

5.3.4 Využití interference na tenkých vrstvách v praxi

Předpoklady: 5303

1. kontrola vybroušení

brousíme čočku, potřebujeme vyzkoušet, zda je správně vybroušená (má správný tvar)

máme vyrobený velice přesný odlitek (negativ) čočky (kalibr)

vyleštěnou čočku (nevyleštěná čočka je matná) přiložíme ke kalibru

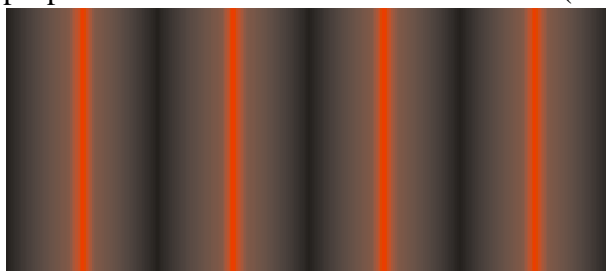
- při ideálním vybroušení čočky je vrstva mezi kalibrem a čočkou všude stejně tlustá \Rightarrow podmínka pro interferenční maximum je všude splněna pro stejnou barvu \Rightarrow vše uvidíme ve stejné barvě (u monochromatického světla ve stejné intenzitě)
- reálná čočka \Rightarrow vrstva mezi kalibrem a čočkou je různě tlustá \Rightarrow podmínka pro interferenční maximum je všude splněna pro jiné barvy \Rightarrow vidíme různé barvy (u monochromatického světla různé intenzity)

\Rightarrow čím rychleji se budou měnit barvy (intenzity) získané interferencí, tím rychleji se mění štěrbinu mezi čočkou a kalibrem a tím hůře je čočka vybroušená

Př. 1: Dvě skleněné destičky jsou na sebe položeny tak, že mezi nimi vzniká vzduchový klín s velmi malým úhlem. Situace je nakreslena na obrázku při pohledu z boku. Nakresli interferenční obrazec, který na vzduchovém klínu vznikne, pokud ho kolmo seshora osvítlíme červeným světlem (při pohledu shora).



Šířka vzduchové vrstvy mezi skleněnými deskami se postupně zvětšuje \Rightarrow v určité vzdálenosti od místa dotyku bude splněna podmínka pro interferenční maximum, v další vzdálenosti podmínka pro interferenční minimum, pak zas pro interferenční maximum \Rightarrow při pohledu seshora uvidíme střídavě černé (minimum) a červené (maximum) pruhy.



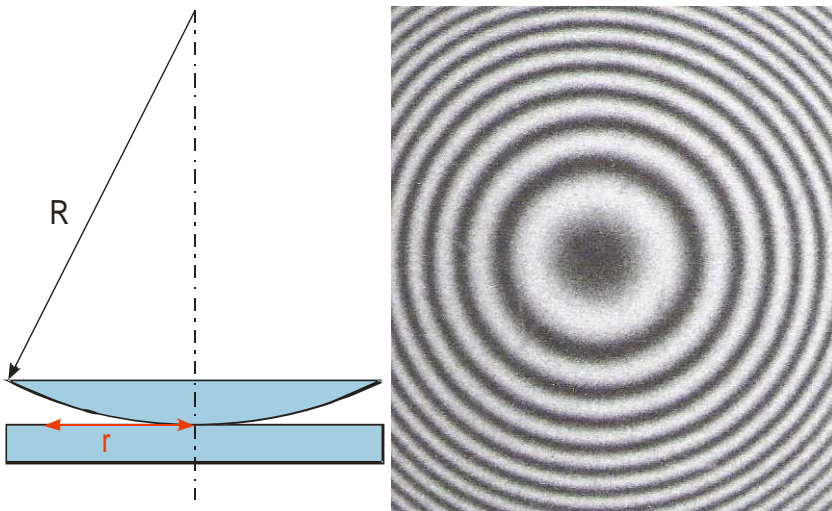
2. Newtonova skla (měření vlnové délky)

ploskovypuklá spojka s velkým poloměrem R přiložená k vodorovné desce \Rightarrow vznikne

vzduchová mezera, jejíž tloušťka se zvětšuje se vzdáleností r od bodu dotyku

svítíme shora \Rightarrow na vzduchové mezeře nastává interference

- svítíme bílým světlem \Rightarrow barevné kroužky
- svítíme barevným světlem \Rightarrow střídají se kroužky barvy, kterou svítíme, s temnými kroužky beze světla



Pokud změříme vzdálenosti r od středu můžeme určit tloušťku vzduchové mezery \Rightarrow určíme vlnovou délku záření, které má na změřeném poloměru maximum nebo minimum

3. protiodrazové vrstvy

část světla dopadajícího na libovolné rozhraní se vždy odráží zpět u skleněných čoček se takto odráží 5% - 10% dopadajícího světla \Rightarrow u jednotlivé čočky to není velký problém u objektivu sestaveného z 12 částí projde pouze $0,95^{12} = 0,54 \Rightarrow 54\%$ světla (to už je málo, znamená to prodloužení expoziční doby na dvojnásobek)

nápad: potáhneme čočku na dopadových plochách tenkou vrstvou, na které dojde k interferenci s minimem v odraženém a s maximem v procházejícím světle

Př. 2: Najdi mezeru v nápadu na snížení odrazivosti čoček jejich potažením interferenční tenkou vrstvou.

viditelné světlo se skládá z různých barev s různou vlnovou délkou \Rightarrow každá barva by vyžadovala jinou tloušťku vrstvy

Problém s různou tloušťkou vrstvy pro různé barvy světla se nedá odstranit, pouze potlačit \Rightarrow tloušťka vrstvy je optimalizována tak, aby zeslabila odraz střední části spektra (zelená, žlutá), na kterou je lidské oko nejcitlivější \Rightarrow v odraženém světle tyto barvy chybí \Rightarrow objektivy vypadají zepředu modrofialově

Dodatek: V gymnaziální učebnici optiky je uvedeno, že materiály na antireflexní vrstvy mají mít index lomu menší než je index lomu skla. Pro tuto podmínku jsem nenalezl logický důvod ani se mi ji nepodařilo ověřit z jiného zdroje. Navíc většina materiálů uváděných na různých místech internetu má index lomu větší než je uváděn u optických skel.

Př. 3: Vypiš údaje, které je nutné znát, pro správné navržení tloušťky antireflexní vrstvy pro čočku.

- index lomu antireflexní vrstvy (je to vrstva na níž probíhá interference)
- vlnovou délku, pro kterou máme vrstvu optimalizovat
- index lomu skla, ze kterého je vyrobena čočka (rozhoduje o tom, jaký typ odrazu nastane na rozhraní vrstva-sklo)

Pedagogická poznámka: Vyřešit všechny tři zbývající příklady není reálné. Možná je lepší řešit příklady v pozmeněném pořadí 4, 6, 5, protože v příkladě 6. studenti potřebují poradit s výpočtem tloušťky vzduchové vrstvy.

Př. 4: Na čočku s indexem lomu 1,52 má být nanесena antireflexní vrstva z oxidu křemíku o indexu lomu 1,55. Urči její tloušťku, pokud má být optimalizována pro žlutozelenou barvu $\lambda = 550 \text{ nm}$.

situace podobná mýdlové bublině \Rightarrow v odraženém světle se skládá:

- paprsek odražený na rozhraní vzduch-antireflexní vrstva (odraz z opticky řidšího do opticky hustšího \Rightarrow obrací se fáze, přičítáme $\frac{\lambda}{2}$)
- paprsek, který prošel vrstvou, odrazil na rozhraní vrstva-sklo (odraz z opticky hustšího do opticky řidšího \Rightarrow fáze se neobrací)

$$\Rightarrow 2nd + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (\text{hledáme minimum})$$

$$2nd = 2k\frac{\lambda}{2}$$

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n}$$

hledáme minimum 1. řádu, je nejsilnější \Rightarrow dosadíme $k=1$

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{2 \cdot n} = \frac{1 \cdot 550}{2 \cdot 1,55} \text{ nm} = 177 \text{ nm}$$

Antireflexní vrstva musí mít tloušťku 177 nm.

Př. 5: Na čočku s indexem lomu 1,52 má být nanесena antireflexní vrstva z fluoridu hořečnatého o indexu lomu 1,38. Urči její tloušťku, pokud má být optimalizována pro žlutozelenou barvu $\lambda = 550 \text{ nm}$.

v odraženém světle se skládá:

- paprsek odražený na rozhraní vzduch-antireflexní vrstva (odraz z opticky řidšího do opticky hustšího \Rightarrow obrací se fáze, přičítáme $\frac{\lambda}{2}$)
- paprsek, který prošel vrstvou, odrazil na rozhraní vrstva-sklo (odraz z opticky řidšího do opticky hustšího \Rightarrow obrací se fáze, přičítáme $\frac{\lambda}{2}$)

\Rightarrow protože se u obou skládajících paprsků obrací fáze, nevzniká mezi nimi žádný fázový rozdíl \Rightarrow na levou stranu nepřidáváme člen $\frac{\lambda}{2}$

$$\Rightarrow 2nd = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (\text{hledáme minimum})$$

$$d = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{4 \cdot n}$$

hledáme minimum 1. řádu, je nejsilnější \Rightarrow dosadíme $k=0$

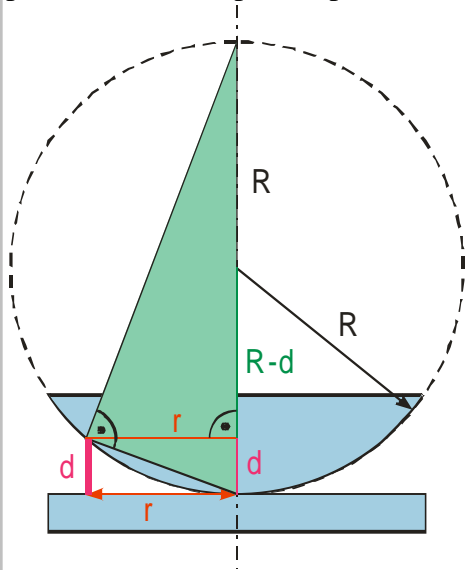
$$d = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{4 \cdot n} = \frac{(2 \cdot 0 + 1) \cdot 550}{4 \cdot 1,38} \text{ nm} = 100 \text{ nm}$$

Antireflexní vrstva musí mít tloušťku 100 nm.

Př. 6: Ploskovypuklá čočka Newtonových skel má poloměr křivosti 300 cm. Druhý světlý kroužek

v odraženém světle má poloměr 1,5 mm. Urči vlnovou délku užitého světla.

Pokud chceme určit vlnovou délku interferujícího světla, musíme spočítat tloušťku vzduchové vrstvy v místě, kde pozorujeme světlý proužek. Nakreslíme obrázek (kvůli přehlednosti neodpovídá poměr velikostí R a r na obrázku realitě):



Zelený trojúhelník sestrojený nad průměrem kružnice s poloměrem R je pravoúhlý (Thaletova věta). Poloměr kroužku r je výškou tohoto trojúhelníka, vzdálenosti $2R-d$ a d jsou úsečky přepony \Rightarrow použijeme větu o výšce: $v^2 = c_a \cdot c_b \Rightarrow r^2 = (2R-d) \cdot d$
 $r^2 = 2Rd - d^2 \Rightarrow$ problém: chceme určit d , ale pro d je rovnice kvadratická, naštěstí d je řádově 0,001 mm (aby vůbec došlo k interferenci), R je řádově m \Rightarrow člen $2Rd$ je miliónkrát větší než člen $d^2 \Rightarrow d^2$ je daleko menší než chyby měření \Rightarrow člen d^2 můžeme zanedbat

$$r^2 = 2Rd$$

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

Teď se můžeme zabývat interferencí:

v odraženém světle se skládá:

- paprsek odražený na rozhraní sklo-vzduch (odraz z opticky hustšího do opticky řidšího \Rightarrow fáze se neobrací, nic nepřičítáme)
- paprsek, který prošel vrstvou, odrazil na rozhraní vzduch-sklo (odraz z opticky řidšího do opticky hustšího \Rightarrow obrací se fáze, přičítáme $\frac{\lambda}{2}$)

\Rightarrow protože se fáze obrací u jednoho ze skládajících se paprsků obrací fáze, musíme k jejich fázovému rozdílu připočíst člen $\frac{\lambda}{2}$

$$\Rightarrow 2nd + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{hledáme maximum})$$

$$2nd = 2k \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{2}$$

$$2nd = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = \frac{4nd}{2k-1} \quad \text{dosadíme } d = \frac{r^2}{2R}$$

$$\lambda = \frac{4n}{2k-1} \cdot \frac{r^2}{2R} = \frac{2nr^2}{(2k-1) \cdot R}$$

hledám maximum 2. řádu $\Rightarrow k=2$, interference probíhá na vzduchové vrstvě \Rightarrow

$$n=1$$

$$\lambda = \frac{2nr^2}{(2k-1) \cdot R} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 0,0015^2}{(2 \cdot 2 - 1) \cdot 3} \text{ m} = 0,0000005 \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

Dopadající světlo má vlnovou délku 500 nm.

Shrnutí: Interference se používá ke kontrole broušených ploch a snižování odrazivosti čoček.