



Výfučení: Polovodiče

Polovodiče – základ kompaktní elektroniky

Každý z nás si už určitě někdy položil otázku, jak vlastně funguje veškerá elektronika, která nás obklopuje. Přestože se na obrazovky chytrých telefonů a televizí díváme často i mnoho hodin denně, alespoň základům jejich stavby rozumí jen nemnoho z nás. A právě tomu, jak fungují integrované obvody – paměti a mikroprocesory, které tyto obrazovky oživují – bude věnováno poslední Výfučení v tomto školním roce. Klíčem k pochopení všeho jsou právě polovodiče – úžasné materiály, jejichž vlastností se naplno začalo využívat ve druhé polovině dvacátého století. Základem elektroniky se tehdy stal tranzistor, za který jeho vynálezce v roce 1956 obdržel Nobelovu cenu.¹ Jeho hlavní výhodou jsou kompaktní rozměry, neboť na jednotku plochy jich dokážeme naskládat velké množství. V dnešní době mikroprocesory a paměti nejvýkonnějších počítačů i chytrých telefonů obsahují několik miliard těchto revolučních součástek.

Téměř stejně důležitým vynálezem byla LED dioda, která najde uplatnění nejen jako zdroj osvětlení, ale používá se také u některých typů displejů. I ona si prošla miniaturizací, takže například ve špičkových chytrých telefonech najdeme skutečně velké množství LED diod na ploše jednoho centimetru čtverečního. I zde byla udělena Nobelova cena, a to v roce 2014 za vynález modré LED diody.²

Na následujících řádcích se tak pokusíme vyložit základní principy fungování pozoruhodných materiálů, které umožnily vývoj moderní výpočetní techniky. Ukážeme si, jakým způsobem jsou sestaveny nejjednodušší polovodičové součástky, přičemž nezapomeneme zahrnout ani výše zmiňovaný tranzistor a LED diodu.

Vnitřní struktura a princip polovodičů

Nejprve si připomeneme rozdíl mezi vodičem a izolantem. Zatímco ideální vodiče proud vedou, izolanty tuto vlastnost nemají. U všech materiálů také můžeme zavést veličinu zvanou *elektrický odpor* R , který popisuje, jak moc daná látka brání průchodu elektrického proudu. U izolantů bude elektrický odpor obrovský a u vodičů malý. U kovových vodičů také často pozorujeme růst elektrického odporu, když je zahříváme.

Elektrický odpor u polovodičů zpravidla nabývá hodnoty, která není tak vysoká jako u izolantů, nicméně je vyšší než v případě vodičů. Polovodičový odpor vykazuje také jiné teplotní chování – pokud polovodič zahříváme, jeho odpor klesá.

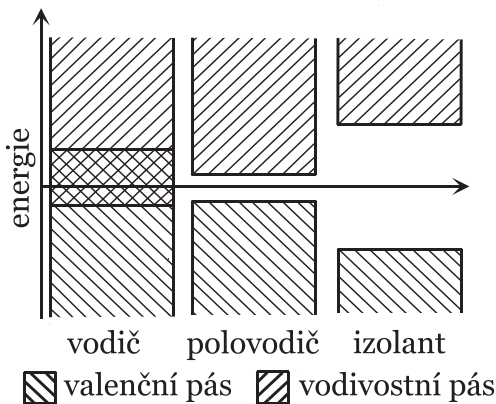
Abychom pochopili, jak polovodiče fungují, podíváme se malinko podrobněji na jejich vnitřní strukturu. Všechna hmota kolem nás se skládá z atomů, které jsou složeny z kladně nabitého jádra a záporně nabitého elektronového obalu. I samotný elektronový obal má další strukturu,³ pro naše potřeby se však budeme zabývat pouze elektrony s největší energií, které sídlí v tzv. *va-*

¹https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/

²https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/

³Podrobněji se o ní můžete dočíst v loňském Výfučení „Návštěva do mikrosvěta atomů a elektronů“ na adrese http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r6/vyfucteni/vyfucteni_3.pdf.

lenčním pásu.⁴ Valenční elektrony jsou k atomu vázané, pokud však tyto elektrony získají více energie, mohou se odtrhnout a přeskočit do tzv. *vodivostního pásu*. Množství energie, jež je k takovému přeskočení potřebné, se liší, přičemž nejmenší je u vodičů, vyšší většinou u polovodičů a nejvyšší u izolantů, viz obrázek 1.



Obr. 1: Znázornění tří různých případů, které běžně nastávají pro tři druhy materiálů – vodiče, polovodiče a izolanty. Zatímco u vodičů má část vázaných elektronů vždy dostatečnou energii k tomu se podílet i na vodivosti, u izolantů tomu tak není a energetická bariéra, kterou by musely překonat, je velká. Polovodiče jsou na rozhraní a potřebná energie je pro vázané elektrony dosažitelná běžnými procesy.

Jako příklad typického polovodiče nám nyní poslouží křemík. Jeden jeho atom má celkem čtrnáct elektronů, z nichž čtyři jsou valenční. Polovodič ale netvoří jen jediný atom, nýbrž jejich vhodné uspořádání. V případě křemíku se jedná o pravidelnou krystalickou mřížku, kde každý atom sdílí všechny své valenční elektrony s dalšími čtyřmi atomy. Valenční vrstva je proto zaplněna osmi sdílenými elektrony.

Při nižších teplotách zůstávají tyto elektrony na svých místech, a krystal křemíku tedy neobsahuje žádné volné elektrony. Elektrický proud však není nic jiného než pohyb elektronů. V krystalu křemíku se nenacházejí žádné elektrony, které by se mohly hýbat, a proto se chová jako izolant. Pokud mu však dodáme energii, např. tím, že jej zahřejeme (pro většinu polovodičů je dostatečná už i pokojová teplota), mohou se některé elektrony uvolnit. Tyto elektrony se pak mohou stát nositeli elektrického náboje, tj. umožňují v tomto krystalu vést elektrický proud. Logicky platí, že čím více energie dodáme, tím více volných elektronů získáme a tím menší hodnoty nabude elektrický odpor.

Uvolněné elektrony však po sobě zanechávají prázdná místa, která se chovají jako kladně nabitě částice a nazývají se *díry*. Proces, při kterém vznikne pár elektron–díra,⁵ se jmenuje

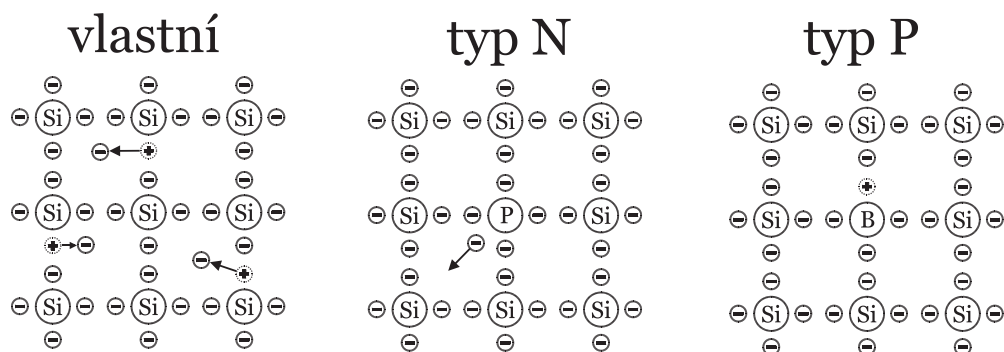
⁴Energetický pás se vytvoří tehdy, pokud se k sobě atomy přiblíží natolik, že se atomární orbitály (ty si můžeme představit jako jakési domečky pro elektrony) začnou překrývat. Vlivem Pauliho vylučovacího principu pak dojde k přeuspořádání energetických hladin a vytvoření energetického pásu (což si můžeme představit tak, že všechny ty elektrony nemusí bydlet v jednom malém domečku, ale postaví si velký panelák s mnoha byty).

⁵Rozmyslete si, že nikdy nemůže vzniknout jen volný elektron nebo jen díra.

generace. Volný elektron se nějakou dobu může volně pohybovat v krystalu, ale jen do té doby, než spadne do nějaké (jiné) díry po dalším elektronu. Volný elektron a díra tak zaniká, čemuž se říká *rekombinace*.

Co se stane, pokud takovýto polovodič připojíme ke zdroji elektrického napětí? Záporně nabitě volné elektrony se samozřejmě začnou okamžitě pohybovat směrem ke kladnému pólu zdroje. Pokud po cestě krystalickou mřížkou narazí na díru, spadnou do ní a spolu zaniknou. Poněvadž ale generace a rekombinace jsou do jisté míry náhodné procesy, může pár elektron–díra opakovaně vznikat a zanikat na mnoha místech v krystalu. Díky tomu dochází i ke zdánlivému pohybu děr k zápornému pólu. Vedení proudu v křemíkovém polovodiči tak probíhá odlišným způsobem než u vodičů.⁶

Výše popsaných mechanismus se označuje jako *vlastní vodivost*.



Obr. 2: Vlastní vodivost je spojena se vznikem párů elektron–díra, zatímco příměsí jiných prvků mohou způsobit přebytek nebo nedostatek elektronů.

Příměsové polovodiče

Dalším typem vodivosti je *vodivost příměsová*, kdy např. v křemíkovém krystalu nahradíme některé atomy jiným prvkem s odlišným počtem elektronů ve valenční vrstvě.

Pokud použijeme například fosfor s pěti valenčními elektrony, účastní se čtyři elektrony vazeb s okolními křemíky. Pátý elektron se žádné vazby neúčastní a bude na svém místě velmi slabě vázaný. K uvolnění tohoto elektronu je potřeba ještě méně energie než k vytvoření páru elektron–díra, proto budou při vzniku elektrického proudu elektrony převažovat. Hovoříme zde o *elektronové vodivosti* způsobené zápornými (negativními) nositeli náboje – elektrony. Látky s touto vodivostí nazýváme polovodiče *typu N*.

Ve druhém případě, kdy při vedení elektrického proudu hrají hlavní roli díry, vyměníme některé atomy křemíku např. za atomy bóru. Bór má ve valenční vrstvě pouze tři elektrony, přičemž všechny vytvoří s okolními křemíkovými elektrony vazbu. Na místě čtvrtého elektronu zůstane prázdné místo – díra, odtud hovoříme o *vodivosti děrové* způsobené kladnými (pozitivními) nositeli náboje. Takové polovodiče se označují jako polovodiče *typu P*.

⁶U vodičů jsou nositeli náboje pouze elektrony.

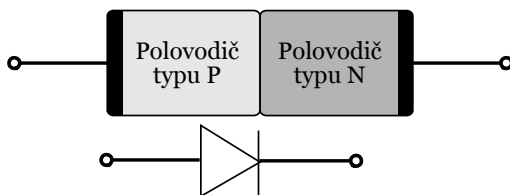
PN přechod

Polovodiče typu P a N je možné spojit. Dostaneme tak jednu oblast s přebytkem elektronů a druhou s přebytkem děr. Rozhraní oblastí se nazývá PN přechod a dochází zde k rekombinaci „nadbytečných“ elektronů a děr. Bez volných nositelů náboje se PN přechod chová jako izolant.

Pokud k polovodiči typu P připojíme záporný pól zdroje napětí a k polovodiči typu N pól kladný, budou díry v polovodiči typu P tlačeny od PN přechodu směrem k zápornému pólu. Podobně elektrony v polovodiči typu N se budou pohybovat od PN přechodu ke kladně nabitému pólu. Oblast bez volných nositelů náboje se tak zvětší a po ustálení obvodem nebude procházet proud.

V opačném případě připojíme k polovodiči typu P kladný pól zdroje napětí a k polovodiči typu N záporný pól. Díry v polovodiči typu P i elektrony v polovodiči typu N tak budou tlačeny směrem k PN přechodu a budou postupně zmenšovat oblast bez volných nábojů. Tímto mechanismem nastane pokles elektrického odporu a elektrony následně začnou přecházet přes PN přechod směrem ke kladnému pólu a po ustálení poteče takovýmto obvodem elektrický proud. Ve zkratce, PN přechod propouští elektrický proud jen jedním směrem.

Pokud PN přechod chceme zapojit do obvodu, hledáme součástku nazývanou se *polovodičová dioda*.



Obr. 3: PN přechod jako spojení polovodičů různých typů vodivosti. Dole je schematické znázornění polovodičové diody, pro níž je propustný směr zleva doprava.

Využití PN přechodu

Usměrnění proudu

Na předchozích řádcích jsme si řekli pár slov o tom, co se děje v diodě (či PN přechodu) v případě, kdy jej připojíme ke zdroji napětí, respektive proudu. Pokud diodou po zapojení do obvodu proud teče, říkáme, že je zapojena v *propustném směru*. Když ji zapojíme naopak a proud diodou nepoteče, mluvíme o zapojení v *závěrném směru*. Tento jev se využívá všude tam, kde je potřeba, aby elektrický proud procházel pouze jedním směrem.⁷

Dioda a světlo

V části, kde jsme si povídali o vnitřní struktuře polovodičů, jsme psali o tom, že ke vzniku páru elektron–díra musíme polovodiči dodat energii například tím, že jej zahřejeme. To však není

⁷V zásuvkách totiž máme pouze proud střídavý, jehož směr se v čase mění! Všechny naše digitální přístroje však pracují na proud stejnosměrný.

jediný způsob, poněvadž potřebnou energii lze dodávat i v podobě světla, respektive fotonů. Toho se využívá například u fotovoltaických článků a nejrůznějších fotodetektorů.

K přesně opačnému jevu dochází u LED diod,⁸ kdy při vhodně zvoleném napětí dochází na PN přechodu k zániku páru elektron–díra a zároveň dojde k vyzáření světla – fotonu o určité energii.⁹ Vyzářená energie je dána použitými materiály a je určující pro barvu, kterou bude LED dioda svítit.

Revoluční tranzistor

Nakonec si povíme pár slov o tranzistoru – součástce, která se i v množství několika miliard kusů nachází v běžném integrovaném obvodu. Tranzistor je tvořen dvojicí PN přechodů za sebou. Vzniká tak přechod typu NPN, případně PNP. Tyto součástky se využívají jako spínače, či zesilovače¹⁰ a jejich různým skládáním za sebou lze vytvořit obvody, které mohou provádět matematické logické operace. Odtud už není příliš dlouhá cesta k mikroprocesorům, které se dnes nacházejí v každém chytřejším zařízení.

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastrešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁸LED – light-emitting diode, neboli elektroluminiscenční dioda, dioda, která vyzařuje světlo.

⁹Podrobněji se o tomto jevu můžete dočíst v jednom z minulých Výfuctení „Fotoelektrický jev“ na adrese http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r7/vyfucteni/vyfucteni_2.pdf.

¹⁰Přesněji nejde o zesilovače proudu, ale o zesilovače změny proudu. Tranzistor umožňuje vzájemně propojit dva obvody tak, že malá změna v proudu jednoho obvodu řídí násobně větší změnu v mnohem větším proudu obvodu jiného.