

Moderní svět

V roce 1947 byl sestrojen první tranzistor na světě. Dnes se jich ročně vyrobí přes 10 000 000 000 000 000 000, což je stokrát víc, než je celkový počet zrněk rýže snědených každý rok sedmi miliardami obyvatel světa. První tranzistorový počítač na světě byl postaven v Manchesteru roku 1953 a obsahoval jich devadesát dva. Dnes můžete koupit víc než sto tisíc tranzistorů za cenu jediného rýžového zrnka a ve vašem mobilním telefonu je jich okolo miliardy. V této kapitole si popíšeme, jak tranzistor funguje, což je nepochybně nejdůležitější uplatnění kvantové teorie.

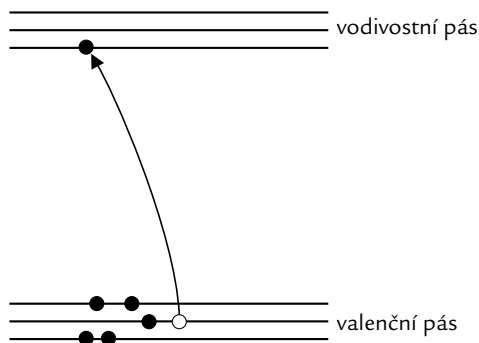
Jak jsme viděli v předešlé kapitole, je vodič vodičem proto, že některé z elektronů sedí ve vodivostním pásu. V důsledku toho jsou docela pohyblivé a mohou „téct“ drátem, je-li připojena baterie. Analogie s tekoucí vodou je dobrá; baterie způsobuje tok proudu. K vystižení této myšlenky můžeme dokonce použít i pojem „potenciálu“, protože baterie vytváří potenciál, v němž se vodivostní elektrony pohybují, a tento potenciál míří v jistém smyslu „z kopce“. Elektron ve vodivostním pásu nějaké látky se tedy „kutálí“ dolů potenciálem vytvářeným baterií, a jak se pohybuje, získává energii. To je další možnost, jak si představovat ony drobné šťouchance, o nichž jsme mluvili v předešlé kapitole – místo baterie ušředňující jemné šťouchance, které urychlují postup elektronu drátem, se odvoláváme na klasickou analogii s vodou tekoucí z kopce. Jde o vhodný způsob, jak si představovat

vedení elektřiny elektrony, a takto také budeme uvažovat po celý zbytek této kapitoly.

V polovodičovém materiálu jako křemík dochází k něčemu velmi zajímavému, protože proud není přenášen pouze elektrony ve vodivostním pásu. K proudu přispívají i elektrony ve valenčním pásu. Abyste to pochopili, podívejte se na obrázek 9.1. Šipka ukazuje elektron původně netečně sedící ve valenčním pásu, který pohltí jistou energii a je vyzdvižen do vodivostního pásu. Vyzdvižený elektron je teď jistě mnohem pohyblivější, pohyblivého je tu ale ještě cosi dalšího – ve valenčním pásu zůstala díra a tato díra dává jinak netečným elektronům z valenčního pásu trochu prostoru, v němž se mohou vrtět. Jak jsme viděli, připojení baterie k tomuto polovodiči způsobí, že energie elektronu z vodivostního pásu povyskočí, což vyvolá elektrický proud. Co se stane s onou dírou? Elektrické pole vytvářené baterií může způsobit, že elektron z nějakého nižšího energetického stavu ve valenčním pásu vyskočí do prázdné díry. Díra je zaplněna, ale teď je tu „hlouběji“ ve valenčním pásu jiná díra. Jak elektrony ve valenčním pásu skáčou do prázdné díry, díra se pohybuje.

Než bychom se obtěžovali udržováním přehledu o pohybu všech elektronů v téměř zaplněném valenčním pásu, budeme místo toho sledovat, kde je díra, a na elektrony zapomeneme. Mezi těmi, kdo pracují na fyzice polovodičů, je tato účetní vymoženost normou – a nám zjednoduší život, budeme-li uvažovat stejně.

Působící elektrické pole přiměje elektrony z vodivostního pásu k tomu, aby tekly, a vyvolá tak proud, a my bychom rádi věděli, co dělá s dírami ve valenčním pásu. Víme, že elektrony z valenčního pásu se nemohou volně pohybovat, protože je téměř úplně spoutal Pauliho princip, ale vlivem elektrického pole se budou někam sunout, a díra se pohybuje



Obr. 9.1: Pár elektron-díra v polovodiči.

spolu s nimi. To by mohlo znít neintuitivně, a pokud máte potíže s myšlenkou, že sunou-li se elektrony ve valenčním pásu doleva, potom se i díra posunuje doleva, třeba vám pomůže následující analogie. Představte si řadu lidí, kteří všichni stojí ve frontě vždy metr od sebe vyjma toho, že někde uprostřed řady jedna osoba chybí. Tito lidé jsou obdobou elektronů a ona chybějící osoba je dírou. Teď si představte, že všichni udělají metrový krok kupředu, takže skončí tam, kde stála osoba, která byla před nimi. Je zřejmé, že i mezera v řadě poskočila o metr dopředu, a tak je to i s dírami. Bylo by také možné si představit vodu tekoucí trubkou – bublinka ve vodě se bude pohybovat týmž směrem jako voda a tato „chybějící voda“ je obdobou díry ve valenčním pásu.

Jakoby ale tohle samo o sobě nestačilo, je tu ještě jedna důležitá dodatečná komplikace; musíme se teď odvolat na jednu partii fyziky, kterou jsme si představili v rámci „zápletky“ na konci předešlé kapitoly. Pokud si vzpomínáte, řekli jsme, že elektrony pohybující se poblíž vrcholu zaplněného pásu jsou elektrickým polem urychlovány ve směru *opačném* vůči elektronům pohybujícím se poblíž dna pásu. To znamená, že díry, které jsou poblíž vrcholu valenčního

pásu, se pohybují opačným směrem než elektrony, které jsou poblíž dna vodivostního pásu.

Výsledkem je, že můžeme uvažovat tok elektronů v jednom směru a odpovídající tok děr ve směru opačném. Lze předpokládat, že díra přenáší elektrický náboj, který je přesně opačný než náboj elektronu. Pro lepší představu si vzpomeňte, že látka, v níž dochází k toku našich elektronů a děr, je v průměru elektricky neutrální. V jakékoli běžné oblasti je celkový náboj nulový, protože náboj daný elektrony vyruší kladný náboj přenášený atomovými jádry. Pokud ale excitováním elektronu z valenčního pásu do vodivostního pásu vytvoříme pár elektron–díra (jak jsme o tom mluvili), máme tu volný elektron poletující kolem, který představuje přebytek záporného náboje vzhledem k průměrným podmínkám v této části látky. Podobně je díra místem, kde není žádný elektron, a tak odpovídá oblasti, kde je celkově přebytek kladného náboje. Elektrický proud je definován tak, že jde o rychlost, jakou tečou kladné náboje,* a tak elektrony k proudu přispívají záporně a díry přispívají kladně, tečou-li tímž směrem. Jestliže – jako je tomu v našem polovodiči – tečou elektrony a díry opačnými směry, potom se obojí spolu sečte a vytvoří se větší celkový tok náboje, a tudíž i větší proud.

Zatímco toto vše je maličko spleť, výsledný účinek je velmi přímočarý: lze ho chápat tak, že elektrický proud polovodičovým materiálem představuje tok náboje, a že tento tok mohou tvořit elektrony z vodivostního pásu pohybující se jedním směrem a díry z valenčního pásu pohybující se směrem opačným. To se dost liší od toku proudu ve vodiči – v tomto případě dominuje proudu tok vysokého počtu

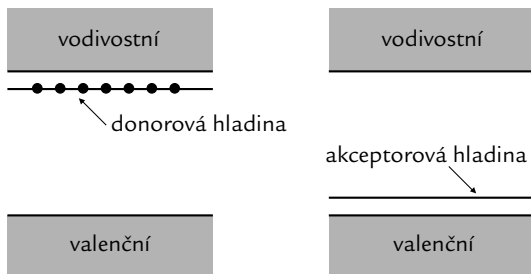
* Tato definice je čistě otázkou dohody a historickou kuriozitou. Zrovna tak bychom mohli definovat, že proud teče směrem, jímž se pohybují elektrony z vodivostního pásu.

elektronů ve vodivostním pásu, zatímco dodatečný proud plynoucí ze vznikajících párů elektron-díra je zanedbatelný.

Pochopit přínos polovodičových materiálů znamená uvědomit si, že proud tekoucí polovodičem není jako neovladatelný příval elektronů tekoucích drátem, jako je tomu ve vodiči. Jde naopak o mnohem delikátnější kombinaci elektronového a děrového proudu a s trochou šikovné konstruktérské práce lze tuto delikátní kombinaci využít k výrobě maličkých zařízení, která jsou schopna skvěle ovládat tok proudu obvodem.

To, co následuje, je inspirujícím příkladem techniky a aplikované fyziky. Celý nápad spočívá v záměrném znečištění kousku čistého křemíku nebo germania tak, abychom pro elektrony vytvořili několik nových dostupných energetických hladin. Tyto nové hladiny nám umožní ovládat tok elektronů a děr naším polovodičem právě tak, jak bychom ovládali třeba tok vody sítí trubek pomocí ventilů. Tok elektriny drátem může samozřejmě ovládat kdokoli – vytáhnete prostě zástrčku. O tom ale nemluvíme – hovoříme spíš o maličkých přepínačích, které umožňují ovládat proud v obvodu dynamicky. Tyto maličké přepínače jsou stavebními kameny logických hradel a logická hradla jsou stavebními kameny mikroprocesorů. Jak tedy tohle všechno funguje?

Levá část obrázku 9.2 znázorňuje, co se stane, je-li kousek křemíku znečištěn fosforem. Stupeň znečištění lze přesně řídit, a to je velmi důležité. Předpokládejme, že uvnitř čistého krystalu křemíku je tu a tam odebrán atom a nahrazen atomem fosforu. Atom fosforu se uvelebí na místě uvolněném křemíkovým atomem, pouze s tím rozdílem, že fosfor má o jeden elektron *víc* než křemík. Tento dodatečný elektron je ke svému hostitelskému atomu vázán jen velmi slabě, zcela volný ale není, a tak obsadí energetickou hladinu ležící těsně pod vodivostním pásem. Za nízkých teplot je vodivostní pás



Obr. 9.2: Nové energetické hladiny vytvořené v polovodiči typu N (vlevo) a polovodiči typu P (vpravo).

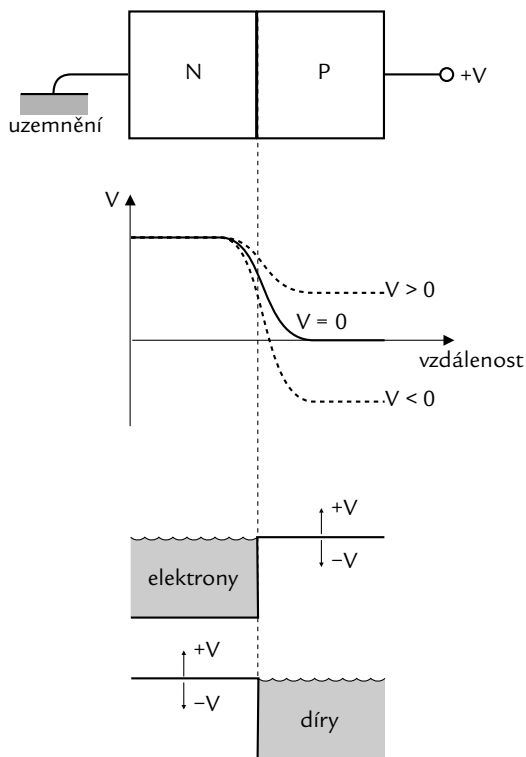
prázdný a tyto elektrony navíc, které sem dodaly atomy fosforu, sídlí na donorové hladině vyznačené na obrázku. Při pokojové teplotě je v křemíku vznik páru elektron-díra velmi vzácný a jen asi tak jeden elektron z každého bilionu získá z tepelných kmitů mřížky dost energie na to, aby vyskočil z valenčního pásu do pásu vodivostního. Protože donorový elektron ve fosforu je na svého hostitele tak slabě vázán, je naopak velmi pravděpodobné, že onen krůček z donorové hladiny do vodivostního pásu udělá. Za pokojové teploty a při úrovni dopování vyšší než jeden atom fosforu na každý bilion křemíkových atomů tak budou vodivostnímu pásu dominovat přítomné elektrony, které dodaly atomy fosforu. To znamená, že můžeme velmi přesně ovládat počet pohyblivých elektronů, které jsou k dispozici pro vedení elektřiny – prostě tím, že budeme měnit míru znečištění fosforem. Protože jsou to elektrony, které se toulají vodivostním pásem a mohou volně přenášet proud, říkáme, že tento druh znečištěného křemíku je „typu N“ („N“ jako „negativně nabitý“).

Pravá část obrázku 9.2 ukazuje, co se stane, když místo toho křemík znečistíme atomy hliníku. Hliníkové atomy jsou opět střídavě rozesety mezi atomy křemíku a zase se uvelebí do míst, kde by jinak byly křemíkové atomy. Rozdíl

je v tom, že hliník má o jeden elektron *méně* než křemík, což do jinak čistého krystalu zavádí díry, právě tak jako fosfor přidával elektrony. Tyto díry se nacházejí poblíž hliníkových atomů a lze je zaplnit elektrony přeskakujícími z valenčního pásu sousedních křemíkových atomů. Na obrázku je znázorněna „dírami zaplněná“ akceptorová hladina, která leží těsně nad valenčním pásem, protože valenční elektron v křemíku může snadno skočit do díry vytvořené hliníkovým atomem. V tomto případě můžeme za šířitele elektrického proudu přirozeně považovat díry, a z tohoto důvodu je tento druh znečištěného křemíku známý jako „typ P“ („P“ jako „pozitivně nabitý“). Stejně jako v předešlém případě nemusí být při pokojové teplotě úroveň znečištění hliníku o mnoho vyšší než jedna ku jednomu bilionu a už bude převládat proud daný pohybem děr z hliníku.

Zatím jsme si prostě jen řekli, že je možné vyrobit kus křemíku, který dokáže přenášet proud – buď tak, že umožní elektronům dodaným atomy fosforu plout vodivostním pásem, nebo tak, že umožní dírám dodaným hliníkovými atomy plout valenčním pásem. O co tedy jde?

Obrázek 9.3 dokládá, že jsme něčemu na stopě, protože ukazuje, co se stane, když propojíme dva kusy křemíku; jeden typu N a druhý typu P. Zpočátku je oblast typu N zaplavená elektrony z fosforu a oblast typu P je zaplavená dírami z hliníku. V důsledku toho se elektrony z oblasti typu N táhnou do oblasti typu P a díry z oblasti typu P se táhnou do oblasti typu N. Na tom není nic tajemného; elektrony a díry se prostě zatoulají přes přechod mezi oběma materiály právě tak, jako se kapka inkoustu rozptýluje ve vaně plné vody. Jelikož se ale elektrony a díry ubírají opačnými směry, zanechávají za sebou oblasti s celkově kladným nábojem (v oblasti typu N) a celkově záporným nábojem (v oblasti typu P). Toto hromadění náboje brání další migraci podle



Obr. 9.3: Přechod vzniklý spojením kusu křemíku typu N a kusu křemíku typu P.

pravidla „náboje stejného znaménka se odpuzují“, dokud se nakonec neustaví celková rovnováha a k další migraci už nedochází.

Druhý ze tří grafů na obrázku 9.3 ukazuje, jak bychom si to mohli představovat v jazyce potenciálů. Vidíme zde, jak se elektrický potenciál mění napříč přechodem. Hluboko v oblasti typu N je vliv přechodu nevýznamný, a jelikož se přechod ustálil ve stavu rovnováhy, žádný proud neteče. To znamená, že potenciál je uvnitř této oblasti konstantní.

Než se dostaneme dál, měli bychom si vyjasnit, co pro nás potenciál dělá: říká nám prostě, jaké síly na elektrony a díry působí. Je-li potenciál plochý, potom – právě tak jako se nebude kutálet míč stojící na ploché podlaze – nebude se pohybovat ani elektron.

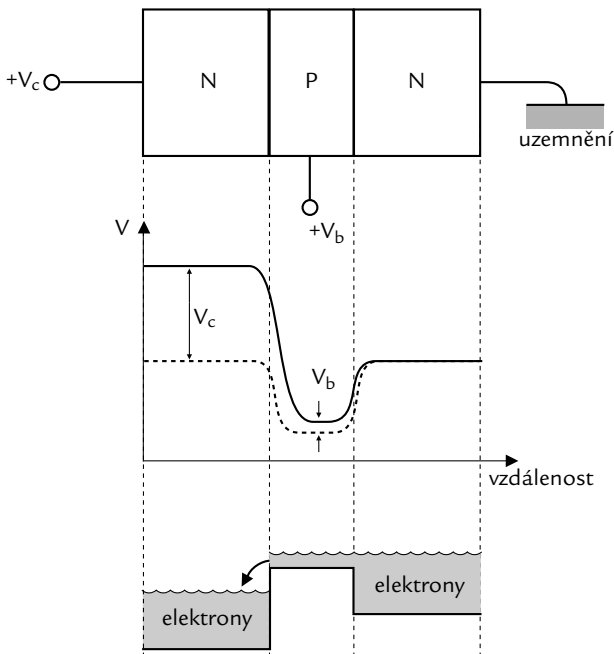
Jestliže se potenciál svažuje, mohli bychom se domnívat, že elektron vložený do blízkosti místa klesajícího potenciálu se bude „kutálet z kopce“. Konvence je bohužel opačná a svažující se potenciál znamená pro elektron „do kopce“, proto budou elektrony proudit do kopce. Jinými slovy, klesající potenciál působí na elektron jako bariéra, jak vidíme na obrázku. V důsledku hromadění záporného náboje, k němuž došlo v důsledku předchozí migrace elektronů, tu působí síla vytlačující elektron z oblasti typu P. Právě tato síla je tím, co brání jakékoli další hromadné migraci elektronů z křemíku typu N do křemíku typu P. Používat svažující se potenciály, které pro elektron představují cestu do kopce, není ve skutečnosti tak pošetilé, jak se zdá, protože z pohledu děr teď vše dává smysl, čili díry přirozeně proudí z kopce. Nyní tedy také chápeme, že to, jak jsme si potenciál nakreslili (tedy že potenciál přechází z vysoké úrovně vlevo na nízkou úroveň vpravo), správně vysvětluje i tu skutečnost, že díram v úniku z oblasti typu P brání schod v potenciálu.

Třetí kresba na obrázku znázorňuje analogii s tekoucí vodou. Elektrony vlevo by rády tekly drátem, ale brání jim v tom bariéra. Podobně i díry v oblasti typu P uvízly na špatné straně bariéry; vodní bariéra a schod v potenciálu jsou jen dvě různé možnosti pro vyjádření téže věci. A takto to probíhá, připojíme-li prostě k sobě kus křemíku typu N a kus typu P. Jejich spojení ve skutečnosti vyžaduje větší péči, než naznačujeme – nelze je prostě jen tak slepit, protože potom by přechod neumožňoval elektronům a díram volně téct z jedné oblasti do druhé.

Zajímavé věci se začnou dít, když tento „přechod P-N“ připojíme k baterii, což nám umožní zvýšit či snížit potenciálovou bariéru mezi oblastmi typu N a typu P. Snížíme-li potenciál oblasti typu P, bude schod strmější, a tak bude pro elektrony a díry ještě těžší přechodem protéct. Zvýšení potenciálu oblasti typu P (nebo snížení potenciálu oblasti typu N) je ale úplně stejné jako snížení přehrady, která zadržovala vodu. Elektrony se okamžitě vyhrnou z typu N do typu P a díry se povalí opačným směrem. Takto lze přechod P-N používat jako diodu – ta může proud nechat téct, ale pouze jedním směrem. Diody však nejsou naším konečným cílem.

Obrázek 9.4 je náčrtek zařízení, které změnilo svět – tranzistoru. Ukazuje, co se stane, když vyrobíme sendvič s vrstvou křemíku typu P mezi dvěma vrstvami křemíku typu N. Dobře nám tu poslouží předchozí výklad diody, protože klíčové myšlenky jsou v podstatě tytéž. Elektrony se táhnou z oblastí typu N do oblasti typu P a díry plynou opačným směrem, dokud tuto difuzi nakonec nezastaví schody v potenciálu na přechodech mezi vrstvami. Je-li vše izolováno, je to totéž, jakoby tu byly dva zásobníky elektronů, které zadržuje bariéra, a jediný zásobník děr, který stojí mezi nimi zaplněný až po okraj.

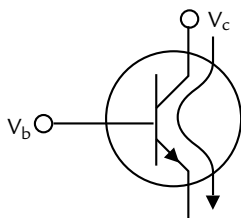
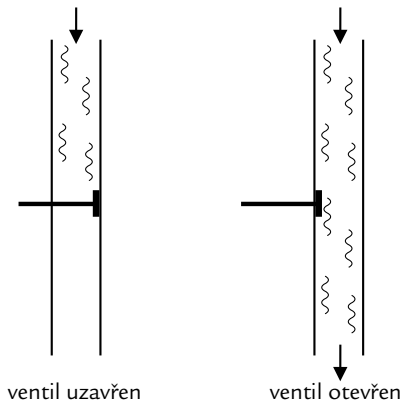
Zajímavé věci se rovněž začnou dít, když na oblast typu P uprostřed a na oblast typu N po jedné straně přivedeme napětí. Přivedení kladného napětí způsobí, že plochá křivka vlevo se zvedne (o hodnotu V_c), a podobně se zachová i plochá křivka v oblasti typu P (o hodnotu V_b). To jsme naznačili plnou čarou v prostředním diagramu na obrázku. Takové uspořádání potenciálů má dramatický účinek, protože vyvolá vodopád elektronů, které se valí přes sníženou středovou bariéru do oblasti typu N vlevo (pamatujte, že elektrony tečou „do kopce“). Za předpokladu, že V_c je větší než V_b , je



Obr. 9.4: Tranzistor.

tok elektronů jednosměrný a elektrony vlevo nadále nedokážou proudit přes oblast typu P. To vše by mohlo znít dost nevinně, ale my jsme si právě popsali elektronický ventil. Přivedením napětí na oblast typu P dokážeme proud elektronů zapínat a vypínat.

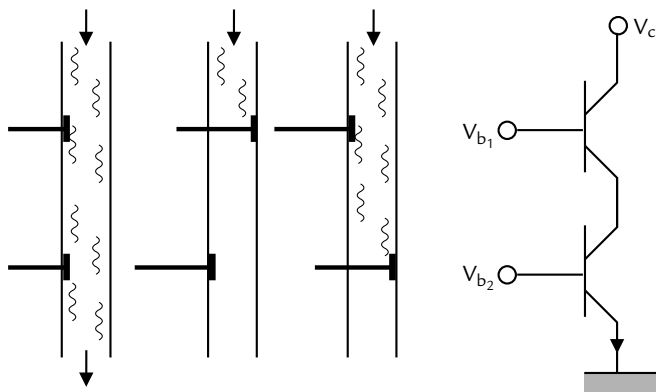
A nyní přichází finále – teď už jsme připraveni pochopit celý potenciál tranzistoru. Na obrázku 9.5 znázorníme fungování tranzistoru tak, že ještě jednou hledáme paralely s tekoucí vodou. Situace „se zavřeným ventilem“ je velmi podobná tomu, co se stane, když na oblast typu P není přivedeno napětí. Přivedení napětí odpovídá otevření ventilu. Pod oběma trubkami jsme také nakreslili často používaný sym-



Obr. 9.5: Analogie mezi „vodou v trubce“ a tranzistorem.

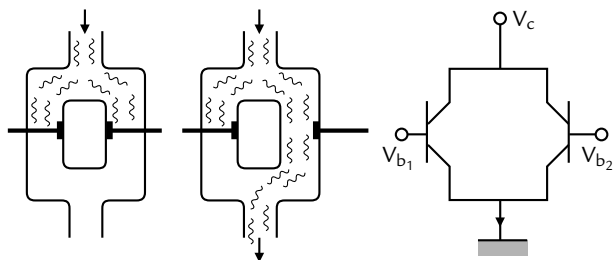
bol pro tranzistor, který s trochou představivosti dokonce i tak trochu jako ventil vypadá.

Co můžeme s ventily a trubkami dělat? Odpověď zní, že můžeme postavit počítač, a dovedeme-li tyto trubky a ventily dostatečně zmenšit, můžeme vyrobit i pořádný počítač. Obrázek 9.6 ukazuje návod, jak z trubky se dvěma ventily sestrojít cosi, co se nazývá „logické hradlo“. Na trubce vlevo jsou oba ventily otevřené a v důsledku toho spodem vytéká voda. Jak trubka uprostřed, tak trubka vpravo mají jeden ventil uzavřený a voda potom zjevně spodem vytékat nemůže. Neobtěžovali jsme se ukázat čtvrtou možnost, kdy jsou oba ventily zavřené. Pokud bychom proud vody vycházející



Obr. 9.6: Hradlo „AND“ postavené z vodovodní trubky a dvou ventilů (vlevo) nebo páru tranzistorů (vpravo). Druhá možnost je pro budování počítačů mnohem vhodnější.

ze spodku našich trubek měli vyjádřit číslici „1“ a nepřítomnost proudu číslicí „0“ a kdybychom přiřadili číslici „1“ otevřenému ventilu a číslici „0“ zavřenému ventilu, mohli bychom působení těchto čtyř trubek (tří nakreslených a jedné nenakreslené) shrnout rovnicí „1 AND 1 = 1“, „1 AND 0 = 0“, „0 AND 1 = 0“ a „0 AND 0 = 0“. Anglické slovo „and“ čili „a“ je zde logickou operací a používá se v technickém smyslu – systém trubek a ventilů, který jsme si právě popsali, se nazývá „hradlo AND“. Toto hradlo vezme dva vstupy (stav obou ventilů) a vrátí jediný výstup (to, zda voda teče, či nikoli), a jediná možnost, jak z něj dostat „1“, je přivést na něj „1“ a „1“. Doufáme, že je jasné, jak můžeme použít dvojici sériově propojených tranzistorů a postavit hradlo AND – schéma tohoto obvodu je znázorněno na našem obrázku. Vidíme, že proud může téct pouze tehdy, pokud jsou oba tranzistory zapnuté (tedy na oblasti typu P jsou přivedena kladná napětí V_{b1} a V_{b2}) – a to je přesně to, co je potřeba k realizaci hradla AND.



Obr. 9.7: Hradlo „OR“ postavené z vodovodních trubek a dvou ventilů (vlevo) nebo páru tranzistorů (vpravo).

Obrázek 9.7 znázorňuje odlišné logické hradlo. Tentokrát bude voda spodem vytékat, bude-li otevřený kterýkoli ventil, a nepoteče pouze tehdy, pokud budou oba ventily zavřené. To se nazývá „hradlo OR“ podle anglického slova „or“ čili „nebo“. Použijeme-li stejnou notaci jako předtím, platí „1 OR 1 = 1“, „1 OR 0 = 1“, „0 OR 1 = 1“ a „0 OR 0 = 0“. Na obrázku je znázorněn také odpovídající tranzistorový obvod. Proud teď poteče ve všech případech vyjma těch, kdy jsou oba tranzistory vypnuté.

Podobná logická hradla jsou tajemstvím, které stojí za výkonem digitálních elektronických zařízení. Z těchto skromných stavebních kamenů lze sestavit takové kombinace logických hradel, které budou vykonávat libovolně důmyslné algoritmy. Můžeme si představit, že stanovíme seznam vstupů do nějakých logických obvodů (řada „0“ a „1“) a pošleme tyto vstupy nějakou propracovanou konfigurací tranzistorů, která vychrlí seznam výstupů (zase řada „0“ a „1“). Takto můžeme postavit obvody, které budou provádět složité matematické výpočty, nebo se budou rozhodovat na základě toho, které klávesy stiskneme na klávesnici. Těmito informacemi budou zásobovat nějakou jednotku, která potom zobrazí odpovídající znaky na obrazovce; nebo spustí

poplach, pokud se do domu vloupá nějaký vetřelec; nebo kabelem z optických vláken pošlou na druhý konec světa proud znaků textu (zakódovaných do řady binárních číslic); nebo... vlastně cokoli, co vás napadne, protože prakticky každé elektrické zařízení, které vlastníte, je přeplněné tranzistory.

Potenciál tranzistoru je neomezený a díky jeho využití se svět podstatně proměnil. Asi nebudeme přehánět, když řekneme, že tranzistor je nejdůležitějším vynálezem za posledních sto let – moderní svět stojí na polovodičových technologiích, které z něj dělají to, čím je. V praktickém životě zachránily tyto technologie miliony životů – stačí vzpomenout na použití výpočetních zařízení v nemocnicích, na přínos rychlých, spolehlivých a celosvětových komunikačních systémů a na využití počítačů ve vědeckém výzkumu a při řízení složitých průmyslových procesů.

William B. Shockley, John Bardeen a Walter H. Brattain získali v roce 1956 Nobelovu cenu za fyziku „za své výzkumy polovodičů a za svůj objev tranzistorového jevu“. Nobelova cena nebyla asi nikdy jindy udělena za práci, která by se přímo dotkla životů tolika lidí.