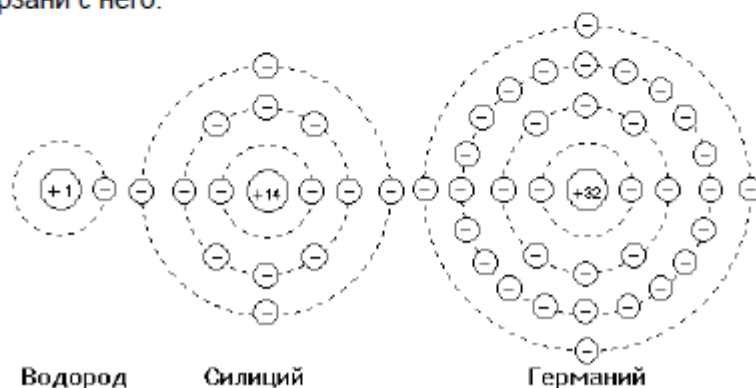


1. Строеж на веществото.

Всеки атом се състои от ядро с положителен електрически заряд, около което обикалят електрони. На фиг. 12.1 са показани схематично атомите на водорода, силиция и германия. Положителния заряд на ядрата е равен на сумарния отрицателен заряд на обикалящите около ядрото електрони и поради това като цяло атома е електрически неутрален. Електроните се движат около ядрото по сложни кръгови и елиптични орбити, като максималния брой на електроните в първата (най-близката до ядрото) орбита може да бъде 2, във втората 8, в третата 18, в четвъртата – 32 и т.н. Електроните от най-външната орбита играят най-голяма роля при образуването на молекулите и кристалите, тъй като те участват в образуването на химичните връзки. Те се наричат *валентни електрони*, и техният брой определя валентността на химичните елементи. Валентните електрони са най-отдалечени от ядрото и са най-слабо свързани с него.



Фиг. 12.1.

При определени условия (например удар между частиците вследствие на топлинните им движения, на електрическо поле, на облъчване с различни лъчи и др.) електроните могат да напуснат атома. В такъв случай положителните заряди в ядрото няма да бъдат неутрализирани и атомът става положително наелектризиран. Възможно е не само откъсване но и присъединяване на електрони към атома и в този случай той става отрицателно наелектризиран. Откъсването и присъединяването на електрони се нарича *йонизация*. Едновременно с йонизацията във веществото се наблюдава и обратния процес – *рекомбинация*, при който положителни йони се свързват с електрони, а отрицателните губят електрони и така се превръщат отново в електрически неутрални атоми.

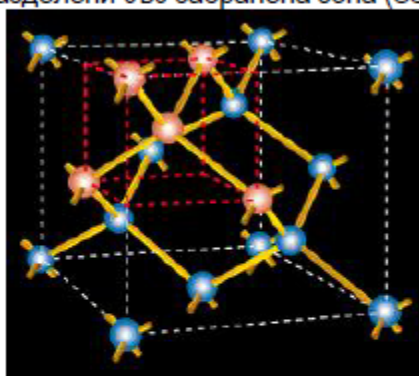
Електроните могат да се движат около ядрото не по произволни а само по строго определени орбити. Това означава, че те могат да получават или отдават само строго определени "порции" енергия.

Полупроводниците са вещества с преобладаващо **ковалентна** химична връзка. При нея между всеки два съседни атома се образува обща двойка електрони. Тази конфигурация е стабилна и ако в кристала няма примеси и разкъсани ковалентни връзки няма и свободни токови носители.

Ако енергията на свободен електрон във вакуум се приеме за ориентир, то всички електрони в кристала имат по-малка енергия (припомняме, че за устойчиво равновесие една система заема положение с минимална енергия).

Зони (на енергиите) в полупроводниците.

Всеки атом в Ge и Si е свързан ковалентно с четирите равноотстоящи от него съседни атоми, като валентните електрони на съседните атоми образуват общи електронни двойки. За Ge и Si тези електрони в даден атом са 4 на брой. Енергията на тези електрони съответства на валентната зона. На фиг. 12.4 б е показана енергетичната схема на кристала – валентната зона (ВЗ), проводимата зона (ПЗ), разделени със забранена зона (ЗЗ).

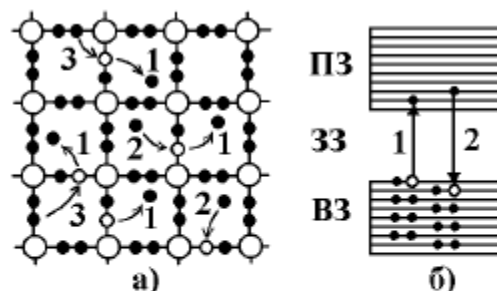


Фиг. 12.3. Модел на кристалната решетка на силиций.

В най-общия случай в един такъв кристал са възможни следните процеси (преходи):

1 - Електрон (●) се откъсва от валентна връзка и преминава в междувъзлиято (става **свободен електрон**). Енергетически това съответства на преход на електрона от валентната в проводимата (свободната) зона. На фиг. 12.4 а и 12.4 б този преход е означен с 1. Освободеното (пространствено или енергетически) място се нарича **дупка** (○) – **р носител**. Преходът 1 е свързан с приемане на енергия от електрона и може да бъде осъществен само при наличие на достатъчно енергетично външно въздействие (загриване или облъчване).

2 - Свободен електрон (●) (с енергия съответстваща на проводимата зона) се движи хаотично в кристала и срещайки р носител (○) заема неговото място (преход 2). Енергетически електронът преминава от проводимата във валентната зона. Този процес се нарича **рекомбинация**. Той се извършва случайно (поради хаотичното движение на електрона) и е свързан с отделяне на енергия.



Фиг. 12.4.

Ще обърнем внимание, че дупките не са реални частици. Те са просто места, освободени от електрони. Въвеждането на понятието "дупка" (тя се

нарича още p-носител, защото има положителен електричен заряд) улеснява изграждането на теорията на полупроводниците.

Електропроводимост на полупроводниците.

Собствена проводимост на полупроводниците.

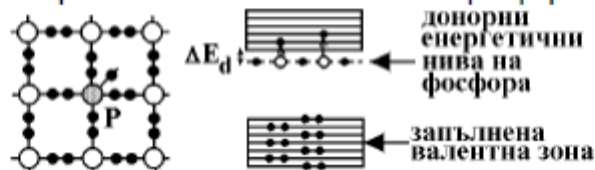
Собствената проводимост възниква при йонизация на полупроводника, в резултат на преход на електрон от валентната зона в проводимата зона (преход 1 на фиг.12.3). В този случай концентрацията на електроните в проводимата зона е равна на концентрацията на дупките във валентната зона. Всеки електрон преминал в проводимата зона оставя свободна дупка във валентната зона.

За получаването на свободни електрони и дупки (в условията на собствена проводимост) е необходима минимална енергия ΔE , равна на ширината на забранената зона. Йонизация се получава, ако предадената енергия е по-голяма или равна на ΔE .

Когато енергетичната бариера ΔE се преодолява чрез облъчване σ е право пропорционална на интензитета на лъчението.

Примесна проводимост на полупроводниците.

Примесната проводимост възниква, когато някои атоми на полупроводника се заменят с такива, чиято валентност се различава от тази на основните атоми на кристалната решетка. На фиг.12.5 и 12.6 е изобразена споменатата вече решетка на силиций с примеси съответно от атоми на фосфор и бор.



Фиг. 12.5

Нека валентността на примесения атом е с единица по-голяма от тази на основния атом (например фосфор в Ge или Si) – фиг.12.5. Фосфорът има 5 валентни електрона, като 4 от тях той отдава за образуване на ковалентни връзки със съседните Ge (Si) атоми. Петият електрон се оказва излишен и е много слабо свързан с фосфора. Той може да се отдели лесно от фосфорния атом, при което се получава свободен електрон и свързана с фосфора дупка.

За разлика от случая на собствен полупроводник сега отделянето на електрона не води до нарушение на ковалентната връзка и образуване на свободна дупка. Ефективният положителен заряд, който възниква около фосфора при отделянето на електрона е свързан с него и не може да се премества свободно из кристалната решетка. Този заряд се разглежда като свързана с фосфорния атом дупка. При полупроводници с такъв вид примеси възникват само един вид свободни токови носители (в случая електрони). Такъв полупроводник притежава **електронна или n-проводимост**. Примесите, които обуславят електронната проводимост, т.е. отдават електрони се наричат **донори**. Енергетическите нива на донорите са много близко до дъното на проводимата зона. За отделянето на електрон в проводимата зона (за получаването на свободен електрон) е необходима енергия ΔE_d , която е много по-малка от ширината на забранената зона. Поради това донорите са източници на

свободни електрони при температури значително по-ниски от температурите, при които се наблюдава собствена проводимост. За Ge и Si това са температури около стайната.



Фиг. 12.6

По-нататък разглеждаме примесен атом, чиято валентност е с единица по-ниска от тази на основния атом (например бор в Ge или Si) – фиг.12.6. Елементът бор има 3 валентни електрона. Те се оказват недостатъчни за образуване на ковалентни връзки с 4^{те} съседни. Една от връзките остава незапълнена и представлява място с ефективен положителен заряд, което може да захваща електрони (свързана с примеса дупка). Това място много лесно може да бъде заето от електрон от съседните ковалентни връзки, т.е. електрон от валентната зона, при което се получава свободна дупка – p токов носител (фиг.12.6). Електронът, захванат от примеса не е свободен и не може да участва в проводимостта. По такъв начин в полупроводник с примеси с по-ниска валентност се получават също един вид токови носители (p токови носители). Проводимостта на такъв полупроводник се нарича **дупчеста или p-проводимост**, а примесите, обуславящи този вид проводимост – **акцептори** (примеси, приемащи електрони).

Контакт между p – тип и n – тип полупроводник (p-n преход).

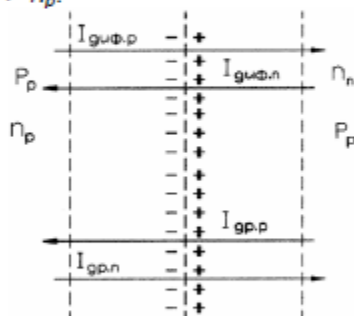
Разглеждаме два полупроводника – единият акцепторен (с концентрация на акцепторите N_a), а другият – донорен (с концентрация на донорите N_d). Нека освен това $N_a = N_d$ и полупроводникът от p-тип не съдържа донори, а този от n-тип няма акцептори.

Един начин за получаване на идеален контакт (p-n-преход) е използването на дифузия в противоположни посоки на донорни и акцепторни примеси в достатъчно чист монолитен кристал. В такъв кристал p-n преходът се получава в мястото на срещата на двата дифузионни потока (например на P и на B в Ge или Si). За по-добро изясняване на процесите, протичащи при образуване на p-n-прехода ще смятаме, че първоначално двата образеца (единият с p проводимост, а другият – с n проводимост) са отделни. Непосредствено след контакта им започва дифузия на електрони от n- към p полупроводника и на дупки от p- към n полупроводника (фиг. 13.2). Дифузията е процес, който се

дължи на топлинното движение на частиците и винаги води до формиране на поток частици, насочен от областта с по-голяма концентрация към тази с по-малка. Електроните, навлезли в p областта се захващат от незапълнени акцептори, а дупките, навлезли в n областта – от нейонизирани донори. В резултат на това се формира двоен електрически слой с положителен заряд от страната на полупроводника и отрицателен в p полупроводника. Между двата слоя, разстоянието между които е около $10 - 20 \mu m$, се създава силно електрично поле (с големина на интензитета $E_p \approx 2 \cdot 10^4 V/m$). Такава система от два слоя, формирана по този начин, се нарича **$p-n$ преход**. Създаденото в $p-n$ прехода електрично поле по-нататък възпрепятства дифузията на електрони от

n - към p -областта и на дупки от p - към n - областта, т.е. $p-n$ преходът е бариера за основните токови носители. Преходният период на създаване на двойния слой трае милисекунди, след което преходът преминава в равновесно (стационарно) състояние.

При нормална температура всички примесни нива са възбудени и концентрацията на основните носители е съответно: P_p на P носителите в P областта и n_n - на n носителите в n областта. Същевременно в двете области има и неосновни токови носители с концентрация P_n и n_p , като са изпълнени неравенствата $P_p \gg P_n$ и $n_n \gg n_p$.



Фиг. 13.2.

Този градиент на концентрацията е причина за поява на два дифузионни потока: на P -носители от P към n областта и на n носители в обратна посока. Резултантният дифузионен ток през $P-N$ прехода е: $I_{диф} = I_{диф p} + I_{диф n}$. Проникналите P носители в n -областта рекомбинират с електроните, поради което концентрацията на електроните в тази област намалява. Аналогично проникналите в P -областта n -носители рекомбинират с P -носителите.

Така в резултат на дифузията от двете страни на границата между двете области се получава зона бедна на основни носители на заряд, с повишено съпротивление, като P -областта има неподвижни отрицателни заряди - йонизирани акцептори, а в n -областта - неподвижни положителни заряди - йонизирани донори. Тези заряди създават електрично поле, което противодейства на дифузията на основните токови носители, т.е. за тях съществува запиращ слой или потенциална бариера - ϕ . Появилата се потенциална разлика създава в $P-N$ -прехода дрейфови токови носители - $I_{p \partial p}$ и $I_{n \partial p}$, а общият дрейфов ток е $I_{\partial p} = I_{n \partial p} + I_{p \partial p}$. Той тече в противоположна посока на дифузионния ток. При липса на външно електрично поле резултантният ток през $P-N$ -прехода е равен на нула:

$$I = I_{диф} - I_{\partial p} = 0. \quad (13.3)$$

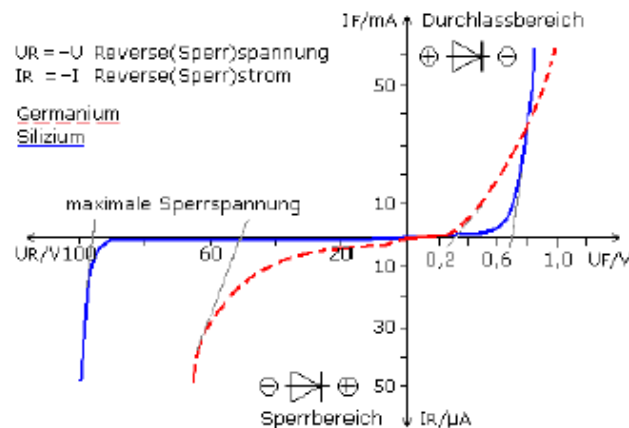
Ако се приложи външно електрично поле обратно на контактното, потенциалната бариера ще се понижи. Това ще доведе до нарастване на дифузионния ток, докато токът на неосновни токови носители не се променя.

Ако се приложи външно електрично поле обратно на контактното, потенциалната бариера ще се понижи. Това ще доведе до нарастване на дифузионния ток, докато токът на неосновни токови носители не се променя.

Тогава за сумарния ток през $P-N$ -прехода се получава

$$I = I_{\text{diff}} - I_{\text{sp}} = (C_p P_n + C_n n_p) \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (13.8)$$

където I_s се нарича "наситен" или термичен ток на $P-N$ -прехода.



Фиг.13.3. $V-A$ характеристика на диод.

При прилагане на обратно напрежение

$$I = I_s \left(e^{\frac{-qU}{kT}} - 1 \right), \quad (13.10)$$

т.е. обратният ток е почти постоянен и не зависи от напрежението. Това е вярно до определена стойност на напрежението, след което настъпва пробив на $P-N$ -прехода.

Фотопроводимост на полупроводниците.

Източници на енергия за образуване на свободни токови носители в полупроводниците, освен разгледаното вече топлинно въздействие, могат да бъдат и други процеси: облъчване с достатъчно енергетични лъчения (γ -лъчи, рентгенови лъчи, ултравиолетови лъчи, светлина), облъчване с бързи електрони, с α -частици и др. За фотопроводимост обикновено се говори, когато кристалът се облъчва с оптично лъчение (ултравиолетово лъчение (УВ – лъчи), светлина, инфрачервено лъчение (ИЧ – лъчи)). При фотопроводимостта свободните токови носители възникват за сметка на непосредствено кратковременно поглъщане на енергия, при което топлинната енергия на кристалната решетка остава практически непроменена. В този случай топлинното равновесие между кристалната решетка и свободните токови носители се нарушава, т.е. свободните токови носители, получени в резултат на облъчване са неравновесни.

Изменението на съпротивлението (проводимостта) на полупроводниците при облъчване се нарича **вътрешен фотоефект**. При облъчване, ако лъчението се разглежда като поток от фотони, поглъщането на фотони с различна енергия може да предизвика преходи на електроните (респективно дупките)

Слънчева (соларна) фотоклетка.

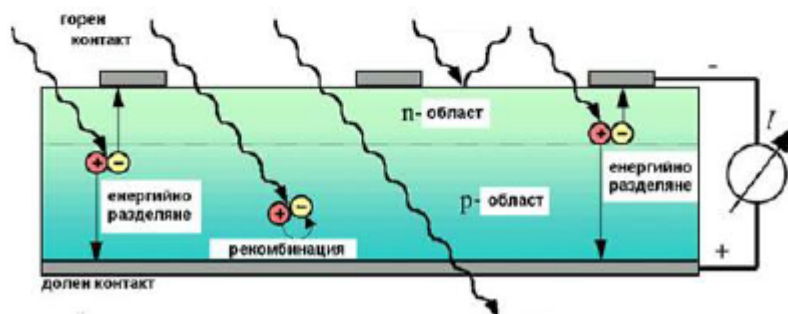
Веднага след изобретяването на р-п прехода (1949) се търси възможност за използване на фотоволтаичния ефект за преобразуване на светлинната в електрическа енергия (1954).

Основата на фотоелектричното превръщане е директното въздействие на слънчевото лъчение върху електроните на полупроводниците. За получаване на електрическа енергия от слънчевото лъчение е необходимо да бъдат изпълнени следните условия:

- Трябва да бъде погълнат фотон, чиято енергия да предизвика вътрешен фотоефект. Поради това фотоните трябва да притежават достатъчна енергия за преодоляване на забранената зона.

- За да се избегне повторното им свързване, образуваната двойка електрон-р токов носител трябва да бъде разделена в определен момент. При слънчеви елементи това се постига с помощта на р-п преходи. Електрическото поле разделя нововъзникналата на р-п прехода двойка електрон - р носител, като електронът се насочва към n-материала, а р носителят към р-материала –

фиг. 13.4.



Фиг. 13.4. Схема на слънчева фотоклетка.

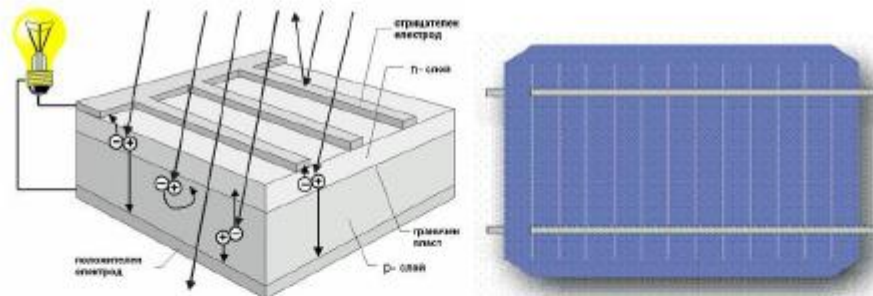
3. Разделените заряди трябва да се отведат при консуматора, преди да са се свързали отново и загубили потенциалната си енергия. К.П.Д. на слънчевите фотоелементи се определя от получената от съотношението между произведената от фотоелемента електрическа енергия и падащата енергия от Слънцето.

Материали за фотоволтаични клетки.

Днес слънчевите клетки основно се изработват от поли-Si (95 %), PbTe и GaAs. Основните изисквания към материала за фотоволтаична клетка е ширината на забранената зона да е съгласувана със спектъра на слънчевата светлина, да има висока подвижност на токовите носители и дълго време на живот на носителите.

Устройство на фотоволтаични модули.

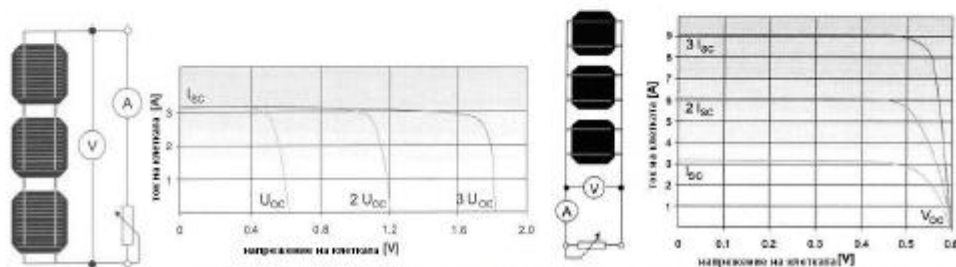
На фиг. 13.5 е показана фотоволтаична клетка. За най-широко разпространените силициеви фотоволтаични клетки размерите са 10×10 cm, а стойностите на тока и напрежението са: $I_{sc}=3.5$ A, $V_{oc}=0.55$ V. Това означава, че за практически приложения използването на една фотоволтаична (PV) клетка е твърде ограничено – там, където е достатъчно напрежение 0,55 V. В повечето случаи е необходимо напрежение 12V или 220 V. Затова се налага да се свържат няколко PV клетки последователно. Конструкция, която се състои от 36-40 последователно свързани PV клетки, се нарича фотоволтаичен (PV) модул.



Фиг. 13.5. Устройство на слънчева фотоклетка.

Свързването е последователно или паралелно. На фиг. 13.7 е показано последователно свързване, а на фиг. 13.8 – паралелно.

Реалната стойност на коефициента на полезно действие на силициевите фотоволтаични клетки е около 12 - 15%, а на тези от галиев арсенид достига 20 – 22%.



Фиг. Последователно и паралелно свързване на фотоволтаични клетки.

Истинските проблеми, свързани с използването на фотоволтаични соларни панели обаче се крият не в техния коефициент на полезно действие, а са по – дълбоки и принцитни. След повече от 40 години технологични усъвършенствания балансът на енергиите сочи, че енергията, необходима за производството на фотоволтаичен панел е повече от енергията, която може да се получи от него през целия му живот (15 – 20 години). Тоест при използването на фотоволтаични слънчеви електроцентрали да се говори за енергийна ефективност е меко казано неуместно. При това трябва да се отбележи и че получаваната от фотоволтаици електроенергия е с лошо качество. Това разбира се не означава, че те не трябва да бъдат използвани – напротив, има места (отдалечени, без централно електроснабдяване и др.), където приложението на фотоволтаиците е напълно обосновано – фиг. 13.9.