MUNI SCI

Praktikum školních pokusů 1

Úloha č. 1A: Optika – záření, zdroje a detektory

jarní semestr 2021

Obsah

1 Experimenty **2**

E 1 Rozklad světla hranolem . . . 2
E 2 Detekce IR záření ve spektru . . . 3
E 3 Radiometr jako detektor záření . . . 5
E 4 Detekce UV záření ve spektru rtuťové výbojky, luminiscence . . . 6
E 5 Antistokesova luminiscence . . . 7
E 6 Luminescence předmětů pod černým světlem . . . 8
E 7 Absorpce bílého světla v kapalinách . . . 8
E 8 Absorpce laserového světla v kapalinách . . . 11
E 9 Emisní spektra atomů a molekul (Geislerovy trubice) . . . 11
E 10 Fotoelektrický jev . . . 14
E 11 Zářivka . . . 15
E 12 Oblouková lampa . . . 15
E 13 Časový vývoj vyzařování světelných zdrojů . . . 15
E 14 Barva světel a pigmentů, skládání barev . . . 15

A Detektory neionizujícího záření **17**

B Vnímání světla a barev **20**

1 Experimenty

E 1 – Rozklad světla hranolem

Pro získání širokého spektra je vhodný hranol z materiálu s velkou chromatickou disperzí, ten ale nepropustí vzdálenější vlnové délky v UV.

Potřeby

- Optická lavice se zdrojem světla (halogenová žárovka), optickou štěrbinou, čočkou, hranolem na stolku, stínítko.

Provedení

1. Optickou štěrbinu postavíme před zdroj světla (úzká štěrbina zajistí dobré rozlišení spektra). Do cesty paprsků dále vložíme čočku a hranol.
2. Hranol natočíme tak, abychom obraz štěrbiny, vytvořený čočkou a odražený přední stranou hranolu, viděli na stínítku. Obraz štěrbiny na stínítku doostříme. Neostrý obraz se projeví spektrálně nečistými (smíchanými) barvami, spektrum pak má malé rozlišení.
3. Nalezneme minimální deviaci (otáčením hranolu jde spektrum na jednu stranu, zastaví se a pak se začne vracet).
4. Vyzkoušíme několik různých hranolů, které ideálně postavíme na sebe: křemenné sklo, korunové sklo, flintové sklo, vodu. Komentujeme polohu a šíři spekter s ohledem na hodnoty indexu lomu a chromatické disperze.

Fyzikální interpretace

Disperzní vlastnosti skel hranolů, umožňující oddělit jednotlivé vlnové délky spektra, nejsou nezávislé na absorpčních vlastnostech materiálu, ale úzce s nimi souvisí. Podle Lorentzovy teorie absorpce záření na určité vlnové délce způsobuje zpomalení šíření záření (tedy změnu indexu lomu) v okolí této vlnové délky. Nízkodisperzní materiál tedy musí být propustný ve velmi širokém rozsahu vlnových délek.

V literatuře se pro popis optické vlastností skel používají různé veličiny jako index lomu n, chromatická disperze $\mathrm{d}n/\mathrm{d}\lambda$, Abbeovo číslo, extinkční koeficient či absorpční koeficient.

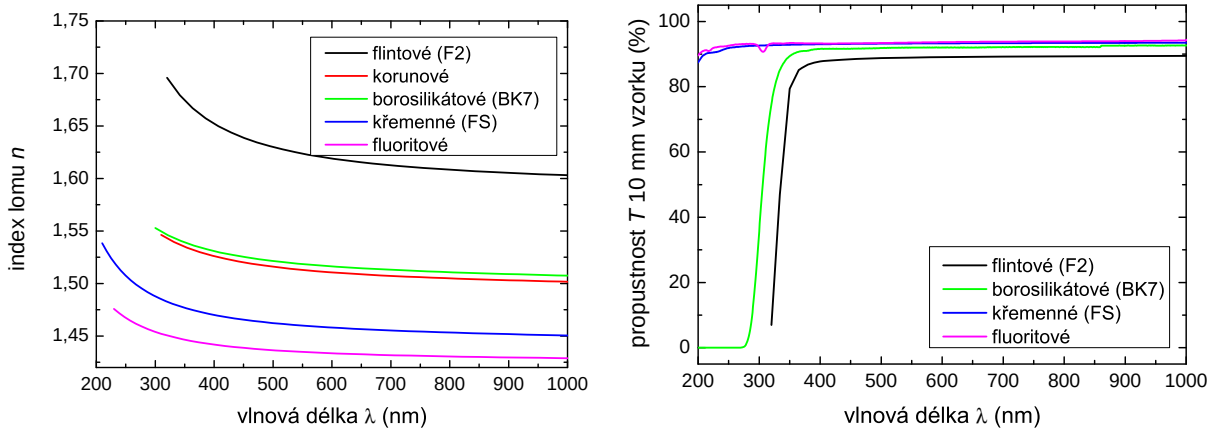
Abbeovo číslo ν_d, popisující průměrnou hodnotu disperze ve viditelné oblasti, udává, jak je index lomu skla na Fraunhoferově čáře D (589 nm) nebo d (587 nm) velký vzhledem k rozdílu indexu lomu na vlnových délkách Fraunhoferových čar F (486 nm) a C (656 nm)

$$\nu_\mathrm{d} = \frac{n_\mathrm{d} - 1}{n_\mathrm{F} - n_\mathrm{C}}.$$

Extinkční koeficient $\kappa(\lambda)$ je součástí komplexního indexu lomu

sklo	index lomu n_d	Abbeovo číslo [2] ν_d
lehké flintové	1.608 [1], 1.581, [2]	40.85
korunové	1.515 [1], 1.511 [2]	60.41
borosilikátové (BK7)	1.5168 [2]	64.17
křemenné (FS)	1.458 [3]	67.82
fluoritové (CaF_2)	1.434 [2]	94.99

Tabulka 1: Indexy lomu a Abbeova čísla typicky používaných skel.



Obrázek 1: Indexy lomu a propustnost vzorku o tloušťce 10 mm v závislosti na vlnové délce.

$$\mathbf{n} = n + \mathrm{i}\kappa$$

a udává absorpční schopnosti materiálu. Tu ale také často charakterizujeme pomocí absorpčního koeficientu $k(\lambda)$, který vystupuje v Lambertově-Beerově zákoně

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\mathrm{e}^{-k(\lambda)d}.$$

Tomuto koeficientu se také říká koeficient zeslabení, pokud se na zeslabení podílí i jiné procesy než absorpce (např. rozptyl). Mezi koeficienty platí vztah

$$k = \frac{4\pi}{\lambda}\kappa.$$

Propustnost celého optického prvku určité tloušťky d pak závisí Lambertovým-Beerovým zákonem na této tloušťce

$$T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda) = \mathrm{e}^{-k(\lambda)d}.$$

U optických prvků však kromě k zeslabení svazku dochází nejen vnitřní absorpcí (a příp. rozptylem), ale také odrazem na rozhraních.

E 2 – Detekce IR záření ve spektru

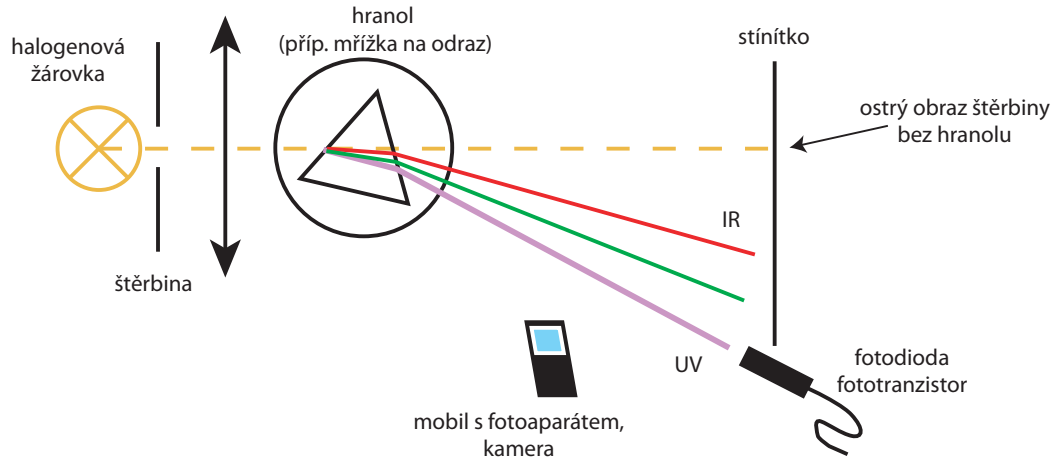
Wolframové vlákno halogenové žárovky produkuje tepelné záření. K detekci velmi blízkého IR záření lze využít křemíkový detektor. Propustnost materiálů může být ve viditelné a v infračervené oblasti velmi odlišná.

Potřeby

- polovodičová fotodioda a mikroampérmetr
- černobílá CCD kamera s monitorem
- okénka z různých materiálů (sklo, Si, GaAs, černý fix).

Provedení

1. Prokažte existenci IR záření ve spektru žárovky. Světlo rozložte hranolem (viz obr. 2), použijte některý z polovodičových detektorů: fotodiodu, fototranzistor, fotoodpor. Vysvětlete, proč je signál v určité oblasti spektra maximální.



Obrázek 2: Schéma experimentu pro detekci blízkého infračerveného spektra na optické lavici.

2. Na papír stínítka tužkou nakreslete čáru na hranici viditelnosti červeného světla. Na stínítko se spektrem zamiřte kameru CCD/CMOS. Porovnejte oblasti, ve kterých oko/kamera vidí.
3. Předešlou konfiguraci využijte pro měření absorpce IR záření v různých látkach (skle, determálním skle, křemíku, arzenidu galitém, černém fixu apod.).
4. Diskutujte princip měření intenzity záření pomocí fotodiody, vnitřní fotoelektrický jev.

Fyzikální interpretace

Vyzařování wolframového vlákna

Rožhavené vlákno halogenové žárovky je žárový (inkadescentní, tepelný) zdroj a jeho vyzařování ve viditelné části spektra je dáno jeho vysokou teplotou. Zatímco vyzařování černého těleso je v termodynamické rovnováze popsáno Planckovým zákonem, u vlákna je vyzařování komplikovanější a odráží vnitřní či povrchové složení a strukturu vlákna. Důležitým faktorem je přítomnost wolframu v pevné fázi – energiové schéma kovu s částečně zaplněným vodivostním pásem poskytuje spojité spektrum energií elektronů pro absorpci a emisi fotonů.

Přesto lze pro popis vyzařování vlákna Planckův zákon přibližně použít. Korekci na vyzařování reálného vlákna pak řeší empirická veličina zvaná emisivita ε

$$I(\lambda;T) = \varepsilon(\lambda;T) \cdot I_{\check{\mathrm{C}}\mathrm{T}}(\lambda;T),$$

která u wolframu rozhodně není zanedbatelná – ve viditelné oblasti má emisivita hodnotu 0,4–0,5 podle vlnové délky. Díky slabší závislosti emisivity na teplotě je ale trend růstu intenzity vyzařování s teplotou a dále posun maxima vyzařování s rostoucí teplotou z IR do viditelné oblasti obdobný černému tělesu.

Polovodičové detektory

V současnosti je s výjimkou speciálních detektorů záření (fotonásobiče pro viditelnou oblast, tepelné detektory pro IR oblast) většina detektorů polovodičového charakteru. K detekci se obvykle využívá vnitřního fotoelektrického jevu, při kterém absorpcí fotonu v polovodiči dochází k excitaci elektronu z valenčního do vodivostního pásu (generace páru elektron-díra). Podaří-li se oba druhy nositelů náboje oddělit (např. polem PN přechodu v diodě, polem napětí přivedeného na hradlo

v CCD), vzniklý náboj se projeví jako fotonapětí či fotoproud (ve fotovoltaickém zapojení) či jako zvýšená vodivost (ve fotokonduktivním zapojení).

Důležitým parametrem pro spektrální citlivost fotodetektoru je šířka zakázaného pásu E_g. Fotony s menší energií detektorem procházejí, neboť elektrony ve valenčním pásu nemohou foton absorbovat. Fotony s vyšší energií než E_g jsou velmi dobře absorbovány, což je předpokladem pro jejich zaregistrování. Příliš velká absorpce však paradoxně může vést k poklesu citlivosti detektoru, pokud k absorpci dojde dříve, v oblastech, kde náboje nelze odseparovat. To je případ kupř. slabé účinnosti standardních fotovoltaických panelů v modré oblasti.

Propustnost látek v IR oblasti

Z výše uvedeného je zřejmé, že padne-li energie zakázaného pásu do blízkosti hranice energií fotonů viditelné a infračervené oblasti, materiál bude ve viditelné oblasti nepropustný (a tedy i neprůhledný), ale dobře propustný v NIR oblasti. To je případ vzorků z Si a GaAs, ale také různých barviv či filtrů (černý fix, RGB filtry). Protože je barva posuzována ve VIS a je žádoucí, aby se vzorek IR zářením neohříval, bývá řada barviv/filtrů v NIR propustná. Použití takového filtru v měření pro výběr viditelné vlnové délky bez dodatečného IR nepropustného filtru může v kombinaci s bílým zdrojem světla a široce spektrálně citlivým detektorem vést k závažné chybě.

E 3 – Radiometr jako detektor záření

Radiometr je jednoduchý mechanický detektor záření. Je to fotonový nebo tepelný detektor?

Potřeby

- radiometr, stolní lampa se žárovkou

Provedení

Postavte radiometr pod rozsvícenou stolní lampu a pozorujte otáčení radiometru. Kterým směrem se otáčí?

Fyzikální interpretace

Rozhodněte, které vysvětlení je správné:

- Černá strana získá absorpcí fotonu hybnost o velikosti $\Delta p = h/\lambda$ (tlak záření, Crooks 1873).
- Ale lesklá strana získá odrazem fotonu hybnost dvojnásobné velikosti $\Delta p = 2h/\lambda$.
- Černá strana se více ohřívá, od ní i molekuly zbytkového plynu, ty na ní více naráží, což představuje větší tlak plynu u černých ploch.
- Molekuly plynu tečou na okrajích lopatek mlýnku z místa studenějšího (lesklá) strana na teplejší (černá strana), přitom tangenciálními silami roztáčejí mlýnek (Reynolds 1879).
- Z černých ploch se zahříváním uvolňují plyny, fungují jako reaktivní motor.
- Na černé straně probíhá silněji fotoelektrický jev, ta ztrácí elektrony.

Více např. [4].

E 4 – Detekce UV záření ve spektru rtuťové výbojky, luminiscence

Rtuťová výbojka je silný zdroj pro pozorování čarového emisního spektra na optické lavici. K detekci UV záření ve spektru postačí kancelářský papír, je však zapotřebí křemenná optika.

Potřeby

- optická lavice
- rtuťová výbojka Tesla RVK 125 (ze starého horského slunce, produkuje nebezpečné UV záření!)
- křemenná/fluoritová optika (čočka, hranol)
- list kancelářského a filtračního papíru, svítivé fólie
- okénka z různých materiálů (sklo, brýle).

Provedení

1. V uspořádání experimentu na detekci IR záření vyměňte halogenovou lampu za rtuťovou výbojku. Proč je pozorované spektrum nyní čarové? Jaké vlnové délky jsou ve spektru?
2. Část stínítka překryjte kancelářským papírem a pozorujte spektrum. Zvažte vhodnost použitého hranolu, případně fukusující čočky (sklo × křemen × CaF_2). Přeostřujte s čočkami na VIS/UV oblast.
3. Do cesty záření vkládejte různé druhy skel, brýle s UV filtrem apod a pozorujte spektrum.
4. Místo hranolu použijte spektroskopickou difrakční mřížku na odraz nebo difrakční fólii. Prozkoumejte žlutou čáru v různých spektrálních řádech. Na čem závisí rozlišení spektra?
5. Místo kancelářského papíru použijte filtrační papír či svítivé fólie různých barev a komentujte barvy pozorovaného spektra (Stokesovo pravidlo).

Fyzikální interpretace

Záření výboje

Ve spektru vysokotlaké rtuťové výbojky[1] pozorujeme úzké spektrální čáry (které mohou být ve skutečnosti mnohem užší než naše uspořádání dovoluje pozorovat). Na rozdíl od halogenové žárovky je zdrojem světla ve výbojce obloukový výboj v plynu. Velká vzdálenost mezi atomy plynu podstatně omezuje jejich vzájemné ovlivňování a dovoluje pozorovat spektra prakticky izolovaných atomů. Vlivem elektrostatického přitahování mezi elektrony a jádrem atomu je pohyb elektronů v atomu finitní (omezen na jistou část prostoru), což vede ke kvantování jeho energie. Existence diskrétních energiových hladin a emise fotonů pouze během přechodů mezi hladinami je příčinou vzniku diskrétního čarového spektra.

Luminescence

Vyzařování atomů plynu ve výbojce je příkladem luminiscence (vyzařování chladné látky nad hodnotou jejího tepelného vyzařování). V případě atomů rtuti jde o tzv. *katodoluminiscenci*, při které atomy získávají energii během srážek s elektrony. Ty jsou ve výboji urychleny na potřebnou energii několika eV elektrickým polem.

Luminiscence je v současnosti dominatním způsobem generování světla ve světelných zdrojích (na rozdíl od minulosti). V *zářivce* je dominantním zdrojem záření pevný luminofor nanesený na vnitřní straně skleněné trubice. Zářivka je opět rtuťová výbojka, ale na rozdíl od vysokotlaké

[1] Provozní tlak par rtuti je několik at.

rtuťové výbojky mají páry rtuti v zářivce podstatně nižší tlak (kolem 1 Pa). To dovoluje emitovat většinu záření (přes 80 %) na rezonanční vlnové délce Hg I 253 nm, v nebezpečné UVC oblasti. Toto záření však z výbojky neuniká, neboť je pohlceno luminoforem, příp. stěnou výbojky. Vyzařování luminoforu po jeho excitaci absorpcí fotonu jiné vlnové délky je případem tzv. *fotoluminiscence*.

U fotoluminiscence se uplatňuje Stokesovo pravidlo

$$\lambda_{\mathrm{ex}} \leq \lambda_{\mathrm{em}},$$

které říká, že emitovaný foton (s vlnovou délkou λ_{em}) nemůže mít větší energii než foton použitý k excitaci (λ_{ex}). Je tedy projevem zákona zachování energie.

Luminiscence je zdrojem světla i v diodách *LED*. Zapojením diody v propustném směru se sníží potenciálová bariéra PN přechodu a zvýší injekce nositelů náboje do polovodiče opačné vodivosti. Tyto minoritní nositelé náboje v polovodiči LED diody rekombinují za vzniku fotonu o energii přibližně rovné šířce zakázaného pásu E_{g}. Volbou vhodného materiálu s různou hodnotou E_{g} lze generovat světlo různých barev (*elektroluminiscence*).

Zdroj bílého světla lze získat kombinací několika barevných LED (RGB diody) nebo pomocí fotoluminiscence. Základem bílé diody je často modrá LED a část jejího světelného výkonu je konvertováno do větších vlnových délek žlutým luminoforem.

Mezi další formy luminiscence patří chemoluminiscence (emise světla z excitovaných stavů produktů exotermických chemických reakcí), bioluminiscence (chemoluminiscence v živé tkáni), radioluminiscence (emise světla po excitaci látky ionizujícím zářením), triboluminiscence (emise světla při tření či drcení látky, mnoho možností), sonoluminiscence (silné ultrazvukové vlnění ve vodě má za následek vznik miniaturních bublinek vyplněných plazmatem emitujícím světlo).

E 5 – Antistokesova luminiscence

Stokesovo pravidlo v některých experimentech na první pohled neplatí. Příčin může být celá řada, o kterých se v dogmatických učebnicích nemluví.

Potřeby

- termoluminiscenční fólie, kartičky Edmund Optics pro justování IR laserů
- fialové laserové ukazovátko, dálkový IR ovladač

Provedení

1. Na vybrané vzorky posvítíme uvedenými zdroji světla a pozorujeme barvu luminiscence a její dosvit. U některých vzorků pozorujeme dlouhodobý dosvit, u jiných emisi na vlnové délce odporující Stokesovu pravidlu.

Fyzikální interpretace

Fotoluminiscence se může lišit dobou trvání emise fotonů po ukončení osvitu. Fluorescence se vyzáří v řádu nanosekund (pouze „za osvitu“), fosforescence trvá déle, i po zhasnutí budicího záření (podle definice emituje zakázaný přechod mezi singletovým a tripletovým stavem). Dlouhodobý dosvit v řádu hodin může být způsoben termoluminiscencí (komplikovaný proces uvolňování energie z metastabilních stavů látky srážkami či absorpcí IR fotonů) anebo probíhající chemickou reakcí (chemoluminiscence).

Stokesovo pravidlo nepředpokládá jiné, komplikovanější způsoby excitace (postupná excitace látky více fotony, vícefotonová absorpce, generování vyšší harmonické frekvence v nelineárních prostředích). Tyto procesy jsou obvykle ve srovnání s excitací jedním fotonem mnohem méně pravděpodobné, mají však v současnosti mnoho aplikací ve vědecké praxi.

Terminologická úskalí

Pozor na zavádějící terminologii. Fluorescence je nazývána podle luminiscence příměsí v minerálu fluorit (kazivec), nikoliv přímo fluoru. Obdobně, bílý fosfor nesvítí díky fosforescenci, ale chemoluminiscenci (oxidace fosforu za vzniku excitovaných produktů).

E 6 – Luminescence předmětů pod černým světlem

Luminiscence patří mezi úchvatné jevy se silným motivačním potenciálem, má ale i nepřeberně mnoho aplikací v běžném životě.

Potřeby

- výbojka „černé světlo“
- luminofory různého typu

Provedení

1. Místo klasické rtuťové výbojky použijte „černé světlo“, rtuťovou výbojku emitující záření pouze v oblasti kolem 365 nm. Pozorujte ochranné prvky bankovek, jízdenek a průkazů a další prvky využívající luminiscenci.

Technické problémy

K pozorování fotoluminiscence je zapotřebí odfiltrovat viditelné světlo výbojky, které při odrazu na luminoforech maskuje slabší luminiscenci. Nemáme-li přímo černé světlo, poslouží vysokotlaká rtuťová výbojka s černým, UV propustným filtrem.

E 7 – Absorpce bílého světla v kapalinách

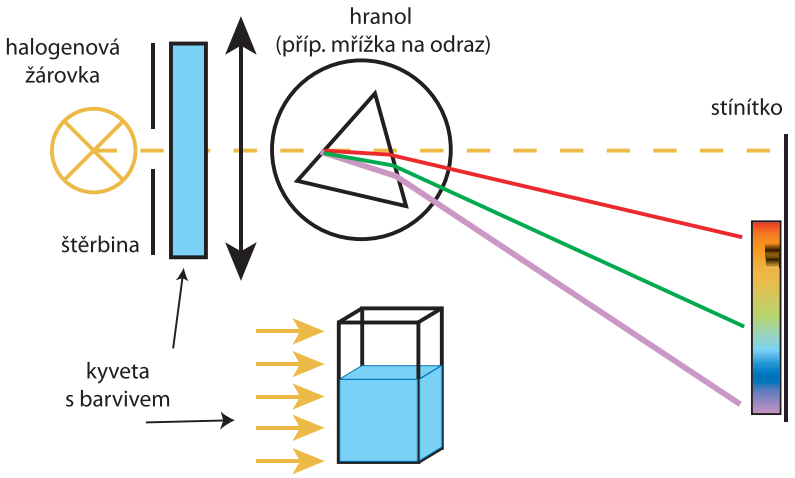
Barva předmětů je způsobena selektivní absorpcí světla na určitých vlnových délkách. I když existence absorpce na určité vlnové délkce implikuje na ní i možnost emise, molekulární luminofory často absorbují světlo ochotně na jiných vlnových délkách, než na kterých pak dominantně vyzařují.

Potřeby

- optická lavice se zdrojem bílého světla, štěrbina, čočka, hranol
- barevné filtry absorpční, RGB filtry
- kyvety s roztoky fluoresceinu a eosinu Y
- pulzní oxymetr

Provedení

1. Na optické lavici opět vytvořte spektrum bílého světla (viz obr. 3). Použijte skleněný hranol s velkou disperzí.
2. Pozorujte absorpci záření v barevných filtrech RGB/CMY filtrech.
3. Pozorujte absorpci záření v roztocích barviv. Pro demonstraci jsou vhodná barviva s absorpcí ve viditelné oblasti. U fluoresceinu a eosinu Y lze navíc pozorovat silnou luminiscenci. Kyvetu vkládejte hned za štěrbinu, případně do různých míst stínítka.
4. Všimněte si vyzařování kapaliny. Porovnejte jeho barvu s barvou chybějící části původního spektra.



Obrázek 3: Schéma experimentu pro demonstraci absorpčních spekter na optické lavici.

Technické problémy

Při přípravě kapalinových vzorků je zapotřebí namíchat vhodně koncentrovaný roztok podle délky kyvety. Příliš silný roztok může absorbovat záření v celém rozsahu viditelných délek. Intenzita luminescence roztoku může záviset na typu rozpouštědla. Vhodným rozpouštědlem je kupř. etanol.

Fyzikální interpretace

Absorpční filtry jsou barevná skla blokující nechtěné záření jeho absorpcí ve filtru, čímž se samotný filtr ohřívá. RGB filtry jsou naopak vícevrstvé interferenční fitry odrážející blokované záření nazpět ke zdroji. Jejich spektrální propustnost může být proto poměrně ostrá, v grafu hranatá.

U luminoforů se v literatuře setkáme s několika typy spekter:

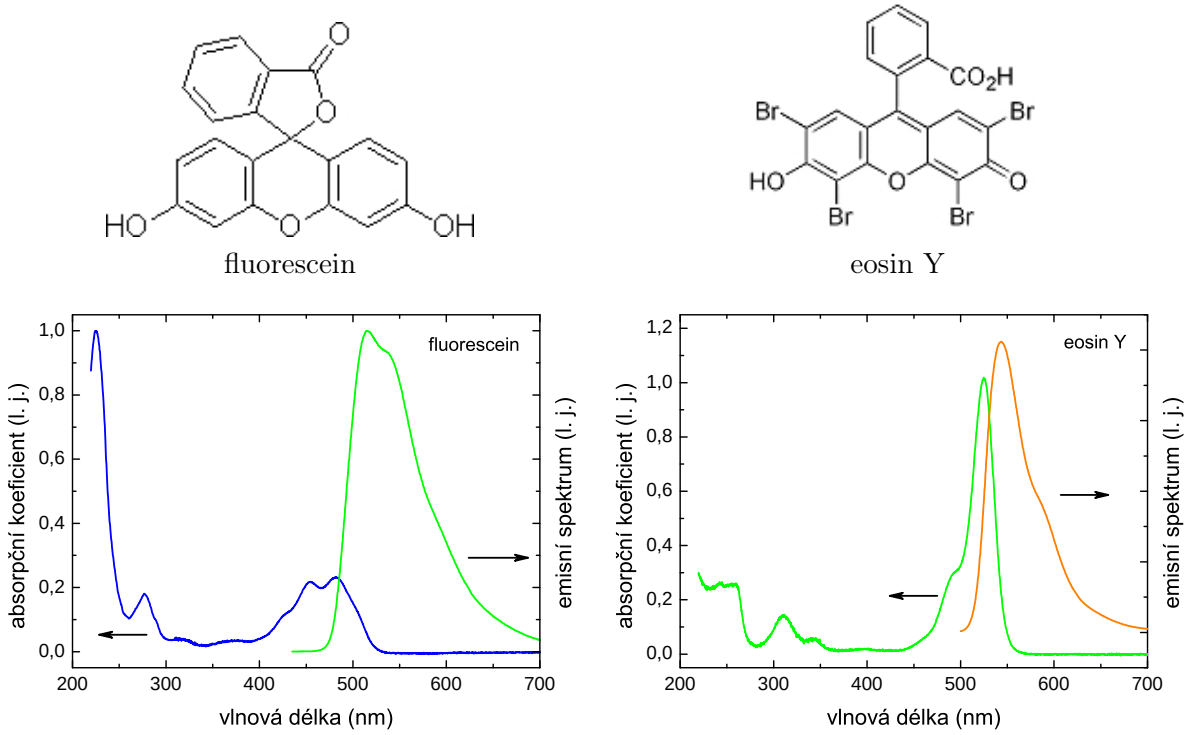
- absorpční spektrum popisující, na kterých vlnových délkách látka světlo absorbuje,
- excitační spektrum udávající, jak se mění intenzita luminescence na pevné vlnové délce při postupné změně vlnové délky dopadajícího monochromatického záření,
- emisní spektrum udávající, jak vypadá spektrum luminescence při pevně vybrané délce dopadajícího monochromatického záření.

Při dopadu bílého světla s vlastním spektrálním průběhem bude pozorované spektrum složitou kombinací výše uvedených závislostí.

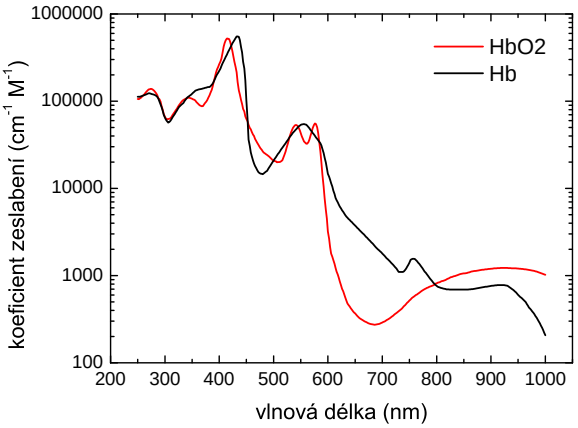
I když na každém přechodu, kde látka absorbuje, může i emitovat (Kirchhoffův zákon), nemusí být přechody v obou směrech stejně využívány. Jak je patrné z grafů, pro excitaci látky je vhodné záření mírně nižší vlnové délky, než je vlnová délka vyzařovaného záření. Příčinou je obvyklá rychlá nezářivá relaxace vibračních stavů látky po přechodu do horního excitovaného stavu.

Otázka

Měření absorpčních spekter umožňuje stanovit druh a koncentraci absorbujících molekul a má mnoho vědeckých a průmyslových aplikací. Z předmětů běžného života ho využívá např. pulzní oxymetr. Dokážete odhadnout, jak přístroj měří okysličení krve? Absorpční koeficient hemoglobinu a oxy-hemoglobinu je na obr. 5.



Obrázek 4: Absorční koeficient a emisní spektrum roztoků fluoresceinu a eosinu Y.



Obrázek 5: Absorční koeficient hemoglobinu a oxyhemoglobinu. Všimněte si logaritmické škály na svislé ose.

E 8 – Absorpce laserového světla v kapalinách

Postupný úbytek světla vlivem absorpce v luminescenčním roztoku a změnu jeho spektra lze pěkně pozorovat na laserovém svazku.

Potřeby

- kyvety s roztoky fluoresceinu a eosinu Y
- laserová ukazovátka o vlnových délkách 405 a 535 nm
- spektrometr Avantes

Provedení

1. Fialovým a zeleným ukazovátkem postupně prosvěcujeme kyvety s eosinem a fluoresceinem. Pozorujeme, že vždy jen jeden svazek se v roztoku „utlumí“, druhý roztokem prochází.
2. Pomocí spektrometru Avantes proměříme spektrum laseru a luminiscence, ideálně tak, abychom obě spektra viděli současně. Toho docílíme tak, že ukazovátko přiložíme ke kyvetě a optické vlákno přiblížíme k laserovému svazku v roztoku téměř nakolmo. Pozorujeme úzkou čáru monochromatického laseru a oddělený široký pás fotoluminescence.

Fyzikální interpretace

První experiment ukazuje, že netrefí-li se dopadající záření svou vlnovou délkou do oblasti silné absorpce, záření roztokem projde a luminiscence bude slabá. V opačném případě se svazek utlumí i na velmi krátké dráze. Pokles intenzity ve svazku bude v nejjednodušším případě exponenciální podle Lambert-Beerova zákona.

Druhý experiment podává jasný důkaz vzniku záření o zcela jiné délce, než má původní laserové záření. Pozorované spektrum je příkladem emisního spektra luminoforu pro vlnovou délku laseru (třetí možnost v předešlém experimentu).

Další experimenty, např. využití Lambertova-Beerova zákona pro měření absorpce UV záření ve skle či odlišení lumioniscence od rozptylu pomocí polarizace najdete v [8].

E 9 – Emisní spektra atomů a molekul (Geislerovy trubice)

Pro pozorování emisních spekter plynů z úzkých Geislerových trubic se nejvíce hodí difrakční fólie. Spektra poskytují přímý důkaz kvantování energie v atomech i v molekulách.

Potřeby

- Geislerovy trubice s různými plyny
- školní zdroj vysokého napětí (verze bez samočinného odpojení při otevření krytu není vhodná pro žákovské experimenty!)
- difrakční fólie, příruční spektroskop s Amici hranolem, papírový spektroskop s mřížkou z CD
- mřížkový spektrometr Avantes s CCD detektorem

Provedení

1. Do školního zdroje vysokého napětí vložte spektrální trubici s heliem a zapněte zdroj. Doba provozu na jedno zapnutí by neměla přesáhnout 30 s (zejména u výbojek s vodíkem, vodní parou a halogeny), výbojky s heliem a neonem mohou běžet trvale. Po ukončení pozorování zdroj nejprve vypněte, horkou výbojku chytněte přes kousek látky a vraťte do stojánku.
2. Posuďte kvalitu zobrazení spektra pomocí jednotlivých pomůcek.
3. Pozorujte spektra vybraných plynů (H_2, H_2O, He, N_2, Ne, CO_2, vzduch ...). Identifikujte použité plyny dle obr. 6.
4. Diskutujte strukturu molekulárního spektra N_2. Jaké spektrum bude mít blesk? (Srovnejte výbojku plněnou N_2 a vzduchem.)
5. Porovnejte spektrum vodíku a vodní páry. Objasněte původ čar na 777 nm a 843 nm.
6. Porovnejte spektrum vodíku a deuteria.

Fyzikální interpretace

Je třeba počítat s tím, že ve výboji dochází k mnoha procesům (excitace, deexcitace, ionizace atomů a molekul, disociace a slučování molekul ...). Některé náplně potřebují jiný startovací plyn k provozu (obvykle vzácný plyn, např. Ar). Při provozu dále dochází k erozi elektrod a vnášení jejich materiálu do plazmatu. Složení plazmatu tedy může být velmi různorodé a je potřeba s tím při experimentech počítat.

Např. lze očekávat, že ve výbojce s H_2 se objeví emise H, ve výbojce s H_2O může být pozorovatelné i O, OH, H_2.

Pro středoškolskou výuku je stěžejní pozorování Balmerovy série ze spektra atomu vodíku. Ta může být lépe pozorovatelná ve spektru výbojky s vodní parou, neboť ji tolik neruší emise záření molekuly H_2.

Ostatní výbojky lze využít aspoň k identifikaci náplně. Další informace ke spektrálním trubicím, pozorovaným spektrům a k možnostem jejich využití při pokročilé výuce spektroskopie lze najít v [5, 6]. Český výtah některých úloh je v [7].

Technické problémy

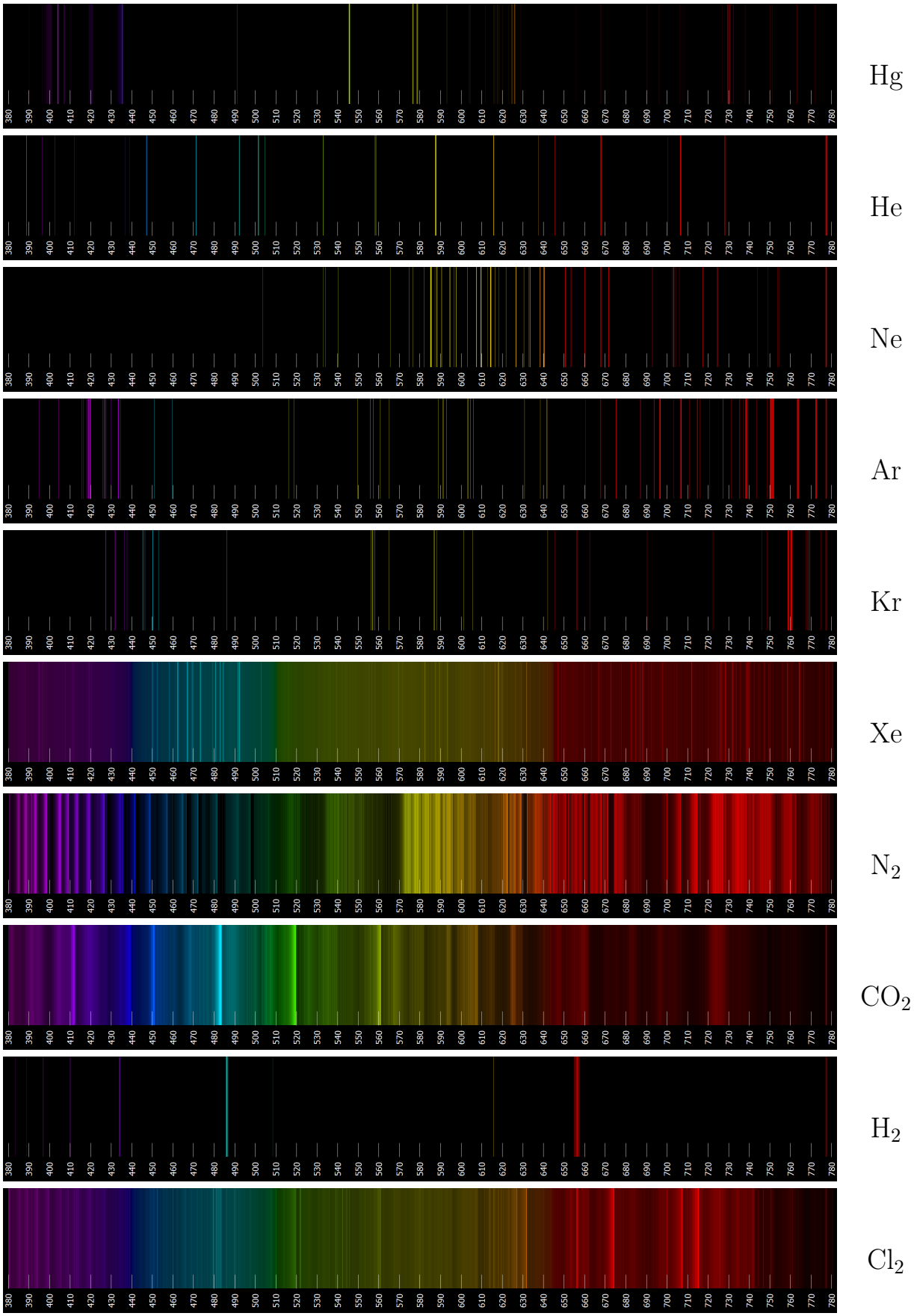
Geislerovy výbojky nejsou natolik úzké a intenzivní, abychom jimi nahradili světelný zdroj a štěrbinu při demonstraci spektra na optické lavici. V tomto případě je vysokotlaká rtuťová výbojka nejvhodnějším zdrojem. Naopak, výbojky jsou ideální pro pozorování na dálku v lavicích pomocí difrakční fólie vložené těsně před lidské oko. Při dobrém zatemnění výsledek v některých ohledech předčí pozorování pomocí drahých přístrojů, které nemají s okem srovnatelný dynamický rozsah a jejichž vstupní štěrbinou je zapotřebí přesně zamířit na úzký zdroj.

Náměty k dalšímu pozorování

Stejnými metodami lze pozorovat i jiné zdroje světla: zářivku, kompaktní zářivku, LCD displej, doutnavku, Slunce či oblohu (Fraunhoferovy temné čáry) apod. Není-li světelný zdroj v jednom směru velmi úzký, je vhodnější použít ruční spektroskop s regulovatelnou štěrbinou či CCD spektrometr než difrakční fólii.

Zajímavé je pozorování spektra vysokotlaké sodíkové výbojky (z pouličních lamp) po zapnutí. Jak vysvětlíte temný absorpční pás na spojitém pozadí namísto původně ostrých emisních čar?

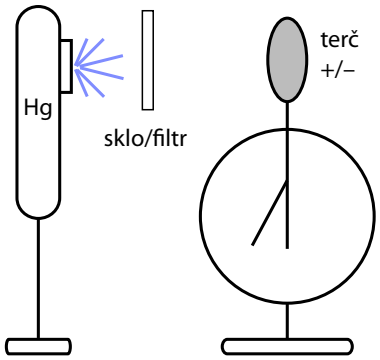
Geislerovy výbojky lze zapálit i pomocí Ruhmkorffova induktoru. Ten lze použít i pro generování výboje ve vzduchu za atmosférického tlaku mezi elektrodami induktoru (korona, jiskrový průraz). Výboje jsou ale nestabilní či slabé pro pozorování spektra.



Obrázek 6: Optická spektra vybraných Geislerových výbojek. **Ne vždy je molekula plynné náplně i původcem spektra!** Viz zdroj obrázků [5].

E 10 – Fotoelektrický jev

Nejcitlivější detektory světla – fotonásobiče – pracují na principu vnějšího fotoelektrického jevu.



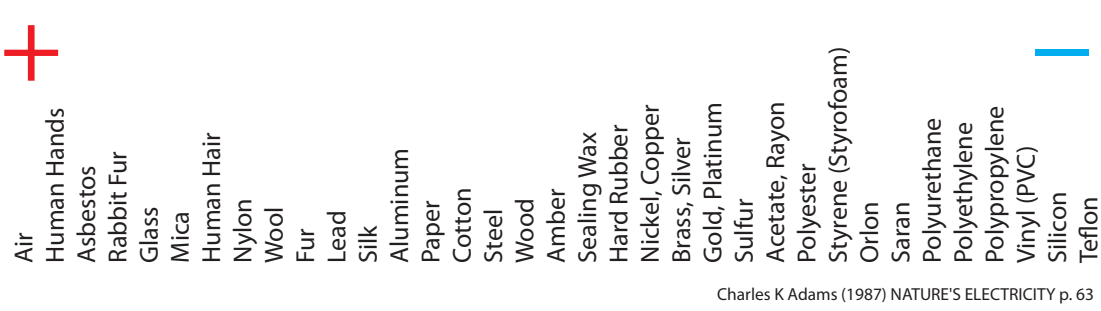
1. Naučte se elektroskop nabíjet kladně i záporně pomocí nabité tyče. Vyzkoušejte si tyto kombinace:

   (a) ebonitová tyč × kožešina,
   (b) skleněná tyč × amalgamovaná jelenice.

   Předpovězte znaménko náboje elektroskopu podle triboelektrické řady. První kombinací nabijte elektroskop kladně i záporně – využijte elektrostatickou indukci.
2. Horní plochou elektrodu nabitého elektroskopu (obě polarity) vystavte záření ze rtuťové výbojky. Pozorujte, zda se náboj na elektroskopu mění.
3. Odstraňte případný oxid na elektrodě a pokus opakujte. Můžete také barevným filtrem/sklem omezit vlnové délky či vyměnit elektrodu za druhou z jiného materiálu (Zn, Al . . .). Jaký je červený práh fotoefektu u těchto materiálů?

Materiál	Výstupní práce (eV)
Zn polykryst.	3.63
Fe 100	4.67
Fe 111	4.81
Cu 100	5.10
Na_2KSb/K_2CsSb	2 – 2.5

Tabulka 2: Výstupní práce vybraných prvků a fotokatod fotonásobičů *bi-alkali*.



Obrázek 7: Triboelektrická řada. Látka více vlevo od jiné látky se třením nabíjí kladně, více vpravo záporně. Pozice blízkých látek je nejistá, záleží na více parametrech.

E 11 – Zářivka

Zářivka v klasickém zapojení s tlumivkou a bimetalovým startérem představuje velmi vyspělé zařízení plné chytře použitých fyzikálních principů.

Provedení

1. Vyzkoušejte si pod dozorem učitele demonstrační zapojení zářivky. Vysvětlete význam doutnavkového startéru a tlumivky v obvodu.
2. Diskutujte dominantní proces vzniku světla a odlišnost vysokotlaké rtuťové výbojky a (nízkotlaké) zářivky.

E 12 – Obloukova lampa

Klasická obloukova lampa svým jasem předčila žárovku, nebyla však bezúdržbová.

Provedení

Sestavte obloukovou lampu. Lampu napájejte ze zdroje proudu (např. zdroj Manson s proudovým omezením). Diskutujte nutnost užití proudového zdroje či zařazení předřadného odporu, zdroj elektronů a iontů ve výboji. Výboj pozorujte nejvýše přes svářečský filtr!

E 13 – Časový vývoj vyzařování světelných zdrojů

Časový vývoj rychlých dějů byl v minulosti analyzován metodou jejich zdánlivého zpomalení/zastavení pomocí pulzního osvětlení. V současnosti jsou dispozici rychlé detektory a vysokorychlostní kamery.

Provedení

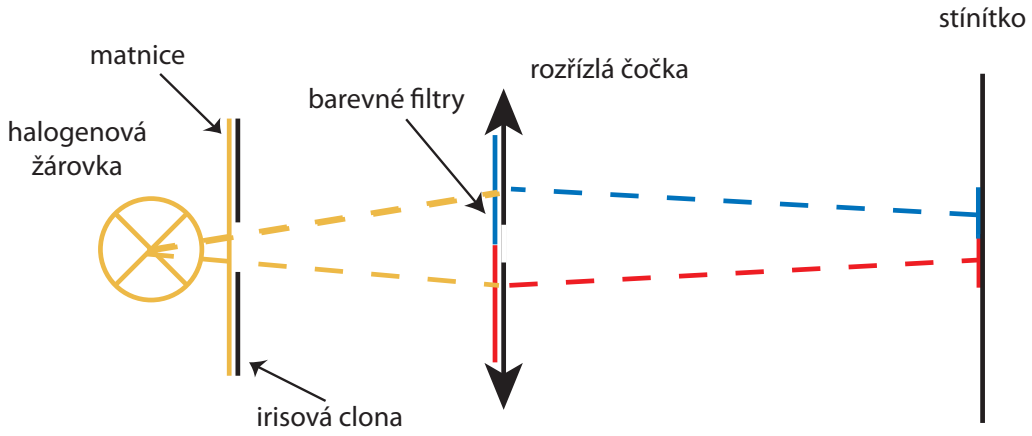
1. Pozorujte stroboskopický kotouč osvětlený žárovkou, Hg výbojkou, stropní zářivkou, žárovkou přes usměrňovací diodu, stroboskopem. Diskutujte využití jevu pro měření otáček.
2. Pozorujte pomocí osciloskopu signál z rychlé fotodiody (integrační doba τ několik ns) osvětlené uvedenými zdroji.
3. Využijte pulzní laser, rychlou fotodiodu a osciloskop k měření rychlosti světla.
4. Pozorujte zářivku/LED světlo napájené vysokofrekvenčním zdrojem pomocí vysokorychlostní kamery.
5. Diskutujte integrační dobu lidského oka, diody, fotonásobiče, luminoforů. Diskutujte technické aspekty pulzního osvětlení: osvětlení rotačních zařízení, princip zobrazovacích zařízení (kupř. DLP projektoru),

E 14 – Barva světel a pigmentů, skládání barev

Tři barvy stačí na vytvoření mnoha dalších, ale stačí na vytvoření barev všech?

Provedení

1. Sestavte na optické lavici experiment dle obrázku. Použijte rozřízlou čočku. Zakrývejte jednotlivá pole čočky. Vysvětlete, jak se dosáhne toho, že se obrazy v různých barvách překrývají.



2. Vytvořte spektrum žárovky pomocí optické mřížky. Do optické cesty vkládejte RGB/CMY filtry a jejich kombinace. Pozorujte výslednou barvu v nultém difrakčním řádu a její spektrum v prvním řádu.
3. Roztočte trojbarevný kotouč. Měňte poměry ploch jednotlivých barev.
4. Vyzkoušejte si aditivní míchání barevných světel na PC s programem ColourMixer.

Odkazy a další literatura

[1] `https://www.3bscientific.com/`, prodejce hranolu v praktiku

[2] `https://refractiveindex.info/`

[3] `http://www.thorlabs.com`

[4] `http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/LightMill/light-mill.html`

[5] Fajnor A *Výuka optické spektroskopie atomů a molekul* Diplomová práce na PřF MU. Dostupné z: `https://is.muni.cz/th/pl6d7/`.

[6] Fajnor A *Optická emisní spektra atomů a molekul* Bakalářská práce na PřF MU. Dostupné z: `https://is.muni.cz/th/uotnu/`.

[7] `https://www.physics.muni.cz/media/3168239/e1.pdf`

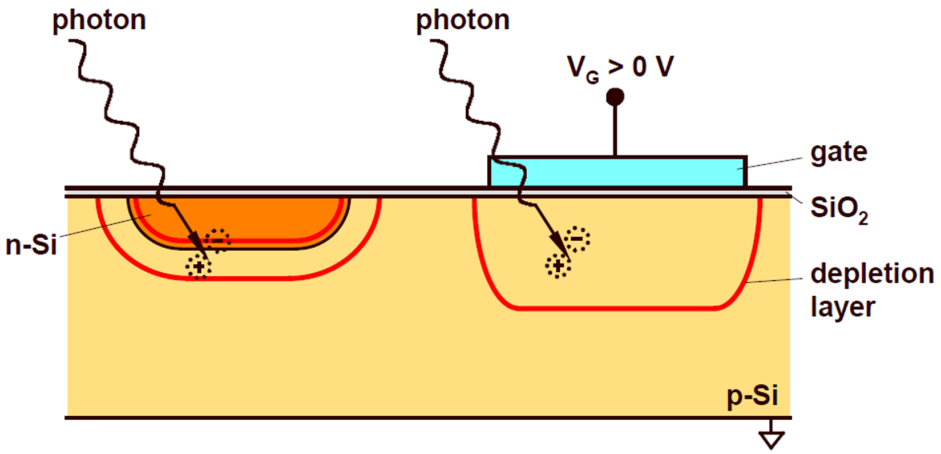
[8] Bochníček Z, Jurmanová J, Konečný P, Navrátil Z a Poláček L 2015 *Absorpce a emise světla* Návod k úloze 7 Fyzikálního praktika pro nefyzikální obory PřF MU. Dostupné z: `https://www.physics.muni.cz/kof/vyuka/fpno_07.pdf`

Přílohy

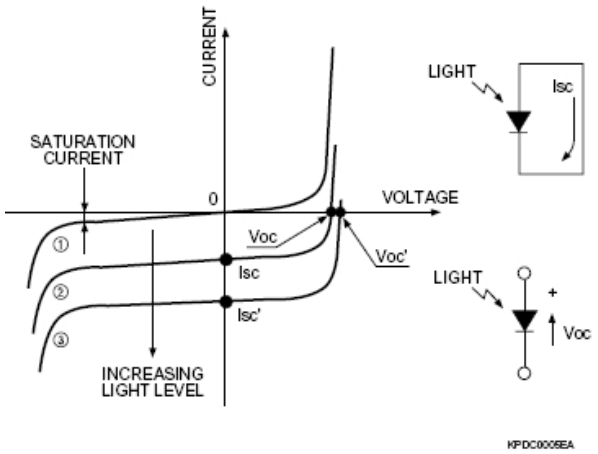
A Detektory neionizujícího záření

K detekci světla je nejprve nutné foton absorbovat.

- tepelné (měří se ohřev látky) – detektory zejména pro IR oblast
  - bolometr (odporový teploměr)
  - thermopile (baterie termočlánků)
  - termovize
- fotonové (registrují se uvolněné volné elektrony) – existence minimální energie
  - fotovoltaické (detektor jako zdroj napětí a proudu)
    - fotodiody, plošné detektory (CMOS, CCD), solární články
  - fotokonduktivní (detektor jako pasivní součástka s proměnnou vodivostí dle osvětlení)
    - fotoodpor, fototranzistor
  - fotoemisivní (elektrony emitované látkou jsou zachyceny obvodem)
    - fotonka, fotonásobič



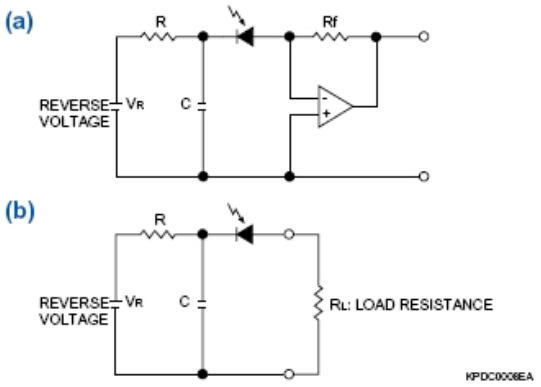
Fotodioda



http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature

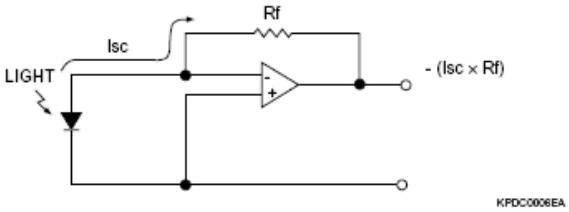
Fotokonduktivní zapojení diody

- světlem kontrolovaný zdroj proudu
- dioda je v závěrném směru
- s ozářením se mění vodivost přechodu
- lepší frekvenční charakteristika (rychlost) a linearita
- vyšší temný proud a šum



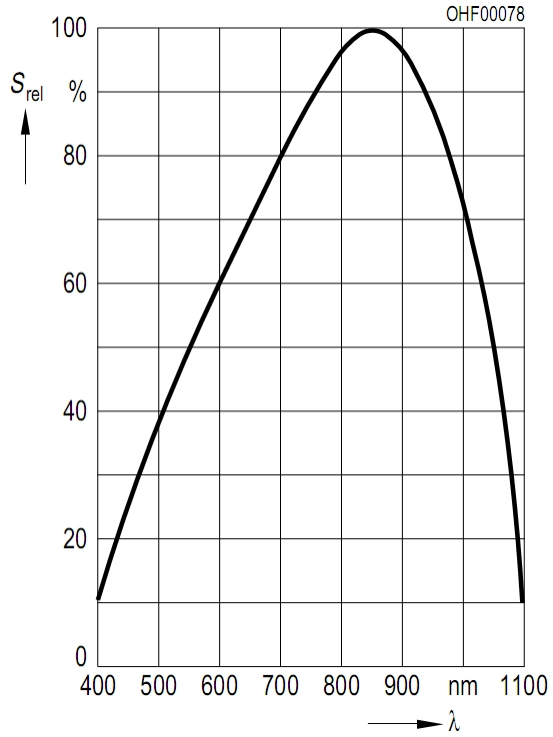
Fotovoltaické zapojení diody

- dioda jako zdroj napětí
- měříme proud diodou pomocí OZ v zapojení transimpendanční zesilovač
- oproti fotokonduktivnímu zapojení vykazuje signál nižší šum

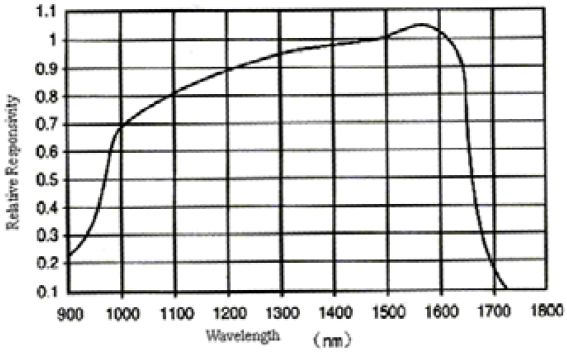


Typy fotodiod

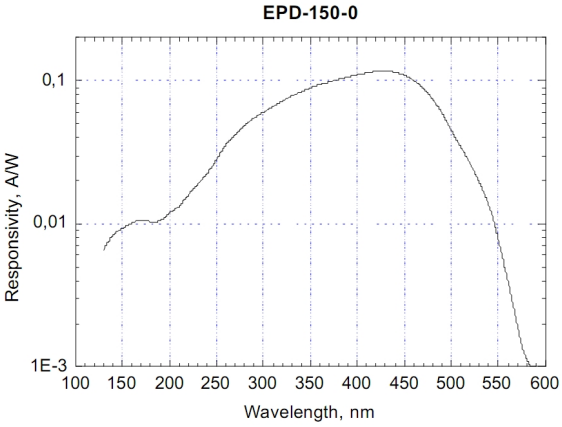
- $U_g = 1.12$ eV pro Si, 1.8 eV for GaAsP
- malá citlivost Si v UV oblasti – další typy TiO_2, GaP, SiC, GaN



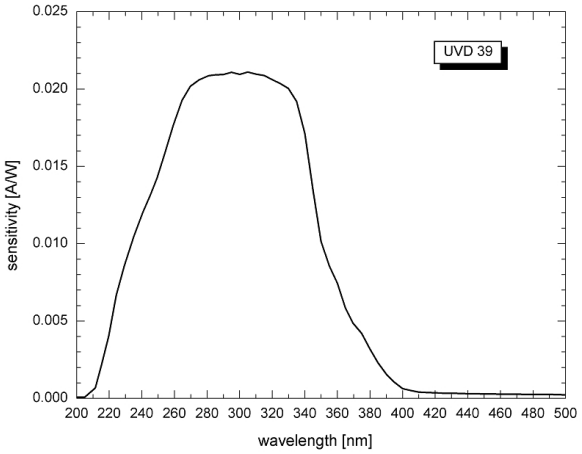
Si BPW34 400-1100 nm



InGaAs PT410 1.0-1.65 μm



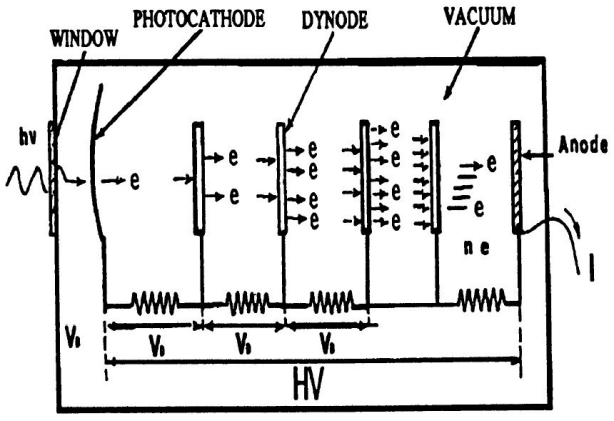
GaP



TiO_2

`http://www.roithner-laser.com/Silicon_cross.htm`

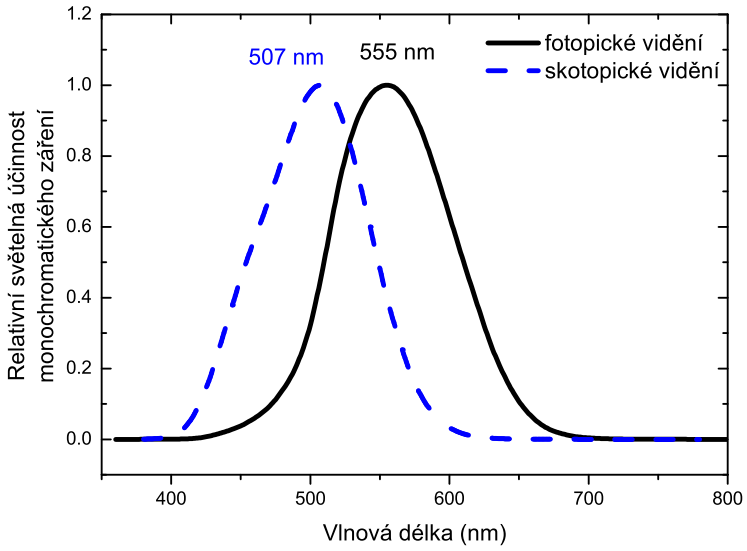
Fotonka a fotonásobič (PMT)



- charakteristiky *responsivity / radiant sensitivity, R* (mA/W), *quantum efficiency, QE* (elektron/foton), temný proud
- čítače fotonů

B Vnímání světla a barev

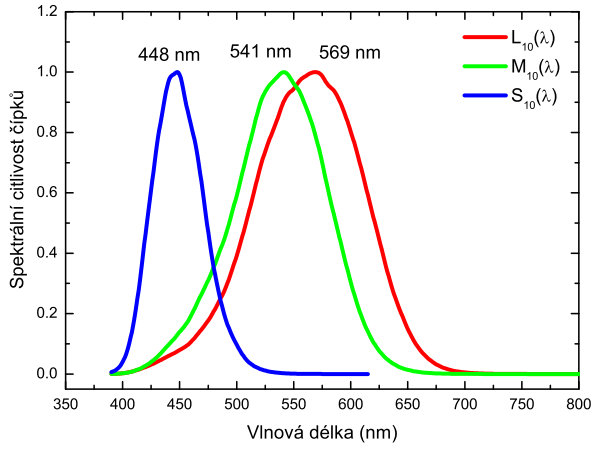
Světelná účinnost monochromatického záření



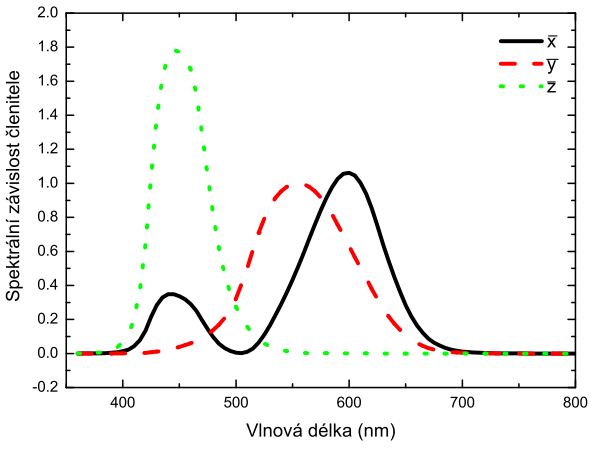
Účinnost monochromatického záření $K(\lambda) = K_{\max} V(\lambda)$

- fotopické vidění (čípky): $K_{\max} = 683$ lm/W (555 nm)
- skotopické vidění (tyčinky): $K_{\max} = 1700$ lm/W (507 nm)

Spektrální charakteristiky



Cone Fundamentals

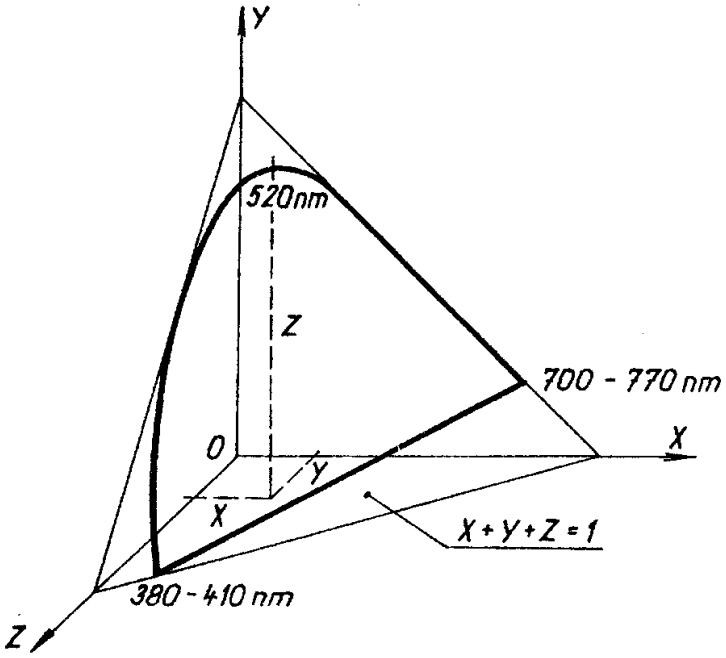


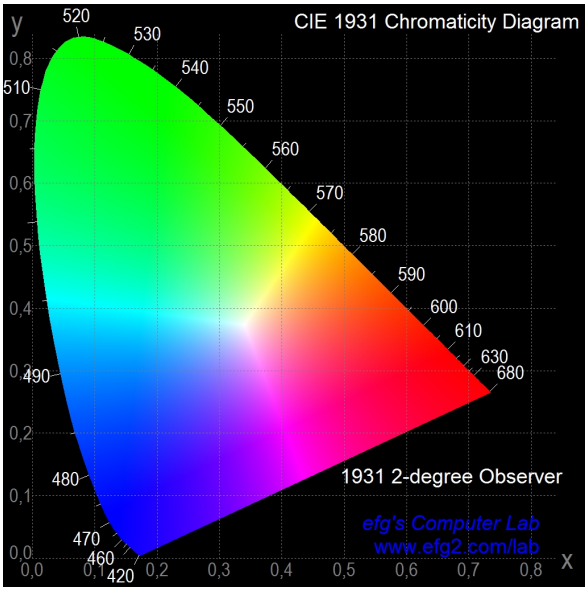
Členitelé prostoru XYZ

`http://www.cvrl.org/`
`http://www.efg2.com/Lab/Library/Color/Science.htm`

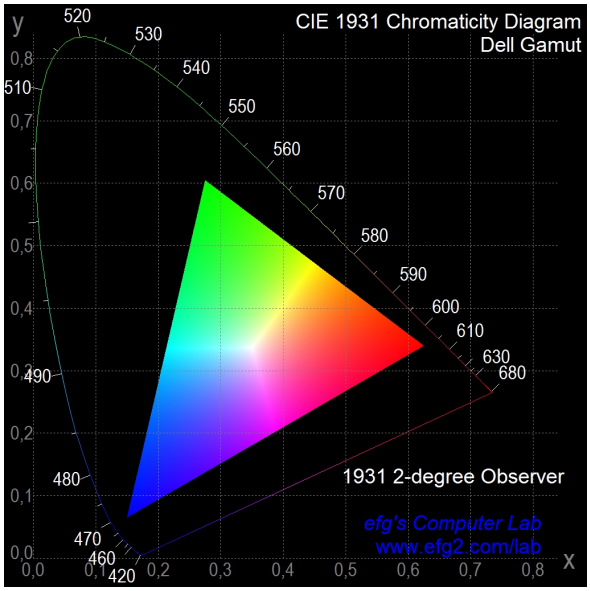
Prostor XYZ a diagram CIE– výpočet souřadnic ze spektra

$$
\begin{aligned}
X &= \int_0^\infty \Phi_\mathrm{e}(\lambda)\overline{x}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \approx \sum_{i=1}^{N} \Phi_{\mathrm{e},i}\cdot\overline{x}_i \\
Y &= \int_0^\infty \Phi_\mathrm{e}(\lambda)\overline{y}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \approx \sum_{i=1}^{N} \Phi_{\mathrm{e},i}\cdot\overline{y}_i \\
Z &= \int_0^\infty \Phi_\mathrm{e}(\lambda)\overline{z}(\lambda)\mathrm{d}\lambda \approx \sum_{i=1}^{N} \Phi_{\mathrm{e},i}\cdot\overline{z}_i \\
x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = 1-x-y
\end{aligned}
$$





celý prostor



gamut RGB zařízení