

# Polovodiče

---

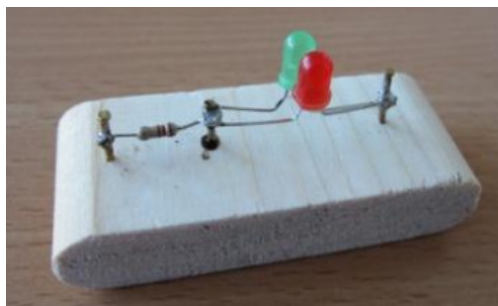
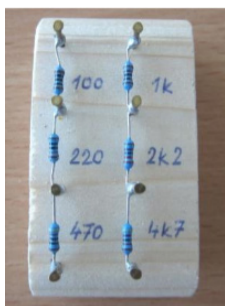
## 1) Úvod

Cílem této části praktik je seznámit se základními pokusy, které je možné provádět ve škole s žáky. Řadu pokusů je sice možné provádět demonstračně pomocí nejrůznějších souprav k tomu určených, ale pro žáky je nejcennější zkušenost, kterou s polovodičovými prvky zažijí sami. Při laboratorních pracích je možné také rozvíjet manipulativní schopnost a zručnost žáků; vlastní manipulací se součástkami ztrácí polovodičové prvky jistou magičnost, přičemž ztráty, které vzniknou „odpálením“ součástek jsou malé a snadno nahraditelné (ve srovnání s profesionálně vyráběnými stavebnicemi a demonstračními, případně žákovskými soupravami). Proto je dobré si „pohrát“ přímo s jednotlivými prvky, případně jednoduchými variantami jejich zapojení (destičky, nepájivá pole apod.), které si učitel může vyrobit sám (případně žáci samotní). Existuje i celá řada souprav a stavebnic, které na školách zbyly z let minulých, anebo naopak je mají žáci doma. V praktikách se s několika takovými stavebnicemi seznámíte.

## 2) Některé používané pomůcky

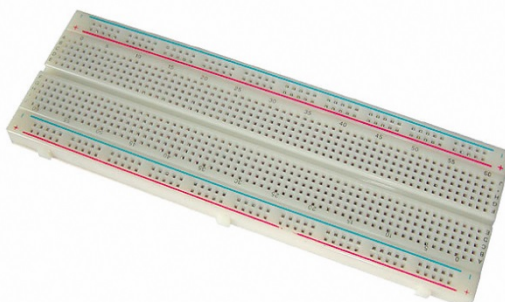
Jednoduchou stavebnici si učitel i žáci mohou vyrobit sami například pomocí mosazných hřebíčků zatlučených do destiček; na tyto hřebíčky je možné připájet potřebné prvky. Jednotlivé destičky pak můžeme použít jako jednoduchou stavebnici, do které „je vidět“ a se kterou se jednoduše pracuje (a jednoduše opravuje). Destičky se součástkami je možné jednoduše spojovat pomocí kablíků s krokosvorkami (krokodýlky), které připojíme k hřebíčkům. Pokud potřebujeme k některým součástkám připojit ochranné rezistory (jak tomu může být např. u diody), je možné na jednu destičku připájet součástku i s rezistorem (viz ilustrace na následujícím obrázku). Můžeme tak vytvářet celé „destičkové“ moduly.

(Někdy se používá jen „nepájivá“ varianta výše popisovaných destiček, kdy se vývody součástek k hřebíčkům nepřipevňují pomocí pájení, ale přitlučou se s hřebíčky přímo do destičky – pomocí hřebíčků se do destičky udělá dírka, do ní se vloží vývody potřebných součástek a ty se teprve pak zajistí přitlučenými hřebíčky. Tuto variantu uvádíme spíše jako námět pro samostatné „bastlení“, v praktikách jí nebudeme používat.)



Obr. 1. Příklad součástek napájených na destičky (odporová dekáda, zkoušečka polarity diody)  
(Projekt OPPA, Polovodiče a jejich aplikace, str. 22 a 20)

Další možností je použití tzv. kontaktního nepájivého pole. Vývody součástek se do tohoto pole (propojovací destičky) zastrkávají; zde je třeba se nejprve seznámit s propojením jednotlivých zdířek. Existuje řada variant těchto univerzálních destiček. Na následujícím obrázku je jedna taková varianta, kde na krajích jsou spojeny zdířky označené plus a mínus po celém okraji desky, ty se zpravidla připojují na zdroj (viz barevné označení). Kolmo na tyto krajní dlouhé pásy zdířek jsou umístěny pětice navzájem propojených zdířek (na obrázku spíše ve svislé poloze), které jsou odděleny drážkou. Tyto propojené zdířky prvního sloupce jsou označeny písmeny A-E.



Obr. 2. Příklad nepájivého pole  
(<http://www.didaktik-gm.sk/admin/data/fotky/661-183.jpg>)

Dále je možné k řadě zkoumání a předvádění použít stavebnici Boffin, Voltík apod.



Obr. 3. Příklad obvodu sestaveného s pomocí stavebnice Boffin (vlevo) a Voltík (vpravo)  
(<http://i2.alza.cz/lmgW.ashx?fd=FotoAdd&cd=ZT055d-04&i=1.jpg> a  
[http://www.flajzar.cz/data/images/202\\_1.jpg](http://www.flajzar.cz/data/images/202_1.jpg))

### 3) *Vlastní vodivost polovodičů*

Polovodiče se od vodičů liší zjednodušeně tím, že jejich odpor (vodivost) značně závisí na příměsích a vnějších vlivech, především teplotě a osvětlení. Jedná-li se o čistý polovodič a o změny jeho vodivosti v závislosti na vnějších vlivech, hovoříme o vlastní vodivosti. Je-li vodivost polovodiče ovlivněna hlavně příměsemi, hovoříme o vodivosti příměsově. U příměsových polovodičů se v součástkách využívají přechody mezi jednotlivými typy vodivosti (součástky s jedním, dvěma a více PN přechody).

#### A) Experimenty s termistorem

Termistor je polovodičová součástka, jejíž odpor se s teplotou výrazně mění. Jako termistor označujeme zpravidla součástku, u které odpor s teplotou klesá; je obvykle označována zkratkou NTC (negative thermal coefficient). Pokud odpor takové „teplotlivé“ součástky s teplotou roste, nazývá se

pozistor (kladný teplotní součinitel odporu, PTC – positive thermal coefficient). Tímto druhým typem se zde však nebudeme zabývat.



Obr. 4. Ukázka termistorů  
(<http://www.spsemoh.cz/vyuka/zl/neelektricke.htm>)

## Závislost odporu termistoru na teplotě – kvalitativně

### Pomůcky

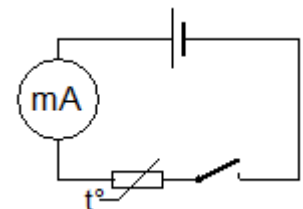
termistor, regulovatelný zdroj ss napětí (6-10 V), ss miliampérmetr, spojovací vodiče, vysoušeč vlasů (fén), ohmmetr

### Příprava a provedení

Termistor připojíme k ohmmetru a měříme jeho odpor při zahřívání fénem a při jeho následném ochlazování (pro rychlejší průběh na něj můžeme třeba foukat, ochladit mokrým hadříkem či ledem). Pro předvedení základní funkce termistoru ho však stačí jenom zahřívát v prstech.

Jinou variantou je připojení termistoru ke zdroji napětí (viz schéma) a měření proudu v obvodu při zahřívání a ochlazování termistoru.

Pozorujeme také, jak se změní výsledek pokusu při změně polarity zdroje.



### Závěr

S rostoucí teplotou klesá odpor termistoru, tedy roste proud v obvodu a naopak. Výsledky pokusu nezávisí na polaritě zdroje.

### Poznámka

Napětí zdroje volíme tak, aby nedocházelo ke zdatnému ohřevu termistoru procházejícím proudem. Z tohoto důvodu (tedy z důvodu nižšího proudu) je vhodnější volit termistory s vyšší hodnotou odporu.

## \* Závislost odporu termistoru na teplotě – kvantitativně

### Pomůcky

ohmmetr, teploměr, rychlovarná konvice s horkou vodou, termistor (v praktiku je již spojen s banánky)

### Provedení

Ve varné konvici ohřejeme vodu a přelijeme ji do kádinky. Ohmmetr připojíme k termistoru a spolu s teploměrem ho vložíme do kádinky. Do tabulky zaznamenáváme teplotu a příslušný odpor termistoru. Pro rychlejší ochlazení můžeme do kádinky přidávat kousky ledu.

### Závěr

S klesající teplotou odpor termistoru roste. Pokud grafem zkusíme proložit různé závislosti, zjistíme, že nejlépe odpovídá exponenciální funkce.

### Poznámky

- 1) Velmi pěkná a pro žáky zajímavá je laboratorní práce podle Václava Piskače, kdy si žáci vytvoří graf závislosti odporu termistoru na teplotě a pomocí tohoto grafu pak měří teplotu rozpuštěné čokoládové polevy.  
(viz [https://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/skolnipomucky/lp\\_termistor.pdf](https://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/skolnipomucky/lp_termistor.pdf)).
- 2) Další možnost (a to pomocí LabQuestu včetně vhodného nastavení a ukázky vzorových grafů) je zpracována na adrese <http://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/4.7/index.php>.

## \* Voltampérová charakteristika termistoru

### Pomůcky

voltmetr Vernier, ampérmetr Vernier, LabQuest, plynule měnitelný zdroj ss napětí, termistor

### Příprava a provedení

Termistor připojíme ke zdroji napětí sériově s ampérmetrem. K termistoru paralelně připojíme voltmetr. V LabQuestu nastavíme čas měření na cca 5 s. Po spuštění LabQuestu pomalu zvětšujeme napětí od nulové hodnoty až po maximální hodnotu povoleného rozsahu sond.

### Závěr

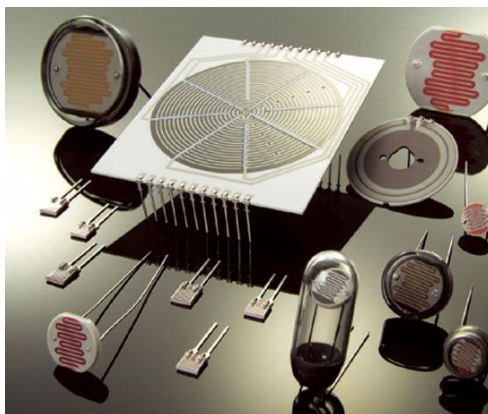
Voltampérová charakteristika termistoru při konstantní teplotě se neliší od voltampérové charakteristiky rezistoru.

### Poznámky

- 1) Pro měření můžeme pochopitelně použít obyčejné multimetry a měřit charakteristiku klasicky bod po bodu. Měření pomocí LabQuestu je rychlejší a eliminuje případné změny teploty v okolí.
- 2) Dále můžeme měření provést pro několik různých teplot (pokojová teplota, teplota 0 °C apod.).
- 3) Nemáte-li k dispozici zdroj měnitelného napětí, můžete použít např. plochou baterii a měnitelný rezistor zapojený jako potenciometr.

## B) Experimenty s fotorezistorem

Fotorezistor (nesprávně označován jako fotoodpor) je pasivní elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor se snižuje se zvyšujícím se osvětlením.



Obr. 5. Ukázka fotorezistorů

(<http://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/7.7/index.php>, pracovní list)

Princip fotorezistoru je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu: světlo (foton) předá svoji energii elektronu ve valenční sféře, elektron tak získá dostatek energie k překonání zakázaného pásu a přejde z valenčního pásu do vodivostního. Tím opustí svůj atom a pohybuje se jako volný elektron prostorem krystalové mřížky. Na jeho místě vznikla díra. Takto vzniklé volné elektrony (event. díry, defacto se pohybují jen elektrony a při rekombinaci se mění jen jedna díra v druhou) přispívají ke snížení elektrického odporu (resp. zvýšení elektrické vodivosti). Čím více světla na fotorezistor dopadá, tím vzniká více volných elektronů, a tedy se zvyšuje jeho elektrická vodivost.

### Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení – kvalitativní experiment

#### Pomůcky

fotorezistor, zdroj světla, zdroj ss napětí 6V (eventuálně plochá baterie), ohmmetr, ss miliampérmetr, spojovací vodiče

#### Příprava a provedení

K ohmmetru připojíme fotorezistor a sledujeme změny jeho odporu při různém osvětlení.

Další možností je připojit k fotorezistoru zdroj ss napětí a v takto vytvořeném obvodu měřit protékající proud miliampérmetrem. Sledujeme změny proudu v obvodu s fotorezistorem zastíněným rukou, s odkrytým a osvětleným fotorezistorem, při různých vzdálenostech fotorezistoru od zdroje světla apod. Pozorujeme také, jak se změní výsledek pokusu při změně polarity zdroje.

#### Závěr

S rostoucím osvětlením se odpor fotorezistoru zmenšuje. Výsledky pokusu nezávisí na polaritě zdroje.

## \* Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení – kvantitativní experiment

### Pomůcky

Ohmmetr, luxmetr Vernier, LabQuest, fotorezistor, spojovací vodiče

### Provedení

Ohmmetr připojíme k fotorezistoru. Luxmetr zapojíme do LabQuestu a namíříme na fotorezistor. Postupně zakrýváme fotorezistor např. jen papírem, čímž měníme osvětlení, a tedy odpor fotorezistoru. Na LabQuestu odečítáme hodnotu osvětlení, na ohmmetru odpor fotorezistoru, hodnoty postupně vynášíme do grafu závislosti odporu fotorezistoru na osvětlení.

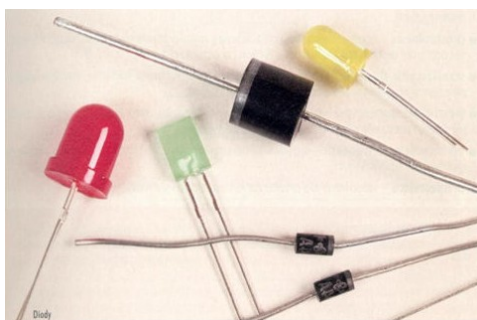
Graf lze zobrazit i v LabQuestu, pokud měření zapneme v režimu „události se vstupy“ a zadáme do LabQuestu při každé změně osvětlení hodnotu odporu fotorezistoru.

### Závěr

Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení je mocninná klesající funkce.

## 4) Dioda a LED

Z metodického hlediska je vhodnější s žáky nejdříve zkoumat luminiscenční diodu (LED). Funkce tohoto prvku je velmi názorná a pro žáky zajímavá (jakmile něco svítí, bliká a pod, je práce pro žáky výrazně zajímavější a poslouží tak větší motivaci). Je ale nutné ukázat, že svítit není jedinou funkcí diody, ale že se dioda užívá právě pro její schopnost „pouštět“ proud jen jedním směrem, a tedy usměrňovat.



Obr. 6. Ukázka (polovodičových) diod  
(<http://www.rchy.pl/zst/pliki/obrazy/dioda.jpg>)

### Diodový jev

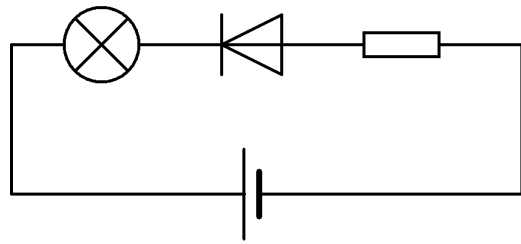
#### Pomůcky

plochá baterie (eventuálně zdroj ss napětí 6 V), ochranný rezistor, LED, spojovací vodiče, ampérmetr, žárovka (6 V/0,3 A), usměrňovací dioda.

#### Příprava a provedení

K ploché baterii připojte přes ochranný rezistor (cca 120  $\Omega$ ) LED a prozkoumejte, jak její svit závisí na polaritě.

Dále je dobré prozkoumat, jak se v obvodu chová usměrňovací dioda (která nesvítí), a to nejlépe připojením ampérmetru, případně žárovky.



### Závěr

LED svítí při zapojení pouze v jednom směru, tzv. směru propustném, a to od anody (+) ke katodě (-). Při pokusu se zapojeným ampérmetrem zjišťujeme, že právě v tomto směru prochází diodou proud.

## Voltampérová charakteristika diody (LED)

Pro měření voltampérové charakteristiky diody je vhodnější užít LED místo usměrňovací diody, a to z důvodů zmíněných výše. Vzhledem k tomu, co víme z předchozího zkoumání, je zajímavější detailněji proměřit tuto charakteristiku při zapojení v propustném směru a zkoumat, kdy se LED různých barev rozsvítí, jak se mění jejich svit v závislosti na protékajícím proudu apod. Voltampérovou charakteristiku je možné měřit užitím ampérmetru a voltmetru a následným „ručním“ zpracováním, případně celé měření napětí a proudu provést za užití PC (např. užitím systému Vernier). V zájmu úspory času bude pro potřeby praktik vhodnější provést měření užitím systému Vernier. V praxi ale doporučujeme, aby si měření provedli žáci pomocí multimetrů. Stačí např. aby si proměřili diodu alespoň jedné barvy. Diody jiných barev mohou proměřit zase žáci jiní. Jednotlivé charakteristiky si pak mohou porovnat. Celé měření je pak dílem celé třídy. Pro zopakování můžeme ještě demonstračně provést měření např. s pomocí systému Vernier.

### Pomůcky

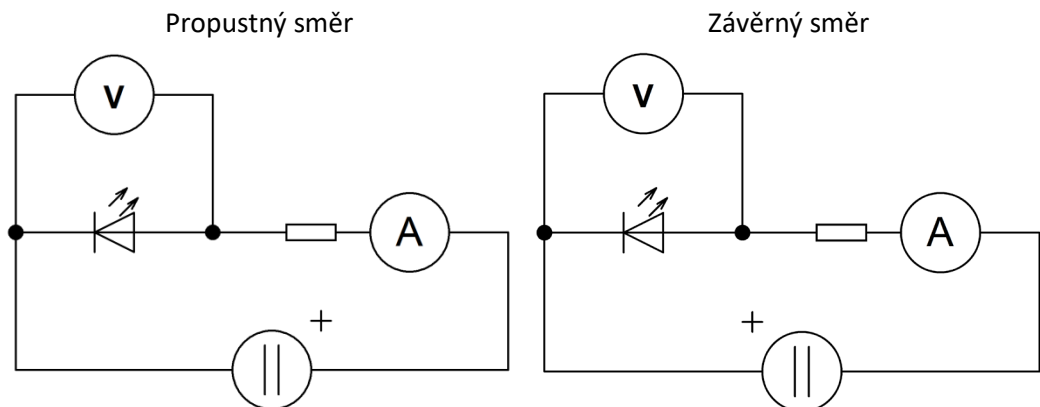
různě barevné LED s připojeným ochranným rezistorem, zdroj s plynule měnitelným ss napětím LabQuest, voltmetr a ampérmetr Vernier, spojovací vodiče

### Příprava a provedení

Obvod zapojíme podle schématu. Ampérmetr je s diodou v sérii, voltmetr je k diodě připojen paralelně. Dbáme na to, aby byla dioda v propustném směru.

Spustíme měření a hodnotu napětí plynule měníme od nulové hodnoty do maximálně hodnoty, kterou dovoluje rozsah sond LabQuestu. Charakteristiku v propustném směru proměřte pro LED různých barev.

Můžete proměřit i voltampérovou charakteristiku LED v závěrném směru.



Obr. 7. Schémata zapojení pro měření V/A charakteristiky diody

### Závěr

Výsledkem měření je výrazně nelineární charakteristika. Z měření je jasně vidět, že dioda nesvítí „od začátku“, ale až po dosažení určitého napětí ( $U_0$ , někdy nazývané prahové napětí), které je pro různé barvy různé. Ale pozor: „provozní“, resp. „pracovní“ napětí, tedy napětí, při kterém dioda výrazněji svítí a „kolem“ kterého se značně mění proud (v širokém intervalu proudů se napětí moc nemění), je o něco větší než napětí, při kterém zaznamenáme rozsvícení diody.

Pro ilustraci uvádíme tabulku, ve které jsou uvedeny hodnoty napětí naměřené na LED při „standardním“ svitu ( $U_{prac}$ ) a při velmi malém proudu, kdy LED právě začíná viditelně svítit ( $U_0$ ). Dále jsou zde uvedeny vlnové délky, na nichž LED září nejintenzivněji, šířka „píků“ bývá několik desítek nm, proto uvedená hodnota je spíše orientační.

LED	$\lambda$ nm	$U_{prac}$ V	$U_0$ 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

### Další informace

Podrobný návod je k dispozici např. na <http://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/9.1/index.php>.

### Rozšiřující úloha

Pokud bychom měli k dispozici citlivý mikroampérmetr, zjistili bychom, že u nepoškozené diody je proud v závěrném směru menší než  $1 \mu\text{A}$ . Zatímco v propustném směru měříme napětí přímo na diodě, v závěrném směru je vhodnější měřit napětí na diodě a ampérmetru, poněvadž proud diodou je mnohem menší než proud tekoucí voltmetrem. Kdybychom tedy měřili napětí jen na diodě samotné, ampérmetrem bychom měřili hlavně proud, který protéká voltmetrem. Schémata zapojení



pro propustný i závěrný směr jsou uvedeny na obrázku. Pro úplnost je ale třeba uvést, že u diod „na velké proudy“ (desítky A), mohou proudy i v závěrném směru dosahovat vyšších hodnot (řádově mA). Závěrný proud tekoucí LED závisí na osvětlení (a tedy může přesáhnout 1  $\mu\text{A}$ )

### Poznámky

- 1) Z tabulky (ale i vlastního měření) je zřejmé, že otevření LED závisí na její barvě, tedy frekvenci, potažmo energii emitovaných fotonů. Energie se získá na úkor toho, že elektrony v diodě procházejí rozdílem potenciálů (napětí na diodě), větší energie vyžaduje větší napětí. Úvahu o tom, proč pro rozsvícení UV LED je nutné vyšší napětí než pro rozsvícení červené, můžeme dotáhnout až po kvantitativní určení hodnoty Planckovy konstanty (podrobněji viz např. L. Dvořák: Polovodiče a jejich aplikace. Projekt OPPA. Praha 2012; str. 26-27).
- 2) I když některé diody mohou „přežít“ krátkodobé přetížení, diodě to určitě neprospěje. LED proto nepřipojujeme přímo k ploché baterii, její „provozní“ napětí je nižší než 4,5 V. Napětí baterie musíme tedy rozdělit na napětí na LED a ochranném rezistoru vhodného odporu. Je-li hodnota proudu LED kolem 20 mA, vychází pro ochranný rezistor velikost odporu cca 130  $\Omega$  (lze tedy použít katalogové hodnoty 150 $\Omega$ , případně 120 $\Omega$ ).

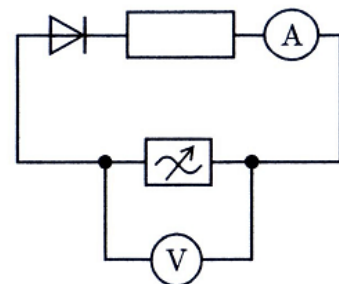
## Jednocestný usměrňovač

### Pomůcky

stejnoseměrný voltmetr s ukazatelem uprostřed, spojovací vodiče, ss ampérmetr s ukazatelem uprostřed, frekvenční generátor (zdroj střídavého napětí s možností změny generované frekvence), polovodičová dioda (lépe LED, ale není nutné), zdroj napětí (pro napájení generátoru), rezistor (jako ochranný, případně pro nastavení velikosti proudu)

### Příprava a provedení

Obvod zapojíme podle schématu na obrázku. Frekvenční generátor připojíme ke zdroji střídavého napětí, přepneme na sinusový průběh, přepínač frekvence nastavíme na nejnižší rozsah. Voltmetr a ampérmetr zapojíme tak, aby se jejich ukazatele vychylovaly na stejnou stranu.



Pozorujeme výchylky voltmetru a ampérmetru. Voltmetr na zdroji detekuje střídavé napětí zdroje, ampérmetr proud v obvodu (je-li připojena LED, její svit ukazuje intervaly, kdy je připojena v propustném směru, a tedy obvodem prochází proud). Ručka ampérmetru se vychyluje jen jedním směrem s prodlevami, kdy je dioda uzavřená (LED nesvítí).

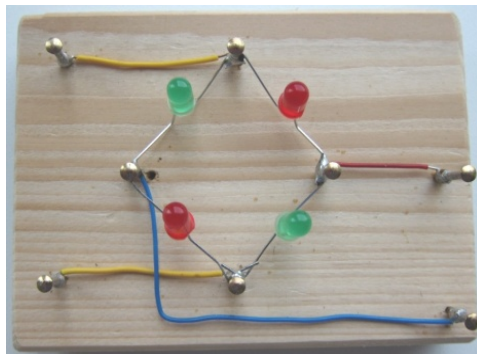
### Závěr

Dioda propouští proud jen jedním směrem, tj. v jedné půlperiodě střídavého napětí, na kterém je dioda připojena.

## Poznámky

- 1) Z didaktického hlediska je vhodnější nejdříve ukázat průběh napětí zdroje, teprve pak připojit obvod a zkoumat proud v obvodu.
- 2) Frekvenci zdroje volíme raději menší, a to i s ohledem na setrvačné vlastnosti ručky přístrojů (i to je vhodné s žáky prodiskutovat, případně později ukázat).

## Dvoucestný usměrňovač (Graetzovo zapojení)



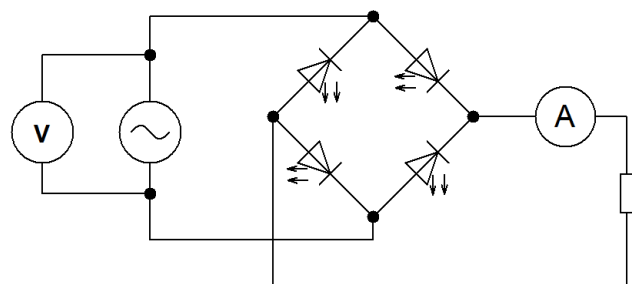
Obr. 8. Ilustrační obrázek Graetzova zapojení na prkénku  
(L. Dvořák: Polovodiče a jejich aplikace. Projekt OPPA)

## Pomůcky

zdroj střídavého napětí nízké frekvence (možno použít frekvenční generátor z minulého pokusu), Grätzovo zapojení z LED, ss voltmetr a ampérmetr (s nulou uprostřed), plochá baterie 4,5 V, spojovací vodiče

## Příprava a provedení

Např. pomocí kontaktního nepájivého pole a červených LED sestavte Grätzovo zapojení a připojte ho ke zdroji střídavého napětí malé frekvence. K tomuto zdroji připojte voltmetr a sledujte, jak se mění napětí na vstupu. Na výstup připojte ampérmetr a sledujte, jak se rozsvěcují a zhasínají jednotlivé diody (resp. páry diod) a jak se mění výchylka ampérmetru. Upravte amplitudu vstupního napětí a jeho frekvenci tak, aby bylo možné co nejlépe sledovat pohyb ruček měřidel.



Pokus proveďte i pomocí většího (demonstračního) zapojení.

**Pozor:** Při větším počtu diod je nutné si uvědomit, že na rozsvícení LED (resp. otevření diody obecně) je třeba jisté minimální napětí, které závisí i na barvě použité diody. Může se vám snadno stát, že zdroj napětí „neutáhne“ ani 4 potřebné diody. Máte-li Grätzovo zapojení realizované červenými LED

(případně máte-li k dispozici generátor vyššího napětí)<sup>1</sup>, můžete jako indikátor „stejnoseměrnosti“ proudu použít další (vhodně zapojenou) svítivou diodu. Že směr proudu na výstupu nezávisí na polaritě zdroje je také možno ukázat připojováním ss zdroje (proud ampérmetrem protéká i při změně polarity připojeného ss zdroje).

### Poznámky

- 1) Žákům je možné předložit schéma můstkového zapojení a nechat je prozkoumat, jak (jakým směrem) bude protékat proud na výstupu. Teprve pak můžeme žákům buď ukázat demonstračně, či ve skupinkách, jak zapojení funguje reálně (tedy jak usměrňuje) – jde vlastně o experimentální verifikaci hypotézy. Také je ale možné (v závislosti na čase, vyspělosti žáků a jejich počtu), nechat žáky, aby si na toto zapojení přišli sami (např. ve skupinách). Úkol může být zadán např. tak, aby vymysleli zapojení, které by způsobilo, aby LED svítla nezávisle na polaritě zdroje. Jde o to vymyslet obvod, který by na výstupu měl stále stejnou polaritu nezávislou na polaritě vstupu. Pak si mohou potvrdit funkci toho, co sami vymysleli. Na druhou stranu je to velice náročný úkol, který není v silách všech studentů ho samostatně splnit. Je to úkol pro opravdu nadané studenty, případně ty, co již s daným zapojením někdy přišli do styku.
- 2) Poměrně zajímavé měření pomocí systému Vernier najdete na <http://www.vernier.cz/experimenty/pazdera/7.24/index.php>. Zde je zapojení rozšířeno i o další prvky, které dále zlepšují usměrňování. To ale překračuje rámec těchto praktik.
- 3) Další rozšíření najdete na stránkách Václava Piskače [https://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/fyzika/usmerneni\\_proudu\\_s\\_led.pdf](https://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/fyzika/usmerneni_proudu_s_led.pdf)

## 5) Fotodioda a fotočlánek

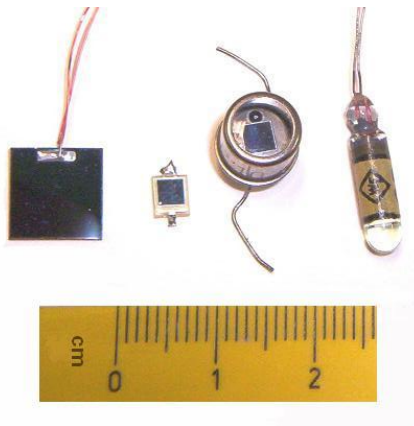
Fotodioda je plošná polovodičová dioda konstrukčně upravená tak, aby do oblasti PN přechodu pronikalo světlo. Není-li přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika fotodiody stejný průběh, jako má charakteristika běžné diody usměrňovací.

Největší rozdíl mezi osvětleným a neosvětleným stavem pozorujeme při zapojení diody v závěrném směru, kdy dochází k téměř lineárnímu růstu proudu při rovnoměrném zvětšování osvětlení (tzv. odporový režim činnosti diody).

Pokud PN přechod osvětlíme, vznikají dopadem fotonů v oblasti přechodu volné nosiče náboje podobně jako u fotorezistoru. V oblasti PN přechodu (hradla) je ale tzv. difúzní napětí, které vzniká díky vytvoření pevných iontů po přechodu elektronů z polovodiče N do polovodiče P (naopak to platí pro díry). Elektrony (vzniklé v PN přechodu díky záření) jsou pak přitahovány ke kladně nabitým pevným iontům v oblasti N, díry se „přemisťují“ do oblasti P. Na diodě pak vzniká tzv. fotoelektrické napětí. Tento jev se nazývá hradlový fotoefekt.

---

<sup>1</sup> Pro typ používaný v praktikách PŠP 2 na KDF jde o zdroj o max. napětí cca 5 V, to omezuje množství zapojených indikačních diod (maximálně jedna dioda místo připojeného rezistoru)



Obr. 9. Ukázka fotodiod

(<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda#mediaviewer/File:Fotodio.jpg>)

Fotodiodám s velkou plochou přechodu se říká sluneční články. Jejich spojováním pak získáme tzv. sluneční baterie.

### **\*Měření fotoelektrického napětí na fotodiodě**

#### **Pomůcky**

Fotodioda, ss milivoltmetr, zdroj světla (lampa), spojovací vodiče

#### **Příprava a provedení**

K fotodiodě připojíme milivoltmetr. Je-li dioda zastíněna, neukazuje milivoltmetr žádné napětí. Při osvětlení fotodiody vznikne v diodě tzv. fotoelektrické napětí. Se zvětšujícím se osvětlením se napětí na diodě zvětšuje.

#### **Závěr**

Při osvětlení fotodiody se dioda chová jako zdroj napětí. S rostoucím osvětlením se toto napětí zvyšuje.

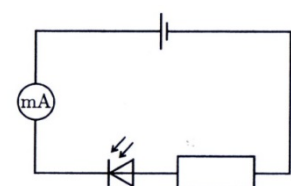
### **\*Zkoumání fotodiody zapojené v závěrném směru**

#### **Pomůcky**

Fotodioda, miliampérmetr, ochranný rezistor, zdroj ss napětí, zdroj světla (lampa), spojovací vodiče.

#### **Příprava a provedení**

Diodu zapojíme sériově s ochranným rezistorem a miliampérmetrem v závěrném směru. Není-li dioda osvětlena, neprochází obvodem měřitelný proud. Při osvětlení fotodiody začne obvodem procházet proud, který je tím větší, čím více je dioda osvětlena.



## Závěr

Osvětlením fotodiody dojde ke vzniku volných elektronů (a tedy i děr) a obvodem začne procházet proud. Generace volných nosičů se zvětšuje s osvětlením, proto roste i proud v obvodu.

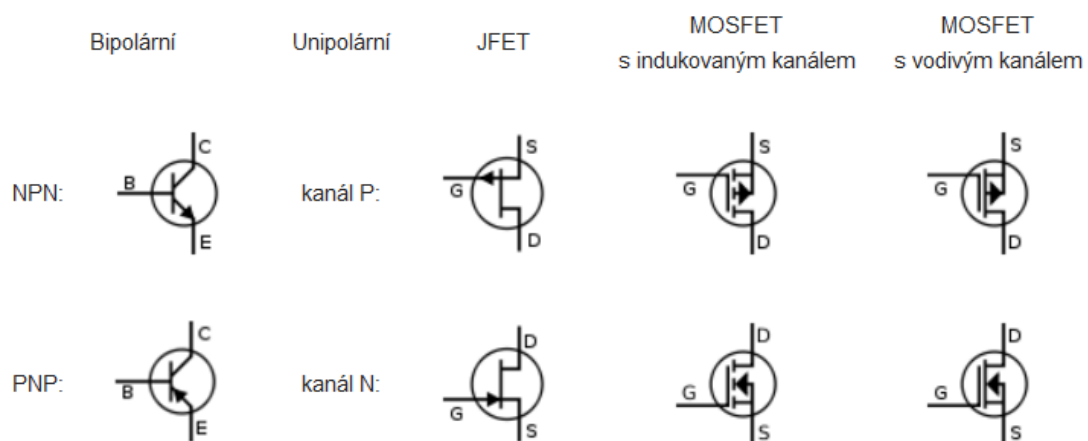
## \*Sluneční článok (sluneční baterie)

V této části si prozkoumejte, případně proměřte, různé hračky a pomůcky, které jsou napájeny slunečními články. Prozkoumejte sériové a paralelní zapojení článků.

## 6) Tranzistor

Tranzistor patří mezi nejdůležitější polovodičové součástky. Rozdělujeme je na dva typy, bipolární a unipolární (podle vnitřní konstrukce a podle toho, zda se vedení proudu účastní oba typy nosičů náboje, nebo jen jeden).

Tranzistory mají zpravidla tři elektrody, které se u bipolárních tranzistorů označují jako kolektor (C), báze (B) a emitor (E), u unipolárních jako drain (D), gate (G) a source (S). Podle uspořádání použitých polovodičů typu P nebo N se rozlišují dva typy bipolárních tranzistorů, NPN a PNP. Unipolární tranzistory se rozlišují na N-FET a P-FET. Bipolární tranzistory (BJT – Bipolar Junction Transistor) jsou řízeny proudem vstupního obvodu (zpravidla bází), unipolární (FET – Field Effect Transistor) jsou řízeny napětím (elektrostatickým polem) na řídicí elektrodě (gate). Asi nejpoužívanějším unipolárním tranzistorem je tzv. MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET-řídicí elektroda je izolována od zbytku tranzistoru oxidem, zpravidla oxidem křemičitým,  $\text{SiO}_2$ ). Výhodou unipolárního tranzistoru je především velký vstupní odpor. Řídicí elektrodou teče zanedbatelný proud, který je ekvivalentní proudu diody v závěrném směru.



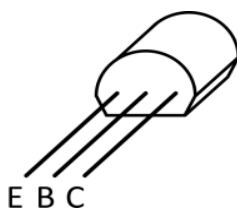
Obr. 10. Schematické značky tranzistorů  
(<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tranzistor>)

Vzhledem k tomu, že jsou ve školských učebnicích uváděny a objasňovány v základním učivu pouze tranzistory bipolární (FET jsou zmiňovány jen okrajově) a také proto, že FET jsou náchylnější ke zničení, budeme se v praktiku zabývat výhradně tranzistory bipolárními.

Ve většině úloh 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.

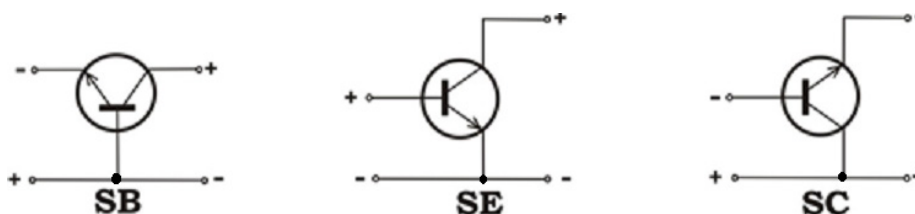
Rozdíl je v maximálních kolektorových proudech: BC547 má povolený proud jen 100 mA. Stačí tedy k ovládní proudu do LED, ale ne třeba už do žárovčky. Pro spínání proudu do žárovek budeme používat tranzistory BC337, ty mají povolen proud až do 800 mA.

Pro výše uváděné tranzistory (a většinu dalších) je pořadí vývodů zřejmé z obrázku (při pohledu ze strany vývodů a je-li plochá strana pouzdra dole, jdou za sebou zleva doprava emitor, báze, kolektor).



Obr. 11. Vývody bipolárního tranzistoru BC547 a BC337  
(L. Dvořák: Polovodiče a jejich aplikace. Projekt OPPA; str. 33)

Bipolární tranzistory můžeme do obvodu zapojit třemi různými způsoby podle toho, jaká elektroda je společná pro vstupní a výstupní část (obvod), a to se společným emitorem (SE), se společným kolektorem (SK) a se společnou bází (SB). Vzhledem k tomu, že se v řadě aplikací používá zapojení SE, budeme se zabývat výhradně tímto zapojením.



obr. 12. Zapojení bipolárního tranzistoru NPN

Tranzistor se používá zejména jako (elektronický) spínač a zesilovač proudu, napětí či výkonu. Ačkoli polovodičové přechody tranzistoru vytvářejí strukturu odpovídající spojení dvou polovodičových diod v jedné součástce, většinu vlastností tranzistoru touto dvojicí diod nahradit nelze. Podstatou funkce tranzistoru je, že malým proudem na vstupu můžeme ovlivňovat velké proudy na výstupu (resp. napětí na rezistoru ve výstupním obvodu). Žákům je také nutné zdůraznit, že zesílení není „samo sebou“, že je nutný vnější zdroj a tranzistor je „jen“ prvek, který řídí proud jím tekoucí.

Pro experimentování je vhodné použít destičky s napájenými součástkami, kontaktní nepájivá pole, ale i stavebnice Boffin a Voltík. (Vyzkoušejte si různé způsoby!)

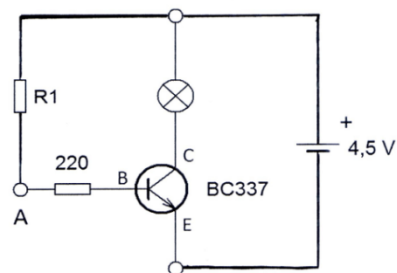
## Tranzistor jako spínač

### Pomůcky

žárovka (3,5 V/0,2 A, příp. 0,3 A), tranzistor BC 337-40, rezistory  $R_1$  (do několika  $k\Omega$ ) případně potenciometr („laditelný“ rezistor), ochranný rezistor  $220 \Omega^2$ , plochá baterie, voltmetr, ampérmetr

### Provedení

Sestavte obvod podle následujícího schématu. Připojte baterii a zapojte různé hodnoty  $R_1$  (místo „pevných“ rezistorů můžete použít vhodný reostat). Vyzkoušejte, při jak velkém odporu rezistoru  $R_1$  ještě žárovka jasně svítí. Změřte také, jaký proud v této situaci teče do báze a jaké je minimální napětí mezi bází a emitorem.



### Závěr

Žárovka jasně svítí, i když  $R_1$  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“, tedy jím prochází proud. (Říkáme také, že je „otevřený“, při techničtějších 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  $R_1$  a  $220 \Omega$ , napětí na něm je rovno napětí baterie minus napětí mezi bází a emitorem. Má-li například  $R_1$  odpor  $4,7 k\Omega$ , bude proud přibližně  $(4,5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}) / (4700 \Omega + 220 \Omega) = 0,8 \text{ mA}$ . (Počítat tuto hodnotu přesněji není třeba, když tolerance odporu levných rezistorů bývá 5 %.)

Z pokusu dále vyplývá, že proud tranzistorem (resp. kolektorem) teče, je-li otevřen PN přechod mezi bází a emitorem (což odpovídá určitému minimálnímu napětí, které známe z voltampérové charakteristiky diody).

### Poznámka

Místo žárovky můžeme použít LED s ochranným odporem  $120 \Omega$ , pro spínání stačí použít tranzistor BC547 (ten by ale žárovku „neutáhl“).

## Tranzistor jako „zesilovač“

V této úloze jde o kvantitativní „dotažení“ předchozího pokusu a o zavedení proudového zesilovacího činitele tranzistoru v zapojení SE.

### Pomůcky

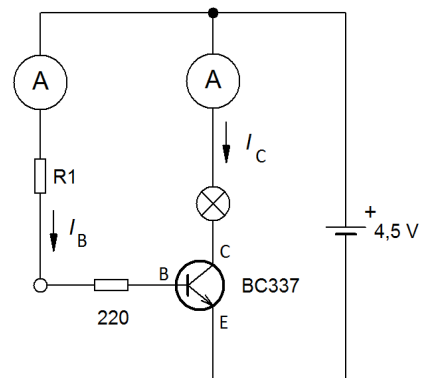
<sup>2</sup> V praktikách PŠP 2 na KDF je „hřebíčkovou“ metodou napájen obvod na destičce

žárovka (3,5 V/0,2 A, příp. 0,3 A), tranzistor BC 337-40, rezistory (do několika k $\Omega$ ), ochranný rezistor 220  $\Omega$ , plochá baterie, ampérmetr (2x)

### Provedení

Sestavte obvod podle následujícího schématu a změřte proud tekoucí bází ( $I_B$ ) a proud tekoucí kolektorem ( $I_C$ ) pro různé hodnoty odporu R1. (Proud kolektorem  $I_C$  měřte od několika mA až do maximálního proudu, tj. kdy žárovka svítí prakticky tak, jako kdyby byla připojena přímo k baterii).

Naměřené hodnoty zapište do tabulky a sestrojte graf závislosti proudu tekoucího kolektorem na proudem tekoucího do báze. Spočtete také poměry  $I_C/I_B$  (zpracujte pomocí PC).



### Závěr

Pro nižší proudy je poměr  $I_C/I_B$  zhruba konstantní. Pro vyšší proudy je už tranzistor plně „otevřen“, proud omezuje již sama žárovka.

Malým proudem do báze můžeme řídit velký proud do kolektoru. Když do báze neteče proud, neteče proud ani kolektorem; tranzistor je „zavřen“. Dostatečně velkým proudem do báze můžeme tranzistor „otevřít“ a na žárovce je prakticky plné napětí baterie.

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. Při vyšších proudech je totiž tranzistor již zcela „otevřen“ resp. „sepnut“ a hodnotu proudu už omezuje jen samotná žárovka, ať proud do báze zvyšujeme jakkoli.

Z počáteční části grafu  $I_C = f(I_B)$  tedy vidíme, že kolektorový proud je prakticky úměrný proudu báze:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Koeficient  $\beta$  v tomto vztahu nazýváme proudový zesilovací činitel tranzistoru.

### Rozšiřující úloha

Výše uvedený proudový zesilovací činitel je hodnota, kterou zobrazují běžné digitální multimetry ve funkci „zkoušečky tranzistorů“. Právě proto si vyzkoušejte proměřit (vyzkoušet) pomocí multimetru alespoň jeden z použitých tranzistorů.

### Poznámka

- 1) V předchozím pokusu jsme se zabývali případem, kdy tranzistor byl buď „plně otevřen“ (protékal proud omezený jen zátěží, v našem případě žárovkou) nebo plně zavřen (neprotékal



téměř žádný proud). Nyní provedený pokus se zabývá chováním tranzistoru mezi těmito mezními stavy, tedy situací, kdy je „částečně otevřen“.

- 2) Proud tekoucí emitorem je prakticky stejný, jako proud kolektorem; je součtem kolektorového proudu a proudu báze. Zátěž (LED, žárovku apod.) bychom tedy mohli umístit i do emitoru, jak tomu také v mnoha případech bývá.

## Zesílení malého proudu

V tomto pokusu ukážeme, jak lze slabý proud zesílit tranzistorem.

### Pomůcky

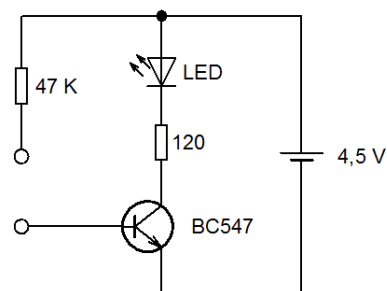
LED, rezistory (47 k $\Omega$ , 120  $\Omega$ ), tranzistor (stačí BC547), plochá baterie, multimetr (miliampérmetr), případně kontaktní nepájivé pole

### Příprava a provedení

Zapojte tranzistor podle schématu. Proud v kolektorovém obvodu bude indikovat svítivá dioda (LED). Spojení můžete realizovat např. pomocí kontaktního nepájivého pole. V rámci pomůcek pro PŠP 2 na KDF je obvod sestaven na destičce pomocí „hřebíčkové metody“.

Jsou-li svorky rozpojené, LED nesvítí. Při spojení svorek se LED rozsvítí.

Změřte proud tekoucí do báze tranzistoru a porovnejte ho s proudem tekoucím svítivou diodou.



Propojte svorky vlastními navlhčenými prsty a sledujte. Zkoušejte propojit svorky suchou špejlí, navlhčenou špejlí, rezistorem o odporu 10 M $\Omega$ . Všimněte si i nepatrného svitu LED.

### Závěr

I při přímém propojení svorek je proud tekoucí do báze tranzistoru jen malý, pouze asi 0,1 mA; svítivou diodou přitom prochází proud podstatně větší, zhruba 20 mA.

Při propojení svorek rezistorem o odporu 10 M $\Omega$  teče do báze tranzistoru proud přibližně 0,4  $\mu$ A; svítivou diodou v tomto případě poteče proud asi 0,1-0,2 mA, při zastínění LED by mělo být vidět, že slabě svítí.

I vodivost lidského těla stačí k tomu, aby proud do báze po zesílení rozsvítil LED. Proud suchou špejlí je typicky příliš malý, než aby na něj toto zařízení reagovalo.

## 7) Experimenty s elektronickými soupravami

Velmi důležité ve výuce je, aby si žáci co nejvíce sami „osahali“ probíranou látku, aby si co nejvíce zákonitostí sami objevili a prozkoumali. A právě elektronika a elektrotechnika k tomu v mnoha oblastech dává příležitost. A to nejen proto, že se mnohé součástky dají poměrně levně sehnat, ale také proto, že na školách bývají různé typy žákovských souprav pro výuku elektroniky od těch nejstarších až po ty nejnovější. Starší ale dosluhují, novější jsou mnohdy poměrně drahé. Na druhou stranu jsou na trhu soupravy levnější, a navíc je mohou znát žáci z domova. Proto je vhodné se s těmito soupravami seznámit alespoň orientačně. V následujících pokusech budete mít k tomu příležitost. Protože se jedná o soupravy, které děti seznamují se základy elektroniky a jsou spíše založeny na pozorování (než na nějakém detailnějším měření), experimenty s nimi nejsou příliš náročné. Na druhou stranu ne vždy žáci proniknou do fyzikální podstaty a funkce jednotlivých prvků. Práce s takovými soupravami může snadno sklouznout k jen k propojování „nějakých“ prvků podle návodu. Zde hodně závisí na učiteli, jak práci s těmito soupravami pojme. Domníváme se ale, že by se měl budoucí učitel fyziky s těmito soupravami seznámit.

### A) Experimenty s Boffinem

Seznamte se nejdříve se stavebnicí Boffin 500 a způsobem zapojování jednotlivých modulů. V návodech jsou přímo obrázky, podle kterých je možné obvody sestavit. Jednotlivé moduly se v mnohých situacích „vrství“ na sebe. O jaké „patro“ ve vrstvení jde, je na obrázcích zachyceno pomocí černých čísel u jednotlivých modulů. V soupravě jsou i „vzpěry“ v podobě koleček (patentek), které slouží jen pro vypořádání jednotlivých vrstev.

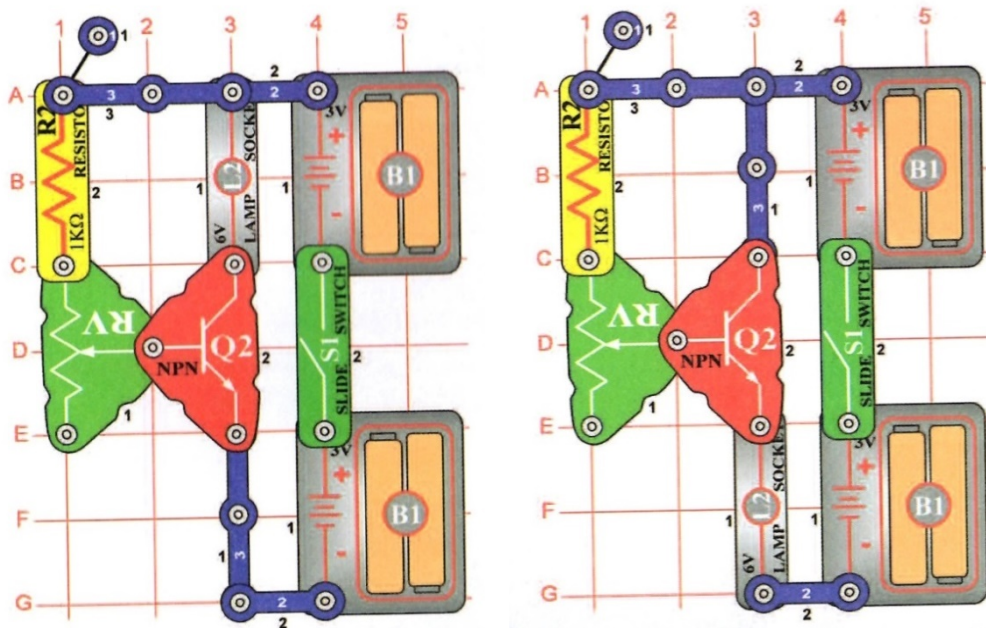
Na rozdíl od jiných tuzemských souprav je v této soupravě použito jiné značení elektronických prvků, a to podle americké normy (na druhou stranu značka bez kolečka, kterou používá stavebnice Boffin, je podle normy správnější než značka v kolečku, která ale v současnosti v mnoha zdrojích přetrvává z dob, kdy měla označovat pouzdro tranzistoru). Zde je vhodná příležitost upozornit žáky na jiné značení, se kterým se mohou v praxi setkat.

Následující pokusy jsou analogii některých výše uvedených zapojení, jde tedy spíše o zopakování základních experimentů pomocí jiných pomůcek.

### Porovnání zapojení

Zapojte postupně obě zapojení podle následujících schémat (liší se jen zapojením žárovky – zde zvané „lamp“ – jednou do emitorového, po druhé do kolektorového obvodu, proto stačí vyměnit jen příslušné moduly). Porovnejte svítivost žárovek v obou případech při stejném nastavení hodnoty rezistoru RV (viz poznámka číslo 3 v pokusu „tranzistor jako zesilovač“, kde se tato problematika diskutovala).

Cílem tohoto pokusu je sestavit jednoduchý obvod s tranzistorem a dále porovnat svět žárovky, která je zapojena v různých místech obvodu.

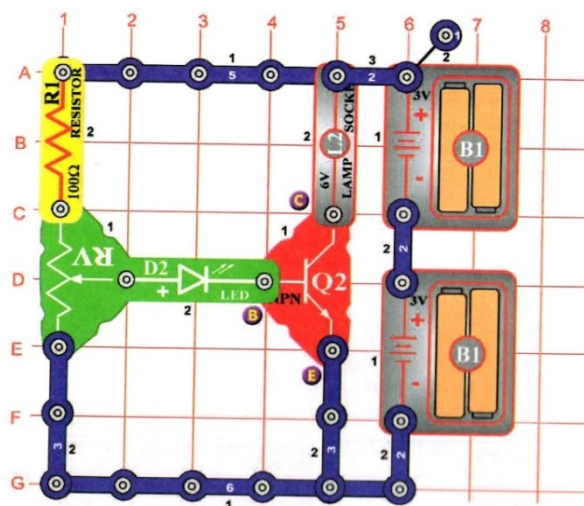


Obr. 13. Porovnání zapojení  
(uživatelská příručka Boffin)

## Jednoduchý obvod SE a s indikací $I_B$ a $I_C$

Sestavte obvod podle následujícího obrázku.

Všimněte si, že je zde rezistor s proměnným odporem zapojen jako potenciometr, resp. pracuje jako dělič napětí. Regulujte velikost napětí mezi emitorem a bází a zkoumejte, jak proud báze (který detekuje svit LED) ovlivňuje proud, který protéká tranzistorem a je detekován žárovkou v kolektorovém obvodu.



Obr. 14. Jednoduchý obvod SE a s indikací  $I_B$  a  $I_C$   
(uživatelská příručka Boffin)

## Závěr

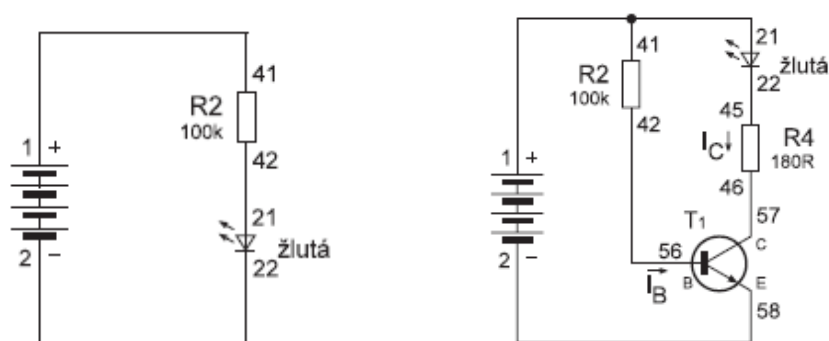
Díky indikaci proudu tekoucího do báze je zřejmé, že proud báze ovlivňuje proud, který teče tranzistorem, a tedy žárovkou.

## B) Experimenty s Voltíkem

Seznamte se se stavebnicí Voltík a způsobem zapojování obvodů v této stavebnici. Dbejte na to, aby vodiče byly správně vloženy a „zazátkovány“, aby nedocházelo k jejich ohnutí, ani k tomu, aby byly odizolovány od zdířek. Pro ilustraci uvádíme několik vhodných zapojení, které je možné s danou soupravou realizovat. Zde jde spíše jen o to vyzkoušet si práci se soupravou.

### Tranzistor jako spínač

Zapojte nejdříve obvod podle levého obrázku (žlutá LED, rezistor o odporu 100 k $\Omega$ , 4 $\times$  články zapojené do připraveného panelu v soupravě). Kvůli velkému odporu rezistoru svítí LED poměrně málo (sotva znatelně).



Obr. 15. Schéma zapojení pokusu „Tranzistor jako spínač“  
(Uživatelská příručka Voltík)

Nyní zapojte obvod podle schématu na pravém obrázku. V tomto zapojení malý proud přes odpor 100 k $\Omega$  tekoucí do báze postačí k otevření („sepnutí“) tranzistoru, a tedy „zprovoznění“ větve s LED, kde je zařazen jen rezistor o odporu 180  $\Omega$ .

Zkuste nyní odpojit vodič ze zdířky 56. LED zhasne, protože se přerušil proud tekoucí do báze a tranzistor se rozepnul.

Chyťte nyní odpojený vodič prsty za odizolovaný konec a druhou rukou se dotkněte zdířky 56. LED se opět rozsvítí (pokud ne, navlhčete si prsty a znovu se dotkněte). Tělo představuje odpor, kterým může procházet proud postačující k sepnutí tranzistoru v tomto zapojení.

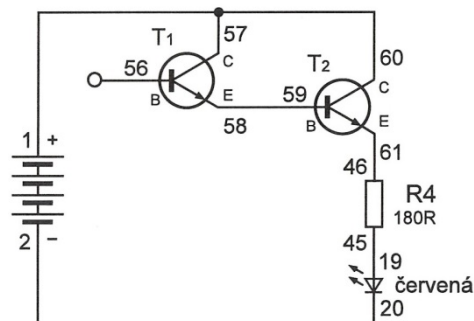
#### Poznámka

Pozor při experimentech s tranzistorem! Dbejte na to, aby proud do báze tekł vždy jen přes odpor!!

## Jednoduchý tranzistorový zesilovač

V mnoha případech, kdy vstupní signál, který máme k dispozici, je příliš malý na to, aby sepnul tranzistor, je nutné propojit několik tranzistorů za sebou, aby se celkové zesílení zvýšilo.

Jednoduchý zesilovač se dvěma tranzistory – tzv. Darlingtonovo zapojení – je na následujícím schématu. Sestavte obvod podle schématu (baterii zatím nepřipojujte) a ke zdiřce 56 (tedy k bázi tranzistoru T1 připojte ještě rezistor o odporu 1 M $\Omega$  (tj. svorka 40), svorka 39 zůstane nezapojena. Teprve teď připojte baterii a dotkněte se prstem zdiřky 39, zašoupejte nohama po podlaze. Chyťte se jednou rukou spolupracovníka a nechte zašoupat nohou jeho.



Po té vložte do zdiřky 39 hřebík a vytvořte tak jakousi anténu. Zkuste se k této „anténě“ přibližovat a vzdalovat např. třením nabitou tyčí (plastovou – postačí nabitě brčko, skleněnou – postačí i nabitá zkumavka). Hřebík slouží pouze k lepší detekci pohybu náboje v okolí. Pokuste se vysvětlit rozdílné chování LED při přibližování a vzdalování kladně a záporně nabitých těles.

### Rozšiřující úloha

Vypojíte-li nyní rezistor a uvolníte-li tak zdiřku 56, poteče do báze přes váš prst větší proud a přístroj bude nepatrně citlivější. Dotkněte se tedy zdiřky č. 56 a přibližte se k nějakému (i vypnutému, ale k síti připojenému) elektrickému spotřebiči. Stejný výsledek bude i tehdy, když se přiblížíte s Voltíkem ke zdi v místech, kde vedou pod omítkou vodiče k vypínači.

### Závěr a vysvětlení

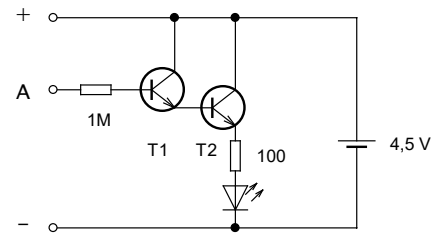
LED se rozsvítí, přestože do báze tranzistoru T1 zdánlivě neteče proud.

Šoupání nohama přivádíme přes prst do báze T1 nepatrný proud, který ovšem stačí k pootevření tranzistoru T1. Zesílený proud vycházející z emitoru T1 a vstupující do báze T2 stačí k sepnutí tranzistoru T2 a rozsvícení červené diody. Celkový proudový zesilovací činitel tohoto zapojení je dán součinem proudových zesilovacích činitelů obou tranzistorů.

V rozšiřující úloze nahradí hřebík naše tělo, které působí jako anténa pro okolní elektromagnetické pole. Přestože se zdá, že při doteku LED svítí trvalým jasnem, vlastně bliká, a to v rytmu změn okolního pole, které mění svoji intenzitu stejně jako napětí a proud v elektrické síti. Toto blikání však oko nepostřehne. Je ho však možné trochu „zviditelnit“ pohybem do stran.

## \*A ještě něco málo na závěr

Zbude-li vám čas, můžete si pomoci hřebíčků a vhodných prvků spájet Darlingtonovo zapojení podle následujícího schématu (vhodným typem tranzistoru je např. BC547C).



### Další informace

Darlingtonovo zapojení a jeho využití pro indikování elektrického náboje je popsáno i v experimentu „Indikace náboje“ v Elektrostatice.

## Literatura

- [1] E. Svoboda a kol.: Pokusy z Fyziky na střední škole 3. Prometheus, Praha 1999.  
ISBN: 80-7196-009-8
- [2] L. Dvořák a kol.: Polovodiče a jejich aplikace. Projekt OPPIA. Praha 2012. ISBN: 978-80-87343-08-1.  
Dostupné na <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppi/#materialy>
- [3] Boffin: Uživatelská příručka
- [4] I. Svoboda, R. Svobodová: Průvodce stavebnicí Voltík II. Ostrava, 1997. Dostupné na:  
[http://voltik.cz/fotky/voltik/v2/prirucka\\_v2.pdf](http://voltik.cz/fotky/voltik/v2/prirucka_v2.pdf)

Tento materiál vznikl v rámci opatření na podporu studijních programů zaměřených na přípravu budoucích učitelů na pedagogických i nepedagogických fakultách veřejných vysokých škol (2021).