

8. Vedení elektrického proudu v polovodičích



Dynamický rozvoj elektroniky v posledních desetiletích je spojen s výrobou a použitím stále složitějších polovodičových součástek. Jestliže chceme pochopit princip jejich činnosti, musíme se seznámit se strukturou polovodičů a s ději, které v nich probíhají při průchodu elektrického proudu.

Polovodiče jsou látky, jejichž měrný elektrický odpor je při obvyklých teplotách v intervalu $10^{-4}\Omega \cdot \text{m}$ až $10^8\Omega \cdot \text{m}$. To je hodnota mnohem větší než u kovů, u kterých dosahuje hodnot $10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ až $10^{-6}\Omega \cdot \text{m}$. Sama hodnota měrného elektrického odporu však není rozhodující pro zařazení látky mezi polovodiče. Podstatné je, že elektrické vlastnosti polovodičů závisí mnohem více než elektrické vlastnosti kovů na teplotě, na dopadajícím záření a na obsahu různých příměsí. Mezi polovodiče patří mnoho pevných látek. Z prvků jsou to např. křemík(Si), germanium(Ge), selen(Se), telur(Te), uhlík(grafit, C). Z chemických sloučenin je to např. sulfid olovnatý (PbS), sulfid kadebnatý (CdS) nebo arsenid galia (GaAs). Nejjednodušší polovodičové elektronické součástky jsou **termistory a fotorezistory**.

Termistor je teplotně závislý rezistor. Odpor termistoru se se zvyšující teplotou zmenšuje. Termistory se využívají pro měření, regulaci teploty a stabilizaci elektrických obvodů.

Fotorezistor je polovodičová součástka, jejíž odpor lze ve velkém ovládat změnou osvětlení. Odpor neosvětleného fotorezistoru bývá větší, než $1\text{ M}\Omega$. Při osvětlení klesá na $10^3\Omega$ až $10^2\Omega$. Fotorezistory se využívají k regulaci osvětlení.

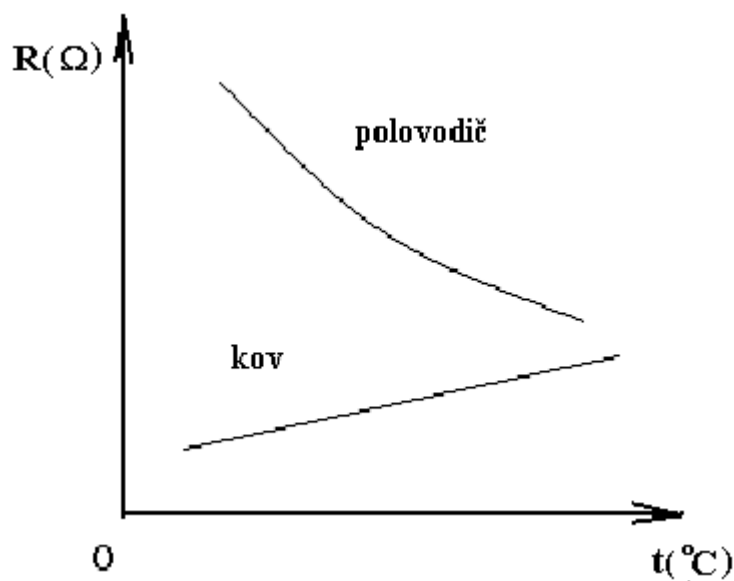
Vedení el. proudu v čistém polovodiči. Vlastní vodivost

V současné době se nejčastěji pro výrobu polovodičových součástek používá velmi čistý monokrystalický křemík. Atom křemíku má 14 elektronů, z nichž je 10 pevně vázáno k jádru a čtyři zbývající vytvářejí elektronové vazebné dvojice se čtyřmi sousedními atomy v krystalové mřížce. Na uvolnění elektronu z této kovalentní vazby v krystalu křemíku je zapotřebí energie 1,1 eV, přičemž $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$. Při nízkých teplotách blízkých nule termodynamické teplotní stupnice ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$) jsou všechny valenční elektrony zapojeny do vazeb a křemík se chová jako izolant. Při běžných teplotách okolo 20°C dochází k „vytržení“ některých elektronů z vazeb. Na místě uvolněného elektronu vzniká prázdné místo. tzv. díra, kde převládá kladný náboj atomového jádra nad nábojem zbylých elektronů. Díra má tedy

vlastnost kladné částice. Volné elektrony a díry se v krystalu chaoticky pohybují. Pohyb díry se uskutečňuje postupnými přeskoky elektronu ze sousední úplné vazby na místo s dírou. Setká-li se volný elektron náhodně s dírou, ztrácí část energie, zaplňuje díru a zapojuje se opět do vazebné dvojice. V polovodiči se tímto způsobem udržuje při stálé teplotě dynamická rovnováha mezi tvorbou generací elektron-díra a jejich zánikem- tzv. rekombinací. Pokud zapojíme polovodič do elektrického obvodu, vzniká v něm elektrické pole, které způsobuje uspořádaný pohyb děr ve směru intenzity elektrického pole a volných elektronů ve směru opačném. Výsledný proud v polovodiči je součtem proudu elektronového a děrového:

$$I = I_e + I_d$$

Hustota volných elektronů je v čistém polovodiči stejná jako hustota děr a s rostoucí teplotou se rychle zvětšuje. Proto měrný elektrický odpor čistého polovodiče s rostoucí teplotou rychle klesá. U kovů je to naopak. Kovy mají konstantní hustotu volných elektronů a jejich odpor s rostoucí teplotou zvětšuje (obr. 13).



Obr. 13 Závislost elektrického odporu kovu a polovodiče na teplotě

Výše popsaný typ elektrické vodivosti polovodiče způsobený vznikem párů elektron- díra se nazývá **vlastní vodivost**. Látky s výhradně touto vodivostí se nazývají **vlastní polovodiče**. Tuto vodivost může vyvolat kromě tepelného pohybu krystalové mřížky také dopad záření na povrch polovodiče. Generování párů elektron-díra účinkem světelného záření se nazývá vnitřní fotoelektrický jev. Vlastní vodivost polovodičů se využívá pouze v některých typech

polovodičových součástek, které jsme již popsali (termistor, fotorezistor). Větší význam má **příměsová vodivost polovodičů**, které se budeme věnovat dále.

Příměsové polovodiče

Vodivost polovodiče může velmi ovlivnit již nepatrné množství **příměsí** (cizích atomů, kterými nahradíme atomy čistého krystalu, aniž bychom narušili jeho krystalovou stavbu). Krystal křemíku, který obsahuje jako příměsí atomy pětímocného prvku (např. P, As, Sb) získá **elektronovou vodivost**. Z pěti valenčních elektronů příměsí se jen čtyři uplatní v kovalentní vazbě se sousedními atomy křemíku. Zbývající páté elektrony jsou k příměsí vázány jen slabě a už při nízkých teplotách se volně pohybují krystalem. Z příměsí se stávají kladné nepohyblivé ionty, které nazýváme **donory** (donor-dárce). V takto upraveném krystalu je mnohem více volných elektronů než děr, které vznikají tepelnou generací elektron-díra). Elektrony proto označujeme jako **většinové** (majoritní) nosiče náboje a díry jako nosiče **menšinové** (minoritní). Polovodiče s převládající elektronovou vodivostí nazýváme **polovodiče typu N**. Pokud do krystalu křemíku použijeme jako příměsí atomy trojmocného prvku (B, Al, Un), získá **děrovou vodivost**. V tom případě se z něj stane **polovodič typu P**. Nosiči náboje jsou kladné – pozitivní částice. Každá příměs obsadí svými elektrony jen tři vazby se sousedními atomy křemíku. Vznikne díra, která však může být snadno zaplněna přeskokem elektronu od sousedního atomu křemíku. Třímocné příměsí se tak stávají nepohyblivými zápornými ionty. Nazýváme je **akceptory** (akceptor-příjemce). Díry vytvořené příměsí se v polovodiči typu P volně pohybují a tvoří zde většinové nosiče náboje. Menšinovými nosiči jsou elektrony. Vodivost vyvolaná pomocí pětímocných nebo třímocných příměsí se nazývá **příměsová vodivost polovodičů**. Polovodiče s takovou vodivostí jsou příměsové polovodiče. Celkový náboj volných elektronů a děr je vyrovnán s nábojem nepohyblivých iontů příměsí. Hustota volných nosičů náboje v příměsovém polovodiči je při nízkých teplotách dána množstvím příměsí. Proto je prakticky konstantní. Při zahřívání polovodiče se od určité teploty začne projevovat také vlastní vodivost, která podstatně zvyšuje zejména koncentraci minoritních nosičů. U většiny polovodičových součástek je tento jev nepřipustný a jejich provozní teplota tedy musí být chlazením udržována na takové teplotě, při které se vlastní vodivost neuplatní.