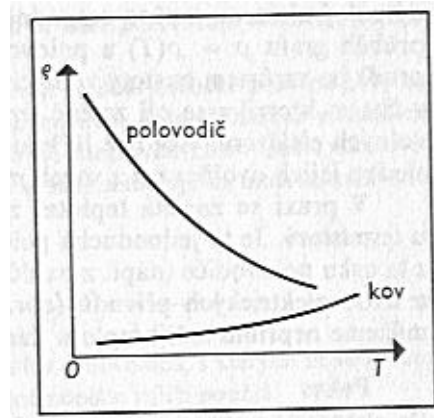


Polovodiče

Co je polovodič?

Polovodiče jsou látky, jejichž rezistivita leží při obvyklých teplotách v intervalu $10^{-4} \Omega \cdot m$ až $10^8 \Omega \cdot m$. Je tedy mnohem větší než u kovů, u kterých dosahuje intervalu $10^{-8} \Omega \cdot m$ až $10^{-6} \Omega \cdot m$ a mnohem menší než u dobrých izolantů. Důležité ovšem je, že elektrické vlastnosti polovodičů závisí na teplotě mnohem více než vlastnosti kovů. Ovlivňuje je také dopadající záření a obsah různých příměsí.



Mezi polovodiče patří velké množství pevných látek. Z prvků jsou to např. křemík Si, germanium Ge, selen Se, telur Te, uhlík (grafit) C. Typickým znakem polovodičů je to, že měrný elektrický odpor polovodičů s rostoucí teplotou rychle klesá. U kovů se naopak měrný el. odpor s rostoucí teplotou zvyšuje. Čím to je? U kovů hustota volných elektronů na teplotě téměř nezávisí. S rostoucí teplotou kmitající částice mřížky stále více překáží pohybu vodivostní elektronů, proto u kovů s rostoucí teplotou měrný elektrický odpor mírně vzrůstá. I v polovodičích se z téhož důvodu pohybuje každý volný elektron o něco nesnadněji, má-li polovodič vyšší teplotu. Hlavním důvodem je nárůst hustoty volných elektronů s rostoucí teplotou. Počet volných elektronů roste v důsledku jejich uvolňování z vazeb mezi částicemi.

Termistor – je jednoduchá polovodičová součástka, která se skládá z kousku polovodiče a dvou elektrických přívodů. Termistory se vyrábějí ve tvaru tyčinek, destiček nebo jako malé perličky. Měřením odporu termistoru můžeme nepřímě měřit teplotu dané látky s přesností až 10^{-3} K. To se využívá v lékařství a dále se tím pozorovalo rozložení teploty v listu stromu. Dále můžeme měřit i rychlost proudění tekutin. Umožňuje to skutečnost, že vnější ochlazování termistoru, kterým prochází proud, závisí na rychlosti proudění tekutiny obtékající termistor.

Fotorezistor – je polovodičová součástka zhotovená nejčastěji ze sirníku kadmnatého CdS, jejíž odpor můžeme ve velkém rozmezí ovládat změnou osvětlení. Odpor neosvětleného fotorezistoru bývá větší než $1 \text{ M}\Omega$. Při osvětlení klesá na $10^3 \Omega$ až na $10^2 \Omega$. Fotorezistory se využívají pro regulaci a měření osvětlení.

Vedení elektrického proudu v čistém polovodiči.

POLOVODIČE VLASTNÍ (vlastní vodivost)

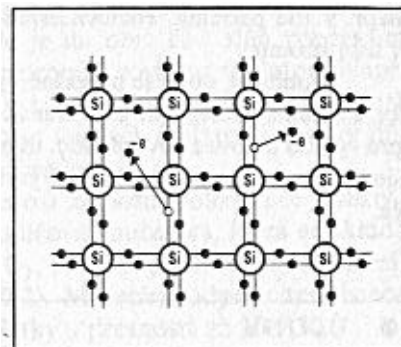
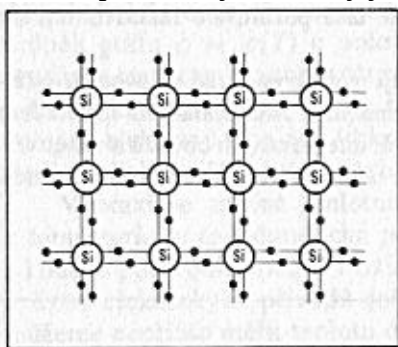
Mezi materiály pro výrobu polovodičových součástek zaujímá v současné době nejvýznamnější místo velmi čistý monokrystalický křemík. Na něm vyložíme základní vlastnosti polovodičů. Na obrázku máte zjednodušený model křemíku. Podle něj by se měl křemík chovat jako izolant. Je tomu tak při teplotách 0 K. Při vyšších teplotách však mohou kmity atomů mřížky vyvolat porušení vazeb mezi atomy. Zrušením některých vazeb vznikají současně dva typy volných částí s nábojem a to přímo v párech. Jsou to volné elektrony a tzv. díry („částice“ s kladným elektrickým nábojem). Mluvíme tedy o vzniku čili generaci párů volný elektron – díra. Vznik párů volný elektron – díra je zachycen na vedlejším obrázku. Pojem díra charakterizujeme situaci, kdy uvolněný valenční elektron chybí ve vazbě mezi

atomy. Kladný náboj získá díra z přebytku nábojů atomového jádra, které bylo před uvolněním valenčního elektronu v rovnovážném stavu se všemi elektrony náležejícími téměř atomu. Nepředstavuje tedy díra skutečnou částici.

Při setkání volného elektronu 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 neboli generací párů elektron – díra a jejich zánikem neboli rekombinací.

Zapojíme-li polovodič do elektrického obvodu, vzniká v něm elektrické pole, které způsobuje uspořádaný pohyb děr ve směru intenzity el. pole a volných elektronů ve směru opačném. V polovodiči vznikne el. proud (jev). Výsledný el. proud v polovodiči je součtem proudu elektronového a děrového: $I = I_e + I_d$. Popsaný typ elektrické vodivosti polovodičů způsobený vznikem páru elektron – díra se nazývá vlastní vodivost a látky výhradně s touto vodivostí jsou vlastní polovodiče.

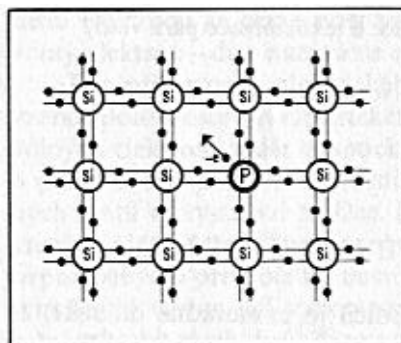
S rostoucí teplotou se zvyšuje hustota volných elektronů a děr. Tím se zmenšuje elektrický odpor polovodiče a pro závislost mezi napětím a proudem neplatí Ohmův zákon. V technice se používá jen na výrobu termistorů a fotorezistorů to z důvodu velké teplotní závislosti měrného odporu a to je nevídaný jev.



POLOVODIČE NEVLASTNÍ (Příměrové polovodiče)

Vodivost polovodiče může značně ovlivnit i nepatrné množství příměsí – cizích atomů, kterými nahradíme atomy čistého krystalu, aniž bychom narušili jeho krystalovou stavbu. Už při koncentraci jednoho atomu příměsí na 10^8 atomů čistého křemíku můžeme jeho vodivost zvětšit tisíckrát. Rozlišujeme dva typy polovodičů: typ N a typ P.

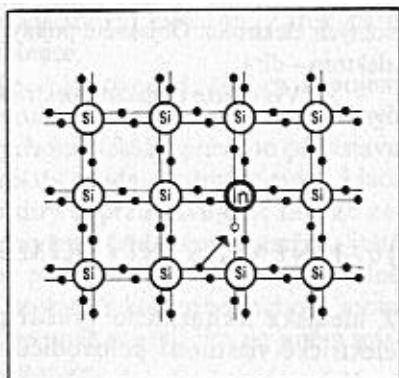
Typ N



Krystal křemíku, který obsahuje jako příměsí atomy s oxidačním číslem pět prvku (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 příměsím vázány jen slabě a už při nízkých teplotách se volně pohybují krystalem. Z příměsí se stávají kladné nepohyblivé ionty, které nazýváme donory (dárce). V takto upraveném krystalu je mnohem více volných elektronů než děr, které zde vznikají tepelnou generací párů elektron – díra. Elektrony označujeme proto jako

většinové (majoritní) nosiče náboje a díry jako nosiče minoritní. Polovodiče s převládající elektronovou vodivostí nazýváme polovodiče typu N – nositeli náboje jsou záporné – negativní - částice.

Typ P



Krystal křemíku, ve kterém použijeme jako příměsi atomy s oxidačním číslem tři (B, Al, Ga, In), získá děrovou vodivost a stane se z něj polovodič typu P. (Nositeli 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. Tyto příměsi se tak stávají nepohyblivými zápornými ionty. Nazýváme je akceptory (akceptor – příjemce). Díry vytvořené příměsmi se volně pohybují v polovodiči typu P a tvoří zde většinové nosiče náboje, menšinovými nosiči jsou

zde elektrony. Vodivost vyvolaná pomocí pětimocných nebo třímocných příměsí se nazývá příměšová vodivost polovodičů. Polovodiče s takovou vodivostí se jsou příměšové polovodiče. Celkový náboj volných elektronů a děr je vyrovnán s nábojem nepohyblivých iontů příměsí. Hustota volných nosičů náboje v příměšovém polovodiči je při nízkých teplotách určena množstvím příměsí, a proto je prakticky konstantní. Při zahřívání se od určité teploty začne projevovat i vlastní vodivost, která podstatně zvyšuje hlavně koncentraci minoritních nosičů. U většiny polovodičových součástek je tento jev nežádoucí a jejich provozní teplota musí být chlazeným udržována na takové hodnotě, při které se vlastní vodivost neuplatní.

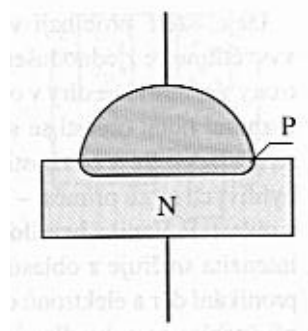
Přechod PN

Většina polovodičových elektronických součástek využívá vlastností přechodů mezi oblastmi typu P a typu N vytvořenými vhodnou technologií v jediném krystalu polovodiče. V místě rozhraní vzniká přechod PN, který se vyznačuje usměrňovací vlastností – propouští elektrický proud jen jedním směrem. Přechod PN může být zhotoven různými technologiemi, např. sléváním. Na základní destičku křemíku typu N se položí kousek hliníku a celek se v ochranné atmosféře zahřeje na teplotu vyšší, než je teplota tání hliníku, a nižší, než je teplota tání křemíku. Atomy hliníku proniknou do krystalu a vytvoří tam tenkou oblast typu P. Tohoto jevu se využívá v polovodičové diodě.

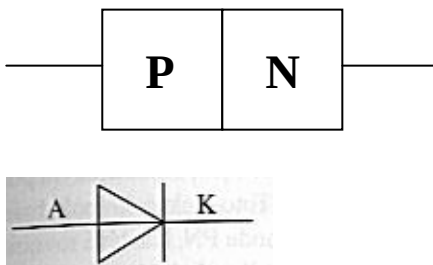
Polovodičová dioda

Polovodičová dioda je součástka s dvěma vývody připojenými ke krystalu polovodiče s jediným přechodem PN. Vývod spojený s oblastí typu P se nazývá **anoda**, vývod spojený s oblastí typu N je **katoda**.

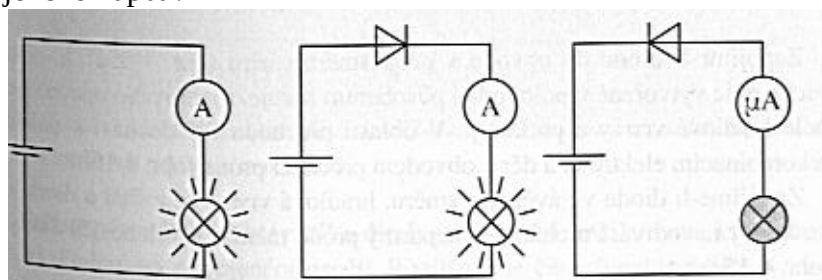
Dioda v řezu:



Schématické značky diody:

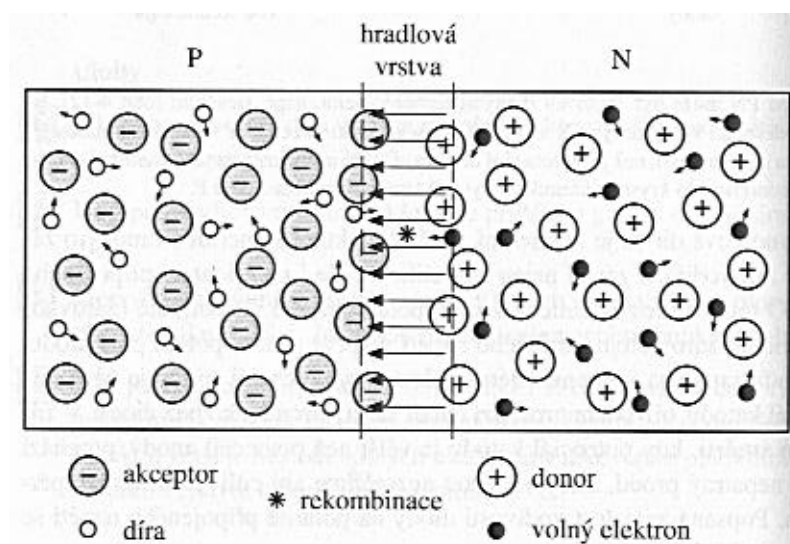


Na polovodičovou diodu neplatí Ohmův zákon. Její vodivost závisí nejen na velikosti, ale i na orientaci připojeného napětí.

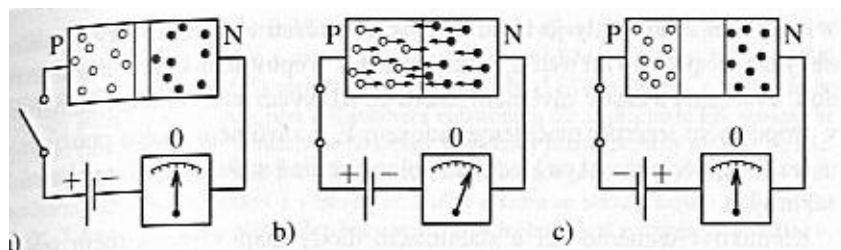


Žárovku jsme připojili ke zdroji proudu nejprve přímo a pak přes diodu. Je-li dioda zapojena v propustném směru, kdy potenciál anody je větší než potenciál katody, prochází obvodem stejně velký proud, jako by tu dioda nebyla. Na posledním obrázku vidíme, že potenciál katody je větší než potenciál anody, prochází diodou pouze nepatrný proud, který většinou nezměříme ani velmi citlivým mikroampérmetrem. Tento jev závisející na polaritě se nazývá diodový jev.

Diodový jev

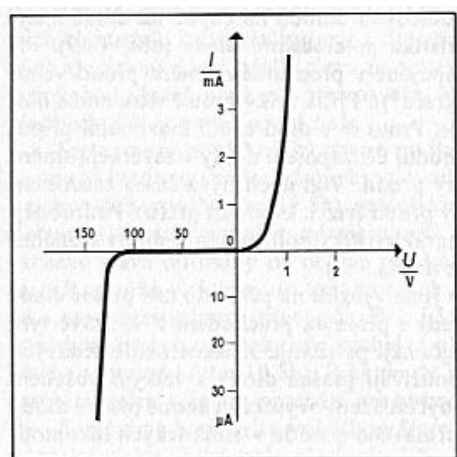


Volné nosiče náboje – elektrony v oblasti N a díry v oblasti P – konají neuspořádaný pohyb v krystalu rozhraní obou oblastí se setkávají a vzájemnou rekombinací zanikají. To má za následek, že v blízkosti přechodu PN převládne elektrické působení nepohyblivých iontů příměsí – kladných donorů v oblasti N a záporných akceptorů v oblasti P. Vzniká hradlová vrstva silná 1 μm s elektrickým polem, jehož intenzita směřuje z oblasti N do oblasti P. Toto elektrické pole brání dalšímu pronikání děr a elektronů do blízkosti přechodu PN. Nastává rovnovážný stav, při kterém se v hradlové vrstvě nenacházejí volné částice s nábojem a její velký odpor rozhoduje o celkovém odporu diody.



Zapojíme-li diodu do obvodu v propustném směru, je elektrické pole vytvořené v polovodiči působením zdroje orientováno opačně než pole hradlové vrstvi a potlačí ji. Na přechodu PN dochází k dalším rekombinacím elektronů a děr a obvodem prochází proud. Zapojíme-li diodu v závěrném směru, hradlová vrstva se a dioda je prakticky Prochází jen nepatrný proud.

Voltampérová charakteristika polovodičové diody



Je to graf závislosti proudu, který prochází diodou, na připojeném napětí. Rozlišujeme část charakteristiky v propustném směru, kdy potenciál anody je větší než katody, a část v závěrném směru, kdy je tomu naopak. Propustný směr značíme do prvního kvadrantu a část v závěrném směru do III. kvadrantu.

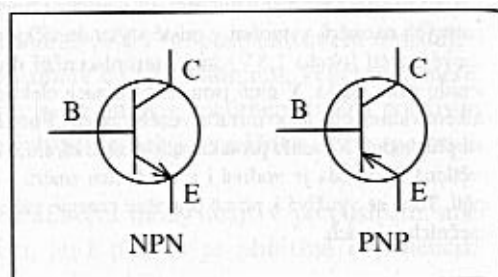
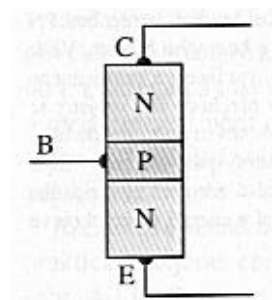
Druhy diod

Usměrňovací dioda – napětí nesmí překročit průrazné napětí, jinak by došlo k prudkému růstu I a došlo by k zničení diody

Zenerova dioda – pracuje i po překročení průrazného napětí

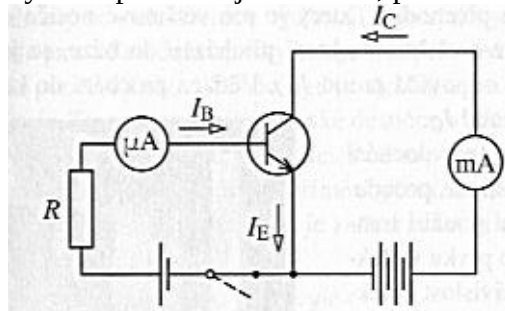
Fotodiody – jsou zhotoveny tak, aby do blízkosti přechodu PN mohlo proniknout světelné záření, které zde generuje páry elektron – díra. Osvětlená fotodioda je vodivá i v závěrném směru a sama se stává zdrojem elektrického napětí. Využíváme toho k přímé přeměně světelného záření v energii elektrickou ve slunečních článcích.

Tranzistor



Patří k nejdůležitějším polovodičovým součástkám. Tvoří ho krystal polovodiče s dvěma přechody PN. Střední část krystalu je báze B a přechody PN ji oddělují od oblastí

s opačným typem vodivosti, které označujeme jako kolektor C a editor E. Oblast kolektoru je zpravidla větší než oblast editoru a přechody jsou v malé vzdálenosti, takže objem báze mezi bema přechody je velmi malý. Podle druhu vodivosti jednotlivých částí označujeme tranzistory jako typy NPN a PNP. U tranzistoru typu NPN směřuje šipka označující editor z tranzistoru a u typu PNP má šipka směr opačný. Ke kolektoru, bázi a editoru jsou připojeny kovové elektrody, které mají shodné názvy. Proto z tranzistoru, který je zabalen do pouzdra, vychází pouze trojice vodičů, pomocí kterých je zapojujeme do obvodu.

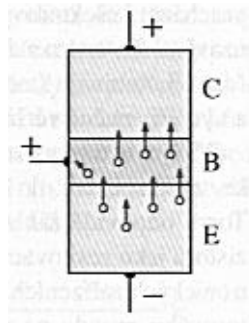


Zapojení tranzistoru do obvodu není jen tak. Nejprve sestavíme kolektorový obvod. Kolektor je připojen ke kladnému pólu zdroje a editor k pólu zápornému. Kolektorový přechod (bázi a kolektorem) je zapojen v závěrném směru a kolektorovým obvodem proto neprochází proud, výchylka miliampérmetru je nulová. Pak zapojení doplníme o obvod báze. Bázi připojíme přes mikroampérmetr a rezistor o velkém odporu ke kladnému pólu druhého zdroje, jeho

záporný pól připojíme k editoru. Poněvadž napětí na přechodu mezi bázi a editorem je orientováno v propustném směru, začne obvodem báze procházet malý proud. V tomto okamžiku však zjistíme, že proud začal procházet i obvodem kolektorovým, ačkoliv napětí na kolektorovém přechodu zůstává orientováno v závěrném směru. Přitom kolektorový proud je mnohokrát větší než proud báze. Nastal tranzistorový jev. Můžeme ho ve stručnosti charakterizovat takto:

Malé napětí vzbuzuje v obvodu báze proud, který je příčinou mnohokrát většího proudu v obvodu kolektorovém.

Tranzistorový jev podrobněji



Proud báze je tvořen elektrony, které z editoru pronikají do oblasti báze. V bázi je nedostatek děr, s nimiž elektrony mohly nekombinovat. Současně jsou elektrony silně přitahovány ke kolektoru, který má ladný potenciál. Poněvadž elektrony jsou v oblasti báze menšinovými nosiči náboje, mohou volně procházet kolektorovým přechodem, který pro většinové nosiče uzavřen. To znamená, že z elektronů, které přicházejí do báze, se jen malá část rekombinuje. Většina prochází do kolektoru a vytváří značně větší kolektorový proud.

Při činnosti tranzistoru dochází k zesílení proudu. Tomu odpovídá základní použití tranzistoru jako zesilovací prvek v elektronických zařízeních. Základní zesilovací parametr tranzistoru je proudový zesilovací činitel β , který

charakterizuje zesilovací funkci tranzistoru. Je definován vztahem $\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$, při $U_{CE} = \text{konst.}$

V elektronice je používáme samostatně, ale i v integrovaných obvodech. Na jejich výrobu používáme různé technologie, z nichž k nejrozšířenějším patří planární technologie. Tranzistor vzniká v tenké destičce vyříznuté z monokrystalu křemíku s vodivostí např. typu N. Na destičce se postupnými operacemi (oxidací povrchu), leptání a difuze příměsí, při níž se mění typ vodivosti vytváří struktura tranzistoru.