

4.3.2 Vlastní a příměsové polovodiče

Předpoklady: 4204, 4207, 4301

Pedagogická poznámka: Pokud budete postupovat normální rychlostí, skončíte u negativní vodivosti. Není to žádný problém, pozitivní vodivost si žáci doplní sami. Na dvě hodiny je látky málo.

Tři „divné“ součástky:

Dioda (její voltampérová charakteristika), propouští proud pouze v jednom směru, navíc:

- v **propustném směru** se dlouho nic neděje, při určitém napětí (různém pro různé diody) začne téct čím dál větší proud (závislost není lineární, ale proud roste rychleji),
- v **závěrném směru** s napětím roste proud (ale jeho velikost je o několik řádů menší než v propustném směru).

Termistor

Součástka, která funguje obráceně než žárovka, s rostoucí teplotou se její odpor zmenšuje.

Fotorezistor

Součástka, jejíž odpor záleží na tom, jak moc na ní svítíme (na světle - malý odpor, ve tmě - velký odpor).

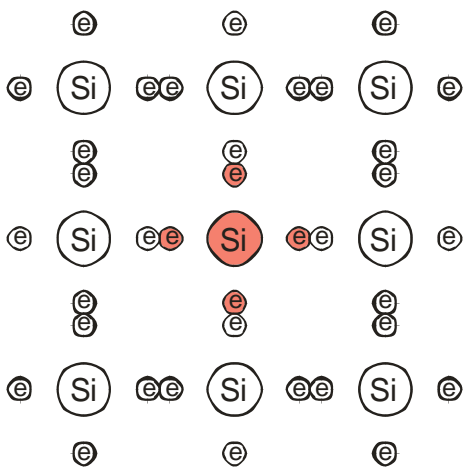
Funkci těchto součástek nevysvětlíme pomocí vedení proudu ve vodičích \Rightarrow musí existovat další skupina látek, která se k proudu chová jinak než vodiče nebo nevodiče.

Polovodiče (nejznámější příklad je křemík Si)

Měrná vodivost látek ρ : vodiče $\rho < 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$,
nevodiče $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$,
polovodiče $10^8 > \rho > 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ \Rightarrow vodivostí jsou něco mezi vodiči a nevodiči, ale tento údaj nevysvětluje chování zmiňovaných součástek.

Poznámka: Vysvětlení podávaná v této kapitole nejsou z hlediska vysokoškolské fyziky (lépe řečeno opravdové fyziky) správná. Správný fyzikální popis vyžaduje použití kvantové mechaniky a pásové struktury elektronových slupek u krystalů pevných látek. Místo správného vysvětlení se ve středoškolských učebnicích používá zjednodušená představa elektronů, jako kuliček vytvářejících vazebné dvojice. Většina jevů jde kupodivu vysvětlit i tímto způsobem, některé (například Zenerův průraz) ne. Autor tohoto textu se přiklání k použití klasického středoškolského vysvětlení než nevysvětlovat vůbec, protože správnější vysokoškolský přístup je na střední škole asi nedosažitelným snem. Jistou oporou tohoto názoru je kapitola o tranzistoru ve Feynmanových přednáškách.

Křemíkový krystal při absolutní nule (nebo o hodně nízké teplotě)



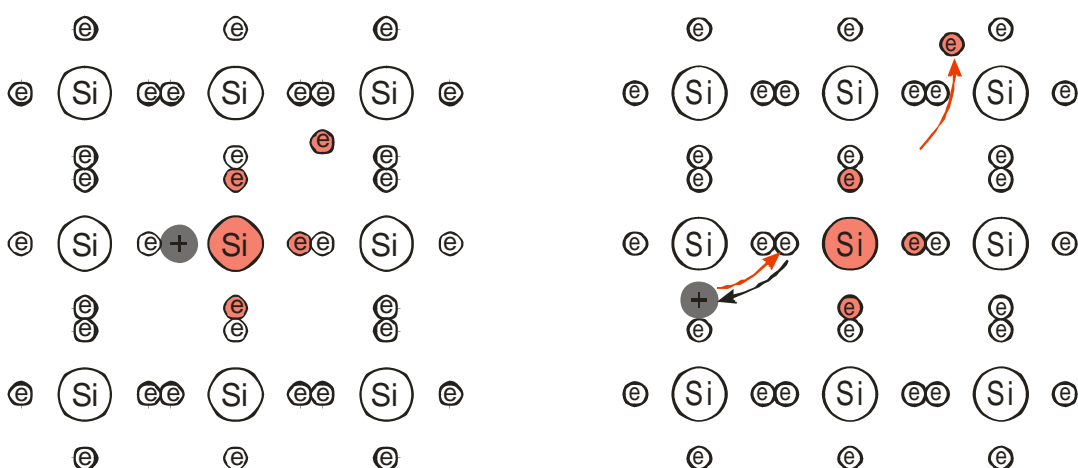
- Každý atom křemíku má čtyři valenční elektrony (vnější elektrony ve vrstvě nejvíce vzdálené a tudíž nejméně přitahované).
- Elektrony jsou vázány do sdílených elektronových párů (každý atom poskytuje do čtyř párů po jednom elektronu, tedy všechny své valenční elektrony), které drží krystal pohromadě
 ⇒ v krystalu Si nejsou volné elektrony, které by mohly vést elektrický proud ⇒ Si se chová jako izolant.

Každý elektron má jednotkový záporný náboj, zbytek atomu křemíku má 4 kladné náboje (se svými čtyřmi elektrony je neutrální).

Začneme krystal zahřívat.

- Elektronové páry nejsou silně vázané k jádru. Krystal Si se zahřeje ⇒ atomy začnou více kmitat a některý z elektronů se může utrhnout ⇒ objeví se elektron pohybující se po krystalu a prázdné místo u atomu, od kterého se elektron odtrhl.
- Atom bez uniklého elektronu se snaží získat jeden elektron ze sousedního elektronového páru, pokud uspěje, bude spokojený, ale vznikne další díra u atomu, kterému elektron ukradl
 ⇒ takto díry cestují po krystalu. Atom s dírou je navenek kladně nabitý ⇒ díra se chová jako pohyblivá částice s kladným nábojem.

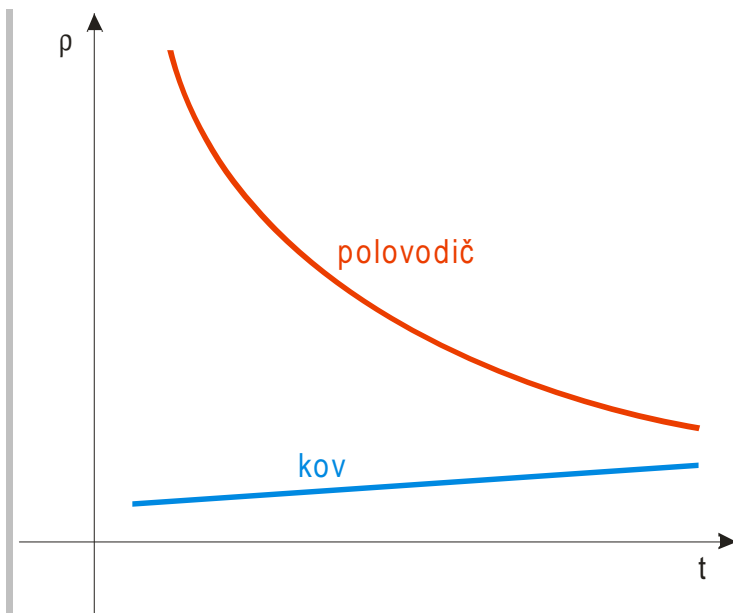
Děj popsáný v předchozích bodech se nazývá **generace páru elektron–díra** (vznikla dvojice nabitých částí, které se mohou pohybovat po krystalu a tak přenášet proud).



Pokud elektron potká díru a spadne do ní, pár **elektron–díra** zanikne (dojde k **rekombinaci**).

Uvedený mechanismus popisuje vedení proudu v polovodičích a nazývá se **vlastní vodivost**. Látky, které vedou tímto způsobem, se nazývají **vlastní polovodiče**.

Př. 1: Nakresli do společného grafu závislost měrného elektrického odporu polovodiče a kovu na teplotě.



Měrný elektrický odpor vodičů s teplotou roste (žárovka, více srážek elektronů s mřížkou), měrný elektrický odpor polovodičů s teplotou klesá (větší tepelný pohyb v mřížce a tím více generovaných párů elektron-díra).

Př. 2: Vysvětli vlastnosti termistoru, fotorezistoru a diody za předpokladu, že jde o součástky vyrobené z polovodičů.

Termistor

S vyšší teplotou atomy více kmitají \Rightarrow více elektronů se může uvolnit ze sdílených párů \Rightarrow vytváří se více párů **elektron-díra** \Rightarrow více vodivých částic \Rightarrow při stejném napětí teče větší proud, odpor látky se zmenšuje \Rightarrow funkce termistoru.

Fotorezistor

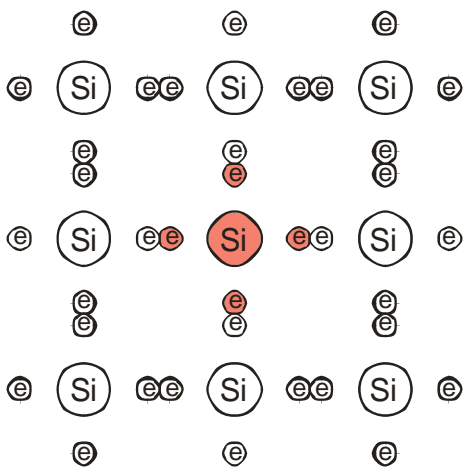
Pár **elektron-díra** nemusí vytvářet pouze kmitání atomů, ale i energie dopadajícího světla \Rightarrow dopadem světla vznikne pár elektron-díra (vnitřní fotoelektrický jev) \Rightarrow více světla vytvoří více párů elektron-díra \Rightarrow více vodivých částic \Rightarrow poteče větší proud, odpor látky se zmenšuje \Rightarrow funkce fotorezistoru.

Dioda

Nic z toho, co jsme si o polovodičích zatím říkali, funkci diody nevysvětluje \Rightarrow zatím zřejmě nevíme o polovodičích dost.

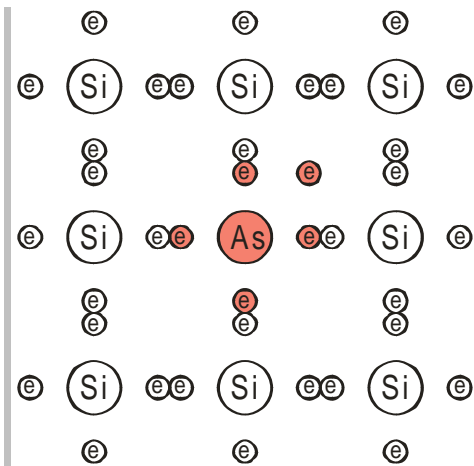
Daleko častěji než polovodiče vlastní se používají polovodiče příměsové.

Opět začneme s krystalem polovodiče.



Příměsové polovodič vyrobíme, když v krystalu nahradíme část atomů křemíku chemickou látkou, která má 3 nebo 5 valenčních elektronů.

Př. 3: Nakresli, jak se změní situace části křemíkového polovodičového krystalu, pokud bude prostřední atom křemíku nahrazen atomem prvku s pěti valenčními elektrony (**As, P, Sb**)

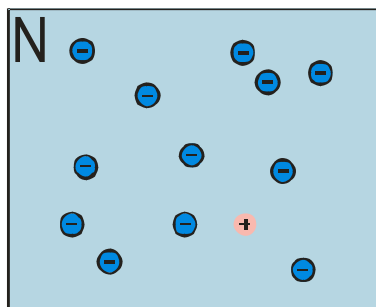


Jeden z pěti valenčních elektronů nemá u okolních atomů křemíku partnera do páru \Rightarrow zůstane sám, není vázán do vazeb \Rightarrow může se volně pohybovat po krystalu.

Každý z atomů příměši takto poskytne jeden elektron \Rightarrow po krystalu se pohybuje velké množství volných elektronů \Rightarrow krystal získal **příměsovou negativní (elektronovou) vodivost** \Rightarrow **polovodič typu N**.

Atomy příměši darují elektrony, říká se jim **donory**.

Takový krystal budeme kreslit následovně.



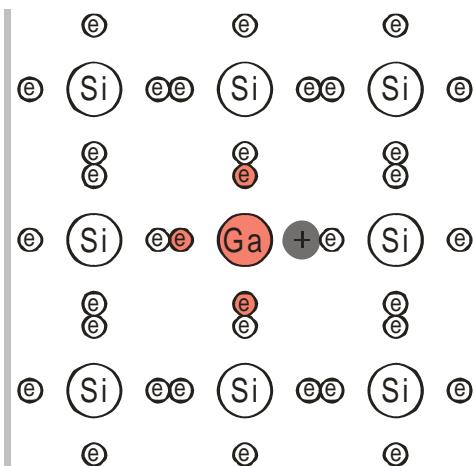
Polovodič typu N obsahuje velké množství volných elektronů (**majoritní nosiče**). I v něm se tvoří páry elektron-díra, ale takto vzniklých děr (**minoritní nosiče**) je v porovnání s elektrony vzniklými díky příměši velmi málo a velmi rychle rekombinují s převahou elektronů.

Krystal není záporně nabitý, na obrázku je nakreslena převaha elektronů, ale nejsou tam

nakresleny atomy příměsi, které jsou nabitě kladně (jeden elektron uvolnily), protože se nemohou pohybovat a přenášet proud.

Pedagogická poznámka: Studenti opravdu často při kreslení obrázků N-polovodiče zapominají, že nejde o záporně nabitou látku. V takovém případě samozřejmě nemohou mnohá vysvětlení pochopit.

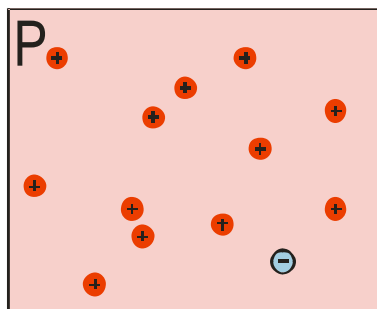
Př. 4: Nakresli, jak se změní situace části křemíkového polovodičového krystalu, pokud bude prostřední atom křemíku nahrazen atomem prvku se třemi valenčními elektrony (**Al, Ga, In**).



Atom má pouze tři valenční elektrony, nemůže jednomu z okolních atomů křemíku poskytnout partnera do páru \Rightarrow vznikne díra (jako při uvolnění elektronu z páru) \Rightarrow díra se může volně pohybovat po krystalu.

Každý z atomů příměsi takto vytvoří jednu díru \Rightarrow po krystalu se pohybuje velké množství volných děr \Rightarrow krystal získal **příměsovou pozitivní (děrovou) vodivost** \Rightarrow **polovodič typu P**. Atomy příměsi odebírají okolním atomům elektrony, říká se jim **akceptory**.

Takový krystal budeme kreslit následovně.



Polovodič typu P obsahuje velké množství volných děr (**majoritní nosiče**). I v něm se tvoří páry elektron-díra, ale takto vzniklých volných elektronů (**minoritní nosiče**) je v porovnání s děrami vzniklými díky příměsi velmi málo a velmi rychle rekombinují s převahou děr.

Krystal není kladně nabitý, na obrázku je nakreslena převaha děr, ale nejsou tam nakresleny atomy křemíku, které uvolnily jeden ze svých elektronů a jsou nabitě kladně, protože se nemohou pohybovat a přenášet proud.

Př. 5: Porovnej vodivost příměsových a vlastních polovodičů. Jak závisí tento rozdíl na množství příměsi? Mění se rozdíl mezi jejich vodivostmi s teplotou?

Příměsové polovodiče mají větší vodivost než vlastní (mají více pohyblivých nosičů náboje, protože každý atom příměsi znamená jeden pohyblivý náboj).

⇒ Čím větší je množství příměsi, tím větší je vodivost materiálu.
Rozdíl ve vodivosti mezi příměsovými a vlastními polovodiči se zmenšuje s rostoucí teplotou. S teplotou se zvyšuje množství teplotně generovaných párů elektron-díra, které vznikají v obou druzích polovodičů stejně.

Shrnutí: Pohyblivé nabitě částice přenášející náboj vznikají v polovodičích uvolňováním elektronů z vazeb ⇒ s teplotou odpor polovodičů klesá. Pomocí příměsi můžeme dosáhnout toho, že v polovodiči povedou proud převážně elektrony (nebo díry).