ŠTÚDIUM SPEKTRA VÝBOJKY

OPTICKOU MRIEŽKOU

Teoretický úvod:

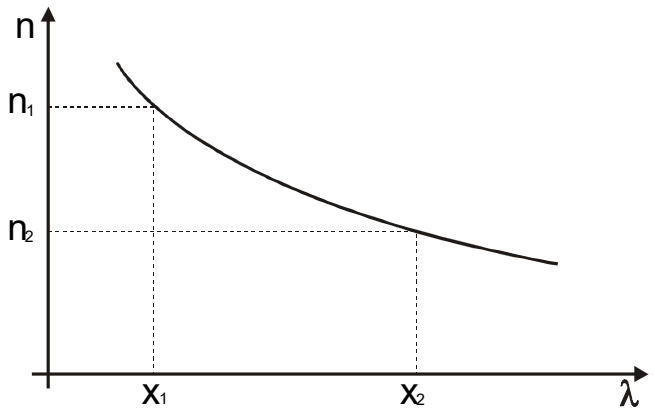
Svetlo, ktoré vyžaruje každý svetelný zdroj, je zložené. Skladá sa zo svetelných vĺn o rôznych vlnových dĺžkach, pričom každej takejto vlne priraďujeme vlnovú dĺžku podľa vzťahu

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{1}$$

kde c je rýchlosť svetla vo vákuu (vzduchu) a ν je frekvencia (t.j. počet kmitov za sekundu) odpovedajúca svetelnej vlne. Svetlu, popísanému jedinou vlnovou dĺžkou λ hovoríme monochromatické svetlo (monochromatická svetelná vlna alebo zložka).

Naše oko nemá analyzačné schopnosti ako napr. náš sluch, preto oko nerozoznáva jednotlivé zložky v zloženom svetle. Sietnica oka je citlivá na svetlo z intervalu vlnových dĺžok 0,4 ÷ 0,7 μm. Svetlo, ktorému zodpovedá jedna vlnová dĺžka, oko vníma ako farebný vnem.

Zložené svetlo na jeho jednotlivé zložky (jednotlivé farby) rozložíme napr. optickým hranolom. Jeho index lomu n je nelineárnou funkciou vlnovej dĺžky, tak ako je to schematický znázornené na obr.1. Táto skutočnosť vedie k tomu, že svetlo s rôznymi vlnovými dĺžkami sa po prechode hranolom láme pod rôznymi uhlami a tým dochádza k jeho rozkladu na jednotlivé farebné zložky. Súboru monochromatických vĺn (zložiek) v zloženom svetle hovoríme svetelné spektrum.



Obr. 1

Inú možnosť analýzy svetla umožňuje optická ohybová mriežka. Tu využívame jav difrakcie (ohybu) svetelnej vlny (svetelného zväzku). Optická mriežka je obyčajne realizovaná ako sústava periodických vrypov na sklenenej doštičke alebo periodicky sa opakujúce priehľadné a nepriehľadné prúžky na filme.

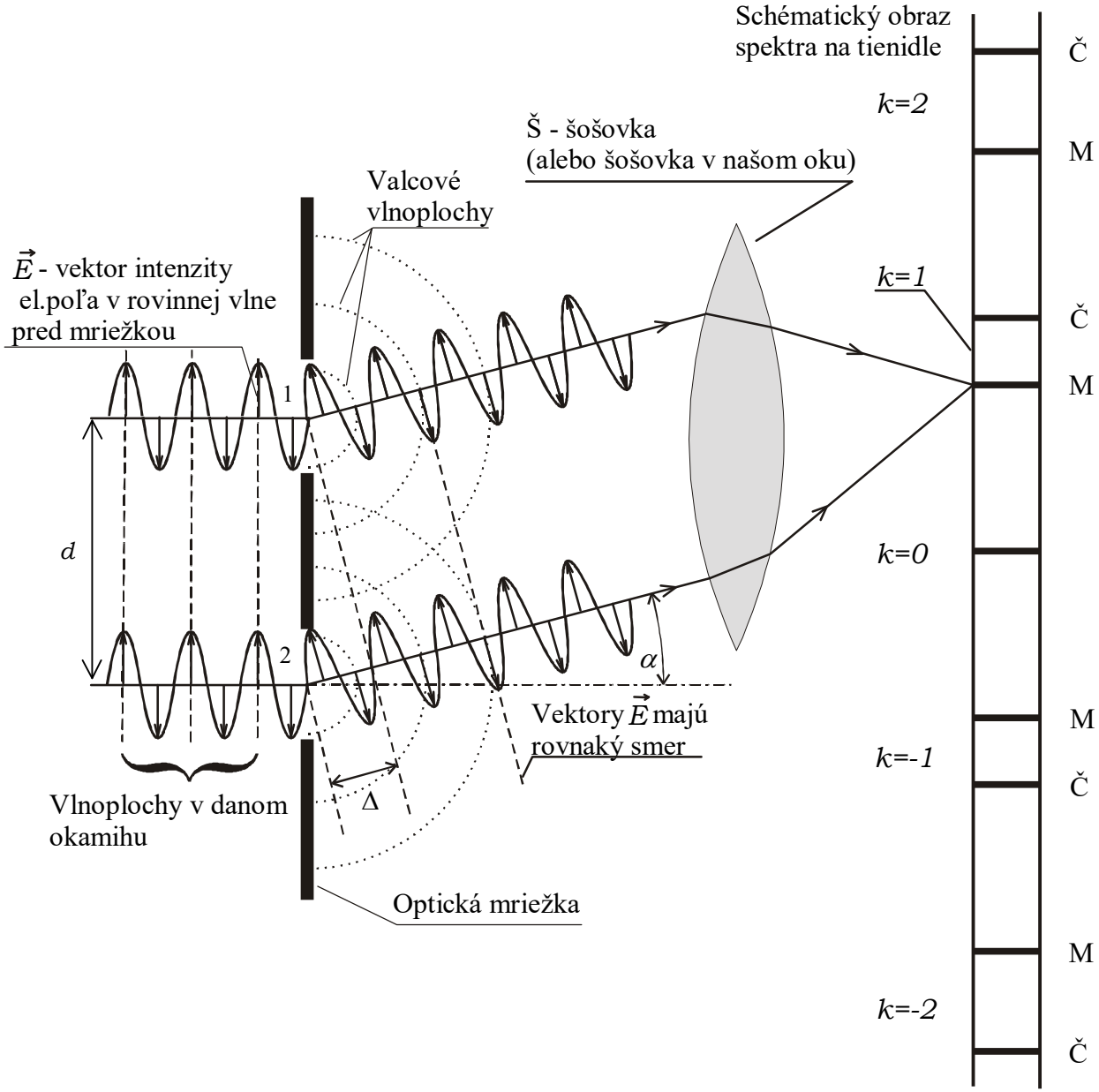
Nech na takúto mriežku dopadá kolmo rovinná svetelná vlna (viď obr. 2). Vlnoplochy (miesta konštantnej fáze) takejto vlny sú roviny. Na obrázku sú reprezentované priamkami rovnobežnými s rovinou mriežky.

Každá štrbina optickej mriežky je v zmysle Huygensovho princípu zdrojom vlnenia. Výsledná vlna po prechode mriežkou bude výsledkom interferencie vĺn vznikajúcich v jednotlivých štrbinách mriežky. Vlnoplochy vĺn šíriacich sa za mriežkou sú valcové plochy a na obr. 2 sú znázornené vybodkovanými polkružnicami.

Sledujme dva svetelné lúče, ktoré prechádzajú štrbinami 1 a 2 pod uhlom α (obr. 2). Alebo namiesto týchto lúčov si predstavme dve svetelné vlny znázornené pre určitý časový okamih sinusoidami (obr. 2). Intenzita elektrického poľa v svetelnej vlne je znázornená vektorom (obr. 2).

Nech lúč 1 vykoná od roviny mriežky po tienidlo, t.j. do bodu M, dráhu l_1 a podobne lúč 2 vykoná dráhu l_2. Dráhovým rozdielom týchto dvoch lúčov rozumieme vzdialenosť $\Delta = l_2 - l = d \sin\alpha$

(viď obr. 2). Ak na dráhový rozdiel Δ týchto dvoch lúčov bude pripadať jedna vlnová dĺžka vlny, alebo jej celočíselný násobok, po prechode týchto dvoch lúčov napr. šošovkou Š (alebo šošovkou v našom oku), stanú sa vektory intenzity elektrického poľa týchto lúčov súmiestne, čím dôjde k ich zosilneniu (konštruktívnej interferencii), t.j. vektory sa sčítajú, lebo majú v uvažových vlnách rovnaké smery. Táto úvaha platí aj pre ďalšie štrbiny.



Obr.2

Ak svetlo vyžiarované zdrojom je pred dopadom na mriežku vymedzené úzkou štrbinou, obrazom tejto štrbiny bude na tienidle svetelná stopa tvaru svetelnej čiary (napr. čiara M, modrá), ktorej odpovedá svetelná vlna s určitou vlnovou dĺžkou. Podobnú úvahu môžeme urobiť pre svetelnú vlnu s väčšou vlnovou dĺžkou. Táto po prechode mriežkou a šošovkou bude dopadať na tienidlo, napr. v mieste Č (červená). Súvis medzi dráhovým rozdielom Δ uvažovaných dvoch vĺn, ich vlnovou dĺžkou, vzdialenosťou d dvoch štrbín a uhlom α je vyjadrený vzťahom (2)

$$\Delta = d \sin\alpha = k\lambda\,, \qquad (2)$$

kde k = 0, 1, 2 … je celé číslo.

Rovnica (2) určuje podmienku, v ktorých smeroch (pod akým uhlom α) sa svetlo interferenciou zosilňuje. V iných smeroch, v ktorých podmienka (2) nie je splnená, sa interferenciou zoslabuje, resp. ruší.

Svetlo sa interferenciou ruší vtedy, keď na dráhový rozdiel Δ (pozri obr. 2) pripadne $\lambda/2$, $3\lambda/2$, … atď., t.j. nepárny násobok pol vlnovej dĺžky. Hovoríme, že došlo k deštruktívnej interferencii. V tomto prípade uvažované vektory sú proti sebe a teda sa odčítajú. Toto môžeme vyjadriť vzťahom

$$\Delta = d \sin\alpha = (2k+1)\lambda / 2 \qquad (3)$$

kde k = 0, 1, 2, 3, … je celé číslo.

Optické hranoly a optické mriežky sú základom zariadení, ktorým hovoríme spektroskopy. Tieto nám umožňujú študovať spektrá svetiel z rôznych svetelných zdrojov. Spektrom potom budeme rozumieť súbor svetelných vĺn s rôznymi vlnovými dĺžkami, ktoré vyžaruje svetelný zdroj. Tento súbor potom na tienidle vytvára obrazec, ktorý pozorujeme okom, alebo ho môžeme naexponovať na film. Jeho tvar bude závislý od toho, aký tvar štrbiny použijeme. (Kruhový otvor by dával kruhové zobrazenia).

Ako bolo povedané už vyššie, naše oko na svetlo svetelného zdroja, ktorému zodpovedá len jedna vlnová dĺžka (monochromatické svetlo), reaguje farebným vnemom. Potom hovoríme o svetle modrom, zelenom, červenom atď.

Historicky sa zaužívalo hovoriť, že pozeráme na spektrum. Teda spektrom nazývame aj pozorovaný obrazec, ktorý vznikol po prechode mriežkou i keď jeho pôvod je vo fyzikálnom mechanizme v atómoch daného svetelného zdroja. Podľa vzhľadu tohoto spektra, potom hovoríme o *spojitom spektre*, vtedy keď jednotlivé farebné časti spektra prechádzajú spojite jedna do druhej. Z iného svetelného zdroja môžeme pozorovať *čiarové spektrum*, kde vo svetle vidíme jednotlivé svetelné čiary, alebo sériu čiar rôznej farby.

Prípadu, keď podľa rovnice (2) je k = 1, hovoríme spektrum 1. rádu, keď je k = 2 hovoríme o spektre 2. rádu atď. Jednotlivá čiara takéhoto spektra sa nazýva čiara 1. difrakčného maxima atď. Ako sme už spomenuli, typ daného spektra súvisí s fyzikálnym mechanizmom v atómoch, v ktorých svetlo vzniká a tiež s prostredím, ktorým svetlo prechádza. Táto skutočnosť teda dovoľuje analyzovať svetlo daného zdroja, preto takéto merania tiež nazývame *spektrálnou analýzou*.

Napr. keď svetlo zdroja, ktorý vysiela spojité spektrum (napr. svetlo žiarovky) prechádza vrstvou určitej skúmanej látky (tou látkou môže byť napr. roztok tejto látky), potom niektoré vlny, ktorým prislúcha určitá farba môžu byť v roztoku pohltené. Takéto svetlo po prechode optickou mriežkou vytvára *absorpčné spektrum*. Tieto spektrá môžu byť podľa tvaru *pásové* alebo *čiarové*.

Poznámka: Konštrukcia použitej výbojky v našej úlohe vedie napr. k tomu, že svetlo zodpovedajúce vlnám vysielaným atómami sodíka z vnútorných častí výboja výbojky je absorbované atómami okolitej časti v priestore výboja, preto sa spektrálna čiara javí ako tmavá (absorbčné spektrum). Zodpovedá jej vlnová dĺžka λ = 589 nm.

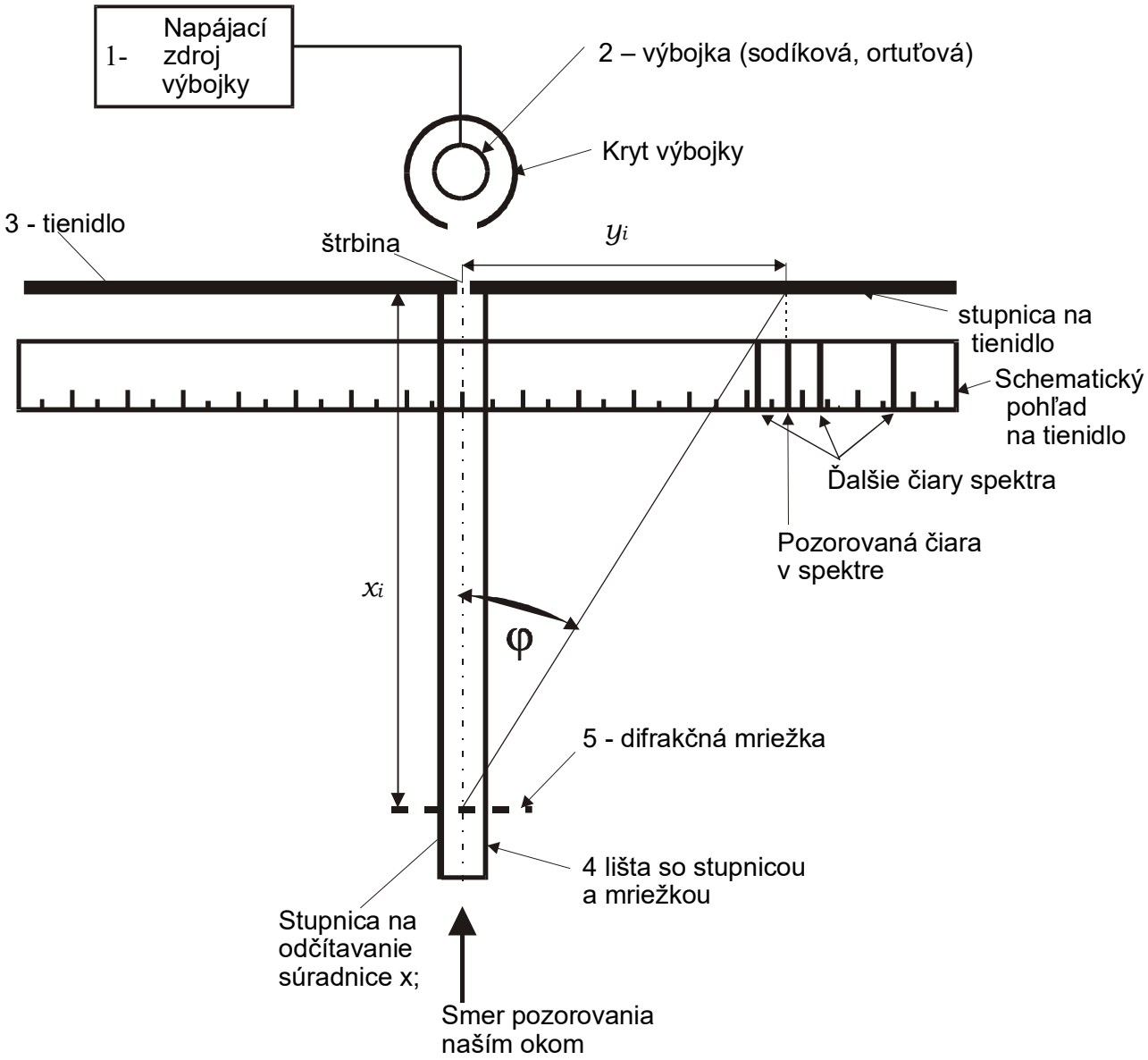
Náčrt a popis meracieho zariadenia:

Na obr. 3 je znázornená principiálna schéma zariadenia, ktoré využívame pre štúdium spektra sodíkovej výbojky.

Toto zariadenie pozostáva zo zdroja prúdu 1, ktorý napája sodíkovú výbojku 2 a prípravku, na ktorom je tienidlo 3 so štrbinou. Po lište 4 je možné posúvať optickú mriežku 5 upevnenú v špeciálnom držiaku, ktorej mriežkový parameter d = 5.10^{-6}m. V prípade, že použijeme mriežku s neznámym mriežkovým parametrom d túto určíme podľa postupu uvedenom v úlohe „Štúdium difrakcie svetla laserom“ t.j. využijeme optickú lavicu so vstavaným zdrojom svetla, napr. laserom

s vlnovou dĺžkou $\lambda = 680\text{nm}$. Pre výpočet využijeme vzťah (5), upravený na tvar $d = \lambda\sqrt{1+(x_i / y_i)^2}$.

Svetlo prechádzajúce cez štrbinu tienidla dopadá na optickú mriežku 5 a do nášho oka na sietnicu. Naše oko potom pozorované spektrum, respektíve jednu z jeho čiar, vidí ako priemet na tienidle 3. Pripomeňme (pozri obr. 3), že mriežka je rovnobežná s tienidlom.



Obr.3

Úlohy:

1. Určte najprv mriežkový parameter d mriežky.
2. Určte pre päť rôznych polôh mriežky (súradnice x) polohy y dvoch vybraných čiar v spektre, keď $k = 1$.
3. Po stanovení $sin\alpha_i$ podľa vzťahu (5) vypočítajte príslušné vlnové dĺžky.
4. Podobné meranie realizujte pre spektrum druhého rádu t.j. $k = 2$ pre tie isté dve spektrálne čiary.
5. Podľa tabuľky, ktorá je súčasťou meracieho pracoviska tejto úlohy, pokúste sa priradiť merané spektrálne čiary a im odpovedajúce vlnové dĺžky atómu prvku vo výbojke, ktorému tieto čiary prislúchajú.

Metóda merania a postup pri meraní:
Po zapnutí zdroja sodíkovej výbojky nastavíme napätie zdroja na maximálnu hodnotu a potom zapneme vypínač na stojane s výbojkou. Regulátorom prúdu nastavíme prúd cca 1A. Po dobu niekoľkých minút chodu výbojky môžeme vidieť na tienidle výrazné čiarové spektrum, ktoré sledujeme okom cez mriežku. Oko je od mriežky vzdialené cca 2 cm. Zvolíme si sledovanú čiaru napr. modrú, ktorej chceme stanoviť odpovedajúcu vlnovú dĺžku. Na stupniciach umiestnených na tienidle a na lište s mriežkou odčítame súradnicu y_i polohy sledovanej čiary a súradnicu x_i polohy mriežky.

Spracovanie výsledkov:
Hodnoty veličín x_i, y_i meranej spektrálnej čiary zapíšte do tabuľky I. Tieto nám umožňujú stanoviť hodnotu $\sin\alpha_i$ v rovnici (1), ktorý (viď obr. 3) môžeme vyjadriť vzťahom

$$\sin\alpha_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_i}{y_i}\right)^2}} \tag{4}$$

Keď poznáme mriežkový parameter d a súčasne vieme, že sledovaná spektrálna čiara patrí k spektru prvého rádu, t.j. keď $k = 1$ môžeme spojením vzťahu (2) a (4) vypočítať vlnovú dĺžku tejto čiary podľa vzťahu

$$\lambda_i = d\frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} = \frac{d}{\sqrt{1 + \left(\frac{x_i}{y_i}\right)^2}} \tag{5}$$

V prípade, že budeme meranie realizovať pre čiaru zo spektra vyšších rádov, musíme patrične upraviť aj vzťah (5) (t.j. potom $k = 2, k = 3, \ldots$)

Vypočítané vlnové dĺžky λ_i, získané podľa vzťahu (5), ktoré odpovedajú hodnotám x_1, y_1; x_2, y_2 ;… x_i, y_i ; uvedieme tiež do tabuľky I. Po stanovení skutočnej hodnoty $\bar{\lambda}$ vypočítajte odchyľky Δ_i a Δ_i^2 .

Tabulka I

i	x_i[ ]	y_i[ ]	$\sin\alpha_i$	λ_i	Δ_i	Δ_i^2
1	x_1	y_1	$\sin\alpha_1$	λ_1	$\Delta_1=\lambda_1 - \bar{\lambda}$	Δ_1^2
2	x_2	y_2	$\sin\alpha_2$	λ_2	$\Delta_2=\lambda_2 - \bar{\lambda}$	Δ_2^2
3	.	.	.	.	.	.
4	.	.	.	.	.	.
5	.	.	.	.	.	.
				$\bar{\lambda}$		$\sum\Delta_i^2$

Vlnovú dĺžku príslušnej čiary vyjadríme $\lambda = \overline{\lambda} \pm \overline{\delta}_{\lambda}$, kde $\overline{\lambda}$ vyjadruje nameranú hodnotu pričom

$$\overline{\delta}_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n(n-1)}}$$

reprezetuje strednú kvadratickú chybu aritmetického priemeru (pozri rovnicu (11) v časti „Vyhodnocovanie chyby merania). Vzdialenosť x_i meňte cca po 2 cm, t.j. tak, aby bola badateľná zmena polohy y_i meranej spektrálnej čiary.

Kontrolné otázky:

1. Čo je to spektrum?
2. Ako triedime spektrá? (Aké typy spektier poznáme?)
3. Ako vzniká spektrum použitím optického hranola?
4. Ako vzniká spektru, keď použijeme difrakčnú mriežku?
5. Uveďte podmienky pre smery, v ktorých sa svetlo po prechode mriežkou šíri a v ktorých sa nešíri.
6. Čo je to rád príslušného maxima?
7. Čo je to spektroskop?
8. Napíšte základné vzťahy pre výpočet vlnovej dĺžky zodpovedajúcej spektrálnej čiary.