

Řetězový filtr pro více astronomicky zajímavých spektrálních čar

Zbyněk Melich, Radek Melich, Pavel Oupický, Ivan Šolc,
Jan Klimeš st., Jan Klimeš ml.

RNDr. Zbyněk Melich, Mgr. Radek Melich, Ing. Pavel Oupický, RNDr. Ivan Šolc, CSc, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálava 89, 511 01 Turnov, tel. 481 322 622, fax. 481 322 913, email: vod@cas.cz
Klimeš Jan st., Klimeš Jan ml., Hvězdárna, U Lipek 160, 542 32 Úpice, tel. 499 882 289, fax. 499 881 289, email: klimes.st@obsupice.cz

K profesionálnímu pozorování chromosféry Slunce se s výhodou používají úzkopásmové dvojlomné řetězové filtry Šolcova typu. Takové filtry jsou zpravidla konstruovány pro jedinou propouštěnou vlnovou délku. Z principu je možné filtr navrhnout tak, že propouští celou řadu úzkých spektrálních čar. Potom předsádkou tvořenou jednoduchým širším filtrem lze vybrat jedinou spektrální čáru. Hlavní filtr se do optimální spektrální propusti ladí nastavením žádané teploty optické soustavy filtru.

V článku je popsán návrh modifikace univerzálního filtru, kde hlavní část je sestavena z 26 křemenných krystalových desek, před který se vkládají hradicí členy. Filtr je navržen pro pozorování v astronomicky zajímavých spektrálních čarách, a to KII, H γ , BaII, H β , D1, D3 a H α .

Šolc birefringent polarizing filter for more spectral lines

Šolc birefringent polarizing narrow - bandpass filters are successfully used for professional observations of solar chromosphere. They are usually constructed to work for only one transmitting wavelength. Principally it is possible to design such filters to transmit more narrow - banded spectral lines. Filter consist of two parts: Frontal part is broad - band filter, with which, required spectral line can be adjusted. Second - main part consists of 26 quartz plates. Filter is designed for observation of Sun in interesting spectral lines: KII, H γ , BaII, H β , D1, D3 and H α .

1. Úvod

Pro pozorování chromosféry Slunce se s výhodou využívá polarizačně-interferenčních filtrů, především s ohledem na jejich vysokou dlouhodobou pracovní stabilitu [1,2]. Takové filtry jsou zpravidla konstruované pouze pro jedinou spektrální čáru, nejčastěji čáru H α , ve které převážná část Slunce vyzářuje. Konstrukce filtrů pro více spektrálních čar [3,4], nebo konstrukce filtru laditelná ve

spektu představuje technologicky podstatně náročnější stavbu filtru, ač teoreticky je řešení takového filtru reálné. V práci [4] je opsána konstrukce filtru typu Lyot, použitá pro současné pozorování v čáře vodíku H α a čáře vápníku na vlnové délce $\lambda=1083.0$ nm. Plně laditelný filtr v celé viditelné spektrální oblasti realizoval Title [5]. Jeho unikátní filtr vedl k tak složité konstrukci, že cena filtru představovala částku milionů dolarů.

K realizaci obdobného plně laditelného filtru bylo přistoupeno i na našem pracovišti v Turnově v roce 1985, avšak tento filtr po odchodu autora řešení Dr. I. Šolce do důchodu již nebyl dokončen.

V minulých letech se podařilo úspěšně zhotovit úzkopásmový filtr pro vápníkovou čáru K II, tedy pro vlnovou délku $\lambda=394.3$ nm o pološířce $\delta\lambda=0.08$ nm [6]. Tento filtr je v současnosti aktivně využíván na hvězdárně v Úpici, pro každodenní patroly celého disku Slunce.

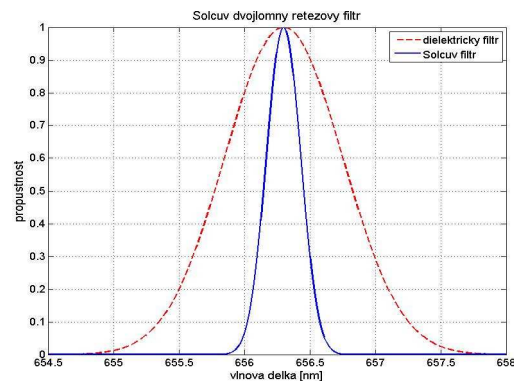
Po konzultacích s pracovníky slunečního oddělení Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově byl jimi vznesen požadavek dodávky několika kusů úzkopásmových filtrů, za předpokladu minimalizace ceny, při zachování špičkové kvality dodávky, s použitím pro profesionální sledování chromosféry. Sada filtrů má být propustná tak, aby se pozorování dala uskutečnit v astronomicky zajímavých spektrálních čarách, a to H α , D1, D2, D3, H β , BaII, H γ , KII a případně i čarách dalších.

Po bližším rozboru bylo shledáno, že řešení je možné využitím aplikace Šolcova řetězového filtru, a to vhodně zvolenou konstrukcí destiček tak, aby uvedené spektrální čáry filtr propouštěl, přičemž by se při pozorování využívala pouze čára jediná, ostatní propusti filtru by byly hrazeny předsádkou. Po rozboru bylo zjištěno, že takové řešení je uskutečnitelné pro řadu astronomicky zajímavých spektrálních čar [7].

2. Schéma řešení filtru

Při vlastním teoretickém návrhu možností stavby filtru bylo konstatováno, že filtr nemůže být realizován jako jednoduchý spektrální člen. Filtr je však možno sestavit z kombinace několika optických prvků, vzájemně závislých.

Vstupním členem bude napařovaný hradicí interferenční filtr, realizovaný klasickou technologií. Z takových filtrů bude sestaven otočný karusel – do optického svazku bude vybrán hradicí filtr s požadovanou propustností. Schéma hrazení je uvedeno na obr 1.

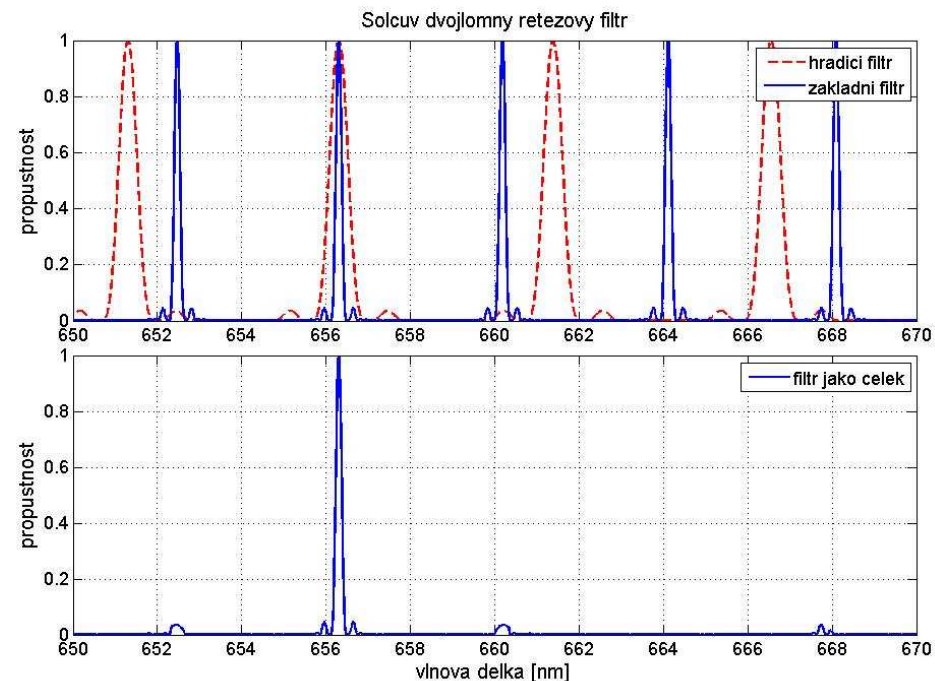


obr. 1 - Schéma hrazení dielektrickým filtrem

Pokud se nepodaří zajistit dostatečně úzkopásmový filtr napařením, je možné předřadný hradicí člen realizovat jako dvojlomný filtr. Takové členy je reálně navrhnut a zhotovit z několika krystalových destiček, jejichž tloušťky budou voleny tak, aby hrazení bylo zajištěno současně nejméně pro dvě spektrální požadované propustnosti hlavního filtru.

Princip je naznačen na obr. 2. Optická tloušťka takových filtrů bude doplněním nekystalického materiálu nastavena na konstantní hodnotu. Z těchto pomocných filtrů opět bude realizován karusel.

Jako vhodnější varianta hrazení je možno použít filtr laditelný sklonem, sestavený z destiček s šikmým řezem v krystalu [8]. Taková předsádka je laditelná v širokém rozmezí prostým nakloněním filtru. Nevýhodou takového řešení je značná výrobní náročnost.



obr. 2 - Princip hrazení dvěma filtry s různou tloušťkou destiček

Za předsádkami bude v optické dráze hlavní filtr. Po rozsáhlých úvahách a na základě dlouholeté zkušenosti s návrhy polarizačně-interferenčních filtrů, byla zvolena za hlavní člen kaskáda 26 ks destiček zhotovených z krystalického křemene.

Základní rovnice pro polohu maxim řetězového filtru 1. modifikace je dána rovnicí:

$$d \cdot D = k \cdot \lambda \quad (1)$$

kde d je tloušťka destiček, D je dvojlom použitého materiálu, k je řád příslušného maxima ($k=0.5, 1.5, 2.5, 3.5$, atd.) a λ je vlnová délka propouštěného maxima. Dosazujeme-li do rovnice (1) hodnotu k postupně stoupající po jedničce, můžeme vypočítat všechna maxima filtru. Při tom nutno respektovat, že D je složitou funkcí vlnové délky λ a též funkcí teploty. Pro zjednodušení je vhodné zavést tzv. jednotkovou tloušťku M výrazem:

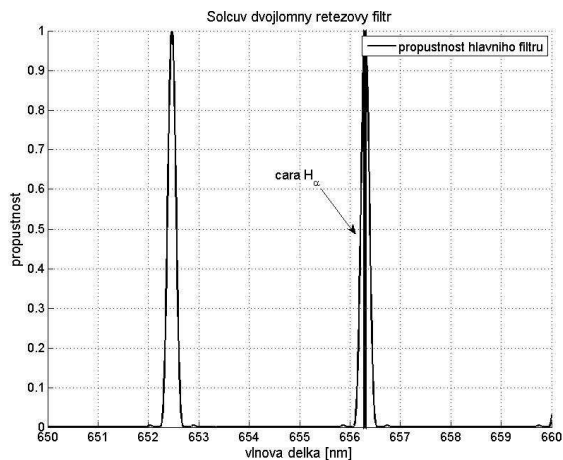
$$M = \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

Spojením rovnic (1) a (2) pak vychází pro tloušťku d destiček:

$$d = k \cdot M \quad (3)$$

Protože vlnová délka λ filtru je závislá na teplotě, závisí na teplotě i hodnota M . Numerickými propočty bylo vybráno několik variant, které zajišťují požadované

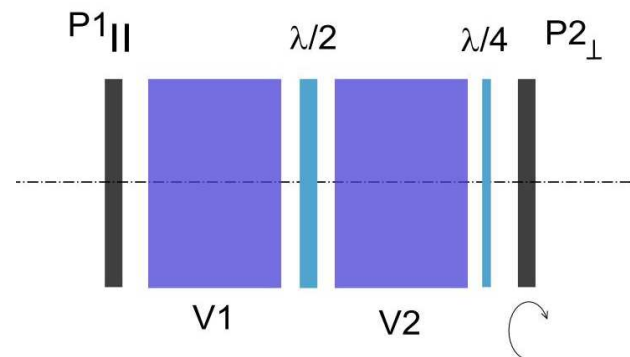
propustnosti filtru poblíž požadovaných spektrálních čar, s předpokladem doladění filtru na přesnou pozici spektrální čáry změnou teploty t filtru. Přitom byl zvolen reálný rozsah použitých teplot (10, 60) °C. Ze získaných několika vhodných variant propustností byly zvoleny destičky o tloušťce $d=11,4000$ mm, mechanického průměru 32 mm, s optickým průměrem 30 mm, takže celý blok hlavního filtru včetně polarizátorů má výslednou mechanickou tloušťku 278 mm. Tato sestava destiček je tmelena imersním olejem, plně propustným v celé využitelné spektrální oblasti. Propustnost hlavního členu filtru v oblasti spektrální čáry $H\alpha$ je uvedena na obr.3.



obr. 3 – Propusti hlavního filtru

Protože navržená soustava má pološířku $\delta\lambda$ propustnosti filtru v oblasti čáry $H\alpha$ o hodnotě cca 0,1 nm, s cílem zmenšení pološířky bude filtr doplněn členem, realizovaným jako další malý filtr Šolcova typu. Ten bude zhotoven z destiček krystalického vápence. Takové řešení vede například při použití 6 kusů destiček s tloušťkou $d=4$ mm k pološířce filtru $\delta\lambda=0.04$ nm v oblasti $H\alpha$.

Též předpokládáme odzkoušení zužující předsádky sestavené jako širokouhlý člen Lyotova typu [9], s předpokladem zúžit propustnost hlavního filtru na hodnotu pološířky $\delta\lambda < 0.05$ nm v oblasti $H\alpha$. Výhodou takového členu je možnost rychlého přeladění propouštěné oblasti v malém, ale zajímavém rozmezí, a to pouhým otáčením výstupního polarizátoru. Reálné přeladění dosahuje hodnoty \pm pološířky $\delta\lambda$ takového členu a umožňuje měření radiálních rychlostí. Řešení Lyotova členu je prakticky použitelné pouze pro dvě vybrané spektrální čáry. To s ohledem na nutnost použití přesných fázových destiček $\lambda/2$ a $\lambda/4$, konstruovaných pro určitou vybranou spektrální čáru a ještě druhou vhodně volenou čáru další. Stavba Lyotovy předsádky je uvedena na obr. 4.



obr. 4 - Schéma širokouhlé předsádky dle Lyota

3. Realizace filtru

Při teoretických propočtech uvedeného návrhu filtru jsme zjistili, že k přesnému návrhu funkce filtru nám schází přesná data dvojlomu D krystalického křemene. Přesné hodnoty disperze, tedy závislosti dvojlomu na vlnové délce, krystalického křemene jsou uvedeny v několika pracích [10,11,12]. Při bližším hodnocení zjistíme, že tyto tabelované hodnoty či disperzní formule nejsou pro navrhovaný výpočet filtru dostatečně přesné. Námí používaný vztah pro vyjádření hodnoty jednotkového dvojlomu M , uvedený v práci [12], představuje nejpřesnější známá data. Tento vztah však má přesnost o řád nižší, než je zapotřebí pro návrh filtru s definicí vlnové délky na setinu nanometru. Proto bylo přistoupeno ke zpřesnění disperzních vztahů – o této problematice bude referováno v dalším příspěvku. Pro zajištění práce filtru v několika spektrálních čarách se hlavní filtr bude přeladovat pomocí nastavení určité teploty. Pro tuto závislost lze psát vztah:

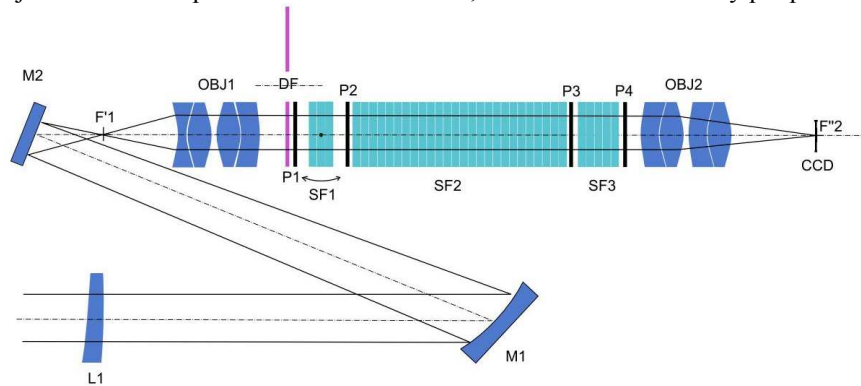
$$\lambda_t = \lambda + \lambda * 1E-5 * (5.5 * \log(\lambda-0.12) + 12.3) * (t-22) \quad (4)$$

kde λ_t je vlnová délka [μm] při teplotě t vyjádřená ve stupních Celsia, přičemž vlnová délka λ při 22 °C je též uvedena v rozměru μm . Bude provedeno prověření uvedeného vztahu v oblasti uvažovaných vlnových délek funkce filtru a případně zpřesněno novým měřením této závislosti, která je důležitým základním parametrem pro sestavení algoritmu ladění filtru.

Pro praktické nastavení požadované teploty bude použit speciální termostat, využívající jak ohřívání tak ochlazování. K vytápění pouzdra s filtrem bude použito osvědčené metody odporového topení, ochlazování pouzdra bude zajištěno pomocí Peltierho článků. Bylo realizováno pokusné pouzdro filtru, které zajišťuje změnu teploty o 10° C v průběhu 2 minut, to pro rozsah teplot 10° až 60° C. Na pouzdru je modelováno tepelné rozložení a prakticky zjišťována problematika odstranění rosení rychle ochlazovaných dílů.

K zobrazení Slunce je nutné použít kvalitní objektiv, který zajistí dostatečné rozlišení pozorovaných detailů chromosféry. Kvalita pozorování je omezena atmosférickými podmínkami, seengem, který v ČR nabývá hodnoty jednotek

úhlových sekund. Jen výjimečně, na dobrých pozorovacích stanovištích, bývá pod 1 sekundu. K zajištění vysokého stupně achromazie bylo zvoleno atypické řešení objektivu - katadioptrická mimoosa soustava, o které bude samostatný příspěvek.



obr. 5 - Optické schéma chromosférického dalekohledu.

Z výše uvedeného popisu jednotlivých dílů je zřejmé, že filtr jako celek bude poměrně komplikované zařízení jak po optické stránce, tak i z hlediska řešení mechanických pouzder všech dílů, při požadavku zajištění měnitelné stabilizované pracovní teploty. K celému řízení bude proto použit PC, který současně bude využit pro záznam snímaného obrazu z CCD prvku.

4. Závěr

V příspěvku je popsán návrh originálního úzkopásmového dvojlomně-polarizačního filtru konstruovaného tak, aby základní Šolcův filtr propouštěl na více astronomicky zajímavých spektrálních čarách, z nichž jedna je vybrána pro pozorování. Stavba filtru pokračuje dle harmonogramu prací - je předpoklad zkušebního provozu základních optických prvků filtru v příštím roce. Naše astronomie tak získá nový přístroj, který pomůže k hlubšímu poznání vlastností Slunce.

Práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cíleného výzkumu AV ČR“, projekt 1SQ100820502.

Literatura:

[1] Yariv A., Jeh P., Optical Waves in Crystals, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003, (překlad: A.Jaryv, P. Jech, Optičeskije volny v kristalch, Mir, Moskva 1987, 616s.

[2] Šolc I. a kol., Dvojlomné krystalové monochromátory jsou stále aktuální, Sborník konference Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Hvězdárna v Úpici, Úpice 1997, s. 163-164.

[3] Šolc I., Dvojlomný filtr pro dvě volitelné vlnové délky, JMO, 21, 1976, s.279-281.

[4] Kuštal G.I., Skomorovskij V.I., Dvochpolosnij i regulirujemyj interferencionno-polarizacionyj filtr na linii HeI i H α , Optičeskij žurnal, Tom67, No.6, June 2000, p. 99-105.

[5] Title A., Rosenberg W., Research on Spectroscopic Imaging, Lunar and Planetary Programs, NASA Headquarters 1979.

[6] Melich Z., Šolc I., Klimeš J., Křivský L., Řetězový filtr pro pozorování chromosféry Slunce v čáře K, JMO, 44, 2003, č.11-12, s. 206-208.

[7] Melich Z., Přihláška podpory projektu cíleného výzkumu AV ČR, projekt 1SQ10085050, AV ČR, Praha 2005.

[8] Melich Z., Klimeš J., Šolc I., Řetězové filtry s šikmým úhlem řezu dvojlomných destiček, Sborník konference Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Hvězdárna v Úpici, Úpice 2005, s.30-36.

[9] Aleksandrovskij K.L., Vinogradova TA., Depman N.P., Tarasčenko V.V., Kvarcovij sirokougolnyj filtr Lio, Optikomechaničeskaja promyšlennost', No.4, 1992, s. 28-31.

[10] Voronkova E.M., Optičeskije matěrialy dlja infrakrasnoj těchniky, Nauka, Moskva 1965.

[11] Dwight E.Gray, American Institute of Physic Hanbook, McGraw-Hill Book Company, New York 1972.

[12] Šolc I., Disperzní relace dvojlomu křemene a vápence, JMO, 25, 1984, č.2, s. 43-48.