



Vzdělávací modul
ČLOVĚK A PŘÍRODA



Vzdělávací modul Člověk a příroda ve vzdělávací oblasti Fyzika

Polovodiče prakticky: Začínáme s LED

Leoš Dvořák



Zvýšení kvality vzdělávání žáků, rozvoje klíčových
kompetencí, oblastí vzdělávání a gramotností

Pedagogická fakulta, Univerzita Karlova, 2019



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
OP Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Vzdělávací modul
ČLOVĚK A PŘÍRODA

Vzdělávací modul Člověk a příroda ve vzdělávací oblasti Fyzika

Polovodiče prakticky: Začínáme s LED

Leoš Dvořák



Univerzita Karlova
Pedagogická fakulta
2019



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
OP Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Polovodiče prakticky: Začínáme s LED

Publikace vznikla v rámci projektu *Zvýšení kvality vzdělávání žáků, rozvoje klíčových kompetencí, oblastí vzdělávání a gramotností*, reg. č. CZ.02.3.68/0.0/0.0/16_011/0000664 (2017–2019), financováno z Evropských sociálních fondů, řešiteli projektu jsou Univerzita Karlova, Masarykova univerzita, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Technická univerzita v Liberci a META, o.p.s.

Publikace je určena ke vzdělávacím účelům.

Hlavní manažer projektu Univerzity Karlovy:

doc. PhDr. PaedDr. Anna Kucharská, Ph.D.

Manažer projektu Masarykovy univerzity:

doc. PhDr. Petr Knecht, Ph.D.

Manažer projektu Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích:

doc. RNDr. Helena Koldová, Ph.D.

Manažer projektu Technické univerzity v Liberci:

doc. RNDr. Miroslav Brzezina, CSc.

Manažer projektu – META, o.p.s.:

PhDr. Kristýna Titěrová

Autor publikace

Leoš Dvořák

Řešitelský kolektiv

Učitelé a pracovníci zapojení v projektu *Zvýšení kvality vzdělávání žáků, rozvoje klíčových kompetenci, oblastí vzdělávání a gramotností* ve vzdělávacím modulu Fyzika.

Garant vzdělávacího modulu člověk a příroda v oblasti Fyzika

Irena Dvořáková

Poděkování

Za podnětné diskuse a inspirativní připomínky a náměty patří dík učitelům a pracovníkům zapojeným v projektu *Zvýšení kvality vzdělávání žáků, rozvoje klíčových kompetenci, oblastí vzdělávání a gramotností* ve vzdělávacím modulu Fyzika a také mnoha dalším učitelům fyziky a kolegům, kteří se účastnili dřívějších seminářů a workshopů. Zkušenosti a podněty získané vzájemnou interakcí a sdílením jsou pro vznik vzdělávacích materiálů, jako je tento, velmi cenné. Inspirací pro některé pokusy a pomůcky byly též shlédnuté příspěvky na řadě českých i mezinárodních konferencí o fyzikálním vzdělávání.

Recenzent

RNDr. Věra Koudelková, Ph.D.

Vydala: Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta v r. 2019

Abstrakt

Publikace prezentuje jednoduché pokusy se svítivými diodami a levné pomůcky, které si s těmito součástkami mohou vytvořit sami učitelé a žáci. Pokusy a pomůcky jsou prezentovány badatelsky orientovaným způsobem a lze je využít při aktivní práci se žáky ve výuce fyziky.

Klíčová slova:

svítivá dioda (LED), jednoduché fyzikální pokusy, levné fyzikální pomůcky, badatelsky orientovaná výuka

Title: Semiconductors in a practical way: starting with LEDs

Abstract

This publication presents simple experiments with light emitting diodes and low-cost tools that may be built by teachers and students themselves. Experiments and tools are presented in an inquiry based way and can be used in active physics teaching and learning.

Keywords:

light emitting diode (LED), simple physics experiments, low-cost physics tools, inquiry based education

Obsah

Předmluva: pro koho je tato knížka a jak ji číst.....	6
1. ÚVOD: PROČ LED.....	7
2. JAKÉ LED POUŽÍT A NA CO SI DÁT POZOR.....	9
3. ZKOU MÁME VLASTNOSTI LED - ZATÍM BEZ MĚŘENÍ.....	12
3.1. Připojujeme LED k baterii.....	12
3.2. Dvě LED v sérii.....	13
3.3. Tři LED v sérii	15
3.4. A co LED jiných barev?	16
4. JEDNODUCHÁ MĚŘENÍ A CO Z NICH MŮŽEME ZJISTIT.....	18
4.1. Měříme napětí na LED.....	18
4.2. Proud tekoucí LED a co s ním souvisí.....	20
4.3. Různý proud, skoro stejná napětí - aneb když Ohmův zákon neplatí.....	22
4.4. * Proud v závěrném směru.....	24
5. DALŠÍ ZAJÍMAVOSTI	26
5.1. Malá „záhada“: dvě různé LED paralelně	26
5.2. „Neviditelné světlo“	27
5.3. Díváme se do LED.....	29
5.4. * LED dává napětí.....	31
6. K ČEMU LED VYUŽÍT.....	32
6.1. Dekorační a jiná světélka	32
6.2. Indikace proudu.....	32
6.3. Jednoduchá zkoušečka	33
6.4. Model můstkového usměrňovače.....	34
6.5. * Skutečné osvětlení	36
6.6. Skládání barev.....	38
7. ZÁVĚR - CO JSME „VYBÁDALI“ A KDE HLEDAT DALŠÍ INFORMACE	39
LITERATURA	40

Předmluva: pro koho je tato knížka a jak ji číst

Jste učitel či učitelka fyziky na základní nebo střední škole? Pak tato knížečka je určena právě pro vás.¹ Nezáleží přitom na tom, zda už polovodiče máte rádi a leccos o nich víte, nebo vám tato oblast dosud není příliš vlastní².

Máte-li ohledně polovodičů a toho, jak o nich učit, dost znalostí a zkušeností, pak následující stránky asi prolistujete rychle – a snad si v nich najdete některé nápady, jak věci dělat a učit jednoduše, prakticky a na základě pokusů, tedy řekněme trochu „badatelsky“. Pokud jste se tématu polovodiče zatím spíše vyhýbali, doufám, že zde najdete poučení dle možnosti přístupnou a srozumitelnou formou. Alespoň jsem se snažil, aby tomu tak bylo.

Pokud se vám zdá, že na následujících stránkách je mnohem víc věcí, než můžete ve výuce stihnout probrat, neděste se prosím. Rozhodně vám nechci vnucovat, že vše zde uvedené je třeba „odučit“.³ Berte informace a pokusy popsané v této knížce jako inspiraci, jako náměty, co lze dělat, ať už v běžné výuce, ve volitelných seminářích nebo třeba v rámci nějakého projektu. Řada informací je tu také pro vás samotné, pro určitý nadhled.⁴ Některé partie, které můžeme chápat jako rozšiřující a určené spíše pro zájemce, jsou ve svých nadpisech označeny hvězdičkou.

Obecná rada zní: V knížce si listujte, přeskakujte, jak je libo, podle potřeby se případně vracejte. Úplně „super“ bude, pokud si popsané pokusy vyzkoušíte prakticky.⁵ Pokusy, které jsou tu uvedeny, jsou velmi jednoduché a nenáročné na pomůcky a na finance⁶. Snažil jsem se text doplnit dostatečným množstvím obrázků resp. schémat a fotografií; snad vás zaujmou a nalákají k pokusničení.

Jak vidíte i na této stránce, text obsahuje hodně poznámek pod čarou. Někdy jde o upřesnění jednodušších formulací v hlavním textu (aby si na své přišli i puntičkáři a „šťourové“), jindy naopak o jednodušší výklad nebo prostě o doplňující „řeči“. Takže i poznámky procházejte nebo ignorujte podle vlastního uvážení.

Těm z vás, kdo se podle této knížky pustíte do aktivního experimentování, držím palce a přeji, ať si přitom užijete hodně radosti – se svítivými diodami a s fyzikou vůbec.

V Praze, 30. 3. 2019

Leoš Dvořák

¹ Jste-li kdokoli jiný, a knížka vás zaujme, je pro vás také.

² Třeba proto, že jste fyziku původně nestudovali, ale její výuka na vás nějak „padla“.

³ Seznamování se svítivými diodami je sice v této knížce řazeno tak, aby mělo rozumnou návaznost, ale určitě nemusíte sami nebo se svými žáky projít vše. Vybírejte si.

⁴ A samozřejmě proto, že si jako autor myslím, že jde o věci hrozně zajímavé. ☺

⁵ Můžete tak sami na sobě aplikovat badatelskou metodu. (Já to dělám také tak.)

⁶ Chceme-li působit světácky, můžeme pro ty pokusy používat anglický termín „low-cost“.

1. Úvod: proč LED

Polovodičové prvky jsou dnes možná „neviditelnou“, ale důležitou součástí světa kolem nás a moderní civilizaci bychom si bez nich asi už nedokázali představit. Nejde jen o smartphony a osobní počítače: s polovodiči se setkáme v bezpočtu přístrojů v domácnostech, jsou v autech, všech možných prostředcích hromadné dopravy, takřka v každém průmyslovém stroji, v lékařských přístrojích... dá se říci, že skoro všude, kde si vzpomeneme.⁷

Samozřejmě, polovodiče nejsou všechno. Když potřebujeme nazdvihnout těžký balvan, tak nejspíš přijde ke slovu stará dobrá páka, a v ní žádné tranzistory nejsou. Ale kdybychom na to zdvihnutí povolali jeřáb, tak už v něm určitě nějaké najdeme. ☺

Je tedy asi rozumné⁸ ve škole ve fyzice žáky a studenty s polovodiči a jejich vlastnostmi alespoň zčásti seznamovat. Pokud je to seznámení pouze teoretické, pak podle zkušeností jde leckdy „jedným uchem tam a druhým ven“. Tím nechceme brojit třeba proti teorii vysvětlující vlastnosti PN přechodů. Ovšem není nad to, si funkci a vlastnosti alespoň některých polovodičových součástek vlastnoručně „osahat“.⁹

A proč začínat se **svítivými diodami**, tedy s **LED**¹⁰? Důvodů je víc. Jednak jde o jeden z nejjednodušších polovodičových prvků.¹¹ Přitom na něm lze zkoumat řadu vlastností charakteristických pro polovodiče, například to, že vede proud jen jedním směrem nebo že jeho charakteristika je nelineární¹². Ale hlavně: LED naprosto jasně a pozorovatelně *něco dělá*, tedy **svítí**¹³. A jakmile ve výuce něco svítí, bliká (nebo bzučí, hraje, bouchá apod.), tak to přitahuje pozornost a zvyšuje zájem a motivaci, zřejmě u všech věkových skupin.

Navíc to, že LEDky svítí, se dnes využívá nejen v nejrůznějších kontrolkách, ale už i pro osvětlování. Díky zákazu obyčejných žárovek a postupnému poklesu cen se „LED žárovky“¹⁴ stávají už běžnou věcí i v našich domácnostech. Takže je o důvod víc se s „LEDkami“ blíže seznámit.

V dalších kapitolkách se se svítivými diodami budeme seznamovat nikoli teoreticky, ale prostřednictvím pokusů, tedy stylem „badatelsky zaměřené výuky“. Budeme přitom z větší části používat postup, který se osvědčil na seminářích pro učitele fyziky v rámci projektu Heuréka. Nikde ovšem není řečeno, že jde o jediný správný postup, vše dále uvedené proto prosím berte jako náměty. Jejich uplatnění samozřejmě záleží na konkrétní situaci na vaší škole a ve vaší výuce, na počtu

⁷ Kolik je kolem nás polovodičů, si už běžně vůbec neuvědomujeme. Navíc, pokud bychom počítali každý tranzistor nebo podobnou polovodičovou strukturu třeba jen v těch chytrých telefonech, tak jejich počet jen v Čechách a na Moravě jde do bilionů a spíš ještě výrazně výš. Každý procesor (o polovodičových pamětech nemluvě) v chytrém telefonu má totiž v sobě několik miliard tranzistorů.

⁸ nezávisle na tom, jaké zrovna platí RVP či ŠVP...

⁹ Podle zkušeností autora tohle oceňují současní i budoucí učitelé fyziky a podle zkušeností učitelů to ve fyzice oceňují i žáci a studenti na všech stupních škol.

¹⁰ Asi není nutno připomínat, že „LED“ je zkratkou z anglického názvu „Light Emitting Diode“, tedy doslovně přeloženo „světlo emitující dioda“. Je ale dobře si uvědomit, že pokud někdy řekneme „LED dioda“, je to vlastně nesmysl; je to, jako bychom řekli „MŠMT ministerstvo“ nebo „ZŠ škola“. ☺ (Ale přiznávám, že jsem možná občas tento termín z úst taky někdy vypustil – tedy to „LED dioda“, ta další výše zmíněná slovní spojení ne. ☺) Hovorově občas užíváme slangový termín „ledka“ (písemně by se asi psal „LEDka“), ale mezi spisovné termíny samozřejmě nepatří.

¹¹ Pro žáky to může být patrné už z toho, že má jen dva vývody, tedy (hovorově řečeno) dvě „nožičky“.

¹² Nebojte se, nebudeme zde tvrdit, že by se žáci na ZŠ museli učit o voltampérové charakteristice, věci budeme vysvětlovat a zkoumat daleko jednodušeji. Ale uvidíme, že se LED svým chováním opravdu liší i od některých dalších polovodičových součástek, které mají „jen dvě nožičky“, konkrétně od fotorezistorů a termistorů. (Na ty se můžeme dívat jako na „skoro obyčejné rezistory“.)

¹³ Překvapivě, když jde o svítivou diodu... ☺

¹⁴ Tímto se omlouvám prof. Valentovi z naší fakulty, který termín „LED žárovka“ velice nemá rád a správně upozorňuje na jeho nesmyslnost: v obyčejné žárovce je vlákno zahřáté na vysokou teplotu a slovo „žár“ je tedy pro název žárovky rozumným základem. Ve svítivé diodě ovšem nic rozžhaveného není. Bohužel se termín „LED žárovka“ používá poměrně běžně a obávám se, že prof. Valentou navrhovaný termín „lumidka“ nemá moc šanci se prosadit.

hodin, které máte k dispozici, na konkrétní třídě a konec konců na tom, jaký prostor chcete polovodičům ve své výuce dát - a tedy i na tom, jak vás osobně tato problematika zaujala. Vše je tedy jen na vás. Ale přirozeně se vás budu na následujících stránkách snažit přesvědčit, že pokusničit se svítivými diodami je rozhodně zajímavé a stojí to za to.

2. Jaké LED použít a na co si dát pozor

V obchodech s elektronickými součástkami lze dostat LED nejrůznějších **průměrů**¹⁵, od 3 mm po 20 mm; výkonové LED mohou být ještě větší. V praxi se osvědčily LED průměru 5 mm a snad ještě lépe průměru 10 mm – na větší LED je prostě i z dálky lépe vidět a lépe přitáhne pozornost.

Aby bylo světlo LED dobře vidět, musí mít svítivá dioda dostatečnou **svítivost**. Bohužel, sortiment svítivých diod se v prodejnách a e-shopech průběžně dost mění, takže nelze jednoduše doporučit určitý typ; kdybychom ho sem uvedli, mohla by za pár měsíců být taková informace nepoužitelná. Při koupi je proto vhodné dívat se na svítivost daného typu LED. Svítivost se udává v mcd¹⁶ a bývá velmi různá, od jednotek mcd až po tisíce mcd (tedy až po jednotky kandel). Přitom cena různě svítivých typů může být prakticky stejná. Ovšem málo svítivé LED budou při školních pokusech špatně vidět, proto je vhodné nakupovat LED se svítivostí minimálně stovek mcd, řekněme od 300 až 400 mcd.¹⁷ LED se svítivostí mnoha tisíc mcd¹⁸ by již mohly být nepříjemně jasné i při pokusech ve škole; hodí se už spíš k osvětlování. Navíc se u nich vysoké svítivosti obvykle dosahuje tak, že jejich světlo je soustředěno jen do velmi úzkého kuželu a to pro naše pokusy také nebude vhodné; ze strany by jejich světlo bylo vidět výrazně méně.

Poznamenejme ještě, že často se LED o vyšší svítivosti označují jako „vysokosvítivé“¹⁹. Ovšem tento termín není nijak přesně definován, takže pokud v obchodě s elektronickými součástkami požádáte o vysokosvítivé LED, nemáte nijak zaručeno, co vlastně dostanete.

Pokud budete chtít LED ve své výuce používat, napadá vás teď asi otázka, **kde a jak nakupovat**. Nechceme zde dělat reklamu žádnému prodejci²⁰, takže rada může být jednoduchá: zadejte do Googlu třeba „LED červená 10 mm“ a uvidíte, jaké odkazy dostanete.²¹ A z rozumných prodejců si vyberte. Doporučit lze prodejce resp. e-shop, kde je o dané součástce dostatek informací – minimálně potřebujeme informaci o té svítivosti. Některé velké e-shopy umožňují „filtrovat“ seznam nabízených součástek, tedy zaškrtnout, jaký průměr, barvu, svítivost a další parametry si přejete, takže nemusíte prohlížet dlouhý seznam součástek. Namátkou uvedu dva tři e-shopy, kde tomu tak je: Svět součástek [2] (s tím nemám zkušenost, ale vypadl na mě z Googlu jako první odkaz a vypadá profesionálně), GES electronic [3] (tam jsme občas něco nakoupili v kamenné prodejně) a GM electronic [4] (s tím mám zkušenost největší, ale nejspíš je to tím, že prodejnu máme blízko). Všichni tři uvedení prodejci nabízejí několik set různých typů svítivých diod²², nepochybně se ale zdaleka nemusíte omezovat jen na ně.

Další z důležitých vlastností LED je samozřejmě barva, přesněji řečeno **barva jejich světla**. Pro dále uváděné pokusy a konstrukce se hodí LED červené, zelené, modré a bílé (a pak taky ultrafialové a infračervené, o těch se zmíníme dále). Můžete ovšem použít i LED žluté, oranžové, modrozelené ev. další, které prodejci nabízejí.²³ Pozor, barva světla není dána **barvou pouzdra**, to může být i čiré.²⁴

¹⁵ Některé LED mívají pouzdra i hranatá nebo oválná, ale nejběžnější bývají pouzdra kulatá, proto se zde omezíme jen na ně.

¹⁶ Milikandelách, tedy v tisícínách kandely. Dobrá příležitost, zopakovat si jednu ze základních jednotek...

¹⁷ Proč se vyrábějí i málo svítivé LED, je asi jasné: Pokud má jít o nenápadnou kontrolku v nějakém přístroji, nestojíme o to, aby nás oslňovala vysokým jasem.

¹⁸ V nabídce lze najít typy se svítivostí třeba 12 000 mcd, ale i 30 000 mcd.

¹⁹ Také se lze setkat s termínem „supersvítivé“.

²⁰ Navíc v různých regionech je určité řada různých prodejců, o nichž nemám tušení.

²¹ Nežadávejte samotné slovo LED – na něj dostanete spoustu odkazů na ledové kostky...

²² A všichni tři danou kategorií označují jako „LED diody“. ©

²³ Některé LED mohou být i dvoubarevné, pak mají obvykle tři vývody. V dále uváděných pokusech s nimi pracovat nebudeme.

²⁴ Takže LED vyzařující červené světlo mohou mít pouzdro buď červené, nebo čiré.

U přesnějších údajů k LED prodejci často uvádějí **vlnovou délku** vyzařovaného světla. Světlo LED ovšem není striktně monochromatické, takže uváděný údaj znamená *dominantní vlnovou délku*, na níž LED září nejjasněji.²⁵



Obr. 1. Různé typy LED

Dodejme, že detailní popis vlastností dané LED obvykle přináší dokumentace výrobce, kterou prodejci označují jako **datasheet**. Obvykle bývají v angličtině, ovšem u dodavatelů z Dálného východu nejsou výjimkou ani jazyky s písmem výrazně odlišným od latinky. Pak může být zjišťování parametrů dané součástky záležitostí trochu detektivní. Ovšem bez luštění podrobných informací se většinou obejdeme, takže datasheety obecně můžeme brát spíš jako záležitost pro technicky zaměřené jedince.

Které typy LED v dále uváděných pokusech **nebudeme používat**. Pro dále popsané zkoumání vlastností LED si nepořizujte svítivé diody, u nichž je napsáno, že jsou pro určitý rozsah napětí, například 5 až 20 V. Nebo může jít o LED na mnohem vyšší napětí, než je pro LED typické²⁶, např. na 12 V. Takovéto součástky v sobě mají další komponenty, které stabilizují proud, jež jimi protéká; nejde tedy vlastně o samotné LED. Podobně jsou další polovodičové komponenty v blikajících LED, ty také v následujících pokusech využívat nebudeme. A nebudeme také přímo pracovat se svítivými diodami napájenými přímo ze sítě. (Tedy s těmi, které mají tvar běžných velkých žárovek.) Ty v sobě také obsahují další elektroniku.

Na závěr asi stojí za to zmínit se alespoň stručně o jedné vlastnosti LED, která sice není fyzikální, ale přece jen pro nás může být důležitá. Je jí **cena**. Opět nejde tvrdit nic definitivního, ale ceny běžných LED jsou několik Kč; při nákupu více kusů (obvykle od 10 výše) bývá cena poněkud nižší. V minulosti bývaly dražší ultrafialové LED, v současnosti se však jejich cena přiblížila běžným svítivým diodám; podobně levné jsou i infračervené LED.

²⁵ Spektrum světla svítivé diody ovšem zahrnuje i složky s vlnovou délkou až o několik desítek nm vyšší nebo naopak nižší. Některé typy LED mohou mít šířku vyzařovaného spektra výrazně menší, ovšem i tak nejde o monochromatické světlo, které známe třeba u laserů. (Výjimkou jsou tzv. laserové diody, ale ty v pokusech popsaných v této publikaci používat nebudeme.)

²⁶ Tedy asi 1 až 3,5 V.

Na co si dát pozor

Některé základní zásady už byly uvedeny v publikaci [5], stojí však za to je připomenout:

- Vývody LED neohýbejte těsně u pouzdra.²⁷
Vývody ohýbejte až několik mm od pouzdra a raději ne úplně ostrým ohybem.
- LED nepřipojujte přímo na plochou baterii nebo jiný zdroj napětí.²⁸
Proud diodou omezte vhodným sériově zapojeným rezistorem (viz dále).
- Pokud budete vývody LED pájet, nepájejte příliš dlouho (déle než pár sekund), součástka by se také mohla zničit vysokou teplotou.

Pokud při pokusech vy nebo vaši žáci nějakou LED zničíte, nic hrozného se neděje. Kdo nic nedělá, nic nezkaží, a jak už bylo řečeno, jde o součástky relativně levné. Přesto je však nemusíme trápit a ničit zbytečně.

Jak LED a jednoduché konstrukce s nimi zapojovat

V nejjednodušších pokusech můžete LED a další součástky propojovat přímo pomocí **vodičů s krokosvorkami**²⁹, viz obrázky níže.



Někdy by stačilo vývody např. LED a sériově zapojeného rezistoru skroutit dohromady, ale pokud bychom vývody součástek často zkrucovali a rozkrucovali, tak nám možná příliš dlouho nevydrží.

Součástky také můžeme propojovat pomocí **nepájivých kontaktních polí**. Do jejich otvorů se vývody součástek prostě zastrčí³⁰, podobně do nich můžeme zasouvat i přírodní dráty například od zdroje napětí (třeba ploché baterie). V nepájivém kontaktním poli je vždy řada kontaktů vodivě propojena. Nepájivá pole se hodí pro rychlé pokusné konstrukce, pole s velkým počtem kontaktů jsou však poměrně drahá; naštěstí existují i pole menší (v současnosti s cenou pod 30 Kč).

V praxi se pro pokusy osvědčilo připájet součástky na **mosazné hřebíčky zatlučené do malých dřevěných destiček** – bližší popis viz [5], příklady vytvořených jednoduchých pomůcek budou i s fotografiemi uvedeny dále.

²⁷ Ohněte vývod několikrát tam a zpět těsně u pouzdra a nejspíš se zlomí – získáte tak exemplář do sbírky nepoužitelných součástek.

²⁸ Samozřejmě, pokud nejde o speciální LED, které v sobě už mají zapojeny další komponenty pro omezení proudu. Připojení k baterii krátkodobě (třeba na sekundu) lecky vydrží i běžné malé LED, ale přece jen se tím ničí. Při delším připojení LED k baterii nebo akumulátoru se LED zahřívá velkým proudem, často začíná svítit méně a méně až třeba přestane svítit vůbec. U malých LED někdy přehřátím odletí část plastového pouzdra LED – a to poměrně rychle, pozor na oči! (Fotografii takto zničené LED můžete vidět v [5].)

²⁹ Zadáte-li do Googlu heslo „propojovací kabel s krokosvorkami“, objeví se hned několik dodavatelů.

³⁰ Zpočátku je někdy potřeba použít trochu větší sílu (pozor, ať vývody součástek nechtě neohnete), pak se obvykle kontakty v otvorech „ochodí“. (Záleží samozřejmě na kvalitě daného nepájivého pole.)

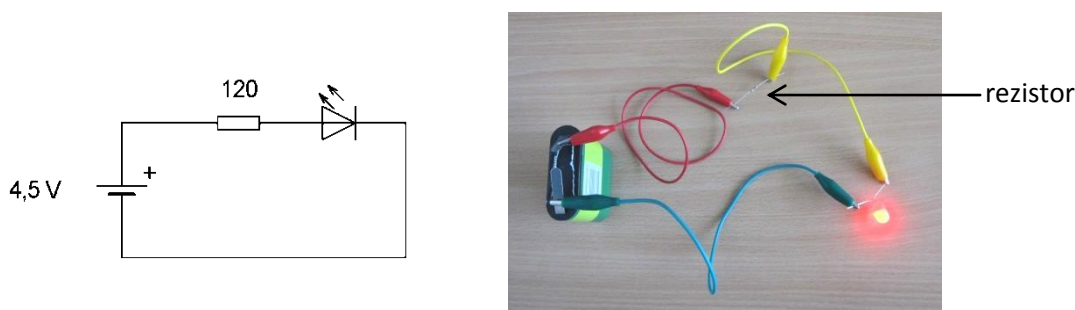
3. Zkoumáme vlastnosti LED – zatím bez měření

Jak už jsme naznačili výše, vlastnosti svítivých diod budeme zkoumat „badatelsky“, tedy pomocí pokusů. Pro základní pokusy nepotřebujeme ani žádné měřicí přístroje.

3.1. Připojujeme LED k baterii

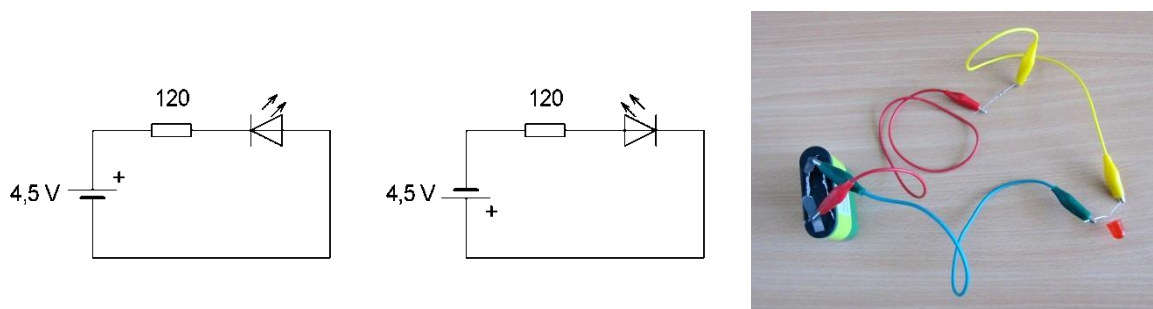
Základním úkolem je rozsvítit LED. Zdrojem bude plochá baterie.³¹ Ovšem **pozor! Nepřipojujte svítivé diody přímo k ploché baterii – napětí 4,5 V je na ně moc velké!**³²

Do série s LED je potřeba zapojit rezistor o vhodném odporu. Pro napětí baterie 4,5 V je vhodný odpor 120 Ω.³³ Schéma zapojení i možnou realizaci pokusu ukazuje obr. 2.



Obr. 2 Připojení LED k ploché baterii

Svítili zapojená LED? Pokud pokus provádí víc skupinek žáků, některým asi svítí, některým ne, i když je obvod uzavřený. Nejspíš je to tím, že LED zapojili s opačnou polaritou, případně otočili polaritu baterie, viz obr. 3.³⁴ Těm, jimž LED svítí, můžeme naopak poradit, ať zkusí, co se stane, když polaritu LED nebo baterie otočí.



Obr. 3 Při opačné polaritě svítivé diody nebo baterie LED nesvítí

³¹ S plochými bateriemi se v pokusech pracuje pohodlně, je ale otázkou, jak dlouho ještě budou v obchodech dostupné. Běžnější jsou tužkové články nebo 9 V baterie. V dalším si ukážeme, jak v našich pokusech používat i tyhle další zdroje. Místo ploché baterie můžete také použít tři 1,5 V články v sérii ve vhodném držáku (dá se koupit).

³² Výše už jsme uvedli, že by se LED ničily velkým proudem.

³³ Lze použít odpory v rozmezí 100 až 150 Ω. K tomu, jak velký odpor použít, se ještě vrátíme dále. Rezistor stačí miniaturní, koupíme ho také v prodejnách s elektronickými součástkami.

³⁴ Samozřejmě, za tím, že LED nesvítí, mohou být i jiné příčiny: vybitá baterie, přerušovaný spojovací vodič nebo zničená LED. V dalším budeme předpokládat, že máme zkontrolováno, že podobné triviální chyby v zapojení nejsou.

Vidíme tedy, že při jedné polaritě LED svítí, při druhé nikoli. **Co z toho můžeme usoudit?** Jinými slovy, co jsme o vlastnostech LED tímto pokusem zjistili?

Častou odpovědí učitelů (kteří již o dané problematice leccos vědí) je „**svítivou diodou prochází proud jen jedním směrem**“. Ale pozor! **Tohle ještě nevíme!**

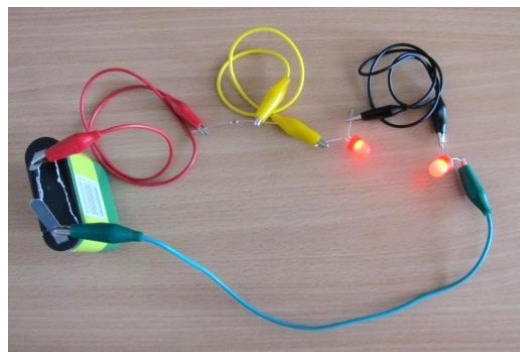
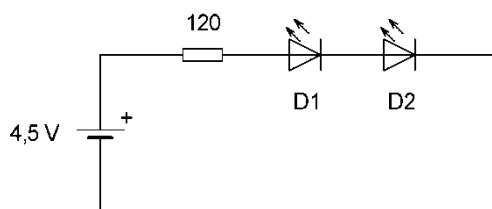
Zjistili jsme jen, že při jedné polaritě LED svítí (takže asi prochází proud, mohli bychom se o tom přesvědčit ampérmetrem) a při druhé polaritě nesvítí. **Co když ale proud i při té obrácené polaritě prochází a jen to LED nedává najevo svitem?**

Máme tedy vlastně dvě možnosti - v duchu badatelsky orientované výuky můžeme říci **dvě hypotézy**: 1) Při polaritě dle obr. 3 proud LED neprochází, nebo 2) při dané polaritě proud prochází, jen LED nesvítí. Mezi těmito hypotézami bude potřeba rozhodnout. Mohli bychom to udělat pomocí zmíněného ampérmetru, ale půjde to i bez něj.

3.2. Dvě LED v sérii

Pro tento pokus použijte dvě LED **červené barvy**.³⁵ Zapojte je do série se stejnou polaritou, jak to ukazuje obr. 4. Poznamenejme, že polaritu LED poznáme podle délky jejich vývodů. U běžných typů platí, že když je delší „nožička“ směrem ke kladnému pólu zdroje, proud prochází a LED svítí.

V zapojení podle obr. 4 jsou obě LED zapojeny tímto směrem a obě tedy svítí.



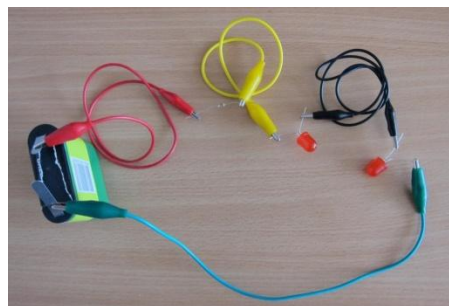
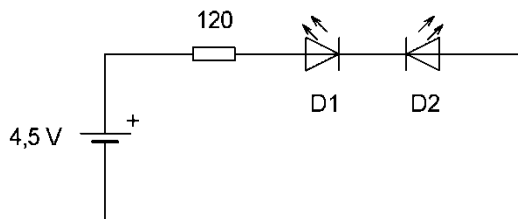
Obr. 4. Dvě LED v sérii se stejnou polaritou: obě svítí³⁶

Nyní jednu z LED otočte, jak to ukazuje obr. 5. Nebude svítit ani jedna z diod. Že nesvítí dioda označená ve schématu jako D2, nás nepřekvapí, to už známe z dříve provedeného pokusu (viz obr. 3). Proč ale nesvítí dioda D1?³⁷

³⁵ Proč červené, vysvětlíme dále.

³⁶ Poznamenejme, že v reálném pokusu samozřejmě nemusí být jednotlivé kablíky stočené, tak jak to ukazuje fotografie na obrázku vpravo. Kablíky jsou zatočené jen proto, aby fotografie byla přehledná a nebyla jen zmetí propletených kablíků.

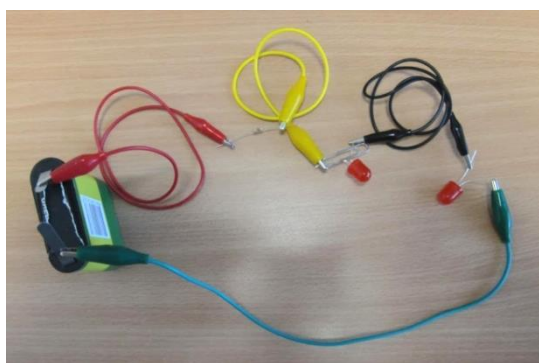
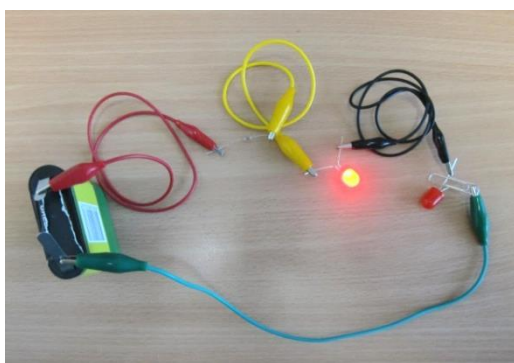
³⁷ Zkuste si na tuto otázku odpovědět sami, dřív než přejdete k textu pod obrázkem.



Obr. 5. Má-li jedna LED opačnou polaritu, žádná LED nesvítí

Ano, dioda D1 nesvítí, protože obvodem neprochází proud. Fakticky můžeme diodu D1 považovat za indikátor toho, jestli obvodem prochází proud, nebo ne. Teď už víme, že dioda D2 proud nepropouští – je to jako bychom v místě dané diody obvod prostě přerušili nebo tam dali vypnutý vypínač. Říkáme, že D2 je zapojena **v závěrném směru**.

Pokud diodu D2 zkratujeme třeba kovovou kancelářskou sponkou, jak to ukazuje fotografie na obr. 6 vlevo, dioda D1 se rozsvítí. (Je zapojena **v propustném směru**, proud jí tedy prochází.³⁸)



Obr. 6. V zapojení podle obr. 5 zkratujeme jednu nebo druhou diodu

Když zkratujeme diodu D1, jak ukazuje pravá fotografie, tak se D2 nerozsvítí – samozřejmě, je zapojena v závěrném směru.

Naším pokusem jsme tedy rozhodli, která z hypotéz uvedených na konci části 3.1 platí: Je to první z nich, při polaritě podle obr. 3 proud neprochází.

* Malé upřesnění, aneb všechno je o trochu složitější

Předchozí úvaha do velké míry platí, ale... Co když nějaký proud diodou D2 zapojenou v závěrném směru přece jen prochází, ale je tak malý, že nestačí rozsvítit diodu D1? Takovou námitku v principu může vznést dostatečně štouravý žák.³⁹

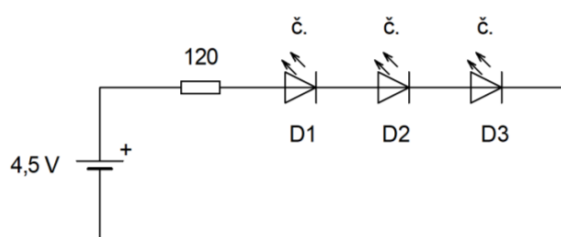
³⁸ Asi nemusíme zdůrazňovat, že ve schématech značka diody svým tvarem připomínajícím šipku ukazuje, kterým směrem může proud diodou procházet.

³⁹ Asi ne každý „štoura“, ale chytrý a hloubavý žák ano, zejména pokud o dané problematice něco ví.

Popravdě řečeno, takový „štoural“ má pravdu! Diodou v závěrném směru opravdu teče nepatrný proud, který ovšem nestačí k pozorovatelnému rozsvícení diody D1.⁴⁰ Zjednodušeně říkáme, že dioda v závěrném směru proud nevede a většině žáků na úrovni ZŠ asi nemusíme „motat hlavu“ tím, že nepatrně přece jen vede. Ale konstruktéři elektronických zařízení si proud v závěrném směru samozřejmě musí být vědomi a musí vědět, kdy je s ním třeba počítat.⁴¹ Pro zájemce se na proud v závěrném směru ještě podíváme v kapitole 4.4.

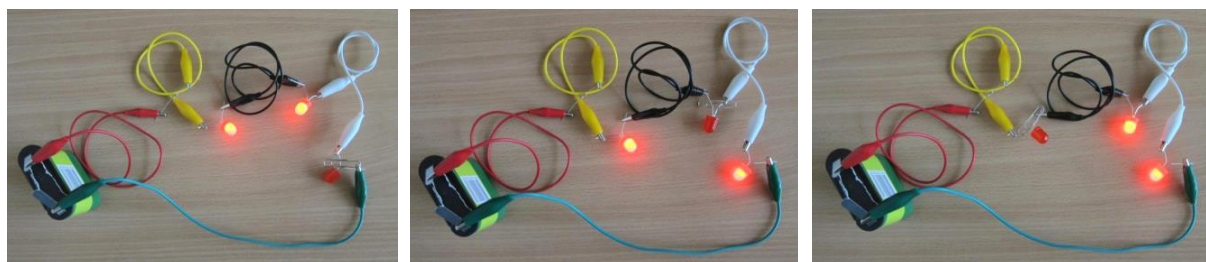
3.3. Tři LED v sérii

Když svítí dvě LED v sérii, proč nezkusit zapojit sériově tři svítivé diody? Samozřejmě, všechny v propustném směru, jak to ukazuje schéma na levé straně obr. 7. Když ale pokus skutečně se třemi (stejnými červenými) LED provedeme, zjistíme, že diody nesvítí, viz obr. 7 vpravo.



Obr. 7. Tři svítivé diody v sérii připojené k baterii 4,5 V nesvítí, i když jsou všechny zapojeny v propustném směru

Zapojili jsme snad nějakou LED obráceně? Lze to překontrolovat buď podle délky jejich nožiček⁴², nebo tak, že je postupně zkratujeme, viz obr. 8.⁴³



Obr. 8. Postupným zkratováním jednotlivých LED se můžeme přesvědčit, že jsou opravdu všechny v propustném směru

Proč naše tři LED v sérii nesvítí? Na dvě LED v sérii plochá baterie „ještě stačila“, na tři už asi nestačí. Opět máme další **hypotézu** v našem badatelském seznamování s vlastnostmi LED. Jak ji ověřit?

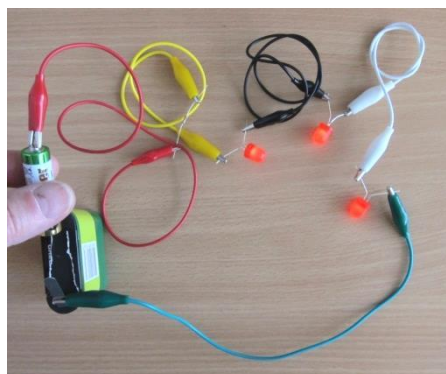
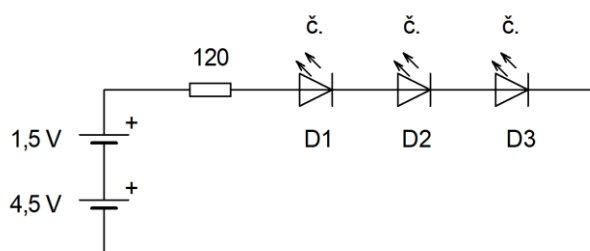
⁴⁰ V našem případě může být řádu zlomků μA .

⁴¹ A pro učitele je zapotřebí o něm vědět právě proto, aby mohl reagovat na případné dotazy zvědavějších nebo znalejších žáků.

⁴² Všechny delší musí být zapojené „stejným směrem“, tj. ke kladnému pólu baterie.

⁴³ Taková důkladná kontrola asi není nutná, pokud začneme od jedné LED, pak k ní přidáme druhou, takže obě svítí a až nakonec přidáme třetí, ale může pomoci, pokud chceme rychle překontrolovat celé zapojení. Zkratování samozřejmě nemusíme dělat kancelářskými sponkami; kablíkem s krokosvorkami je to pohodlnější.

Zkusme napětí baterie zvýšit, třeba tím, že do série s plochou baterií přidáme jeden tužkový článek, viz obr. 9. A vida, LEDky se opravdu rozsvítí!⁴⁴



Obr. 9. Při napětí baterie 6 V tři červené LED v sérii svítí

Co jsme se z pokusů se třemi LED v sérii dozvěděli?

To nejdůležitější asi je:

Aby LED svítila, potřebuje určité minimální napětí.

V pokusu podle obr. 7 se zřejmě napětí baterie 4,5 V rozdělí rovnoměrně na jednotlivé diody, na každou LED tedy připadá 1,5 V.⁴⁵ Z pokusu jsme zjistili, že napětí 1,5 V k rozsvícení červené LED nestačí.⁴⁶

Napětí 2 V, a dokonce i o něco nižší, už je k rozsvícení červené LED dostatečné. Ukázal nám to pokus podle obr. 9. Na tři v sérii zapojené LED připadá necelých 6 V, na každou z nich tedy o něco méně než 2 V.⁴⁷

3.4. A co LED jiných barev?

Stačí dva volty i pro svítivé diody jiných barev? Doposud jsme pracovali jen s červenými LED. Což zkusit třeba modré?

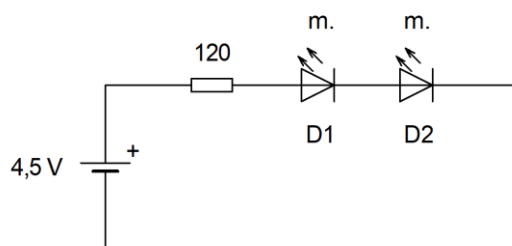
V pokusu podle obr. 4 dvě červené diody (v propustném směru) v sérii svítily. Zapojíme tedy stejně i dvě modré, viz obr. 10.

⁴⁴ Pozornější pohled odhalí, že LED nyní svítí slaběji, než v předchozích případech, ale svítí. Podrobněji se tomu, kdy svítí více a kdy méně, budeme ještě věnovat dále. (Předem můžeme prozradit, že v situaci podle obr. 9 protéká diodami menší proud. V tomto konkrétním pokusu můžeme zkratovat rezistor omezující proud, LED se rozzáří jasněji. Raději si ale na vyrazení rezistoru omezujícího proud nezvykejme.)

⁴⁵ Úbytek napětí na rezistoru 120 Ω je minimální, takže ho nemusíme uvažovat. (Pro ty, kdo mají rádi věci přesněji: Měřením můžeme ověřit, že proud obvodem podle obr. 7 je řádově 10 μ A. Na rezistoru s odporem 120 Ω je tedy úbytek napětí jen něco přes 1 milivolt. Přesná hodnota proudu závisí na napětí baterie, to může být u „čerstvé“ baterie až 4,7 V, a na vlastnostech konkrétních LED, ale i kdyby byla větší, stále bude úbytek napětí na rezistoru nepodstatný.)

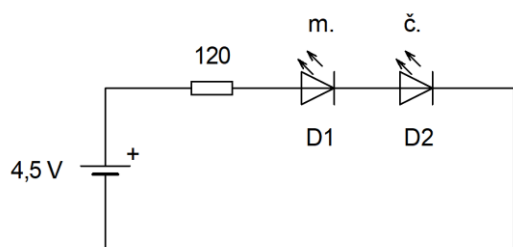
⁴⁶ Pro upřesnění: Budeme-li pokus provádět ve tmě a s „čerstvější“ plochou baterií, jejíž napětí je třeba 4,65 V, můžeme zjistit, že některé typy červených LED, když na ně připadá napětí 1,55 V, přece jen slabounce svítí. Pokud by některým štouravým žákům naše pokusy z podobných důvodů nepřipadaly dostatečně precizní, můžete je vyzvat, ať si je sami vymyslí a provedou přesněji. Možností pro bádání je tu dost a dost.

⁴⁷ Obvodem při daném pokusu obvykle teče proud několik mA, takže úbytek napětí na rezistoru činí několik desetin voltu. Na jednu LED tedy připadá napětí asi 1,8 až 1,9 V.



Obr. 10. Dvě modré LED v sérii připojené k baterii 4,5 V nesvítí

Modré LED v tomto zapojení nesvítí - vidíme tedy, že napětí 2,2 až 2,3 V zjevně k rozsvícení modré LED nestačí. Co kdybychom zkusili zkombinovat modrou a červenou LED?



Obr. 11. Modrá a červená LED v sérii připojené k baterii 4,5 V svítí

Jak vidíme, obě diody teď svítí. Jaké napětí přitom asi je na modré LED? Z předchozích pokusů víme, že když svítí červená LED, je na ní napětí asi 1,8 až 1,9 V. Nějaký malý úbytek napětí bude na rezistoru, dejme tomu 0,1 až 0,2 V. To znamená, že na modrou LED zbývá asi 2,5 V.

Co jsme tedy zjistili?

Svítivé diody různých barev potřebují k rozsvícení různé napětí.

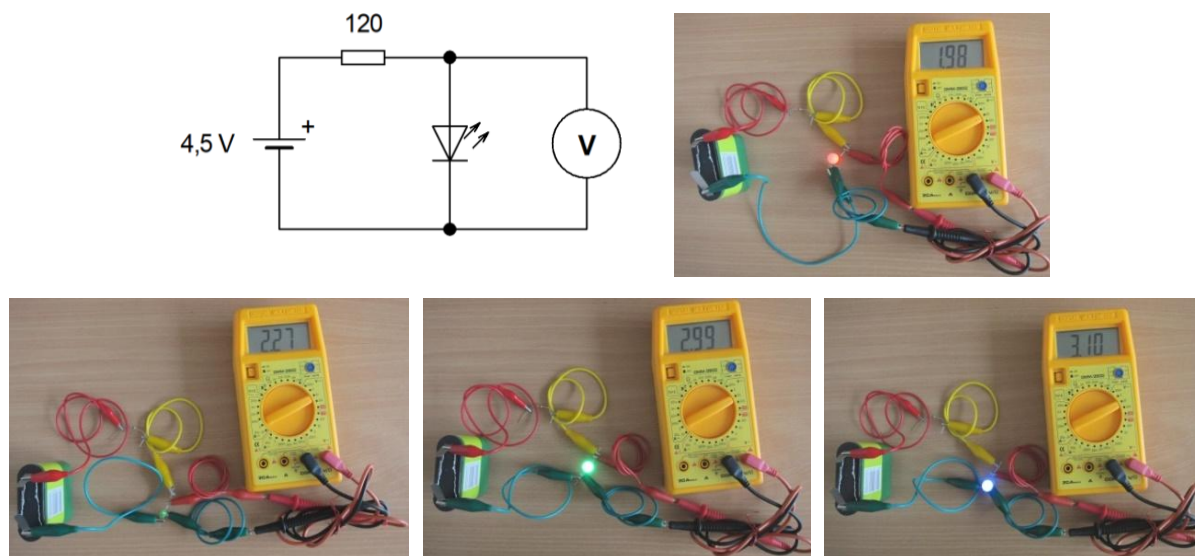
(Modré LED vyšší napětí, než červené.)

I bez voltmetru jsme tedy dokázali zjistit dost. Ale pokud chceme napětí na LED určit přesněji, je samozřejmě potřeba napětí opravdu měřit.

4. Jednoduchá měření a co z nich můžeme zjistit

4.1. Měříme napětí na LED

K měření napětí můžeme použít jakýkoli běžný multimetr.⁴⁸ Přepneme ho na měření napětí a na rozsah, který umožní měřit napětí jednotek voltů a připojíme ho paralelně ke svítivé diodě⁴⁹. Schéma a některé naměřené hodnoty ukazuje obr. 12.



Obr. 12. Měření napětí na LED

Co jsme z měření zjistili:

Napětí na LED opravdu závisí na barvě, pro zelené LED je vyšší než pro červené, pro modré LED je ještě vyšší.

Napětí jsou ovšem o něco vyšší, než jsme odhadovali v jednoduchých pokusech výše. Pro červenou diodu jsme odhadovali asi 1,8 až 1,9 V, nyní vidíme (viz fotografie vpravo nahoře na obr. 12), že napětí je skoro 2 V. Napětí na modré diodě jsme odhadovali na 2,5 V, nyní vidíme (viz foto vpravo dole), že je 3,1 V. Vysvětlení je ovšem jednoduché: v pokusech výše diodami protékal menší proud (také svítily slaběji). Je tedy vidět, že **s rostoucím proudem svítivou diodou na ní napětí roste.** (Ovšem pozor, růst napětí není přímo úměrný proudu, to ještě uvidíme dále.)

* Upozornění pro zájemce, že věc může být ještě trochu složitější. Ani při stejné barvě a při stejném proudu nemusí být napětí na LED stejné. Na levé a prostřední fotografii na obr. 12 dole je v obvodu

⁴⁸ Samozřejmě můžeme použít i starší ručičkové přístroje, ale správné odečítání hodnot na nich už většinou asi nebývá dovednost, kterou by většina žáků zvládala.

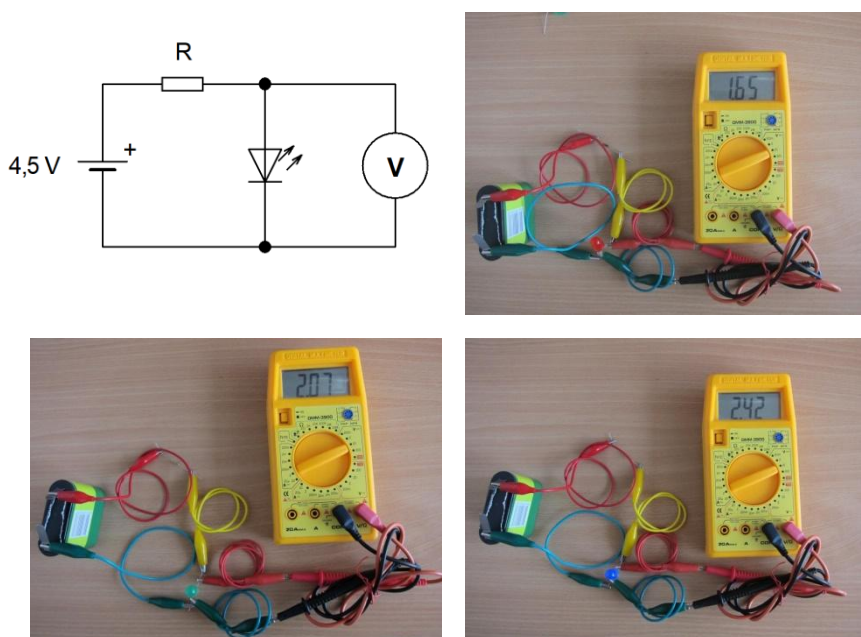
⁴⁹ Pardon, že zde opakujeme takové samozřejmosti, ale zkušenost ukazuje, že žáci občas mohou připojit měřicí přístroj do obvodu nej(h)různějšími způsoby. Takže se vyplatí zkontrolovat, zda mají opravdu multimetr přepnutý na měření napětí a zda ho zapojují tak, jak se voltmetr do obvodu zapojovat má. Dobrou kontrolou je nejprve změřit napětí na ploché baterii, jestli multimetr opravdu ukáže hodnotu okolo 4,5 V. (Pokud svezepě ukazuje nulu, zkontrolujte, zda není přepnut na měření proudů a zda se v něm tedy při připojení k baterii nepřepálila pojistka. Přístup typu „proč bychom předem přemýšleli, jak přístroj přepnout a do kterých zdířek připojit přívodní šňůry“ nebo „zkusíme to zapojit různými způsoby, co to udělá“ má už na svědomí hodně přepálených pojistek v multimetrech – a vyměňovat je, je otrava. Naštěstí přepálená pojistka většinou „zneschopní“ jen proudové rozsahy, takže můžeme měřit alespoň napětí.)

zapojena zelená LED, na levé ovšem LED dosti slabě svítící, na prostřední pak LED vysokosvítivá. Napětí na nich se ovšem liší o asi 0,7 V; rozdíl je zřejmě dán rozdílnými technologiemi při jejich výrobě.⁵⁰

Napětí na LED při malých proudech

Souvislost mezi napětím na LED a její barvou je lépe vidět, pokud se omezíme na malé proudy, při nichž diody „právě začínají svítit“.⁵¹ K tomu stačí zařadit do obvodu dostatečně vysoký odpor.

Zapojme tedy místo rezistoru o odporu $120\ \Omega$ rezistor s větším odporem R .⁵² Výsledky ukazuje obr. 13.



Obr. 13. Měření napětí na LED při malém proudu (hodnoty R byly $33\ \text{k}\Omega$ a $330\ \text{k}\Omega$, viz pozn. pod čarou)

Vidíme, že na červené LED bylo napětí asi 1,65 V, na zelené asi 2,07 V a na modré asi 2,42 V.⁵³ Ze všech těchto pokusů a měření vidíme, že napětí na svítivých diodách stoupá s tím, jak se barva světla přibližuje modrému konci spektra; směrem k červenému konci spektra naopak klesá. Kvalitativně to lze pochopit, i když vysvětlení na úrovni ZŠ se asi nemůže příliš opřít o „základoškolskou fyziku“ a je tedy nutně značně „povídavé“: Fotony modrého světla mají větší energii, než fotony červeného světla. A danou energii LED získá, když jí projde elektron. Vyšší napětí znamená vyšší energii. Proto pro vytváření modrého světla potřebujeme vyšší napětí.⁵⁴

⁵⁰ Takovéto detaily zřejmě nemusíme žákům zdůrazňovat; zde je uvádíme spíše proto, abychom neměli představu, že napětí na diodě je při daném proudu úplně jednoznačně dáno její barvou.

⁵¹ Tohle je samozřejmě hodně nepřesné kritérium, řekněme tedy (byť také dosti vágně), že svít LED bude velmi slabý.

⁵² V našem případě jsme použili odpor $33\ \text{k}\Omega$ pro červenou svítivou diodu. Při hodně velkém zastínění ruličkou černého papíru byl její slabý svít vidět i ve dne. Zelená a modrá LED při stejném odporu pozorovatelně slabě svítily i bez zastínění. (To může být dáno i skutečností, že lidské oko je na světlo červené barvy výrazně méně citlivé než třeba na světlo zelené.) Pro zelenou a modrou LED jsme proto užíli odpor $330\ \text{k}\Omega$; při zastínění byl jejich slabý svít také pozorovatelný i ve dne. Na fotografiích na obr. 13 ovšem není vidět, že by LED svítily, na to je jejich svít příliš slabý.

⁵³ Budete-li toto měření provádět, neďte se, když vám vyjdou poněkud odlišné hodnoty. Při nižších proudech (tedy větším odporu R) se můžeme dostat i k o něco nižším hodnotám napětí.

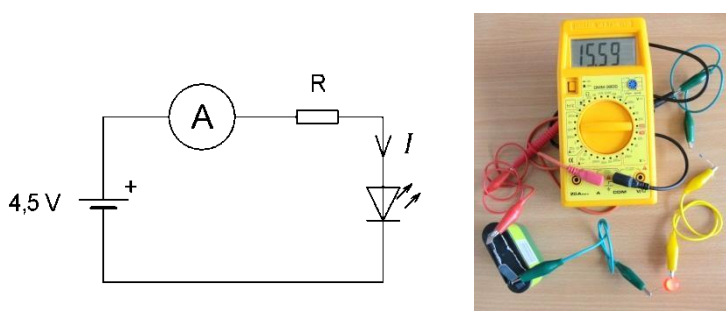
⁵⁴ Na středoškolské (resp. pokročilejší středoškolské) úrovni lze celou věc spočítat i kvantitativně a dokonce lze z pokusu tohoto typu přibližně určit hodnotu Planckovy konstanty; zájemce lze odkázat například na volně dostupnou knížečku [5].

Kromě závislosti napětí na barvě světla – **co jsme z našich měření napětí zjistili?**

Můžeme si všimnout, že **napětí na LED se příliš nemění**, i když s proudem stoupá, je podobné při malých i větších proudech. Například na červené LED jsme naměřili napětí od asi 1,6 V do zhruba 2 V, na modré LED od 2,4 V do asi 3,1 V. To jsou rozdíly „plus minus deset procent“. Svit LED se přitom měnil velmi výrazně a proud procházející LED také (ten dokonce o mnoho řádů⁵⁵). Pojďme se teď právě na ten proud podívat blíže.

4.2. Proud tekoucí LED a co s ním souvisí

Proud tekoucí svítivou diodou můžeme měřit multimetrem přepnutým na měření proudu podle obr. 14.⁵⁶ Hodnotu odporu R volíme v rozmezí 100 Ω až asi 100 k Ω , případně i více. Při větších hodnotách R je proud menší.



Obr. 14. Měření proudu svítivou diodou

Při pokusu jasně vidíme, že proud ovlivňuje svítivost LED: jednoduše řečeno, **při menším proudu LED svítí méně**.

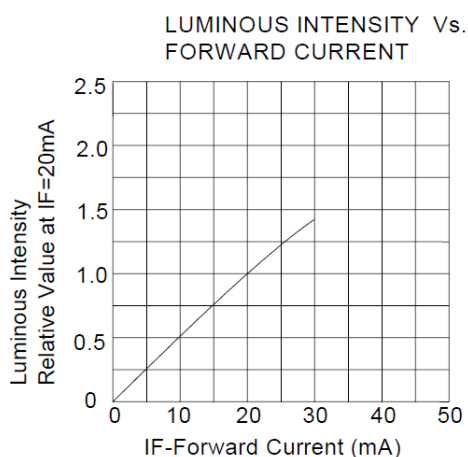
* Malé doplnění pro ty, kdo chtějí znát věci přesněji:

Závislost svítivosti na proudu lze samozřejmě měřit i kvantitativně. Výrobci ji často uvádějí v data-sheetech graficky. Příklad takové závislosti ukazuje obr. 15. Je z něj vidět, že svítivost je prakticky přímo úměrná proudu.⁵⁷

⁵⁵ Nižší proud jsme v měřeních na obr. 13 zajistili vyššími hodnotami odporu sériově zapojeného rezistoru.

⁵⁶ Rozsah měřeného proudu nastavíme na 20 mA (nebo podobnou hodnotu, záleží, jaký máme multimetr). Ampérmetr samozřejmě můžeme zapojit kdekoli do obvodu, třeba mezi rezistor a LED nebo mezi LED a záporný pól baterie, proud je v celém obvodu stejný. Pozor, žáci někdy mohou mít nesprávnou představu, že za rezistorem je proud nižší a za LED případně ještě nižší, tedy že rezistor a LED nějaký proud uberou. Možná to souvisí s používaným názvem „spotřebič elektrického proudu“. To, že spotřebič proud ve skutečnosti nespotřebovává, tedy že je proud před ním a za ním stejný, je leckdy pro žáky a pro laiky překvapením. Měření proudu LED můžeme tedy vzít jako příležitost, jak připomenout a znovu ověřit skutečnost, že proud je ve všech místech obvodu stejný.

⁵⁷ Neplatí to stoprocentně, odchylky mohou nastat zejména při větších proudech, ale obvykle se závislost od přímé úměrnosti příliš neliší.



Obr. 15. Příklad závislosti svítivosti LED na proudu⁵⁸ Graf je převzat z datasheetu [6].

Na ZŠ zřejmě svítivost proměřovat nebudeme, na SŠ běžně nejspíše také ne; možná by to ale mohl být zajímavý námět na nějaký projekt.⁵⁹

Pozor - nepřekračujte **maximální dovolený proud!**

Jestliže s rostoucím proudem roste svítivost, můžeme do naší malé LED pustit třeba několik ampér a získat tak vysoce výkonný světelný zdroj?

Můžeme to samozřejmě zkusit, ale LED tím spolehlivě zničíme. Každý typ LED má stanoven **maximální dovolený proud**. Pro malé LED bývá 20 až 30 mA.⁶⁰ Tuto hodnotu je opravdu vhodné nepřekračovat.⁶¹ Právě proto omezujeme proud rezistorem v sérii. Pojďme se teď podívat, jaký zvolit jeho odpor.

Jak volit odpor sériového rezistoru?

Pro naše počáteční pokusy jsme volili rezistor o odporu 120 Ω. Nemuselo to být přesně, vyhověly rezistory o odporu mezi 100 až 150 Ω. Jak jsme k těmto hodnotám došli? A jak volit hodnotu odporu, pokud použijeme baterii o jiném napětí, třeba 9 V?

Hodnotu R můžeme určit jednoduše pomocí Ohmova zákona. Překresleme si nejdřív pro větší názornost naše základní schéma z obr. 2 do podoby podle obrázku 16. Z měření napětí na LED víme, že na červené svítivé diodě je (při proudu, kdy výrazně svítí) napětí asi 2 V. Na rezistor R tedy zbude napětí asi 2,5 V.⁶² (Označme toto napětí jako U_R .) Proud obvodem tedy bude $I = U_R/R$. Odtud plyne, že potřebujeme rezistor s hodnotou odporu $R = U_R/I \doteq 2,5 \text{ V}/0,02 \text{ A} = 125 \Omega$.

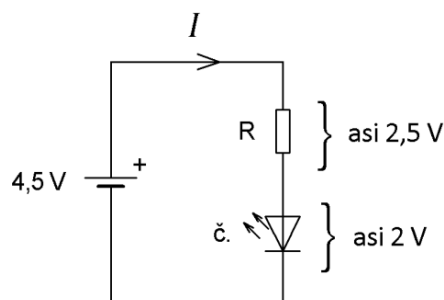
⁵⁸ Svítivost je v grafu uvedena relativně vůči svítivosti při proudu 20 mA.

⁵⁹ Třeba v souvislosti s tím, že LED jsou úspornějšími zdroji světla, než žárovky, viz též dál část 6.5.

⁶⁰ Pro výkonné LED jsou samozřejmě maximální proudy výrazně větší. Příkladem mohou být LED s výkonem 1 W (lze je koupit ve výše uvedených prodejnách elektronických součástek), kde se uvádí maximální proud 350 mA.

⁶¹ Poznámka pro techničtější zaměřené čtenáře: Vyšší proud je někdy povolen v krátkodobých pulzech. Např. v datasheetu [6] se uvádí, že pro pulzy délky 0,1 ms, které se mohou opakovat s frekvencí 1 kHz, je dovolen proud až 100 mA.

⁶² Fakticky při této úvaze využíváme druhý Kirchhoffův zákon, ale to žákům nemusíme zdůrazňovat. Už z obrázku je snad dostatečně jasně vidět, že 2 V na LED plus napětí na rezistoru dává dohromady 4,5 V na ploché baterii.



Obr. 16. K určení odporu sériového rezistoru

Jestliže použijeme rezistor o odporu 100Ω , bude proud asi 25 mA, při odporu 150Ω necelých 17 mA. Svit LED se bude trochu lišit, ale ne příliš dramaticky.

Uvedená úvaha platila pro červenou svítivou diodu. Pro modrou bude na diodě napětí asi 3 V, na rezistor R tedy zbude asi 1,5 V; pro proud 20 mA vychází $R \doteq 75 \Omega$. Pokud je odpor 100Ω , bude proud 15 mA.

Pro vyšší napětí baterie je potřebná hodnota odporu vyšší. Z úvahy uvedené výše plyne, že hodnota R má být

$$R = \frac{U_{\text{bat}} - U_{\text{LED}}}{I} \quad .^{63}$$

Pro baterii o napětí 9 V vyhoví odpor 300Ω .⁶⁴ Z běžně dostupných hodnot rezistorů tedy použijeme odpor 330Ω .^{65 66} Pro jiná napětí zdroje případně jiné proudy svítivou diodou hodnotu odporu spočítáme analogicky.

A co když máme několik svítivých diod v sérii? Třeba chceme tři sériově spojené červené LED připojit k baterii 9 V. Jaký odpor v sérii s nimi máme použít? Zkuste si tuto úlohu vyřešit sami, dřív než se podíváte do poznámky pod čarou⁶⁷. Na podobných praktických problémech lze ilustrovat a se žáky „promrskávat“ aplikace Ohmova zákona.

4.3. Různý proud, skoro stejná napětí, aneb když Ohmův zákon neplatí

Na seminářích, kde provádíme výše uvedené pokusy, se pravidelně objevuje otázka: **Jaký odpor má svítivá dioda?**

Otázka asi přirozená, ale vlastně ne moc vhodná. O odporu (například odporu rezistoru nebo kusu drátu) obvykle mluvíme v případech, kdy proud je úměrný napětí: $I = \frac{1}{R} \cdot U$. Například při dva-

⁶³ Význam symbolů je snad jasný: U_{bat} je napětí baterie, U_{LED} napětí na svítivé diodě, I proud, který chceme, aby diodou tekla.

⁶⁴ Napětí na LED přitom bereme 2 až 3 V a proud 20 mA nebo o málo více.

⁶⁵ Je možná zbytečné připomínat, že běžné rezistory se nedodávají v hodnotách např. 100Ω , 200Ω , 300Ω , apod. Hodnota 330Ω je ale běžně k dostání. (V tzv. řadě E12 jsou ve stovkách Ω k dostání odpory v hodnotách 100 , 120 , 150 , 180 , 220 , 270 , 330 , 390 , 470 , 560 , 680 a 820Ω .)

⁶⁶ Pokud byste chtěli, můžete proud diodou nastavovat přesněji například sériovou kombinací dvou vhodných rezistorů. V našich pokusech ale většinou přesnou hodnotu proudu nepotřebujeme.

⁶⁷ Na každé LED budou asi 2 V, dohromady tedy na třech LED 6 V. Na napětí na rezistoru zbývají 3 V. Chceme-li, aby proud byl 20 mA, musí odpor být $3 \text{ V} / 0,02 \text{ A} = 150 \Omega$.

krát větším napětí je dvakrát větší proud. Jinými slovy, chceme-li dvakrát větší proud, musíme dvakrát zvětšit napětí. Pro stokrát větší proud potřebujeme stokrát větší napětí.⁶⁸

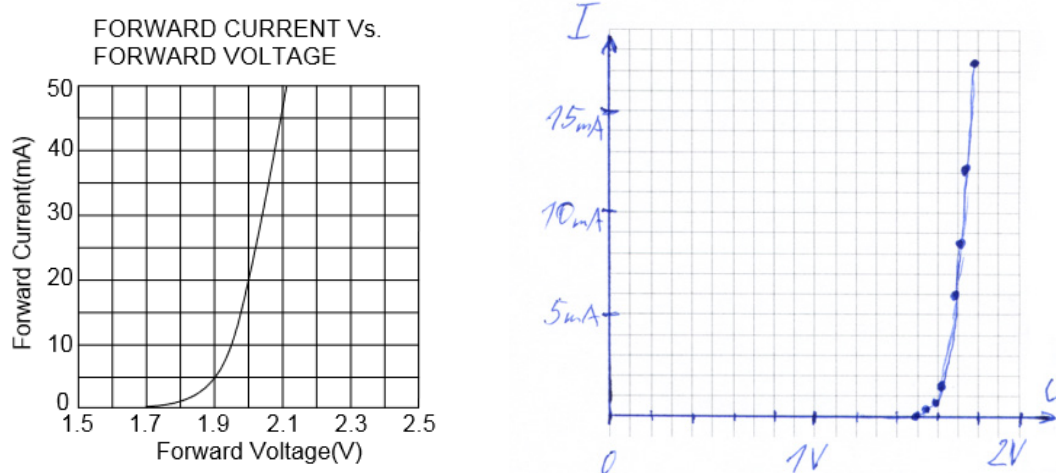
LED se ale takto nechová! Stačí, když porovnáme pokusy na obrázcích 12 a 13; konkrétně si budeme všimnout červených LED. V pokusu na obr. 12 byl proud asi 20 mA⁶⁹, napětí na LED bylo zhruba 2 V. V pokusu na obr. 13 byl proud necelých 0,1 mA⁷⁰, napětí na LED bylo asi 1,65 V. Proud byl *dvěstěkrát* menší, napětí přitom bylo nižší jen asi o 20 %. Závěr – ať se nám líbí nebo nelíbí – je jasný:

Pro LED neplatí Ohmův zákon!

Proud svítivou diodou prostě není úměrný napětí na diodě. Pokud bychom formálně určovali R jako poměr proudu a napětí ($R=U/I$), pak pro proud 20 mA dostaneme $R \doteq 2\text{ V}/20\text{ mA}=100\ \Omega$ a pro proud 0,1 mA pak $R \doteq 1,6\text{ V}/0,1\text{ mA}=16\ 000\ \Omega$, tedy 160-krát větší. Pro jiné hodnoty proudu svítivou diodou bychom dostali jiné hodnoty R . (Při menších proudech by byly R ještě vyšší.) Podobně by to bylo i pro diody jiných barev.

* Pro ty, kdo chtějí podrobnosti: voltampérová charakteristika

Pro závislost proudu na napětí na svítivé diodě nám tedy Ohmův zákon nepomůže. Formálně sice můžeme psát $U = I \cdot R$, ale R není konstanta (ani přibližně)⁷¹. Užitečnější je proměřit a znát závislost proudu na napětí na LED, $I = I(U)$. Této závislosti se říká **voltampérová charakteristika** (zkráceně VA-charakteristika). Často bývá zobrazována graficky. Příklady ukazuje obr. 17.



Obr. 17. Příklady voltampérových charakteristik červené svítivé diody
(levý obrázek: graf z datasheetu výrobce, převzato z [6],
pravý obrázek: z naměřených hodnot, převzato z [5]⁷²)

⁶⁸ Prostě: R je konstanta.

⁶⁹ Proud jsme neměřili, ale můžeme ho určit úvahou, kterou jsme provedli v části 3.6: na rezistoru 120 Ω zbývá napětí asi 2,5 V, tj. proud je 2,5 V / 120 Ω , což dává asi 0,021 A.

⁷⁰ Stejnou úvahou: Napětí na LED je asi 1,65 V, na rezistor o odporu 33 k Ω zbývá napětí necelých 2,9 V. Proud rezistorem (a tedy i celým obvodem) je tedy asi 2,9 V/33000 Ω , což je asi 9·10⁻⁵ A, tj. necelých 0,1 mA.

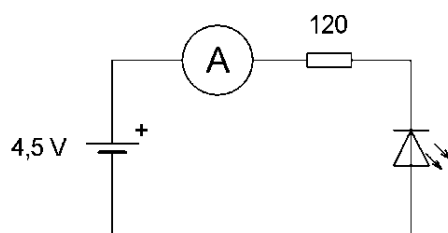
⁷¹ Doplnující informace pro čtenáře, kteří chtějí vědět víc: Veličina $R = U/I$ se někdy říká *statický odpor*. Kromě toho se používá veličina zvaná *dynamický odpor*: Jestliže se při změně napětí na LED o malou hodnotu ΔU změní proud o hodnotu ΔI , je dynamický odpor $R_d = \Delta U/\Delta I$.

⁷² Pardon, že tento graf není „podle normy“. Správně by se symboly jednotek neměly psát k hodnotám veličin, ale k jejich symbolům, tedy $\frac{U}{V}$ a $\frac{I}{\text{mA}}$. Ale závislost proudu na napětí je i tak z grafu snad dostatečně jasná.

Měření voltampérové charakteristiky LED je stručně popsáno v [5], zde se mu blíže věnovat nebudeme. Zájemci si mohou najít podrobnosti jak toho, jak ji měřit, i toho, co lze z VA-charakteristiky vyčíst, i v řadě dalších pramenů.⁷³

4.4. * Proud v závěrném směru

Zatím jsme proud svítivou diodou měřili jen v propustném směru a tvářili jsme se, že v závěrném směru žádný proud neteče.⁷⁴ Pojďme teď zkusit naměřit, jak to s proudem v závěrném směru je. Schéma pro měření proudu v závěrném směru je jednoduché, ukazuje ho obr. 18.⁷⁵ Potřebujeme ale použít velmi citlivý ampérmetr, či spíše mikroampérmetr. V běžných multimetrech bývá nejcitlivější proudový rozsah 20 μA . Co když tato citlivost nestačí? (Např. na obr. 18 vidíme, že přístroj ukazuje asi 0,01 μA .)



Obr. 18. Měření proudu tekoucího LED v závěrném směru

Naštěstí si můžeme pomoci.⁷⁶ V multimetru vlastně totiž existuje jeden „utajený“ rozsah pro měření proudu. Je jím, možná překvapivě, rozsah pro měření napětí. Princip ukazuje schéma vlevo na obr. 19. Jestliže obvodem prochází proud I , je na rezistoru o odporu R napětí $U = I \cdot R$. Když voltmetr naměří na rezistoru $R = 10 \text{ M}\Omega = 10^7 \Omega$ napětí například $U = 1 \text{ V}$, víme, že proud musí být $I = U/R = 1/10^7 \text{ A} = 0,1 \mu\text{A}$. A protože multimetr na napěťových rozsazích měří napětí i v řádu milivoltů, můžeme tímto způsobem měřit proudy od desetin nanoampéru.⁷⁷

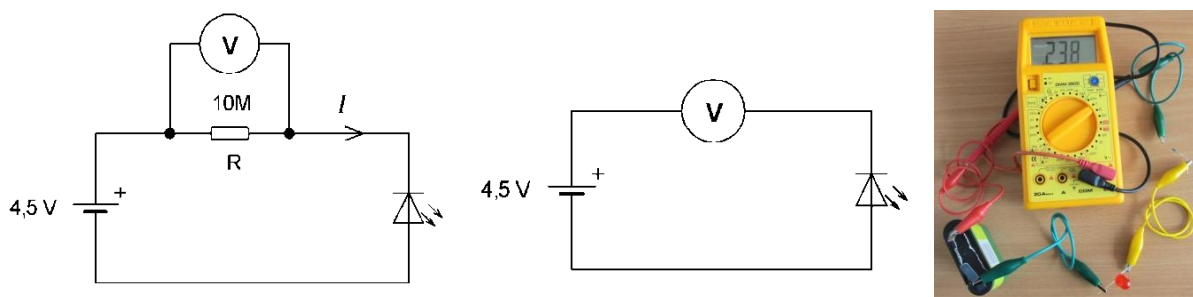
⁷³ Pro čtenáře, které neodradila předchozí zmínka o dynamickém odporu, můžeme doplnit, že dynamický odpor je převrácenou hodnotou derivace VA charakteristiky. (Ale to už opravdu nepatří na ZŠ. ☺) Z levého grafu na obr. 17 je vidět, že pro změnu proudu z 10 mA na 20 mA (tj. pro $\Delta I = 10 \text{ mA}$) se napětí musí změnit z 1,95 V na 2,0 V (tj. $\Delta U = 0,05 \text{ V}$). Odtud $R_d = \Delta U / \Delta I = 0,05 \text{ V} / 0,01 \text{ A} = 5 \Omega$. To je ještě výrazně méně než statický odpor při proudu 20 mA. Při nižších proudech ovšem je i dynamický odpor výrazně větší...

⁷⁴ Až na poznámku pro zájemce na konci kapitoly 3.2, kde jsme připustili, že nepatrný proud v závěrném směru teče, to ale bylo jen konstatování nepodpořené žádným pokusem nebo měřením.

⁷⁵ Prostě oproti měření proudu v propustném směru jen otočíme polaritu diody.

⁷⁶ Následující „finta“ je ale opravdu spíš jen pro zájemce.

⁷⁷ Nejnižší zobrazená hodnota na multimetrech bývá 0,1 mV, takže fakticky nejmenší proud, který takto můžeme změřit, je 0,01 nA. (To je deset pikoampér! Člověk by ani netušil, jak citlivý přístroj má za pár set korun k dispozici.)



Obr. 19. Využití voltmetru jako velmi citlivého ampérmetru při měření proudu v závěrném směru – princip (schéma vlevo) a realizace (schéma vpravo)

Při skutečném měření se obejdeme i bez rezistoru 10 megaohmů. Při výkladu principu měření jsme totiž předpokládali, že máme ideální voltmetr, který neodebírá žádný proud, tedy že jeho odpor je nekonečný. Běžné multimetry (kromě některých úplně nejlacinějších) ale mívají na napěťových rozsazích vstupní odpor právě 10 MΩ, takže stačí zapojit baterii, voltmetr a LED jak je ukázáno na obr. 19 vpravo, a můžeme měřit.⁷⁸ (Např. v měření na obr. 19 ukázal voltmetr 0,238 V, takže proud byl asi 0,024 μA.)

Závěrný proud tekoucí LED je opravdu malý – a jak sami při pokusech zjistíte, závisí navíc na tom, zda je LED ve tmě nebo zda na ni dopadá světlo a jak intenzivní.

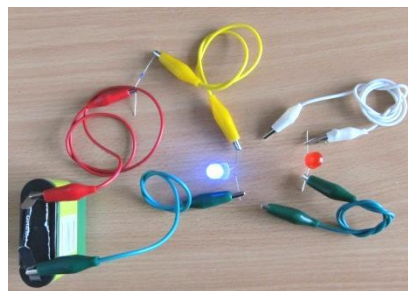
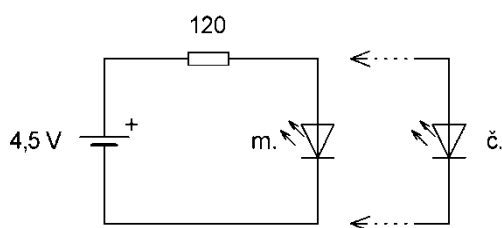
⁷⁸ Reálně je tedy zapojení na obr. 19 vpravo ekvivalentní zapojení na téže obrázku vlevo (kde bychom měli ideální voltmetr s nekonečným vstupním odporem). Poznamenejme, že nejlacinější multimetry mívají vstupní odpor jen 1 MΩ, pak je měření desetkrát méně citlivé, naměřený 1 mV odpovídá proudu 1 nA. A jak zjistíte, jaký vnitřní odpor má váš konkrétní multimetr? Zapojte do série s ním rezistor 10 MΩ a změřte napětí známého zdroje, třeba ploché baterie 4,5 V. Pokud voltmetr ukáže asi 2,25 V, má vnitřní odpor 10 MΩ. (Rozmyslete si, proč tomu tak je – jak se často píše, „toto necháváme na laskavém čtenáři“...)

5. Další zajímavosti

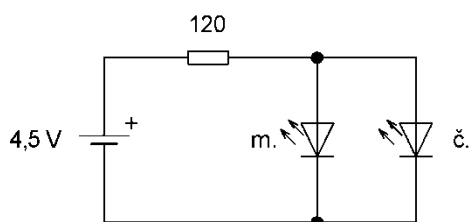
5.1. Malá „záhada“: dvě různé LED paralelně

Když už teď víme, jak je to s napětím a proudem na LED různých barev, pochopíme i na první pohled „záhadné“ chování svítivých diod v následujícím pokusu.

K ploché baterii připojíme modrou LED, jak to ukazuje obr. 20. LED je zapojena v propustném směru, takže svítí. Pak k ní paralelně připojíme červenou LED, také v propustném směru. Výsledek ukazuje obr. 21: Červená LED se rozsvítí, ale modrá zhasne. Proč?

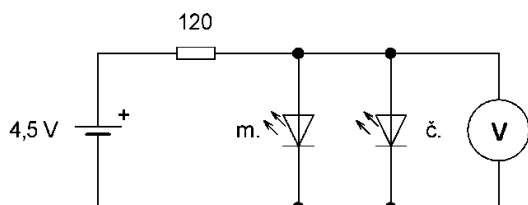


Obr. 20. K svítící modré LED připojíme paralelně červenou...



Obr. 21. ... a červená LED bude svítit, ale modrá zhasne

Proč modrá LED zhasne? Baterie přece může dodat dostatek proudu pro obě diody.⁷⁹ Rozřešit tuto „záhadu“ nám pomůže měření napětí na daných LED.⁸⁰ Po připojení voltmetru vidíme, že napětí na LED je jen asi 2 V, viz obr. 22.



Obr. 22. Na paralelně zapojených LED je napětí asi 2 V

⁷⁹ A to i když je proud omezen rezistorem, pro svít modré LED totiž stačí i proud jen několik desetin mA.

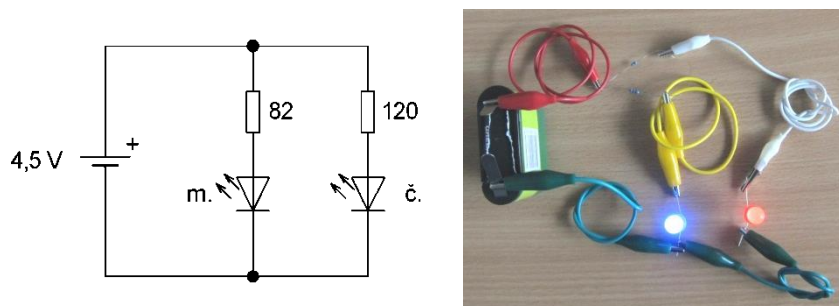
⁸⁰ Samozřejmě můžete problém nejdřív řešit teoretickou úvahou a pak se měřením napětí přesvědčit o správnosti své úvahy.

Stejné napětí by zůstalo, i kdybychom odpojili modrou LED – jde prostě o napětí, které je na červené LED, když je přes rezistor připojena k baterii, jak to známe už z předchozích pokusů. Toto napětí ovšem nestačí k rozsvícení modré LED, na to bychom potřebovali více než asi 2,4 V.

Jednoduše řečeno, při proudu 20 až 30 miliampér (který je schopna dodat baterie se sériově zapojeným rezistorem) červená LED nedovolí, aby napětí na ní stoupló výše než na asi 2 volty. A při tak malém napětí modrá LED nesvítí.⁸¹

Kdybychom měřili proud oběma diodami, ověřili bychom, že prakticky veškerý proud z baterie prochází červenou LED, modrou tečou jen zlomky mikroampér.

A co když chceme z jedné baterie napájet více světelných diod různých barev? Jak už teď víme, nemůžeme je prostě zapojit vedle sebe paralelně! Řešení je naštěstí jednoduché: ke každé LED zapojíme do série vlastní rezistor, jak to ukazuje obr. 23.



Obr. 23. Jak z jedné baterie napájet několik různých LED

Navíc, jak je ukázáno na obr. 23, můžeme ke svítivým diodám různých barev zapojit rezistory s různými odpory, abychom pro každou LED individuálně nastavili třeba stejný proud (např. 20 mA) nebo (třeba „podle oka“) vyrovnali jejich svítivost.

5.2. „Neviditelné světlo“

Dosud jsme využívali jen LED několika barev: většinou červené, zelené a modré. Existují však i LED s barvou „za modrou resp. fialovou“ a „před červenou“. Pojďme rychle prozkoumat jejich vlastnosti.

Ultrafialové LED

Jako „ultrafialové“ označují výrobci svítivé diody vyzařující světlo o vlnových délkách okolo 400 nm nebo kratších. Nemusí tedy jít striktně o ultrafialové záření, protože za hranici viditelného spektra se obvykle bere vlnová délka 380 nm. Světlo těchto „ultrafialových“ svítivých diod (v nabídce prodejců je najdeme obvykle pod zkratkou UV LED) tedy většinou zčásti vidíme jako slabě fialové.^{82 83}

⁸¹ Říká se také, že toto napětí nestačí k „otevření“ modré LED – prostě při tomto napětí teče modrou LED jen velmi nepatrný proud.

⁸² Jako slabé se nám jeví proto, že lidské oko už je blízko hranice viditelného světla málo citlivé.

⁸³ UV LED dodávané běžnými prodejci obvykle vyzařují s největší intenzitou na vlnových délkách 395 až 400 nm. U specializovaných dodavatelů lze ale nalézt i UV LED s vlnovými délkami pod 300 nm. Ty jsou ale již výrazně dražší a ve školních pokusech se s nimi zřejmě nepotkáme.

Běžné malé UV LED mívají maximální proud 20 mA, napětí na nich při tomto proudu je kolem 3,4 V nebo o něco více. Při napájení z ploché baterie k nim proto zařadíme rezistor o odporu např. 56 Ω.

Přestože světlo běžných UV svítivých diod je vlastně na hranici ultrafialové oblasti, dokáže aktivovat fluorescenční barviva například v ochranných prvcích bankovek nebo v čarách různých zvýrazňovačů, v papírcích typu „Post-It“, na některých tkaninách apod. Některé možnosti ukazují fotografie na obr. 24. Ve světle těchto UV LED také ve tmě výrazně září zuby.

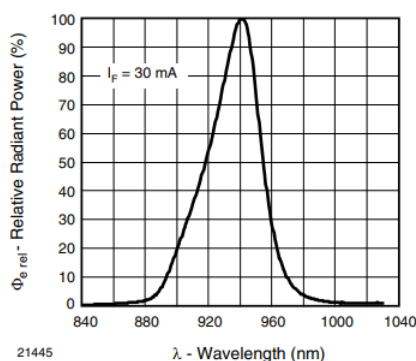


Obr. 24. Fluorescence vzbuzená zářením UV LED

Světlo běžných UV LED tedy popravdě řečeno není neviditelné; záření dalšího typu LED ale již očima opravdu nevidíme.

Infračervené LED

Svítivé diody označované jako infračervené obvykle vyzařují záření s vlnovou délkou asi 940 nm.⁸⁴ Jejich záření tedy opravdu nevidíme, protože dlouhovlnný konec viditelného spektra má vlnovou délku asi 750 až 760 nm. Svítivé diody ovšem vyzařují v poměrně širokém rozsahu vlnových délek, jak ukazuje příklad spektra jedné IR LED na obr. 25. Zmíněných 940 nm je vlnovou délkou, na níž dioda vyzařuje s největší intenzitou.



Obr. 25. Příklad spektra infračervené LED (převzato z datasheetu výrobce [7])

Jak můžeme lehce naměřit, napětí na infračervené LED (při „plném svitu“) je asi 1,3 V.⁸⁵ Povolný maximální proud však u těchto diod bývá 100 mA. Pokud chceme při připojení k ploché baterii opravdu využívat až skoro daný maximální proud, můžeme použít sériový rezistor o odporu jen 39 Ω.⁸⁶ Bude však třeba použít rezistor na dostatečné výkonové zatížení. Při proudu 0,1 A a napětí

⁸⁴ Najdou se ale i typy s vlnovou délkou například 850 nm.

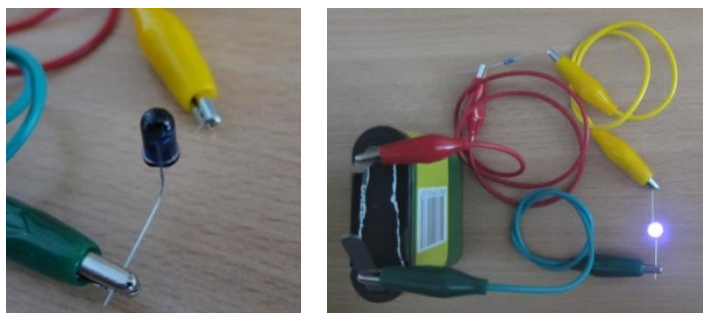
⁸⁵ „Svítit“ začíná IR LED již od napětí přibližně 1 V.

⁸⁶ Šel by použít ještě o jednu hodnotu menší odpor, tj. 33 Ω, ale není nutno se přibližovat úplně mezní hodnotě proudu. Klidně můžeme

na rezistoru asi 3,2 V by se totiž na rezistoru měnil na teplo výkon 0,32 W.⁸⁷ Použijte proto rezistor pro výkonové zatížení alespoň 0,5 W.^{88 89}

Infračervené LED se využívají v ovladačích např. televizí, dataprojektorů nebo dalších zařízení. K čemu je ale můžeme použít v našich pokusech, když jejich záření nevidíme?

My ho sice nevidíme, ale některé fotoaparáty včetně fotoaparátů mobilních telefonů a tabletů ano. Tyto fotoaparáty zobrazí „zapnutou“ IR LED jako svítící, jak to ukazuje obr. 26. Barva světla, jak ji vidíme na fotografii je ovšem „falešná“, i když světlo vypadá narůžověle či nafialověle, samozřejmě ve skutečnosti růžové není. (Ono také, jak nám má fotoaparát zobrazit barvu, která je mimo viditelné spektrum?)



Obr. 26. Některé fotoaparáty „vidí“ rozsvícenou infračervenou LED, například i z televizních ovladačů. Samotná nerozsvícená IR LED vypadá skoro černá, viz fotografie vlevo.⁹⁰

Záření infračervených LED ovšem nevidí všechny fotoaparáty a smartphony. Smůlu mají především majitelé dražších přístrojů, právě ty jsou k tomuto záření „slepé“, protože v sobě mají zabudovaný filtry, které IR záření potlačují.⁹¹

5.3. Díváme se do LED

Při pohledu na LED, jejichž pouzdra jsou celá zbarvená, můžeme mít dojem, že světlo se tvoří v celém objemu LED. To ale není pravda. To, co zvenku vidíme, je právě jen plastové pouzdro; světlo se ve skutečnosti generuje jen v malém polovodičovém čipu.

Celkem dobře je tento čip vidět ve svítivých diodách s průhledným pouzdrům, viz fotografie na obr. 27. Pohled nám samozřejmě zkresluje zakřivený povrch pouzdra, ale něco přece jen vidíme, zejména když si na „pohled do nitra svítivé diody“ vezmeme silnější lupu. Také je vhodné pustit do LED velmi malý proud (řádu μA až desítek μA ⁹²), aby čip slabounce svítil. Výsledek ukazuje prostřední fotografie na obr. 27.⁹³

použít i větší hodnotu odporu, třeba 100 Ω , proud pak bude lehce přes 30 mA, což pro většinu pokusů bude stačit.

⁸⁷ Pokud bychom chtěli být fyzikálně korektní, měli bychom napsat, že se daný výkon mění na vnitřní energii toho rezistoru. (Formulace „elektrická energie se mění na teplo“ je sice užívaná, ale vlastně nepřesná a slangová; proč, to ale na tomto místě rozebírat nebudeme.) Prostě a jednoduše řečeno: rezistor se daným výkonem zahřívá.

⁸⁸ Některé miniaturní rezistory mají povolený maximální příkon jen 0,25 W, ty byste mohli velkým příkonem „spálit“. Nehledě na to, že takový rezistor by se v obvodu zahřál na vysokou teplotu a sáhnout na něj prstem by mohlo znamenat, že bychom si malou spáleninu přivodili sami.

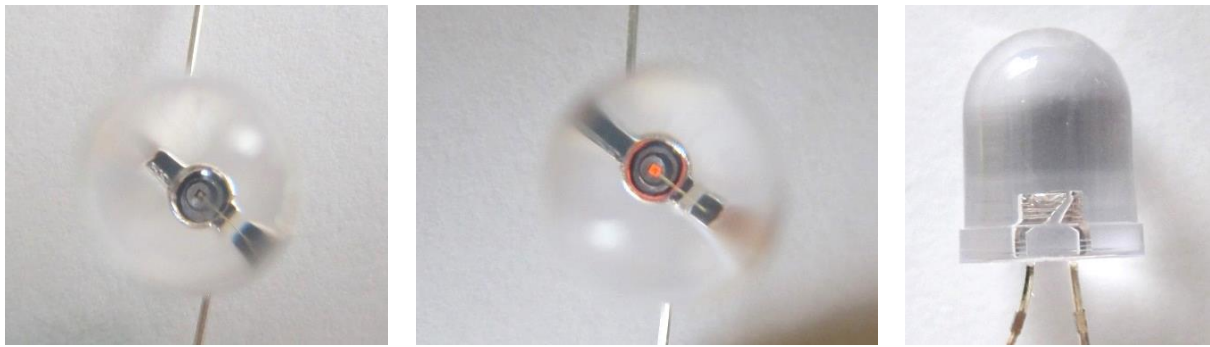
⁸⁹ Pokud bude mít sériový rezistor takový odpor, že jím bude protékat jen asi 30 mA, bude se zahřívát výkonem jen asi 0,1 W – proto jsme výše v pokusech s červenými, modrými apod. LED povolený ztrátový výkon rezistorů neřešili.

⁹⁰ IR LED ale nemusí mít vždy černé pouzdro, některé mívají pouzdro průhledné.

⁹¹ Je to logické: Proč by se mělo do fotografií plést „světlo“, které lidské oči nevidí, a vlastně tak fotografii zkreslovat.

⁹² To znamená, že do série s LED budeme zapojovat rezistory o odporu stovek $\text{k}\Omega$.

⁹³ Při pozorování pomocí lupy budete patrně vidět do LED lépe, než umožňují níže uvedené fotografie pořízené běžným fotoaparátem.



Obr. 27. Pohled „do nitra LED“ (bližší popis viz text)

Slabá šikmá „čárka“ od středu čipu, viditelná na levé a prostřední fotografii, je jeden přívod k čipu, druhý je elektroda, která je pod ním. Horní přívod je při větším zvětšení vidět i na pravé fotografii, která ukazuje LED z boku. Je vidět, že tento přívod je spojen s druhým vývodem LED. Malá mistička, slabě viditelná na pravé fotografii, je zrcátko. Toto zrcátko odráží část světla, které čip vyzařuje do stran, zpátky nahoru k povrchu pouzdra.

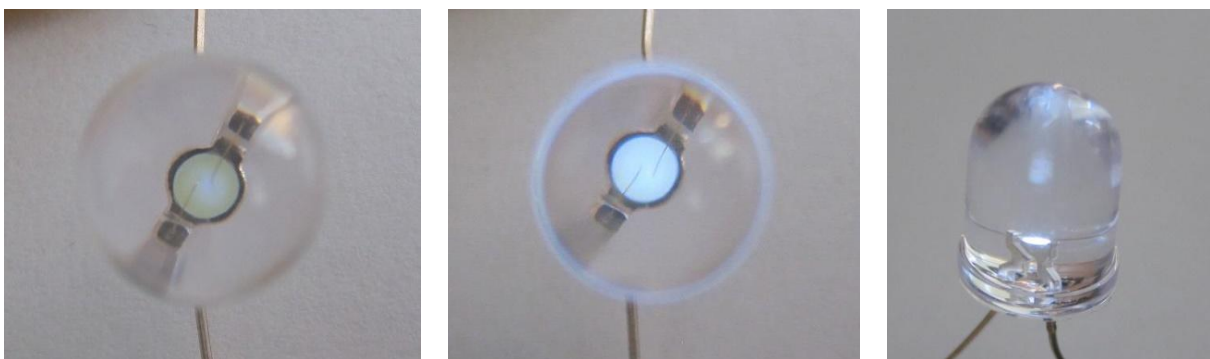
Bílé LED

Doposud jsme se věnovali pouze svítivým diodám vyzařujícím světlo určité barvy. Jak ale fungují LED, které svítí bílým světlem?

Opět je to otázka, kde bychom mohli vymýšlet různé hypotézy. (Schválně, zkuste se zamyslet, jaké by to mohly být, než budete číst dál.)

Jednou možností by bylo, zkombinovat světlo červené, zelené a modré barvy. Takhle skutečně fungovaly některé z prvních vyráběných bílých LED, ale dnes už naprostá většina bílých LED funguje na jiném principu.

Vlastně jsme se s tímto principem již setkali, když jsme svítili UV diodou na fluorescenční barvy. K fluorescenci není nutně potřeba UV dioda, stačí modrá. V bílých LED svítí modrá LED na fluorescenční materiál, který vyzařuje světlo bílé nebo mírně nažloutlé barvy. Spolu s prosvítajícím světlem modré LED je výsledkem prakticky bílé světlo. Fluorescenční materiál uvnitř LED vidíme i při pohledu do ní, viz obr. 28.



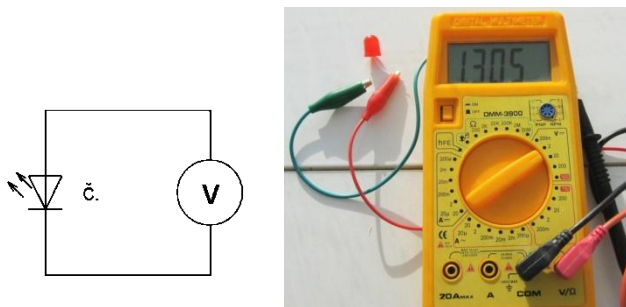
Obr. 28. V nitru bílé LED je vidět fluorescenční materiál

Slabé šikmé „čárky“ při pohledu shora jsou opět přírody k polovodičovému čipu vyzařujícím modré světlo, ten je ukryt pod matně vypadající vrstvičkou fluorescenčního materiálu.

S tím, že v bílé svítících LED je ukryta modrá, souvisí i napětí potřebné pro to, aby bílá LED svítila: jak se můžeme přesvědčit měřením, je asi 3 V, stejně jako na modrých LED.

5.4. * LED dává napětí

Pro následující pokus uděláme trochu divnou věc: k LED připojíme pouze voltmetr – a **žádný zdroj napětí**, viz obr. 29. Přesto, když na LED posvítíme, voltmetr ukáže nenulové napětí.



Obr. 29. Když na LED dopadá světlo, stane se zdrojem napětí⁹⁴

Vidíme tedy, že LED se vlastně chová jako fotodioda nebo fotočlánek. Dokáže měnit světelnou energii v elektrickou. Reálně ji samozřejmě nikdo nebude používat jako zdroj elektrické energie, protože je to zdroj velice neefektivní. Ale napětí (a také velmi slabý proud) při nasvícení dává.⁹⁵

⁹⁴ Pokud budete tento pokus provádět, svítejte na LED dostatečně intenzivním světlem, například nasmírejte LED přímo na Slunce. V daném pokusu (za již podvečerního světla Slunce) bylo napětí produkované LED asi 1,3 V.

⁹⁵ Dokonce podobně tomu, že pro rozsvícení modré LED potřebujeme vyšší napětí než pro rozsvícení červené, platí, že modrá LED dá při nasvícení vyšší napětí než červená. S obyčejným multimetrem to ovšem bohužel nenaměříme, protože se ukazuje, že modrá LED použitá jako zdroj napětí má extrémně vysoký vnitřní odpor, takže i připojení multimetru s odporem 10 MΩ ji téměř úplně „zkratuje“. Inu, použití jednoduchých a laciných pomůcek má své meze...

6. K čemu LED využít

V předchozích kapitolách jsme se seznámili se základními vlastnostmi svítivých diod a s tím, jak je napájet resp. zapojovat do obvodů. Pojďme se ještě v rychlosti podívat na několik možností jejich využití, zejména v jednoduchých pomůckách.

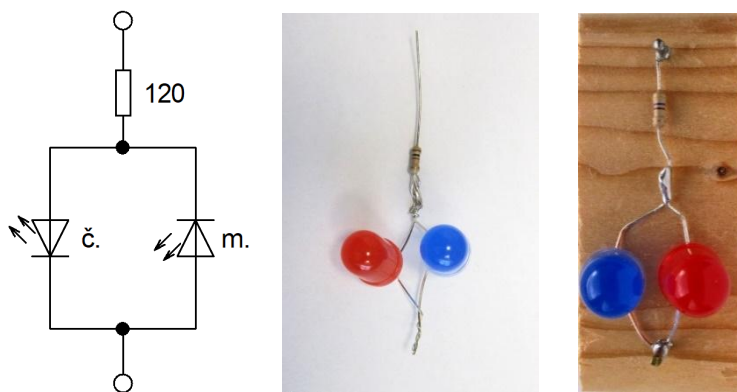
6.1. Dekorační a jiná světélka

Nejjednodušší se nabízí téměř samo: LED mohou být očima různých plyšáků či strašidýlek, reflektory modelů aut či lokomotiv, mohou svítit z různých čepic, masek, apod. Pro dekoraci v bytě se samozřejmě prodává řada komerčních výrobků, LED pásků apod., ale obecně se amatérské tvořivosti meze nekladou. Podle toho, jaké budete mít k dispozici baterie či zdroje napětí, už budete jistě umět sami propojit LED sériově či paralelně a přidat k nim vhodné rezistory omezující proud.⁹⁶

6.2. Indikace proudu

Svítivé diody mohou sloužit k indikaci procházejícího proudu. Samozřejmě, půjde jen o malé proudy do asi 20 až 30 mA. Nevýhodou takového indikátoru také bude značný úbytek napětí (2 V pro červenou LED, asi 3 V pro modrou). Přesto se takový indikátor může hodit. Dá se jím demonstrovat třeba proud při nabíjení kondenzátoru: už při kapacitě kondenzátoru 1 μF svítivá dioda viditelně blikne⁹⁷. Multimetr ani ručičkový měřicí přístroj se pro indikaci tak krátkého proudového pulzu nehodí.

Se zapojeným sériovým rezistorem může také LED indikovat polaritu baterií nebo jiných zdrojů proudu.⁹⁸ Zapojíme-li paralelně, ale s opačnou polaritou, dvě LED různých barev, jak to ukazuje obr. 30, budou při různých polaritách svítit LED různé barvy. Při připojení ke zdroji střídavého proudu pak budou svítit obě diody.



Obr. 30. Dvě LED zapojené paralelně s opačnou polaritou⁹⁹

⁹⁶ Pozor, v něčem se zde ale meze kladou! Jistě by šlo zapojit do série třeba 110 červených LED a s vhodným rezistorem v sérii takovýto výtvar připojit do zásuvky. Ale pak byste měli na některých diodách prakticky síťové napětí proti zemi a dotyk na jejich vývody by mohl vést k úrazu elektrickým proudem, možná i fatálnímu. Takže pozor, od síťového napětí s našimi jednoduchými konstrukcemi ruce pryč! (Teď jen doufám, že toto upozornění v někom nevyvolá touhu si to zkusit podobně jako známé varování „Děti, když mrzne, nelízejte venku kovové zábradlí“... Ostatně, jak by určitě upozornili ti, kdo se v elektronice víc vyznají, připojení takového řetězce LED ke střídavému napětí by mohlo způsobit problémy v periodě, kdy napětí na LED působí v závěrném směru. Pokud by se napětí na diody nerozdělilo rovnoměrně, mohlo by na některé LED překročit nejvyšší dovolené napětí v závěrném směru, takže by se tato dioda mohla prorazit, pak třeba některá další... Takže opravdu ne, tuhle konstrukci prosím skutečně nezkoušejte!)

⁹⁷ Slabé bliknutí lze dokonce vidět už při nabíjení kondenzátoru o kapacitě několika desítek nF.

⁹⁸ Jejich napětí ovšem musí být větší než asi 2 V.

⁹⁹ Pro toto zapojení se používá i termín „antiparalelně“.

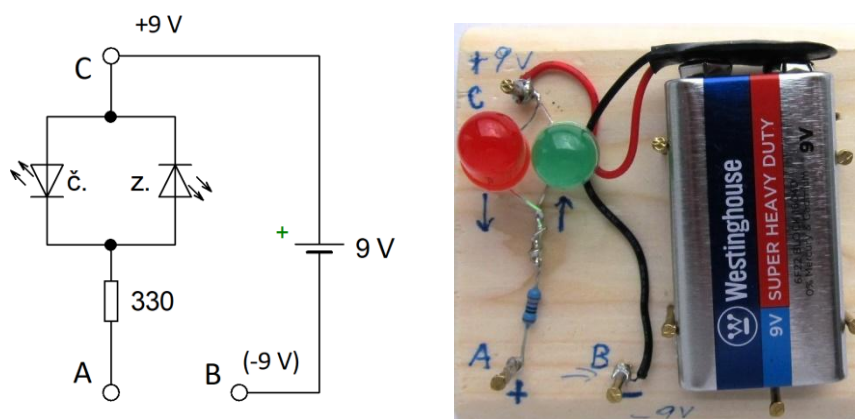
Tuto pomůcku můžeme nejjednodušeji udělat tak, že prostě zkroutíme vývody LED a k jednomu zkroutením připojíme i rezistor, jak to ukazuje prostřední část obr. 30. Větší výdrž bude pomůcka mít, když vývody LED a rezistoru připájíme k mosazným hřebíčkům zatlučeným do malé destičky, viz pravou fotografii na obr. 30. Pomůcka a její vytvoření je popsána v již zmíněné volně dostupné publikaci [5] a také v článku [8] – tam je také ukázáno, jak s ní jednoduše demonstrovat, že se ve střídavém proudu rychle střídá polarita napětí.

6.3. Jednoduchá zkoušečka

Pokud pomůcku z obr. 30 doplníme baterií, můžeme ji využít i pro další účely: například zkoušení vodičů (zda nejsou přerušené) a zejména zkoušení polarit diod, svítivých diod a případně i dalších polovodičových součástek.¹⁰⁰

Baterií může být plochá baterie 4,5 V; zkoušečka s ní byla popsána už před léty v příspěvku [9]; tam jsou také popsány některé další metody jejího využití. (Například na vyzkoušení, zda v multimetru na proudovém rozsahu není přepálená pojistka.) V daném příspěvku je též popsána i „pokročilejší“ varianta zkoušečky, která navíc obsahuje jeden tranzistor.¹⁰¹ Je v něm také uvedeno několik rad pro začátečníky, kteří se učí pájet. (Ne nadarmo titlek příspěvku začíná „Nebojte se pájet...“.)

Menší rozměry má zkoušečka s devítivoltovou baterií. Schéma i možné provedení ukazuje obr. 31.¹⁰²



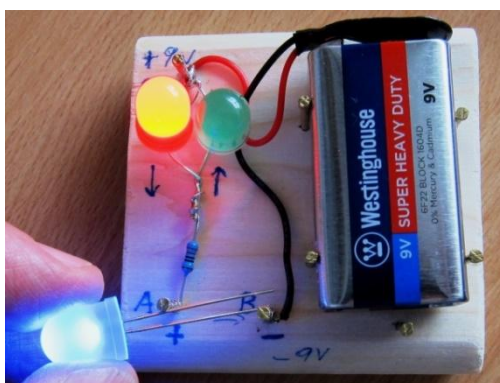
Obr. 31. Zkoušečka s dvojicí LED a 9 V baterií

Výhodou této zkoušečky je, že s ní lze bez problémů zkusit i polaritu modrých, bílých a UV LED; při zkoušení září dostatečně jasně, protože jimi protéká proud okolo 10 mA. Při zkoušení polarit LED nepotřebujeme ani žádné vodiče, stačí LED přiložit, aby se její vývody dotýkaly příslušných mosazných hřebíčků, jak to ukazuje fotografie na obr. 32.

¹⁰⁰ Například přechodů báze-emitor a báze-kolektor bipolárních tranzistorů.

¹⁰¹ S její pomocí lze orientačně zkusit velké odpory, demonstrovat vodivost lidského těla nebo nabíjení kondenzátorů malých kapacit.

¹⁰² Stručně byla tato zkoušečka popsána v článku [8].



Obr. 32. Zkoušení polaritu modré LED pomocí zkoušečky

Zkoušečkou můžeme také indikovat proud a zkoušet polaritu baterií (od napětí 3 V do asi 10 V) podobně, jako s předchozí pomůckou z obr. 30. Stačí k tomu využít kontakty označené na schématu A a C.

A pokud potřebujeme, bude nám zkoušečka i zdrojem napětí 9 V, toto napětí je mezi vývody B a C. Je vidět, že na to, jak je zkoušečka jednoduchá a laciná, jde o pomůcku docela všestrannou.

6.4. Model můstkového usměrňovače

Svitivé diody propouštějí proud jen jedním směrem; fungují tedy jako normální diody a lze je použít k usměrnění střídavého proudu. Nevýhodou oproti normálním diodám je vyšší úbytek napětí na LED¹⁰³ a samozřejmě malý maximální dovolený proud.^{104 105} Do skutečných usměrňovačů tedy LED používat nebudeme. Ovšem hodí se do názorných modelů, kde svým svitem ukazují, kudy teče proud.

Velmi oblíbenou konstrukcí na seminářích pro učitele je model dvoucestného usměrňovače – Graetzova můstku. Je popsán v článku [8] (i s odkazem na autorku původního nápadu), zde ho proto popíšeme jen stručně.

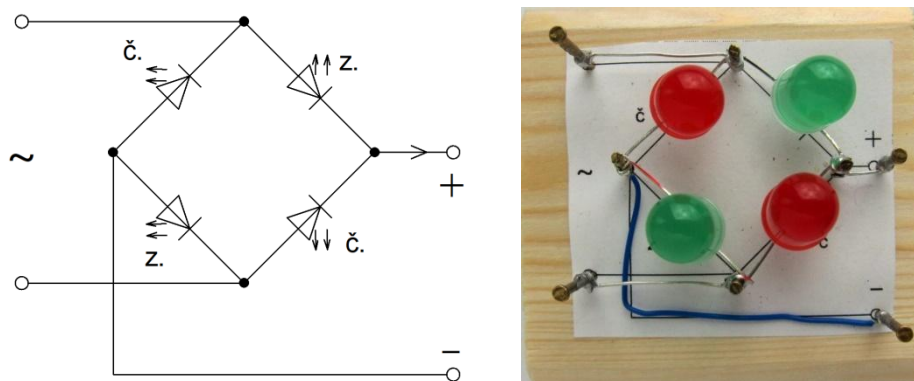
Jak ukazuje obr. 33, konstrukce na destičce přesně kopíruje schéma. (Pokud si budete tuto pomůcku vyrábět, dejte pozor, aby polaritu všech diod byly správně. Snadno se to splete a zapojení pak nefunguje.¹⁰⁶)

¹⁰³ Na běžných křemíkových diodách je při menších proudech úbytek napětí 0,7 až 0,8 V (jak se můžeme přesvědčit např. měřením jejich VA-charakteristiky, viz [5]). Na LED je úbytek napětí 2 až 3 V.

¹⁰⁴ Jak jsme už upozorňovali výše, malé LED mívají povolený proud max. 20 až 30 mA. I malé usměrňovací křemíkové diody mají povolený proud výrazně vyšší. Např. typ 1N4007 má max. proud 1 A, běžně se dají dostat diody s maximálními povolenými proudy desítek A. (Nemluvě o usměrňovacích diodách pro opravdu velké proudy, používaných třeba v elektrických lokomotivách.)

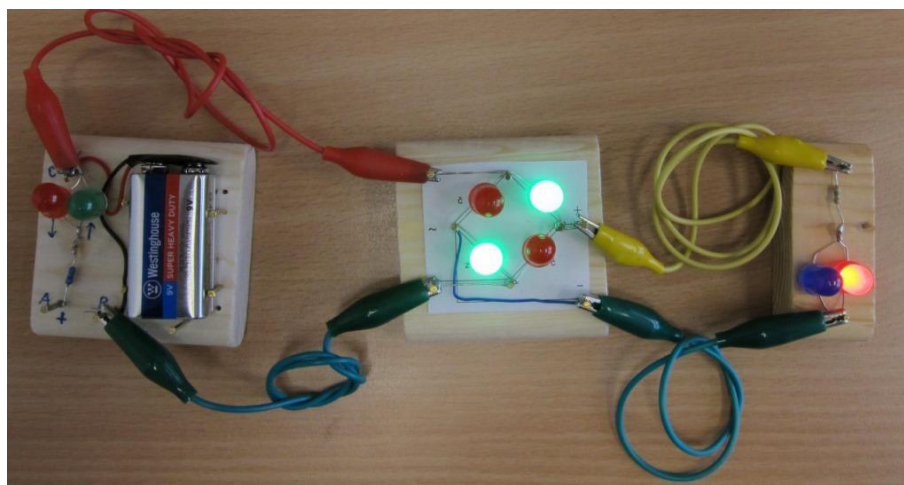
¹⁰⁵ Další nevýhodou je nízké maximální povolené napětí v závěrném směru (tedy při polaritě LED, kdy jí neteče proud). O něm jsme dosud nemluvíli, protože při našich pokusech napájených z baterií o napětí 4,5 V nebylo nutno se na něj ohlížet. Ve specifikacích výrobců však někdy bývá uváděno jako povolené napětí v závěrném směru jen 5 V. Výrobci se asi uváděním takto nízké hodnoty spíše „jistí“; podle praktických zkušeností vydrží LED vyšší napětí, někdy až desítek voltů. (Ovšem při překročení toho, co vydrží, se zničí.) V každém případě je ale toto napětí výrazně nižší než u běžných usměrňovacích křemíkových diod, kde bývá až stovky voltů. (Např. typ 1N4007 má uvedeno maximální napětí v závěrném směru 1000 V.)

¹⁰⁶ Vyplatí se ověřit funkci zapojení dříve, než LED na mosazné hřebíčky připájíte.



Obr. 33. Graetzův můstek ze svítivých diod

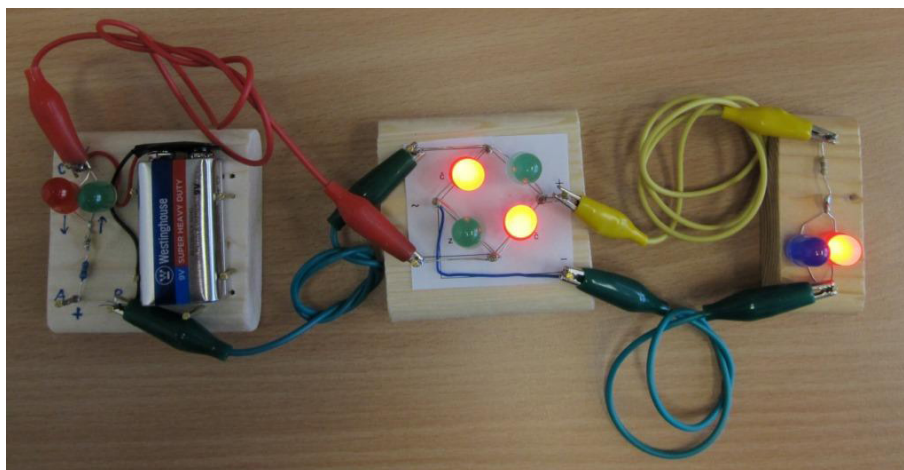
Připojíme-li na vstup označený symbolem střídavého napětí (tedy vlnovkou) napětí z baterie, žádná LED nesvítí.¹⁰⁷ Není divu – LED svítí při protékajícím proudu a ten zatím nemá kam protékat, dokud na výstup nepřipojíme nějaký spotřebič (jinými slovy, nějakou „zátěž“). Jako spotřebič můžeme využít pomůcku se dvěma LED z obr. 30. Připojíme-li na vstup střídavé napětí (o amplitudě alespoň asi 5 V), svítí v usměrňovacím můstku všechny LED, což nám o funkci nic názorně neprozradí. Připojíme proto na vstup 9 V baterii¹⁰⁸; můžeme použít baterii ve zkoušečce popsané výše. Výsledek ukazují obr. 34 a 35 – v závislosti na polaritě napětí na vstupu svítí buď zelené, nebo červené LED. Na „spotřebiči“ stále svítí LED jedné barvy. To znamená, že na výstupu má napětí stále stejnou polaritu, je opravdu usměrněno.



Obr. 34. Průchod proudu můstkovým usměrňovačem při jedné polaritě napětí na vstupu

¹⁰⁷ Člověka to může zmást, ale nebojte se, zapojení určitě „rozhýbeme“.

¹⁰⁸ Plochá baterie o napětí 4,5 V by nestačila – v našem zapojení máme tři LED v sérii.

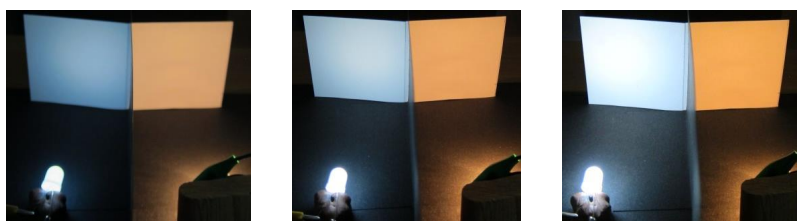
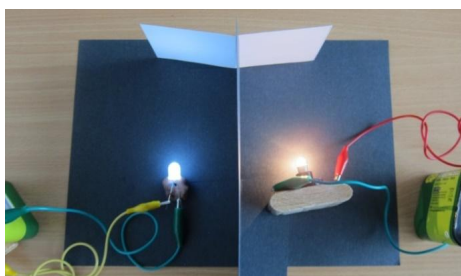


Obr. 35. Průchod proudu můstkovým usměrňovačem při opačné polaritě napětí na vstupu

Na vstupu můžeme také použít přepínač, jímž můžeme rychle připojovat napětí jedné nebo druhé polarity, viz schéma v [8]. Rychlým „přecvakáváním“ přepínače pak vlastně vytváříme na vstupu střídavé napětí.¹⁰⁹

6.5. * Skutečné osvětlení

Svítivé diody se už dnes běžně používají k osvětlování, od malých lampiček po náhradu žárovek na síťové napětí třeba v lustrech.¹¹⁰ A používají se proto, že osvětlení „LEDkami“ je energeticky úspornější.¹¹¹ I v pokusu s malými LED můžeme alespoň velmi zhruba ilustrovat, jak jsou svítivé diody úsporné oproti žárovkám. Jednu z možností ukazuje obr. 36¹¹²: Na dvě části papíru svítí zvlášť bílá svítivá dioda a malá žávička (3,5 V, 0,3 A); mezi nimi je svislá přepážka z tmavého papíru.



Obr. 36. Porovnání osvětlení od bílé LED a žárovky.
(Na levou část papíru svítí LED, na pravou žávička; svit LED měníme.)

¹⁰⁹ Nemá sice harmonický průběh (ale obdélníkový), ovšem to nám zde nevádí.

¹¹⁰ A samozřejmě jako světla v autech a leckde jinde.

¹¹¹ A v Evropě samozřejmě také proto, že EU žárovky zakázala...

¹¹² Následující pokus berte opravdu jako inspiraci a neváhejte ho upravovat podle svých potřeb a zkušeností. (Jde o pokus, který byl připraven a realizován nově právě pro tuto publikaci, takže se jistě bude v budoucnu ještě dál vyvíjet.)

Žárovka svítí stále stejně, svit LED nastavujeme změnou odporu sériového rezistoru. Tři fotografie na spodní části obr. 36 ukazují situace, kdy osvětlení levého papíru je oproti osvětlení pravého papíru žárovkou pozorovatelně menší, zhruba stejné a pozorovatelně větší.

Naše porovnání samozřejmě bude velmi nepřesné a subjektivní, i proto, že barva světla LED a žárovky je výrazně jiná. (Světlo bílé LED je „modřejší“ resp. „chladnější“, světlo žárovky „teplejší“.) Ale dejme tomu, že najdeme situaci, kdy bychom řekli, že osvětlení je přibližně stejné. V našem případě přitom na LED bylo napětí asi 2,8 V a protékal jí proud asi 5 mA.¹¹³ LED tedy odebírala příkon asi 14 mW. Napětí na žárovce bylo asi 3,2 V, proud byl přibližně 0,25 A, příkon žárovky tedy byl asi 0,8 W. To znamená, že příkon LED byl jen asi 2 % příkonu žárovky.

Tento výsledek ovšem neodpovídá tomu, co se běžně uvádí: že přechod na „LED žárovky“ ušetří až 90 % energie¹¹⁴. Opravdu jsme v našem pokusu ušetřili 98 % energie oproti žárovce? Že by malé LED byly ještě výrazně úspornější než velké, použité pro osvětlování?

Určitě ne. Žárovka totiž září do všech stran, zatímco světlo naší svítivé diody je soustředěno směrem dopředu.¹¹⁵ Takže ve výše uvedeném pokusu byl sice příkon LED více než padesátkrát nižší, než příkon žárovky, ale její celková svítivost rozhodně nebyla stejná – přestože ve směru dopředu svítila podobně jako žárovka.

Jak jsme už uvedli, v předchozím pokusu se subjektivně těžko porovnávalo nasvícení papíru, když šlo o světlo různých barev. Snazší je to v případě, kdy na místě bílé LED použijeme „teple bílou“ (bývají označeny anglickým termínem *warm white*). Pokus s touto LED ukazují obr. 37.



Obr. 37. Porovnání osvětlení od teple bílé LED a žárovky

Svítivé diody můžeme také využít pro zhotovení jednoduché svítilny (třeba na pásku na čelo nebo na přidělaní na brýle či kam je libo); taková jednoduchá baterka se může hodit třeba při nějaké noční táborové hře.¹¹⁶ Jen pozor, pokud použijete barevnou LED. Před mnoha léty si jeden kolega právě na noční hře svítil červenou LED – a některé pokyny na papírech připevněných na stromech byly psány červenou fixou. Moc si z nich nepřečetl... ☺

¹¹³ Pro pozorovatelně menší a pozorovatelně větší osvětlení byl proud svítivou diodou více než dvakrát menší resp. větší. (Při různých barvách je rozdíl v osvětlení opravdu těžké porovnat, pro přesnější měření bychom museli osvětlení měřit luxmetrem.)

¹¹⁴ Údaje, které se uvádějí u jednotlivých „LED žárovek“ spíše ukazují na úsporu 85 % energie, např. někteří výrobci uvádějí, že LED o příkonu 9 W nahradí 60 W žárovku. Podle toho by LED o stejné svítivosti měla šestkrát až sedmkrát menší příkon než klasická žárovka.

¹¹⁵ Pro přesnější pokus by bylo potřeba světlo žárovky také nasměrovat ze všech směrů dopředu nebo proměřovat osvětlení do různých směrů.

¹¹⁶ Dnes je samozřejmě k dispozici mnoho profesionálních baterek s LED, ale svítit si v lese vlastnoručně vyrobenou svítílkou má něco do sebe. Pokud ji navíc napájíte třeba z ploché baterie, vydrží zřejmě svítit déle, než komerční baterka napájená z malých tužkových článků. (Jen tu plochou baterii budete muset dát do kapsy, na brýlích za uchem by pro ni asi nebylo nejlepší místo. ☺)

6.6. Skládání barev

Příhoda popsaná v předchozím odstavci nás navádí na další aplikaci svítivých diod, použitelnou ve výuce fyziky. Zkuste svítit LEDkami různých barev na nápisy napsané různobarevnými fixami nebo na barevné obrázky či fotografie a sledujte, jak se pozorované barvy mění.

Skládat lze i barevná světla jednotlivých LED.¹¹⁷ S výkonnými LED to lze velmi názorně demonstrovat celé třídě, jak krásně ukázal příspěvek V. Piskače [10]. Tyto a podobné experimenty již necháme na laskavém čtenáři...

¹¹⁷ V tomto případě jde o tzv. aditivní skládání barev.

7. Závěr – co jsme „vybádali“ a kde hledat další informace

V předchozích kapitolách jsme se pomocí pokusů seznámili s mnoha vlastnostmi svítivých diod. Víme už, jaké je na nich napětí a jak souvisí s barvou jejich světla, jaký jimi protéká proud (a že je třeba si dát pozor na jejich zničení či poškození velkým proudem), že pro ně neplatí Ohmův zákon a že je proto třeba omezit proud sériově zapojeným rezistorem; vhodnou hodnotu jeho odporu umíme spočítat.

Víme, že nemůžeme jednoduše spojit třeba červenou a modrou LED paralelně¹¹⁸, ale že každá musí mít vlastní rezistor v sérii, seznámili jsme se i s ultrafialovými a infračervenými LED, nakoukli jsme také do vnitřku LED a máme představu, jak vzniká bílé světlo v bílých LED. Pro tohle vše nám stačilo jen minimum měření; řadu věcí jsme zvládli jednoduchými pokusy zcela bez měření.

Stranou nezůstala ani „technická tvořivost“; svítivé diody jsme využili při zhotovení několika jednoduchých, ale užitečných pomůcek. Zdaleka jsme přitom nevytvořili vše zajímavé, co by šlo udělat. Pominuli jsme například možnost přenášení signálů pomocí IR záření. Jednu možnost popisuje příspěvek Z. Poláka [11], pro příjem je ovšem potřeba využít fototranzistor.¹¹⁹ Další příspěvek Z. Poláka [12] popisuje některé další pokusy s LED, včetně ultrafialových.

Tím se dostáváme k otázce, **kde čerpat další náměty, inspiraci, poučení a informace.**

Samozřejmě, nepřeborným zdrojem toho všeho je internet. Ale nemusíme chodit úplně do světa; velikým zdrojem inspirace mohou být i příspěvky na českých konferencích, třeba na konferenci Veletrh nápadů učitelů fyziky. Výhodou je, že prakticky všechny sborníky jsou volně k dispozici na webu a že mezi vybranými příspěvky lze vyhledávat pomocí klíčových slov. Konkrétně příspěvků týkajících se LED lze ve sbornících do ročníku 2016 najít celkem 31, viz [13].

Pokud jde o bližší informace o svítivých diodách a jak se fyzika a technologie podílely na jejich vývoji a zdokonalování, pak jako neocenitelný zdroj informací lze doporučit články J. Valenty [14] a [15].

A co říci úplně závěrem?

Ať už budete další informace a náměty hledat kdekoli, nebo vám zatím informace v této útlé knížečce budou postačovat, přeji vám, aby se vám pokusy a tvorba jednoduchých pomůcek a konstrukcí se svítivými diodami dařily a aby se líbily vám i vašim žákům.¹²⁰

¹¹⁸ A víme, proč by v tomto případě modrá LED nesvítila.

¹¹⁹ Jednoduchý „detektor“ IR signálu z televizních a podobných ovladačů využívající fototranzistor je popsán i v [5].

¹²⁰ Trochu nevázně snad můžeme dodat: A pokud přitom přinesou i trochu poučení, bude to dobrý bonus... © Fakticky ale jako autor doufám, že k tomu, aby některé pokusy či konstrukce s LED zaujaly a nějaké to poučení přinesly, snad alespoň malou troškou může přispět i tato knížka.

Literatura

- [1] *Projekt Heuréka* [online]. Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/heureka/>
- [2] Svět součástek [online]. Dostupné online: <https://www.svetsoucastek.cz/>
- [3] GES electronic [online]. Dostupné online: <https://www.ges.cz/cz/>
- [4] GM electronic [online]. Dostupné online: <https://www.gme.cz/>
- [5] DVOŘÁK Leoš; *Polovodiče a jejich aplikace* [online]. Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/polovodice.pdf>
- [6] *Datasheet LED diody LED 10MM RED 550/40° DIFF 105MR2D* [online]. Dostupné online GM electronic: <https://www.gme.cz/led-10mm-red-550-40-diff>
- [7] *Datasheet IR LED TSAL6100* [online]. Dostupné online: <https://www.vishay.com/ir-emitting-diodes/list/product-81009/>
- [8] DVOŘÁK, Leoš; KAMARÁDOVÁ, Zdeňka. Udělejte si sami: jednoduché aplikace polovodičů (nejen) pro ZŠ. *MATEMATIKA–FYZIKA–INFORMATIKA*, 2019, 28(1), 55–66. Dostupné online: <http://www.mfi.upol.cz/index.php/mfi/article/view/442>
- [9] DVOŘÁK, Leoš; *Nebojte se pájet – a postavte si jednoduchou zkoušečku* [online]: sborník příspěvků z *Dílňů Heuréky 2003-2004*, Praha: Prometheus. Dostupné online: https://kdf.mff.cuni.cz/heureka/sborniky/DilnyHeureka_2003-2004.pdf
- [10] PISKAČ Václav; Barevné čelovky a spousta mikrofonů [online]: sborník *Veletrh nápadů učitelů fyziky 15*, Praha: Prometheus, 2011. s. 176–180. Dostupné online: [http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_15_\(Praha_2010\).pdf](http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_15_(Praha_2010).pdf)
- [11] POLÁK Zdeněk: Náměty na experimenty s infračerveným zářením [online]: sborník *Veletrh nápadů učitelů fyziky 15*, Praha: Prometheus, 2011. s. 181–185. Dostupné online: [http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_15_\(Praha_2010\).pdf](http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_15_(Praha_2010).pdf)
- [12] POLÁK Zdeněk.: Několik pokusů s LED [online]: sborník *Veletrh nápadů učitelů fyziky 17*, Praha: P3K, 2012, s. 69–73. Dostupné online: [http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_17_\(Praha_2012\).pdf](http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Veletrh_17_(Praha_2012).pdf)
- [13] Sborníky z konferencí Veletrh nápadů učitelů fyziky. Dostupné online: [http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Příspevky týkající se LED lze dohledat v kolekci vybraných příspěvků z daných konferencí, po výběru příslušného klíčového slova, konkrétně jsou na: \[http://vnuf.cz/sbornik/klicova/LED_dioda_\\(178\\).html\]\(http://vnuf.cz/sbornik/klicova/LED_dioda_\(178\).html\)](http://vnuf.cz/sbornik/rocniky/Příspevky_týkající_se_LED_lze_dohledat_v_kolekci_vybraných_příspěvků_z_daných_konferencí,_po_výběru_příslušného_klíčového_slova,_konkrétně_jsou_na:_http://vnuf.cz/sbornik/klicova/LED_dioda_(178).html)
- [14] VALENTA, Jan. Modrá je dobrá. Díl 1. Stoletá cesta svítivých diod od kuriozity k Nobelově ceně. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 2015, 60(1), s. 3–18. Dostupné online: <http://dml.cz/dmlcz/144333>
- [15] VALENTA, Jan. Modrá je dobrá. Díl 2. Svítivé diody jako základ nové generace osvětlovací techniky. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 60(2), s. 89–104. Dostupné online: <http://dml.cz/dmlcz/144402>

Vzdělávací modul Člověk a příroda ve vzdělávací oblasti Fyzika

Polovodiče prakticky: Začínáme s LED

Leoš Dvořák

Vydala Univerzita Karlova, Pedagogická fakulta

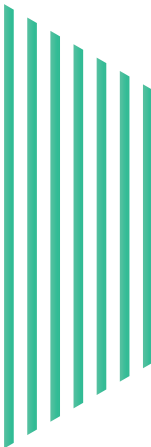
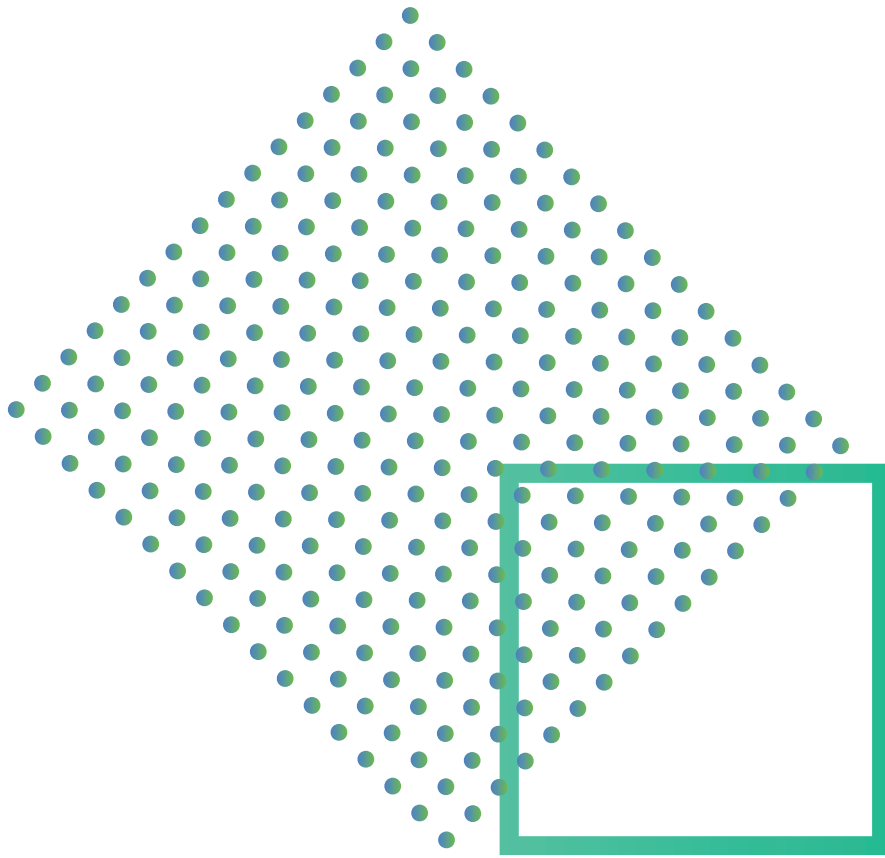
Rok vydání: 2019

Počet stran: 43

Formát A4 (elektronická publikace ve formě PDF)

1. vydání

ISBN 978-80-7603-060-2



 TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta přírodovědně-humanitní
a pedagogická

MUNI



 Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

..META*~