтано кретање наелектрисања супротног знака у p - n споју назива се дифузна струја. Услед дифузног кретања наелектрисања на p - n споју се образује танак слој, такозвана прелазна област, која је на страни полупроводника p -типа наелектрисана негативно, а на страни полупроводника n -типа позитивно. Шематски приказ расподеле наелектрисања у p - n споју са прелазном облашћу у којој постоји мањак наелектрисања дат је на слици 10.6. горе.



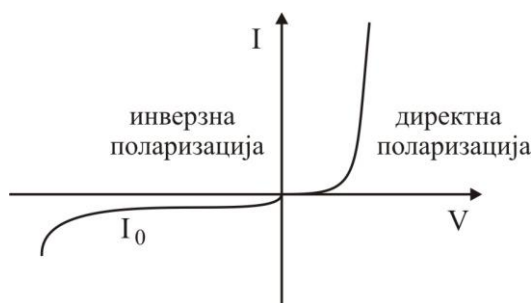
Слика 10.6. Расподела наелектрисања у p - n споју (на слици горе), шематски приказ енергетских зона код p - n споја (на слици доле).

Услед прерасподеле наелектрисања на p - n споју долази до појаве унутрашњег електричног поља \vec{K} и контактнoг потенцијала W између p и n полупроводника. Контактни потенцијал спречава даље дифузно кретање електрона и шупљина кроз p - n спој, долази до подизања енергетских нивоа p -полупроводника и до спуштања енергетских нивоа n -полупроводника, што је приказано на слици 10.6. доле.

Применом одговарајућег напона p - n спој може бити поларисан директно или инверзно. Код директне поларизације p - n споја, p страна је прикључена на позитиван, а n страна на негативан пол извора струје. Спољашње електрично поље је тада усмерено супротно пољу контактнoг слоја услед чега се поље у прелазној области и разлика потенцијала смањују. То омогућава транспорт главних носилаца наелектрисања тј.

електрична струја протиче кроз спој а њена јачина експоненцијално расте са порастом повезаног напона. Струјно-напонска карактеристика р-п споја приказана је на слици 10.7.

Уколико се р-п спој прикључи инверзно, у прелазној области расте потенцијална баријера, што доводи до повећања отпора при протицању струје. Електрична струја потиче од кретања мањинских носилаца наелектрисања и знатно је слабијег интензитета од оне која се остварује посредством главних носилаца наелектрисања.



Слика 10.7. Струјно-напонска карактеристика р-п споја.

Струја р-п споја услед ињекције шупљина из р области у п област и ињекције електрона из п области у р област преко р-п споја, може бити описана Shockley-вом идеалном једначином диоде, која је дата у облику:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (10.5)$$

где је I_0 - струја засићења, e - наелектрисање електрона, k - Болцманова константа, T - температура, U - напон.

Једна од основних примена полупроводничких диода је заснована на њиховом исправљачком дејству, где су оне успешно замениле раније коришћене вакуумске стаклене цеви. Осим обичне полупроводничке диоде која је претходно описана, користе се и Зенер диоде, LED (Light Emitting Diode), ласерске диоде, фотодиоде, итд.

Зенер диода се често назива пробојна диода због особине да може проводити у супротном смеру. До Зенеровог пробоја долази на одређеној вредности инверзног напона, што је особина значајна за конструкцију референтног напонског извора или у колима за стабилизацију и ограничење напона. Принцип рада је заснован на појави тунеловања електрона кроз танку потенцијалну баријеру споја. Ове диоде се карактеришу негативним температурским коефицијентом пробојног напона. Израђују се од силицијума и германијума. Диоде са лавинским

ефектом такође проводе у инверзном смеру када напон поларизације изазове лавинско умножавање слободних носилаца наелектрисања услед достизања великих брзина при кретању кроз јако електрично поље прелазне области. Карактерише их позитиван температурски коефицијент пробојног напона, што се ублажава редним додавањем обичне диоде директно поларисане.

Светлећа диода- LED емитује светлост када је директно поларисана. Већина диода емитује зрачење, које не напушта полупроводник и налази се у области инфрацрвеног зрачења. Прва комерцијална LED је произведена 1962. године и емитовала је црвену светлост. Даљи технолошки развој омогућио је израду диода које емитују светлост у целом видљивом делу спектра електромагнетног зрачења, чак и ултраљубичасту. Боја емитоване светлости зависи од врсте полупроводничког материјала, односно од ширине забрањене зоне датог полупроводника. За израду ових диода користе се: GaAs (инфрацрвена), GaAsP (црвена), InGaAlP (жута), GaAlP (зелена), InGaN (плава) итд.

Ласерска диода је врста светлеће диоде код које се полирањем паралелних страница материјала диоде формира резонантна шупљина, што се манифестује као појачавач усмерене светлости. Користе се код оптичких уређаја (CD и DVD) и оптичких влакана. За производњу ласерских диода најчешће се користе полупроводничка једињења галијум-арсенид GaAs и индијум-фосфид InP, као и легуре $In_{1-x}Ga_xAs$ и $(InAs)_{1-x}(GaP)_x$.

Фотодиода је диода са широким провидним спојем, у којој се под дејством светлости генерише електрична струја. Користе се у фотометрији и као фотонапонске ћелије. За израду соларних ћелија најчешће се користе: силицијум, германијум, индијум фосфид (InP), галијум фосфид (GaP), галијум арсенид (GaAs), кадмијум сулфид (CdS), кадмијум селенид (CdSe), кадмијум телурид (CdTe) итд. Од избора материјала за израду соларних ћелија зависи коефицијент апсорпције, спектрална осетљивост, као и ефикасност соларне ћелије.

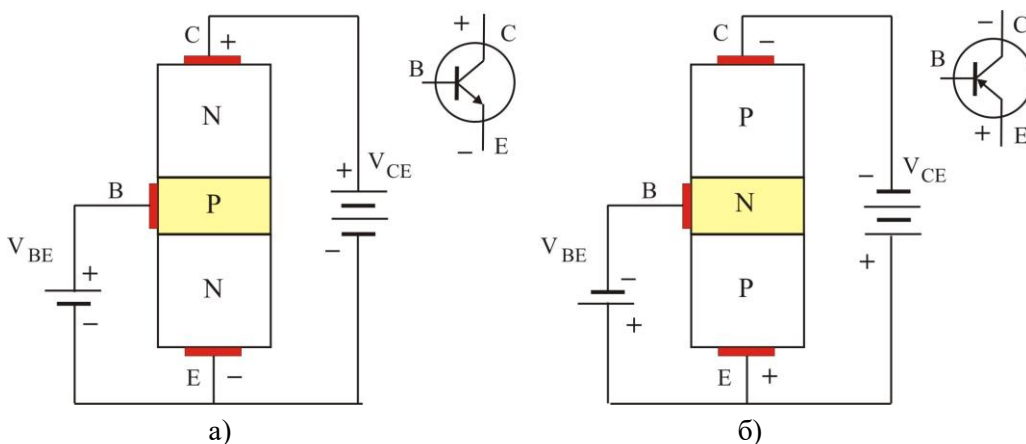
Соларне ћелије имају релативно малу излазну снагу, па се у циљу повећања излазног напона, струје и снаге, повезују у соларне модуле који представљају основне саставне делове фотонапонских система. Соларне ћелије и модули имају широку примену за осветљење, за рад аудиовизуелних уређаја, расхладних уређаја, телекомуникационих уређаја и система, сигнализационих уређаја на путевима, медицинских уређаја, као и за рад соларних електрана. Користе се и за напајање електричном енергијом усамљених објеката, бродова, сателита итд.

10.3.2. Транзистори

Од свог проналаска 1948. године транзистор је веома важна компонента микроелектронских кола. Може да се користи као појачавач електричног сигнала или као прекидач при процесирању или сторнирању информација. Према начину рада транзистори се деле на: биполарне транзисторе (*BJT-Bipolar Junction Transistor*) код којих проводност зависи и од мањинских носилаца наелектрисања (електрони у NPN или шупљине у PNP типу) и униполарне транзисторе (*FET-Field Effect Transistor*) код којих проводност зависи само од већинских носилаца наелектрисања (електрони у n-каналном или шупљине у p-каналном типу).

Транзистори се праве као дискретне компоненте или у оквиру интегрисаних кола. За интеграцију је кључна појава MOSFET-а који су због својих малих димензија и специфичне технологије израде готово потиснули биполарне транзисторе.

Биполарни транзистор се састоји из три различито допираних полупроводничких делова: емитерског, базног и колекторског. Ови делови су, редом, p, n и p типа у PNP транзисторима и n, p и n типа у NPN. Сваки полупроводни део је прикључен на извод означен као: емитер (E), база (B) и колектор (C), као што је приказано на слици 10.8. У нормалном раду, спој емитер-база је директно поларисан, а спој база-колектор је инверзно поларисан.



Слика 10.8. Биполарни транзистор: а) NPN и б) PNP типа.

База је смештена између емитера и колектора и направљена је од слабо допираног, високоотпорног материјала. Колектор окружује емитерски део, чинећи скоро немогуће ињектованим електронима или шупљинама у бази да избегну да буду скупљени, што даје транзистору велико појачање. Биполарни транзистор, за разлику од осталих

транзистора, није симетричан уређај. То значи да замена између колектора и емитера доводи до тога да транзистор почиње да ради у инверзном режиму.

Мале промене у напону који је прикључен на спој емитер-база изазива да се струја која тече између колектора и емитера значајно промени. Овај ефекат се може користити да се повећа улазна струја. Биполарни транзистори се могу сматрати напонски контролисаним струјним изворима, али се обично карактеришу као струјни појачавачи због мале импедансе у бази. Отуда мала промена струје базе може да утиче на велику промену тока електрона између емитера и колектора. Однос ових струја I_c / I_b се назива струјно појачање и означава се са β . Обично износи 100 или више. Рани транзистори су били направљени од германијума, док се модерни биполарни транзистори израђују од силицијума.

Транзистори са ефектом поља-FET се карактеришу великом улазном отпорношћу, реда величине 100 МΩ или више, због чега представљају напонски контролисане уређаје. Постоје различите врсте ових транзистора³: JFET-спојни транзистор са ефектом поља, MOSFET-метал-оксид-полупроводнички транзистор са ефектом поља, TFET-транзистор са тунелским ефектом поља, MODFET-модулисано-допирани транзистор са ефектом поља, MESFET-метал-полупроводнички транзистор са ефектом поља итд.

Највише коришћени FET је MOSFET, који је формиран од два полупроводника р-типа убачена у силицијумску подлогу n-типа и спојена уском полупроводном зоном р-типа (р-канални тип). Депонованем танких слојева на полупроводницима образоване су металне везе сорс (source) и дрејн (drain) док је површина подлоге оксидована (SiO₂). Коначна веза, гејт (gate) је формирана у SiO₂ слоју. Проводност се мења у уском каналу, пољем које се примењује на гејт.

FET се израђује од различитих врста полупроводничких материјала, од којих се најчешће користи монокристални силицијум као активна област, односно канал. Могу се, међутим, користити и аморфни силицијум, поликристални силицијум, као и други аморфни полупроводници у транзисторима танког филма или органским транзисторима са ефектом поља-OFET, који су базирани на органским полупроводницима. Осим ових

³JFET-junction gate field-effect transistor, MOSFET-metal-oxide semiconductor field-effect transistor, TFET-tunnel field-effect transistor, MODFET-modulation-doped field-effect transistor, MESFET-metal-semiconductor field-effect transistor.

материјала користе се и силицијум карбид (SiC), галијум арсенид (GaAs), галијум нитрид (GaN) итд.

Развојем полупроводничких материјала, диода и транзистора, започео је нагли развој микроелектронике, рачунарске технике и комуникационих система. Формирање компонената и система започиње добијањем монокристала Si велике чистоће, на чијој се малој површини, после сечења, у зони површине формира стотинак елемената електричног кола: диода, транзистора, отпорника, електричних контаката и кондензатора. Формирани елементи електричног кола на чипу повезују се са другим компонентама система на плочи.

10.4. НОВИ ПОЛУПРОВОДНИЧКИ МАТЕРИЈАЛИ

Велике могућности примене полупроводничких материјала довеле су до све већег интересовања за истраживањем нових материјала са карактеристичним особинама неопходним за разне врсте примена.

Полупроводнички материјали који се најчешће користе су: чисти полупроводници, елементарни силицијум Si и германијум Ge, који се налазе у IV групи периодног система елемената, полупроводничка једињења настала од елемената III и V групе, где спадају GaAs, InSb, InP, GaP, полупроводничка једињења настала од елемената II и VI групе, CdS, CdTe, ZnTe, HgTe, полупроводничка једињења настала од елемената IV и VI групе, PbTe, PbS, PbSe, SnTe итд.

Осим ових материјала све више се проучавају и друга двокомпонентна и трокомпонентна једињења, полупроводнички материјали на бази легура, органски полупроводнички материјали, као и полупроводничке решетке.

10.4.1. Полупроводнички елементи

Од укупно дванаест полупроводничких елемената, колико их има смештених у пет група периодног система елемената, значајну примену у електроници имају једино силицијум Si и германијум Ge. Остали се користе врло мало или се уопште не користе. Елементарни полупроводници имају кристалну решетку дијамантског типа, а атоми унутар решетке су међусобно повезани ковалентним везама.

Атом силицијума садржи четрнаест електрона, од чега четири у последњој лусци, који учествују у формирању тетраедарских ковалентних веза у кристалној решетки. Монокристални силицијум је тамно сив и непровидан. Одликује се великом тврдоћом и слабом електричном

проводношћу. Добија се најчешће из поликристалног силицијума методом Чохралског и методом лебдеће зоне.

Осим монокристалног силицијума, све више се користе и поликристални и аморфни силицијум. Силицијум се у поликристалном облику добија са различитом специфичном електричном отпорношћу која се може разликовати и за неколико редова величине. Основни проблем код добијања поликристалних полупроводника, генерално, је поновљивост добијених особина. Због посебне структуре која се карактерише постојањем граница зрна, особине поликристалних полупроводничких материјала истог хемијског састава могу знатно да се међусобно разликују.

Поликристални силицијум се све више користи као полупроводнички материјал за израду интегрисаних кола, као и у области конверзије сунчевог зрачења у електричну енергију.

10.4.2. Полупроводничка једињења и легуре

Полупроводничка једињења и легуре настала су због потребе за полупроводничким материјалима који би имали жељене вредности ширине забрањене зоне, као и покретљивост и концентрацију носилаца наелектрисања.

Једињења типа III-V су највише проучавана и коришћена двојна полупроводничка једињења. Образују се од елемената III и V групе периодног система елемената, а најзначајнија од њих су галијум арсенид (GaAs) и индијум антимионид (InSb).

Галијум арсенид у односу на силицијум има значајне предности у погледу одређених примена. Одликује се знатно већом покретљивошћу електрона и средњом вредношћу дрифтоске брзине, што омогућава израду компонената које раде на вишим фреквенцијама. Осим тога, компоненте на бази галијум арсенида могу да раде на нижим напонима. Посебно је значајна примена галијум арсенида за израду ласера јер се карактерише ширином забрањене зоне, која износи $E_g = 1.43 \text{ eV}$ и директним преласком електрона. Када се ради о галијум арсениду, посебан проблем представља добијање квалитетног монокристала који би могао да се користи у микроелектроници за израду интегрисаних кола.

Индијум антимионид се одликује малом вредношћу енергетског процепа $E_g = 0.18 \text{ eV}$ и великом покретљивошћу носилаца наелектрисања. Основни недостатак овог једињења је прелазак у сопствену област на ниским температурама, што захтева рад компонената на температурама течног азота која износи 77 K . Осим тога, веома се тешко добија у чистом

облику, па је неопходно користити методу зоналног пречишћавања за његово добијање.

Легуре на бази двојних полупроводничких једињења типа III-V се најчешће добијају у облику чврстих раствора са различитим процентуалним саставима одговарајућих полупроводничких једињења. Најзначајнија је легура $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ која се добија легирањем GaAs и AlAs. Енергија енергетског процепа ове легуре се континуално мења са променом удела компонената између вредности $E_g = 1.43\text{ eV}$ (за GaAs) и $E_g = 2.16\text{ eV}$ (за AlAs). Са променом састава ове легуре (до $x < 0.4$) линеарно се мењају параметар кристалне решетке, специфична густина, специфична топлота, топлотни коефицијент ширења, док се по квадратном закону мења температура топљења.

Једињења типа II-VI су такође релативно добро проучена. Кадмијум телурид (CdTe) се користи као монокристална подлога за наношење танких монокристалних слојева појединих суперрешетака који се затим могу користити као детектори инфрацрвеног зрачења. Живин телурид (HgTe), који има особине полуметала, се користи за израду суперрешетака и такође за израду детектора инфрацрвеног зрачења. Велики практични значај има легура $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ која се добија легирањем HgTe и CdTe . Легирањем ова два материјала могу се добити легуре чија енергија енергетског процепа може да се смањи до нуле са повећањем вредности x . У зависности од вредности x , одговарајуће легуре се могу користити за израду фотодетектора у различитим интервалима таласних дужина.

Једињења типа IV-VI имају средњи број валентних електрона пет, тако да не могу да образују тетраедарске ковалентне везе. Због тога ова једињења најчешће имају кристалну решетку типа натријум хлорида. Најзначајнија су једињења олова тзв. олово халкогениди: олово телурид (PbTe), олово селенид (PbSe) и олово сулфид (PbS), који се одликују позитивним температурским коефицијентом промене ширине енергетског процепа, што је карактеристично и за њихове легуре са калај халкогенидима.

Од осталих двокомпонентних једињења треба поменути силицијум карбид (SiC), који се јавља као α и β модификација. Ово једињење садржи 70.045% масеног удела Si и 29.955% масеног удела C. Веома се ретко налази у природи, а најчешће се користи за израду нисконапонских извора светлосних сигнала малог шума и бројача високоенергетских честица. Силицијум карбид допиран атомима алуминијума, бора или

берилијума користи се за израду LED у целом опсегу видљивог дела спектра електромагнетног зрачења.

Једињења типа III-VI се одликују слојевитом монокристалном структуром у којој унутар слојева доминирају ковалентне везе, док су слојеви међусобно повезани slabим Ван дер Валсовим везама. Због тога се ова једињења лако цепају на изузетно танке слојеве. Посебно су интересантне магнетне полупроводничке легуре $Cd_{1-x}Fe_xTe$ и $Hg_{1-x}Fe_xTe$, чија ширина енергетског процепа може да се мења деловањем спољашњег магнетног поља на магнетне јоне гвожђа у кристалној решетки.

Што се тиче трокомпонентних и вишекомпонентних полупроводничких једињења, очекује се њихова све већа примена, посебно у области нелинеарне оптике за израду модулатора, прекидача, филтера итд. Могућности примене полупроводничких материјала су изузетно велике узимајући у обзир могућност формирања великог броја њихових легура различитог састава.

10.4.3. Органски полупроводнички материјали

У органске полупроводничке материјале спадају традиционални молекуларни кристали, металоорганички и органички комплекси са преносом наелектрисања и полимерни материјали. У одређеним условима они могу имати и диелектрична, метална или суперпроводна својства. Основни структурни елементи ових материјала су молекули или ланци молекула са делимично попуњеном валентном зоном. Предмет сталног истраживања су проводни полимерни материјали, који се могу контролисано допирати и на тај начин се њихове особине могу мењати у веома широком интервалу.

Најзначајнији органички полупроводнички материјали су: полиацетилен, ароматични угљоводоници, графит, полисумпор нитрид, полидиацетилен итд.

Полиацетилен $(C_2H_2)_n$ (polyacetylene, PAc или по IUPAC-у polyethyne) спада у органске полимере чија се електрична отпорност може мењати у врло широком интервалу $(10^5 - 10^{-5}) \Omega m$, приликом допирања донорима алкалних метала или акцепторима халогена AsF_3 . Експериментална испитивања термичке стабилности полиацетилена показала су да полиацетиленски слојеви имају добру термичку стабилност у вакууму. До разлагања овог полимера долази тек на температурама од 598 K. Врло често се високолегирани полиацетилен понаша као класичан

метал, што значи да се енергија забрањене зоне своди на нулу или чак долази до преклапања проводне и валентне зоне.

Ароматични угљоводоници такође спадају у потенцијалне полупроводничке материјале. Графит се може сматрати граничним представником свих ароматичних полицикличних низова. Он има карактеристичну слојевиту структуру, где се слојеви са хексагоналном симетријом ређају наизменично један изнад другог. Како је веза између слојева слаба, графит може да се легира увођењем донора или акцептора између слојева. На тај начин се специфична електрична проводност дуж дводимензионалних слојева знатно повећава, јер се на тај начин повећава густина носилаца наелектрисања. Анизотропија електричне проводности графита може се смањити или повећати у зависности од типа легирајућих примеса.

Полисумпор нитрид $(\text{SN})_n$ (polymeric sulfur nitride или polythiazyl) је безбојан дијамагнетни кристал, који је стабилан само на ниским температурама. Атоми сумпора и азота образују ланце који практично леже у једној равни. Електрична проводност полисумпор нитрида се повећава са смањењем температуре све до преласка у суперпроводно стање ($\approx 0.26 \text{ K}$). Треба уочити да је ово материјал који не садржи атоме метала, али може да пређе у суперпроводно стање, из чега се може закључити да и полимерни материјали могу да буду суперпроводници.

Полидиацетилен (polydiacetylene, PDA) је типичан електрично активан полимер са већим степеном кристалне уређености у односу на полисумпор нитрид. Он спада у диелектрике и садржи веома мали број носилаца наелектрисања. Однос покретљивости носилаца наелектрисања у правцу полимерног ланца и нормално на овај правац износи око хиљаду. Енергија ширине забрањене зоне зависи од природе бочних група на полидиацетилену и износи од $(2.1 - 2.6) \text{ eV}$.

По мишљењу многих истраживача органски полупроводни материјали су врло перспективни и значајни за развој микроелектронике. Могу да се користе за израду електронских компонената и биочипова, као и за електростатичку заштиту.

10.4.4. Полупроводничке суперрешетке

За добијање полупроводничких суперрешетки најчешће се користи метода заснована на полупроводним танкослојним структурама у облику периодичног система р-п прелаза или хетеропрелаза. Облик додатног периодичног потенцијала у случају р-п прелаза формира се јонизованим атомима донора и акцептора. Материјали за израду хетероструктурних

суперрешетки треба да имају што је могуће ближе вредности константи кристалне решетке. Осим тога захтева се и велика покретљивост носилаца наелектрисања у почетном полупроводном материјалу. Овакве захтеве доста добро испуњавају једињења типа III-V.

Углавном се користе суперрешетке у којима се енергетски процеп једног полупроводника налази унутар енергетског процепа другог полупроводника. Ако је дебљина слојева другог полупроводника са мањим енергетским процесом мања од де Брољевих таласних дужина електрона и шупљина, онда су њихове енергије квантоване у правцу осе суперрешетке. У том случају долази до цепања валентне и проводне зоне полупроводника са мањим енергетским процесом на дводимензионалне енергетске подзоне, што изазива ефективно повећање енергетског процепа.

Особина промене ефективног енергетског процепа у зависности од дебљине слоја има значајну улогу у добијању нових материјала, јер се свака полупроводничка суперрешетка понаша као полупроводнички материјал са новим особинама битно различитим од особина полазних материјала.

Обично се за израду полупроводничких суперрешетки користе монокристални слојеви материјала чије се константе решетке разликују за мање од 2%. У такве материјале спадају следеће комбинације: GaAs-AlAs, CdTe-HgTe, InAs-GaSb, PbTe-HgTe итд. Суперрешетке се могу израђивати и од појединих трокомпонентних и четворокомпонентних легура на подлози од индијум фосфида InP.

Дакле, променом дебљине слојева, која спада у лако контролисане параметре, могу се добити материјали са унапред задатим особинама, односно захтеваном енергијом ширине забрањене зоне.