

Aplikovaná optika 2

Dušan Hemzal

srpen 2022

Světlo

- 1) Odvoďte vztah mezi energií fotonu a jeho vlnovou délkou. Víte-li, že atomárním světě je výhodnější jednotkou energie 1 eV=1 J/e, kde e je elementární náboj, vyjádřete přepočtení mezi eV a nm.

$$[E=hc/\lambda; E[\text{eV}]\doteq 1240/\lambda[\text{nm}]]$$

- 2) Hranice UV A,B,C je po řadě 380 nm, 320 nm a 280 nm. Vypočtete energii fotonů na těchto hranicích a porovnejte tyto fotony s fotony z He-Ne laseru ($E=1.96$ eV) a KrF excimerového laseru ($E=5.00$ eV).

$$[E_A=3.26 \text{ eV}, E_B=3.88 \text{ eV}, E_C=4.43 \text{ eV}, \lambda_{\text{He-Ne}}=633 \text{ nm}, \lambda_{\text{KrF}}=248 \text{ nm}]$$

- 3) Měkké RTG záření má energii fotonu v řádu 10 keV, tvrdé RTG záření potom v řádu 100 keV. Vypočtete vlnovou délku obou typů záření a porovnejte ji s atomárními vzdálenostmi v materiálech (odhadněte například mřížkový parametr krystalu ^{197}Au ze znalosti hustoty zlata 19.3 g/cm^3).

$$[\lambda_{\text{soft}} \approx 124 \text{ pm}, \lambda_{\text{hard}} \approx 12.4 \text{ pm}; a_{\text{Au}} = 257 \text{ pm} \text{ při rovnoměrném rozložení atomů}]$$

Bohrův model atomu

- 1) Uvažujte wolframový drát průměru $25 \mu\text{m}$ a délky 820 mm, ze kterého je stočeno vlákno žárovky, které je při provozu žárovky vyhřáto na 2300 K. Určete, kolik energie vlákno žárovky vyzařuje do prostoru. Vypočtete velikost nejmenších objektů, které jsme schopni vidět běžným okem a porovnejte tuto hodnotu s průměrem vlákna žárovky. Jakto, že jsme schopni vlákno vidět? (náповěda: zamyslete se také nad udanou délkou drátu).

$$[\sigma T^4 = 1.5866 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2, P = 102 \text{ W}, d_{\text{min}} = 70 \mu\text{m}]$$

Porovnejte výkon vyzařovaný vlákem žárovky se zářením Slunce (povrchová teplota Slunce činí 5780 K, jeho rovníkový průměr 1 392 020 km). Jaký výkon na čtvereční metr dopadá na Zemi (vzdálenou od Slunce 150 000 000 km) na hranici atmosféry (tzv. sluneční konstanta)?

$$[\sigma T^4 = 63.3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2, P = 3.852 \cdot 10^{26} \text{ W}, \text{sluneční konstanta } 1300 \text{ W/m}^2]$$

- 2) Naleznete energii několika jádru nejbližších elektronových hladin v atomu vodíku. Určete energii fotonů, odpovídajících Lymanově sérii; naleznete vlnovou délku hrany této serie.

$$[\lambda_{\text{min}} = 90.88 \text{ nm}]$$

- 3) Naleznete energii K_α čáry pro rentgenku s měděnou ($Z=29$) a wolframovou ($Z=74$) anodou. Porovnejte tyto hodnoty s tabelovanými (8027 eV pro Cu, 58 keV pro W), a určete vlnovou délku těchto čar. Naleznete práh spektra rentgenky pro urychlovací napětí 100 kV. Jakým způsobem by bylo možné dosáhnout spektra, ve kterém čára K_α wolframu chybí?

$$[K_\alpha(\text{Cu}): 8 577 \text{ eV} (0.144 \text{ nm}), K_\alpha(\text{W}): 55.8 \text{ keV} (0.022 \text{ eV}), \lambda_{\text{min}} = 0.0124 \text{ nm}]$$

Lasery

- 1) Odhadněte (polo)šířku spektrální čáry, generované běžným typem přechodu (doba života $\tau=1$ ns) a přechodem z metastabilní hladiny (doba života $\tau=1$ μ s); oba přechody uvažujte v blízkosti čáry He-Ne laseru, $\lambda_0=632.8$ nm. Určete pro oba přechody koherenční délku emitovaného světla.

$$[\tau=1 \text{ ns: } \Delta\lambda=31.8\mu\text{m}, \delta_c=12.6 \text{ nm}; \tau=1\mu\text{s: } \Delta\lambda=31.8 \text{ nm}, \delta_c=12.6\mu\text{m}]$$

- 2) Odhadněte, které podélné módy rezonátoru, dlouhého $L=2$ m, bude využívat He-Ne laser (jedná se o emisi z metastabilní hladiny předchozího příkladu).

$$[\text{přibližně módy } 6\ 166\ 178 \text{ až } 6\ 484\ 033, \text{ hustota módů: } 10\ 000 \text{ módů/nm}]$$

- 3) Odhadněte šířku jednotlivých rezonátorových módů, je-li rezonátor uzavřen zrcadly s $R=0.9$ nebo $R=0.99$. Stanovte pro tyto šířky rezonátorových módů odpovídající koherenční délky laseru.

$$[\text{centrální mód } m=6\ 321\ 113: R=0.9 \Delta\lambda=1.7 \cdot 10^{-6} \text{ nm } \delta_c=238 \text{ m}, R=0.99 \Delta\lambda=1.6 \cdot 10^{-7} \text{ nm } \delta_c=2.5 \text{ km}]$$

- 4) Odhadněte maximální energii, kterou je teoreticky schopen v daném okamžiku uvolnit krychlový centimetr plynu, vyzařující z metastabilní hladiny He-Ne laseru ($\lambda_0=632.8$ nm, $\tau=1$ μ s). Jaký by měl takový zdroj světla okamžitý výkon?

$$[\text{Loschmidtovo číslo } N_A/V_m=2.687 \cdot 10^{19} \text{ částic/cm}^3, 8.44 \text{ J}, 8.44 \text{ MW}]$$

- 5) Předpokládejte, že rozbíhavost laserového svazku z předchozího příkladu je asi $\alpha=5^\circ$. Vypočtěte, jaký výkon P_z by musela mít žárovka, aby ve vzdálenosti l dávala stejný osvit jako svazek tohoto laseru o výkonu $P=5$ mW.

$$[P_z/P=16/\tan^2\alpha, 10.5 \text{ W}]$$

Detekce světla

Plně osluněná zasněžená plocha má expoziční potřebu 16 EV, Mléčná dráha potom -9 EV. Stanovte poměr expozičních dob těchto dvou scén a pro citlivost záznamového media $s=100$ ASA rozhodněte, zda je realistické pořídit je s expozicí 1/1000 s. Vypočtete, jak se expoziční doba Mléčné dráhy změní při použití detektoru s citlivostí 400 ASA a odclonění objektivu.

$$[t_2/t_1=33.6 \times 10^6, c: 8 \text{ a } 1.4 \times 10^{-3}, c=8, 100 \text{ ASA: } 9.1 \text{ hod, } c=1.4, 400 \text{ ASA: } 4.2 \text{ min}]$$

Předpokládejte fotografický objektiv s $f'=50$ mm a clonou $c=1.4$, nastavitelnou až na $c=16$. Určete podélnou i příčnou velikost difrakčních stop při těchto clonách za použití světla o vlnové délce 550 nm a z nich odvoďte úhlová rozlišení objektivu a příslušné hloubky ostrosti (předpokládejte ostření "na nekonečno").

$$[l: 4.3 \mu\text{m a } 0.56 \text{ mm, } d: 0.94 \mu\text{m a } 10.7 \mu\text{m, } 3.9'' \text{ a } 44.1'', a_{\text{min}}: -581 \text{ m a } -4.49 \text{ m}]$$

Optická zařízení

Konfokální mikroskop. Předpokládejte mikroskop s objektivem o $Z=50x$, $D=2.5$ mm a tubusovou vzdáleností $\Delta=250$ mm. Nakreslete schema mikroskopu, zvolte polohu předmětu tak, aby vznikl skutečný obraz a zkonstruuje obraz za objektivem a za okulárem mikroskopu. Umístěte do schematu mikroskopu konfokální clonu a stanovte její optimální velikost při osvětlení o vlnové délce 550 nm. Zjistěte, jaké laterální rozlišení v předmětovém prostoru zvolená konfokální clona přináší.

$$[d=1.34 \mu\text{m, } a=-5.1 \text{ mm, } 27 \text{ nm}]$$

GDx. Vliv dvojlomného prostředí jednotlivých vrstev oka na procházející světlo je popsán pomocí veličiny retardance. Retardance popisuje v zásadě rozdíl ve fázi, kterou mezi sebou nabraly průchodem zvoleným prostředím řádný a mimořádný paprsek. Retardance může být udána v různých jednotkách, například se uvádí: pro sítnicovou vrstvu nervových vláken 0.1 až 0.35 °/μm vrstvy (při dvojitým průchodu vrstvou) při osvětlení s $\lambda_0=840$ nm (tloušťku vrstvy s vláknem uvažujte 50 μm), pro rohovku 0-250 nm (při dvojitým průchodu rohovkou) při osvětlení s $\lambda_0=585$ nm (tloušťka rohovky je 0.55 m), nebo pro čočku $\Delta n=2.10^{-6}$ (tloušťka čočky je 4.5 mm). Nalezněte způsob, jak mezi jednotlivými uvedenými jednotkami přecházet a porovnejte míru dvojlomnosti uvedených struktur.

$$[0.2 \text{ }^\circ/\mu\text{m} \approx 23 \text{ nm} \approx 4.6 \times 10^{-4}, 0.17^\circ/\mu\text{m} \approx 150 \text{ nm} \approx 2.7 \times 10^{-4}, 0.001^\circ/\mu\text{m} \approx 9 \text{ nm} \approx 2 \times 10^{-6}]$$

Aberace

Z definičních vztahů spočtete všechny Zernikovy polynomy pro aberace nižšího řádu.

Optická zařízení

Světelný mikroskop. Uvažujte mikroskop s objektivem o zvětšení $Z_{\text{ob}}=50x$, v provedení s $NA=0.5$ nebo $NA=0.9$, oba údaje platí na vzduchu. Určete zorný úhel obou objektivů a stanovte rozsah rozlišení, kterých je teoreticky možno s jejich použitím dosáhnout.

$$[60^\circ \text{ a } 128^\circ, d_{\text{min}}=1.3 \mu\text{m} \text{ pro } NA=0.5 \text{ v bílém světle až } d_{\text{min}}=180 \text{ nm} \text{ pro } NA=0.9 \text{ při } \lambda_0=400 \text{ nm, imerzi } n=1.5 \text{ a kondenzoru}]$$