



Výfučtení: Tranzistory – svět nul a jedniček

Nejspíše každý dokáže popsat základní charakteristiku vodiče a izolantu. Vodič je schopen vést elektrický proud, což charakterizuje jeho odpor – čím menší, tím lépe vede. Izolant naopak proud nevede skoro vůbec. Co ale takový polovodič? Z názvu je zřejmé, že bude někde mezi. V tomto Výfučtení si jednak vysvětlíme, jak to je s vodivostí těchto látek, ale hlavně uvedeme důležitý příklad jejich využití, kterým jsou tranzistory. Bez těchto součástek si totiž dnešní dobu nikdo nedovede představit, protože tvoří základ prakticky veškeré elektroniky.

Vlastní vodivost

Polovodiče jsou látky, které mají za normálních podmínek větší odpor než kovové vodiče, ale jejich vodivost (převrácená hodnota odporu) se velmi rychle zvyšuje s teplotou – je to tedy přesně naopak než u vodičů, kde s teplotou vodivost klesá.

Abychom tomuto jevu porozuměli, zaměříme se teď podrobně na nejvyužívanějšího zástupce polovodičů – křemík. A když říkáme podrobně, myslíme na atomární úrovni. Pro polovodičový průmysl se využívá velmi čistý monokrystalický křemík, který má krychlovou krystalovou mřížku. Z periodické tabulky vyčteme, že atom křemíku má 14 elektronů, ovšem z hlediska vodivosti nás zajímají pouze 4 valenční elektrony (není náhoda, že je křemík prvek IV. A skupiny). Ty totiž zprostředkovávají vazby s okolními atomy. Když se těmto elektronům dodá určitá energie, například ve formě tepla, mohou vyskočit ze svého místa a vyrazet další a další valenční elektrony. Vznikají tak páry elektronů a děr – tak říkáme místům uvolněným elektrony. Když připojíme polovodič do elektrického pole, můžeme pozorovat uspořádaný pohyb těchto nabitých částic, polovodičem tedy protéká elektrický proud. Tomuto mechanismu vzniku párů elektron–díra říkáme vlastní vodivost.

Příměsová vodivost

V praxi by pro nás bylo jistě poměrně nepraktické zajišťovat vodivost polovodičových součástek pouze zvyšováním teploty. Zahřívání je totiž omezeno již teplotou, při níž daný polovodič taje. Proto zařízení obvykle musíme spíše chladit. Naštěstí existuje ještě další možnost zajištění zvýšení vodivosti polovodičů – pomocí příměsí.

Vraťme se k našemu krystalickému křemíku na atomární úrovni a vyměňme jeden atom křemíku za atom, který má valenčních elektronů 5, tedy například arsen či fosfor. Čtyři jeho valenční elektrony budou tvořit vazby se sousedními křemíky, ovšem ten pátý bude již od začátku volný. Aniž bychom museli dodat jakoukoliv energii, máme již od počátku přebytek elektronů oproti dírám. Když takový polovodič umístíme do elektrického pole, volné elektrony se budou pohybovat ke kladnému konci a budou vyrazet další elektrony – polovodičem poteče elektrický proud.

Výše jsme demonstrovali princip na příměsi s přebytkem elektronů, takový polovodič nazýváme N jako negative. Opačným typem je P jako positive, kde jako příměs použijeme prvek se třemi valenčními elektrony, tudíž máme převahu kladných děr.

PN přechod, dioda

Vysvětlili jsme si základy příměsových vodičů. Nyní se zamysleme, co se stane při spojení polovodičů typu P a N. V obou částech budou nosiče náboje konat neuspořádaný pohyb, přičemž na rozhraní obou oblastí bude docházet k jejich rekombinaci, tedy vzájemnému vyrušení páru elektron-díra. Volné elektrony z polovodiče typu N budou na krátké vzdálenosti přeskakovat do kladných děr v polovodiči typu P. Toto tedy vede k tomu, že na okraji P polovodiče vzniká záporně nabitá vrstva a naopak na okraji polovodiče typu N vzniká kladně nabitá vrstva. Tyto nabitě vrstvy vytváří elektrické pole, které zabraňuje dalším elektronům v přechodu z polovodiče N do polovodiče P. Takové oblasti se říká hradlová vrstva. Podle zapojení pak můžeme vnějším elektrickým napětím tuto hradlovou vrstvu zmenšit či zvětšit. Proud pak vedou většinou elektrické náboje na polovodičích a mluvíme o zapojení v propustném, respektive závěrném směru. Součástce, která obsahuje 1 PN přechod, se říká dioda a umožňuje průchod proudu pouze jedním směrem.

Tranzistor

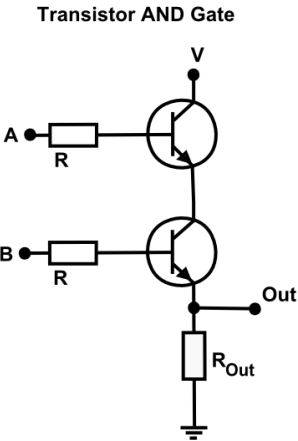
Tranzistor funguje na principu dvou polovodičových PN přechodů. Podle toho, jestli jsou za sebou příměsové polovodiče NPN nebo PNP, se rozlišují dva typy tranzistorů. Uvažujme dále o typu NPN. Vývody z N oblastí nazýváme kolektor (C) a emitor (E). Tranzistor zároveň obsahuje i vývod z prostřední oblasti P, který se označuje jako báze (B). Proud mezi kolektorem C a emitorem E prochází jen ve chvíli, kdy prochází ještě malý proud mezi bází a emitorem. Důvod, proč tomu tak je, lze jednoduše vysvětlit, když přemýšlíme nad tranzistory jako nad dvěma diodami zapojenými v opačném směru. Za normálních podmínek nemůže mezi C a E procházet proud, protože jedna z diod je v závěrném směru. Jakmile však na tuto diodu připojíme napětí v propustném směru, zmenší se hradlová vrstva a může touto diodou procházet proud – stejně jako celým tranzistorem.

Tranzistory jsou velmi důležitá součástka pro veškerou moderní elektroniku. Bez nich by nemohly fungovat žádné mikročipy, které se nacházejí ve výpočetní technice. Jak se ale dostaneme od součástky, která umí spojovat a rozpojovat obvod mezi emitorem a kolektorem na základě napětí na bázi, k výpočetní technice? Odpověď na tuto otázku skýtá speciální odvětví matematiky, Booleova algebra. Booleova algebra je na rozdíl od matematiky, se kterou běžně počítáme, založená na binární soustavě, kde jsou všechna čísla reprezentována pouze kombinacemi dvou stavů – vypnuto a zapnuto, tedy 0 a 1. Čísla v binární soustavě jsou zapisována tak, že na posledním místě čísla je počet jedniček, na předposledním počet dvojek a na cifře n od konce počet 2^{n-1} . Například číslo 154 je tak zapsané v binární soustavě jako 1001 1010, tedy jako $1 \cdot 128 + 0 \cdot 64 + 0 \cdot 32 + 1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1$.

Logická hradla

S pomocí tranzistorů lze postavit takzvaná logická hradla, což jsou elektronické komponenty vykonávající základní logické operace. Například hradlo AND, které má dva vstupy a jeden výstup, má na výstupu kladné napětí pouze v případě, kdy je kladné napětí na obou vstupech. Alternativně v řeči Boolovy algebry má toto hradlo na výstupu jedničku pouze tehdy, pokud je jednička na obou vstupech. Při jiné kombinaci na vstupech je na výstupu nula. Hradlo AND lze postavit z tranzistorů např. podle schématu 1.

Podobně lze postavit i další logická hradla. Logická hradla se často popisují logickou tabulkou, ve které jsou všechny kombinace vstupů a odpovídajících výstupů. Nejpoužívanější hradla



Obrázek 1: Hradlo AND vytvořené ze dvou tranzistorů. Zřejmě bude procházet proud pouze, pokud bude na obou bázích napětí, tedy pokud bude na vstupech A i B stav 1. Autor: EBatlleP, licence: CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>)

vstup A	vstup B	vstup C	součet	přenesení 1
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

Tabulka 1: Sčítání binárních čísel v logické tabulce.

popisuje tabulka na obrázku 2. Za povšimnutí stojí hradla NAND a NOR, lze z nich totiž různým zapojení vytvořit jakékoliv jiné hradlo, jak si vyzkoušíte v úloze.

Jak sčítají počítače?

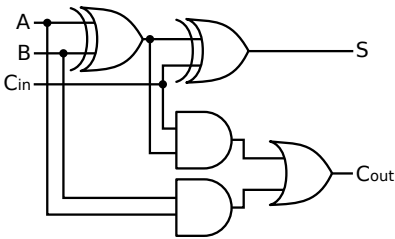
Z logických hradel můžeme stavět i větší celky, které dokáží dělat aritmetiku ve dvojkové soustavě a provádět logické operace. Asi nejdůležitější aritmetická operace je sčítání. Tu lze provádět podobně jako v desítkové soustavě při písemném sčítání – tedy sčítat vždy stejné cifry, a pokud jejich součet přesahuje základ číselné soustavy, přenést jedničku do vyššího řádu. Takové sčítání můžeme vyjádřit tabulkou výše, kde A a B představují sčítané cifry a C je zde jako přenesená jednička ze sčítání předchozích cifer. Výstupem je odpovídající cifra součtu a to, zda se přenáší jednička.

Tabulka výše je již poměrně složitá a rozhodně není na první pohled zřejmé, jak sestavit

Input		Output (Q)						
								
A	B	AND	OR	INH	XOR	NAND	NOR	XNOR
0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	1

Obrázek 2: Nejpoužívanější logická hradla spolu s jejich značkami. Všechna tato hradla vzniknou vhodným zapojením mnoha tranzistorů obdobně jako jsme výše ukázali zapojení hradla AND. Autor: Chemsaint, licence: CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)

obvod z hradel tak, aby odpovídal takovému zadání. Správné zapojení hradel pro sčítání je na obrázku 3. Sami si postupně pro několik vstupů ověřte, že daný obvod skutečně odpovídá tabulce a představuje tak sčítání dvou čísel.



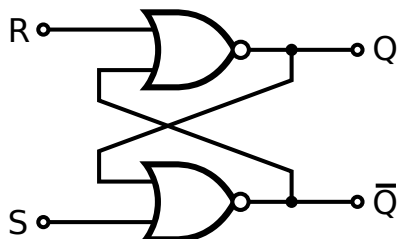
Obrázek 3: Zapojení obvodu pro součet dvou čísel spolu s přenesením jedničky. Vidíme, že se používají hradla AND, OR a XOR. Autor: Cburnett, licence: CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)

Tyto obvody lze zapojit do řetězce, kde na vstup C se zapojí přenesení 1 (anglicky carry) předchozího obvodu, a sčítat tak několikabitová čísla (čísla s více číslicemi).

Uchování dat

Další nesmírně praktické použití logických hradel je uchovávání dat. Toho lze docílit obvodem, který je zapojen do smyčky. Příkladem je obvod na obrázku 4. Tento obvod má výstup Q a vstupy R a S. Pokud se na vstupu S (set) vyskytne napětí znamenající 1, tak se výstup Q nastaví na 1. To trvá i poté, co již na vstupu S není 1, a to právě do té doby, dokud se neobjeví 1 na vstupu R (reset). Na pochopení toho, jak tento obvod funguje, je nejvhodnější

zvolit si nějaký počáteční vstup a krok po kroku si rozmýšlet podle pravdivostní tabulky hradla NOR, co bude následovat.



Obrázek 4: Schéma obvodu, který slouží k uložení dat.

Závěr

Ukázali jsme si základy toho, jak fungují polovodiče, a představili nejjednodušší polovodičovou součástku – diodu. Spojením takových diod pak vznikne součástka, která je již o mnoho zajímavější a také složitější – tranzistor. Jeho vlastnosti, kdy malé změny napětí na bázi umožňují rozpojit, či spojit kolektor s emitorem, ho předurčují k využití v počítačové technice. Musíme k tomu však přejít do světa pouhých dvou stavů – vypnuto a zapnuto, tedy 0 a 1.

Kombinováním tranzistorů můžeme vytvářet nejrůznější logická hradla a kombinováním hradel pak složitější logické obvody. Dalším krokem je skládat za sebe celé obvody, čímž lze postavit jednoduchý počítač. Ten na základě hodnoty instrukce uložené v paměti dekoduje, co má proběhnout za operací s daty v paměti, data v paměti upraví a přesune se na další instrukci.

Lukáš Linhart

lukas.linhart@vyfuk.org

Míla Tomášů

mila.tomasu@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

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