

Cvičenia z princípov počítačov

Michal Ďurian

Cvičenie 1

1.1 Napätie, prúd, odpor

Ako každý technický odbor, aj elektronika má svoj pojmový aparát, ktorým popisuje svoj predmet záujmu. V tejto podkapitole zhrnieme pojmy, ktoré sú predstavujú nutné minimum na popis jednoduchých elektrických obvodov, a s ktorými sa čitateľ vo väčšej alebo menšej miere už určite stretol. Kde-tu pridáme aj nejakú informáciu navyše.

V elektronike sú tri základné veličiny, pomocou ktorých popisujeme dianie v obvode. Sú to:

- **Napätie** – ozn. U , jednotka Volt¹(V)
- **Prúd** – ozn. I , jednotka Ampér (A)
- **Odpor** – ozn. R , jednotka Ohm (Ω)

Všimnime si, že kým napätie a prúd vypovedajú o podmienkach a procesoch odohrávajúcich v obvode, odpor predstavuje vlastnosť obvodu. Každá časť obvodu má určitý odpor, avšak odpor samotných vodičov, najčastejšie medených, je pri bežných aplikáciach zanedbateľný. Vtedy je odpor v obvode koncentrovaný v súčiastkach, ktoré nazývame **rezistory**.

Existujú aj ďalšie veličiny popisujúce vlastnosti obvodov. Medzi bežné patria kapacita (ozn. C , jedn. Farad), realizovaná v obvode kondenzátorom a indukčnosť (ozn. L , jedn. Henry), realizovaná cievkou².

1.2 Ohmov zákon

Jednoduchou analógiou, ktorá nám pomôže uchopiť pojmy napätia, prúdu, odporu a vzťahy medzi nimi, je vodná priehrada. Rozdiel výšky hladín pred a za priehradou predstavuje napätie, teda vôľu vody tečť určitým smerom. Čo predstavuje prúd vody, je očividné. Množstvo vody pretečenej za jednotku času skrz priehradu závisí od veľkosti otvoru, čo predstavuje odpor. Vzťah týchto troch elektrických veličín je vyjadrený **Ohmovým zákonom**:

$$U = RI \quad (1.1)$$

O niečo pochopiteľnejšiu formu vzťahu 1.1 získame osamostatnením prúdu I . Vtedy by sme videli, že je tým väčší, čím väčšie je napätie a čím menší je odpor.

Ak by sme vzťah 1.1 preložili do ľudskej reči, sú možné dve interpretácie, obe správne:

¹Mená jednotiek sú často na počesť významných vedcov a učencov.

²Pre potreby tohto predmetu to netreba rozvádzať.

1. Ak medzi koncami určitého úseku obvodu s odporom R je napätie U , tak týmto úsekom tečie prúd I .
2. Ak určitým úsekom obvodu s odporom R preteká prúd I , tak medzi koncami tohto úseku je napätie U .

Rozdiel týchto tvrdení spočíva v rôznom určení voľného a závislého parametra³. V prípade prvého tvrdenia je dané napätie, čo je možné dosiahnuť **zdrojom napätia**, pričom takéto napätie nazývame **elektromotorické**. Priamym dôsledkom je potom pretekajúci prúd, ktorého veľkosť závisí od odporu celého obvodu.

Naopak, u druhého tvrdenia je dané, že úsekom preteká určitý prúd, ktorý môže byť spôsobený napríklad elektromotorickým napätím zdroja, nachádzajúceho sa niekde inde v obvode. Ak tento prúd necháme pretekať cez časť obvodu s určitým odporom, potom na koncoch tejto časti nameriame napätie, ktoré nazývame **ohmické**. Veľkosť tohto napätia je v súlade s Ohmovým zákonom daná veľkosťou odporu daného úseku a prúdu, ktorý ním preteká. Ohmické napätie je orientované proti elektromotorickému.

1.3 Elektrický odpor a rezistory

Merný elektrický odpor materiálu

Každý vodič má tri základné elektrické vlastnosti: odpor, kapacitu a indukčnosť. Výrobnými procesmi je možné vytvoriť vodič z takých materiálov a v takom geometrickom usporiadaní, že niektorá z týchto vlastností bude dominantná a bude určovať správanie sa súčiastky v obvode.

V prípade elektrického odporu môžeme pre ľubovoľný vodič valcového tvaru napísať:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

kde ρ je **merný elektrický odpor** (jednotka Ωm), ktorý predstavuje ochotu materiálu prepúšťať pohybujúce sa nosiče náboja. Je teda vlastnosťou daného materiálu. Ostatné parametre l a S sú dĺžka a plocha prierezu vodiča.

Hodnoty merného elektrického odporu vybraných materiálov sú uvedené v tabuľke 1.3. Široko používaná meď má merný odpor veľmi malý, avšak je náchylná na oxidáciu, v dôsledku ktorej merný odpor takého vodiča⁴ vzrastie o mnoho rádov. Preto sa na ochranu kontaktov používa napríklad zlato, ktoré má prakticky rovnaký merný odpor, ale za bežných podmienok nepodlieha oxidácii. Konštantán a nichróm sú príkladmi tzv. **odporových zliatin** s vyšším merným odporom, ktoré sa používajú na výrobu rezistorov. Typickým izolantom je polyetylén s veľmi vysokou hodnotou merného odporu.

³Voľný parameter je ten, ktorého hodnotu určujeme my (vstup) a závislý je ten, ktorý predstavuje odozvu systému (výstup).

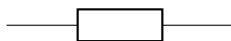
⁴Meď zoxидуje len na povrchu, následkom čoho sú väčšie odpory kontaktov.

Meď	$1,68 \times 10^{-8} \Omega m$
Oxid meďný	$10 - 10^6 \Omega m$
Zlato	$2,44 \times 10^{-8} \Omega m$
Konštantán	$4,90 \times 10^{-7} \Omega m$
Nichróm	$1,10 \times 10^{-6} \Omega m$
Polyetylén	$10^{21} \Omega m$

Tabuľka 1.1: Merné elektrické odpory niektorých materiálov.

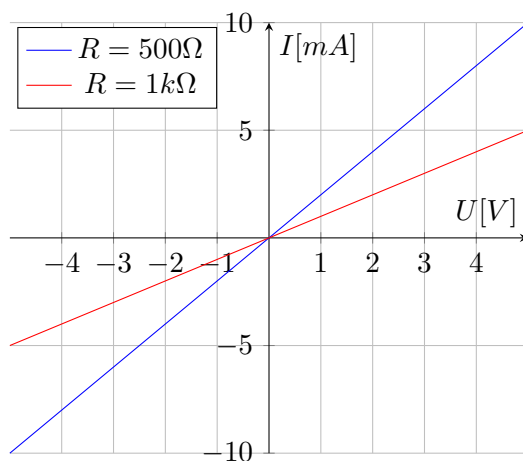
Rezistor a jeho V–A charakteristika

Rezistor (obr. 1.1) je súčiastka, ktorej hlavnou vlastnosťou je elektrický odpor. Najčastejším konštrukčným prevedením rezistorov je tenký film z uhlíka alebo odporovej zliatiny nanosený na keramický valček. Hodnoty odporu rezistorov, ktoré sa sériovo vyrábajú, sú štandardizované. Napríklad rada s označením *E6* obsahuje šesť hodnôt odporov v každej dekáde: 10Ω , 15Ω , 22Ω , 33Ω , 47Ω , 68Ω a potom 100Ω , 150Ω , 220Ω , atď.



Obrázok 1.1: Značka rezistora.

Jedným zo spôsobov popisu vlastností niektorých súčiastok je tzv. **volt-ampérová charakteristika** (skr. VA charakteristika). Je to závislosť prúdu pretekajúceho súčiastkou od napätia, naloženého na svorky súčiastky. VA charakteristika rezistora je vyjadrená Ohmovým zákonom (vzťah 1.1), ktorý má v grafickom znázornení tvar priamky. Ako vidno na obrázku 1.2, od hodnoty odporu závisí smernica priamky, teda strmosť nárastu prúdu. Záporné znamienka u napätia aj prúdu znamenajú len opačný smer.



Obrázok 1.2: Voltampérová charakteristika rezistorov.

Značenia rezistorov

V technickej praxi sa pri označovaní hodnôt odporov nepoužíva značka pre Ohm (Ω). Namiesto toho sa používajú písmená R , k a M pre označenie rádu a polohy desatinnej čiarky. Význam jednotlivých písmen je uvedený v nasledujúcej tabuľke:

R	10^0
k	10^3
M	10^6

Tabuľka 1.2: Označovanie hodnôt odporu rezistorov.

Napríklad ak chceme označiť hodnotu rezistoru 220Ω , začali by sme to napísaním číselky 220. Túto hodnotu už netreba násobiť, preto použijeme z tabuľky 1.2 označenie R a umiestime ho tam, kde by bola desatinná čiarka. Výsledkom teda bude označenie $220R$.

Pokiaľ by sme chceli zaznačiť hodnotu rezistora 1500Ω , môžeme využiť označenie násobku pre 10^3 , čiže k . 1500 je po vydelení 10^3 rovné 1,5 a po nahradení desatinnej čiarky získame finálne značenie $1k5$.

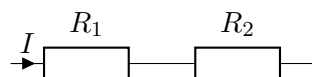
Obdobne, ak by sme chceli prečítať označenie $1M2$, tak vezmeme číslo 1,2 a vynásobíme ho príslušným rádom, v tomto prípade 10^6 . Takto získame hodnotu $1\,200\,000\Omega$, alebo v súlade s dobrými mravmi $1,2 \times 10^6\Omega$.

Hodnoty odporov bývajú na rezistoroch niekedy napísané aj číselne použitím vyššie spomenutého zápisu. Najčastejší spôsob je kvôli jednoduchosti výroby kódovanie číslíc do štandardizovaného farebného kódu. Legendy na prečítanie farebného kódu sú široko dostupné a preto ich nebudeme uvádzať.

Zapojenia rezistorov

Kvôli dostupnosti rezistorov len s určitými hodnotami odporu sa často stretneme so situáciou, kedy potrebujeme použiť v obvode hodnotu odporu, akú práve nemáme k dispozícii. Vtedy je možné požadovanú výslednú hodnotu odporu získať poskladaním dostupných súčiastok. Existujú dve základné vzájomné zapojenia rezistorov⁵:

- Sériové zapojenie



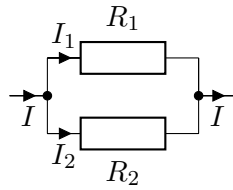
Obrázok 1.3: Sériové zapojenie rezistorov.

Rezistory sú zapojené "za sebou" a preteká nimi rovnaký prúd. Pre výsledný odpor platí vzťah:

$$R = \sum_i R_i \quad (1.3)$$

⁵Na schémach sú nakreslené síce len dva rezistory, ale uvedené pravidlá a vzťahy očividne platia pre ľubovoľný počet rezistorov.

- Paralelné zapojenie



Obrázok 1.4: Paralelné zapojenie rezistorov.

Rezistory sú zapojené "vedľa seba" a vtekajúci prúd sa rozvetvuje. Pre výsledný odpor platí vzťah:

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (1.4)$$

Použitie vzťahov 1.3 a 1.4 tiež nazývame hľadaním ekvivalentného odporu. Oba vzťahy sú totiž konkrétnymi prípadmi všeobecnejšej Théveninovej vety. Tá hovorí, že ľubovoľný úsek obvodu, obsahujúci zdroje napätia a rezistory, je možné nahradiť jedným zdrojom a jedným rezistorom s takými hodnotami elektromotorického napätia a odporu, že sa voči zvyšku obvodu budú správať rovnako ako pôvodné zapojenie.

1.4 Kirchhoffove zákony

Kirchhoffove zákony sú po Ohmovom zákone ďalšie, veľmi často používané, nástroje na analýzu elektrických obvodov. Ešte pred uvedením ich znenia a vysvetlenia je potrebné definovať dva pojmy, s ktorými tieto zákony pracujú. Sú to pojmy **uzlu** a **slučky**.

Uzol je taký bod v obvode, kde sa stretávajú aspoň tri vodiče. V schémach sa uzly označujú spravidla tmavou bodkou, viď napríklad obrázok 1.4. Ak prekríženie dvoch vodičov nieje označené čiernou bodkou, tak vodiče v tom bode nie sú spojené⁶.

Slučka predstavuje uzavretú časť obvodu. Niekedy sa tiež používa pojem **vetva**, ktorý popisuje časť obvodu, ktorá nieje uzavretá, teda nieje slučkou. Ako príklad môžeme znova použiť obrázok 1.4, v ktorom každý rezistor je vo svojej vlastnej vetve. Vetvy sú ohraničené uzlami. Ak by sme prešli z povedzme ľavého uzla cez rezistor R_1 do druhého uzla a potom cez rezistor R_2 naspäť, tak by sme opísali slučku.

Kirchhoffove zákony znejú nasledovne:

1. **Zákon uzlových prúdov** – Súčet prúdov vtekajúcich do uzla je rovný súčtu prúdov z neho vytekajúcich.

$$\sum_1^n I_{in} = \sum_1^m I_{out} \quad (1.5)$$

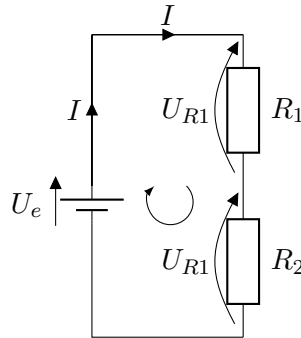
⁶Toto pravidlo je v súlade s dobrými mravmi, avšak nie vždy sa dodržiava. Je nevyhnutné rozmýšľať nad tým čo je v schéme nakreslené!

Tento zákon vychádza zo **zákona zachovania náboja**. Ak je častica nosičom elektrického náboja, tak za bežných podmienok nosičom aj zostane. Rovnako kov ako vodič za normálnych podmienok obsahuje konštantný počet voľných nosičov náboja. Z toho vyplýva, že nosiče náboja nám v obvode nikde nevznikajú ani nezanikajú, a preto sme po skombinovaní týchto poznatkov mohli vysloviť spomenutý Kirchhoffov zákon. Ako príklad uvidíme aplikáciu na situáciu znázornenú na obrázku 1.4, čím dostaneme: $I = I_1 + I_2$.

2. **Zákon slučkových napätí** – Súčet elektromotorických napätí v určitej slučke obvodu je rovný súčtu ohmických napätí v tejto slučke.

$$\sum_1^n U_e = \sum_1^m U_R \quad (1.6)$$

Druhý Kirchhoffov zákon je jedným z mnohých aplikácií **zákona zachovania energie**. Elektromotorické napätia zdrojov dodávajú nosičom náboja energiu, pohybom ktorých následne vznikajú elektrické prúdy. Odporové prvky v obvode predstavujú pre pohybujúce sa nosiče určitú prekážku, na prekonanie ktorej musia energiu vynaložiť. Pomôžme si teraz v predstave obrázkom 1.5.



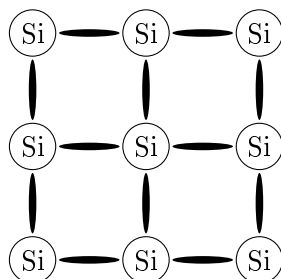
Obrázok 1.5: Ukážka použitia druhého Kirchhoffovho zákona.

Na obrázku sú znázornené orientácie napätí na jednotlivých prvkoch. Prechádzajme teraz obvodom v smere hodinových ručičiek, ako je to znázornené a sledujme prúd. Na rezistoroch ide prúd proti ohmickým napätiam, kde energiu stráca a pri prechode zdrojom zase v smere elektromotorického, kde energiu získava. Môžeme teda povedať že napätia sú činiteľmi energie. Zo zákona zachovania energie vyplýva, že ak elektrón jedenkrát obíde celú slučku, musí mať rovnakú energiu ako predtým, v opačnom prípade by išlo o perpetuum mobile. Ak skombinujeme tieto dva fakty, dostaneme druhý Kirchhoffov zákon.

1.5 Polovodiče a polovodičové súčiastky

Vlastný polovodič

V súvislosti s polovodičovými materiálmi sa najčastejšie spomína kremík. Čistý kremík ako prvok z IV.A. skupiny periodickej tabuľky prvkov vytvára kovalentné kryštály, v ktorých každý atóm vytvorí so susednými atómami štyri väzby. Schematicky je to znázornené na obrázku 1.6. Elektróny v týchto väzbách sú viazané až do okamihu nadobudnutia energie dostatočnej na uvoľnenie, vďaka čomu sa následne môžu v kryštáli voľne pohybovať – monokryštalický kremík sa stáva vodivým. Takejto vodivosti hovoríme **vlastná vodivosť**⁷, materiál nazývame **vlastný polovodič** a uvoľnené elektróny nazývame **vodivostné**.



Obrázok 1.6: Schéma čistého kremíkoveho kryštálu.

Mechanizmus dodávania energie elektrónom je termodynamický, to znamená teplom. Keď kryštalický materiál prijíma teplo, uskladňuje sa v podobe kmitov jadier atómov v mriežke. Energia týchto kmitov mriežky sa potom môže prenášať na **väzbové elektróny** a uvoľňovať ich. Ak sa jeden elektrón z kovalentného páru uvoľní, zostane po ňom tzv. **diera** a hovoríme, že vznikol **elektrón-dierový pár** (obr. 1.7a).

Ak kryštál necháme na pokoji, tak elektrón sa s vysokou pravdepodobnosťou vráti na pôvodné miesto, teda dochádza k **rekombinácii** elektrón-dierového páru. Energia, uvoľnená pri rekombinácii, sa premení najčastejšie na teplo.

Iná možnosť nastane, ak na kryštál naložíme elektrické napätie⁷. Je zrejmé, že vodivostné elektróny získajú od tohto napätia energiu a tým pádom vzniká tzv. **elektrónový prúd**, keďže je tvorený elektrónmi.

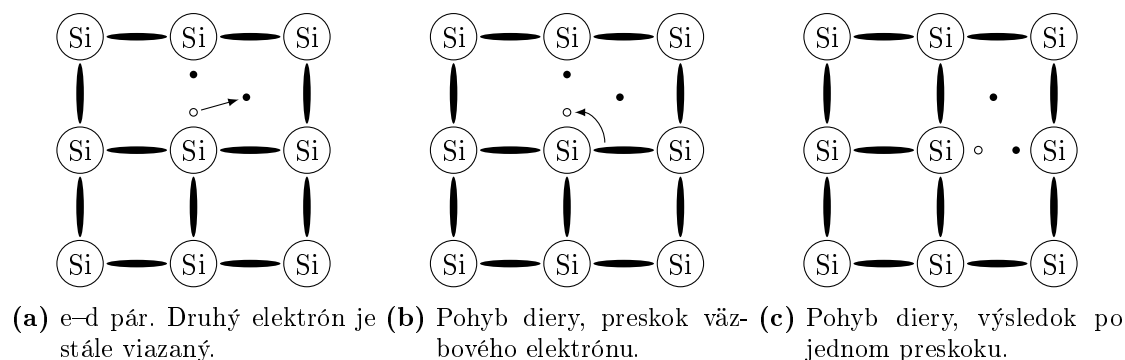
Diera, ktorá po elektróne zostala, nie je v pravom slova zmysle časticou. Predstavme si, že pôvodnú diery zaplní väzbový elektrón, ktorý tam preskočí zo susednej väzby, pretože je tam priťahovaný kladným elektrickým nábojom diery (obr. 1.7b). Diera sa vtedy o kúsok posunie, ako vidno na obrázku 1.7c. Jej pohyb by mohol pokračovať napríklad preskokom väzbového elektrónu zo susedného atómu napravo od diery. Vďaka tomu môžeme z makroskopického pohľadu konštatovať, že diery sa pohybuje, čo je ale vlastnosť častice. Preto diery niekedy klasifikujeme ako **kvázičastice**. Keďže diery predstavuje oblasť kladného náboja, možno ju považovať za nosič náboja. Tým pádom, v elektrickom

⁷Vznikne tým v kryštáli elektrické pole, ktoré silovo pôsobí na nabitú časticu. "Priložiť elektrické pole" a "priložiť elektrické napätie" znamená v našom prípade presne to isté.

poli vzniká⁸ tzv. **dierový prúd**, ktorého častice tečú opačným smerom ako u elektrónového prúdu. Lenže, vďaka tomu, že diery majú opačný náboj ako elektróny, pre celkový prúd kryštálom dostaneme:

$$i = ej_d - (-e)j_e \quad (1.7)$$

kde j_d a j_e predstavujú iba toky samotných nosičov. Až po vynásobení toku hmoty nábojom dostaneme prúd⁹, ktorý je prenášaný daným typom častice. Podstatnou informáciou, ktorú vzťah 1.7 prináša, je že celkový prúd v polovodiči má elektrónovú a dierovú zložku.



Obrázok 1.7: Správanie sa nosičov náboja v polovodiči. Čiernou sú znázornené elektróny, prázdny krúžkom diera.

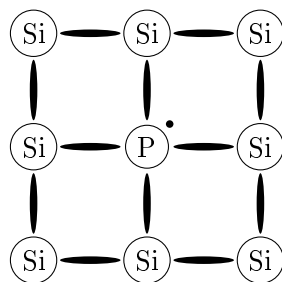
Dopovaný polovodič

Vlastné polovodiče ako také nie sú zodpovedné za raketový vzostup polovodičových technológií. Ich vlastnosti je možné významne meniť riadeným pridávaním prímies, tzv. **dopantov**, čím získame **dopovaný polovodič**. Ako prímies sa najčastejšie používajú prvky z III.A. a V.A. skupiny periodickej tabuľky prvkov. Podľa toho, ktorú skupinu použijeme, dostaneme dva typy polovodičov:

- **Polovodič typu N** – Vzniká po dopovaní materiálu atómami z V.A. skupiny. Tie majú oproti atómu zo IV.A. o jeden elektrón viac. Štyri elektróny prímiesného atómu vytvoria so susednými kremíkmi kovalentné väzby, ale piaty elektrón nemá väzbu s kým vytvoriť (obr. 1.8). Je teda pomerne slabo viazaný iba na prímiesný atóm. Vďaka slabšej väzbe tohto elektrónu je ho možné oveľa ľahšie tepelne uvoľniť, ako v prípade vlastného polovodiča. Tým pádom, už pri nevelkej teplote máme za každý prímiesný atóm k dispozícii voľný vodivostný elektrón, teda materiál je vodivý. Keďže dominantnými nosičmi náboja sú záporne (negatívne) nabité elektróny, tento typ polovodičov označujeme ako N–typ.

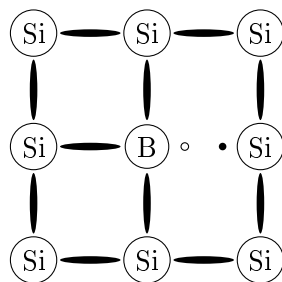
⁸Väzbové elektróny, preskakujúce do diery, budú vtedy ochotnejšie skákať tým smerom, kam ich ťahá elektrické pole.

⁹Aby sme boli presní, ide o hustotu toku častíc a prúdovú hustotu -> nerieš.



Obrázok 1.8: Schéma polovodiča typu N s prímiesným atómom fosforu.

- **Polovodič typu P** – Vzniká po dopovaní materiálu atómami z III.A. skupiny, ktoré majú oproti atómom zo IV.A. skupiny o jeden elektrón menej. Prímiesný atóm tak vytvorí so susedmi tri kovalentné väzby, ale na vytvorenie štvrtej väzby mu už chýba elektrón (obr. 1.9). Na tom mieste získavame dieru, do ktorej môžu po dodaní nevelkej tepelnej energie preskakovať valenčné elektróny zo susedných atómov¹⁰. Tým získame pohyblivú a kladne nabitú dieru. Takýto typ polovodiča nazývame P-typ.



Obrázok 1.9: Schéma polovodiča typu P s prímiesným atómom bóru.

P-N prechod

Samotné dopované polovodiče sú iba ingredienciami na výrobu prakticky využiteľných súčiastok. Polovodičové súčiastky nadobúdajú svoje zaujímavé vlastnosti až vtedy, keď obsahujú aspoň jednu štruktúru, nazývanú **P–N prechod**. P–N prechod získame, ak na atomárnej úrovni¹¹ spojíme polovodič typu N a polovodič typu P.

Predstavme situáciu, že polovodič typu N a polovodič typu P vieme v jednom okamihu optimálne spojiť. V okamihu spojenia je v polovodiči N prebytok vodivostných elektrónov (**majoritné nosiče**) a zanedbateľné množstvo dier (**minoritné nosiče**). Na druhej strane v polovodiči P je prebytok vodivostných dier a máličko elektrónov. Ak niekde

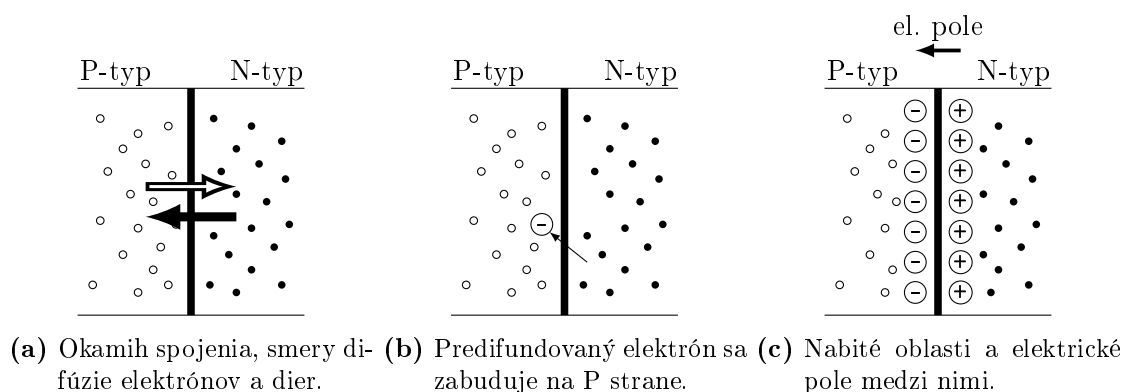
¹⁰Mohla by vzniknúť otázka, čo ak potom bude mať prímiesný atóm štyri väzby? Fyzikálne je to v poriadku, pretože aj ten atóm má nad valenčnou vrstvou ďalšie voľné orbitály.

¹¹To znamená, že ich kryštalické mriežky na seba budú priamo nadväzovať, teda nieje to obyčajný mechanický kontakt. Jedna z technológií výroby je naparovanie.

existuje gradient koncentrácie častíc, majú častice snahu prenikať z oblasti s vyššou koncentráciou do oblasti s koncentráciou nižšou (obr. 1.10a) – tento jav nazývame **difúzia** a má vplyv na vznik P–N prechodu.

Sledujme teraz jeden napríklad elektrón, ktorý predifundoval z oblasti N do oblasti P. Zrazu sa nachádza v priestore, kde je veľa dier, a preto veľmi rýchlo rekombinuje. Tým sa z neho stane viazaný elektrón v kryštalickej mriežke (obr. 1.10b). Dôležité je, že elektrón so sebou priniesol záporný náboj do pôvodne elektroneutrálneho materiálu. Prienikom určitého množstva elektrónov týmto spôsobom vznikne na okraji P oblasti tenká, záporne nabitá vrstva. Obdobným mechanizmom vznikne difúziou dier do N oblasti kladne nabitá vrstva (obr. 1.10c).

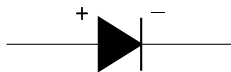
Medzi dvoma opačne nabitými oblasťami vzniká **elektrické pole**, ktoré je orientované z kladne nabitej časti do zápornej. To znamená, že toto postupne rastúce pole svojimi účinkami bráni časticiam prenikať cez spoj¹². V okamihu ako sa vykompenzujú účinky poľa a difúzie, môžeme tvorbu P–N prechodu považovať za ukončenú.



Obrázok 1.10: Rôzne fázy vytvárania P–N prechodu. Čierne bodky sú elektróny, biele sú diery.

Dióda

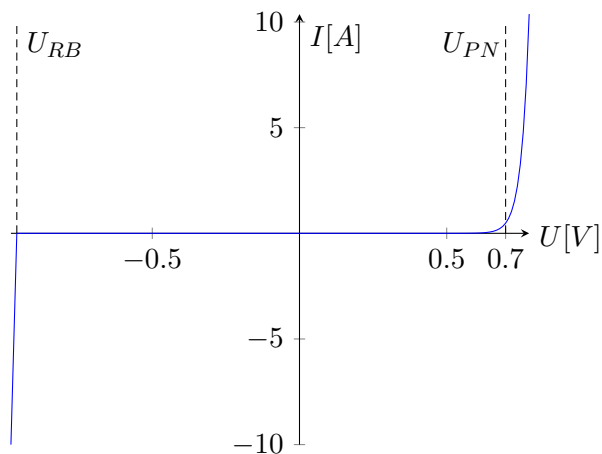
Dióda je jednoduchou polovodičovou súčiastkou, ktorej schematická značka je na obrázku 1.11. Šípkou je označená časť z polovodiča typu P (ozn. **anóda**) a čiarou časť z typu N (ozn. **katóda**). To je dôležité pre zapojenie diódy do obvodu so správnou polaritou.



Obrázok 1.11: Schematická značka obvyčajnej diódy. Póly sú vyznačené len ako pomôcka, v schémach sa nekreslia.

¹² Pretože záporne nabitá častica bude pri prenikaní do zápornej oblasti odpudzovaná. To isté platí aj pre kladnú časticu.

Popis elektrických vlastností P–N prechodu môžeme pokojne zaradiť do časti s popisom vlastností diódy, pretože dióda obsahuje práve jeden P–N prechod. Keďže dióda nie je symetrická, možno ľahko očakávať, že aj jej VA charakteristika (obr. 1.12) bude asymetrická. V obvode sa to prejaví tak, že dióda bude prepúšťať prúd len v jednom smere, preto hovoríme, že dióda má **usmerňovacie vlastnosti**.



Obrázok 1.12: Voltampérová charakteristika diódy. U_{PN} – prahové napätie pre kremíkovú diódu, U_{RB} – priernazné napätie.

Príčinu týchto vlastností môžeme hľadať v existencii elektrického poľa na P–N prechode. Predstavme si, že na anódu priložíme záporné napätie a na katódu kladné. Vtedy, diery nachádzajúce sa v anóde (P-typ) sú odťahované preč od P–N prechodu a rovnako sú odťahované aj elektróny v katóde (N-typ). Týmto sa v blízkom okolí P–N prechodu zväčšuje vrstva, v ktorej nie sú prítomné majoritné nosiče náboja, a ktorú preto nazývame **ochudobnená vrstva**. Kľúčovým dôsledkom je, že cez P–N prechod a teda aj cez celú diódu netečie prúd¹³. V takom prípade hovoríme, že dióda je zapojená v **závernom smere**. Pokiaľ napätie naložené v závernom smere prekročí určitú kritickú hodnotu (U_{RB} na obr. 1.12), nastane tzv. **prieraz** diódy, kde sa väčšina typov diód úplne zničí.

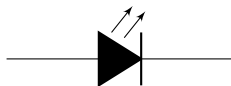
Zapojme teraz napätie na diódu opačne ako predtým, teda kladným pólom na anódu a záporným na katódu. Nech je toto napätie spoiatku malé. Vtedy elektróny okrem toho, že sú odpudzované od P–N prechodu záporne nabitou vrstvou na opačnej strane (obr. 1.10c), sú zároveň priťahované kladným pólom napätia priloženého na katódu. Keďže napätie sme zatiaľ zvolili malé, výsledkom je, že elektróny preniknú bližšie ku P–N prechodu, ale stále nie sú cez neho ťahané dostatočne silno na to, aby prekonal odpudivé sily záporne nabitej vrstvy a prešli na druhú stranu. Tým pádom, prúd diódou ešte netečie. To isté, len v opačnom smere, sa súčasne deje aj s dierami.

Ponechajme polaritu napätia a zväčšujme postupne jeho hodnotu. Pri určitej hodnote napätia budú elektróny ťahané cez P–N prechod dostatočne silno na to, aby prekonal

¹³No lebo inak by tam ochudobnená vrstva nebola a majoritné nosiče by veselo cez P–N prechod prechádzali.

odpudivé sily od záporne nabitej vrstvy. Rovnako aj diery prekonajú odpudzovanie od kladnej vrstvy. Vďaka tomu majoritné vodiče prechádzajú cez spoj, čiže P–N prechod od tohto momentu vedie prúd. Hovoríme, že napätie je naložené v **priepustnom smere** a že jeho hodnota je vyššia ako hodnota prahového, tzv. **difúzneho napätia**¹⁴ U_{PN} . Existencia prahového napätia je spôsobená práve prítomnosťou elektrického poľa na P–N prechode, ktoré sme popisovali v predošlej časti (obr. 1.10c). Hodnota difúzneho napätia, čiže napätia, pri ktorom sa P–N prechod otvorí, závisí od použitých materiálov a od koncentrácie dopantov. Pre obyčajnú kremíkovú diódu je to 0.7V.

Existuje veľké množstvo diód na najrôznejšie aplikácie. Líšia sa hlavne priestorovou konfiguráciou, zložením aj koncentráciou dopantov. Veľmi častou aplikáciou sú svietiace LED¹⁵ diódy (obr. 1.13). Je skonštruovaná tak, aby pri pretekaní prúdu P–N prechodom dochádzalo ku veľkému počtu rekombinácií elektrónov a dier, pričom sa uvoľňujú hlavne fotóny. Farba LED diódy závisí od energie fotónov, ktorá je rovná energii uvoľnenej pri rekombinácii. Preto farbu LED diódy vieme nastaviť energetickými pomermi v materiáli diódy, teda typom materiálov a koncentráciou dopantov.



Obrázok 1.13: Schematická značka LED diódy.

Bipolárny tranzistor

Bipolárny tranzistor je polovodičová súčiastka obsahujúca dva P–N prechody. Z toho logicky vyplývajú dve možné usporiadania trojice P a N častí a tým pádom dva typy bipolárneho tranzistora:

- **NPN tranzistor**
- **PNP tranzistor**

Schematické značky oboch typov tranzistorov sú na obrázku 1.14. Ako vidno, tranzistor má tri vývody, **kolektor** – ozn. C, **bázu** – ozn. B a **emitor** – ozn. E. Každý z týchto vývodov má svoju funkciu. Označenie NPN udáva typy polovodiča z ktorých sa skladá C, B a E, v tom poradí. Emitor je od kolektoru na schematickej značke odlišený šípkou, pričom smer šípky udáva typ tranzistora¹⁶.

Pre pochopenie fungovania tranzistora sa musíme pozrieť na jeho vnútornú konštrukciu, ktorá sa dá znázorniť spôsobom, ako je to na obrázku 1.15. Dva P–N prechody kolektor-báza a báza-emitor možno znázorniť ako dve opačne zapojené diódy. Ak naložíme napätie medzi kolektor a emitor, tak bez ohľadu na polaritu, jedna dióda je

¹⁴Je to minimálna hodnota vonkajšieho napätia, pri ktorej sa práve vykompenzuje odpudzovanie vrstvami, teda môže voľne prebiehať difúzia.

¹⁵angl. light emitting diode.

¹⁶Všimnite si, že šípka má rovnaký smer ako u diódy, teda od P-typu ku N-typu.



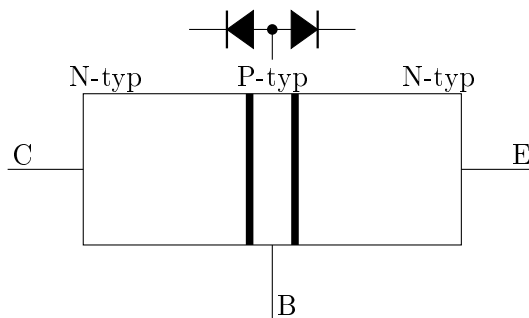
Obrázok 1.14: Schematické značky bipolárnych tranzistorov. C–kolektor, B–báza, E–emitor.

zapojená v priepustnom a druhá v závernom smere. Tým pádom prúd medzi kolektorom a emitorom nepotečie.

Sledujme teraz, čo sa začne diať, ak naložíme ďalšie napätie určitej hodnoty medzi bázu a emitor (tzv. **napätie báza-emitor** – U_{BE}) v priepustnom smere. V momente ako toto napätie bude väčšie ako difúzne napätie pre daný P–N prechod (pozri časť o dióde), začne táto dióda viesť prúd. Kľúčový faktor v tom, čo bude nasledovať je fakt, že báza je veľmi tenká. Vďaka tomu elektróny, ktoré sú napätím urýchlené cez prechod B–E, preletia cez bázu a aj cez P–N prechod C–B aj napriek tomu, že ten je zapojený v závernom smere¹⁷. V tomto momente nám začne tiecť prúd aj cez kolektor (tzv. **kolektorový prúd** – I_c). Niektoré elektróny do kolektora nepreniknú a tečú cez bázu, čo nazývame **bázový prúd** – I_B . Kolektorový prúd je vďaka konštrukcii tranzistora vždy oveľa väčší ako bázový. Všimnime si ešte príčinu a dôsledok: Veľký kolektorový prúd začal tiecť až vtedy, keď začal tiecť určitý malý bázový prúd. To tranzistory predurčuje na použitie v roli zosilňovačov, kedy pomocou malého výkonu (t.j. bázovým prúdom) vieme ovládať veľký výkon (t.j. kolektorový prúd). Ich vzťah môžeme zapísať ako:

$$I_c = h_{fe} * I_B \quad (1.8)$$

kde h_{fe} je koeficient prúdového zosilnenia. Hodnota tohto koeficientu je charakteristická pre každý typ tranzistora a závisí od jeho výroby a konštrukcie.

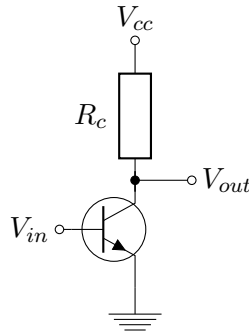


Obrázok 1.15: Znázornenie vnútornej stavby NPN tranzistora.

¹⁷ Jednoducho "nevýtočia zákrutu".

Za zmienku stojí fakt, že vzťah 1.8 je síce dostatočne presný pre bežné použitie, ale nie je úplne exaktný. Ak naložíme napätie medzi kolektor a emitor, tak aj pri nulovom bázovom prúde bude tiecť akýsi veľmi malý kolektorový prúd (tzv. **zvodový prúd**¹⁸), ktorý je pri drvivej väčšine aplikácií zanedbateľný. Existencia tohto prúdu je daná tým, že tranzistor vždy trochu "prepúšťa".

Najjednoduchšie zapojenie tranzistora v roli napäťového zosilňovača¹⁹ je tzv. **zapojenie so spoločným emitorom**, znázornené na obrázku 1.16. Čitateľa nech nemýli fakt, že doteraz sme sa bavili o zosilnení prúdovom skrz väzbu bázového a kolektorového prúdu. Trik, ako získať napäťový zosilňovač spočíva v prvkoch, nakreslených na schéme. Keď priložíme na vstup (bázu) napätie V_{in} kladné voči zemi (emitoru), tak v zmysle predchádzajúceho odseku začne tiecť bázový a teda aj kolektorový prúd. Kolektorový prúd tečie od napájania (ozn. V_{cc}) cez tranzistor do zeme, pričom prechádza aj cez rezistor R_c . V zmysle Ohmovho zákona (vzťah 1.1) vznikne na rezistore napäťový spád, ktorý bude tým väčší, čím väčší je kolektorový prúd.



Obrázok 1.16: Tranzistor NPN v zapojení so spoločným emitorom.

Spomeňme si teraz na Kirchhoffov zákon o slučkových napätiach a podľa zistiť, aké budeme mať výstupné napätie V_{out} v závislosti od vstupného. Vezmime najprv situáciu, kedy je vstupné napätie nulové. Vtedy je tranzistor uzavretý, kolektorový prúd je zanedbateľný (zvodový prúd, pozri vyššie), a preto sa naňho môžeme pozeráť ako na súčiastku s obrovským odporom. Podľa spomenutého Kirchhoffovho zákona musí platiť:

$$V_{cc} = U_{R_c} + U_{Tr} \quad (1.9)$$

Teda súčet ohmických napätí na odporoch je rovný elektromotorickému. Keďže odpor rezistora R_c je oproti odporu tranzistora zanedbateľný, tak aj spád napätia na rezistore R_c bude zanedbateľný oproti spádu na tranzistore²⁰. Z toho vyplýva, že ak na jednom konci rezistora voči zemi nameriame napätie V_{cc} , tak v dôsledku zanedbateľnosti napäťového spádu nameriame voči zemi to isté napätie aj na jeho druhom konci. Pohľad na schému 1.16 nám umožní urobiť záver, že v tejto situácii bude výstupné napätie V_{out}

¹⁸ angl. leakage current

¹⁹ Môže byť aj prúdový.

²⁰ Lepšie je to vidno, keď do vzťahu 1.9 dosadíme za odpory a prúd, podľa Ohmovho zákona (vzťah 1.1).

rovné napájaciemu napätiu V_{cc} . Zákonite vznikne otázka, kde je tu ten sľúbený zosilňovač? Trpezlivosť, ešte dva odseky.

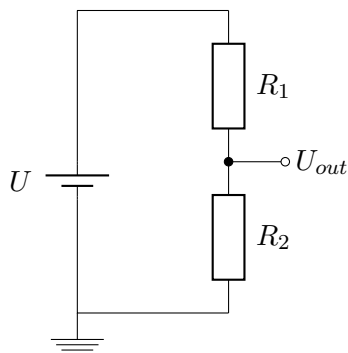
Rozoberme si teraz opačnú hraničnú situáciu, keď je na vstup privedené určité napätie a tranzistor je plne otvorený²¹. Vtedy je jeho odpor oproti odporu rezistoru R_c zanedbateľný. Znova by sme si mohli napísať Kirchhoffov zákon slučkových napätí v takom tvare, ako bol vzťah 1.9, len hodnoty ohmických napätí by boli iné. Napätie medzi kolektorom a emitorom pri zanedbateľnom odpore tranzistora pozostáva len z napäťového spádu na P–N prechode B–E, ktorý je zapojený v priepustnom smere. Tým pádom zvyšok napäťového spádu bude medzi svorkami rezistora R_c . Čiže, ak na jednom konci rezistora je napätie V_{cc} a na rezistore je určitý spád napätia, tak na druhom konci musíme voči zemi namerať napätie menšie práve o hodnotu toho spádu. Záverom teda je, že na výstupe budeme mať napätie rovné napätiu P–N prechodu diódy B–E.

Princíp zosilnenia spočíva v tom, že aj malou zmenou vstupného napätia vieme získať veľkú zmenu výstupného napätia. To, že aká prudká je táto závislosť, vieme nastaviť pomocou ďalších externých súčiastok, napríklad rezistorom medzi bázou a vstupným napätím, pretože tým ovplyvníme bázový prúd. Fakt, že pri rastúcom vstupnom napätí nám výstupné napätie klesá, nie je na závalu – výstup je jednoducho **invertovaný**. Ak sa tohto chceme zbaviť, stačí do série pripojiť ďalší tranzistor v tom istom zapojení a dve inverzie sa vyrušia.

1.6 Úlohy na cvičenie

1.6.1 Napäťový delič

Prvá úloha slúži na precvičenie Ohmovho zákona a Kirchhoffovho zákona slučkových napätí. Predstavme si, že máme zdroj fixného jednosmerného napätia, ale my potrebujeme hodnotu menšiu. Vtedy nám posluží nasledujúci obvod:



Obrázok 1.17: Napäťový delič a zdroj jednosmerného napätia.

Podme urobiť analýzu tohto obvodu a zistiť, aké bude výstupné napätie U_{out} . Napíšme Kirchhoffov zákon slučkových napätí (vzťah 1.6), dosadíme za ohmické napätia podľa

²¹Zanedbajme teraz možnosť, že by sa mohol príliš veľkým prúdom zničiť.

Ohmovho zákona (vzťah 1.1) a vyjmime prúd:

$$U = U_{R_1} + U_{R_2} = I(R_1 + R_2)$$

Z toho môžeme vyjadriť prúd, ktorý tečie obvodom:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Záporný pól zdroja predstavuje v obvode zem. Preto napätie U_{out} bude rovné Ohmic-
kému napätiu na rezistore R_2 , ktorý môžeme vyjadriť z Ohmovho zákona, pričom za prúd
dosadíme vyššie odvodený vzťah.

$$U_{out} = IR_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Vidno, že voľbou vhodných hodnôt odporu oboch rezistorov vieme nastaviť požadované
výstupné napätie deliča.

Skúsme sa pozrieť ešte na jednu vec. Oboma rezistormi preteká rovnaký prúd, ktoré
môžeme opäť vyjadriť cez Ohmov zákon a dať do rovnosti:

$$\begin{aligned} I &= U_1 R_1 & I &= U_2 R_2 \\ U_1 R_1 &= U_2 R_2 & \Rightarrow & \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

Z posledného vzťahu vidno, že pomer ohmických napätí na rezistoroch je rovný obráte-
nému pomeru ich odporov.

Úlohy

1. Zvoľte si hodnoty odporov R_1 , R_2 a zapojte obvod podľa schémy na obrázku 1.17.
2. Pomocou multimetra odmerajte napätie U_{out} a porovnajte s teoretickou hodnotou,
ktorú si vypočítate z uvedených vzťahov. Sú tieto hodnoty rovnaké? Prečo áno/nie?

1.6.2 Diódové AND hradlo

Ešte pred tým, ako sa budeme zaoberať samotným hradlom AND, uvedieme niekoľko dôležitých informácií všeobecne platných pre všetky logické obvody. Logické obvody majú svoje meno pre to, že pracujú s binárnymi logickými informáciami, ktoré môžu mať hodnotu pravda (1) alebo nepravda (0). Táto informácia sa v obvodoch kóduje pomocou napäťových úrovní, pričom existuje viacero štandardov, z ktorých dva najbežnejšie uvádzame.

- **TTL** – Transistor-transistor logic

Logická 0: 0V – 0.8V

Logická 1: 2V – 5V

- **CMOS** – Complementary metal-oxide-semiconductor

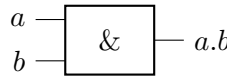
Logická 0: $0V - \frac{1}{3}V_{cc}$

Logická 1: $\frac{2}{3}V_{cc} - V_{cc}$

Napäťové úrovne sú dané konštrukciou súčiastok a použitými materiálmi. Všimnime si, že u oboch štandardov určitý rozsah napätí nepredstavuje ani jednu logickú hodnotu. To nazývame **nedefinovaný stav** a logická súčiastka vtedy nedokáže fungovať podľa špecifikácie.

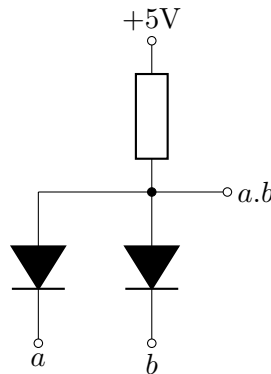
Logický súčin (AND) je jednou zo základných logických funkcií. **Pravdivostnú tabuľku** a schematickú značku pre dvojvstupový AND uvádzame na obrázku 1.18.

b	a	$a.b$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Obrázok 1.18: Pravdivostná tabuľka a schematická značka hradla AND.

Prvé logické obvody využívali pre svoju funkciu diódy, išlo o tzv. **diódovo-diódovú logiku** (DDL). Obvodová realizácia hradla AND v DDL vyzerala nasledovne:



Obrázok 1.19: Zapojenie dvojvstupového hradla AND pomocou DDL.

Podme teraz zanalyzovať fungovanie tohto obvodu. Ako prvý prípad uvažujme, že na vstup a privedieme logickú nulu (teda $0V$, čiže zem) a na vstup b privedieme logickú jednotku (teda $5V$). Medzi napájacím kontaktom a vstupom b neexistuje žiaden spád napätia, a preto tadiaľto prúd nepotečie. Tým pádom táto časť obvodu nemá ďalší vplyv na situáciu. Na druhej strane, dióda vo vetve a je zapojená v priepustnom smere a s napätím väčším ako difúzne, čiže bude viesť prúd. Tým pádom medzi jej svorkami bude napäťový spád rovný difúznemu napätiu (pozri sekciu 1.5, časť dióda). Pohľadom na schému zistíme, že svorky diódy sa nachádzajú medzi zemou (vstup a) a výstupom, a preto na výstupe bude voči zemi napätie rovné difúznemu. Pre bežné diódy je to $0.7V$,

čo predstavuje logickú nulu. Ak by sme obe vstupné hodnoty zamenili, dostali by sme identickú situáciu.

Dajme teraz na oba vstupy napätie 5V, teda logické jednotky. Vtedy kvôli neexistencii napäťového spádu žiaden prúd netečie, a tým pádom neexistujú ani napäťové spády. Logicky z toho vyplýva, že na výstupe obvodu voči zemi²² nameriame 5V, čo je logická jednotka.

Posledným prípadom je zapojenie oboch vstupov na zem, čo predstavuje dve logické nuly. Obe diódy sú zapojené v priepustnom smere, tečie cez ne prúd, čiže na každej z nich je napäťový spád 0.7V. Uvedomme si, že tieto dve napätia sú voči sebe paralelne, a teda sa nebudú sčítavať, len sa zväčší "prietok prúdu". Druhým argumentom môže byť to, že anódy oboch diód sú aj s výstupom spojené vodičom, teda sú na rovnakom napätí voči zemi. Nech sa z miesta výstupu vyberieme do zeme ľubovoľnou cestou, tak vždy prejdeme cez napäťový spád len 0.7V. Z toho vyplýva, že túto hodnotu nameriame voči zemi aj na výstupe, z čoho máme logickú nulu.

Keď si zhrnieme výsledky analýzy do tabuľky 1.20 a porovnáme ich s tabuľkou v obrázku 1.18 tak vidíme, že správanie sa obvodu skutočne zodpovedá logickej funkcii AND.

U_b	U_a	$U_{a.b}$
0V	0V	0.7V
0V	5V	0.7V
5V	0V	0.7V
5V	5V	5V

Obrázok 1.20: Napäťové úrovne v diódovom hradle AND.

Úlohy

1. Zostavte obvod podľa schémy na obrázku 1.19.
2. Zapojte rôzne kombinácie vstupných hodnôt a pomocou multimetra overte, že výstupné napätia zodpovedajú logickej funkcii AND.
3. Skúste namiesto obyčajných diód zapojiť LED diódy a skontrolujte, či sa zmenili napäťové pomery v obvode pri rôznych vstupných hodnotách. Ak áno/nie, prečo?

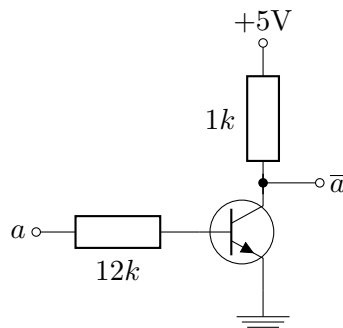
1.6.3 Tranzistorové NOT hradlo

DDL logika, hoci v princípe funkčná, má jeden veľký problém. Prejaví sa vtedy, ak výstup z jedného DDL hradla privedieme na vstup druhého. Vtedy Výstup druhého hradla bude často v nedefinovanej oblasti²³. Riešením sa ukázali byť tranzistory, čím

²²Nedajte sa pomýliť tým, že na schéme nie je nikde vyznačená. Ak je tam údaj +5V, tak automaticky to znamená, že niekde inde sa musí zem ako referenčná hladina nachádzať.

²³Nakreslite si schému a skúste zistiť prečo.

vznikla diódovo-tranzistorová logika (DTL) a nakoniec aj TTL. Vezmime si tranzistor v zapojení so spoločným emitorom, podľa nižšie uvedenej schémy. Rozdiel oproti schéme 1.16 je v prítomnosti rezistora medzi bázou a vstupom a . Jediná jeho funkcia je určovať maximálnu hodnotu bázevého prúdu.



Obrázok 1.21: Tranzistor NPN v zapojení so spoločným emitorom – NOT hradlo.

Analýza obvodu na schéme 1.21 je identická s analýzou obvodu zo schémy 1.16 v sekcii 1.5 a časti Bipolárny tranzistor, a preto ju nebudeme znovu písať. Zhrnieme len poznatky do tabuľky 1.22. Keď napäťovým úrovňam priradíme logické hodnoty podľa TTL štandardu vidíme, že ide o hradlo NOT, inak nazývané **invertor** alebo **negátor**.

U_a	a	$U_{\bar{a}}$	$\bar{a}$
0V	0	5V	1
5V	1	0V	0

Obrázok 1.22: Napäťové úrovne v tranzistorovom NOT hradle.

Úlohy

1. Zostavte obvod podľa schémy na obrázku 1.21.
2. Overtete funkciu hradla pomocou multimetra pri oboch hodnotách vstupu a .