

Leoš Dvořák

POLOVODIČE A JEJICH APLIKACE



Vzdělávací modul FYZIKA

Výukový a metodický text

Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze:
aktivně, aktuálně a s aplikacemi – projekt OPFA



Praha 2012

Publikace byla vydána v rámci Operačního programu Praha – Adaptabilita (OPPA) a jeho projektu Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi. Řešiteli projektu jsou pracovníci Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze a Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

Autor textu:

doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc.,
katedra didaktiky fyziky MFF UK v Praze

Recenzenti:

RNDr. Stanislav Gottwald
Mgr. Věra Koudelková
RNDr. Peter Žilavý, Ph.D.

Vydalo Nakladatelství P3K s. r. o. (www.p3k.cz) v Praze v roce 2012 v nákladu 120 ks. Vydání první.
Ze sazby dodané autorem vytiskl xPrint s. r. o.
Publikace neprošla jazykovou korekturou.

© Leoš Dvořák, 2012

© Nakladatelství P3K, 2012

ISBN 978-80-87186-83-1

OBSAH

1. Úvodem	5
1.1 Trocha temné sci-fi – a polovodiče v RVP	5
1.2 Jak pracovat s tímto materiálem	7
1.3 Jaké pokusy zde najdete a jak je využít ve výuce	8
2. Něco málo teorie	9
2.1 Druhy polovodičových prvků a základní informace o jejich činnosti	9
2.2 Parametry polovodičových součástek	13
2.3 Několik užitečných vztahů pro výpočty	15
3. Praktické rady pro pokusy s polovodiči	16
3.1 Jak lze polovodiče zničit – a jak to nedělat	16
3.2 Kde sehnat polovodiče a jak o nich získat informace	18
3.3 Konstrukce a pomůcky pro realizaci pokusů	19
4. Diody	23
4.1 Začínáme s LED	23
4.2 Usměrnovací diody a jejich využití	27
4.3 Jednoduchá zapojení s diodami a LED	28
4.4 Zenerovy diody: stabilizace napětí	29
5. Fotorezistory a termistory	32
6. Tranzistory	33
6.1 Tranzistor jako spínač	33
6.2 Tranzistor zesiluje proud	34
6.3 Tranzistor zesiluje napětí	36
6.4 Jednoduchá zapojení s bipolárními tranzistory	37
6.5 Tranzistory řízené polem	39
7. Další zajímavé součástky	40
7.1 Fototranzistory	40
7.2 Tyristory	41
7.3 Hallovy sondy	41
8. Závěr	42
Literatura	43

1. Úvodem

Tento učební materiál vznikl v rámci projektu OPPA „Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi“, řešeném v letech 2010–2012 na Přírodovědecké a na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Záměrem projektu je přispět k inovaci výuky přírodních věd a matematiky a ke zvýšení zájmu středoškoláků o tyto obory. Za fyziku byla vybrána témata z oblasti, která byla klíčová pro rozvoj moderní společnosti – z oblasti elektromagnetismu. Do těchto témat bez diskuse patří i problematika polovodičů.

1.1 Trocha temné sci-fi – a polovodiče v RVP

Vlastně není přesné psát, jak jsme to udělali výše, že oblast elektromagnetismu „byla klíčová“. Ona stále je – a v případě polovodičů je to vidět více než jasně.

Pokud by vinou nějaké „černé magie“ polovodiče přestaly pracovat (ať už by se z nich staly vodiče nebo izolanty), naše současná civilizace by se zastavila či spíše propadla by se do naprostého chaosu a kolapsu. To, že by přestaly hrát MP3-přehrávače a různé „konzole“ typu Play Station, bychom zřejmě přežili. Mlčící rozhlas a osleplé televizní obrazovky už by byly horší. Informace by prakticky přestaly kolovat: z mobilních telefonů by byly mrtvé „cihličky“, po internetu by se nepřenesl jediný byte (opravdu, o tom, jak nic nefunguje, by se nešlo podělit ani s přáteli na Facebooku!) a noviny by také nevyšly – redaktoři je připravují na počítačích a i v tiskařských strojích je polovodičů nemálo. Zásobování elektřinou by ostatně také vysadilo, řídicí systémy elektráren a přenosových sítí se bez polovodičových technologií také neobejdou. Temnotu by nám nerozjasnily ani čelovky a svítilny obsahující LED. Města by se asi brzy stala prostředím z postkatastrofických sci-fi románů. Snad by bylo lepší ujet na venkov. Autem by to ale nebylo – moderní automobily mají pod kapotou také nemálo polovodičových systémů, bez nich bychom ani nenastartovali.

Raději už zanechme těchto temných vizí¹. Polovodiče našťastí fungují a díky pokračujícímu výzkumu a vývoji nám slouží stále lépe. Není účelem těchto řádek pět na ně chválu – jen upozornit, jak moc jsme na nich ve skutečnosti závislí.

Tak důležitou technologii by samozřejmě bylo chybou při výuce fyziky (minimálně na úrovni střední školy) pominout a nic o ní neříci. Jinak by pro nás byla jen něčím zcela nepochopitelným, čímsi v nitru „černých skříněk“, které nás v moderním světě obklopují, a fakticky tak téměř jakousi neznámou „magií“, ať už černou nebo bílou. Asi se my, kdo učíme fyziku, shodneme, že její výuka by kromě jiného měla sloužit právě k tomu, abychom z těch „magických moderních technologií“ alespoň něco pochopili. Konkrétně, aby pro nás a pro naše žáky a studenty

¹ V těchto vizích samozřejmě nejsme moc původní. Kdo se jimi rád opájí, mohl si například už před téměř dvěma desítkami let o důsledcích toho, kdyby přestala fungovat elektřina, přečíst v románu O. Neffa „Tma“.

polovodičové prvky nebyly jen záhadnými „šváby a broučky“, kterým běžný člověk nemá šanci porozumět. Abychom se alespoň v základech těchto technologií trochu vyznali a třeba s pomocí polovodičových prvků uměli i pár nejjednodušších zapojení realizovat.

Odpovídá významu polovodičů kolem nás důraz, který na ně kladou české vzdělávací dokumenty? Dalo by se říci, že ano i ne. V Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia se na jedné straně v očekávaných výstupech uvádí, že „žák ... aplikuje poznatky o mechanismech vedení elektrického proudu v kovech, polovodičích, kapalinách a plynech při analýze chování těles z těchto látek v elektrických obvodech“. Tam by se schovalo téměř všechno, až po pokročilé vědomosti a dovednosti inženýra navrhujícího integrované obvody. Na druhé straně, pokud se týče učiva, najdeme v RVP ohledně předmětu našeho zájmu jen dvě lakonická slova: „polovodičová dioda“. Žádný polovodičový prvek, který má více, než dva vývody, se tedy do povinného učiva nedostal a i z těch „se dvěma nožičkami“ to je jen dioda. Navíc není úplně jasno jaká. Detekční? Výkonová usměrňovací? Zenerova? Nebo dokonce nějaký jiný typ?

Není však účelem těchto řádek kritizovat Rámcové vzdělávací programy. V rozsahu, který jim byl vymezen, se autoři těžko mohli více „rozmačknout“. Navíc RVP představuje jen povinné *minimum*, které je třeba zvládnout. A „tělesa z kovů a polovodičů“ jsou samozřejmě i tranzistory a integrované obvody. Takže je na učitelích fyziky, v jakém rozsahu podle konkrétních podmínek na své škole žáky a studenty s polovodiči seznámí.

Jak v tom může pomoci tato publikace?

V následujících kapitolách představíme možnosti, jak toto seznamování dělat *aktivně*. To znamená praktickou konstrukcí jednoduchých zapojení, jejichž funkci můžeme ověřovat, zkoumat a měřit.

Co zde najdete?

Jak je zřejmé již z obsahu, tato příručka se zaměřuje na polovodičové prvky v *analogových* obvodech. Tedy tam, kde jde například o zesilování analogových signálů nebo usměrňování střídavých napětí – čili napětí, která se mohou v určitém rozmezí libovolně měnit. Jasným a známým příkladem je třeba napětí na sluchátkách, které máme připojeny k MP3 přehrávači.

Stranou tedy necháváme *číslicovou* neboli *digitální techniku*, tedy, zhruba řečeno, zapojení, kde je signál kódován posloupností nul a jedniček (resp. bitů či skupin bitů). Takovýchto obvodů je samozřejmě například ve zmíněném MP3 přehrávači podstatně víc, než těch analogových. Podobně je tomu v mobilech a dalších zařízeních, o počítačích nemluvě. Digitální technika je samozřejmě oblast nesmírně zajímavá a určitě by mohla být například náplní seminářů na pomezí fyziky a informatiky. Číslicové obvody však jsou, určitě pokud se vnitřní struktury týče, již poněkud složitější. Proto jsme v této příručce zvolili cestu, na níž se seznamujeme s polovodičovými součástkami opravdu od těch nejjednodušších, „s nejméně nožičkami“, počínaje už zmíněnou diodou.

1.2 Jak pracovat s tímto materiálem

V této příručce a na přiloženém CD najdete pracovní listy a návody na konstrukce velmi jednoduchých obvodů a pokusy s nimi. Je na vás, které návody a pokusy do své výuky zařadíte a jak je využijete.

Návody a pokusy uvedené v dalších kapitolách jsou řazeny dle známé zásady „od jednoduššího ke složitějšímu“, takže by asi nebylo účelné ve výuce úplně zpřeházet jejich pořadí. Ovšem jak podrobně co probrat, co z dále nabízeného materiálu vypustit a do jaké úrovně dojít, je opravdu na vás, učitelích, a na konkrétních podmínkách na vaší škole.

Totéž se týká i pomůcek a toho, jak s nimi pracovat. Někteří učitelé si sami či se svými žáky a studenty zhotovili sadu jednotlivých pomůcek (součástek na dřevěných destičkách popsaných dále v kapitole 3.3) a používají je pak dále pro pokusy a měření. Někdo může klást důraz na to, aby si žáci a studenti zhotovili jednoduché konstrukce a zapojení sami. Nemusíme tomu hned říkat třeba polytechnická výchova a ani to neznamená, že by se každý žák či student měl stát mistrem v práci s transformátorovou páječkou či konstruktérem elektronických obvodů. Ale je fakt, že když si žák zhotoví jednoduchou věc či pomůcku, která funguje, získá tím k dané partii fyziky přece jen jiný vztah, než když si o tom jen čte v knížce či se dívá na video na internetu.

To ostatně platí i pro učitele. Zkušenost s vedením různých kurzů ukazuje, že řada učitelů má před polovodičovými součástkami určitý „ostych“, nebo uvádí, že páječku nedržela v ruce řadu let, pokud vůbec. Vytvořit si vlastníma rukama pár byt' jednoduchých pomůcek či zapojení, které mohou posléze využít ve výuce, je pro tyto učitele zkušeností, kterou velmi oceňují.

Náměty v této příručce uvedené tedy mohou sloužit i vám samotným, abyste si vyzkoušeli, že udělat si jednoduchou konstrukci či pomůcku třeba se svítivou diodou, několika rezistory a případně i tranzistorem není „žádná věda“.

Obsah příručky asi není třeba podrobněji komentovat. Ve druhé kapitole najdete „něco málo teorie“. Nikoli ovšem teoretický výklad principů vodivosti polovodičů nebo činnosti PN přechodu, spíše základní věci, které budou potřeba pro pochopení činnosti jednoduchých obvodů s polovodičovými prvky. Ve třetí kapitole pak již následují konkrétní praktické rady, které využijete při práci s polovodiči. Věříme, že se vám k informacím a radám v této kapitole vyplatí vracet, až budete prakticky realizovat konstrukce a pokusy popsané dále.

Těžištěm příručky jsou kapitoly 4 až 7. V nich vás postupně seznámíme s tím, jak se různé polovodičové prvky chovají, s některými obvody, v nichž mohou být využity a v nichž lze jejich chování demonstrovat a zkoumat.

Seznam použité a doporučené literatury uvedený na závěr odkazuje jednak na výklad teorie činnosti polovodičových prvků a také na zdroje, popisující řadu námětů „co s polovodiči dál“.

Přiložené CD obsahuje zejména barevnou fotodokumentaci některých v příručce popsaných pomůcek a také pracovní listy a návody, které si můžete upravit pro vaše žáky a studenty.

1.3 Jaké pokusy zde najdete a jak je využít ve výuce

Jak již bylo řečeno výše, tato příručka není výkladem teorie fungování polovodičových prvků. S fungováním polovodičových součástek se zde seznamujeme aktivně, prostřednictvím konkrétních pokusů.

Typicky půjde o pokusy velmi jednoduché, které nám ukážou základní vlastnosti polovodičových součástek, případně umožní měřit jejich nejzákladnější parametry.

Některé z uvedených pokusů by samozřejmě mohly být provedeny i demonstračně, většina se však uplatní spíše jako pokusy frontální nebo jako jednoduché laboratorní práce.

V souvislosti s tím, zda dělat či nedělat frontální pokusy (ba dokonce, zda dělat pokusy vůbec), si často učitelé stěžují na nedostatečné vybavení školních kabinetů fyziky a na nedostatečné finance pro nákup nových pomůcek. Často jde o stížnosti oprávněné, nicméně právě v případě polovodičů můžeme na pomůckách značně ušetřit. Je pravdou, že budeme-li kupovat jednotlivé součástky na panelech od výrobců a dodavatelů školních pomůcek, získáme sice profesionální výrobek, ale obvykle za cenu mnohonásobně převyšující cenu samotných součástek. Jednoduché konstrukce na dřevěných prkénkách, které popisujeme v této příručce, sice vypadají amatérsky, ale jsou názorné a cenově vyjdou doslova na pár korun. Z finančního hlediska tedy není problém, abychom měli dost pomůcek třeba pro všechny dvojice žáků ve třídě nebo pro všechny žáky ve třídě dělené na laboratorní práce.

Chceme-li provádět kvantitativní měření, stačí levné digitální multimetry, které lze někdy sehnat i za cenu necelých sto korun (je pravdou, že jejich životnost nemusí být nejdelší), v cenovém rozpětí dvě stě až čtyři sta korun už bývá nabídka širší a rozsah měřených hodnot vyšší.

V závislosti na časových možnostech lze zvážit, zda některou z laboratorních prací nezaměřit přímo na to, aby žáci či studenti nějakou jednoduchou pomůcku či konstrukci vyrobili. Znamená to práci s kladívkem, kleštičkami, případně s páječkou – a směřuje k rozvoji dovedností trochu jiných než jen počítačově-informatických. Jistě, zatlukání hřebíčků do dřevěné destičky i následné pájení vývodů součástek může být pro leckoho trochu náročnější než klikání myši a brouzdání po webu. Ale může vést k uspokojení z toho, že jsme něco vytvořili vlastníma rukama, i u jedinců, do kterých bychom to ani neřekli a které bychom neoznačili za technické typy. A je jen na nás, učitelích fyziky, zda i k takovéto činnosti dáme našim žákům a studentům příležitost.

2. Něco málo teorie

V této příručce nebudeme vykládat fyzikální základy vodivosti různých polovodičových materiálů ani principy činnosti PN přechodu zakládající se na teorii pohybu elektronů v pevných látkách (pásová teorie). Nebude zde tedy řeč o elektronech a dírách, o jejich pohyblivosti, rekombinaci apod. Pomineme i výklad principu činnosti bipolárního tranzistoru vycházející z těchto představ. Zájemci mohou základní informace najít už ve středoškolských učebnicích, poněkud podrobněji pak například v [1-2] a samozřejmě i na mnoha místech na webu.

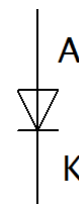
V této kapitole se soustředíme na základní informace, které jsou podstatné pro *aplikaci* polovodičových součástek. I zde lze samozřejmě najít řadu podrobnějších pramenů. Doporučit můžeme třeba volně dostupnou hypertextovou učebnici [3], obecně pak i řadu publikací typu „úvod do elektroniky“, např. [4-5]. Pro úplnost zde stručně zmíníme i některé typy polovodičových součástek, které se např. v gymnaziální učebnici fyziky ani nezmiňují, např. tyristory. Pokud jsou pro vás tyto informace nadbytečné, můžete je v následujícím textu přeskočit.

2.1 Druhy polovodičových prvků a základní informace o jejich činnosti

2.1.1 Diody

Základním polovodičovým prvkem, s nímž se většinou žáci seznamují, je **polovodičová dioda**. Její počátky lze vystopovat k *hrotovým detektorům* požívaných v první polovině minulého století v nejjednodušších přijímačích, „krystalkách“. Z nich se později vyvinula *hrotová dioda*, v níž se kovový hrot dotýká destičky z germania nebo křemíku. Hrotová dioda je dodnes někdy používána pro usměrňování vysokofrekvenčních signálů, v naprosté většině však dnes převažují křemíkové diody využívající PN přechod (na rozdíl od hrotových bývají nazývány *plošné diody*).

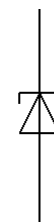
Dioda propouští proud v *propustném směru*, od anody ke katodě (viz schematickou značku na obrázku vpravo, A značí anodu a K katodu, propustný směr přirozeně odpovídá směru šipky ve značce; v diodě samotné to znamená proud tekoucí z polovodiče typu P do polovodiče typu N). V opačném, *závěrném směru*, tedy od katody k anodě, dioda proud téměř nepropouští.



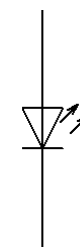
Předchozí tvrzení je třeba poněkud upřesnit. Dioda není ideálním prvkem, který by v propustném směru měl nulový a v závěrném směru nekonečný odpor. Prochází-li diodou proud v propustném směru, je na ní určité napětí. (Někdy mluvíme o úbytku napětí na diodě.) U křemíkových diod bývá, při proudech při nichž se tyto diody užívají, okolo 0,8 V – blíže se na něj podíváme v kap. 4. 2. V závěrném směru naopak polovodičová dioda propouští nepatrný *závěrný proud*, u běžných diod řádu mikroampér i menší. Diody sloužící k usměrňování velkých proudů mívají ovšem závěrný proud větší. V závěrném směru navíc nesmíme přivést na diodu libovolně vysoké napětí – viz dále kap. 2.2.

Dosud jsme v případě plošných diod mluvili o diodách určených k usměrňování, tedy o *usměrňovacích diodách*. Existují ovšem i speciální typy diod určené pro jiné účely.

Zenerovy diody se užívají pro stabilizaci napětí. Pro tento účel jsou vlastně zapojeny v závěrném směru. Do určitého napětí jimi teče jen nepatrný proud. Ten ale po dosažení *Zenerova napětí* začne rychle růst. Běžná dioda by se velkým proudem v závěrném směru zničila; Zenerova dioda tento proud vydrží a udržuje přitom na sobě téměř konstantní napětí.



Svitivé diody (anglicky *light emitting diodes*, odtud běžně užívaná zkratka **LED**) produkují při průchodu proudem světlo určité barvy. Přesněji řečeno, nemusí jít jen o viditelné světlo, ale také o infračervené nebo naopak ultrafialové záření. LED vydávající bílé světlo ve skutečnosti většinou uvnitř vydávají ultrafialové záření; tím je ozáren vhodný fluorescenční materiál, který vydává světlo, jež vnímáme jako bílé.



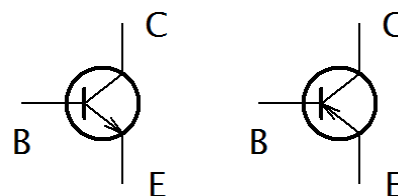
Fotodiody mohou fungovat buď jako zdroj elektrického napětí a dodávat elektrický proud (v tzv. *hradlovém* neboli *fotovoltaickém režimu*) nebo ovlivňovat proud, který jimi prochází v závěrném směru (v *odporovém režimu*).

Kromě výše uvedených existují **další typy polovodičových diod**. Příkladem mohou být *Schottkyho diody* využívající přechod kov-polovodič. Používají se zejména k usměrňování vysokofrekvenčních proudů velmi vysokých frekvencí. Úbytek napětí v propustném směru na přechodu Schottkyho diod je výrazně menší než u běžných křemíkových diod, typicky jen asi 0,3 V. Dalším speciálním typem diod jsou *varikapy*, u nichž využíváme změny kapacity jejich přechodu (v závěrném směru) v závislosti na přiloženém stejnosměrném napětí. Používají se tedy jako kondenzátory s proměnnou kapacitou.

2.1.2 Tranzistory

Součástí, která umožňuje elektrické signály nejen usměrňovat, ale také *zesilovat*, je tranzistor. Bez velkého přehánění můžeme říci, že to byl právě objev *tranzistorového jevu* v roce 1947, co odstartovalo následující doslova revoluční rozvoj polovodičové elektroniky. Není divu, že za něj W. Shockley, J. Bardeen a W. Brattain dostali v roce 1956 Nobelovu cenu.

Nejběžnějším typem tranzistoru, s nímž se dnes jako se součástí setkáme, je **bipolární tranzistor**. Tento typ tranzistoru má dva PN přechody. V závislosti na pořadí vrstev s příměsí P a N rozeznáváme tranzistory typu NPN a PNP. Rozlišení schematických značek obou typů si lze pamatovat podle známé říkanky „NPN – šipka ven“².



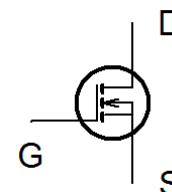
² Poznamenejme, že podle novější české normy se ve značce tranzistoru nekreslí kružnice, pokud nemá tranzistor kovové pouzdro vodivě spojené např. s kolektorem. Ve schématech, která najdeme v učebnicích a dalších knihách, v časopisech i na webu, se však většinou používá značka s kružnicí. (Značka bez kružnice se užívá při kreslení tranzistorů uvnitř integrovaných obvodů.) V této publikaci proto budeme užívat značky tak, jak jsou uvedeny na obrázcích na této stránce, tedy „s kolečkem“.

Tranzistor má tři vývody nazývané *emitor*, *báze* a *kolektor*, u značek na obrázcích jsou označeny písmeny E, B, C (z anglického *collector*). V aplikacích je u tranzistorů NPN na kolektoru *kladné* napětí oproti emitoru³, u tranzistorů PNP je tomu naopak.

Pro aplikaci bipolárních tranzistorů je důležité, že malým proudem do báze můžeme řídit velký proud tekoucí kolektorem (a také emitem).

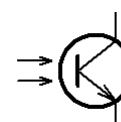
Tranzistory řízené polem bývají označovány zkratkou FET (z anglického *field effect transistor*), některé jejich typy jsou označovány jako MOSFET (*metal-oxid-silicon FET*)⁴.

Tranzistory řízené polem se též nazývají **unipolární**. Nemají totiž vrstvy složené z různých typů příměsových polovodičů, ale jen jeden kanál, např. z polovodiče typu N, jehož vodivost je ovládána elektrickým polem – fakticky velikostí napětí přivedeného na elektrodu G (*gate*). Ta hraje podobnou roli, jako báze u bipolárních tranzistorů, na rozdíl od báze však do ní neteče prakticky žádný proud. Roli kolektoru a emitoru hrají elektrody označované jako D (*drain*) a S (*source*).



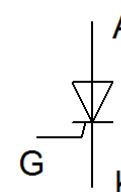
Schematické značky unipolárních tranzistorů mají různé podoby v závislosti na jejich dílčím typu; na obrázku je nakreslena značka pro jeden typ MOSFET tranzistoru s kanálem typu N. Pro kanál typu P míří šipka ve schematických značkách obráceně. Poznamenejme, že u unipolárních tranzistorů s kanálem typu N má elektroda D kladné napětí oproti elektrodě S (tedy analogicky jako je tomu u bipolárních tranzistorů NPN).

Fototranzistory fungují podobně jako běžné bipolární tranzistory, kolektorový proud je však ovládán intenzitou světla, které na fototranzistor dopadá. Fototranzistory proto mají jen dva vývody – emitor a kolektor, báze není vyvedena. Změna proudu v závislosti na intenzitě dopadajícího světla je mnohem výraznější, než je tomu u fotodiod.



2.1.3 Tyristory

Tyristory jsou prvky se třemi PN přechody. Působí jako spínač ovládaný proudem do elektrody G. Pokud na tyristoru začneme zvyšovat napětí mezi anodou A a katodou K od nuly (a do elektrody G neteče proud), tyristor nevede. Proudem do elektrody G jej můžeme „sepnout“ – a pak již zůstane sepnutý, tedy vede proud, i když do elektrody G již žádný proud neteče. V tom se jeho funkce liší od funkce tranzistoru. Tyristor se vypne, až když proud mezi elektrodami A a K klesne pod určitou malou hodnotu (která může být řádu miliampér). Taková situace zcela přirozeně nastane, když je tyristor zapojen v obvodu se střídavým napětím. Protože může zapínat proud v určité části periody střídavého napětí, lze jej využít k prakticky bezztrátovému řízení výkonu například žárovek – tyristory se proto používají například ve stmívačích osvětlení.



Tyristory vedou proud jen jedním směrem. Pro spínání proudu v obou směrech se užívají **triaky**.

³ Výjimkou z tohoto pravidla je tzv. inverzní zapojení tranzistoru; užívá se však tak zřídka, že se jím zde nemusíme zabývat. Praktická poznámka s tím související: Pokud u tranzistoru naměříte nebo zjistíte, že jeho proudový zesilovací činitel je podezřele malý (například řádu jednotek), zkontrolujte, zda nemáte přehozený kolektor a emitor.

⁴ Zkratkou zahrnujících „MOS“ a „FET“ je ovšem víc (CMOS, DMOS, JFET a další). Zájemce můžeme odkázat například na [4] nebo na internetové zdroje.

2.1.4 Další prvky

Termistory jsou polovodičové rezistory, jejichž odpor se výrazně mění s teplotou. Běžnější jsou termistory, jejichž odpor s teplotou klesá (*termistory se záporným teplotním koeficientem*), existují však i termistory s kladným teplotním koeficientem (někdy se jim říká *pozistory*).



Odpor **fotorezistorů** závisí na intenzitě světla. Mění se o mnoho řádů: za tmy může mít fotorezistor odpor stovek kiloohmů, na slunečním světle pak pouze jednotek ohmů. Fotorezistory se však nehodí ke snímání rychlých změn světla (na frekvencích řádu kHz, MHz a vyšších), zejména při malém osvětlení je jejich „setrvačnost“ v reakci na změny intenzity světla velmi znatelná.



Rychle a citlivě na světlo reagují **CCD prvky** (z anglického *charge-coupled device*). Používají se ve čtečkách čárových kódů, jako snímací prvky v digitálních fotoaparátech a videokamerách i jako velice citlivé optické prvky v astronomických dalekohledech.

Když už se zmiňujeme o prvcích reagujících na světlo, neměli bychom zapomenout ani na **fotovoltaické články a panely**, dnes často nazývané prostě *solární články* resp. *panely*. Bylo by asi nošením dříví do lesa konstatovat, že slouží k přeměně energie slunečního záření na energii elektrickou, tedy k využití jednoho z obnovitelných zdrojů energie⁵. Účinnost přeměny světelné energie na elektrickou bývá od 6 % pro články z amorfního křemíku až po 30 % i více pro nové typy solárních článků připravované v laboratořích. Účinnost komerčně dostupných solárních panelů (v době přípravy tohoto textu, dle internetových zdrojů) dosahuje až okolo 17 %. Solární články jsou nepochybně oblastí, kterou v budoucnu čeká ještě výrazný vývoj.

V našem stručném přehledu jsme samozřejmě nezmínili všechny druhy polovodičových prvků. Zajímavé a dostupné jsou například **Hallovovy sondy** pro měření magnetické indukce, **laserové diody** (ty najdeme například v laserových ukazovátkách) nebo **diaky** (prvky se speciální charakteristikou, používané v obvodech s tyristory).

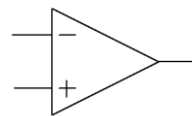
2.1.5 Integrované obvody

Dosud uváděné polovodičové prvky patřily do skupiny *diskrétních polovodičových součástek*. To neznámá, že by byly ceněny pro to, jak umí udržet tajemství. Jde prostě o součástky samostatné – například co tranzistor, to jedna součástka, ve vlastním pouzdře, s vlastními vývody. Naproti tomu *integrované obvody* v jednom pouzdře zahrnují více tranzistorů, rezistorů a diod – od jednotek až po stovky a více. (V případě číslicových obvodů, například procesorů osobních počítačů se dnes tranzistory uvnitř jednoho pouzdra počítají už ve stovkách milionů, ale jak už jsme uvedli výše, těmito obvody se zde nebudeme zabývat.)

⁵ Bylo by mimo rámec tohoto textu diskutovat ekonomickou výhodnost resp. nevýhodnost jejich využití a peripetie toho, komu a v důsledku jakých okolností přinášejí či budou přinášet zisk. Za tyto peripetie samotné solární články nemohou. Při výuce fyziky přirozeně na podobné diskuse ve třídě může dojít; učitel fyziky může přispět k jejich racionalitě tím, že bude dbát, aby se při nich užívalo fyzikálně správných a relevantních informací a argumentů.

Zůstaneme-li u analogových obvodů (kde nejde o nuly a jedničky, ale o spojitě proměnné hodnoty napětí a proudů), pak k důležitým a běžným druhům integrovaných obvodů patří:

Operační zesilovače. Jak název napovídá, jde o prvky, které zesilují elektrické napětí; zesílení přitom může dosahovat hodnot až milion i více. Schematická značka na obrázku vpravo je jednoduchá: zachycuje dva vstupy a jeden výstup. (Není zde zakresleno například napájení a případné další pomocné vývody.)



K funkci operačního zesilovače zde jen velmi stručně uvedeme, že napětí na jeho výstupu je mnohonásobkem rozdílu mezi napětími na vstupech označených jako + a - (tzv. *neinvertující* a *invertující vstup*). Ač se to možná na první pohled nezdá, součástka s takto jednoduchou základní funkcí má velmi široké možnosti využití.

Časovače umožňují například sepnout další obvody po určitou definovaně dlouhou dobu (například rozsvítit na určitou dobu světlo na schodišti) nebo generovat signály různých frekvencí a být tak základem různých blikáčů, bzučáků apod.

Integrované obvody umožňují zesilovat a řídit i vyšší napětí a proudy. Příkladem jsou **audiozesilovače** (v přenosném MP3 přehrávači už dnes nenajdeme zesilovač z jednotlivých tranzistorů) nebo například **integrované stabilizátory napětí**.

Touto stručnou zmínkou jsme samozřejmě zdaleka nevyčerpali všechny kategorie integrovaných obvodů. Pojdme se však raději podívat na některé základní parametry polovodičových součástek.

2.2 Parametry polovodičových součástek

Polovodiče nevydrží vše⁶. Proto je dobré, abychom si u každé součástky byli vědomi jejich **mezních parametrů**, především elektrických. Většinou se uvádějí:

- **Maximální napětí** (většinou označované jako *maximální závěrné napětí*)
Uvádí se napětí mezi jednotlivými elektrodami, většinou v závěrném směru.
Například usměrňovací dioda 1N4001 má dovolené napětí v závěrném směru max. 50 V, dioda 1N4007 dokonce 1000 V.
- **Maximální proud**
Jde o proud mezi danými elektrodami, většinou v propustném směru.
Například výše uvedené typy diod mají maximální povolený stálý proud 1 A; pro jednotlivý neopakující se pulz je povolena hodnota vyšší.

⁶ Ted' nemáme na mysli extrémny typy hození do černé díry nebo do jácnu aktivní sopky, jde nám o jejich případné poškození elektrickým napětím či proudem.

- **Maximální výkon**

Z napětí na součástce a z proudu, který jí prochází, můžeme spočítat výkon, který se na dané součástce mění v teplo. Ten musí být menší než určitá maximální hodnota, aby se polovodičové struktury v součástce nezničily příliš vysokou teplotou. Například tranzistor BC337 má maximální dovolený výkon 625 mW. Poznamenejme, že maximální povolený výkon závisí na okolní teplotě.

- **Maximální teplota** polovodičových přechodů.

Zde sice již nejde o elektrickou veličinu, ale i ona klade na práci s polovodičovými součástkami určitá omezení. Pro křemíkové diody a tranzistory bývá uváděna maximální povolená teplota 150 °C. To například znamená, že vývody součástek bychom neměli příliš dlouho „koupát“ v roztaveném cínu resp. cínové pájce, ty mají teplotu tání vyšší. (Naštěstí křemíkové tranzistory nejsou na teplotu tak citlivé jako kdysi bývaly tranzistory germaniové, takže se jejich poškození vysokou teplotou nemusíme příliš obávat.)

Pro aplikaci polovodičových součástek jsou samozřejmě důležité jejich **základní elektrické parametry** (nazývané též *provozní parametry*). Ty záleží na typu součástky.

Pro **diody** se obvykle udává **napětí v propustném směru** při proudu, při němž je dioda provozována (např. jako usměrňovací dioda). Například pro výše zmíněné diody 1N4001 až 1N4007 je toto napětí při proudu 1 A uváděno jako 1,1 V. Dále se u diod uvádí **proud v závěrném směru** při určitém napětí. Měl by být co nejmenší; pro uvedené typy diod například katalog uvádí maximálně 5 μA při teplotě 25 °C. (S teplotou ale závěrný proud roste, pro 100 °C je už katalogová hodnota desetkrát vyšší.)

Pro **Zenerovy diody** se uvádí **Zenerovo napětí**, tedy zhruba řečeno napětí, které je na diodě, když ji použijeme pro stabilizaci napětí.

Pro **LED** bývá uváděn **pracovní proud** (pro většinu malých LED bývá 20 mA), rozsah **vlnových délek**, v nichž svítí, **svítivost** (v jednotkách mcd, čili milikandela) a také to, do jak širokého kužele daný typ LED svítí.

U **bipolárních tranzistorů** bývá základním uváděným parametrem **proudový zesilovací činitel**, tedy poměr proudu kolektorem k proudu bází. Bývá označován symbolem B nebo β ⁷, někdy též h_{21e} nebo také h_{FE} (pod tímto symbolem jej najdeme na digitálních multimetrech – ty při „kontrolě tranzistorů“ měří právě proudový zesilovací činitel).

U těchto i dalších součástek samozřejmě katalogy a firemní dokumentace uvádějí řadu dalších parametrů a grafů, které vystihují různé charakteristiky příslušných součástek. Tyto údaje jsou důležité při profesionálním návrhu obvodů s polovodičovými součástkami a využijí je i ti, kdo

⁷ Přesněji řečeno, B označuje *statický proudový zesilovací činitel* a β *dynamický proudový zesilovací činitel*, který se počítá z malých změn proudů kolektoru a báze. Pro naše účely však zde obě veličiny nebudeme rozlišovat.

se elektronice věnují na pokročilé amatérské úrovni. Pro naše základní seznamování s polovodičovými prvky však již další podrobnosti nebudou nezbytné.

2.3 Několik užitečných vztahů pro výpočty

Abychom se při svém seznamování s polovodiči nemuseli držet jen bezduchého kopírování schémat a hodnot součástek, je dobré umět alespoň některé základní veličiny a vztahy mezi nimi spočítat.

Naštěstí však pro základní výpočty nepotřebujeme skoro nic nad ty nejznámější vztahy:

Ohmův zákon

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.3.1)$$

umožní vypočítat proud I v obvodu, známe-li napětí U a odpor R . Pokud naopak budeme požadovat, aby proud (například svítivou diodou) měl určitou zadanou hodnotu, a budeme se ptát, jaký rezistor do obvodu zařadit, využijeme samozřejmě Ohmův zákon ve tvaru $R = U / I$. (Opravdu, základní výpočty, které budeme potřebovat, jsou jen velmi jednoduchým cvičením na Ohmův zákon!)

Vztah pro výkon

$$P = U \cdot I \quad (2.3.2)$$

umožní vypočítat, zda nepřekročíme maximální povolený výkon například na tranzistoru.

Vztah pro **proudový zesilovací činitel** bipolárního tranzistoru

$$B = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.3.3)$$

(kde I_C je kolektorový proud a I_B proud bázi) využijeme později například k odhadu, jak dokáže zesílit proud dvojice tranzistorů.

Poznamenejme, že výše jsme opravdu uvedli jen ty nejjednodušší vztahy, prakticky na úrovni ZŠ. Pro základní výpočty však nám a našim žákům postačí. Pokročilejší zájemci samozřejmě mohou pracovat s dynamickým proudovým zesilovacím činitelem $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$, případně s teoretickým vztahem mezi napětím a proudem na polovodičové diodě (my se tohoto vztahu dotkneme v kap. 4.2). Ti ještě pokročilejší pak například s tzv. čtyřpólovými parametry tranzistorů. Ale tito zájemci si příslušné definice veličin, vzorce a vztahy nepochybně sami najdou v dostupné literatuře. My nyní od teorie raději přejdeme k otázkám naprosto praktickým.

3. Praktické rady pro pokusy s polovodiči

Seznamovat se s polovodiči *aktivně*, znamená provádět s nimi pokusy, sestavovat a konstruovat alespoň velmi jednoduché obvody a na nich si vlastnosti polovodičových součástek „osahat“. K tomu se do začátku může hodit několik praktických rad.

3.1 Jak lze polovodiče zničit – a jak to nedělat

Kdo nic nedělá, nic nezkaží. Proto se může stát, že občas některou polovodičovou součástku my nebo naši žáci zničíme. Nic hrozného se neděje – pro pokusy a konstrukce v následujících kapitolách budeme vybírat a doporučovat součástky, které jsou doslova „korunovými položkami“. Přesto je dobré vědět, nač si dát pozor.

Nejjednodušší způsob, jak „zneschopnit“ polovodičovou součástku je triviální: **ulomit jí nožičku**. Vývody součástek jsou v pouzdrech zataveny, a tak, ohneme-li vývod těsně u pouzdra (zejména pokud to uděláme několikrát tam a zpátky), může se ulomit. Proto je dobře ohýbat vývody až ve vzdálenosti pár milimetrů od pouzdra, mezi pouzdrem a ohybem je při ohýbání raději přidržen (prsty nebo malými kleštičkami) a neohýbat přes ostrou hranu.

Přejděme k variantám „elektrického ničení“. Ty souvisejí s výše uvedenými mezními parametry součástek.

Zprvė lze **překročit maximální dovolené napětí**. Budeme-li chtít diodou, která má povolené napětí v závěrném směru 50 V, usměrňovat síťové napětí, je pravděpodobné, že to dioda nevydrží a její PN přechod se „prorazí“. (Opravdu se v této souvislosti hovoří o průrazu v závěrném směru.) Podobně by síťové napětí v závěrném směru nevydržela svítivá dioda, ty mají povolené napětí v závěrném směru ještě nižší. Typ polovodičového prvku (diody, tranzistoru apod.) tedy musíme zvolit vždy takový, který s rezervou vydrží napětí, které na dané součástce za provozu bude.

Velice citlivé jsou na průraz vyšším napětím MOSFET tranzistory. Konkrétně jde o průraz mezi elektrodou G (gate) a ostatními elektrodami; dovolené napětí je zde maximálně několik desítek voltů. Elektrodu G přitom ani nemusíme připojovat na síťové napětí. Díky extrémně vysokému odporu a velmi malé kapacitě (řádu pikofaradů) mezi G a ostatními elektrodami se může příslušná bariéra v MOSFET tranzistoru prorazit i elektrostatickým nábojem, a to i poměrně malým. Nemusíme k tomu zapínat školní van de Graafův generátor či třít velkou ebonitovou tyč liščím ohonem. Náboj na kousku zelektrovaného plastového brčka nebo náboj, který získáme, když botou šoupneme po podlaze, může MOSFET zničit velmi spolehlivě. Některé ze součástek využívající MOSFET technologie (např. některé typy integrovaných obvodů) mají v sobě již zintegrovány některé ochranné prvky, takže nejsou tak citlivé. Přesto ale v našich pokusech budeme raději pracovat s bipolárními tranzistory.

Další možností jak zničit polovodičovou součástku je přetížít ji **vysokým proudem**. To se nemusí týkat jen tranzistorů či usměrňovacích diod, ale též běžných svítivých diod. Právě zde nás či naše žáky může „oklamat“ zdánlivá podobnost se žárovkou. Tu jsme zvyklí připojit přímo například k ploché baterii či k jinému zdroji napětí. V případě LED to však může vést k přetížení vysokým proudem. LED může krátce svítit zdánlivě intenzivněji, případně s poněkud změněnou barvou (např. místo zelené téměř žlutou), ale výrazně se zahřívá. Její svit přitom obvykle po několika sekundách či desítkách sekund zeslábne, až dioda někdy téměř přestane svítit a je k nepotřebě. V extrémním případě může přehřátí diody vést k tomu, že materiál jejího pouzdra praskne. Část „čepičky“ LED v takovém případě může odletět poměrně vysokou rychlostí – pozor na oči! Výsledek podobného „experimentu“ ukazuje fotografie vpravo. Takovéto extrémy nastanou poměrně zřídka, některé typy LED vyšší proudy zdánlivě snášejí bez následků, alespoň chvíli, ale nelze na to spoléhat. Při připojování LED k baterii proto musíme vždy proud omezit sériovým odporem (u běžných malých LED na asi 20 mA), jak si to ukážeme v kap. 4. Výjimkou mohou být speciální typy diod, které mají v sobě omezení proudu už zabudováno.



V případě tranzistorů i dalších součástek může nastat situace, kdy proud ani napětí nepřesáhnou katalogové mezní hodnoty, ale jejich součin je příliš velký. V tomto případě můžeme součástku zničit **příliš velkým výkonem** (resp. příkonem). Součástka se přitom vlastně zničí vysokou teplotou: přiváděný elektrický výkon se mění na teplo, to se nestačí odvádět do okolí, teplota součástky stoupá, až dosáhne hodnot „neslučitelných se životem součástky“. Krátké přetížení tohoto typu tedy může například tranzistor vydržet, delší jej zničí. (Záleží též na tom, jak součástku chladíme. Výkonové tranzistory a integrované obvody jsou vyráběny tak, aby mohly být připevněny na chladič, který odvádí teplo. Takovéto součástky lze zatěžovat maximálním výkonem, který uvádí výrobce, jen pokud jsou spojeny s dostatečně velkým chladičem. Pokud bychom je provozovali bez chladiče, zničí se už při nižším výkonu.) Polovodičové součástky tedy musíme v zapojeních či pokusech využívat tak, abychom maximálně povolený „ztrátový výkon“ nepřesáhli.

Poznamenejme, že možnost zničit elektronické součástky příliš velkým napětím či výkonem se netýká jen polovodičů. Například kondenzátory se vyrábějí pro určité maximální povolené napětí. (U elektrolytických kondenzátorů to může být třeba i pouhých 6,3 V. Za připomenutí také stojí, že u elektrolytických kondenzátorů musíme dát pozor na polaritu!) Příliš velkým výkonem zase můžeme zničit i obyčejné rezistory. Nejlevnější uhlíkové rezistory mají povolený příkon jen 0,25 W – a pokud třeba ke dvěma plochým bateriím zapojeným v sérii připojíme rezistor o odporu 100 Ω, nedivme se, že z něj začne stoupat sloupeček kouře. ($(9\text{ V})^2/100\ \Omega = 0,81\text{ W}$, a to je výrazně víc než čtvrtina wattu.) A pozor – od horkého rezistoru se můžeme snadno spálit!

3.2 Kde sehnat polovodiče a jak o nich získat informace

Chceme-li s polovodičovými prvky ve škole skutečně provádět pokusy a ne o nich jen teoretizovat, potřebujeme příslušné součástky získat „fyzicky“. V provedení přímo přizpůsobeném pro školní pokusy, tedy na malých panelech či v krabičkách, jsou samozřejmě dostupné u dodavatelů školních pomůcek. Jak jsme však již konstatovali výše, cena takových pomůcek je nemalá. V prodejnách elektronických součástek jsou přitom diody, tranzistory a další polovodičové prvky k dostání za částky v řádu jednotek korun – navíc v až neskutečně široké nabídce.

Aniž bychom zde chtěli dělat reklamu kterémukoli z těchto obchodů, můžeme odkázat například na webové stránky [6-8], kde lze získat bližší informace. Příslušní prodejci mají v Praze (a několika dalších velkých městech) „kamenné obchody“, kde lze součástky přímo zakoupit. Navíc samozřejmě provozují internetové obchody, kde si lze součástky vybrat a nechat zaslat.

Velmi příjemnou vlastností webových stránek [6-8] je skutečnost, že o nabízeném sortimentu součástek poskytují poměrně detailní informace. Odkazy vedou i na dokumentaci k jednotlivým součástkám poskytovanou jejich výrobcem.

V souvislosti s tím, kde a jak polovodičové a další součástky (rezistory a kondenzátory) sehnat, je vhodné se zmínit i o jejich **cenách**. Ty se samozřejmě mohou měnit a také mění, stručný přehled však může dát představu alespoň o jejich cenové úrovni v době, kdy vzniká tento text. Pro nákupy do škol je přitom vhodné upozornit na to, že v řadě případů je výhodné nekupovat součástky po jednotlivých kusech, ale raději po několika desítkách. Někdy jsou příslušné „množstevní slevy“ jen nevelké – ale například na [6] zjistíme, že při nákupu nejlevnějších rezistorů stojí jeden kus 2 Kč, zatímco při nákupu padesáti a více kusů od jedné hodnoty je cena jen 0,30 Kč za kus. Podobně výraznou slevu najdeme u levných usměrňovacích diod: při nákupu jednoho kusu nebo malého množství je cena 1 Kč za kus, při nákupu od padesáti kusů výše je cena za kus zhruba poloviční a při nákupu sto a více kusů méně než čtvrtinová. Bohužel takto pohádkové množstevní slevy už u jiných součástek většinou nenajdeme; přesto se nákup v množství „větším než malém“ často vyplatí.

Zůstaneme-li u nejlevnějších typů polovodičových součástek (a ty nám na pokusy ve škole bohatě vystačí), lze konstatovat, že cenová úroveň hlavních druhů součástek je dnes zhruba:

- Usměrňovací diody (s mezním proudem 1 A): cca 1 Kč, při nákupu více kusů i méně
- Zenerovy diody (s maximálním výkonem 1 W): něco málo přes 1 Kč
- Svítivé diody (běžné, s průměrem 5 mm): od jedné do několika Kč; tzv. „vysokosvítivé“ bývají poněkud dražší; UV LED stojí 10 až 15 Kč.
- Tranzistory („nízkovýkonové“): 1 až 2 Kč
- Rezistory a kondenzátory: desítky haléřů až jednotky korun

Možná trochu paradoxně tak budou nejdražšími prvky do našich pokusů a zapojení ploché baterie, z nichž je budeme napájet. (Obecně jsou samozřejmě drahé jakékoli mechanické prvky, například vypínače a přepínače, nijak levné také nejsou propojovací kabely a krokosvorky.)

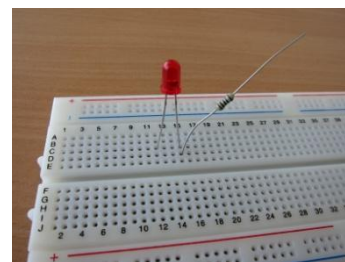
A kde o polovodičových prvcích získat potřebné informace, například údaje, jak velké napětí a proud vydrží? Jak už bylo řečeno, v dokumentaci, kterou poskytují výrobci. Tyto materiály bývají označovány jako **datasheets**. Odkazy na ně vedou ze stránek prodejců; můžeme je ale také jednoduše nechat vyhledat internetovým vyhledavačem. Zkuste zadat do Google například „BC547“ (typ tranzistoru, který budeme v našich konstrukcích využívat) – už mezi prvními odkazy několik „datasheetů“ najdete. Kopie „datasheetů“ několika součástek jsou k dispozici i na přiloženém CD.

3.3 Konstrukce a pomůcky pro realizaci pokusů

Jak jednotlivé součástky při pokusech propojovat? Možností je více. Nastíníme zde některé možné způsoby; na závěr kapitoly pak popíšeme osvědčenou konstrukci, která je přehledná a jednoduchá a kterou již úspěšně po léta využívá řada učitelů.

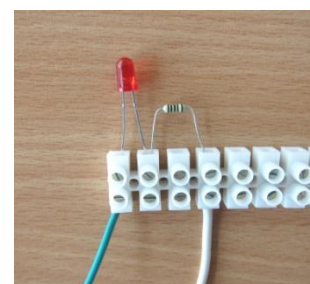
3.3.1 Možnosti, jak zapojovat obvody s polovodiči

I složitější zapojení se dají realizovat na „univerzálních propojovacích destičkách“ – v prodejnách se součástkami je najdeme pod názvem **nepájivá kontaktní pole**. Vývody součástek se do nich prostě zastrkávají, jak to ukazuje fotografie vpravo. (Na barevné fotografii v příloze na CD je to vidět lépe.) Výhodou je rychlost a univerzálnost. Ceny nepájivých kontaktních polí ovšem začínají zhruba od sta korun výše, takže nejde o nijak levné řešení.



Navíc může být zapojení na takovéto destičce trochu nepřehledné a destička se také hodí jen na zkušební konstrukce a ne na trvalé pomůcky.

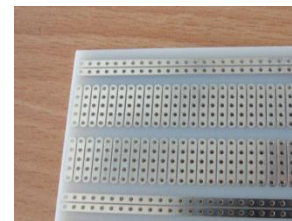
Před několika desítkami let, když byly součástky celkově robustnější a jejich vývody delší, bylo možno konstrukce zapojovat do „**lustrových svorkovnic**“; vývody součástek, případně přívodní dráty se prostě přichytily šroubkem. Tato „technologie“ byla popsána např. v knize [9], která je pěkným příkladem, jak se práce s polovodičovou technikou u nás pro mládež popularizovala už téměř před půl stoletím. Dnes bychom tento způsob mohli využít pro jednoduché obvody s LED nebo s usměrňovacími diodami – zapojení však také není příliš přehledné.



Způsob „**spojování za studena**“, v němž ke spojení součástek stačí dřevěná destička, menší hřebíky a případně kusy drátu, využívají ve svých konstrukcích někteří fyzikáři ze ZŠ případně kluby „mladých debrujárů“. Hřebíkem se udělá do destičky dírka, do ní se zasunou vývody a dráty, které chceme spojit, a hřebíkem (silněji zatlučeným) se vývody v dírce utěsní a propojí.

Výhodou je, že součástky lze na destičce rozmístit přehledně; velmi výhodná je samozřejmě skutečnost, že celá konstrukce je jednoduchá a levná. Při pečlivé práci je kontakt v jednotlivých spojích vcelku dobrý. Problémem může být, pokud chceme ke spoji přidat další drát či součástku. Hřebík lze samozřejmě vytáhnout a po vložení dalšího drátu do díry ho zase zatlouci; kvalitě spoje to však zjevně nepřidá. A otázkou je přece jen i dlouhodobá spolehlivost spoje, případně jeho kvalita při méně pečlivé práci.

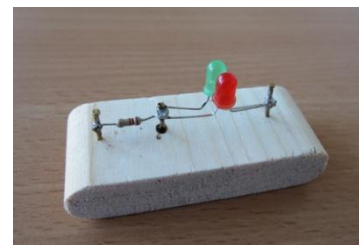
Máme-li páječku, můžeme samozřejmě součástky zapojovat například do **univerzálních destiček plošných spojů**. (Jsou k dostání v prodejnách s elektronickými součástkami.) Pro složitější konstrukce, či pro konstrukce, které mají mít malé rozměry, je to vhodný způsob. Ovšem přehlednost opět nemusí být největší a zapojování obvodů na těchto destičkách může být trochu „pipláčka“, pro niž je vhodné užívat



spíše páječku s malým hrotem. V obchodech s elektronickými součástkami jsou k dostání „pájecí stanice“ umožňující regulovat teplotu hrotu páječky. S nimi jde práce dobře od ruky, ovšem na většině škol asi nebudou příliš rozšířené. Běžněji dostupnými páječkami jsou **transformátorové páječky**, někdy zvané též „pistolové“. Ty umožňují pájet i silnější dráty případně malé hřebíčky, což právě využijeme v dále popsanych konstrukcích.

3.3.2 Konstrukce využitá v dále popsanych pokusech

Osvědčená „technologie“⁸ konstrukce obvodů využívá také dřevěné destičky (z měkkého dřeva, například smrkového) a mosazné hřebíčky, které jsou zatlučeny v místech, kde chceme spojit vývody součástek. Na mosazné hřebíčky jsou vývody připájeny. Hřebíčky tedy fungují jako *pájecí body*.



Proč *mosazné* hřebíčky? Protože se na ně dobře pájí. Mosazné hřebíčky jsou sice dražší⁹ a také měkčí, než železné, ale pájet na ně je mnohem snazší. Začínáme-li s nimi, je vhodné hřebíčky nejdříve pocínovat (tak, aby na nich byla jen tenká vrstvička cínu). Pokud se na ně cín nechytá, například proto, že jsou již trochu „zašlé“ (tedy zoxidované), čistíme je smirkem nebo jehlovým pilníčkem. Vývody součástek před pájením kolem hřebíčků omotáme, cín nemá být to jediné, co vývod a hřebíček drží u sebe. Návod „jak pájet – pro začátečníky“ lze nalézt například v příspěvku [12], kopii tohoto příspěvku najdete i na přiloženém CD.

Výhodou uvedené konstrukce je skutečnost, že rozložení součástek na destičce může odpovídat schématu. Celý obvod je pak velmi názorný. Konstrukce je jednoduchá, levná a dostatečně „robustní“, takže vytvořené pomůcky lze bez obav využít v běžné výuce. Fotografie vpravo ukazuje



⁸ Na Veletrhu nápadů učitelů fyziky byl tento způsob realizace obvodů představen již v roce 2000, viz [10]. Ukázku, jak jej lze využít i pro konstrukce s integrovanými obvody, lze najít na [11].

⁹ Současné ceny jsou nejméně 600,- Kč za kilogram – ovšem na druhé straně malý hřebíček váží asi 0,2 g, takže nestojí ani dvacet haléřů.

obvod, v němž tranzistorem spínáme proud do svítivé diody. Podrobněji se s ním seznámíme v kapitole 6.1.

K baterii, měřicím přístrojům a dalším součástkám (například žárovkám) můžeme takto vytvořené obvody připojit kablíky, které mají na konci malé krokosvorky. Takovéto kablíky jsou k dostání v prodejnách s elektronickými součástkami. Jsou v různých barvách (viz fotografie na přiloženém CD), což umožňuje přehlednější propojování obvodů. Ceny se u různých dodavatelů liší, většinou jsou v rozmezí 10 až 15 Kč za jeden kablík. Je ale třeba upozornit, že spojení měděného jádra kablíku (tvořeného mnoha tenkými licnami) s vlastní kovovou částí krokosvorky bývá provedeno prostým zmáčknutím kovových „paciček“ na krokosvorce. To je jistě pohodlné a laciné pro výrobce těchto spojovacích kablíků, ovšem tento kontakt nemusí být dlouhodobě zcela spolehlivý. Proto pozor – to, že kablíky opravdu vedou, je vhodné občas kontrolovat a vadné vodiče vyřadit. Navíc je třeba počítat s tím, že odpor těchto spojovacích vodičů nemusí být vždy zanedbatelný. Může mít hodnotu okolo 1 ohmu, což už při propojení žárovky s baterií může znamenat úbytek napětí v řádu desetin voltu. Proto pozor při měření – pokud byste chtěli demonstrovat například druhý Kirchhoffův zákon, je třeba s těmito úbytky počítat.

Pokud chcete spolehlivější spoje nebo pokud si budete chtít spojovací vodiče s krokosvorkami sami vyrobit (ceny příslušných krokosvorek jsou dnes okolo 4 Kč za kus), pak prostě měděnou žílu kablíku ke kovovému „tělu“ krokosvorky připájejte. Pozor, tělo krokosvorky je přitom potřeba páječkou dostatečně zahřát, aby se na něj cín dobře „chytal“.

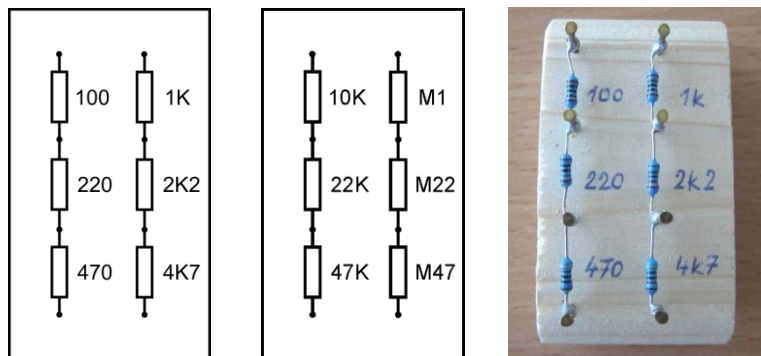


3.3.3 Příklad konstrukce: odporové „triády“

Příkladem pomůcky, kterou si uvedeným způsobem můžeme vyrobit a kterou budeme následně používat v mnoha pokusech, je skupina několika rezistorů na dřevěné destičce. Může sloužit k podobnému účelu, k jakému například ve fyzikálních praktikách (jež jsme asi všichni v nějaké formě absolvovali) sloužily *odporové dekády*: tedy k nastavení určité známé hodnoty odporu, například abychom omezili proud protékající nějakým obvodem.

V našem případě ale nepůjde o deset přesných rezistorů například po sto ohmech. Na školách musíme šetřit – a tak místo deseti rezistorů pro každý řád (např. pro stovky ohmů) použijeme rezistory jen tři. V analogii s názvem „odporové dekády“ tedy naši pomůcce můžeme říkat **odporové triády**, byť toto pojmenování není nijak oficiální. Odporovými triádami sice nebudeme moci nastavovat například proud v obvodu tak přesně jako odporovými dekádami, ale pokud nám půjde o měření v širším rozsahu hodnot, tak často stačí měnit proudy na zhruba dvojnásobek, polovinu apod. – a to již našimi triádami zvládneme.

Jak zvolit hodnoty odporu jednotlivých rezistorů? Tak, abychom obsáhli vždy celý příslušný dekadický řád, tedy například rozsah odporů od 100 Ω do téměř 1 kΩ. V našem případě jsme zvolili rezistory o odporech 100 Ω, 220 Ω a 470 Ω. Jejich poměry jsou tedy zhruba 2:1 (přibližně, odchylky nejsou větší než 10 %). První rezistor z další skupiny, 1 kΩ, bude mít opět hodnotu zhruba dvojnásobnou oproti poslednímu členu (470 Ω).



Odporové „triády“: schéma a realizace¹⁰

Podobně jako u odporových dekád, nemusíme ani u „triád“ zapojovat do obvodu jen jednotlivé rezistory. Sériovým spojením dvou rezistorů dostáváme (v řádu stovek ohmů) hodnoty 320 Ω, 690 Ω a 790 Ω. Další možnosti by přineslo paralelní spojování rezistorů: například paralelním spojením rezistorů 220 Ω a 470 Ω dostáváme asi 150 Ω. Ještě větší variabilitu přinese spojení rezistorů z různých řádů, například 1,22 kΩ dostaneme sériovým spojením rezistorů 1 kΩ a 220 Ω.

Chceme-li, můžeme vytvořit podobné pomůcky i pro vyšší a nižší hodnoty odporů. Pro nižší hodnoty, u nichž lze předpokládat vyšší proudy, je ovšem vhodné volit rezistory s vyšším povoleným výkonem. Například tak, jak to ukazuje fotografie vpravo; v tomto případě můžeme nastavovat hodnoty odporů asi od 2 Ω až do asi 86 Ω (při sériovém spojení všech rezistorů). To se může hodit například při proměřování charakteristik žároviček.



A proč vlastně odporové triády používat? K regulaci proudu bychom mohli používat školní reostaty. Ty ale nejsou levné a navíc často kontakt jezdců s odporovou dráhou nebývá zrovna nejspolehlivější. Triády sice neumožňují plynulou změnu odporu, ale jsou pomůckou velmi levnou, názornou (navíc si při nich můžeme mimochodem procvičit sériové případně paralelní spojování rezistorů) a umožňují nastavovat proudy v rozsahu mnoha řádů – což je právě to, co například při měření charakteristik polovodičových součástek potřebujeme.

¹⁰ Pro označování hodnot odporů zde užíváme způsob běžně užívaný ve schématech: například 220 znamená 220 Ω, 1K znamená 1 kΩ, 4K7 znamená 4,7 kΩ, 47K pak 47 kΩ. Místo 100 kΩ, tj 0,1 MΩ píšeme M1, místo 0,22 MΩ pak M22.

4. Diody

Pro první pokusy s diodami si zvolíme svítivé diody. Důvodem je skutečnost, že jejich funkce je velmi názorná: to, že proud prochází v propustném směru, nemusíme nijak měřit ani zprostředkovaně zjišťovat, prostě vidíme, že LED svítí. Ostatně, jakmile něco svítí, bliká či houká, je to pro naše žáky, a vlastně i pro nás, výrazně zajímavější, než když máme na správnou funkci usuzovat jen z údajů měřicích přístrojů. Řadu pokusů a pomůcek zde uvedených proto můžeme využít i na úrovni ZŠ.

Protože se ale budeme chtít s vlastnostmi LED seznámit i podrobněji, začneme s pokusy, které zahrnují měření. Následně pak přejdeme jednak k tvorbě jednoduchých pomůcek a obvodů, ale také k měření na dalších typech diod.

Poznamenejme, že pracovní listy a návody ke zde uvedeným pokusům a aktivitám jsou uvedeny na příloženém CD – proto na následujících stránkách bude v některých případech jejich popis stručnější a bude mít spíše formu souvislého textu, než návodů striktně strukturovaných do oddílů typu Pomůcky, Popis experimentu, Výsledky a podobně. Na doprovodném CD najdete i barevné fotografie některých pokusů a konstrukcí, které vám mohou pomoci při jejich realizaci.

4.1 Začínáme s LED

Že svítivá dioda svítí, když jí prochází proud, není nijak překvapující. Abychom se blíže seznámili s tím, jak velký proud to má být, jak zajistit, abychom LED nepřetížili a abychom poznali její základní vlastnosti, proměříme si alespoň přibližně její charakteristiku.

4.1.1 Přípravný pokus: charakteristika rezistoru

Než začneme měřit charakteristiku LED, proměříme nejprve charakteristiku součástky, u níž je nám jasné, jaký bude výsledek, tedy charakteristiku rezistoru. K měření budeme potřebovat „neznámý rezistor“ (vhodný je rezistor o odporu např. 330 Ω nebo 390 Ω), dva multimetry (jeden využijeme jako voltmetr, druhý jako ampérmetr), „odporovou triádu“ (viz kap. 3.3), propojovací vodiče s krokosvorkami a plochou baterii nebo jiný zdroj malého stejnosměrného napětí.

Úkolem je proměřit napětí na „neznámém rezistoru“ při různých proudtech.

Zjištěné hodnoty je třeba zapsat do tabulky a nakreslit graf závislosti napětí a proudu.

(Viz pracovní list na příloženém CD.)

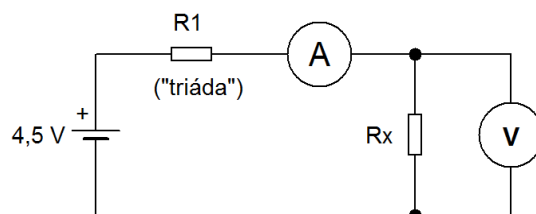
V pracovním listu záměrně není vyplněno záhlaví tabulky ani osy grafu. Toto vše by si měli žáci doplnit sami¹¹. V této „startovací aktivitě“ je příležitost se žáky diskutovat, co do záhlaví tabulky

¹¹ Právě tak pracovali s pracovními listy i učitelé na kurzech, které jsme při různých příležitostech pořádali.

napsat, jaké veličiny mají být na osách grafu, jak zvolit měřítka apod. Cílem je, aby při dalších měřeních již tyto věci sami volili a zapisovali a zakreslovali rozumně, aniž by je jen bezhlavě kopírovali či opisovali z nějakých návodů. Samozřejmě je možné volit i počítačové zpracování výsledků třeba v Excelu nebo následně využívat počítačem podporované měření pomocí dataloggerů (Vernier, Pasco, ISES apod.). Vždy je však potřeba, aby žáci a studenti věděli, co opravdu dělají. A dobrým tréninkem pro to je přece jen „klasické ruční měření“ a zapisování hodnot. Při něm se navíc můžeme zamyslet nad tím, zda naměřené hodnoty „dávají smysl“, zda nejsou mimo vhodný rozsah apod. Potřebujeme-li měřit více hodnot, opakovat měření podobných charakteristik pro více různých typů diod apod., je přirozené nasadit například výše uvedená počítačem řízená měření.

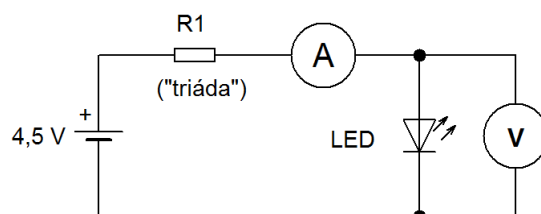
V pracovním listu též záměrně není nakresleno schéma zapojení, v němž budeme charakteristiku měřit; je pro něj jen volné místo. Schéma zapojení by měli vymyslet (či někde najít, vzájemně prodiskutovat apod.) sami žáci a do pracovního listu si ho pak zakreslit. Opět je věcí učitele, jak při tom (v daných časových a prostorových podmínkách, v závislosti na typu třídy apod.) své žáky povede.

Schéma zapojení je samozřejmě jednoduché, viz obrázek vpravo.¹² Procházející **proud měníme změnou sériového rezistoru R1** – zde můžeme využít naše „odporové triády“. Je-li zdrojem plochá baterie 4,5 V, můžeme měnit proud asi od 0,7 mA do skoro 10 mA. Výsledná charakteristika, tedy závislost napětí na proudu (nebo proudu na napětí¹³) je samozřejmě lineární, viz příklad zpracování výsledků na přiloženém CD.



4.1.2 Charakteristika LED

Když jsme si na rezistoru nacvičili měření charakteristiky, naprosto stejně můžeme proměřit charakteristiku svítivé diody. Nejdříve použijeme **červenou LED**. Půjde o její charakteristiku *v propustném směru*. V závěrném

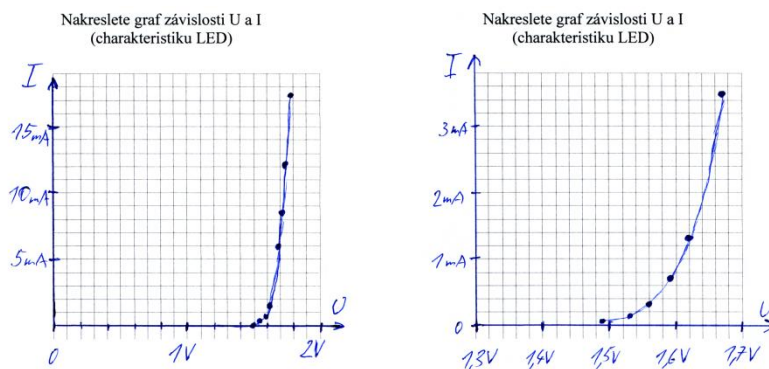


směru, jak se můžeme přesvědčit, proud svítivou diodou prakticky neprochází. Při měření můžeme na místo R1 zapojit i rezistory z „triády“ s hodnotami odporů 10 kΩ až 470 kΩ. Tím proměříme charakteristiku i při podstatně nižších proudech, od hodnot kolem 10 μA.

¹² S hloubavějšími žáky a studenty lze přitom diskutovat, že vnitřní odpor voltmetru je zde vlastně připojen paralelně k „neznámému rezistoru“, to znamená, že ovlivňuje proud procházející obvodem a měřený ampérmetrem. Naštěstí vnitřní odpor běžných multimetrů na napětěovém rozsahu bývá 10 MΩ (u některých nejlevnějších typů je to 1 MΩ), což je mnohem více, než zvolený odpor „neznámého rezistoru“, takže měření prakticky neovlivní. To je ostatně důvod, proč jsme odpor „neznámého rezistoru“ zvolili v řádu stovek ohmů. Kdybychom jej zvolili třeba 1 MΩ, voltmetr už by do měření vnášel chybu 10 %. (Pro nejlevnější multimetry s vnitřním odporem 1 MΩ by chyba byla dokonce 50 %.)

¹³ Závislost proudu na napětí, $I = I(U)$, je obvykle nazývána *voltampérová charakteristika*. V našem případě je však vlastně veličinou, kterou řídíme, proud, takže můžeme nakreslit i graf závislosti $U = U(I)$. Strmost příslušné křivky je v tomto případě rovna přímo odporu neznámého rezistoru R_x . Oba grafy poskytují stejnou informaci.

Výsledkem je výrazně nelineární charakteristika, jak ukazují následující grafy. Záměrně zde ukazujeme „kostrbaté“ grafy, tak jak je žáci mohou nakreslit do pracovního listu. Oba grafy zachycují totéž měření, jen měřítka na osách jsou různá.



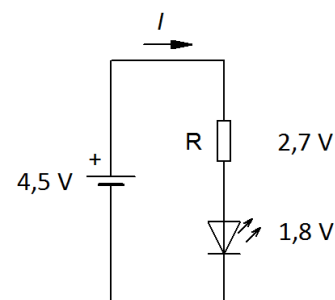
Nyní jde o to, jak výsledek interpretovat. V pracovním listu jsou k tomu uvedeny následující otázky:

- Jaké je typické napětí na LED?
- Co jsme se o LED dozvěděli?
- Jaký odpor je vhodné připojovat do série s LED?

Pojem „typické napětí“, který je zde uveden, je záměrně značně vágní, nejde o žádný přesně definovaný termín. Přesto však má svůj význam. Můžeme jím označit napětí na LED při proudu, při němž LED již dostatečně silně svítí. Tento proud bývá v rozsahu 10 až 20 mA; příslušné napětí na červené LED bývá asi 1,6 až 1,8 V.

Co jsme se z našeho měření dozvěděli o svítivé diodě? To, že vede proud v jednom směru. Že její charakteristika je výrazně nelineární. Že se červená LED „snaží na sobě udržet“ napětí o něco nižší než 2 V. Že výrazně svítí při proudu 10 až 20 mA. A co bývá nejnápadnější pro žáky? Jednoduchý fakt související s nelinearitou charakteristiky: skutečnost, že do napětí asi 1,5 V neprochází červenou svítivou diodou téměř žádný proud.

Z uvedených zjištění mimo jiné vyplývá, že **LED nemůžeme připojit přímo k ploché baterii**. Při vhodném *pracovním proudu* (ten bývá u většiny malých LED právě 20 mA) je na LED napětí jen asi zmíněných 1,8 V; plochá baterie má napětí asi o 2,7 V vyšší. Toto napětí musíme nějak „srazit“, například rezistorem o vhodném odporu. Jak ukazuje obrázek, výpočet hodnoty odporu je vlastně jednoduchým cvičením na Ohmův zákon. Na rezistoru potřebujeme srazit napětí asi $U_R = 2,7 \text{ V}$, proud má být $I = 20 \text{ mA}$. Hodnota rezistoru tedy vychází $R = U_R/I = 2,7 \text{ V}/2 \cdot 10^{-2} \text{ A} = 135 \Omega$. Reálně to znamená, že můžeme použít rezistor o odporu 150 Ω nebo 120 Ω . Hodnota proudu svítivou diodou nebude přesně 20 mA, ale to ani nepotřebujeme. (Při použití rezistoru o odporu 120 Ω bude sice proud poněkud vyšší, zejména při „čerstvé“ ploché baterii, ale LED to vydrží, při mírně vybité baterii bude už proud nižší.) Podobně bychom vypočetli odpor sériového rezistoru pro baterii o napětí 3 V nebo jiném.



4.1.3 Další měření na LED – od kvalitativního popisu až po stanovení Planckovy konstanty

V pracovních listech na CD najdete náměty na další úkoly. Stejně jako jsme to dělali výše, lze měřit charakteristiku a stanovit „typické pracovní napětí“ pro svítivé diody různých barev: žluté, zelené, modré, a také infračervené (IR) a „ultrafialové“ (UV).

Výsledkem je zjištění, že toto napětí roste, jak postupujeme od IR přes červenou, žlutou, zelenou a modrou až k UV LED. Zajímavé je také změřit napětí, při němž dané diody začínají pozorovatelně svítit (to většinou bývá při dosti malých proudech – u IR diody, kdy svit nevidíme, nastavíme podobný proud jako o ostatních LED, když začínají svítit). Samozřejmě toto napětí nestanovíme úplně přesně, bývá o několik desetin voltu nižší než „typické pracovní“.

Příklady hodnot napětí, které můžeme naměřit, uvádí následující tabulka. Jsou v ní uvedeny i přibližné hodnoty vlnových délek emitovaného záření. Jde o vlnové délky, na nichž LED září nejintenzivněji, šířka příslušných „píků“ bývá několik desítek nanometrů; proto je uvedená hodnota spíše orientační. Vlnová délka závisí také na konkrétním typu LED – pro přesnější úvahy a výpočty byste ji pro vaše konkrétní součástky mohli zjistit měřením jejího spektra.

Hodnoty napětí naměřené na LED při „standardním svitu“ (U_{prac}) a při velmi malém proudu, kdy LED právě začíná viditelně svítit (U_0):

LED	λ nm	$\frac{U_{\text{prac}}}{V}$	$\frac{U_0}{V}$
IR	940	1,3	0,95
červená	640	1,8	1,5
žlutá	590	2,1	1,6
zelená	550	2,3	1,8
modrá	440	3,0	2,4
UV	400	3,5	2,7

Na kvalitativní úrovni lze dané chování LED pochopit vcelku jednoduše. Od IR přes červenou až k modré a UV klesá vlnová délka emitovaného záření – to znamená, že roste jeho frekvence a tedy i energie fotonů daného záření. Energie se získává na úkor toho, že elektrony v LED procházejí rozdílem potenciálů – což je napětí na diodě. Větší energie vyžaduje větší napětí. Proto je na UV a modré LED vyšší napětí, než na červené. IR záření infračervené svítivé diody má nejmenší energii, proto této LED stačí nejnižší napětí.

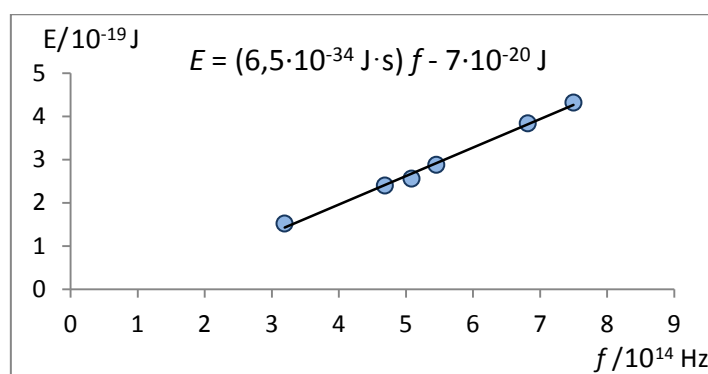
Celou úvahu lze dotáhnout i kvantitativně a z výsledků měření dokonce alespoň přibližně určit i hodnotu Planckovy konstanty h .

Elektron (jehož náboj je $-e$, kde $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C) projde rozdílem potenciálů rovným napětí U na diodě. Tím získá energii $E = e \cdot U$. Část energie má navíc díky tomu, že teplota LED není někde blízko absolutní nuly, ale tyhle detaily zatím pomineme.

Energie fotonu je $E_f = h \cdot f$. (Zde $f = c/\lambda$ je frekvence záření, kde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla a λ je vlnová délka záření.) Kombinací uvedených vztahů získáme $h \cdot f = e \cdot U$, resp.

$$h \cdot f = e \cdot U + \text{konst.},$$

kde konstanta vystihuje právě „dodatečnou“ energii elektronů danou teplotou látky případně dalšími mechanismy. (Viz poznámky v pěkném výkladu [13].) Ze směrnice grafu $E = E(f)$ zkonstruovaného z naměřených dat lze pak určit Planckovu konstantu. Níže uvedený výsledek dává až „podezřele dobrou“ hodnotu – odchylka 10-15 % od tabulkové hodnoty by nás při našem jednoduchém měření neměla překvapit.

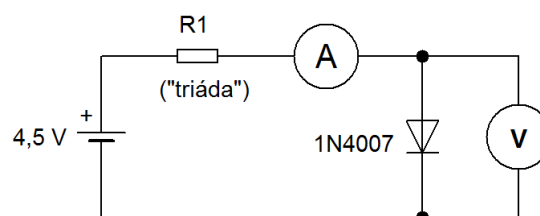


4.2 Usměrňovací diody a jejich využití

Základní pokus s běžnou křemíkovou usměrňovací diodou asi ani nemá cenu připomínat: Diodu zapojíme do série s baterií a žárovčkou a ověříme, že proud prochází jen v jednom směru. Můžeme použít nejlacinější typ, např. kterýkoli z řady 1N4001 až 1N4007. Typ 1N4007 vydrží největší závěrné napětí a stojí stejně jako ty ostatní, není tedy důvod nepoužít právě tuto diodu.



Podobně, jako jsme zkoumali charakteristiku svítivé diody, můžeme proměřit charakteristiku běžné křemíkové usměrňovací diody. Proud můžeme nastavovat v rozmezí od jednotek či desítek mikroampérů do desetin ampéru¹⁴. Naměřené hodnoty opět vyneseme do tabulky a můžeme je zakreslit do grafu.

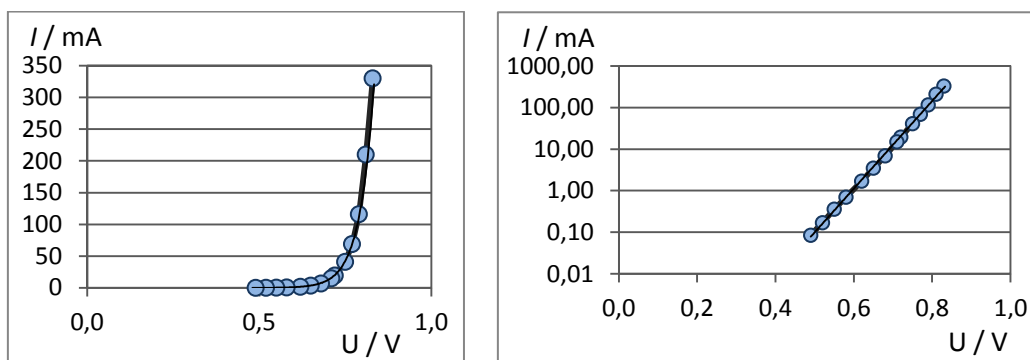


¹⁴ Do přívodu od baterie je vhodné dát „ochranný rezistor“ o odporu například $4,7 \Omega$, který by omezil proud v případě, že bychom nechtěně na „triádě“ zkratovali vodiče. Nejde jen o ochranu diody, ale hlavně o to, abychom nepřepálili pojistku v proudovém rozsahu multimetru.

Pro to, abychom se nad výsledkem zamysleli, je v pracovním listu uvedena otázka:

- Jaké je "typické" napětí na diodě v propustném směru?

Z voltampérové charakteristiky diody (tentokrát prezentované jako graf vykreslený v Excelu, viz graf na obrázku níže vlevo) můžeme odhadnout, že napětí na diodě při proudu řádů desítek a stovek miliampér je asi 0,7 až 0,8 V, pro vyšší proudy o trochu více. Úbytek napětí na křemíkové diodě například při jejím použití v usměrňovači je tedy necelý jeden volt. (Poznamenejme, že u diod pro usměrňování velkých proudů to může být o něco více než 1 V.)



Voltampérová charakteristika křemíkové usměrňovací diody:

vlevo běžně uváděný graf, vpravo graf, v němž jsou proudy vynášeny v logaritmické škále

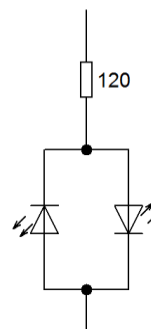
Na druhou stranu, charakteristika vlastně nemá žádný ostrý „zlom“ v tom smyslu, že pro nižší napětí by neprocházela vůbec žádný proud a až od určitého napětí by začal růst. Dobře je to vidět, pokud na svislé ose zvolíme logaritmické měřítko. (Takto bychom si mohli s grafy hrát s matematictější orientovanými studenty v nějakém volitelném semináři.) Tento výsledek souvisí s tím, co pro závislost $I = I(U)$ pro polovodičovou diodu předpovídá teorie. Z té vychází, že daná závislost je exponenciální, resp. že má tvar $I = I_0 \cdot (\exp(U/U_T) - 1)$, kde U_T je konstanta.

Na pracovním listu na přiloženém CD najdete náměty i na další úkoly. Například:

Usměrnit diodou střídavé napětí (asi 4 V, z transformátorku nebo z rozvodu nízkého napětí, pokud jej v učebně máte). Porovnat jas žárovčky napájené přímo a přes diodu a vysvětlit výsledek. (Při zapojení přes diodu je svit slabší, protože žárovčka svítí jen v půllnách střídavého napětí, které dioda propustí.)

4.3 Jednoduchá zapojení s diodami a LED

Na dřevěných destičkách si pomocí mosazných hřebíčků a pájení můžeme vytvořit další užitečné pomůcky. Snad nejjednodušší je „zkoušečka“ se dvěma LED různých barev (červená a zelená) zapojenými „antiparalelně“ se sériově zapojeným rezistorem, jak to ukazuje schéma a fotografie vpravo.

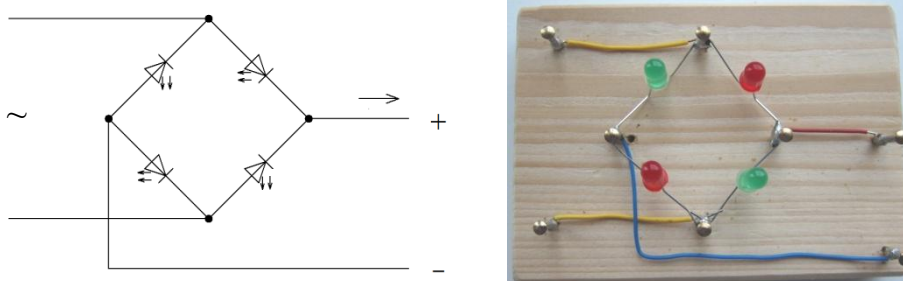


Ač velmi jednoduchá, umožňuje například:

- Indikovat napětí asi od 2 V do 5 V.
- Indikovat proudy od zlomku miliampéru do asi 20 mA.
- Indikovat polaritu napětí.
- Indikovat střídavé napětí.
- Při napájení střídavým napětím s frekvencí 50 Hz a rychlém pohybu ukázat, že se polarita napětí střídá (a demonstrovat setrvačnost oka).

Přidáme-li na společnou destičku s LED a rezistorem plochou baterii, vznikne zkoušečka, která má ještě širší použití – viz materiál [12], který najdete i na příloženém CD.

Zajímavou pomůckou je **můstkový usměrňovač ze svítivých diod**.



Pokud na vstup usměrňovače přivedeme nízké střídavé napětí (např. 6 až 9 V) a jeho výstup zatížíme například výše popsanou jednoduchou zkoušečkou, budou v můstkovém usměrňovači svítit všechny LED. Zkoušečka ukáže, že na výstupu je už napětí jen jedné polarity. Detailněji můžeme funkci můstkového usměrňovače demonstrovat tak, že na jeho vstup přivedeme napětí 9 V, například ze dvou sériově spojených plochých baterií¹⁵. Změnou polarity napětí na vstupu „simulujeme“ střídavé napětí a vidíme, při které polaritě které diody vedou.

Podobných pomůcek bychom mohli vytvářet více. Můžeme třeba vytvořit jednoduchý stabilizátor napětí, na němž lze demonstrovat princip funkce a využití dalšího typu diody: *Zenerovy diody*.

4.4 Zenerovy diody: stabilizace napětí

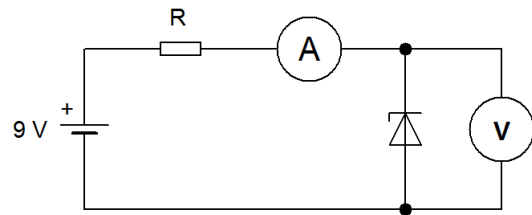
Pro následující pokusy můžeme použít Zenerovy diody s malým výkonem, například řady BZX83. Při nákupu není podstatné požadovat určitou značku Zenerovy diody, stačí chtít typ s výkonem do 1 W a vybrat si napětí, „na které má dioda stabilizovat“, tzv. *Zenerovo napětí*.

Naprosto stejně, jako jsme to dělali u běžných usměrňovacích diod, můžeme i u Zenerových diod proměřit charakteristiku v propustném směru; dostaneme i podobné výsledky. Zajímavá ale je

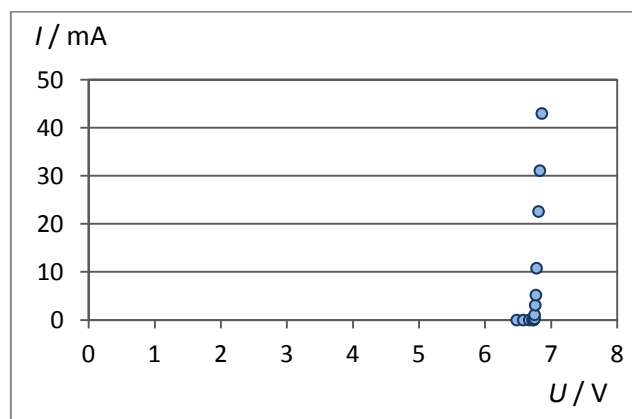
¹⁵ Jedna plochá baterie nestačí. V zapojení jsou celkově v sérii dvě LED v můstkovém usměrňovači a jedna LED ve zkoušečce. V součtu potřebná napětí na LED dávají víc než 5 V.

charakteristika Zenerovy diody v *závěrném směru*.

Měříme ji opět v podobném zapojení jako pro propustný směr, pro diody s vyšším Zenerovým napětím ovšem musíme volit vyšší napětí baterie (musí být vyšší než Zenerovo napětí, jinak bychom nic zajímavého neměřili). Pro naše pokusy můžeme použít diodu se Zenerovým napětím 3 V, pak jako zdroj stačí plochá baterie. Výraznější stabilizační efekt však mají spíše diody s vyšším Zenerovým napětím, například 6,2 V nebo 6,8 V, pak náš obvod budeme napájet ze dvou plochých baterií v sérii. Sériové odpory volíme tak, aby se proud pohyboval od několika μA do asi 50 mA.



Charakteristika Zenerovy diody v *závěrném směru* ukazuje, že v širokém rozsahu proudů na sobě dioda „drží“ téměř konstantní napětí:



Proudy se přitom pohybují v desítkách miliampér. Maximální velikost proudu, který můžeme nechat Zenerovou diodou protékat, je přitom omezena povoleným výkonem: Je-li na diodě napětí 6,8 V, pak při protékajícím proudu 50 mA se na ní „ztrácí“, tedy přeměňuje na teplo, výkon $P = U \cdot I = (6,8 \text{ V}) \cdot (0,05 \text{ A}) = 0,34 \text{ W}$. Máme tedy ještě rezervu, s proudem lze jít až do asi 70 mA. (Zenerovy diody výše uvedené řady mají povolený výkon 0,5 W.)

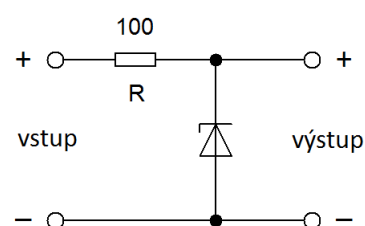
Jak vidno, máme zde ve výuce příležitost pro zopakování vztahu mezi napětím, proudem a výkonem. Při reálném experimentu ale nesmíme zapomenout, že při proudech blízkých maximu bude dioda značně zahřátá, takže pozor při dotyku. A navíc daný výkon vydrží, jen pokud je dostatečně chlazena okolním vzduchem a odvodem tepla jejími vývody. Pokud bychom ji dali do stísněného prostoru, obalili nějakou izolací, popřípadě provozovali za horkého dne na poušti, mohli bychom ji zatěžovat jen nižším výkonem. To ostatně platí i pro jiné druhy polovodičových součástek¹⁶.

¹⁶ V dokumentaci k polovodičovým součástkám bývá uváděna hodnota *tepelného odporu*. V zásadě jde o to, o kolik kelvinů se zvýší teplota PN přechodu v dané součástce, když se na ní přemění na teplo určitý výkon. Hodnota tepelného odporu se tedy vyjadřuje v K/mW nebo v K/W. Například pro námi použité Zenerovy diody uvádí katalog tepelný odpor 0,3 K/mW a povolenou teplotu přechodu 175 °C. Při výkonu 500 mW je tedy teplota přechodu o 150 stupňů vyšší než teplota okolí (v daném případě teplota přívodů, jimiž se zřejmě odvádí nejvíce tepla). Pro teplotu okolí 25 °C dostáváme teplotu přechodu právě 175 °C. Z uvedených údajů můžeme spočítat povolený výkon při jiných teplotách okolí.

Dodejme ještě jednu poznámku k Zenerovu napětí. I když je pro daný typ diody uvedeno například 6,8 V, neznamená to, že ve skutečnosti je na diodě právě tolik a ani o milivolt více nebo méně. Výrobce zaručuje Zenerovo napětí jen s určitou tolerancí – pro daný typ například od 6,4 V do 7,2 V. Navíc s rostoucím proudem napětí na Zenerově diodě mírně stoupá. (Přírůstek napětí dělený přírůstkem proudu bývá označován jak *dynamický odpor* Zenerovy diody – čím je menší, tím lépe dioda stabilizuje napětí.) A jako většina parametrů polovodičových součástek Zenerovo napětí závisí také na teplotě. (V případě „naší“ diody stoupá o asi 0,05 % při růstu teploty o 1 stupeň; i tento údaj má ale určitý rozptyl, katalog uvádí rozmezí 0,03 % až 0,07 %. Upozornění: Tento efekt se projeví i při měření charakteristiky Zenerovy diody. Při zahřátí napětí na diodě stoupá až o 0,2 V.)

Jak tedy Zenerovu diodu zapojit, aby fungovala jako **stabilizátor napětí**?

V zásadě půjde o stejné zapojení, jako když jsme měřili její charakteristiku v závěrném směru. Hodnota rezistoru, uvedená ve schématu zapojení, vyhoví pro zmíněnou Zenerovu diodu (se Zenerovým napětím 6,8 V) pro vstupní napětí v rozsahu asi 8 V až téměř 14 V. Rezistor však nestačí miniaturní s povoleným výkonem 0,25 W, protože se na něm může měnit v teplo i více než 0,5 W. Použijeme tedy raději typ s povoleným výkonem 1 W.



Pro jiné hodnoty vstupního a výstupního napětí musíme potřebnou velikost odporu a jeho výkonové zatížení vypočítat.

Jak uvedený jednoduchý stabilizátor funguje? Pracovní list na přiloženém CD popisuje, jak se s jeho funkcí seznámit pomocí pokusů: při změně napětí na vstupu sledujeme, jak se mění napětí na výstupu. Také můžeme sledovat, jak se výstupní napětí mění při změně proudu odebíraného na výstupu.

Vysvětlení funkce stabilizátoru je v zásadě jednoduché a vlastně jsme ho již řekli. Zenerova dioda na sobě „drží“ téměř konstantní napětí v širokém rozsahu protékajících proudů. Podívejme se nejprve na situaci, kdy z výstupu stabilizátoru neodebíráme prakticky žádný proud (třeba zde jen měříme napětí voltmetrem). Je-li na vstupu stabilizátoru 8 V a na diodě asi 6,8 V, zbývá na odpor R napětí 1,2 V. Podle Ohmova zákona jím tedy teče proud 12 mA. Tento proud také protéká Zenerovou diodou. Jestliže napětí na vstupu stabilizátoru zvýšíme dejme tomu na 12 V, je na Zenerově diodě stále jen necelých 7 V. Na odpor R tedy zbývá napětí asi 5 V a teče jím tedy proud přibližně 50 mA. Tento proud opět protéká i Zenerovou diodou. Protože napětí na Zenerově diodě při proudech 12 mA a 50 mA se téměř neliší (jen asi o 0,1 V), zůstává napětí na výstupu stabilní. (Pozn.: Náš stabilizátor je spíše „modelový“, při vyšších vstupních napětích už se Zenerova dioda dost zahřívá; za zvážení stojí použít diodu s povoleným výkonem 5 W.)

Odebíráme-li z výstupu stabilizátoru nějaký proud, pak se o příslušnou hodnotu sníží proud protékající Zenerovou diodou. Napětí na ní se o něco sníží, ale jen nepatrně – opět zde máme stabilizující efekt. Nesmíme ovšem odebírat tolik proudu, že by na Zenerovu diodu nic nezbylo! Pak by samozřejmě uvedený obvod nestabilizoval vůbec. (Dodejme, že stabilizátory, které mají

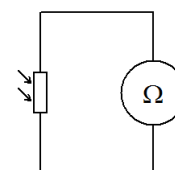
dodávat vyšší proudy, užívají poněkud složitější zapojení. Dnes jsou dostupné ve formě integrovaných obvodů.)

5. Fotorezistory a termistory

Pro jednoduché pokusy s fotorezistory a s termistory vystačíme s multimetrem, který přepneme do funkce ohmmetru. V některých případech bychom pro indikaci proudu protékajícího těmito součástkami mohli využít také LED (například „zkoušečku“ popsanou výše v kap. 4.3) nebo baterii a žárovičku.

Fotorezistory

Již na úrovni ZŠ lze jednoduše zkoumat kvalitativní závislost odporu fotorezistoru na osvětlení. Prostým zakrýváním a odkrýváním fotorezistoru nebo jeho osvětlením slunečním světlem či lampou zjistíme, že s rostoucím osvětlením odpor fotorezistoru klesá.

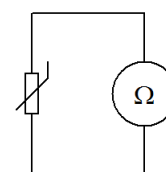


Závislost je velmi výrazná. Fotorezistory lze přitom užívat jak pro velmi nízké úrovně osvětlení (jsou schopny detekovat měsíční svit), tak pro velmi vysoké (nasmícení sluncem). Například fotorezistor VT83N2 má ve tmě zaručený odpor vyšší než 500 kΩ, při osvětlení 10 luxů již jeho odpor klesá typicky na 28 kΩ; při nasvícení sluncem můžeme naměřit odpor v řádu pouhých ohmů.

Náročnější úlohou pro zájemce by bylo proměřit závislost odporu fotorezistoru na osvětlení a mít pak vlastně k dispozici měřič osvětlení.

Termistory

Odpor termistorů s negativním teplotním koeficientem (NTC) s teplotou klesá. Jde o nelineární závislost, která je poměrně složitá (uvádí se pro ni vztah $R = A \cdot \exp(\beta/T)$, kde A a β jsou konstanty a T je absolutní teplota). V malém rozmezí teplot ji lze přibližně linearizovat – pak se uvádí, že v určitém rozsahu teplot odpor určitého typu termistoru klesá například o 4,5 % na kelvin (resp. na stupeň Celsia).



Kvalitativně můžeme změnu odporu termistoru demonstrovat tak, že jej prostě zahřejeme v prstech. Pro výraznější změnu odporu jej můžeme také lehce nahřát páječkou (jeho vývody, ne se snažit „utavit“ jeho pouzdro!).

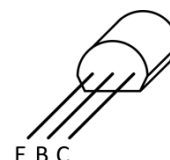
Náročnější laboratorní práce může zahrnovat proměření závislosti odporu na teplotě. Tak vlastně žáci mohou vyrobit jednoduchý teploměr, viz [14]. Pro matematictější zaměřené žáky a studenty by taková úloha mohla být příležitostí k diskusím, jak naměřenými hodnotami prokládat vhodnou závislost, jak a v jakém rozsahu lze závislost linearizovat, apod. Ti, kdo se takovými úvahami nechťejí zatěžovat, prostě mohou hodnotu teploty k danému odporu hledat a interpolovat v tabulce naměřených hodnot.

6. Tranzistory

V této kapitole se budeme až na malou výjimku v části 6.5 věnovat bipolárním tranzistorům. Omezíme se přitom na tranzistory typu NPN¹⁷. Budeme využívat běžné tranzistory pro nízké výkony, konkrétně typy BC547 a BC337. Oba mají maximální napětí kolektoru proti emitoru 45 V, takže bez problémů vydrží napájecí napětí, i kdybychom naše pokusné obvody napájeli z několika plochých baterií v sérii. Co se maximálního výkonu týče, není nijak závažný (protože jde o tranzistory v plastových pouzdech, ta nejsou uzpůsobena k nějakému zvláštnímu chlazení): BC547 má povolený výkon 0,5 W, BC337 jen o málo více: 0,625 W.

Rozdíl je v **maximálních kolektorových proudech**: BC547 má povolený proud jen 100 mA. Stačí tedy k ovládní proudu do LED, ale ne třeba už do žárovíčky. Pro spínání proudu do žárovíček budeme používat tranzistory BC337, ty mají povolen proud až do 800 mA.

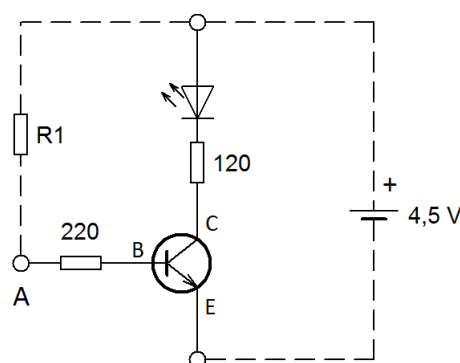
Jak poznat který vývod tranzistoru je který? U uvedených typů (a u řady dalších¹⁸) **při pohledu ze strany vývodů** a je-li plochá strana pouzdra dole, jdou za sebou zleva doprava emitor, báze a kolektor.



S vlastnostmi tranzistorů se, jak jinak, budeme seznamovat prostřednictvím jednoduchých pokusů. Pracovní listy jsou k dispozici na přiloženém CD.

6.1 Tranzistor jako spínač

Nejprve si vyzkoušíme, jak lze malým proudem do báze spínat výrazně větší proud v kolektoru tranzistoru. Jednoduchý obvod podle schématu můžeme opět postavit na dřevěnou destičku. Čárkovaně jsou ve schématu vyznačeny součástky, které budeme k obvodu připojovat zvenku: baterie a rezistor R1. Rezistor 220 Ω má v obvodu jen ochrannou funkci: pokud svorku A spojíme přímo s + pólem baterie, omezí proud tekoucí do báze tranzistoru.



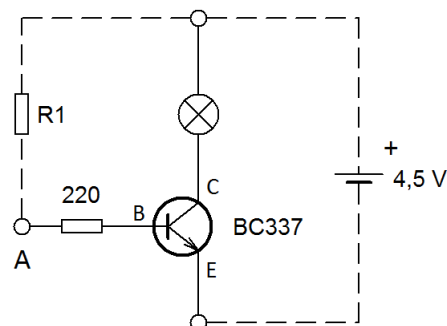
Jak na tomto zapojení budeme demonstrovat funkci tranzistoru jako spínače? Víme, že LED září plným jasnem, když ji přes rezistor o odporu 120 Ω připojíme přímo k baterii, například když v uvedeném zapojení zkratujeme, tedy vodivě spojíme, kolektor a emitor tranzistoru. Tranzistor toto vodivé spojení („zkrat“, či spíše řečeno sepnutí) může zařídit také – pokud do jeho báze pustíme dostatečný proud. Ten přitom bude mnohem menší, než proud kolektorem. Vyzkoušejte, při jak velkém připojeném rezistoru R1 svítí LED ještě plným jasnem!

¹⁷ V dále uváděných pokusech a obvodech by samozřejmě šlo využívat i tranzistory PNP; prakticky by to znamenalo jen otočit polaritu napájecího zdroje.

¹⁸ Pozor, ne u všech! U neznámých typů tranzistorů si pořadí jejich vývodů vždy ověřte v dokumentaci.

Na místě rezistoru R1 můžeme vyzkoušet rezistory z naší odporové triády o odporech řádově desítky kiloohmů. LED obvykle jasně svítí i při hodnotě R1 rovné 47 kΩ. Pokud bychom ji přes takovýto rezistor napájeli přímo z baterie, její svit bychom sotva postřehli. Opravdu tedy malým proudem do báze spínáme výrazně větší proud v kolektoru¹⁹.

Místo LED může být v kolektorovém obvodu žárovka; vhodný je typ 3,5 V/0,2 A nebo 0,3 A. Ke spínání již musíme použít tranzistor BC337, který snese vyšší proud. (Nejvhodnější je typ BC337-40, pro ten stačí k sepnutí nejnižší proud do báze.) Žárovka jasně svítí, i když R1 má odpor jednoho či několika kiloohmů. Změříme-li přitom napětí mezi emitorem a kolektorem tranzistoru, zjistíme, že je jen několik málo desetin voltu. Tranzistor je tedy opravdu „sepnut“. (Říkáme také, že je „otevřený“, při techničtějším vyjadřování se užívá termínu *v saturaci*. O napětí mezi emitorem a kolektorem pak v tomto případě mluvíme jako o *saturačním napětí*.) Napětí mezi emitorem a bází je přitom asi 0,6 až 0,7 V.



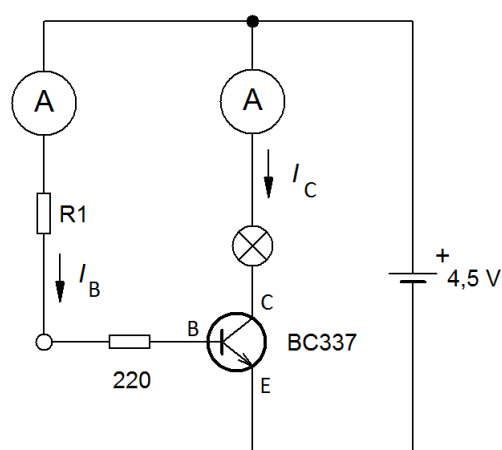
Proud, který teče do báze tranzistoru, můžeme vypočítat z Ohmova zákona: Celkový odpor mezi + pólem baterie a bází je dán součtem odporu R1 a 220 Ω, napětí na něm je rovno napětí baterie mínus napětí mezi bází a emitorem. Má-li například R1 odpor 4,7 kΩ, bude proud přibližně $(4,5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}) / (4700 \Omega + 220 \Omega) = 0,8 \text{ mA}$. (Počítat tuto hodnotu přesněji nemá cenu, když tolerance odporu levných rezistorů bývá 5 %.)

Chceme-li, můžeme proud do báze i kolektorový proud měřit. Tím už se ale dostáváme k otázce, jak tranzistor zesiluje proud.

6.2 Tranzistor zesiluje proud

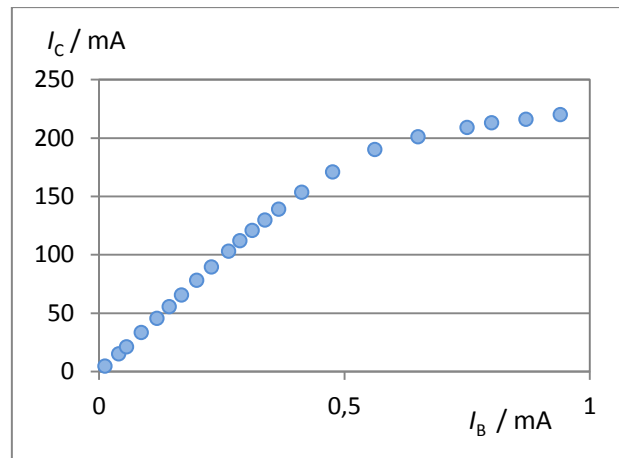
V zapojení podle obrázku můžeme změnou odporu R1 měnit proud do báze I_B . Přitom se bude měnit i kolektorový proud I_C .

V pracovním listu je k této úloze pokyn měnit R1 tak, aby se kolektorový proud pohyboval od několika miliampér až do 200 či 300 mA, kdy žárovka již svítí naplno. Do tabulky přitom zapisujeme hodnoty obou proudů a vypočítáme vždy jejich poměr I_C / I_B . Hodnoty samozřejmě můžeme zapisovat na papír (do pracovního listu) nebo do excelovské tabulky. Ta nám umožní vykreslit graf závislosti I_C na I_B . Co zjistíme?



¹⁹ LED svítí i při vyšších hodnotách R1, její svit je ale už slabší. V tomto případě tedy tranzistor není „plně sepnut“. Tomuto chování se budeme věnovat v následující kapitole 6.2.

Graf ukazuje, že až do proudů, při nichž žárovka již výrazně svítí, je závislost zhruba lineární. Pak se ovšem ohýbá a kolektorový proud se blíží konstantní hodnotě. To je vcelku přirozené: při vyšších proudech je již tranzistor zcela „otevřen“ resp. „sepnut“ a hodnotu proudu už omezuje jen samotná žárovka, ať proud do báze zvyšujeme jakkoli.



V předchozí kapitole jsme se zabývali případem, kdy tranzistor byl buď „plně otevřen“ (protékal proud omezený jen zátěží, v našem případě žárovčkou) nebo plně zavřen (neprotékal téměř žádný proud). Nyní se budeme zabývat chováním tranzistoru mezi těmito mezními stavy, tedy situací, kdy je „částečně otevřen“.

Z grafu $I_C = f(I_B)$, resp. z jeho počáteční části vidíme, že kolektorový proud je v tomto případě prakticky úměrný proudu báze:

$$I_C \doteq B \cdot I_B .$$

Koeficient B v tomto vztahu nazýváme (statický) **proudový zesilovací činitel**²⁰ tranzistoru. Zmínili jsme jej už v teoretické části (viz rovnici (2.3.3)), nyní jsme k němu přirozeně dospěli z měření.

Připomeňme, že tento proudový zesilovací činitel je právě hodnotou, kterou zobrazují běžné digitální multimetry ve funkci „zkoušečky tranzistorů“.

Při diskusích se žáky asi stojí za zdůraznění jeden samozřejmý fakt: Tranzistor nezesiluje proud „sám od sebe“, bez vnějšího zdroje. Co tedy dělá? Jak jsme poznali výše, **reguluje proud kolektorem** v závislosti na proudu báze.

A jak velký proud teče emitorem? Prakticky stejný, jako proud kolektorem; je součtem kolektorového proudu a proudu báze. Zátěž (LED, žárovku apod.) bychom tedy mohli umístit i do emitoru. Několik takových obvodů si zkonstruujeme v kap. 6.4.

²⁰ Přesněji řečeno, jde o proudový zesilovací činitel *v zapojení se společným emitorem*. Pro běžné tranzistory mívá hodnotu několika desítek až stovek. Naopak proudový zesilovací činitel *v zapojení se společnou bází* je menší než 1, obvykle je velmi blízký jedničce. Zapojení se společnou bází však v naší příručce nebudeme využívat.

6.3 Tranzistor zesiluje napětí

Už jsme se seznámili s tím, že tranzistor zesiluje proud. Jak ale zesiluje napětí?

Prozkoumejme funkci obvodu podle schématu na obrázku. Tranzistorem může být typ BC547 nebo BC337.

Poznamenejme, že v tomto zapojení je emitor společným bodem, vůči němuž měříme napětí na vstupu (U_{BE}) a napětí na výstupu (U_{CE}). Proto se používá název **tranzistor v zapojení se společným emitorem**.

Hodnotu rezistoru R1 nejprve vybereme tak, aby napětí U_{CE} mezi

kolektorem a emitorem tranzistoru bylo asi 1,5 V. Nemusí to být nijak přesně: jde o to, aby napětí mezi kolektorem a emitorem nebylo nižší než asi 1 V a naopak, aby nebylo téměř rovné napětí baterie. V prvním případě by byl tranzistor příliš otevřený, v tom druhém prakticky zavřený. Správný *pracovní bod* pro funkci tranzistoru jako zesilovače napětí bude mezi těmito krajnostmi.

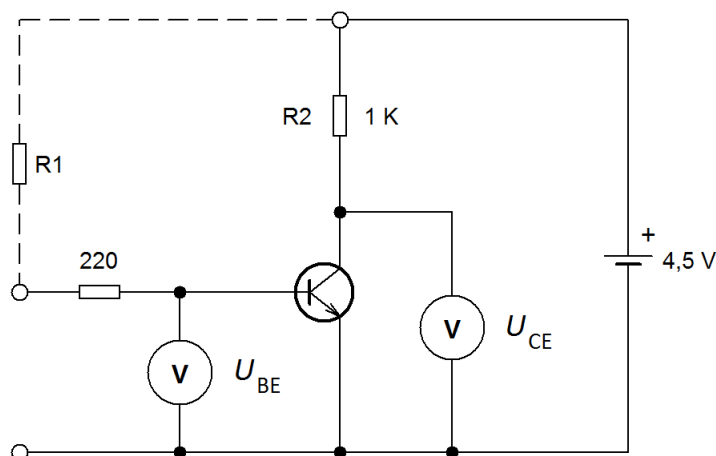
Vhodný odpor rezistoru R1 přitom může být například 1 M Ω , ale také více nebo naopak méně, záleží na proudovém zesílení daného tranzistoru. (Odpor 220 Ω má jen ochrannou funkci: pokud bychom místo R1 omylem zapojili příliš malý odpor nebo jen vodič, omezí proud do báze tranzistoru a zabrání jeho zničení.)

Nyní měňme odpor rezistoru R1 – například tím, že k němu budeme připojovat do série další rezistory. Sledujte přitom, jak se mění napětí U_{CE} mezi kolektorem a emitorem a také napětí U_{BE} mezi bází a emitorem. **Dokážeme vysvětlit pozorované změny?** Zkuste se nad tím zamyslet sami, dříve než si přečtete další text. Pokud měření přímo neprovádíte, můžete předpovědět, co můžeme očekávat, tedy provést „myšlenkový pokus“.

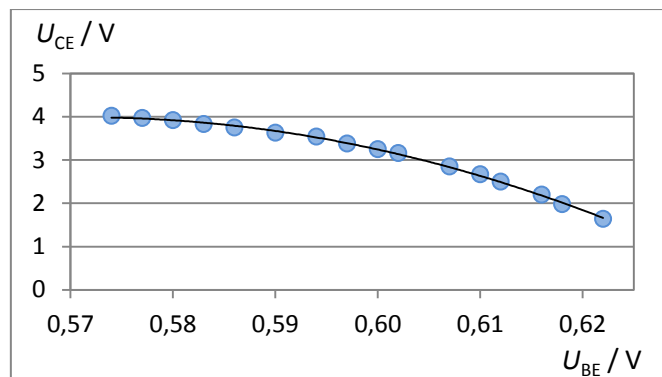
Úvahy, které nám pomohou osvětlit chování daného obvodu, jsou vlastně docela jednoduché, když je provádíme postupně.

Zvětšíme-li odpor R1, zmenší se proud do báze tranzistoru. V důsledku toho poklesne napětí U_{BE} mezi bází a emitorem. (Přechod báze-emitor funguje jako polovodičová dioda, jeho charakteristika se podobá té, kterou jsme naměřili v kap. 4.2.) Pokles napětí je ale většinou malý.

Současně v důsledku poklesu proudu I_B do báze poklesne kolektorový proud I_C (viz předchozí kap. 6.2). Tento proud prochází rezistorem R2; nižší proud znamená *menší úbytek napětí* na R2. Napětí na kolektoru tranzistoru tedy *stoupne*. A může jít o nárůst poměrně výrazný.



Příklad, jak může vypadat závislost mezi U_{BE} a U_{CE} , ukazuje následující graf:



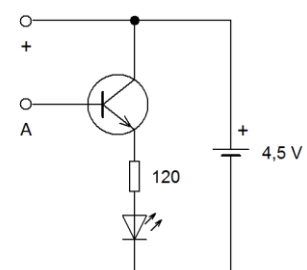
Co z něj vidíme:

- Při vzrůstu napětí na bázi napětí na kolektoru klesá.
(To je jasné už z úvah uvedených výše.) Často se to vyjadřuje konstatováním, že tranzistor v zapojení se společným emitorem *obrací fázi* zesilovaného napětí.
- Závislost *není lineární*.
Při zesilování signálů se tedy buď musíme omezit na malé rozkmity napětí (pro malý rozkmit není odchylka od linearit příliš velká) nebo linearitu zesílení zajistit jinak (s využitím zpětné vazby, do toho se však v naší příručce pouštět nebudeme).
- Zesílení napětí je poměrně velké, řádu několika desítek.
Jako zesílení napětí bereme poměr změny kolektorového napětí ke změně napětí na bázi, tedy $\Delta U_{CE}/\Delta U_{BE}$. (Pro výsledky zobrazené v grafu vychází při U_{BE} v rozmezí 0,61 až 0,62 V velikost zesílení rovna asi 85.)

Poznamenejme, že v zapojení se společným emitorem tranzistor zesiluje také proud (typicky několikrát, podle proudového zesilovacího činitele). Celkové zesílení *výkonu* je rovno součinu napěťového a proudového zesílení, může tedy být řádu až 10^4 .

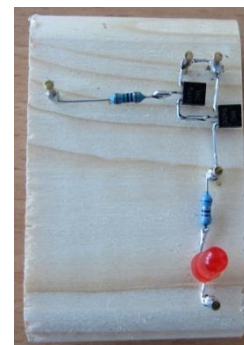
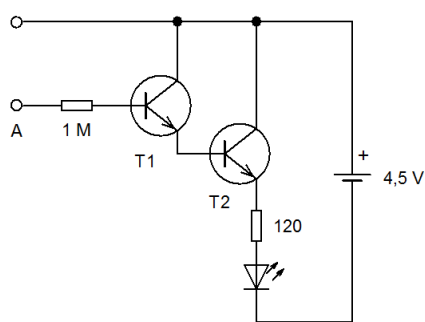
6.4 Jednoduchá zapojení s bipolárními tranzistory

Zapojení, na nichž jsme si vyzkoušeli chování tranzistoru, můžeme využít i pro jednoduché aplikace. Jedna z nejjednodušších je na schématu vpravo. Může sloužit jako jednoduchý **indikátor malých proudů**, od asi $1\mu A$. Proud přicházející do svorky A je zesílen tranzistorem (například typu BC547C²¹), zesílený proud v emitorovém obvodu indikuje LED. Funkci jednoduše ověříme tak, že svorky + a A spojíme prsty (ani nemusí být moc nasliněné).



²¹ Písmena A, B nebo C za typem tranzistoru (BC547) dávají informaci o velikosti proudového zesílení. V dokumentaci („datasheetu“) tohoto tranzistoru najdeme, že nejvyšší proudové zesílení má právě BC547C: je v rozmezí 420 až 800. To se nám hodí, protože v tomto a následujícím obvodu potřebujeme proudové zesílení co nejvyšší. Reálně můžeme počítat s hodnotou proudového zesílení zhruba 500.

Pro větší proudové zesílení můžeme spojit dva tranzistory tak, jak to ukazuje následující schéma²². Tranzistor T1 zesiluje proud, který do něj teče ze svorky A. (Rezistor o odporu 1 M Ω pouze omezuje proud do báze. Na jeho přesné velikosti nezáleží.) Zesílený emitorový proud teče do báze tranzistoru T2, ten ho dále zesílí. Výsledný proudový zesilovací činitel je dán součinem zesílení obou tranzistorů, může tedy být např. až okolo $500 \cdot 500 = 250\,000$. Tento přístroj proto může indikovat proud o velikosti několika nanoampér. (Při daném zesílení to znamená, že svítivou diodou prochází proud okolo 1 mA, při tomto proudu už svit LED spolehlivě vidíme.)



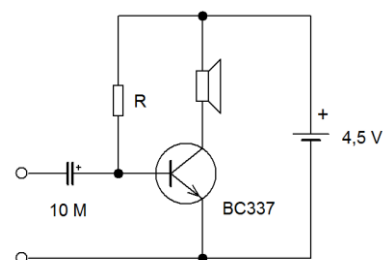
Indikátor je tak citlivý, že jej lze využít i v pokusech z elektrostatiky, jak to bylo popsáno v kapitole 3.1.4 příručky [15]. Reaguje také na spojení + pólu baterie a svorky A třeba i velmi suchými prsty; LED svítí, i když svorky spojíme předmětem, jehož odpor je třeba 1 G Ω .

K posledním dvěma uvedeným zapojením lze poznamenat, že v nich je vlastně elektrodou společnou pro vstup a výstup *kolektor* tranzistoru. Proto se toto zapojení nazývá **zapojení se společným kolektorem**.

Různých variant popsaných indikátorů lze vymyslet a postavit více. LED může být zapojena i v kolektorovém obvodu, po přidání třetího tranzistoru můžeme proud indikovat svitem žárovky apod. Experimentování tohoto typu už necháme vám, čtenářům, a vašim žákům.

Poslední jednoduchou konstrukcí, kterou si zde ukážeme, je **jednostupňový zesilovač střídavého napětí**.

Využijeme jej k zesílení výkonu. V kolektorovém obvodu zapojíme reproduktor. Čím větší bude mít odpor, tím lépe; mělo by to být nejméně 8 Ω . (Pozn.: Zde máme na mysli odpor, který na reproduktoru změříme ohmmetrem, u malých reproduktorů bývá ve shodě s uváděnou hodnotou impedance.) Rezistor R zvolíme tak velký, aby na reproduktoru bylo napětí asi 1 V. To znamená, že napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru bude asi 3,5 V.



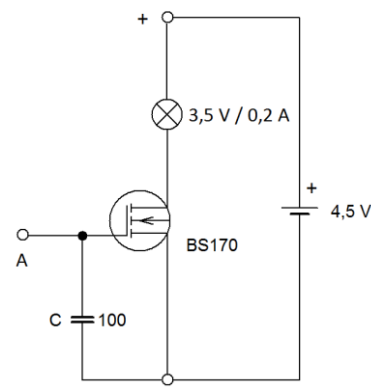
(Tyto hodnoty nemusíme nastavovat přesně; jde o to, abychom reproduktor nezatěžovali velkým stejnosměrným proudem a aby se na tranzistoru neměnil v teplo příliš velký výkon.) V závislosti na proudovém zesílení tranzistoru a na odporu reproduktoru bude na místě R vyhovovat rezistor o odporu několika k Ω až desítek k Ω . Kondenzátor je elektrolytický o kapacitě 10 μ F. (Ve schématu se značí jako 10 M.) Ani jeho hodnota není kritická, může to být třeba 4,7 μ F nebo naopak 22 μ F. Kondenzátor slouží k oddělení střídavého signálu od stejnosměrného proudu, kterým nastavujeme „pracovní bod“ tranzistoru (odporem R, jak jsme to popsali výše).

²² Toto spojení dvou tranzistorů je známo pod názvem *Darlingtonovo zapojení*.

Na vstup našeho jednoduchého zesilovače lze připojit třeba sluchátkový výstup MP3 přehrávače nebo jiného zdroje hudebního signálu. Výsledná hlasitost není velká, ale k demonstraci zesílení postačí.

6.5 Tranzistory řízené polem

Pro pokusy s tranzistorem řízeným polem můžeme využít typ BS170. Je relativně levný (současná cena je asi 3,30 Kč) a vydrží proud 0,5 A, takže jím můžeme spínat proud do žárovčky. Pomůcka, na níž můžeme vlastnosti tranzistoru MOSFET demonstrovat, je na schématu vpravo. (Pozn.: Hodnota 100 uvedená u kondenzátoru C znamená jeho kapacitu v pF.)

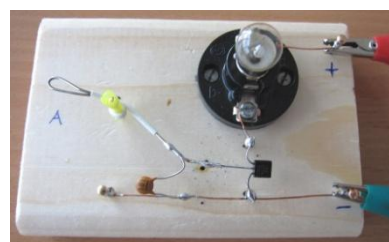


Pokud svorku A spojíme, třeba nakrátko, se záporným pólem baterie, žárovka nebude svítit. Pokud ji nakrátko spojíme s + pólem, žárovka svítí – a zůstane tak, i když svorka A už není k ničemu připojena. Napětí, které je na kondenzátoru C (a tedy napětí mezi elektrodami G a S, které jsou analogií báze a emitoru), stačí k „otevření“ tranzistoru. Kondenzátor se přitom do elektrody G prakticky nevybíjí, napětí na něm zůstává konstantní.

Právě v tom je rozdíl mezi bipolárními tranzistory a tranzistory řízenými polem. Kdybychom v tomto zapojení použili bipolární tranzistor, kondenzátor o kapacitě 100 pF by se proudem do jeho báze vybil za méně než mikrosekundu. Lze říci, že bipolární tranzistor je řízen proudem do báze; tranzistory řízené polem, jak už název napovídá, jsou řízeny *napětím*.

Nastavíme-li na svorce A napětí na nižší hodnoty než plné napětí baterie, můžeme jas žárovky řídit prakticky spojitě: žárovka může svítit slabě nebo jen žhnout. I v tomto případě stačí napětí na elektrodu A přivést jen krátce, pak už zůstává na nastavené hodnotě (nebo se mění jen pomalu).

V konstrukci daného zapojení na dřevěném prkénku je třeba, aby svorka A a přívod k elektrodě G tranzistoru byly izolovány od hřebíčků zatlučených do destičky – jinak se totiž kondenzátor vybíjí proudem tekoucím dřevem. Konstrukce je vidět na fotografii (v materiálech na přiloženém CD jsou fotografie v barvách a ve větším rozlišení lépe zachycující detaily).



Jak jsme již upozornili výše v kap. 3.1, tranzistory řízené polem lze snadno zničit napětím mezi elektrodou G a ostatními. Tranzistor BS170 vydrží mezi elektrodami G a S napětí pouhých 15 V! Protože kapacita mezi těmito elektrodami je malá, stačí ke zničení tranzistoru i velmi malý náboj, pouhých několik nanocoulombů. Kondenzátor C dělá zapojení o něco bezpečnější, ale jen o trochu. (Chcete-li bezpečnost zapojení zvýšit, použijte na místě C kondenzátor o kapacitě 1 nF nebo i vyšší.) Přesto však do elektrody A nevybíjejte žádné nabitě tyče ani plastová brčka a než se jí dotknete prstem, držte se jednoho z pólů baterie.

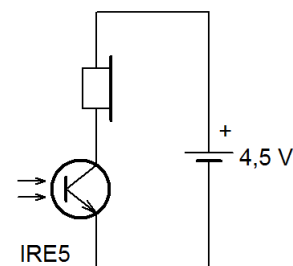
7. Další zajímavé součástky

Polovodičových součástek, jejichž funkci by bylo zajímavé si vyzkoušet, je ještě řada. Velmi stručně se zde dotkneme jen několika z nich. *Fototranzistory* umožňují převod rychle proměnných světelných signálů na signály elektrické – a my ukážeme, jak to lze jednoduše demonstrovat. *Tyristory*, jak již bylo řečeno výše, slouží ke spínání a k řízení výkonu v obvodech se střídavým proudem. Zde si ukážeme jen jejich základní chování, do aplikací se již pouštět nebudeme. (Podobně by šlo ilustrovat základní chování triaků, na ty však už v tomto textu bohužel nedojde.) Posledním druhem součástek, o nichž se zmíníme, budou *Hallovy sondy* umožňující měřit magnetickou indukci. Určitě by bylo zajímavé podívat se blíž ještě alespoň na některé integrované obvody, ale to už by bylo na další samostatnou publikaci.

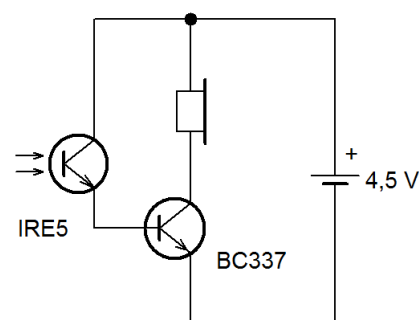
7.1 Fototranzistory

Fototranzistory bychom vlastně mohli zařadit ještě do kapitoly o tranzistorech. Kolektorový proud fototranzistoru závisí na osvětlení; s rostoucím osvětlením roste. Příslušnou závislost bychom mohli měřit – podívejme se však raději na to, jak činnost fototranzistoru co nejjednodušeji demonstrovat.

Snad nejjednodušší možnost ukazuje schéma vpravo. Mezi kolektor a + pól baterie zapojíme sluchátka. S běžnými nízkohmovými sluchátky je sice citlivost zapojení velmi malá, ale přece jen, je-li kolem ticho a fototranzistor přiblížíme třeba k zářivce (jeho čepička musí být namířena směrem k zářivce), uslyšíme ve sluchátkách slabé bručení. Silnější signál uslyšíme, když na fototranzistor namíříme dálkový ovladač (k TV nebo k dataprojektoru) a stiskneme některé z tlačítek, například pro zapnutí přístroje. Signál je silnější i proto, že použitý fototranzistor (levný typ IRE5) je nejcitlivější právě v oblasti infračerveného záření, zhruba na vlnové délce 940 nm. Místo sluchátka můžeme zapojit i malý reproduktor (o odporu 8 Ω nebo více). Zvuk je slabý, ale přiblížíme-li ovladač blízko k fototranzistoru, je slyšet.



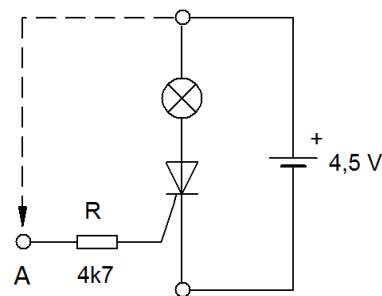
Vyšší hlasitost můžeme získat, jestliže slabý proud z fototranzistoru zesílíme dalším tranzistorem, podobně, jako jsme to dělali výše. Zde by se nám paradoxně hodil tranzistor BC337 spíše s nižším proudovým zesilovacím činitelem. Při vyšším osvětlení totiž fototranzistor IRE5 „dává“ proud až 5 mA a tak vlastně druhý tranzistor zcela otevře. Můžeme říci, že naše zapojení se tak prakticky „zahltí“ a neslyšíme nic.



V tom případě pomůže zastínění fototranzistoru. S trochou šikovnosti můžeme zachytit signál dálkového ovladače na vzdálenost 1 metru nebo i o trochu více, a to i při poslechu přes reproduktor. Alespoň zčásti tak můžeme demonstrovat princip dálkového ovládání „neviditelnými paprsky“.

7.2 Tyristory

Jak jsme již uvedli v kap. 2.1.3, tyristor lze sepnout proudem do „pomocné“ elektrody. Demonstrovat to můžeme v zapojení na schématu. Na začátku necháme svorku A nepřipojenou. Žárovka nesvítí. Když svorku A spojíme, byť krátce, s + pólem baterie, žárovka se rozsvítí a zůstane rozsvícená, i když je svorka A opět odpojena. Ke zhasnutí žárovky musíme, byť na okamžik, přerušit proud tyristorem, tedy odpojit jeden pól baterie. V zapojení lze užít jeden z nejlevnějších tyristorů, BT169. Tento typ vydrží proud 0,5 A, takže jím můžeme bez problémů spínat proud žárovkou.

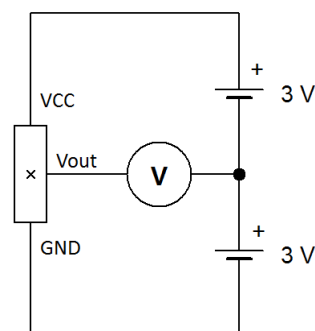


Uvedeným zapojením jsme ukázali jen základní funkci tyristoru. Rozbor a diskuse toho, jak lze pomocí tyristoru regulovat střídavý proud žárovkou, už je trochu nad rámec našich jednoduchých pokusů a demonstrací. Zájemci jej mohou najít v doporučené literatuře.

7.3 Hallový sondy

Některé z polovodičových prvků, s nimiž jsme se v předchozím textu setkali, reagovaly na určité „neelektrické“ veličiny; například na teplotu (termistory) nebo osvětlení (fotorezistory a fototranzistory).

Hallové sondy jsou příkladem senzorů, které reagují na magnetické pole, přesněji řečeno na velikost magnetické indukce. I tyto senzory můžeme koupit v prodejnách elektronických součástek, a také nijak závratně drahé: například typ A1302 stojí něco málo přes 20 Kč. Přestože vnitřek zmíněné sondy je složitý (vedle vlastního Hallova senzoru obsahuje i operační zesilovače a další obvody), ven vedou jen tři vývody: „napájení“ (označované v dokumentaci symbolem V_{CC}), na něž se připojí + pól baterie, „zem“ (označovaná symbolem GND), na níž se připojí záporný pól napájecího zdroje a „výstup“ (V_{OUT}). Obvod lze jednoduše napájet napětím 6 V ze 4 tužkových baterií. Potřebujeme totiž střed napájecího napětí (+3 V proti GND); vůči němu se měří napětí na výstupu, jak to ukazuje schéma.



Výstupní napětí je úměrné magnetické indukci. Koeficient úměrnosti pro daný typ sondy je přibližně 13 mV/mT. (To bohužel znamená, že s danou sondou nemůžeme měřit pole v blízkosti neodymových magnetů, kde magnetická indukce dosahuje asi 1 tesla: ± 13 V na výstupu při napájení napětím ± 3 V opravdu nedostaneme. A napájecí napětí daného obvodu nesmí překročit 8 V.) Přesnější kalibrace sondy, nastavení nuly apod. by vyžadovalo složitější zapojení. Jednoduchou demonstraci funkce Hallové sondy a případně i orientační měření magnetické indukce však i náš jednoduchý obvod zvládne.

8. Závěr

Výše uvedeným přehledem informací, námětů a pokusů jsme samozřejmě zdaleka nevyčerpali vše, co můžeme s polovodiči dělat a co se o nich můžeme dozvědět. Naší snahou bylo vstoupit do této oblasti spíše „zlehka“ a na velmi jednoduchých pomůckách a pokusech si vlastníma rukama „osahat“ základní vlastnosti nejdůležitějších analogových polovodičových součástek.

Jak již bylo řečeno, co z těchto pokusů zařadíte do své výuky a s čím seznámíte své žáky, je na vás samotných, učitelích fyziky. Nejde o to, abyste z každého ze svých žáků vychovali elektronika. Někomu bude stačit jen velmi zběžná představa, co polovodičové součástky umí. Techničtější zaměření žáci a studenti vám naopak mohou přinést do hodin vlastní konstrukce a zařízení, které budou podstatně složitější než cokoli, co jsme v našem textu zmínili. Takovíto žáci by vám přirozeně mohli značně pomoci při zhotovení pomůcek, které jsme zde popisovali, nebo by mohli vymyslet a vytvořit pomůcky další. Snad jen jedna varovná poznámka: Pokud budou tvořit konstrukce, v nichž se bude používat síťové napětí, případně vysoké napětí, vysoké proudy, kde se budou kondenzátory nabíjet na vysoké energie – dbejte na bezpečnost a případně tyto konstruktéry varujte či trochu „umravněte“. Na internetu se dají najít návody na zařízení, kde bezpečnost zdaleka není tím, o čem tvůrcům jde. Různá „elektromagnetická děla“ či výkonné Teslovy transformátory či zdroje vysokého napětí mohou být fascinujícími konstrukcemi – do té doby, než si někdo sáhne, kam nemá, nebo stojí, kde nemá. A je na odpovědnosti učitele, co do třídy a do výuky pustit a co už raději ne. Konstrukce, které jsme popsali v této příručce, jsou napájené nízkým napětím z baterií a tak u nich žádné nebezpečí úrazu elektrickým proudem nehrozí. Přirozeně, že při jejich tvorbě, kdy zatlukáme hřebíčky a pájíme, je jistá elementární opatrnost potřeba; ale že se od hrotu páječky můžeme spálit, je snad věc jasná každému.

Pokusy s dalšími typy polovodičových součástek či tvorba složitějších obvodů by možná na některých školách mohla být náplní speciálních seminářů, případně nějakých kroužků elektroniky. Někdo z rodičů, kdo má elektrotechnické vzdělání nebo se věnuje radiotechnice či amatérské elektronice, by mohl být vhodným vedoucím. Pro jakékoli aktivity tohoto druhu, případně pro vlastní pokusničení či „bastlení“ (jak zní slangový termín pro kutilskou činnost v tomto oboru) lze v literatuře a zejména na internetu najít bezpočet návodů a námětů.

A když něco nefunguje tak, jak má? To je situace, která může snadno nastat, a nejen u velmi složitých konstrukcí. Neměli bychom se jí bát, protože je příležitostí zamyslet se nad daným obvodem a jeho funkcí podrobněji, lépe ji pochopit, prakticky se pocvičit v řešení konkrétního problému... Najít a pochopit proč něco nefungovalo – a co udělat proto, aby to řádně fungovat začalo – nás může mnohému naučit. Chcete-li, můžeme říci, že si tím rozvíjíme naše kompetence k řešení problémů. A navíc to skvěle zapadá do přístupu, kdy výuku fyziky a učení se fyzice děláme *aktivně, aktuálně a s aplikacemi*.

Přeji vám všem hodně radosti při experimentování ať už s jednoduchými či složitějšími polovodičovými obvody a při tom, když k tomu vedete své žáky.

Literatura

Citovaná literatura

- [1] Ioffe A. F.: *Fysika polovodičů*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1959.
- [2] Eckertová L. a kol.: *Fyzikální elektronika pevných látek*. Karolinum, Praha 1992. ISBN 80-7066-535-1.
- [3] Tichý M. a kol.: *Elektronika*. Hypertextová učeníce. MFF UK, 2002. Dostupné online na <http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektronika/>
- [4] Doleček J.: *Moderní učebnice elektroniky. 2. díl. Polovodičové prvky a elektronky*. BEN, Praha 2007. ISBN 978-80-7300-161-2.
- [5] Doleček J.: *Moderní učebnice elektroniky. 3. díl. Optoelektronika*. BEN, Praha 2007. ISBN 978-80-7300-184-1.
- [6] GM Electronic. Online: <http://www.gme.cz>
- [7] PS Electronic, s.r.o. Online: <http://www.pselectronic.cz/>
- [8] GES-Electronics. Online: <http://www.ges.cz/cz/>
- [9] Škoda Z.: *S tranzistorem a baterií*. Mladá fronta, Praha 1963.
- [10] Dvořák L.: *Pár věcí z tábora 3: Tentokrát o čase a taky trochu o elektronice*. In: Veletrh nápadů učitelů 5. Sborník z konference. Prometheus, Praha 2000. Dostupné online na adrese: http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/Veletrh_05/05_09_Dvorak.html
- [11] Piskač V.: *Hřebíčkové obvody*. Brno 2011. Dostupné online na adrese: http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/jaknato/hrebickove_obvody.pdf
- [12] Dvořák L.: *Nebojte se pájet – a postavte si jednoduchou zkoušečku*. In: Dílny Heuréky 2003-2004. Prometheus, Praha 2005. s. 79-88. ISBN 80-7196-316-X.
- [13] Perimeter Institute for Theoretical Physics: *Measuring Planck's Constant: Teacher's Notes*. Dostupné online: http://www.perimeterinstitute.ca/Outreach/Plancks_Constant/Measuring_Planck's_Constant%3A_Teacher's_Notes/
- [14] Havránek V.: *Nejjednodušší digitální teploměr z termistoru*. In: Dílny Heuréky 2006-2007. Prometheus, Praha 2009, s. 144-148. ISBN 978-80-7196-396-7.

[15] Dvořák L. a kol.: *Náboje, proudy a elektrické obvody. Výukový a metodický text. Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi – projekt OPPA*. P3K, Praha 2012. ISBN 978-80-87186-78-7.

Další literatura, z níž lze čerpat informace a náměty na pokusy

Zájemci z řad učitelů fyziky, žáků a studentů si dnes mohou vybrat z řady zdrojů a publikací, a také mnoha internetových zdrojů.

Knih o elektronice je na trhu značné množství – od úvodů pro začátečníky, až po specializované publikace pro ty, jimž je navrhování a konstrukce elektronických zařízení koníčkem, jemuž se věnují na téměř profesionální úrovni.

Vybrat si můžete například z nabídky nakladatelství BEN (<http://www.ben.cz/cz/>, hledejte pod hlavičkou „Elektro literatura“), Kopp (<http://www.kopp.cz>) a dalších. (Poznámka: Žádné z uvedených nakladatelství nijak nesponzorovalo vznik této příručky a uvedením odkazů zde žádné nechceme protěžovat či mu dělat zvláštní reklamu.)

Pro úvodní studium lze doporučit například řadu publikací V. Maliny *Poznáváme elektroniku* nebo A. Schommerse *Elektronika tajemství zbavená*. Poněkud náročnější jsou výše citované publikace J. Dolečka [4-5].

Zdrojem informací o polovodičích a elektronice mohou být i vysokoškolská skripta, například učebnice K. Raunera: *Elektronika (fyzikální a analogová část)*, ZČU Plzeň, 2003, určená učitelům fyziky základních a středních škol.

Spíše vážnějším zájemcům o amatérskou elektroniku a radiotechniku je určen časopis *Praktická elektronika – Amatérské Rádio*, vycházející jednou měsíčně. Na webu lze najít též databázi článků z časopisů věnovaných radiotechnice a amatérské elektronice, které u nás vycházely od roku 1952. Šlo například o časopisy *Amatérské Rádio*, *Radiový konstruktér*, *Praktická elektronika* a další. (Lze najít pomocí webových hledačů například při zadání termínu „AR-BASE“.)