

# Řetězový filtr pro více astronomicky zajímavých spektrálních čar

R. Melich, Z. Melich, I. Šolc, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Oddělení optické diagnostiky, Turnov, vod @cas.cz

J. Klimeš sr., Jan Klimeš jr., Hvězdárna v Úpici, hvezdarna @obsupice.cz

## Abstrakt

Je popsáno řešení univerzálního polarizačně-interferenčního dvojlomného filtru Šolcova typu, pracující v několika spektrálních čarách. 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 hradící členy. Filtr je navržen pro pozorování v astronomicky zajímavých spektrálních čarách, a to KII, H $\gamma$ , BaII, H $\beta$ , D1, D3 a H $\alpha$ . K ladění filtru se předpokládá použití termostatu s topením i chlazením křemenných dvojlomných částí filtru. Uvedeny jsou výsledky spektrálních měření sloužící ke zpřesnění dvojlomu krystalického křemene a také parametry speciálního objektivu chromosférického dalekohledu.

## 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 většinou konstruované pouze pro jedinou spektrální propust, nejčastěji čáru H $\alpha$ . Konstrukce filtrů pro více spektrálních čar [3,4], nebo konstrukce filtru laditelného ve spektru představuje technologicky podstatně náročnější stavbu, ač teoreticky je řešení takového filtru reálné. V práci [4] je popsána konstrukce filtru typu Lyot, použitá pro současné pozorování v čáře vodíku H $\alpha$  a čáře vápníku na vlnové délce  $\lambda=1083.0$  nm. Plně laditelný filtr v široké spektrální oblasti realizoval Title. Jeho unikátní filtr [5] však vedl k velmi složité konstrukci.

V minulých letech se podařilo úspěšně zhotovit úzkopásmový filtr pro vlnovou délku  $\lambda=393.4$  nm, tedy vápníkovou čáru K II, 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.

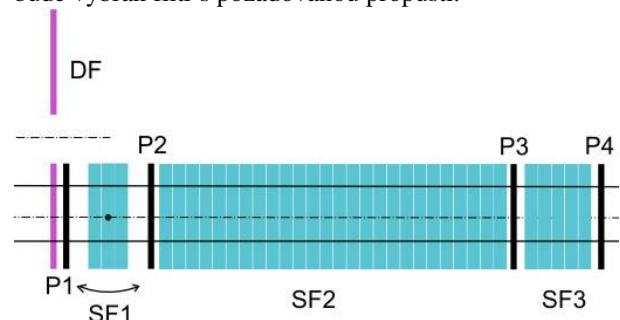
Při jednáních s pracovníky slunečního oddělení Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově byl vnesen požadavek dodávky několika kusů úzkopásmových filtrů, za předpokladu minimalizace ceny, s použitím pro profesionální sledování chromosféry. Sada filtrů by měla umožňovat pozorování v astronomicky zajímavých spektrálních čarách, a to H $\alpha$ , D1, D2, D3, H $\beta$ , BaII, H $\gamma$ , 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 [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 vzájemně závislých optických prvků, jak je uvedeno na obr. 1.

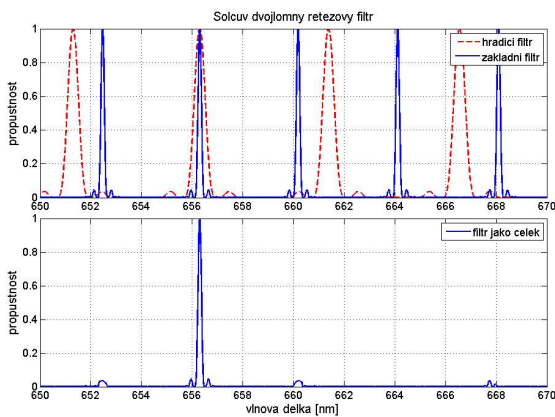
Vstupním členem bude sada napařovaných hradicích interferenčních filtrů, uložených v karuselu, z nichž bude vybrán filtr s požadovanou propustí.



Obrázek 1: Schéma soustavy univerzálního filtru. DF jsou dielektricky napařené filtry uložené v karuselu. SF1 je hradící Šolcův filtr laditelný náklonem. SF2 je hlavní křemenná část filtru a SF3 je dodatečný vápencový člen sloužící k zvýšení výkonnosti filtru.

Pokud se nepodaří realizovat dostatečně úzkopásmový filtr napařením, bude nutné předřadit hradicí člen zhotovit jako dvojlomný filtr. Takové členy je reálné navrhnout 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 odzkoušeno použití filtru laditelný sklonem, sestavený z destiček s šikmým řezem v krystalu [8]. Taková předsádka je laditelná v širokém rozmezí prostým nakloněním filtru.



**Obrázek 2: Princip hrazení dvěma filtry s různou tloušťkou destiček**

Za předsádkami bude v optické dráze vložen hlavní filtr, který byl navržen jako křemenný člen z 26 ks destiček. Návrh filtru, který by pracoval na požadované vlnové délce  $\lambda$ , je vytvářen pomocí vzorce

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

kde  $d$  je tloušťka destičky použité ve filtru,  $D(\lambda, t)$  je dvojlom materiálu destičky závislý na vlnové délce a teplotě a  $k$  je řád destičky (0.5, 1.5, 2.5, ...) [3]. Šolc pomocí vzorce 1. s výhodou zavedl tzv. jednotkovou tloušťku  $M$

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

Je zřejmé, že  $M$  má rozměr délky. Fyzikálně tedy hodnota  $M$  znamená tloušťku dvojlomné destičky vybroušené rovnoběžně s optickou osou krystalu, při níž je dráhový rozdíl ordinární a extraordinární vlny roven právě  $\lambda$ . Filtr tedy bude propouštět požadovanou vlnovou délku právě tehdy pokud tloušťka jeho destiček bude splňovat podmínku

$$d = k \cdot M(\lambda, t), \quad 3.$$

kde  $k = 0.5, 1.5, 2.5, \dots$

Dále pro volbu tloušťky  $d$  jednotlivých destiček filtru platí úměra, kdy čím silnější jsou destičky filtru, tím jsou maxima kanálového spektra dále od sebe. Pološířka maxima je naopak dána celkovou délkou filtru  $\Sigma d$  [1].

Pokud je navrhován Šolcův filtr pro více zajímavých spektrálních čar, například pro  $H_\alpha$  a  $K$  čáru vápníku, postupuje se následovně. Zvoleným vlnovým délkám odpovídají určité hodnoty jednotkové tloušťky

$$\begin{aligned} \lambda_1(H_\alpha) \dots M_1 \\ \lambda_2(K) \dots M_2 \end{aligned} \quad 4.$$

$$M_1 > M_2$$

Protože hledám jednu konkrétní tloušťku destiček, které budou propouštět obě vlnové délky, platí dále

$$\begin{aligned} d &= k_1 \cdot M_1 \\ d &= k_2 \cdot M_2, \end{aligned} \quad 5.$$

$$k_2 > k_1$$

čili

$$k_1 \cdot M_1 = k_2 \cdot M_2. \quad 6.$$

Nyní budu hledat takové celé číslo  $C$ , pro které platí

$$k_2 = k_1 + C. \quad 7.$$

Dosažením vztahu 7. do rovnice 6. dostávám

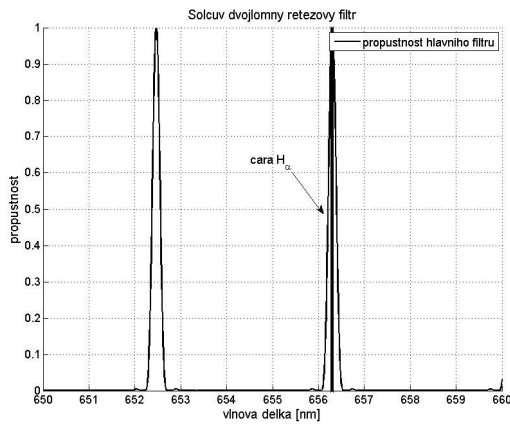
$$\begin{aligned} k_1 \cdot M_1 &= k_1 \cdot M_2 + C \cdot M_2 \\ k_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} &= k_1 + C \end{aligned} \quad 8.$$

$$C = k_1 \left( \frac{M_1}{M_2} - 1 \right)$$

Pokud nyní zvolím takový řád  $k_1$ , že se číslo  $C$  bude co nejvíce blížit celému číslu, dosáhnu toho, že najdu takovou tloušťku destiček, pro kterou vlnová délka  $\lambda_2$  padne blízko maxima propouštěného filtrem. Pro číslo  $C$  celé bude právě v tomto maximu a filtr bude propouštět obě požadované vlnové délky.

Z tohoto příkladu je vidět, že znalost dostatečně přesné disperzní charakteristiky jednotkové tloušťky  $M(\lambda)$  je pro návrh laditelného Šolcova filtru klíčová. Pokud totiž neznáme tuto charakteristiku s dostatečnou přesností může se stát, že zvolíme takovou tloušťku destiček, pro kterou už nebudeme schopni filtr tepelně doladit na vlnovou délku, pro kterou byl filtr původně navrhován.

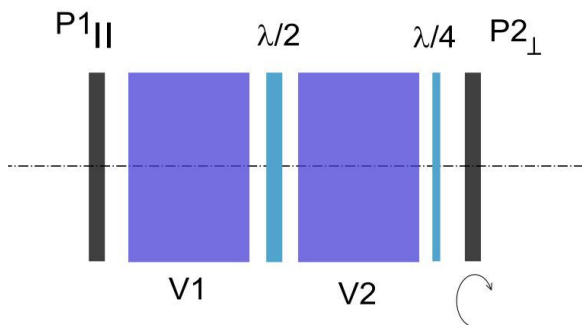
Hodnota  $M$  je také závislá na teplotě. Numerickými propočty bylo vybráno několik variant, které zajišťují požadované propustnosti filtru poblíž požadovaných spektrálních čar, s předpokladem doladění filtru na přesnou pozici spektrální čáry změnou teploty filtru. Přitom byl zvolen reálný rozsah použitých 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.



Obrázek 3: Propusti hlavního filtru

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 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  $H_\alpha$ .

Těž předpokládáme realizaci 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 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.



Obrázek 4: Schéma širokouhlé předsádky dle Lyota

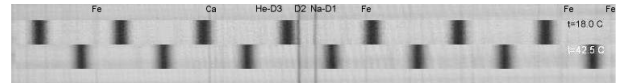
### 3. REALIZACE FILTRU

Při teoretických propočtech návrhu filtru jsme zjistili, že k přesnému návrhu funkce filtru je nutné podstatně zpřesnit údaj dvojlomu  $D$  krystalického křemene. Přesné hodnoty disperze krystalického křemene, tedy

závislosti dvojlomu na vlnové délce, jsou uvedeny v několika pracích [10,11,12]. Námí používaný vztah pro vyjádření hodnoty jednotkového dvojlomu  $M(\lambda)$ , uvedený v práci [12], představuje nejpřesnější známá data. Tento vztah však má přesnost o řád nižší, než je zapotřebí pro návrh univerzálního filtru s definicí vlnové délky na setinu nanometru. Proto bylo přistoupeno ke zpřesnění disperzních vztahů. Byla snímána spektra v oblastech zajímavých spektrálních čar při teplotě 42.5°C (viz. tab. 1 a obr. 5), pomocí kterých byla tato spektra následně okalibrována vlnovou délkou  $\lambda$ .

Tabulka 1: Zaznamenané spektrální oblasti.

čára	vlnová délka [Å]
CaK	3933.682
H $\delta$	4101.748
H $\gamma$	4340.475
H $\beta$	4861.342
Mg2	5172.698
Fe	5328.051
D2	5889.973
H $\alpha$	6562.808



Obrázek 5: Obrazy Slunečního absorpčního spektra v oblasti sodíkového dubletu. První řádek je bez filtru v optickém svazku. Druhý řádek je kanálové spektrum se zařazeným filtrem o teplotě 18°C. Třetí řádek je spektrum s filtrem o teplotě 42.5°C opět s patrnými propustmi, které jsou posunuté kvůli tepelné závislosti dvojlomu křemene. Poslední čtvrtý řádek je opět spektrum bez filtru.

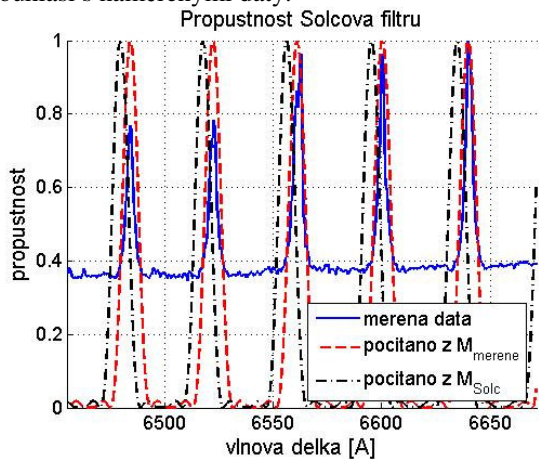
Tímto způsobem mohly být určeny polohy propustí filtru vzhledem k vlnové délce a následně nato určen i disperzní vzorec pro novou jednotkovou tloušťku  $M_{měřená}(\lambda)$ . Byl nalezen polynom 15. stupně ve tvaru:

$$M(\lambda) = a + b\lambda^1 + c\lambda^2 + d\lambda^3 + e\lambda^4 + f\lambda^5 + \\ + g\lambda^6 + h\lambda^7 + i\lambda^8 + j\lambda^9 + k\lambda^{10} + l\lambda^{11} + \\ + m\lambda^{12} + n\lambda^{13} + o\lambda^{14} + p\lambda^{15}$$

kde pro koeficienty platí:

$$\begin{aligned}
 a &= 2.0232945167880762E+07 \\
 b &= -4.2410717546476871E+08 \\
 c &= 3.9534698559061441E+09 \\
 d &= -2.1417992835955055E+10 \\
 e &= 7.3575398569537949E+10 \\
 f &= -1.6210001944087778E+11 \\
 g &= 2.1226874845497870E+11 \\
 h &= -1.0691360621970964E+11 \\
 i &= -1.0871318169114221E+11 \\
 j &= 1.6371732715132364E+11 \\
 k &= 4.3161553294153412E+10 \\
 l &= -1.7954956396291135E+11 \\
 m &= 4.4820243045536146E+09 \\
 n &= 2.0328320903504874E+11 \\
 o &= -1.7153389155836725E+11 \\
 p &= 4.6222194582970963E+10.
 \end{aligned}$$

Výsledky výpočtů jsou graficky znázorněny na obr. 6, kde je uvedena propustnost filtru počítaného pomocí Šolcova disperzního vzorce pro jednotkovou tloušťku  $M_{\text{Solc}}(\lambda)$ , propustnost filtru počítaného z polynomu  $M_{\text{měřená}}(\lambda)$  a měřené propustnosti filtru. Je zřejmé, že zatímco hodnoty vyjádřené pomocí vzorce  $M_{\text{Solc}}(\lambda)$  jsou mírně posunuty směrem ke kratším vlnovým délkám, tak hodnoty  $M_{\text{měřená}}(\lambda)$  vypočtené pomocí polynomu souhlasí s naměřenými daty.



Obrázek 6: Zpřesnění návrhu filtru. Vypočtené polohy propustí filtru za použití  $M_{\text{měřená}}$  se shodují s naměřenými hodnotami.

Pro zajištění práce filtru v několika spektrálních čarách se hlavní filtr bude přeladovat pomocí nastavení vhodné teploty. Pro tuto závislost lze psát vztah [12]:

$$\lambda_t = \lambda + \lambda \cdot 10^{-5} \cdot [5.5 \cdot \log(\lambda - 0.12) + 12.3] \cdot (t - 22), \quad 9,$$

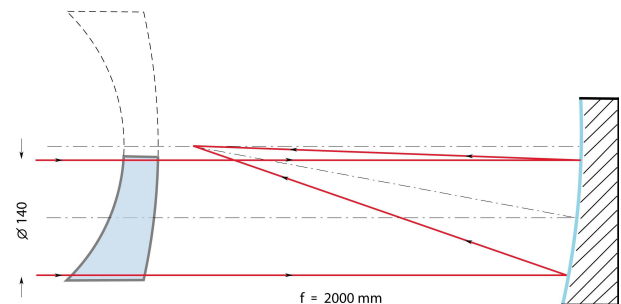
kde  $\lambda_t$  je vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ] při teplotě  $t$  vyjádřená ve stupních Celsia, přičemž vlnová délka  $\lambda$  při 22 °C je též uvedena v rozměru  $\mu\text{m}$ . Bude provedeno prověření uvedeného vztahu v oblasti uvažovaných vlnových délek funkce filtru a případně zpřesněno novým

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.

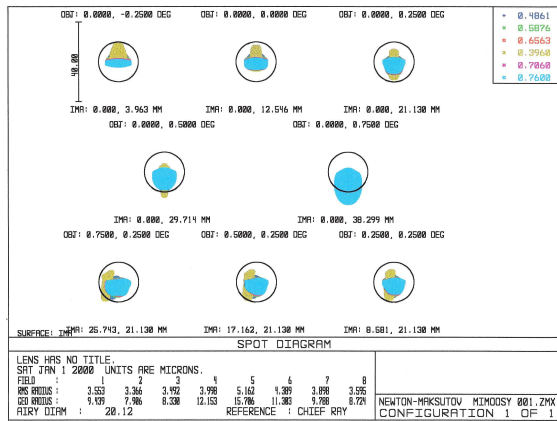
K zobrazení Slunce je nutné použít kvalitní objektiv, který zajistí dostatečné rozlišení pozorovaných detailů chromosféry. Kvalita pozorování je omezena atmosférickými podmínkami, seengem, který v ČR nabývá hodnoty jednotek úhlových sekund. Jen výjimečně, na dobrých pozorovacích stanovištích, bývá pod 1 sekundu. S ohledem na předešlé zkušenosti se stavbou obdobných přístrojů a požadavek zobrazení celého disku Slunce, byl pro objektiv zvolen optický průměr d140 mm a ohnisková vzdálenost f'2000 mm, takže primární obraz Slunce získáme o průměru cca 19 mm. Teoretická rozlišovací schopnost objektivu uvedeného průměru je 0,7 úhlové sekundy.

Při hledání vhodné soustavy objektivu bylo přihlédnuto k nutnosti zajistit co nejmenší chromatickou vadu polohy. Nejlepší výsledky s ohledem na korekce sférochromatické vady, komy a funkce přenosu kontrastu byly získány u varianty mimoosého systému Maksutova (viz. obr. 7).

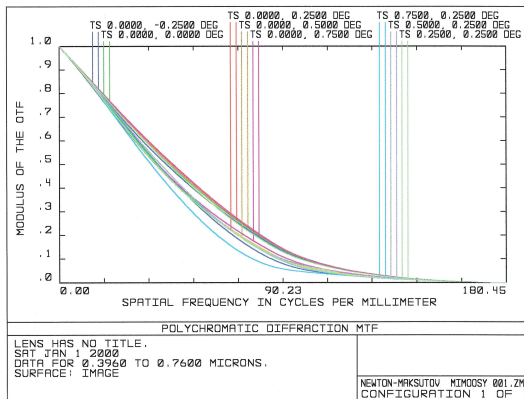


Obrázek 7: Schéma mimoosé Maksutovovy soustavy

Využívá se mimoosé řešení, u kterého nedochází ke stínění primárního zrcadla. Sférochromatická vada našeho objektivu dosahuje pro ohniskovou vzdálenost f'2000 mm hodnotu pouze  $ds'=0,03$  mm, pro spektrální rozsah mezi 380 nm až 760 nm. Z grafu spot diagramů (viz obr. 8) vyplývá, že obrazy v zorném poli velikosti disku Slunce jsou menší než difrakční limit, který je vyjádřen difrakčním kroužkem o průměru 20  $\mu\text{m}$ . To lze též odečíst na grafu přenosové funkce objektivu, kde na ose x je vyjádřena rozlišovací schopnost v čarách na mm a na ose y je vynesena kontrast obrazu (viz. obr. 9).

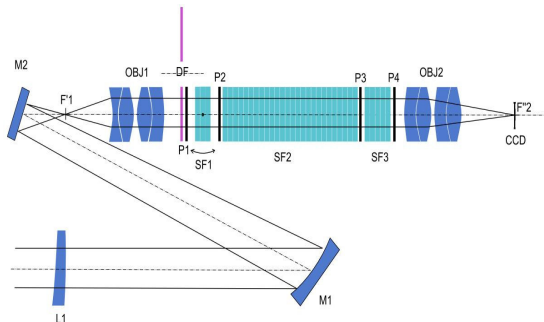


**Obrázek 8: Spot diagramy mimoosé Maksutovovy soustavy. Obrazy jsou v zorném poli velikosti disku Slunce menší než difrakční limit, který je vyjádřen difrakčním kroužkem o průměru 20  $\mu\text{m}$ .**



**Obrázek 9: Přenosová funkce objektivu.**

Soustava chromosférického dalekohledu bude doplněna pomocnými rovinými zrcadly k zalomení optické dráhy do žádaného směru – obr. 10. Optika kolimačního objektivu a zobrazujícího objektivu se v současné době vyvíjí, přičemž komplet zobrazující soustavy, včetně všech členů filtru, bude optimalizována jako celek. Jako snímací člen bude používána CCD kamera od fy SoftHard Technology s.r.o, s 2/3“ čipem SONY ICX285AL. Uvedený čip má rozměr 10.2 mm x 8,3 mm a obsahuje matici 1376 x 1038 pixelů o rozměru 6,5  $\mu\text{m}$  x 6,5  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 10: Optické schéma chromosférického dalekohledu. Členy L1, M1 a M2 tvoří vstupní objektiv, OBJ1 je kolimační objektiv, členy DF, P1, ..., P4, SF1, SF2, SF3 tvoří celek filtru a OBJ2 je zobrazovací objektiv na CCD prvek.**

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 zkušební 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.

#### 5. LITERATURA

- 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.
- Šolc I. a kol., Dvojlomně krystalové monochromátory jsou stále aktuální, Sborník konference Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Hvězdárna v Úpici, Úpice 1997, s. 163-164.
- Šolc I., Dvojlomný filtr pro dvě volitelné vlnové délky, JMO, 21, 1976, s.279-281.
- Kuštal G.I., Skomorovskij V.I., Dvochpolosnij i regulirujemyj interferencionno-polarizacionyj filtr na linii HeI i H $\alpha$ , Optičeskij žurnal, Tom67, No.6, June 2000, p. 99-105.
- Title A., Rosenberg W., Research on Spectroscopic Imaging, Lunar and Planetary Programs, NASA Headquarters 1979.
- 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.
- Melich Z., Přihláška podpory projektu cíleného výzkumu AV ČR, projekt 1SQ10085050, AV ČR, Praha 2005.
- 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.
- Aleksandrovskij K.L., Vinogradova TA., Depman N.P., Tarasčenko V.V., Kvarcovij širokougolnyj filtr Lio, Optikomechaničeskaja promyšlenost', No.4, 1992, s. 28-31.
- Voronkova E.M., Optičeskije matěrialy dlja infrakrasnoj těchniky, Nauka, Moskva 1965.
- Dwight E.Gray, American Institute of Physic Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York 1972.
- Šolc I., Disperzní relace dvojlomu křemene a vápence, JMO, 25, 1984, č.2, s. 43-48.