

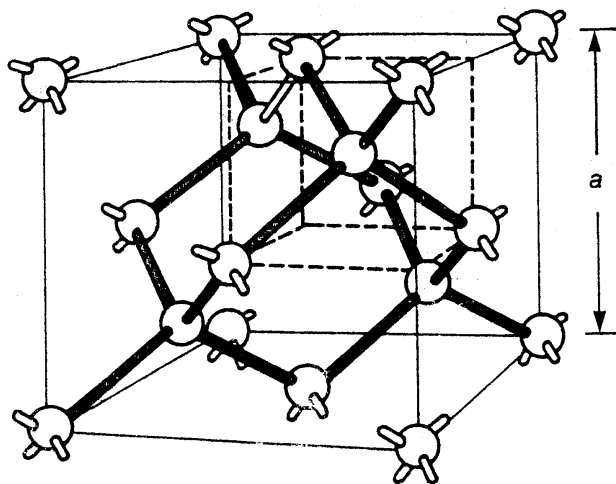
r. 1947 W. Shockley, J. Bardeen a W. Brattain, zahájil epochu polovodičové elektroniky, která se rozvíjí dodnes.

2.2. Polovodiče

Lze je definovat jako látku, která má elektronovou bipolární vodivost, tj. vedení elektrického proudu je v ní zprostředkováno elektrony a dírami, a jejíž elektrická vodivost se zvětšuje se vzrůstající teplotou. Význačnou vlastností polovodičů je schopnost měnit svou vodivost vlivem, vnějších fyzikálních dějů – působením tepla, světla, elektrického pole, magnetického pole apod., nebo přidáním nepatrného množství příměsí (tj. cizích atomů) do čisté látky polovodiče.

Vliv některých vnějších fyzikálních dějů na polovodič vynikne při porovnávání základních vlastností vodiče – lineární závislost a nelineární závislost. [5].

Polovodiče jsou obvykle tuhé (krystalické nebo amorfní) nebo kapalné látky. Většina dnes vyráběných součástek je z polovodičů **diamantové krystalové struktury** (např. **Ge** – germanium, **Si** - křemík).



diamantová mřížka Si

Obr. 2-3 Ukázka diamantové mřížky u Si

2.3. Vlastní a nevládní polovodiče

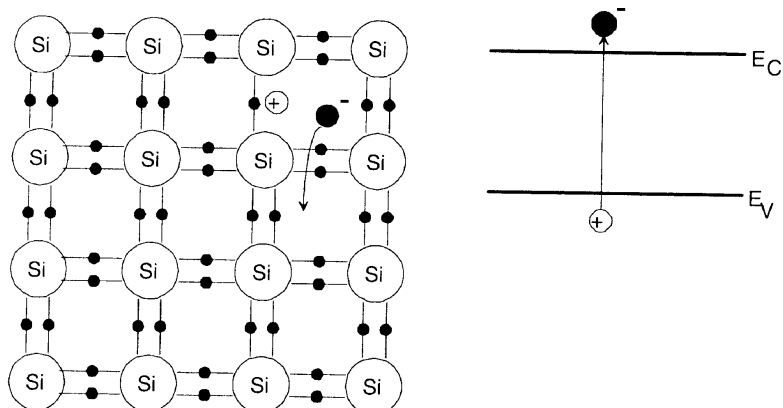
2.3.1. Elektrická vodivost polovodičů

U polovodičů existují dva typy vodivosti, tzv. vlastní a nevládní vodivost. **Vlastní** (intrinsická) **vodivost** se vyznačují všechny polovodiče, **nevládní vodivost** existuje jen u tzv. **příměsových** (dotovaných, extrinzičských, nevládních, legovaných) polovodičů.

2.3.2. Vlastní polovodiče

Dokonalý vlastní polovodič (dokonalý krystal bez poruch a příměsí) se v přírodě nevyskytuje, při pečlivé výrobě se mu však můžeme přiblížit. Vlastní (intrinzičský) polovodič se podobá izolantu. Za teploty **0 K** je vodivostní pás prázdný, tj. v polovodiči nejsou žádné volné elektrony, které by mohly vést proud. Vlivem teploty nebo jiného vnějšího vlivu však může elektron získat dostatečnou energii a "přeskočit" do vodivostního pásu. Hovoříme o tzv. **ionizaci**, k níž je nutné určité množství tzv. **ionizační energie**. **Ionizační energie** (užívá se i termín aktivační energie) je nutná k překonání zakázaného pásu a uvolnění elektronu z vazby, její velikost musí tedy být nejméně E_G .

Elektron, který se uvolní, zanechá po sobě ve valenčním pásu atom postrádající jeden elektron (chová se potom jako kladný iont). Tento kladný iont se může zneutralizovat přijetím elektronu, který k němu přejde ze sousedního atomu. Tím se však z tohoto sousedního atomu stane kladný iont a může být opět zneutralizován příchodem dalšího elektronu. Vidíme, že atomy se jako pevná součást mřížky nepohybují, ale kladný náboj se může přemisťovat. Tento kladný náboj nazýváme **díra**. Přestože **díra** jako reálná částice neexistuje, je užitečné jí přiřadit některé vlastnosti materiální částice (podobné, jako má elektron, ale opačný náboj **+q**).



Obr. 2-4 Vznik páru elektron díra.

Ve vlastních polovodičích mohou tedy přenášet elektrický proud za teplot nad 0 K jednak volné elektrony ve vodivostním pásu (každý elektron přenáší náboj $-q$), jednak pohyblivé díry ve valenčním pásu (náboj $+q$).

Pro obě tyto částice se užívá název **nosiče** (nebo **nositelé**) **náboje**. Protože současně vzniká volný elektron a pohyblivá díra, hustota elektronů se rovná hustotě děr:

$$\mathbf{n = p = n_i} \quad (2-2)$$

kde \mathbf{n} je počet elektronů,

\mathbf{p} je počet děr,

$\mathbf{n_i}$ je intrinzická koncentrace nosičů na jednotku objemu; podle soustavy SI je to 1 m^3 , v praxi i v literatuře se však běžně používá 1 cm^3 .

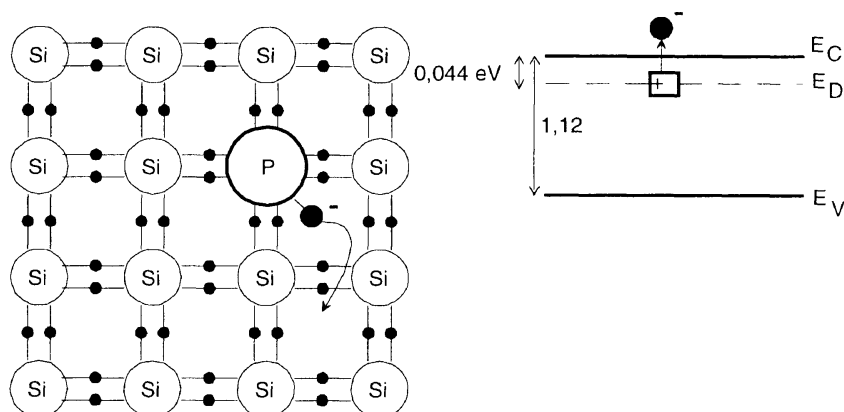
Je užitečné si zapamatovat, že intrinzická koncentrace nosičů je při 300 K pro křemík 10^{16} m^{-3} (10^{10} cm^{-3}) a pro germanium 10^{19} m^{-3} (10^{13} cm^{-3}), intrinzická koncentrace však silně závisí na teplotě. Proces uvolňování elektronů při ionizaci atomů nezpůsobuje změnu výsledného náboje daného objemu polovodiče (po uvolněním elektronu zůstává v krystalové mřížce ionizovaný atom s kladným nábojem).

Vlastní polovodiče jsou tedy při teplotách kolem 300 K vodiče elektrického proudu, vlivem závislosti intrinzičké koncentrace na teplotě i jejich vodivost silně závisí na teplotě. Rozsah jejich měrných odporů je přibližně 10^{-2} až $10^9 \Omega\text{cm}$ (dobré vodiče mají měrný odpor $< 10^{-6} \Omega\text{cm}$, izolanty $> 10^{14} \Omega\text{cm}$).

2.3.3. Nevlastní polovodiče

Na elektrickou vodivost polovodičů mají výrazný vliv cizí atomy zabudované do krystalové mřížky (poruchy), které jsou v reálném krystalu vždy přítomny. Příměsové atomy jsou do co nejčistšího materiálu zaváděny i uměle, abychom získali materiál s vhodnými elektrickými vlastnostmi. Tento technologický postup, kdy se do základního materiálu přidávají atomy cizích prvků, nazýváme **dotování** (nebo též dopování či legování; přidávaná látka se nazývá **dopant** či legura). Nejčastěji přítom vstupují atomy příměsí do krystalové mřížky jako náhrada některých původních atomů (tzv. substituce).

Polovodič typu N



Obr. 2-5 Příměsový polovodič typu N.

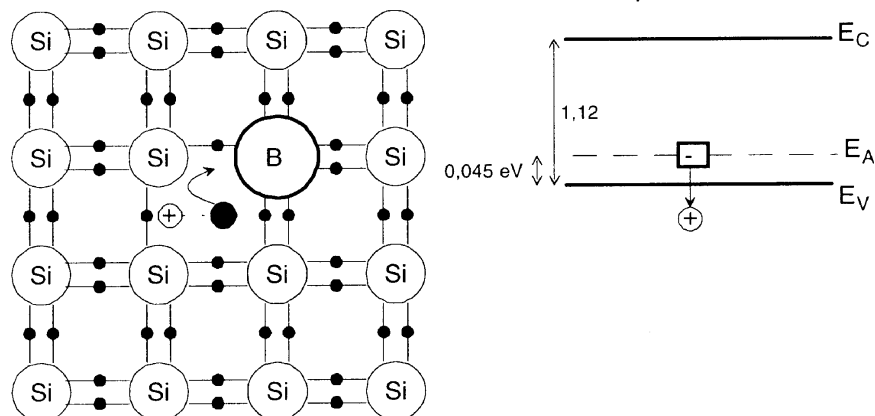
Je-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku (prvku IV. skupiny - např. Si, Ge) nahrazen atomem pětimocného prvku (prvku V. skupiny - např. P, As, Sb), pak čtyři z jeho valenčních elektronů se účastní vytvoření vazby se sousedními atomy, pak elektron je nadbytečný a je vázán k atomu velmi slabě. Tento elektron může být uvolněn dodáním velmi malé (aktivační) aktivační energie a účastnit se vedení

proudu. Typická hodnota aktivační energie je asi 0,05 eV pro běžné příměsi v Si; každá příměs má svoji typickou hodnotu aktivační energie. Tuto energii elektron získá už při nízkých teplotách, takže při pokojové teplotě jsou téměř všechny atomy příměsi ionizovány. Vznikají tak kladné ionty příměsí, které zůstávají v mřížkových polohách, a volné elektrony. Proto se pětimocné příměsi nazývají **donory** (dodávají elektrony do vodivostního pásu).

V pásovém diagramu vytvářejí donorové atomy tzv. **donorovou hladinu** (s energií E_D), která se nachází v zakázaném pásu těsně pod dnem vodivostního pásu (E_C) - viz Obr. 2-5. V polovodiči typu **N** (v polovodiči s elektronovou vodivostí) převažují jako nosiče proudu elektrony, nazýváme je proto **majoritní nosiče**.

Polovodič typu P

Podobně nahradíme-li atom krystalové mřížky čtyřmocného prvku atomem trojmocného prvku (prvku III. skupiny - např. B, In, Ga, Al), pak se všechny tři jeho valenční elektrony účastní vazeb se sousedními atomy a čtvrtá zůstane neúplná. Stačí malá energie k tomu (opět typická hodnota je asi 0,05 eV pro Si), aby se některý z elektronů ze sousedních vazeb uvolnil a zaplnil neúplnou vazbu trojmocného atomu - tj. trojmocný atom se ionizuje záporně a vytvoří v sousedství "kladnou" díru (tj. nedostatek jednoho elektronu). Tato díra se může pohybovat a umožnit tak vedení proudu (působí-li na ni vnější elektrické pole). Trojmocné příměsi se nazývají **akceptory** (přijímají, lépe řečeno zachycují elektrony z valenčního pásu). V pásovém diagramu vytvářejí akceptorové příměsi tzv. **akceptorovou hladinu** (s energií E_A),



Obr. 2-6 Příměsový polovodič typu P.

ležící těsně nad stropem valenčního pásu (E_V) - viz Obr. 2-6. Již za malé teploty jsou téměř všechny akceptorové příměsi ionizovány a ve valenčním pásu jsou vytvořeny díry, které v polovodiči typu P (v polovodiči s děrovou vodivostí) převažují jako nosiče proudu - majoritními nosiči jsou zde díry.

Vodivost příměsových polovodičů (typu N a P) se nazývá souborně **nevládní** (extrinzičnou) **vodivostí**. Při ionizaci (aktivaci) příměsi vzniká jeden pohyblivý nosič a jeden nepohyblivý iont. Při ionizaci atomů ve vlastních (intrinzičských) polovodičích vzniká pohyblivý elektron a pohyblivá díra.

Případ vlastního polovodiče bez příměsi i případy čistě donorového nebo čistě akceptorového polovodiče (bez příměsi opačného typu) jsou případy pouze teoretické, protože reálné technologické možnosti nám neumožňují takovéto ideální polovodiče vyrobit.

Při zvyšování koncentrace příměsí se donorové nebo akceptorové hladiny štěpí - vznikají pásy příměsí. Při velké koncentraci příměsí splývá akceptorova hladina s valenčním pásem a donorova hladina s vodivostním pásem - polovodič se chová jako kov (**degenerovaný polovodič**).