

Návrh dvojlomného filtru pro čáry HeI a CaII v infračerveném oboru Design of birefringence filter for HeI and CaII line in near IR spectral range

Radek Melich^a, Zbyněk Melich^a, Ivan Šolc^a, Jan Klimeš sr.^b, Jan Klimeš jr.^b

^a Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Oddělení optické diagnostiky, Turnov,
vod@jpp.cas.cz

^b Hvězdárna v Úpici, hvezdarna@obsupice.cz

Abstrakt

Spektrální citlivost dnešních CCD kamer umožňuje snímání i v blízkém infračerveném spektru. Pozorování Slunce v astronomicky zajímavých čarách helia a vápníku v blízkém infračerveném oboru se však doposud v České republice nerealizovaly. Článek se zabývá návrhem dvojlomného polarizačně interferenčního filtru pro vlnové délky 10830 Å (čára HeI) a 8542 Å (čára CaII), který by tyto pozorování umožnil.

Spectral sensitivity of today's CCD chips allows observing in near IR spectral range. Solar observations on astronomically interesting spectral lines of Helium and Calcium in near infra-red region have not yet been done in the Czech Republic. The paper deals with a design of birefringent filter of Šolc type for wavelengths 10830 Å (HeI line) a 8542 Å (CaII line) that would enable such observation.

Úvod

Sluneční fyzika studující různé jevy ve sluneční fotosféře a v chromosféře jako jsou protuberance, skvrny, filameny, erupce, granule a další aktivní oblasti, potřebuje k pozorování těchto jevů využít takové vlnové délky, na které je daný jev nejlépe studovatelný. K tomu slouží právě sluneční filtry. V dnešní době se používají především filtry pro vlnové délky čar jako jsou HeI (10830 Å), CaII (8542 Å), H α (6563 Å), CaIIK (3934 Å) a další [1]. V České republice se provádí pozorování především na posledních dvou zmíněných čarách [2,3]. Dnešní CCD kamery, které se pro pozorování využívají jsou schopny detekovat i vlnové délky v blízkém infračerveném oboru. Teoreticky je možné navrhnout dvojlomný filtr Šolcova typu, který by bez přeladování propouštěl obě vlnové délky zároveň, tedy HeI (10830 Å) i CaII (8542 Å).

Návrh filtru

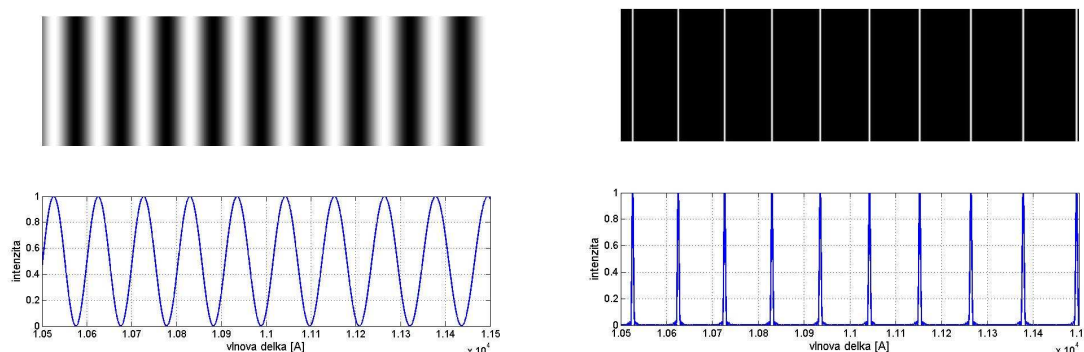
Funkce dvojlomného filtru Šolcova typu je založen na principu interferenčně-polarizačním a popisuje ho jedno ze čtyř Fresnel-Aragových pravidel: „Paprsky, které jsou polarizovány ve směrech k sobě kolmých mohou interferovat, pokud jsou uvedeny do stejného směru a pokud vznikly ze stejného zdroje polarizovaného světla.“ Toto pravidlo je u šolcova filtru zajištěno jeho stavbou. Skládá se ze vstupního polarizátoru, sady dvojlomných destiček a výstupního polarizátoru. Vstupní polarizátor vytváří zdroj polarizovaného světla. Průchodem sadou destiček, které jsou vůči sobě azimutálně pootočený, dojde k rozdělení vstupního paprsku na celkem 2^N fázově posunutých paprsků (N je počet dvojlomných destiček ve filtru). Tyto paprsky jsou poté průchodem výstupním polarizátorem uvedeny do stejného směru a mohou být interferenčně sečteny. Vzniká charakteristické kanálové spektrum Šolcova filtru. Pološifka maxim je inverzně závislá na celkové délce filtru

$$\lambda_{1/2} \propto \frac{1}{N \cdot d \cdot D},$$

tzn. čím je filtr delší, tím získáme užší maxima. Vzdálenost jednotlivých maxim je naopak inverzně závislá pouze na tloušťce destičky, ze kterých je filtr složen

$$\lambda_{m-1} - \lambda_m \propto \frac{1}{d \cdot D},$$

tzn. čím je destička silnější, tím jsou jednotlivé maxima blíže k sobě (viz. Obrázek 1)



Obrázek 1 : Na levém obrázku je znázorněna spektrální propustnost jedné destičky mezi polarizátory. Na pravém obrázku je spektrální propustnost Šolcova filtru složeného z 26 stejných destiček. Polohy maxim udaných

tloušťkou destičky/destiček ve filtru je tedy v obou případech stejná. Filtr na pravém obrázku obsahuje však více destiček a proto jsou maxima užší.

Při návrhu filtru potřebujeme znát základní materiálovou charakteristiku, čímž je jednotková tloušťka M . Ta je závislá jednak na vlnové délce uvažovaného světla λ , a také na teplotě materiálu T . Pro křemen a výrobní teplotu 22°C můžeme uvažovat [5]

$$M(\lambda) = 119.27 \cdot \lambda + 5 \cdot \log_{10}(\lambda - 0.15) + \left(0.5 \cdot \lambda^{4.5}\right) + \frac{5.85}{1 + 1.6 \cdot \lambda^2} - 7.59.$$

Tloušťka destičky d , která propouští požadovanou vlnovou délku λ , se vypočítá pomocí řádu destičky k (0.5, 1.5, 2.5, ...) a pomocí jednotkové tloušťky materiálu pro danou vlnovou délku $M(\lambda)$

$$d = k \cdot M(\lambda).$$

Oprava tloušťky destičky na teplotu

Při výpočtu, který jsme si právě uvedli je zapotřebí mít na paměti, že jednotková tloušťka je závislá nejen na vlnové délce, ale také na teplotě dvojlomného materiálu, ze kterého je filtr vyroben. Změna propuštěné vlnové délky $\Delta\lambda$ se změnou teploty Δt je přibližně dána vztahem [5]

$$\Delta\lambda = -1 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda \cdot \Delta t.$$

Po tomto započtení nám do výpočtu filtru, který by měl být v provozu ohřátý na teplotu 40°C vstupují vlnové délky, které jsou vůči původním posunuty směrem k delším vlnovým délkám. Pro vlnovou délku čáry HeI (10830 Å) musíme při výpočtech používat hodnotu 10850 Å a pro vlnovou délku čáry CaII (8542 Å) hodnotu 8557.4 Å.

Filtr pro dvě vlnové délky

Protože řetězový filtr je založen na principu, kdy všechny destičky ve filtru mají stejnou tloušťku, musí stejná destička propouštět i další požadovanou vlnovou délku [4]. Označíme jednotkové tloušťky pro požadované vlnové délky $M(\lambda_1)$ a $M(\lambda_2)$. Protože $M(\lambda_1)$ a $M(\lambda_2)$ jsou materiálové konstanty, které jsou dané, to co můžeme měnit, tak abychom dostali destičku, která propouští obě vlnové délky, je řád destičky. Můžeme psát

$$d = k_1 \cdot M(\lambda_1) = k_2 \cdot M(\lambda_2) \quad (1)$$

a tedy

$$k_2 = k_1 \cdot \frac{M(\lambda_1)}{M(\lambda_2)} \quad (2)$$

Při volbě řádu k_1 nám po výpočtu vychází řád k_2 , který by se měl co nejvíce blížit polovině celého čísla. Poté bude splněna rovnice (1) a destička o tloušťce d bude propouštět jak vlnovou délku λ_1 tak λ_2 .

Tabulka 1 udává numerické vyjádření rovnice (2). Řádů, které se hodí pro volbu tloušťky destičky propouštějící obě dvě požadované vlnové délky je několik. k_2 se nejvíce blíží celému číslu pro $k_1 = 3.5, 83.5$ a 90.5 , atd, čemuž odpovídají tloušťky destiček 43.2 μm , 10.3931 mm a 11.2644 mm.

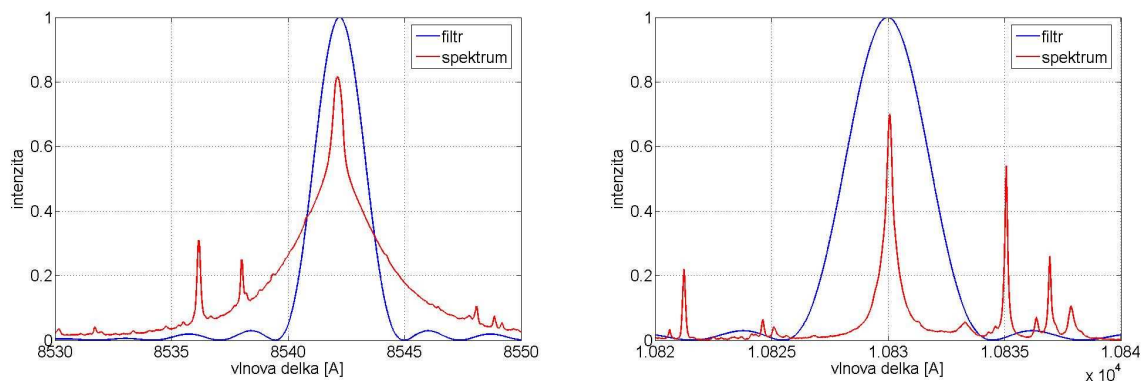
Tabulka 1: Tabulka numerického vyjádření rovnice (2), která vyjadřuje vhodnost tloušťky destičky pro konstrukci dvojlomného filtru propouštějícího dvě vlnové délky. Čím se řád k_2 více blíží polovině celého čísla, tím je použití řádu vhodnější.

k1	k2	k1	k2	k1	k2	k1	k2	k1	k2
0.5	0.64	20.5	26.39	40.5	52.14	60.5	77.89	80.5	103.63
1.5	1.93	21.5	27.68	41.5	53.43	61.5	79.17	81.5	104.92
2.5	3.22	22.5	28.97	42.5	54.71	62.5	80.46	82.5	106.21
3.5	4.51	23.5	30.25	43.5	56.00	63.5	81.75	83.5	107.49
4.5	5.79	24.5	31.54	44.5	57.29	64.5	83.03	84.5	108.78
5.5	7.08	25.5	32.83	45.5	58.57	65.5	84.32	85.5	110.07
6.5	8.37	26.5	34.12	46.5	59.86	66.5	85.61	86.5	111.36
7.5	9.66	27.5	35.40	47.5	61.15	67.5	86.90	87.5	112.64
8.5	10.94	28.5	36.69	48.5	62.44	68.5	88.18	88.5	113.93
9.5	12.23	29.5	37.98	49.5	63.72	69.5	89.47	89.5	115.22
10.5	13.52	30.5	39.26	50.5	65.01	70.5	90.76	90.5	116.51
11.5	14.80	31.5	40.55	51.5	66.30	71.5	92.05	91.5	117.79
12.5	16.09	32.5	41.84	52.5	67.59	72.5	93.33	92.5	119.08
13.5	17.38	33.5	43.13	53.5	68.87	73.5	94.62	93.5	120.37
14.5	18.67	34.5	44.41	54.5	70.16	74.5	95.91	94.5	121.66
15.5	19.95	35.5	45.70	55.5	71.45	75.5	97.20	95.5	122.94
16.5	21.24	36.5	46.99	56.5	72.74	76.5	98.48	96.5	124.23
17.5	22.53	37.5	48.28	57.5	74.02	77.5	99.77	97.5	125.52
18.5	23.82	38.5	49.56	58.5	75.31	78.5	101.06	98.5	126.80
19.5	25.10	39.5	50.85	59.5	76.60	79.5	102.35	99.5	128.09
								100.5	129.38

Z konstrukčních důvodů vyloučíme řád $k_1 = 3.5$ a volíme tloušťku destičky například 11.2644 mm.

Výsledky návrhu

Pro názornost vypočítáme propustnost filtru složeného z 26 křemenných destiček. Na požadovaných vlnových délkách bude mít tedy filtr následující propustnost (viz. obrázek 2)



Obrázek 2: Propustnost filtru složeného z 26 křemenných destiček o tloušťce 11.2644 mm na vlnových délkách spektrálních čar CaII (levý obrázek) a HeI (pravý obrázek).

Pro 26 destičkový filtr vychází pološířka na vlnové délce CaII cca 3 Å a na čáře HeI asi 4 Å. Mechanická délka filtru vychází cca 300 mm. Pološířka filtru na čáře helia je však několikanásobně větší než-li pološířka pozorované čáry. Jedním z řešení tohoto problému by mohlo být například využití krystalického vápence (CaCo3). Využitím jeho velkého dvojlomu, který je cca 20x větší než u křemene, bychom mohli z 10 destiček o tloušťce 5.393 mm vytvořit filtr s pološířkou 2 Å na čáře helia a celkové délce 54 mm. Nevýhodou tohoto materiálu je v dnešní době vysoká cena materiálu. Z 20\$/kg v 60. letech se dnes pohybuje kolem 1000\$/kg.

Materiálové konstanty a další charakteristiky filtru

Návrh filtru pro více vlnových délek v infračerveném oboru se však opírá o materiálové konstanty, které byly s vysokou přesností změřeny pouze ve viditelné oblasti [6]. Pro infračervenou oblast nutnost přesného měření dvojlomu materiálu a teplotní závislosti stále přetrvává.

Další důležitou potřebou je stanovení správné pološifky filtru vůči pozorované vlnové délce. Každá spektrální čára má svou pološifku a propustnost filtru by jí měla být přizpůsobena. Důležitým faktorem je také rychlost a velikost přeladitelnosti filtru pro měření Dopplerovských rychlostí.

Všechny tyto veličiny hrají důležitou roli při jeho využívání a měly by tedy být známy už při jeho návrhu. Při určení všech těchto charakteristik filtru a materiálu, ze kterého je vyroben, už nic nebrání výrobě navrhovaného dvojlomného filtru pro infračervený obor.

Literatura

[1] <http://umbra.nascom.nasa.gov/images/>

[2] <http://www.obsupice.cz/slunce/sun.htm>

[3] <http://www.asu.cas.cz/%7Eesunwatch/index.html>

[4] ŠOLC, I.: Koincidenční řetězové dvojlomné filtry, JMO 1971/6, s. 159-161.

[5] ŠOLC, I.: Disperzní relace dvojlomu křemene a vápence, Jemná mechanika a optika, 1984/2 s. 43-48.

[6] MELICH, R.: Měření základních materiálových charakteristik propustnosti řetězového filtru, Sborník konference Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Hvězdárna v Úpici, Úpice 2006, s.38-51.