

Superachromáty složené ze dvou čoček

Článek se zabývá návrhem optických soustav superachromátů, jejichž chromatická aberace je korigována pro několik vlnových délek. Jsou uvedeny vztahy pro výpočet lámavosti a poloměrů křivosti aplanačních a neaplanatických dvoučlenných optických soustav složených z tenkých čoček v dotyku. Výsledky výpočtu vybraných optických systémů jsou uvedeny v tabulkách obsahujících potřebné konstrukční parametry těchto optických systémů.

Klíčová slova: superachromát, optická soustava

1. ÚVOD

Problematické optických soustav, majících co nejlépe korigovanou chromatickou aberaci v co nejširší oblasti vlnových délek, je ve světě dlouhodobě věnována pozornost a na toto téma byla publikována řada prací jako např. [1–35]. Na tomto místě je třeba upozornit na práci M. Herzbergera, který se této problematice podrobně a na obecné úrovni věnoval [1, 8–12] a který také zavedl pojem superachromát [9] jako optickou soustavu s korigovanou chromatickou aberací pro čtyři a více vlnových délek světla. Mikš a Vondřich pak ve své práci [6] zobecnili problematiku superachromatických soustav i na případ hranolových optických soustav, optických soustav okulárů, tříčlenných optických systémů s korigovanou Petzvalovou sumou a na aplanační teleskopické objektivy. Robb ve své práci [16] provedl podrobnou teoretickou analýzu výběru skel vhodných pro dosažení vysokého stupně korekce chromatické aberace pomocí Buchdahlova disperzního vztahu a představil několik příkladů optického návrhu dubletů a tripletů. Rayces a Aguilar ve své práci [17] analyzovali též sférochromatickou aberaci optické soustavy. V obsáhlé práci [19] je pak dále rozpracován Robbův a Raycesův postup užitím multikriteriálních optimalizačních metod.

Cílem tohoto článku je odvodit vztahy, které umožňují jednoduchým způsobem vypočítat konstrukční parametry, tj. poloměry křivosti a materiály jednotlivých čoček dvoučlenných aplanačních superachromátů nebo superachromátů se zadanou hodnotou sférické aberace a komy (neaplanatické soustavy). Takto získané hodnoty konstrukčních parametrů superachromátů je pak možno použít jako startovní parametry pro další optimalizaci pomocí optického návrhového software jako např. OSLO, ZEMAX aj.

2. ANALÝZA SUPERACHROMÁTŮ

Jak je všeobecně známo, závisí index lomu optických materiálů na vlnové délce světla [4]. Zobrazovací vlastnosti optických soustav obsahujících čočky budou tedy také záviset na vlnové délce světla, které jimi prochází. Závislosti zobrazovacích vlastností optických soustav na vlnové délce světla říkáme chromatické aberace optické soustavy [1–5]. Zabýváme se nyní podélnou chromatickou aberací (chromatickou aberací polohy) [1–5]. Při vyšetřování podélné chromatické aberace budeme v první aproximaci předpokládat, že optická soustava transformuje sférickou vlnoplochu příslušející světlu o vlnové délce λ opět na sférickou vlnoplochu (bezaberační optická soustava pro danou vlnovou délku). Transformovaná vlnoplocha však bude mít pro různé vlnové délky λ různý poloměr křivosti a různou polohu svého středu vzhledem k optické soustavě.

Uvažujme soustavu N tenkých čoček v dotyku a předpokládejme, že jednotlivé čočky jsou ve vzduchu a že vzdálenost vstupní pupily od soustavy je rovna nule. Pro lámavost φ této soustavy pak platí [1–6]

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (1)$$

kde $\varphi_i = \varphi_i(\lambda)$ jsou lámavosti jednotlivých čoček optické soustavy a jsou dány vztahem

$$\varphi_i = (n_i - 1) \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_i'} \right) = (n_i - 1) K_i, \quad (2)$$

kde $n_i = n_i(\lambda)$ je index lomu skla čočky, r_i a r_i' jsou poloměry křivosti čočky a λ je vlnová délka světla. Pro zobrazení ve vzduchu pak platí následující zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \varphi, \quad (3)$$

kde s je vzdálenost předmětu od soustavy čoček a s' je vzdálenost obrazu od soustavy čoček. Vliv vlnové délky světla na zobrazení této soustavy čoček získáme diferenciací vztahu (3). Užitím vztahů (1) a (2) dostáváme pro paraxiální podélnou chromatickou aberaci $\delta s'_\lambda = s'(\lambda + d\lambda) - s'(\lambda)$ v obrazovém prostoru následující vztah [1–6]

$$\delta s'_\lambda = m^2 \delta s_\lambda - s'^2 d\varphi = m^2 \delta s_\lambda - s'^2 \sum_{i=1}^N K_i dn_i = m^2 \delta s_\lambda - s'^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i(\lambda_0)}{V_i}, \quad (4)$$

kde jsme označili

$$V_i = \frac{n_i(\lambda_0) - 1}{dn_i} = \frac{n_i(\lambda_0) - 1}{n_i(\lambda + d\lambda) - n_i(\lambda)} \quad (5)$$

a dále pak λ_0 značí vlnovou délku světla, pro kterou určujeme lámavosti φ_i jednotlivých čoček soustavy, $m = m(\lambda_0) = s'(\lambda_0)/s(\lambda_0)$ příčné zvětšení optické soustavy, $d\lambda$ změnu hodnoty vlnové délky světla a $\delta s_\lambda = s(\lambda + d\lambda) - s(\lambda)$ je paraxiální podélná chromatická vada v předmětovém prostoru.

V katalogích optických skel jsou uváděny hodnoty indexu lomu pro určité vlnové délky příslušející určitým spektrálním čarám. Pro viditelnou oblast spektra nejčastěji bereme pro korekci chromatické vady vlnové délky odpovídající Fraunhoferovým spektrálním čarám d , C a F . Označme n_d index lomu skla pro vlnovou délku $\lambda_d = 587$ nm, n_C index lomu skla pro vlnovou délku $\lambda_C = 656$ nm a n_F index lomu skla pro vlnovou délku $\lambda_F = 486$ nm. Abbeovo číslo ν_d a relativní disperze P_λ jsou pak definovány vztahy

$$\nu(\lambda_d) = \nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad P_\lambda = \frac{n_F - n_\lambda}{n_F - n_C}. \quad (6)$$

Položíme-li ve vztahu (4) $\lambda_0 = \lambda_d$, dostáváme

$$\delta s'_\lambda = m^2 \delta s_\lambda - s'^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{V_i} P_{\lambda_i}, \quad (7)$$

kde $\delta s'_\lambda = s'_F - s'_\lambda$, $\delta s_\lambda = s_F - s_\lambda$, $\varphi_i = \varphi_i(\lambda_d)$ a $V_i = V_i(\lambda_d)$. Uvážíme-li, že platí $s' = f'(1 - m)$, kde f' je ohnisková vzdálenost optické soustavy, potom můžeme vztah (7) psát ve tvaru

$$\delta s'_\lambda = m^2 \delta s_\lambda - f'^2 (1 - m)^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{V_i} P_{\lambda_i}. \quad (8)$$

Pro předmět v nekonečnu platí $m = 0$ a vztah (8) má pak tvar

$$\delta s'_\lambda = -f'^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} P_{di} \quad (9)$$

Jak je z (8) patrné, má-li mít optická soustava N tenkých čoček v dotyku odstraněnu chromatickou aberaci ($\delta s'_\lambda = 0$) v oblasti vlnových délek $\lambda \in \langle \lambda_{\min}, \lambda_{\max} \rangle$, potom musí být pro všechny vlnové délky λ z tohoto intervalu splněna podmínka

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i}{v_i} P_{di} = 0. \quad (10)$$

Z (8) plyne, že při splnění podmínky (10) bude soustava stabilně achromatická, tj. bude mít korigovanou chromatickou aberaci pro všechny polohy předmětu. Lámacosti φ_i jednotlivých čoček optické soustavy pak určíme ze vztahů (1) a (10).

Předpokládejme nyní, že chceme minimalizovat chromatickou aberaci pro M dvojic vlnových délek, potom ze vztahů (1) a (10) dostáváme např. pro tříčlennou optickou soustavu následující soustavu rovnic

$$\mathbf{A}\mathbf{f} = \mathbf{b}, \quad (11)$$

kde

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ P_{\lambda_1,1}/v_1 & P_{\lambda_1,2}/v_2 & P_{\lambda_1,3}/v_3 \\ P_{\lambda_2,1}/v_1 & P_{\lambda_2,2}/v_2 & P_{\lambda_2,3}/v_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{\lambda_M,1}/v_1 & P_{\lambda_M,2}/v_2 & P_{\lambda_M,3}/v_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \varphi \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix},$$

kde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$ jsou libovolně zvolené vlnové délky světla. Například můžeme pro $M=5$ volit následující hodnoty vlnových délek: $\lambda_1 = \lambda_c$, $\lambda_2 = \lambda_d$, $\lambda_3 = \lambda_g$, $\lambda_4 = \lambda_h$ a $\lambda_5 = \lambda_r$, pro které jsou v katalozích optických skel udány hodnoty jejich indexů lomu. Řešení soustavy lineárních algebraických rovnic (11) pak získáme metodou nejmenších čtverců

$$\bar{\mathbf{f}} = \mathbf{X}\mathbf{A}^T \mathbf{b}, \quad (12)$$

kde \mathbf{A}^T značí transponovanou matici a $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$. Zbytkové hodnoty podélné chromatické aberace pak získáme dosazením vztahu (12) do vztahu (11)

$$\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X}\mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (13)$$

Řešení ve tvaru (12) však nemůže přesně splňovat podmínku (1) na celkovou lámavost optické soustavy. Chceme-li tedy přesně zachovat celkovou lámavost soustavy, musíme řešit soustavu rovnic

$$\mathbf{A}\mathbf{f} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{C}\mathbf{f} = \mathbf{c}, \quad (14)$$

kde $\mathbf{C} = (1, 1, 1)$ a $\mathbf{c} = (\varphi)$. Užitím metody Lagrangeových součinitelů pak řešení soustavy rovnic (14) má tvar

$$\hat{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{f}} - \mathbf{X}\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{X}\mathbf{C}^T)^{-1}(\mathbf{C}\bar{\mathbf{f}} - \mathbf{c}). \quad (15)$$

Řešení dané vztahem (15) minimalizuje zbytkovou chromatickou aberaci optické soustavy a přesně splňuje podmínku (1) pro celkovou lámavost φ optické soustavy.

Z praktického hlediska však není striktní dodržení podmínky (10) nutné, postačí, když zbytková chromatická aberace nepřekročí přípustnou hodnotu T tolerance zbytkové podélné chromatické aberace. Jak je známo z teorie optického zobrazení, můžeme optickou soustavu považovat za přibližně rovnocennou fyzikálně dokonalé optické soustavě, bude-li splněno *Rayleighovo kritérium*. Pokud je zbytková vlnová aberace ΔW optické soustavy pro všechny body předmětu

a všechny vlnové délky λ světla menší než čtvrtina vlnové délky světla, tj. $\Delta W < \lambda/4$, potom se zobrazení reálné optické soustavy prakticky příliš neliší od zobrazení fyzikálně dokonalé optické soustavy pro tuto vlnovou délku světla.

Zbytková vlnová aberace ΔW_λ , vzniklá v důsledku zbytkové podélné chromatické aberace $\Delta s'_\lambda$, je dána vztahem [3]

$$\Delta W_\lambda = \frac{\Delta s'_\lambda}{8F^2} < \frac{\lambda}{4}, \quad (16)$$

kde $F = F_0(1 - m/m_p)$ je clonové číslo objektivu, $F_0 = f'/D$ je clonové číslo optické soustavy pro předmět nacházející se v nekonečnu, D je průměr vstupní pupily optické soustavy, m je příčné zvětšení optické soustavy a m_p je příčné zvětšení optické soustavy v pupilách. Jak je ze vztahu (16) patrné, musí zbytková podélná chromatická aberace splňovat pro všechny vlnové délky z daného intervalu vlnových délek podmínku

$$\Delta s'_\lambda < 2\lambda F^2. \quad (17)$$

Například pro viditelnou oblast spektra, tj. pro spektrální čáry F a C , dostáváme: $\Delta s'_F < 0,00097 F^2$ a $\Delta s'_C < 0,0013 F^2$.

Pro praxi můžeme tedy vyslovit následující tvrzení: *Nemá-li chromatická aberace polohy příliš zhoršovat kvalitu zobrazení optické soustavy ve vizuální oblasti spektra, musí maximální hodnota zbytkové chromatické aberace polohy $(\Delta s'_\lambda)_{\max}$ splňovat podmínku*

$$(\Delta s'_\lambda)_{\max} < F^2 / 1000, \quad \text{a to pro } \lambda \in \langle \lambda_F, \lambda_C \rangle.$$

Zabýváme se nyní výpočtem parametrů apochromatických a superachromatických objektivů. Předpokládejme nejprve, že objektive je tvořen dubletem, tj. soustavou dvou tenkých čoček v dotyku. Má-li být takováto soustava apochromatická, tj. má-li mít korigovanou chromatickou aberaci pro tři vlnové délky spektra (např. pro spektrální čáry d , C , F), potom, jak plyne ze vztahů (1) a (8), musí být splněny následující podmínky [1–6]

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi, \quad \sum_{i=1}^2 \frac{\varphi_i}{v_i} = 0, \quad \sum_{i=1}^2 \frac{\varphi_i}{v_i} P_{di} = 0, \quad (18)$$

kde $v_i = v_i(\lambda_d)$ je Abbeovo číslo pro Fraunhoferovu čáru d a relativní disperze P_{di} skla i -té čočky je dána vztahem

$$P_d = \frac{n_F - n_d}{n_F - n_C}. \quad (19)$$

Mají-li být vztahy (18) splněny, musí platit $P_{d1} = P_{d2}$, tedy obě skla, z kterých jsou čočky zhotoveny, musí mít stejné relativní disperze. Pro lámavosti čoček pak dostáváme

$$\varphi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} \varphi, \quad \varphi_2 = \varphi - \varphi_1. \quad (20)$$

Jak je z výše uvedeného patrné, požadavek na korekci chromatické aberace umožňuje určit lámavosti jednotlivých čoček objektivu. Požadujeme dále, aby objektiv měl také korigovanou sférickou aberaci a komu (aplanatická optická soustava) nebo aby měl zadanou hodnotu sférické aberace a komu (neaplanatická optická soustava). Při prvním návrhu objektivu se stačí omezit jen na aberace 3. řádu (Seidelovy aberace) pro tenké čočky. Má-li být tedy korigována sférická aberace a koma (aplanatická optická soustava), potom se musí Seidelovy koeficienty S_I pro sférickou aberaci a S_{II} pro komu rovnat nule ($S_I = S_{II} = 0$). Pro Seidelovy koeficienty S_I a S_{II} soustavy N tenkých čoček v dotyku, dostáváme úpravou vztahů uvedených v [3] následující vyjádření

$$S_I = \sum_{i=1}^N a_i \rho_i^2 - 2b_i \rho_i + c_i, S_{II} = \sum_{i=1}^N e_i \rho_i - b_i. \quad (21)$$

Pro dublet je $N=2$ a ostatní veličiny v rovnicích (21) jsou dány vztahy

$$a_i = \frac{n_i + 2}{n_i} \varphi_i, e_i = \frac{n_i + 1}{n_i} \varphi_i, \xi_i = 1/s + \varphi_i/2, \xi_{i+1} = \xi_i + (\varphi_i + \varphi_{i+1})/2, \quad (22)$$

$$b_i = \varphi_i \xi_i, c_i = \left[\frac{n_i \varphi_i}{2(n_i - 1)} \right]^2 \varphi_i, \rho_i = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r'_i} \right) - \xi_i,$$

přičemž s je vzdálenost předmětu, n_i a φ_i značí index lomu skla a lámavost i -té čočky, r_i a r'_i jsou poloměry křivosti jednotlivých čoček objektivu. Známe-li veličiny ρ_i , pak poloměry křivosti r_i a r'_i jednotlivých čoček objektivu vypočítáme z následujících vztahů

$$\frac{1}{r_i} = \rho_i + \xi_i + \frac{\varphi_i}{2(n_i - 1)}, \frac{1}{r'_i} = \rho_i + \xi_i - \frac{\varphi_i}{2(n_i - 1)}, \quad (23)$$

kde veličiny ρ_i získáme řešením rovnic (21)

$$\rho_1^2 - 2\alpha\rho_1 + \beta = 0, \rho_2 = \frac{b_1 + b_2 + S_{II} - e_1\rho_1}{e_2}, \quad (24)$$

kde

$$\alpha = \frac{a_1 e_1 (b_1 + b_2 + S_{II}) + e_2 (b_1 e_2 - b_2 e_1)}{a_1 e_2^2 + a_2 e_1^2}, \quad (25)$$

$$\beta = \frac{a_2 (b_1 + b_2 + S_{II})^2 - 2b_2 e_2 (b_1 + b_2 + S_{II}) + e_2^2 (c_1 + c_2 - S_I)}{a_1 e_2^2 + a_2 e_1^2}.$$

V tab. 1 jsou uvedeny parametry některých superachromatických dubletů vypočítaných pomocí výše uvedených rovnic pro předmět v nekonečnu ($s = \infty$), $S_I = S_{II} = 0$ a $\varphi = 1 \text{ mm}^{-1}$ ($f' = 1 \text{ mm}$). Na tomto místě je třeba poznamenat, že ve všech níže uvedených tabulkách jsou délkové veličiny (není-li uvedeno jinak) vyjádřeny v milimetrech. Vzhledem k tomu, že první rovnice (24) je kvadratická, existují dvě různá řešení této rovnice. V tab. 1 jsou uvedena obě řešení. Vzhledem k tomu, že existuje velké množství řešení, která mají různé aberace vyšších řádů, byly do výpočtu vloženy další podmínky vylučující soustavy s velkými aberacemi vyšších řádů. První podmínkou bylo, aby absolutní hodnoty lámavostí jednotlivých čoček byly co nejmenší a druhá podmínka byla, aby absolutní hodnota nejmenšího poloměru křivosti soustavy byla větší než námi povolená hodnota. Tyto dvě empirické (dlouholetou zkušeností ověřené) podmínky přibližně zaručují, že na jednotlivých plochách optické soustavy nebudou vznikat velké úhly dopadu paprsků na tyto plochy, a tedy nebudou vznikat příliš velké zbytkové aberace. V našem případě jsme volili $|\varphi_{i \max}| < 5$ a $|r_{i \min}, r'_{i \min}| > 0,15 \text{ mm}$. Při výběru vhodných kombinací skel jsme požadovali, aby absolutní hodnota zbytkové chromatické vady polohy byla v celém intervalu vlnových délek světla ($\lambda \in \langle 0,45 \mu\text{m} - 0,70 \mu\text{m} \rangle$) menší než $3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ pro dublety.

Tab. 1 Vybraná skla Schott a poloměry křivosti dubletů, $S_I = S_{II} = 0$ a $\varphi = 1 \text{ mm}^{-1}$

1. řešení

Sklo 1	Sklo 2	r_1	r'_1	r_2	r'_2
N-KZFS2	N-PK51	+0,48306	+0,15936	+0,15861	-33,95875
N-KZFS2	N-PK52A	+0,43399	+0,17237	+0,17038	-13,91779

N-LAK14	N-PK52A	+0,33959	+0,16741	+0,16037	-43,48128
N-LAK34	N-PK51	+0,34008	+0,15976	+0,15299	+15,22724
N-LAK8	N-PK51	+0,35322	+0,16431	+0,15793	+20,42612
N-LAK9	N-PK51	+0,35665	+0,15744	+0,15169	+16,07162

2. řešení

Sklo 1	Sklo 2	r_1	r'_1	r_2	r'_2
N-FK51A	N-KZFS2	+0,59092	-0,25009	-0,25518	-1,33198
N-FK51A	N-LAK21	+0,62716	-0,18119	-0,19179	-0,72925
N-FK51A	N-PSK3	+0,62813	-0,15003	-0,15431	-0,98357
N-FK51A	N-SK16	+0,62582	-0,17919	-0,18854	-0,77774
N-FK51A	N-SK5	+0,62610	-0,17021	-0,17734	-0,85833
N-FK51A	N-ZK7	+0,58677	-0,17398	-0,17514	-1,83301
N-FK51A	P-SK57	+0,61336	-0,18727	-0,19470	-0,94153
N-FK51A	P-SK58A	+0,62516	-0,17130	-0,17846	-0,86320
N-PK51	N-SK4	+0,66858	-0,15553	-0,16070	-0,98229
N-PK51	P-SK60	+0,65784	-0,16380	-0,16905	-1,05186
N-PK52A	N-SK11	+0,62901	-0,15899	-0,16344	-1,05639
N-PK52A	N-SK14	+0,64711	-0,15981	-0,16669	-0,81497
N-PK52A	N-SK16	+0,65021	-0,16219	-0,17013	-0,75859
N-PK52A	N-SK5	+0,64886	-0,15333	-0,15920	-0,84982
N-PK52A	N-ZK7	+0,58703	-0,15787	-0,15827	-2,33350
N-PK52A	P-SK57	+0,63023	-0,17053	-0,17675	-0,94976
N-PK52A	P-SK58A	+0,64747	-0,15443	-0,16034	-0,85567
N-PK52A	P-SK60	+0,62382	-0,18827	-0,19650	-0,91145

V tab. 2 jsou uvedena některá řešení, kde jeden člen dubletu je z CaF₂.

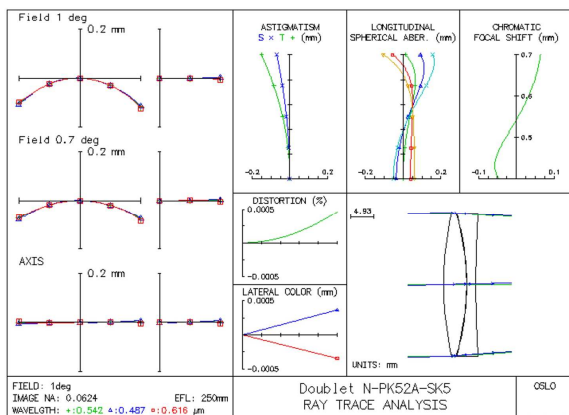
Tab. 2 Vybraná skla Schott a poloměry křivosti dubletů s CaF₂, $S_I = S_{II} = 0$ a $\varphi = 1 \text{ mm}^{-1}$

Sklo 1	Sklo 2	r_1	r'_1	r_2	r'_2
CAF2	K7	+0,55774	-0,22202	-0,22795	-1,00151
CAF2	N-LAK14	+0,55068	-0,27090	-0,29025	-0,68900
CAF2	N-LAK21	+0,56109	-0,22414	-0,24010	-0,66800
CAF2	N-LAK7	+0,55711	-0,23937	-0,25622	-0,68451
CAF2	N-PSK53A	+0,57275	-0,19453	-0,20826	-0,63080
CAF2	N-SK11	+0,56234	-0,21778	-0,22835	-0,79913
CAF2	N-SK14	+0,56273	-0,21952	-0,23298	-0,71687
CAF2	N-SK16	+0,56197	-0,22203	-0,23669	-0,69303
CAF2	P-PK53	+0,57684	-0,17163	-0,17872	-0,78833
CAF2	P-SK57	+0,56024	-0,22879	-0,24119	-0,76919

Na obr. 1, obr. 2 a obr. 3 jsou uvedeny aberace reálných dubletů majících ohniskovou vzdálenost $f' = 250 \text{ mm}$, clonové číslo $F = 8$ a clonové číslo $F = 5$, které byly vypočteny v softwaru OSLO pro oblast vlnových délek z intervalu $\lambda \in \langle 0,45 \mu\text{m} - 0,70 \mu\text{m} \rangle$ a pro předmět ležící v nekonečnu. Graf zbytkové sférochromatické aberace na obrázcích je uveden pro vlnové délky $\lambda = (0,542; 0,487; 0,616; 0,457; 0,684) \mu\text{m}$. Parametry objektivů jsou dány v tab. 3, tab. 4 a tab. 5, kde je také uvedena hodnota polychromatické Strehlovovy definice (Strehl).

Tab. 3 Parametry objektivu

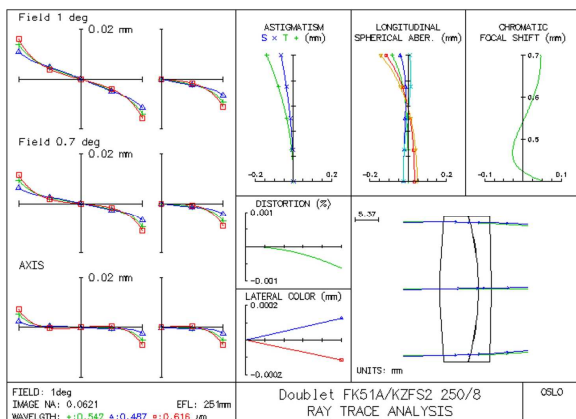
$f' = 250 \text{ mm}, F = 8, \text{Strehl} = 0,970$		
$r \text{ [mm]}$	$d \text{ [mm]}$	sklo Schott
69,237	5,00	N-PK52A
-54,575	0,05	
-55,719	2,00	N-SK5
324,876		



Obr. 1 Aberace objektivu ($f' = 250$ mm, $F = 8$)

Tab. 4 Parametry objektivu

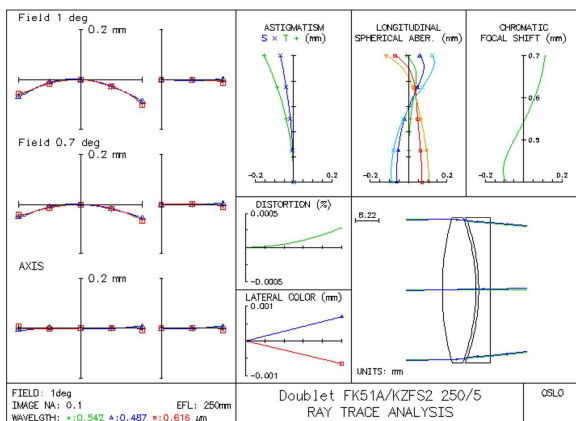
$f' = 250$ mm, $F = 8$, Strehl = 0,986		
r [mm]	d [mm]	sklo Schott
147,730	9,00	N-FK51A
-62,523	0,01	
-63,795	3,00	N-KZFS2
-332,995		



Obr. 2 Aberace objektivu ($f' = 250$ mm, $F = 8$)

Tab. 5 Parametry objektivu

$f' = 250$ mm, $F = 5$, Strehl = 0,87		
r [mm]	d [mm]	sklo Schott
98,402	12,00	N-FK51A
-75,563	1,00	
-74,621	4,00	N-KZFS2
19843,0		



Obr. 3 Aberace objektivu ($f' = 250$ mm, $F = 5$)

3. ZÁVĚR

Byla provedena podrobná teoretická analýza superachromatických dvoučlenných optických soustav složených ze dvou tenkých čoček v dotyku. Na základě této analýzy pak byly nalezeny takové kombinace optických skel, které umožňují dosažení vysokého stupně korekce chromatické aberace polohy. Pro výpočet byla použita skla od firmy Schott. Dále byly na základě teorie aberací 3. řádu odvozeny vztahy pro výpočet poloměrů křivosti superachromatických optických soustav se zadanou hodnotou sférické aberace a komy 3. řádu. Výsledky výpočtu pro vybranou skupinu optických skel jsou uvedeny v příložených tabulkách. Dále je na několika případech předveden výpočet reálných optických soustav složených z čoček konečné tloušťky a jsou určeny konstrukční parametry těchto optických soustav a grafy zbytkových aberací vypočtených pomocí softwaru OSLO. Jak je z uvedených příkladů patrné, polychromatická Strehlova definice je u všech soustav vyšší než 0,8 pro bod na optické ose. Parametry optických soustav uvedené v tabulkách pak mohou sloužit jako vstupní parametry pro další optimalizaci těchto soustav pomocí optických návrhových programů.

Práce byla vypracována za podpory projektu SGS21/092/OHK1/2T/11 Českého vysokého učení technického v Praze.

Literatura

- [1] M. Herzberger: *Modern Geometrical Optics*, Interscience, New York (1958).
- [2] H. Chretien, *Calcul des Combinaisons Optiques* (Masson, Paris, 1980).
- [3] B. Havelka, *Geometrická optika I, II*, NČSAV Praha (1956).
- [4] M. Born, E. Wolf: *Principles of Optics*, Oxford University Press, New York (1964).
- [5] A. Mikš: *Applied optics*, Czech Technical University, Prague (2009).
- [6] A. Mikš, J. Vondřich, „Metodika výpočtu superachromatických soustav I“, *Jemná mechanika a optika* **12**, č. 3, 79–84 (1967).
- [7] A. Mikš, J. Vondřich, „Auswahl der Glaser für ein verkittetes Duplet“, *Optik*, 1968/69, p. 321–327.
- [8] M. Herzberger and H. Jenkins, „Color Correction in Optical Systems and Types of Glass“, *J. Opt. Soc. Am.* **39**, 984–986 (1949).
- [9] M. Herzberger, „Colour correction in optical systems and a new dispersion formula“, *Opt. Acta* **6**, 197–215 (1959).
- [10] M. Herzberger and N. R. McClure, „The design of superachromatic lenses“, *Appl. Opt.* **2**(6), 553–560 (1963).
- [11] M. Herzberger, „Tables of Superachromatic Glasstriplets and their Color Correction“, *Optik* **35**(1), 1–8, 1972.
- [12] M. Herzberger, H. Pulvermacher, „Die Farbfehlerkorrektur von Multipletts“, *Optica Acta* **17**(50), 349–361, 1970.
- [13] R. E. Stephens, „Four-color achromats and superchromats“, *J. Opt. Soc. Am.* **50**, 1016–(1960).
- [14] N. v.d. W. Lessing, „Selection of Optical Glasses in Superachromats“, *Appl. Opt.* **9**, 1665–1668 (1970).
- [15] N. v. d. W. Lessing, „Further Considerations on the Selection of Optical Glasses in Superachromats“, *Appl. Opt.* **9**, 2390–2391 (1970).
- [16] P. N. Robb: Selection of optical glasses. *Proc. SPIE Vol. 554*, 1985, p.60–75.
- [17] J. L. Rayces and M. Rosete-Aguilar, „Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. I. Tolerance conditions for secondary spectrum, spherochromatism, and fifth-order spherical aberration“, *Appl. Opt.* **40**(31), 5663–5676 (2001).
- [18] H. Pulvermacher, „Theorie der Restspektrum von Simpletts“, *Optik* **30** (3), 297–313 (1969).

- [19] B. F. C. de Albuquerque, J. Sasian, F. L. de Sousa, and A. S. Montes, „Method of glass selection for color correction in optical system design,” *Opt. Express* **20**, 13592–13611 (2012).
- [20] A. Mikš, J. Novák, „Method for primary design of superachromats,” *Appl. Opt.* **52**, 6868–6876 (2013).
- [21] T. N. Khatsevich and V. L. Parko, „Algorithm for calculating objective-achromats with separated components for telescopic and collimation systems,” *J. Opt. Technol.* **79**, 395–398 (2012).
- [22] Robert D. Sigler, „Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation,” *Appl. Opt.* **25**, 4311–4320 (1986).
- [23] R. I. Mercado, „Design of apochromats and superachromats,” *Proc.SPIE*, 270–296 (1992).
- [24] H. H. Hopkins and V. V. Rao, „The systematic design of two component objectives,” *Opt. Acta* **17**, 497–514 (1970).
- [25] M. I. Khan, „Cemented triplets: a method for rapid design,” *Opt. Acta* **31**, 873–883 (1984).
- [26] C. H. Chen and S. G. Shiue, „Method of solving a triplet comprising a singlet and a cemented doublet with given primary aberrations,” *J. Mod. Opt.* **45**, 2063–2084 (1998).
- [27] A. Szulc, „Improved solution for the cemented doublet,” *Appl. Opt.* **35**, 3548–3558 (1996).
- [28] M. H. Sussman, „Cemented aplanatic doublets,” *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1185–1186 (1962).
- [29] S. Banerjee and L. Hazra, „Experiments with a genetic algorithm for structural design of cemented doublets with prespecified aberration targets,” *Appl. Opt.* **40**, 6265–6273 (2001).
- [30] M. I. Khan and J. Macdonald, „Cemented doublets, a Method for rapid design,” *Opt. Acta* **29**, 807–822 (1982).
- [31] A. Mikš and J. Novák, „Design of a double-sided telecentric zoom lens,” *Appl. Opt.* **51**, 5928–5935 (2012).
- [32] M. Berek, *Grundlagen der Praktischen Optik* (Walter de Gruyter & Co., 1970).
- [33] A. Mikš, J. Novák, „Method for primary design of superachromats,” *Appl. Opt.* **52**, 6868–6876 (2013).
- [34] A. Mikš, J. Novák, „Superachromatic air-spaced triplet,” *Appl. Opt.* **53**, 6930–6937 (2014).
- [35] J. Sasian, W. Gao, Y. Yan, „Method to design apochromat and superachromat objectives,” *Opt. Eng.* **56**(10) 105106 (2017).

prof. RNDr. Antonín Mikš, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, e-mail: miks@fsv.cvut.cz

prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz

Jedná se o vědecký článek