

# **Středoškolská odborná činnost**

**Obor: 02.  
Fyzika.**

## **Spektrální analýza světla**

**Autor:** Tomáš Lepič

**Škola:** Střední škola spojů a informatiky  
Bydlinkého 2474, Tábor, 39011

**Konzultant:** Ing. Pavel Musila

**Tábor 2016**

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně. Použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně.

V Táboře 10. dubna 2016

Tomáš Lepič

## **Poděkování**

Děkuji vyučujícím naší školy za obětavou pomoc při řešení mé práce.

## **Anotace**

Cílem práce je ukázat na možnosti využití optického spektrometru při analýze světelného spektra různých zdrojů světla i vyhodnocení absorpce světla v roztocích různých sloučenin.

## **Klíčová slova**

Spektrometr, emise světla, absorpance světla, fluorescence, zdroje světla, žárovka, zářivka, [LED](#)-svítivá dioda, [LD](#)-laserová dioda.

## Obsah

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod .....                                                                                                                     | 5  |
| Cíle .....                                                                                                                     | 5  |
| Bezpečnost práce .....                                                                                                         | 5  |
| Teoretický úvod.....                                                                                                           | 6  |
| Měření emise světelných zdrojů.....                                                                                            | 8  |
| Naměřené výsledky .....                                                                                                        | 10 |
| Měření emisních spektrálních diagramů základních světelných zdrojů.....                                                        | 10 |
| Měření absorpance roztoků .....                                                                                                | 16 |
| Měření roztoků fluorescenční metodou.....                                                                                      | 19 |
| Měření fluorescence je velmi citlivá měřicí metoda, kterou lze velmi přesně měřit např.<br>koncentrace látek v roztocích. .... | 19 |
| Závěr.....                                                                                                                     | 20 |
| Seznam obrázků a diagramů .....                                                                                                | 21 |
| Použitá odborná literatura .....                                                                                               | 21 |
| Použité webové odkazy .....                                                                                                    | 21 |
| Zkratky a odborné termíny .....                                                                                                | 22 |
| Příloha provedení měřicího přípravku.....                                                                                      | 23 |

## Úvod

Při studiu fyziky na naší střední škole jsem se seznámil s žákovským optickým spektrometrem PS 2600 společnosti Pasco, která se věnuje vývoji a výrobě učebních pomůcek a výukových systémů. Měření tímto spektrometrem mě velmi zaujalo hlavně tím, co všechno lze pomocí spektroskopie zjistit. Ve své práci chci zájemce o tuto tematiku seznámit se způsoby využití spektrometru Pasco k měření emise (vyzařování) světla žárovek, zářivek, polovodičových svítivých diod [LED](#) i laserové diody [LD](#), dále k měření absorpce (pohlcování) světla různými roztoky a z toho vyhodnotit jejich složení i koncentraci a také ukázat možnosti měření fluorescence (vybuzeného vyzařování) a jeho využití pro přesné a citlivé analýzy roztoků.

## Cíle

Pro svou práci jsem si stanovil několik cílů:

- naučit se používat výukový systém Pasco k měření s optickým spektrometrem PS-2600, sestavit měřicí aparaturu s optickým snímačem PS-2601,
- nakonfigurovat měřicí software Pasco Spectrometry,
- změřit emisní spektrum světla různých světelných zdrojů,
- změřit absorpční světelný diagram roztoků různých sloučenin,
- změřit diagram fluorescence roztoků různých sloučenin,
- měřením ověřit teoretické znalosti,
- dodržovat zásady bezpečné práce.

## Bezpečnost práce

- Při použití [PC](#) a tiskárny používat důsledně napájení pouze ze zásuvky s proudovým chráničem s nadproudovou ochranou 16 A / 30 mA.
- Pozor na ostré světlo moderních vysoce svítivých [LED](#) diod, nedívat se do nich zblízka, doporučuji použít sluneční brýle!
- Roztoky sloučenin k měření absorpce světla a fluorescence budou hermeticky uzavřeny v měřicích kyvetách, s jejich uzávěry nemanipulovat, použitá barviva nejdou vyprat, technický líh je hořlavina a nasycený roztok NaCl je žíravina. Doporučuji používat ochranné brýle a jednorázové pryžové rukavice!
- Měření vyžaduje maximální soustředěnost a pečlivost!
- Měření jsem prováděl pod dohledem svého učitele.

## Teoretický úvod

Světlo, které vnímá lidské oko je v podstatě elektromagnetické vlnění velmi vysokého kmitočtu, tedy velmi malé vlnové délky  $\lambda$  a to v rozsahu přibližně  $\lambda = 400$  až  $700$  nm.

Mezi vlnovou délkou a kmitočtem světla platí vztah

$$\lambda = c / f; \quad [ \text{m}, \text{m/s}, \text{Hz} ]$$

kde  $c$  je rychlost světla.

Největší rychlost má šíření světla ve vakuu  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s.

Naše oko vnímá každou jinou vlnovou délku jako jinou barvu, konkrétně například světlo s vlnovou délkou  $\lambda = 450$  nm ( $= 0,45$   $\mu\text{m}$ ) vnímáme jako modré,  $\lambda = 530$  nm jako zelená  $\lambda = 670$  nm jako červené. Součtovým (aditivním) mísením těchto základních barev světla vznikají všechny ostatní barvy, které známe například z duhového spektra. Smísením všech těchto barev v poměru jak k nám přichází světlo ze Slunce dostávají naše oči vjem bílého světla.

Jinak je tomu s barvou předmětu, barviva nebo nátěru s barevnými pigmenty. Například červený svetr spolužačky se nám jeví jako červený proto, že z dopadajícího bílého světla se k nám odráží pouze světlo červené, zatímco ostatní barvy svetr pohlcuje (absorbuje). To také znamená, že tento svetr nebude vůbec vidět při osvětlení čistě modrým světlem. (Těchto triků také často využívají kouzelníci-iluzionisté.) V případě mísení barviv hovoříme o takzvaném subtraktivním čili rozdílovém mísení, při kterém se zvětšuje pohlcování barevných složek, barevná směs vytváří tmavší barvy až k barvě černé.

Rozložit světelné paprsky na jednotlivé barvy, lze například skleněným hranolem, který kratší vlnové délky světla láme pod větším úhlem, takže světlo dopadá na podložku za hranolem rozložené do barevných pruhů. Podobně lze použít optickou mřížku, na které vzniká různý ohyb světelných paprsků podle jejich vlnové délky. Oba principy jsou používány při konstrukci optických spektrometrů, které slouží k analýze měřeného dopadajícího světla. Ve spektrometru Pasco PS-2600 jsou barevné pruhy rozloženého světla promítány na pás polovodičových fotodiod, které dopadající světlo dané barvy přeměňují na elektrické napětí a předávají tyto informace měřicí elektronické aparatuře, která prostřednictvím programového vybavení vytvoří spektrální diagram na zobrazovači tohoto měřicího systému.

Jen malá poznámka k přírodnímu efektu duhy při dešti. Na dešťových kapkách vzniká lom světla a mezi kapkami ohyb světla. Ten krásný duhový efekt nastane když se správně sejde hustota deště, velikost kapek a vzdálenost pozorovatele, aby právě k němu dopadaly různě zalomené barvy z různých výšek dešťových vrstev nad sebou.

K měření a hodnocení úrovně osvětlení se používají fotometrické veličiny.

**Světelný tok  $\Phi$  [lm]** je celkový zářivý tok viditelného světla z daného zdroje. Jednotkou je lumen. Klasická žárovka s příkonem 100 W má světelný tok okolo 1700 lm.

**Svítivost  $I$  [cd]** má jednotku kandela ( v angličtině znamená svíčka) a je to hustota světelného toku, tedy podíl vyzařeného světelného toku a prostorového úhlu vyzařování.

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ sr}$$

kde sr je jednotka prostorového úhlu steradián.

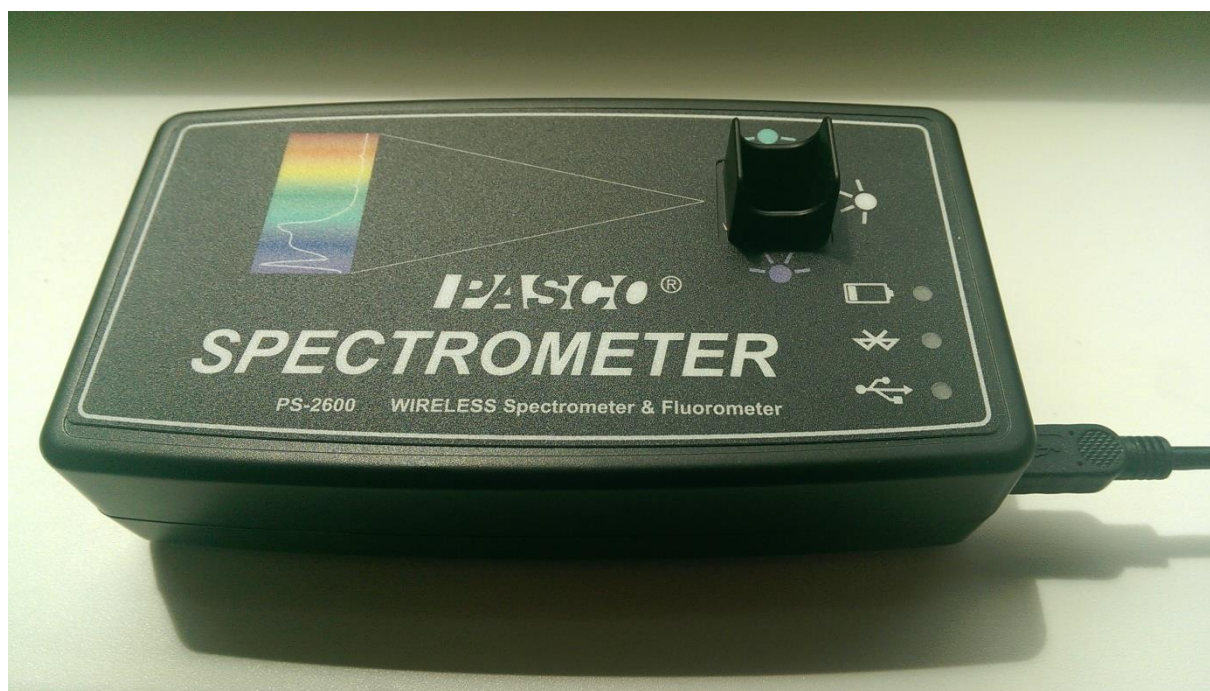
Kandela je zařazena mezi základní jednotky mezinárodní soustavy SI. Běžná svíčka má svítivost přibližně 1 cd, žárovka 100 W má svítivost 170 cd. Moderní LED diody dosahují vysoké svítivosti ( desítky tisíc cd ) tím, že vyzařují světlo do malého prostorového úhlu. Pro snadnější představu obchodní katalogy uvádějí vyzařovací úhel v běžných stupních. Současné LED diody mají vyzařovací úhly od 30° do 8° .

**Intenzita osvětlení  $E$  [lx]** je pak dána poměrem světelného toku dopadajícího na jednotku osvětlované plochy.

$$E = \Phi / S ; [\text{lx}, \text{lm}, \text{m}^2]$$

Intenzita osvětlení ubývá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje světla. Svíčka ze vzdálenosti 30 cm osvětluje přibližně intenzitou 10 lx. Pro rýsování potřebujeme aspoň 500 lx.

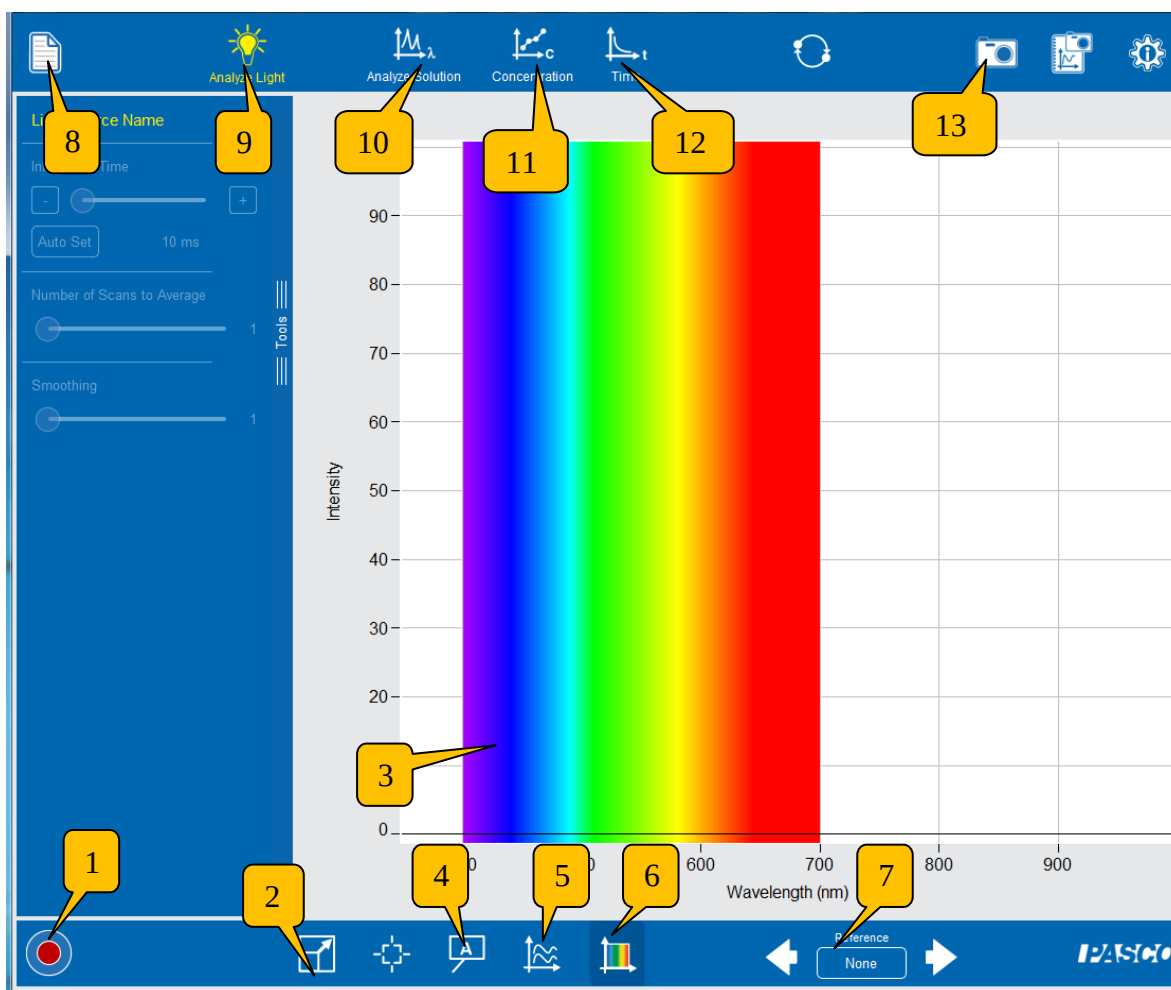
## Měření emise světelných zdrojů



Obr. 1. Spektrometr Pasco-2600.

Spektrometr Pasco-2600 je přístroj k měření spektrálních diagramů emise, absorpce i fluorescence světla s možností připojení k [PC](#) pomocí [USB](#) i Bluetooth nebo přes aplikaci k Smartphonu. Měřicí rozsah tohoto spektrometru je pro vlnové délky světla  $\lambda$  od 400 do 900 nm ( $10^{-9}$ m). Jeho rozlišovací schopnost je 1 až 2 nm. Tento žákovský spektrometr je vybaven napájecím akumulátorem s kapacitou 2000 mAh, jehož nabíjení přes USB trvá až 8 hodin. Napájení akumulátorem umožňuje používat spektrometr i v terénu, nezávisle na napájecí energetické síti.





Obr. 2. Ovládací a zobrazovací panel spektrometru.

Vysvětlení ovládacích prvků řídicího panelu spektrometru z obr. 2:

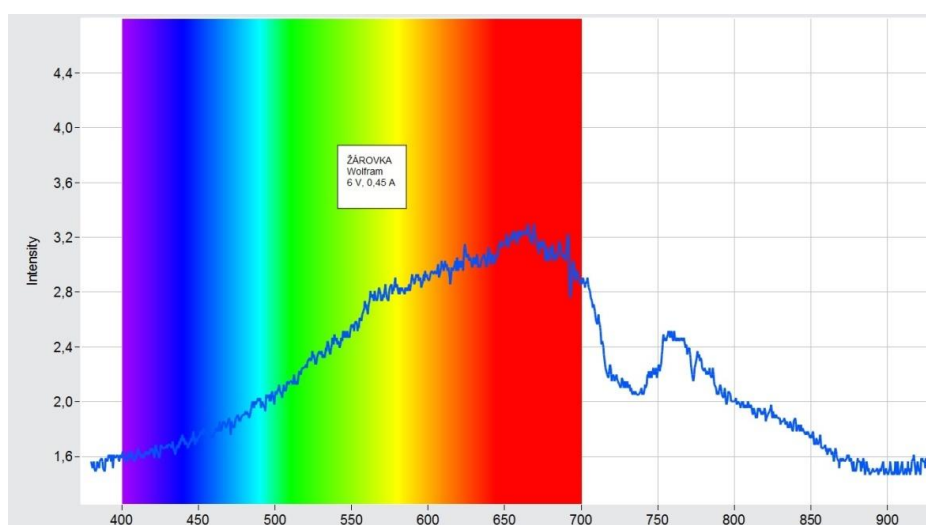
- 1 - zapnutí aplikace,
- 2 - zvětšení zobrazení spektrogramu,
- 3 - zobrazovací plocha diagramu naměřeného spektra,
- 4 - doplnění textem,
- 5 - zobrazení bez barevného pozadí,
- 6 - zobrazení s barevným pozadím,
- 7 - zobrazení referenčních spektrálních čar základních prvků,
- 8 - uložení dokumentu,
- 9 - měření emisního spektra,
- 10 - měření absorpance a fluorescence roztoku,
- 11 - měření koncentrace roztoku,
- 12 - měření časových průběhů změn koncentrace,
- 13 - snímek naměřeného diagramu

Řídicí [SW](#) spektrometru plně automatizuje jeho činnost tak, že obsluha se může plně soustředit na to co se měří (a ne jak měřit). Práce s tímto řídicím SW je příjemná a intuitivní, v současnosti již existuje i jeho česká lokalizace.

## Naměřené výsledky

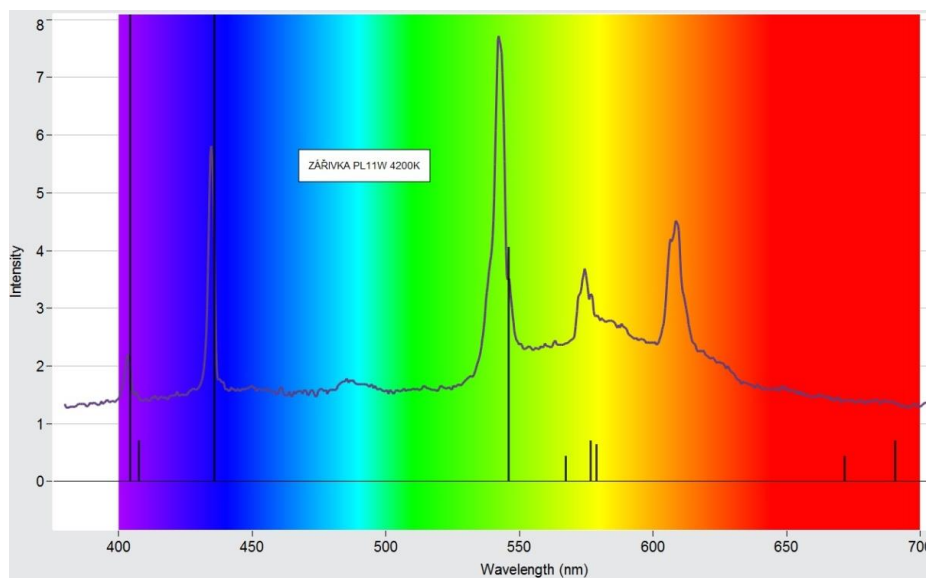
### Měření emisních spektrálních diagramů základních světelných zdrojů

K tomuto měření se ke spektrometru připojí snímač PS 26001, což je v podstatě držák zakončení světlovodného vlákna, které přivádí dopadající světlo do spektrometru. Podle obr.2 zapneme na ovládacím panelu měřicí režim Analyze Light, světlovod přiblížíme na definovanou vzdálenost od zdroje světla a měřicí SW zobrazí naměřený spektrální diagram čili graf intenzity světla v závislosti na jeho vlnové délce.



Obr. 3. Spektrální diagram žárovky.

Na obr. 3 je snímek měřeného spektrálního diagramu wolframové žárovky 6V/3W ze vzdálenosti 5cm. Výrazné je červené světlo a tepelné [IR](#) záření.

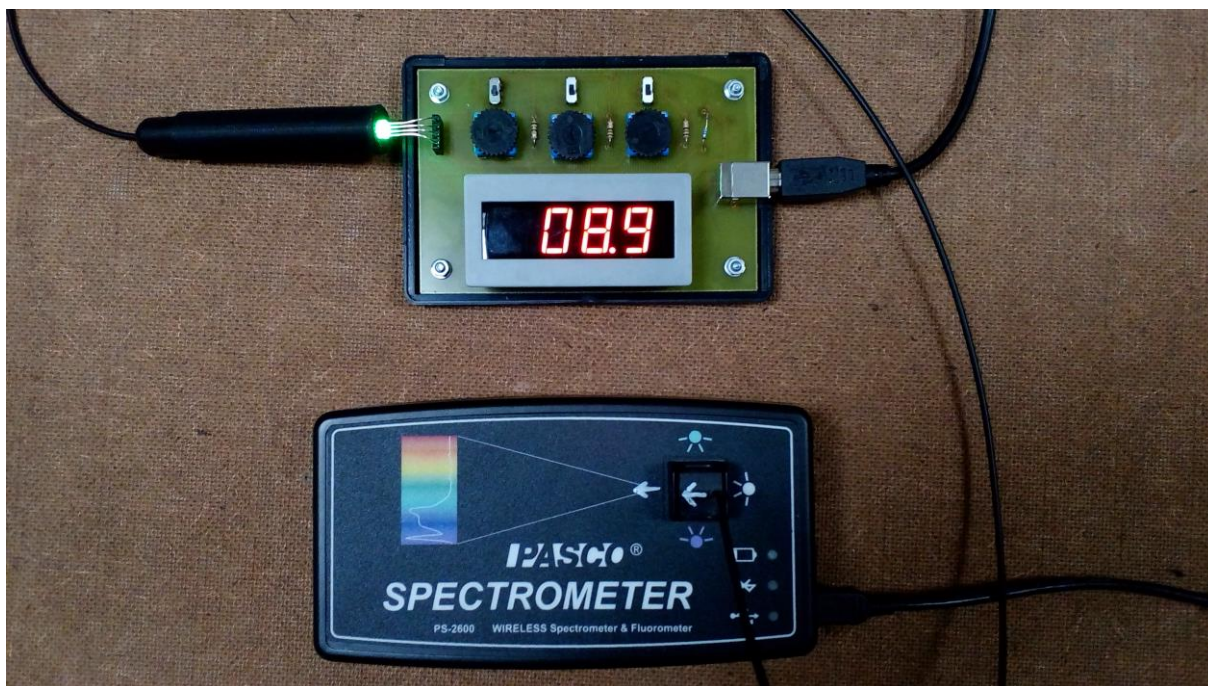


Obr. 4. Spektrální diagram zářivky.

Obr. 4. ukazuje naměřený spektrální diagram trubicové zářivky 230V/40W ze vzdálenosti 5cm. Svislé referenční přímky indikují spektrální čáry elektrického výboje ve zředěných parách rtuti (hydrargium). Tím je potvrzeno, že elektrický světelný výboj v zářivce probíhá ve rtuťových parách. Na stejném principu fungují i tzv. „úsporné žárovky“. Ekologickým problémem u nich zůstává, že obsahují jedovatou rtuť. Další bílé světlo je ze zářivky emitováno díky vnitřnímu bílému povlaku trubice z kysličníku barya, který funguje jako konvertor světla. Energeticky je vybuzen UV zářením ze rtuťového výboje a následně je přebytek energie elektronů z vyšších oběžných orbitů vyzářen při návratu zpět na svou stabilní oběžnou dráhu jako světlo s větší vlnovou délkou spadající do intervalu bílého světla. Zářivky bez baryového luminoforu vyzařují hlavně [UV](#) záření a používají se např. k opalování v soláriích, nebo v mém studijním oboru k osvětlování fotorezistové vrstvy při výrobě plošných spojů fotografickou metodou.

Budoucnost světelných zdrojů patří svítidlům z [LED](#) diodami a v dálkovém přenosu dat po optických vláknech dominují [LD](#) laserové diody, proto jsem své další měření nasměroval k měření spekter těchto zdrojů.

Po několika improvizovaných měřeních LED diod jsem se rozhodl postavit měřicí přípravek zobrazený na následujícím obrázku 5 v součinosti se spektrometrem.

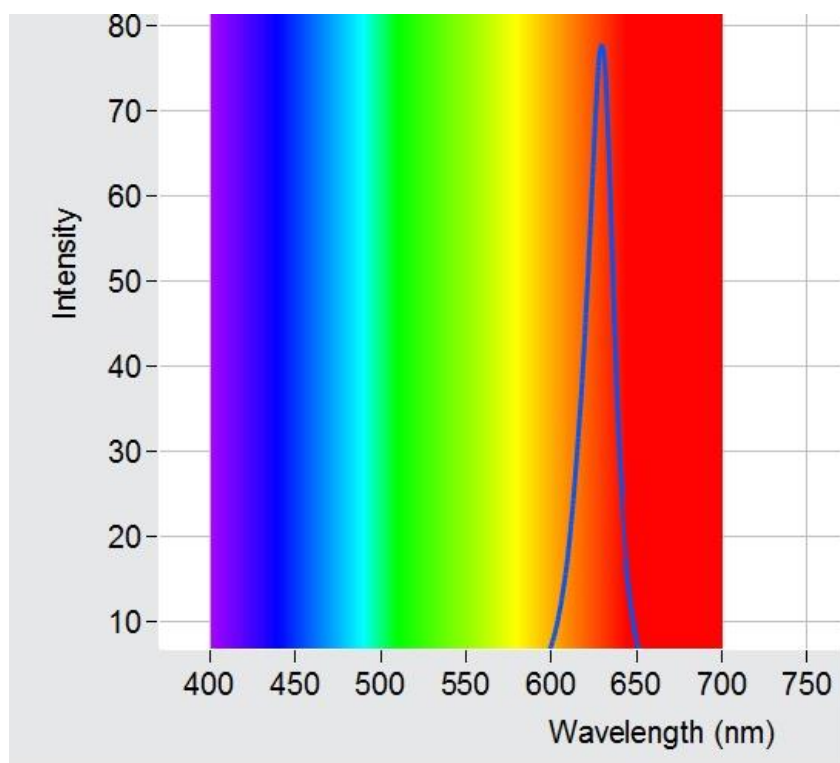


Obr. 5 Měřicí přípravek pro LED

Měřicí přípravek na obr. 5 obsahuje tři spínače a tři reostaty k zapnutí a regulaci proudu do sdružených [RGB LED](#) diod, kterými lze vhodnými proudy do jednotlivých diod dohromady nastavit optimální bílé světlo. Nastavené proudy lze průběžně odměřovat zabudovaným digitálním mA-metrem. Tímto přípravkem lze samozřejmě kontrolovat i jednočinné LED-ky a sledovat u nich energetickou účinnost jako poměr vyzářeného světelného toku a budicího proudu.

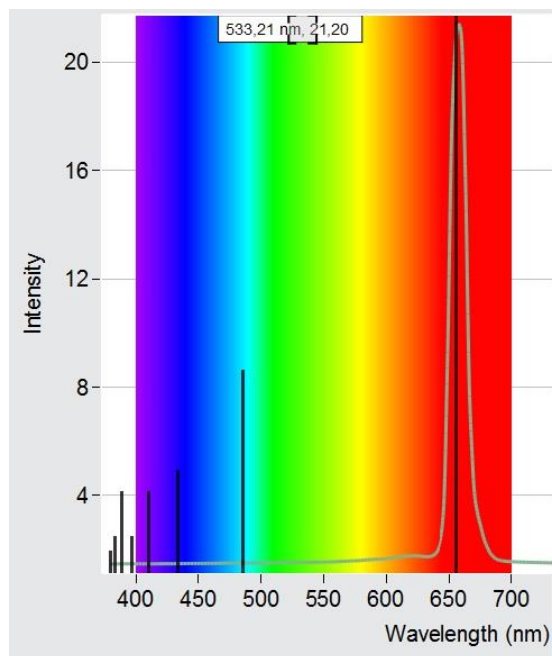
Pro zájemce o tento měřicí přípravek připojuji na konec své práce v příloze detailní [schéma](#) zapojení i [obrazec](#) desky plošných spojů.

Na následujících obrázcích 6 až 11 jsou uvedeny naměřené spektrální diagramy LED diod různých barev.



Obr. 6. Spektrální diagram červené LED.

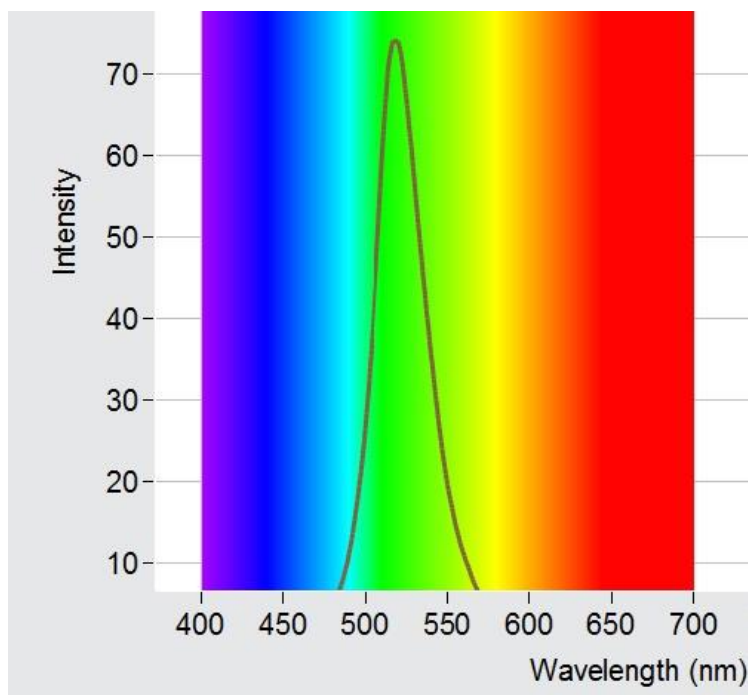
Deklarované parametry měřené červené [LED](#): svítivost 72 cd, vyzařovací úhel  $8^\circ$ , měřeno ze vzdálenosti 5cm.



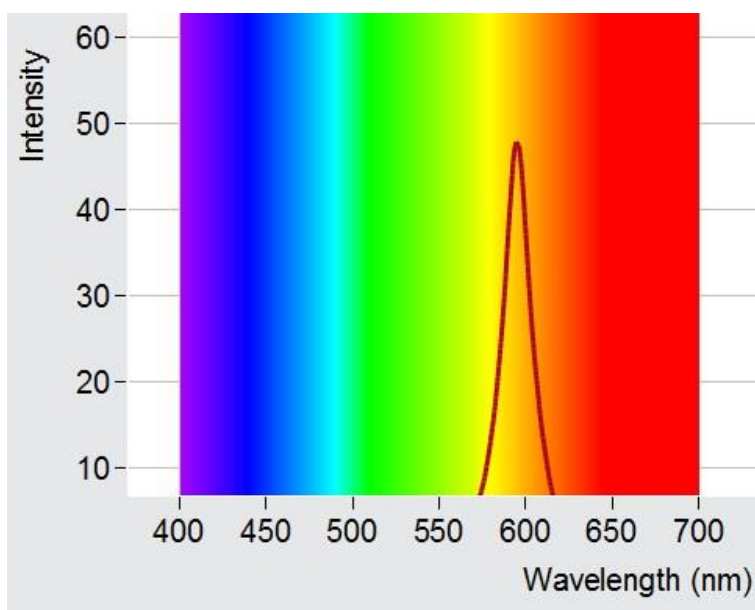
Obr. 7. Spektrální diagram červené LD.

Pro porovnání s červenou LED na obr. 6 uvádím na následujícím 7. obrázku naměřený spektrální diagram červeného laserového ukazovátka také ze vzdálenosti 5cm.

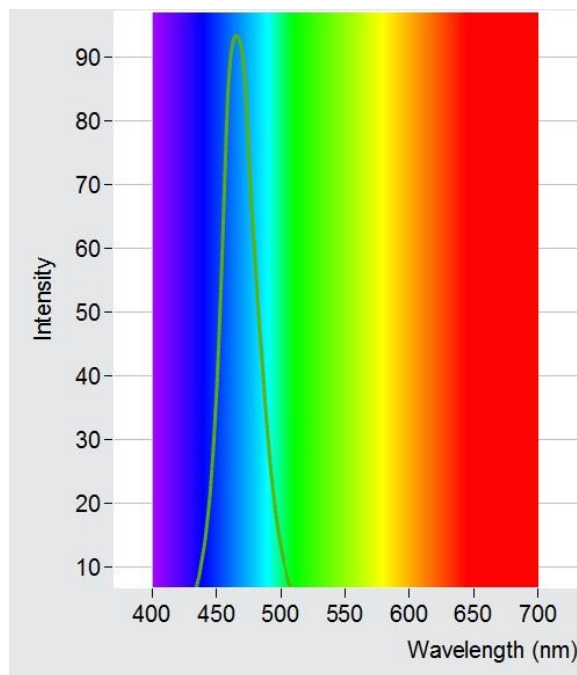
Porovnáním spekter z obr. 6 a 7 je vidět, že polovodičová laserová LD dioda má podstatně užší vyzařované barevné spektrum než dioda [LED](#). To znamená, že [LD](#) má vyšší „barevnou čistotu“ světla a více se blíží k ideálnímu monochromatickému zdroji světla pro přenos dat po optických vláknech. Každá jiná barva světla je totiž v optickém vláknu přenášena různou rychlostí, paprsky světla různých barev dorazí na konec vlákna s různým časovým zpožděním a tak degradují přenášený datový signál.



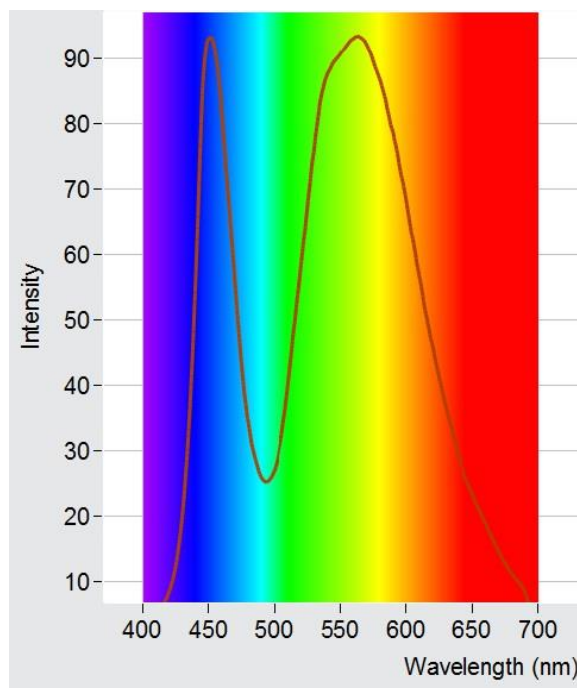
Obr. 8. Spektrální diagram zelené LED  
svítivost 72 Cd, vyzařovací úhel 8°, měřeno ze vzdálenosti 3 cm.



Obr. 9. Spektrální diagram oranžové LED  
svítivost 72 Cd, vyzařovací úhel 8°, měřeno ze vzdálenosti 3 cm.



Obr. 10. Spektrální diagram modré LED  
svítivost 72 Cd, vyzařovací úhel  $8^\circ$ , měřeno ze vzdálenosti 5 cm.



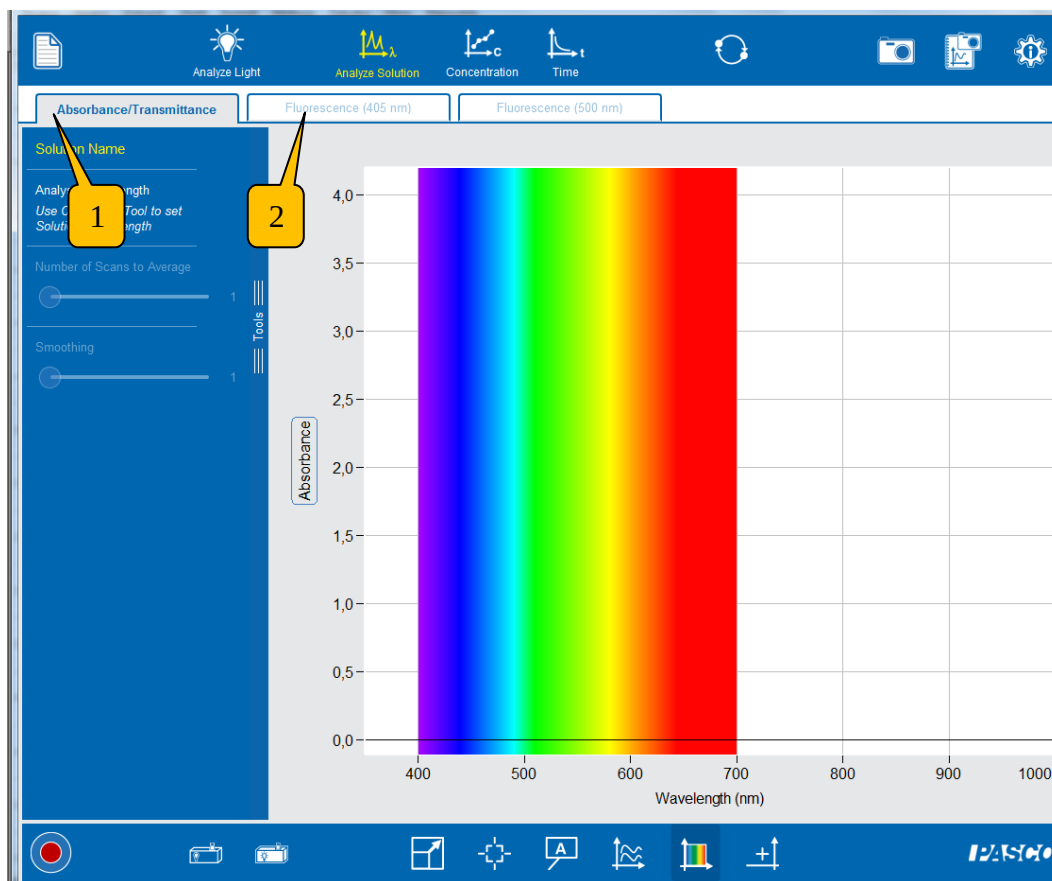
Obr. 11. Spektrální diagram bílé LED  
svítivost 72 Cd, vyzařovací úhel  $15^\circ$ , měřeno ze vzdálenosti 5 cm.

Z naměřeného spektra bílé LED je zřejmé, že její výsledná barva je tzv. „studená bílá“, protože, jak ukazuje spektrogram, je generována modrou, zelenou a žlutou LED-kou, které jsou integrovány do jednoho pouzdra. Červená složka zde chybí.

## Měření absorbance roztoků

Do spektrometru jsem postupně vkládal připravené kyvety s roztoky testovaných sloučenin a měřil spektrální diagramy absorbance čili pohlcování světla těmito sloučeninami.

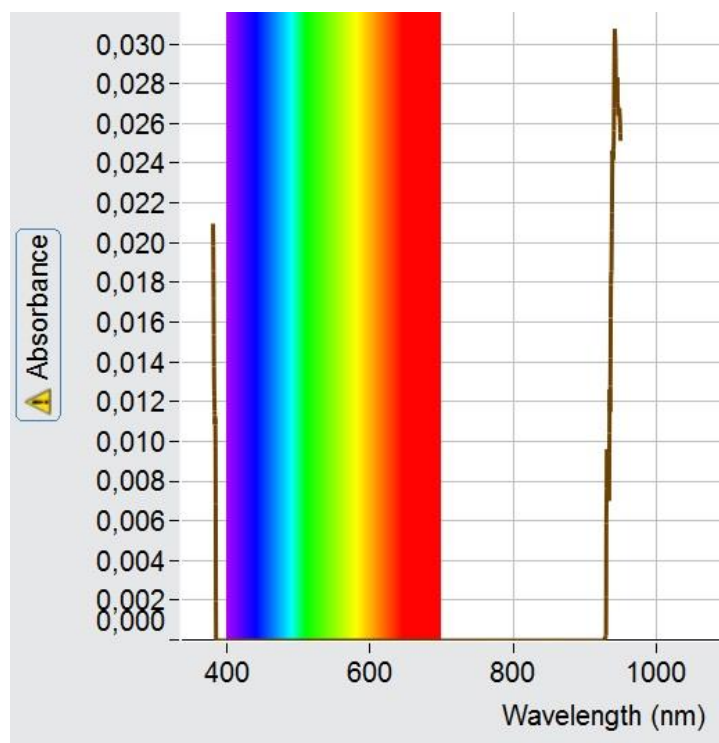
Měření absorbance světla v roztocích se nastavuje na ovládacím panelu spektrometru podle následujícího obr. 12.



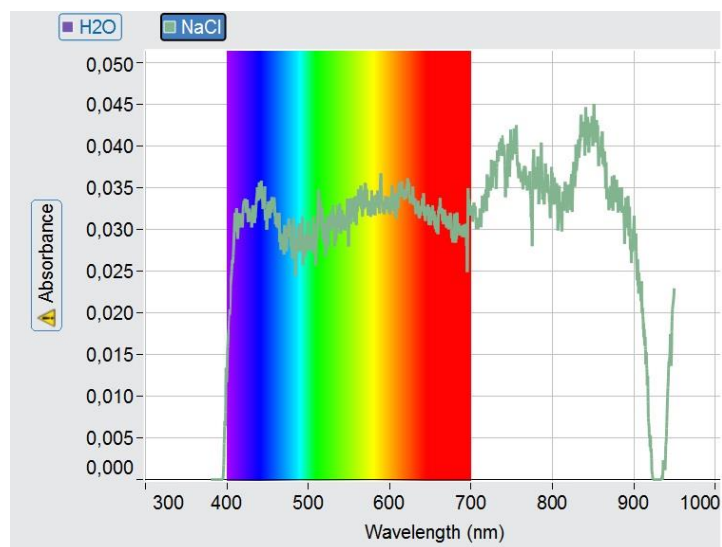
Obr. 12. Nastavení měření absorbance

Volba 1 zapíná měření absorbance světla v roztocích,  
volba 2 umožňuje alternativně zapnout měření fluorescence roztoků.

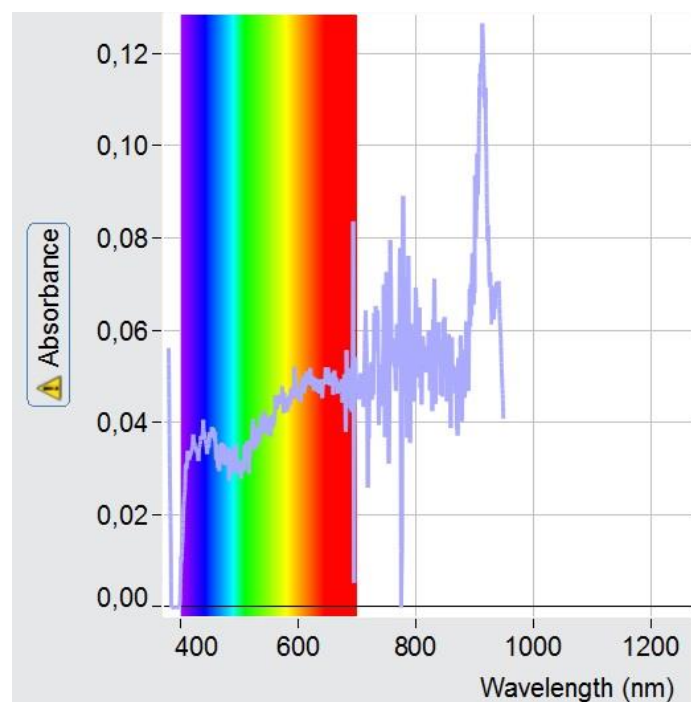




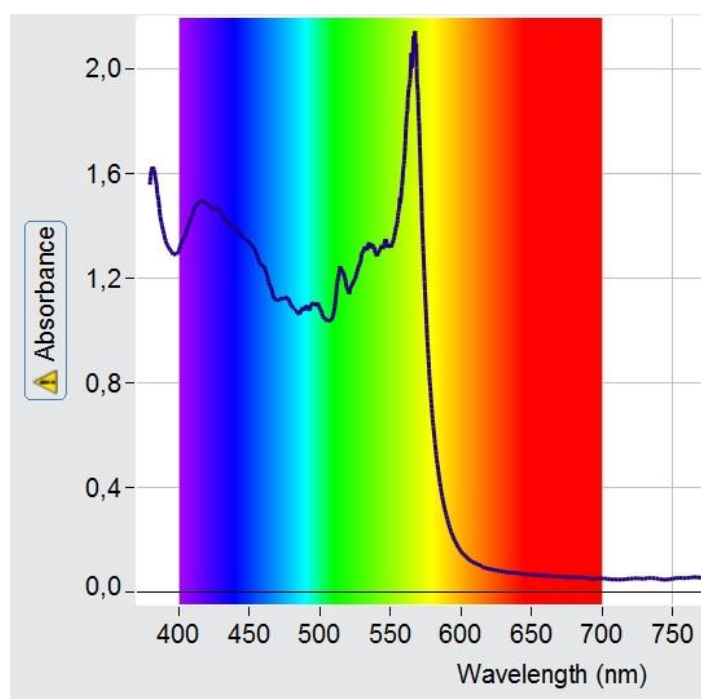
Obr. 13. Diagram absorbance destilované vody.



Obr. 14. Absorbance roztoku NaCl.  
(nasyceného vodního roztoku NaCl při 20 °C).



Obr. 15. Absorbance technického lihu.  
(použit byl technický lih 95% vol.)

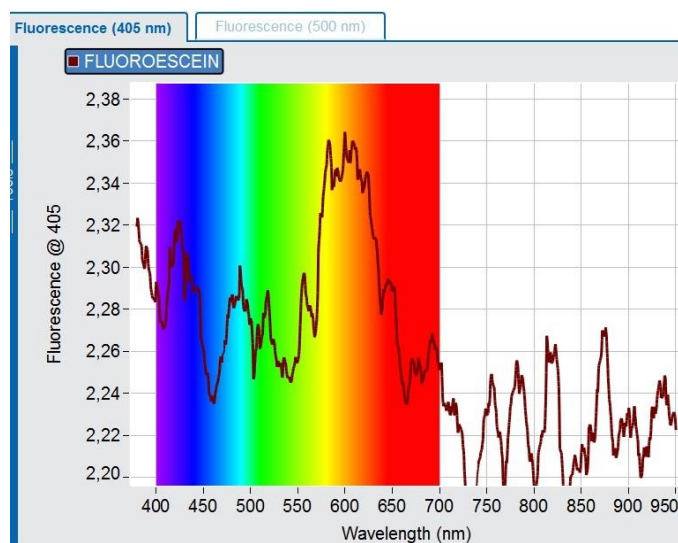


Obr. 16. Absorbance fluoresceinu.

Naměřený spektrální diagram absorbance lihového roztoku fluoresceinu sodného (oranžovo-červené barvy).

## Měření roztoků fluorescenční metodou

Spektrometr nastavíme na ovládacím panelu podle obr. 12 na měření fluorescence. Do spektrometru vložíme kyvetu s roztokem testované sloučeniny a změříme spektrální diagram fluorescence dané sloučeniny. Fluorescence je světlo vybuze jiné zářením, v našem případě je vzorek roztoku ve spektrometru ozařován zabudovanou LED diodou s vlnovou délkou 405 nm a spektrometr následně zaznamenává touto excitací vybuze vyzařované světlo.



Obr. 17. Fluorescence fluoresceinu

- lihový roztok fluoresceinu sodného, oranžové barvy byl vybuzen světlem s vlnovou délkou 405 nm.

Měření fluorescence je velmi citlivá měřicí metoda, kterou lze velmi přesně měřit např. koncentrace látek v roztocích.

## Závěr

V této práci jsem napsal o svých zkušenostech získaných při měření spektrometrem. Tento přístroj stejně jako obor spektroskopie mě zaujal tím, co všechno lze ze světelného spektra zjistit. Kromě v práci zmiňovaných témat měření emise světelných zdrojů, měření absorpance a fluorescence roztoků jsem rovněž dělal pokusy naměřit Balmerovu emisní řadu vlnových délek slunečního spektra, ze kterého lze určit, jaké termo-reakce na Slunci probíhají. Nebo změřit Fraunhoferovy čáry světla procházejícího atmosférou, což jsou temné spektrální čáry chybějícího světla, pohlceného složkami atmosféry, tím potvrdit obsah kyslíku a dusíku, ale také indikovat průmyslové exhalace. Bohužel však náš školní spektrometr na tyto úkoly nestačí svou menší rozlišovací schopností. Doufám, že při svém dalším studiu na vysoké škole budu moci pracovat s dokonalejšími přístroji a dále se věnovat tomuto zajímavému oboru.

Navíc jsem v této práci uvedl základní dokumentaci měřícího přípravku k měření emise LED diod, který je možné využít při jejich nákupu, u kterého si současně zkontrolujeme kvalitu svítivých diod. Na konci práce se mi podařilo využít Bluetooth spojení spektrometru s mým smartphonem, které umožňuje měření spektrometrem i v terénu. Prakticky jsem toho využil při nákupu LED svítidel do lustru, kdy jsem vybral LED žárovky s teplou bílou barvou, nejlepší svítivostí a přijatelnou cenou.

## Seznam obrázků a diagramů

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1. Spektrometr Pasco-2600. ....                         | 8  |
| Obr. 2. Ovládací a zobrazovací panel spektrometru. ....      | 9  |
| Obr. 3. Spektrální diagram žárovky. ....                     | 10 |
| Obr. 4. Spektrální diagram zářivky. ....                     | 11 |
| Obr. 5 Měřicí přípravek pro LED.....                         | 12 |
| Obr. 6. Spektrální diagram červené LED. ....                 | 13 |
| Obr. 7. Spektrální diagram červené LD. ....                  | 13 |
| Obr. 8. Spektrální diagram zelené LED ....                   | 14 |
| Obr. 9. Spektrální diagram oranžové LED.....                 | 14 |
| Obr. 10. Spektrální diagram modré LED ....                   | 15 |
| Obr. 11. Spektrální diagram bílé LED ....                    | 15 |
| Obr. 12. Diagram absorbance destilované vody. ....           | 17 |
| Obr. 13. Absorbance roztoku NaCl. ....                       | 17 |
| Obr. 14. Absorbance technického lihu. ....                   | 18 |
| Obr. 15. Absorbance fluoresceinu. ....                       | 18 |
| Obr. 16. Fluorescence fluoresceinu. ....                     | 19 |
| Obr. 17. Schéma zapojení měřicího přípravku LED diod. ....   | 23 |
| Obr. 18. Obrazec plošných spojů měřicího přípravku LED. .... | 23 |

[zpět na obsah](#)

## Použitá odborná literatura

[1] E.Svoboda a kolektiv: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus,ISBN: 80-7196-307-0.

## Použité webové odkazy

[2] [www.pasco.cz](http://www.pasco.cz)

## **Zkratky a odborné termíny**

PC - Personal computer

USB - Universal serial bus

IR - Infračervený (Infraradiation)

UV - Ultrafialový (Ultra Violation)

LED - Light emitting diode

LD - Laser diode

SW - Software

HW - Hardware

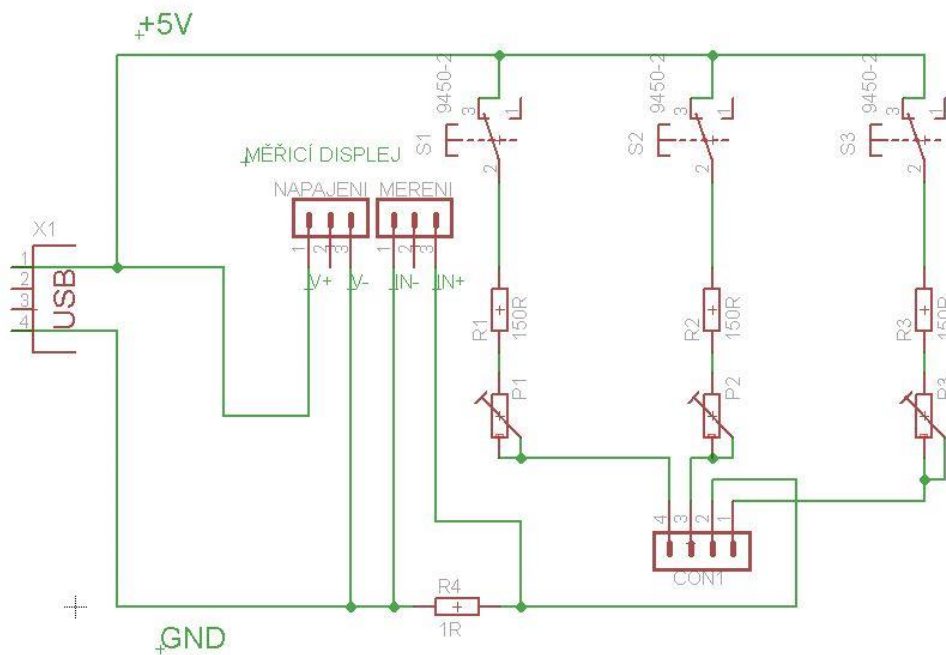
R - Red

G - Green

B - Blue

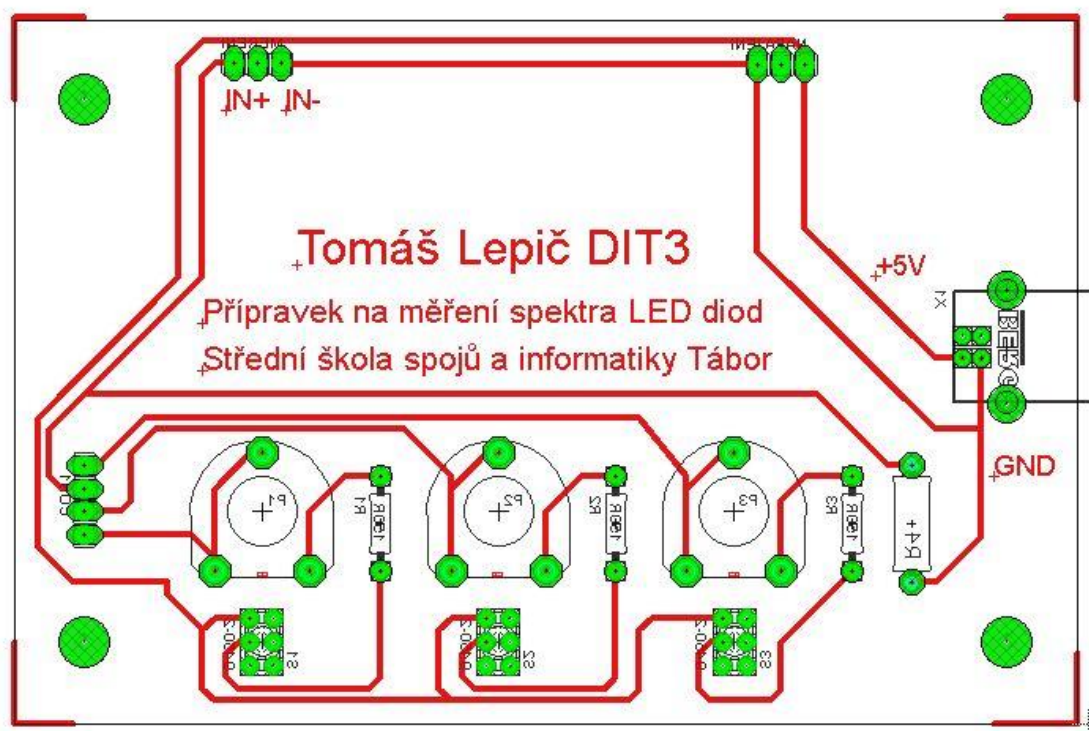
[zpět na obsah](#)

## Příloha provedení měřicího přípravku



Obr. 18. Schéma zapojení měřicího přípravku LED diod.

[zpět na obsah](#)



Obr. 19. Obrazec plošných spojů měřicího přípravku LED.

[zpět na obsah](#)