

15) Elektrický proud v kovech a polovodičích

VEDENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU V KOVECH

- Valenční elektrony kovů jsou prakticky volné (k atomovým jádrům jsou vázány pouze slabými silami) a pohybují se chaoticky
- **Vodivostní** elektrony = elektronový plyn (podobné chování plynu)
- Počet vodivostních elektronů odpovídá přibližně počtu atomů ve vodiči
- Po připojení ke stejnosměrnému zdroji vzniká v celém objemu elektrické pole → **uspořádaný unášivý pohyb vodivostních elektronů**
- Nepravidelnosti krystalové mřížky se projevují jako odpor vodiče
- **Supravodivost** – odpor (olova) při ochlazení pod kritickou teplotu klesá prakticky na nulovou hodnotu → vodič vede elektrický proud prakticky bez odporu

ODPOR KOVOVÉHO VODIČE

- Odpor kovového vodiče je přímo úměrný jeho délce, nepřímo úměrný průřezu a závisí na materiálu vodiče:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [R] = \Omega \quad \rho - \text{rezistivita (měrný elektrický odpor)} \quad [\rho] = \Omega \cdot m; \text{ (tab. 228)}$$

- **Odpor kovového vodiče s rostoucí teplotou roste**, pro velké teplotní intervaly je ale závislost odporu vodiče na teplotě prakticky lineární:

$$R = R_1(1 + \alpha \Delta t)$$

α – teplotní součinitel elektrického odporu; charakteristický pro materiál vodiče; $[\alpha] = K^{-1}$

- Podobný vztah platí i pro měrný elektrický odpor (rezistivitu):

$$\rho = \rho_1(1 + \alpha \Delta t)$$

VEDENÍ PROUDU V POLOVODIČÍCH

- Pevné látky (např.: Si, Ge, Se, Te, C, sulfid olovnatý, sulfid kademnatý)
- Jejich měrný elektrický odpor (rezistivita) je $10^{-4} \Omega \cdot m$ až $10^8 \Omega \cdot m$
- Částečně se chovají jako vodiče a částečně jako izolanty (nízké teploty)
- Elektrické **vlastnosti závisí na vnějších podmínkách** (teplota, osvětlení, tlak, hluk) více než u vodičů
- **S rostoucí teplotou se odpor (R) zmenšuje** (opak kovů – dochází ke generaci)
- Nejjednodušší el. polovodičové součástky:
 - **Termistor**
 - Využití v obvodech k regulaci a měření teploty, pro stabilizaci elektrických obvodů
 - Odpor termistoru se s rostoucí teplotou rychle zmenšuje (proud v obvodu roste)
 - **Fotorezistor**
 - Využití v obvodech k regulaci a měření teploty, pro stabilizaci elektrických obvodů
 - Odpor termistoru se s rostoucí teplotou rychle zmenšuje (proud v obvodu roste)
 - Využití: automatické otevírání/zavírání dveří, ve fotoaparátu, automatický jas mobilu, automatické osvětlení na ulicích

VLASTNÍ (ČISTÉ) POLOVODIČE

- Bez příměsí (čistá krystalická látka např. křemík)
- Při nízkých teplotách blízkých jsou všechny valenční elektrony zapojeny do vazeb – polovodič se chová jako izolant
- Při vyšších teplotách vyvolají kmity atomů porušení vazeb
- Elektron se uvolní z vazby a stane se z něj volný elektron
- Na prázdném místě vzniká **díra (kladná částice)**
- Volné elektrony i díry se v polovodiči chaoticky pohybují
- **Vlastní vodivost polovodiče** = el. vodivost zprostředkovaná elektrony, které se uvolní z atomu
- **Generace = vznik párů elektron – díra**
- **Rekombinace = zánik párů elektron – díra**
- Generace i rekombinace probíhají současně
- Výsledný elektrický proud v polovodiči je součtem proudu elektronového a děrového: $I = I_e + I_d$
- Při stálé teplotě se udržuje dynamická rovnováha mezi generací a rekombinací (hustota děr = hustota volných elektronů)
- S rostoucí teplotou roste i tepelný pohyb atomů → větší počet generací párů elektron-díra → roste vodivost polovodiče
- **Vnitřní fotoelektrický jev – generování párů elektron – díra účinkem světelného záření**

NEVLASTNÍ (PŘÍMĚSOVÉ) POLOVODIČE

- **Vodivost polovodiče lze ovlivnit příměsemi**
- Příměsová vodivost – podmíněna zvýšenou hustotou elektronů nebo děr
Si – 14 elektronů (4 jsou valenční)

POLOVODIČE TYPU N (NEGATIVNÍ)

- Příměsí k čtyřvaznému např. křemíku je pětivazný prvek (P, As, Sb) – páté elektrony, které se neuplatní v kovalentní vazbě, se při vyšších teplotách volně pohybují krystalem
- **Příměsí: donory („donor – dárce“)** – **přebytek valenč. elektronů oproti polovodiči**
- **Elektronová vodivost**
 - Mnohem více volných elektronů než děr
 - Elektronová vodivost je způsobena elektrony s **negativním** nábojem
 - Elektrony – majoritní (většinové) nosiče náboje
 - Díry – minoritní (menšinové) nosiče náboje

POLOVODIČE TYPU P (POZITIVNÍ)

- Do krystalu křemíku přidáme třívazné prvky (In, Al, B) – po chybějícím elektronu vznikne díra
- **Příměsí: akceptory („akceptor – příjemce“)** – **nedostatek valenč. elektronů oproti polovodiči**
- **Děrová vodivost**
 - Převažují díry
 - Elektronová vodivost děrová je způsobena dírami s **pozitivním** nábojem
 - Díry – majoritní (většinové) nosiče náboje
 - Elektrony – minoritní (menšinové) nosiče náboje

Polovodiče typu P a N mají nulový náboj!

POLOVODIČOVÁ DIODA

- **1 PN přechod**
- Anoda – oblast typu P (kladná)
- Katoda – oblast typu N (záporná)
- V místě rozhraní obou typů vzniká **hradlová vrstva** s el. polem, jehož intenzita brání pronikání děr a elektronů do oblasti přechodu
- Dojde k rekombinaci (elektrony naskáčou do děr)
- Příměsi (donory a akceptory) jsou nepohyblivé (součást mřížky)
- V oblasti přechodu nejsou žádné nosiče náboje → hradlová vrstva se chová jako izolant
- Vodivost závisí na velikosti i orientaci připojeného napětí (**diodový jev**):
 - **Propustný směr**
 - Zapojená ve směru **P → N**
 - Obvodem **prochází elektrický proud**
 - Elektrické pole přechodu PN je zeslabené elektrickým polem zdroje napětí
 - **Hradlová vrstva se zužuje**, při překročení prahového napětí U_{F0} zanikne (zmenšení odporu přechodu PN)
 - **Závěrný směr**
 - Zapojená ve směru **N → P**
 - Obvodem prakticky **neprochází elektrický proud** – prochází jen velmi malý proud
 - Intenzita elektrického pole PN se zvětší, **hradlová vrstva se rozšíří**
 - Elektrický odpor přechodu PN se zvětší

VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA POLOVODIČOVÉ DIODY

- Graf závislosti proudu procházejícím diodou na napětí zdroje
 U_{BR} průrazné napětí (závěrný směr), po jeho překročení dochází k velkému nárůstu proudu
 U_{F0} prahové napětí (propustný směr), po jeho překročení, začíná proud růst
- Usměrňovací dioda
 - Po překročení průrazného napětí – zničení diody
 - Používají se jako usměrňovače střídavého proudu a napětí
střídavý proud = změna směru toku napětí
- Zenerova dioda
 - Pracuje i po překročení průrazného napětí U_Z
 - Slouží k udržování konstantního napětí (stabilizaci)
- Luminiscenční diody (LED – light emitting diode)
 - Dioda vydávající světlo (je-li zapojena v propustném směru)
 - Odebírá malý proud → vhodná jako indikace zapnutí přístroje
 - Dává ale málo světla → nevhodná k osvětlení
- Fotodiody
 - Na PN přechod jde světlo, kde se generují páry elektron-díra
 - Využití: zdroj el. E v solárních článcích

TRANZISTOR

- **Zesiluje el. proud**
- Tři vývody:

- Báze B – uprostřed, velmi tenká vrstva
- Kolektor C – větší
- Emitor E – menší
- 2 PN přechody
 - Báze – emitor
 - Báze – kolektor
- Druhy tranzistorů: NPN a PNP

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C \gg I_B$$

- Tranzistorový jev: **Malé napětí vzbuzuje v obvodu báze proud, který je příčinou mnohokrát většího proudu v obvodu kolektorovém.**
- Proudový zesilovací činitel β (charakterizuje zesilovací funkci tranzistoru)

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \text{při } U_{CE} = \textit{konst.}$$

ΔI_C změna kolektorového proudu
 ΔI_B změna proudu báze
 U_{CE} při konstantním napětí mezi kolektorem a emitorem

- V procesoru několik miliard tranzistorů
- Integrovaný obvod – celý funkční elektronický systém obsahující velké množství tranzistorů, diod, rezistorů (popř. dalších součástek) v křemíkové destičce malého rozměru (např. mikroprocesor)