

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).

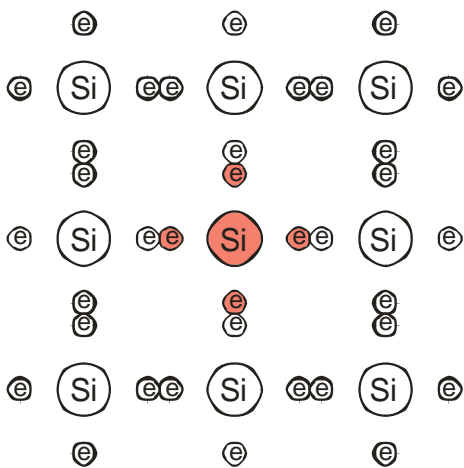
Funkci těchto součástek nevysvětlíme pomocí vedení proudu ve vodičích \Rightarrow musí existovat další skupina látek, která se k proudu chová jinak než vodiče nebo nevodiče.

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)



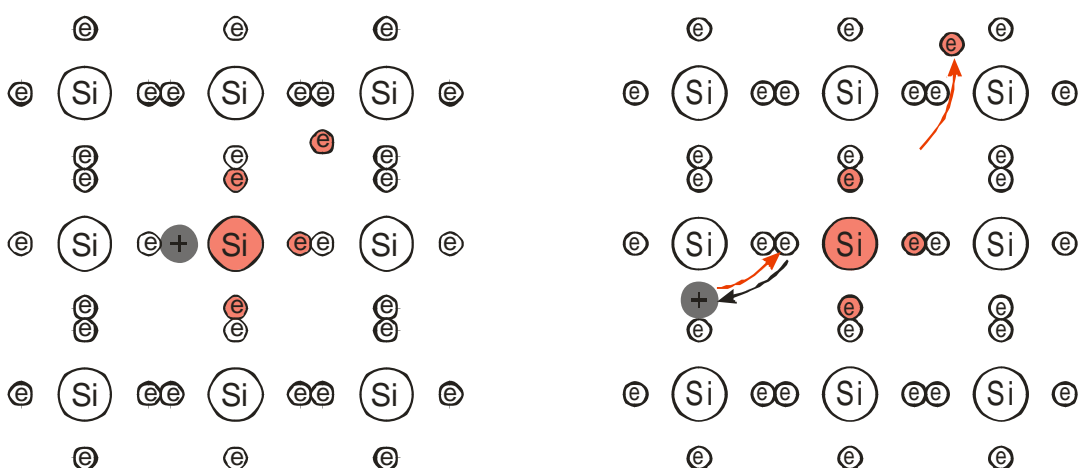
- Každý atom křemíku má čtyři valenční elektrony (vnější elektrony ve vrstvě nejvíce vzdálené a tudíž nejméně přitahované).
- Elektrony jsou vázány do sdílených elektronových párů (každý atom poskytuje do čtyř párů po jednom elektronu, tedy všechny své valenční elektrony), které drží krystal pohromadě
 ⇒ 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.

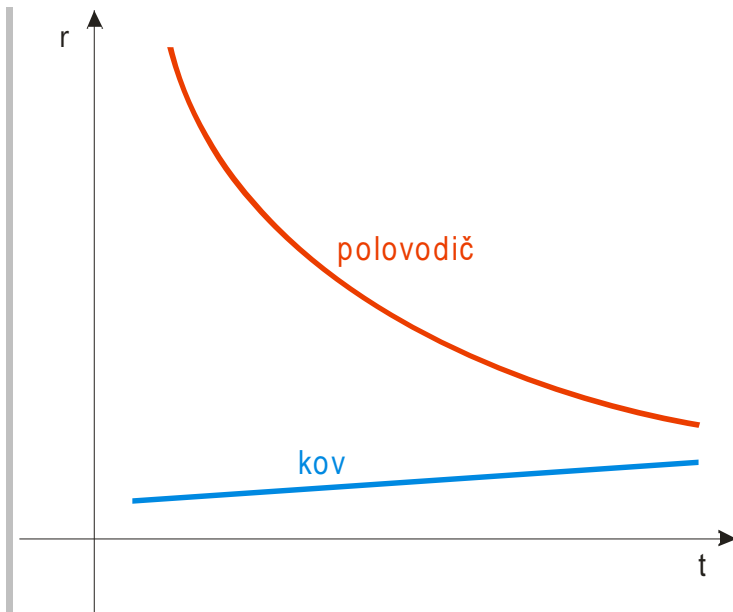
Děj popsáný v předchozích bodech se nazývá **generace páru elektron–díra** (vznikla dvojice nabitých částí, které se mohou pohybovat po krystalu a tak přenášet proud).



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

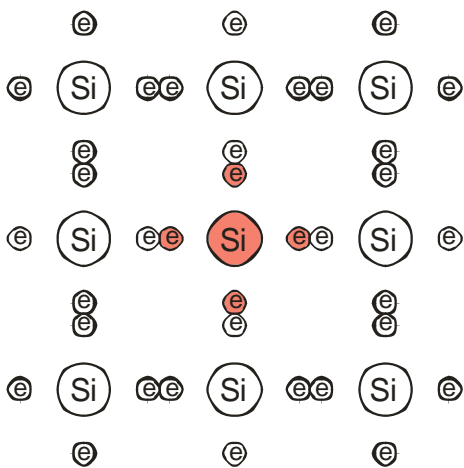
Pár **elektron-díra** nemusí vytvářet pouze kmitání atomů, ale i energie dopadajícího světla \Rightarrow dopadem světla vznikne pár elektron-díra (vnitřní fotoelektrický jev) \Rightarrow více světla vytvoří více párů elektron-díra \Rightarrow více vodivých částic \Rightarrow poteče větší proud, odpor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

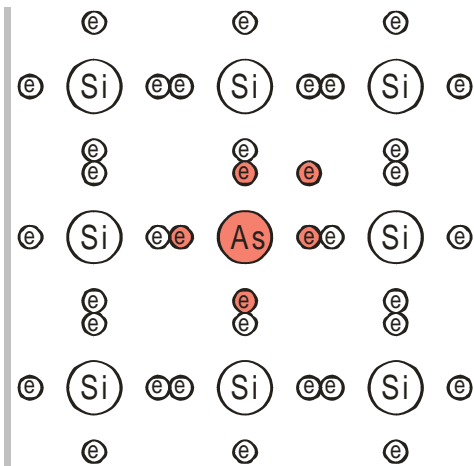
Daleko častěji než polovodiče vlastní se používají polovodiče příměsové.

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**)

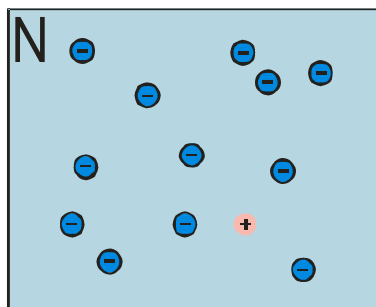


Jeden z pěti valenčních elektronů nemá u okolních atomů křemíku partnera do páru \Rightarrow zůstane sám, není vázán do vazeb \Rightarrow může se volně pohybovat po krystalu.

Každý z atomů příměsi 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 příměsi darují elektrony, říká se jim **donory**.

Takový krystal budeme kreslit následovně.



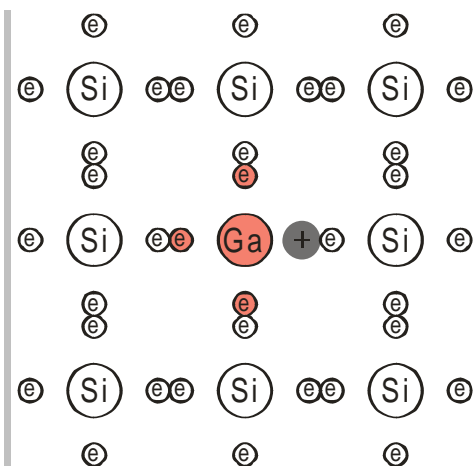
Polovodič typu N obsahuje velké množství volných elektronů (**majoritní nosiče**). I v něm se tvoří páry elektron-díra, ale takto vzniklých děr (**minoritní nosiče**) je v porovnání s elektrony vzniklými díky příměsi velmi málo a velmi rychle rekombinují s převahou elektronů.

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.

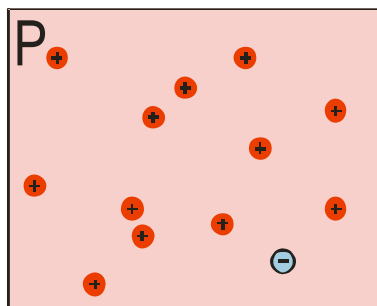
Př. 4: Nakresli, jak se změní situace části křemíkového polovodičového krystalu, pokud bude prostřední atom křemíku nahrazen atomem prvku se třemi valenčními elektrony (**Al, Ga, In**).



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 příměsi, které jsou svázány se sousedními křemíky čtyřmi vazbami, do kterých poskytly pouze tři elektrony (jeden získaly od zbytku krystalu) a jsou nabitě záporně. Atomy příměsi jsou vázány v mřížce, proto 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 příměšovými 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 nabité 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).