

Materiál MgF_2 pro výrobu dvojlomných filtrů MgF_2 material for birefringence filter production

Radek Melich, Zbyněk Melich, Ivan Šolc, Václav Mikule, Hana Oupická
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Oddělení optické diagnostiky, Turnov,
vod@jpp.cas.cz

Abstrakt

Pro výrobu dvojlomných interferenčně polarizačních filtrů Lyotova a Šolcova typu je standartně používán výhradně krystalický křemen (SiO_2) a vápenec ($CaCO_3$). Oba dva materiály, jak křemen s dvojlomem $D \equiv 0.009$ a tvrdostí $T = 7$ (na Mohsově stupnici) tak vápenec s dvojlomem $D \equiv 0.170$ a tvrdostí $T = 3$, mají pro stavbu těchto filtrů své výhody i nevýhody. V poslední době se objevují možnosti použití jiných materiálů jako je například paratellurit (TeO_2) nebo právě sellait (MgF_2), o kterém pojednává tento článek. Dvojlomné filtry jsou vysoce náročné systémy jak na výrobu tak z hlediska fyzikálního. Pro jejich návrh je potřeba znát závislosti dvojlomu a teplotního koeficientu přeladění na vlnové délce použitých materiálů s vyšší přesností než udává odborná literatura. Tento článek se zabývá prvními zkouškami použití MgF_2 pro výrobu dvojlomných filtrů.

Production of birefringent interference-polarization filter of Lyot and Šolc type is mainly realized with crystalline quartz (SiO_2) and calcite ($CaCO_3$). Both materials, crystalline quartz of birefringence $D \equiv 0.009$ and hardness $T = 7$ (according to Mohs) and calcite of birefringence $D \equiv 0.170$ and hardness $T = 3$, have its own pro and con. Nowadays, other materials usage for production appears such as paratellurite (TeO_2) or sellaite (MgF_2). Birefringent filters are sophisticated systems both from mechanical and physical point of view. To design such filters it is necessary to know dependence of birefringence and temperature coefficient as functions of wavelength for used materials with higher precisions than it is possible to find in scientific literature. This paper deals with a first tests using MgF_2 for birefringence filters production.

1. Úvod

Při výrobě dvojlomných interferenčně polarizačních filtrů Lyotova a Šolcova typu se používají především dva materiály: vápenec ($CaCO_3$) a krystalický křemen (SiO_2) [1, 2, 3]. Vápenec s hodnotou dvojlomu přibližně $D \equiv -0.170$ pro vlnovou délku $0.63 \mu m$ se řadí mezi vysoce dvojlomné materiály a při výrobě filtrů bylo této výhody využíváno, protože filtry měli krátkou konstrukční délku. Kvůli snížení dostupnosti materiálu došlo však k velkému nárůstu ceny krystalů z 20 dolarů za 1 kg suroviny na konci 60 let až na dnešních 1000 dolarů za 1 kg. Což je nárůst dosahující 500%! Z tohoto důvodu se při výrobě filtrů přechází k dostupnějším materiálům, které nedosahují takových hodnot dvojlomu jako vápenec, ale jsou finančně dostupnější. Takovým je například krystalický křemen SiO_2 . Cenově dostupnější materiál má však přibližně $20 \times$ menší dvojlom ($D \equiv 0.009$ pro vlnovou délku $0.63 \mu m$) a filtry tedy mají $20 \times$ větší konstrukční délku. Například pro 1 \AA filtr vychází délka křemenného filtru Šolcova typu asi 200 mm. Na druhou stranu požadavky na čistotu krystalu a tolerance opracování nejsou u křemene tak striktní jako u vápence. Přihlédneme-li k tvrdosti materiálu má křemen ($T = 7$ na Mohsově stupnici) oproti vápenci ($T = 3$) výhodu v menší náchylnosti na poškrábání leštěných ploch.

Dalším materiálem, který byl pro výrobu dvojlomného filtru použit je paratellurit (TeO_2) [1]. Dvojlom tohoto materiálu je $D \equiv -0.118$ pro vlnovou délku $0.63 \mu m$, tvrdost paratelluritu je $T = 7$. Bohužel daný materiál je lehce jedovatý a je potřeba tomu přizpůsobit výrobu. S daným materiálem tedy nemáme v naší dílně zkušenosti.

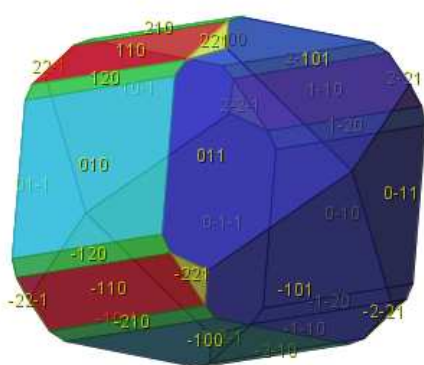
Jiným materiálem, který se využívá v krystalové optice, především k výrobě achromatických a superachromatických vlnových destiček je sellait (MgF_2). Jedná se o jednoosý kladný materiál. Tento materiál s dvojlomem $D \equiv 0.012$ pro vlnovou délku $0.63 \mu m$ a tvrdostí $T = 5$ je cenově dostupný, protože se pěstuje ve velké míře především pro svoji velkou propustnost ($0.2 \mu m - 8 \mu m$). Má tedy o $1/4$ větší dvojlom umožňující kratší konstrukční délku filtru a jeho tvrdost zajišťuje snadnější opracování než u křemene avšak zároveň menší náchylnost na poškrábání než u vápence.

2. Další vlastnosti MgF_2

Při výrobě dvojlomných interferenčně polarizačních filtrů se však musí přihlížet nejen k dvojlomu a tvrdosti materiálu. Mezi další vlastnosti, které je potřeba znát a kontrolovat při výrobě filtru je homogenita materiálu, teplotní závislost dvojlomu, závislost dvojlomu na vlnové délce, krystalickou soustavu, ve které materiál krystalizuje, velikost základní buňky, koeficienty reflexe jednotlivých Millerových rovin a orientace materiálu (krystalografická rovina vůči mechanické rovině; hlavní a vedlejší směry krystalu).

Závislost dvojlomu na vlnové délce $D(\lambda)$ je pro návrh dvojlomných filtrů velmi důležitá, zejména kritická je při návrhu filtru, který je navrhován pro více spektrálních čar [4]. Jelikož se index lomu krystalu mění v závislosti na typu růstu, je vždy nutno materiál z nových zdrojů přeměřit [1]. Jako prvotní zdroj informací o závislosti dvojlomu na vlnové délce posloužila Sellmeierova disperzní rovnice pro MgF_2 z internetových stránek www.cvilaser.com [5], kde však chybí informace o teplotě, pro kterou jsou koeficienty rovnice platné. Při vlastním měření při teplotě 22°C v rozmezí 450 nm až 700 nm byly zjištěny odchylky mezi teoreticky spočtenými hodnotami maxim propustností filtru a měřenými až 5 Å, což poukazuje na rozdílné hodnoty dvojlomu daného rovnicí a skutečného dvojlomu.

Při výrobě vlnových destiček, ze kterých se filtr skládá se používá řezů rovnoběžných s optickou osou, tak aby byl zajištěn maximální fázový posuv paprsků procházejících dvojlomnou destičkou. Pro správnou funkci filtru je rovnoběžnost řezu destičky s optickou osou velmi důležitá. Sesouhlasení mechanické roviny destičky s hlavní rovinou se proto provádí na rentgenovém goniometru [6], který umožňuje toto sesouhlasení v řádu jednotek úhlových minut. Pro využití této metody je zapotřebí znát krystalografickou skupinu ve které MgF_2 krystalizuje, velikost základní krystalické mřížky, Millerovy roviny, které krystal tvoří, reflexe těchto rovin a vlnovou délku rentgenového záření, které pro orientaci využíváme.



Obrázek 3 : Krystal MgF_2 a Millerovy indexy ploch, které tvoří.

Na obrázku 3 vidíme jak vypadá krystal MgF_2 . Optická osa je rovnoběžná s Millerovými rovinami [110], [110], [210] a [010], čehož se při orientaci krystalu využívá. Mechanická rovina destičky se sesouhlasí s jednou z těchto krystalových rovin, které mají své specifické reflexe rentgenového záření. Teoreticky každá z těchto rovin má maximální dvojlom a z hlediska průchodu paprsků jsou rovnocenné, avšak vezmeme-li v úvahu mechanické opracování často se jednotlivé plochy od sebe liší. Například u vápence vyleštit plochu kolmou na optickou osu je vysoce náročné. Proto je důležité orientovat krystal také na dobře opracovatelnou plochu.

Určení hlavního a vedlejšího směru provádíme pomocí Nakamurovy dvojdesky, pomocí které můžeme dosáhnout přesnosti až 1 úhlové minuty.

Další vlastností materiálu, která nesouvisí sice s dvojlomem, avšak určitě stojí též za povšimnutí, je jeho nízký index lomu a vysoké Abbeovo číslo:

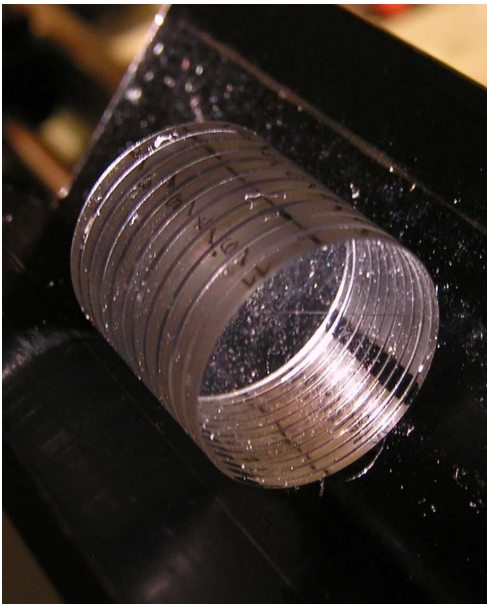
$$n_{Do} = 1.378, v_{Do} = 105.3,$$

$$n_{De} = 1.390, v_{De} = 103.8.$$

Řezy kolmé na optickou osu, které jsou izotropní, by tedy byly velmi vhodné jako součást refrakční optiky.

3. Test MgF_2 na dvojlomném filtru

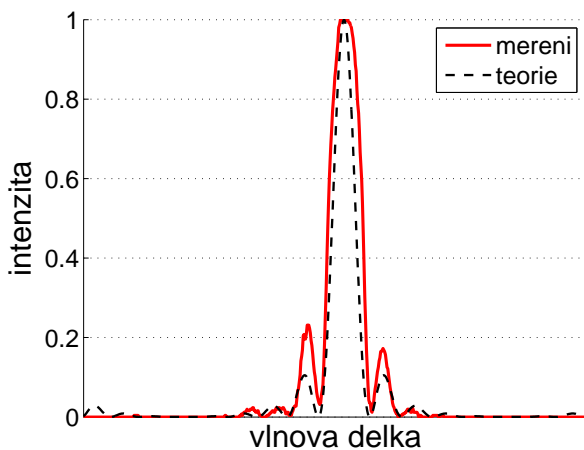
Celkový test MgF_2 byl proveden na dvojlomném interferenčně polarizačním filtru Šolcova typu složeném z 11 destiček o tloušťce 1.8320 mm s obdélníkovitým rozdělením azimutů (viz. Obrázek 4).



Obrázek 4: Dvojlomný interferenčně polarizační filtru Šolcova typu složený z 11 destiček o tloušťce 1.8320 mm s obdélníkovitým rozdělením azimutů.

Tímto způsobem, kdy svazek prochází celým blokem destiček o celkové tloušťce 20 mm je možno otestovat celkovou homogenitu materiálu, teplotní závislost dvojlomu, závislost dvojlomu na vlnové délce a toleranční možnosti orientace krystalu. Šolcův filtr je vysoce náročný systém, ve kterém se projeví všechny nepřesnosti vzniklé při výrobě či vady materiálu.

Na obrázku 5 je znázorněno měření (plnou čarou) vůči teoretickým hodnotám (čárkovaná čára).



Obrázek 5 : Porovnání měřených a teoretických spektrálních závislostí propustnosti filtru skládajícího se z 11 destiček MgF_2 , každá o tloušťce 1.8320 mm, s obdélníkovým azimutálním rozdělením. Celková délka filtru je přibližně 20 mm. Šířka hlavního píku je asi 10 Å na vlnové délce 5500 Å.

Porovnáním obou křivek můžeme vidět, že teorie se shoduje s měřenými hodnotami. Pouze první vedlejší maxima dosahují větších hodnot než předpokládá teorie, což může být zapříčiněno saturací čipu, který snímá spektra. Totéž by vysvětlovalo i mírné rozšíření hlavního maxima měřeného píku vůči teoretickému. V úvahu nebyla též brána možná nelinearita čipu.

Ze symetrie píku je možné usuzovat na orientaci krystalových destiček. Levé první vedlejší maximum je o několik procent vyšší než-li pravé, což je zapříčiněno nedokonalou orientací destiček. Naměřené hodnoty jsou však ve výrobních tolerancích. Pokud by získaný vzorek materiálu obsahoval nehomogenity, nebylo by možné takového měření dosáhnout. Materiál tedy vyhovuje i po této stránce.

Díky sestavenému filtru mohla být změřena též orientační hodnota koeficientu závislosti dvojlomu na teplotě. Výsledky měření jsou zatíženy velkou chybou kvůli nedokonalému vyrovnání teplot a malému rozlišení spektrometru, avšak i tak je naměřený výsledek cenný pro další úvahy. Teplotní koeficient činí

$$TK_{MgF_2} (\text{Å}/1^\circ\text{C}) = -0.53 \cdot 10^{-4} \lambda(\text{Å})$$

4. Závěr

Získané vzorky materiálu MgF_2 splňují všechny požadavky, které jsou potřeba pro výrobu interferenčně polarizačních dvojlomných filtrů: jsou v dostatečné míře homogenní, krystal lze dobře a přesně orientovat na rentgenovém goniometru a na Nakamurově dvojdesce, má dostatečný dvojlom, je teplotně laditelný, navíc je propustný v širokém oboru od 0.2 do 8.0 μm . To umožňuje konstrukci filtrů v rozmezí těchto vlnových délek, což je výjimečné. Další výhodou tohoto materiálu je jeho nízký index lomu, který se blíží indexu lomu parafínových olejů, což umožňuje snížit ztráty vnitřními odrazy a tím především u výkonnějších filtrů zvýšit kontrast. MgF_2 se tedy jeví jako velmi perspektivní materiál nejen pro výrobu fázových achromatických a superachromatických destiček a pro klasickou polarizační optiku, ale také pro výrobu vysoce náročných interferenčně polarizačních dvojlomných filtrů.

Literatura:

- [1] Kustal, G., Skomorovski, V.: Dvochpolosnij i regulirujemyj interferencionno-polarizacionyj filtr na linii HeI i Halpha, *Journal of Optics*, 2000, 6, 99-105
- [2] Title, A., Rosenberg, W.: Research on Spectroscopic Imaging, Lunar and Planetary Programs, *NASA Headquarters*, 1979
- [3] Šolc, I.: Nový typ dvojlomného filtru, *Čs. čas. fyz.*, 1953, 3, 366-376
- [4] Melich, R.: Měření základních materiálových charakteristik propustnosti řetězového filtru, Sborník konference Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Hvězdárna v Úpici, Úpice 2006, 38-51.
- [5] http://www.cvilaser.com/Common/PDFs/Dispersion_Equations.pdf
- [6] Šolc, I., Šrytr, V.: Rentgenový spektrometr pro přesnou orientaci krystalových výbrusů, *Jemná mechanika a optika*, 1960, 2, 43-45.