

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra optiky



Konstrukce refraktivních pozorovacích objektivů pro pásmo LWIR

Diplomová práce

Bc. Dominik Špilák

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Vedoucí práce: RNDr. Vladimír Chlup

Olomouc 2016

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne s podporou školiteľa RNDr. Vladimíra Chlupa a použitím literatúry citovanej v závere práce.

V Olomouci 15.07.2016

.....

Abstrakt

Návrhy objektívov pre rôzne spektrálne pásma zahŕňajú v sebe určité problémy súvisiace s optickými vlastnosťami ako priepustnosť, disperzia a refrakcia. Práca popisuje optický návrh a postup pri riešení achromatického dubletu a následne tripletu pre pásmo LWIR. Existuje len pár materiálov, ktoré majú dostatočnú spektrálnu priepustnosť vhodnú pre infračervenú optiku. Správnou kombináciou vybraných materiálov a parametrov jednotlivých členov je snaha dosiahnuť fyzikálne dokonalú optickú sústavu, a to s použitím iba refraktívnych sférických šošoviek. Bude overené, že triplet má oproti dubletu pri vyššej svetelnosti lepšiu rozlišovaciu schopnosť. Realizované návrhy konštrukcií boli obmedzené na predmetovú vzdialenosť v nekonečnu, relatívne úzke zorné pole 2 stupne a ohniskovú vzdialenosť 60mm.

Kľúčové slová:

optická konštrukcia, dublet, triplet, Abbeovo číslo, infraoptika, LWIR, priepustnosť

Abstract

The optical design for different spectral bands includes certain issues arising from optical properties such as transmittance, dispersion and refraction. The thesis describes the optical design and method by solving of achromatic doublet and afterwards triplets for LWIR band. There are just several materials usable for the infrared optic of sufficient spectral transmittance. The proper combination of chosen materials and parameters of particular lenses is likely to reach physically perfect assembly using just refractive spherical lenses. The thesis examines the triplet comparing to doublet has a better resolution by a wider aperture. Designed constructions were limited to subject focal distance at infinity, relatively narrow field of view 2degrees and focal length 60mm.

Key words

optical design, doublet, triplet, Abbe number, infraoptic, LWIR, transmittance

Pod'akovanie

Ďakujem RNDr. Vladimírovi Chlupovi. za vedenie diplomovej práce, cenné rady, metodické, ako aj teoretické a praktické pripomienky a pomoc pri simuláciach v programe OSLO.

Obsah

Úvod.....	7
1. Optické spektrum	8
1.1. Spektrálna priepustnosť atmosféry	10
1.2. Optické pásmo LWIR	10
1.3. Kvalitatívne parametre zobrazenia pre rôzne spektrálne pásma	10
2. Prehľad vybraných výrobcov objektívov pre pásmo LWIR.....	15
2.1. Vlastnosti a použitie objektívov v pásme LWIR.....	17
3. Charakteristika materiálových parametrov a materiálov pre pásmo VIS a LWIR ..	18
3.1. Optické parametre materiálov	18
3.1.1. Priepustnosť optických materiálov pre IČ oblasť	21
3.2. Mechanické a termálne parametre optických materiálov	23
3.2.1. Teplotný koeficient indexu lomu	23
3.2.2. Teplotný koeficient dĺžkového predĺženia.....	24
3.2.3. Knoopová tvrdosť.....	24
3.3. Vybrané optické materiály pre infračervenú oblasť LWIR	25
4. Optický návrh dubletu pre pásmo LWIR.....	28
4.1. Optické vady	28
4.2. Návrh tenkej a reálnej šošovky.....	33
4.3. Návrh dubletu pomocou tenkých šošoviek	34
4.4. Konštrukčný návrh achromatického netmeleného dubletu v priestore 3. radu.....	36
5. Optický návrh tripletu pre pásmo LWIR.....	55
6. Záver	69
Zoznam použitej literatúry a zdrojov	70

Úvod

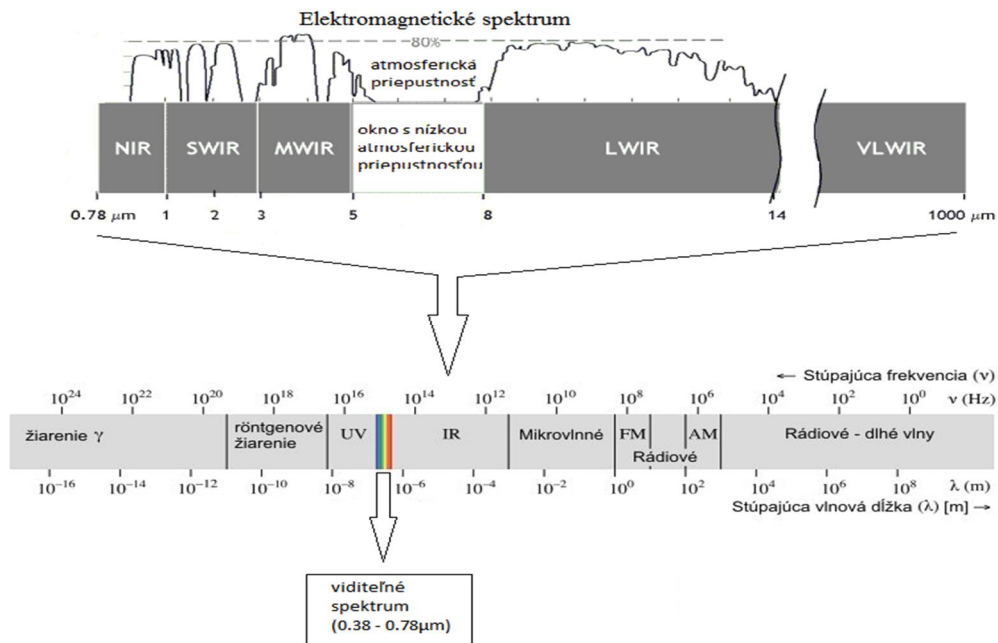
Používanie optických zariadení, pracujúcich v iných častiach spektra ako viditeľné, nachádza už dlhú dobu široké uplatnenie. Praktické aplikácie využívajúce infračervenú oblasť si s rozvojom technológií našli využitie v oblastiach, kde bolo potrebné zobrazovať a zaznamenávať aj iné druhy žiarenia, na ktoré nie je citlivé ľudské oko. Jedným z nich je aj infračervené žiarenie. Všetky predmety v našom okolí vyžarujú tepelné žiarenie, počnúc živými organizmami, až po anorganické objekty. Široké uplatnenie si našli vo vojenských aplikáciách, liečebných procedúrach, astronómii a veľa ďalších vedeckých a technických smeroch.

Táto práca popisuje výber komerčne dostupných objektívov, ktoré pracujú v jednom z pásiem infračervenej oblasti- LWIR pásme. Charakteristika a vlastnosti tejto spektrálnej oblasti sú zmienené v úvodných kapitolách. Ďalej sa bude zaoberať špecifickými parametrami, materiálmi, ktoré sú svojimi vlastnosťami použiteľné na výrobu snímacích a pozorovacích objektívov. Návrhom achromatických dubletov a tripletov v priestore 3. rádu a následne ich optimalizáciou a snahou sa čo najviac priblížiť k fyzikálne dokonalšej sústave.

Navrhované objektívy budú riešené pre ohniskovú vzdialenosť 60mm, clonové číslo 2 a úzke zorné pole FOV(Field of View) 2°, uvažuje sa s pozorovaným predmetom v obrazovej vzdialenosti v nekonečnu. Návrhy tripletov boli riešené taktiež pre ohniskovú vzdialenosť 60mm, úzke zorné pole 2°, ale vyššiu svetelnosť s hodnotou 1.4. Následne bola snaha zistiť pri akom najnižšom clonovom čísle je u vybranej optickej sústavy, pri triplete, možnosť dosiahnuť fyzikálne dokonalú optickú sústavu.

1. Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je súbor viacerých žiarení, ktoré nás obklopujú a líšia sa rôznymi vlnovými dĺžkami (frekvenciami). Podľa vlnovej dĺžky (frekvencie) sa vymedzujú rôzne pásma. Obr.1. So stúpajúcou vlnovou dĺžkou žiarenia, klesá frekvencia a naopak.



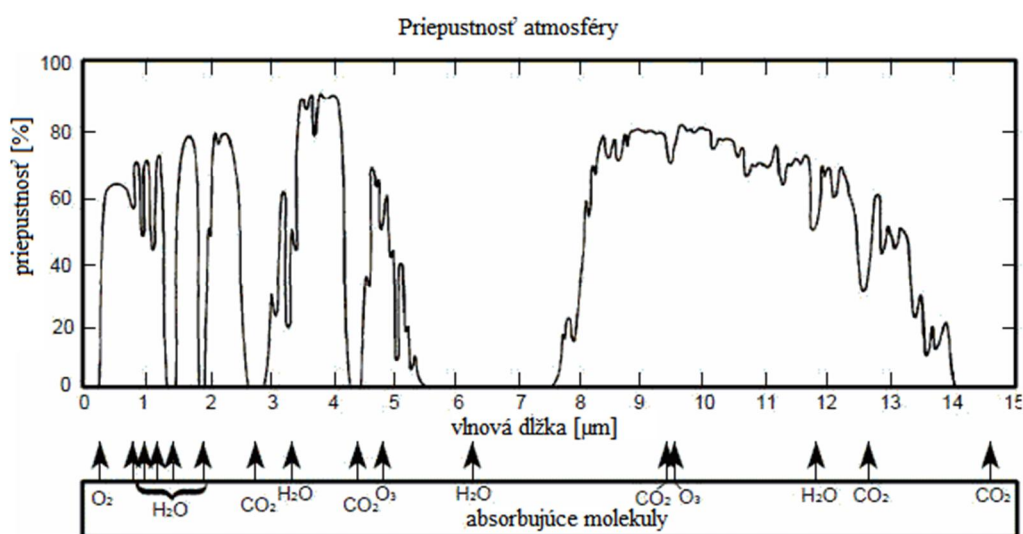
Obr.1. Elektromagnetické spektrum.[2]

Rozdelenie elektromagnetického spektra:

- Rádiové žiarenie $10^3 - 10^4$ m
- Infračervené žiarenie (IR) $10^4 - 7,8 \cdot 10^7$ m
 - VLWIR $\sim 16 \cdot 10^6 - 10^4$ m
 - LWIR $8 \cdot 10^6 - 14 \cdot 10^6$ m
 - MWIR $3 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^6$ m
 - SWIR $10^6 - 3 \cdot 10^6$ m
 - NIR $7,8 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^6$ m
- Viditeľné žiarenie (VIS) $7,8 \cdot 10^7 - 3,8 \cdot 10^7$ m
- Ultrafialové žiarenie (UV) $3,8 \cdot 10^7 - 10^8$ m
- Röntgenové žiarenie $10^8 - 10^{12}$ m
- Gama žiarenie $< 10^{12}$ m

1.1. Spektrálna priepustnosť atmosféry

Atmosféra je plynný obal zemského povrchu. Je zložená zo zmesi plynov, vody vo všetkých skupenstvách a rôznych pevných častíc. Jej hustota s rastúcou výškou od zemského povrchu klesá. Vrchná hranica atmosféry tzv. exosféra siaha približne do výšky 1000 km a tvorí prechod do medziplanetárneho priestoru. Svetelné žiarenie dopadajúce z vesmírnych zdrojov, Slnka, hviezd, vzdialených galaxií je čiastočne pohlcované, rozptýlené zložkami atmosféry. V atmosfére sú oblasti (okná priepustnosti) na (Obr.2), v ktorých je určitá časť spektra svetelného žiarenia priepustná. Priepustnosť atmosféry nie je stála, ovplyvňuje ju koncentrácia plynov, vlhkosť, častičky pevných látok...



Obr.2. Priepustnosť atmosféry.[2]

Na grafe Obr.2. je možné vidieť, že atmosféra neprepúšťa vlnové dĺžky v rozsahu približne od 5,5-7,5μm. V ostatných pásmach priepustnosť atmosféry kolíše. Tento graf platí pre priepustnosť atmosféry do výšky 1.8km, merané 1m nad hladinou mora.

1.2. Optické pásmo LWIR

Slnko vyžaruje taktiež termálnu emisiu, ktorá vzhľadom k teplote jeho povrchu okolo 6000K zahrňuje široké spektrálne pásmo od približne 200nm až po ďalekú infraoblasť. Spektrálne maximum slnečného vyžarovania leží v oblasti 550nm. Ľudské telo vyžaruje taktiež termálne žiarenie, ale vzhľadom k svojej nízkej teplote okolo 310K vyžaruje iba v infraoblasti približne 2μm s maximom vyžarovania okolo 10μm. Vzhľadom k obrovskej vzájomnej vzdialenosti Slnka od Zeme je termálne vyžarovanie Slnka dopadajúce na človeka stojaceho na povrchu zeme v oblasti okolo 10μm oproti žiareniu, ktoré človek v tejto oblasti(10μm) vyžaruje prakticky zanedbateľné.

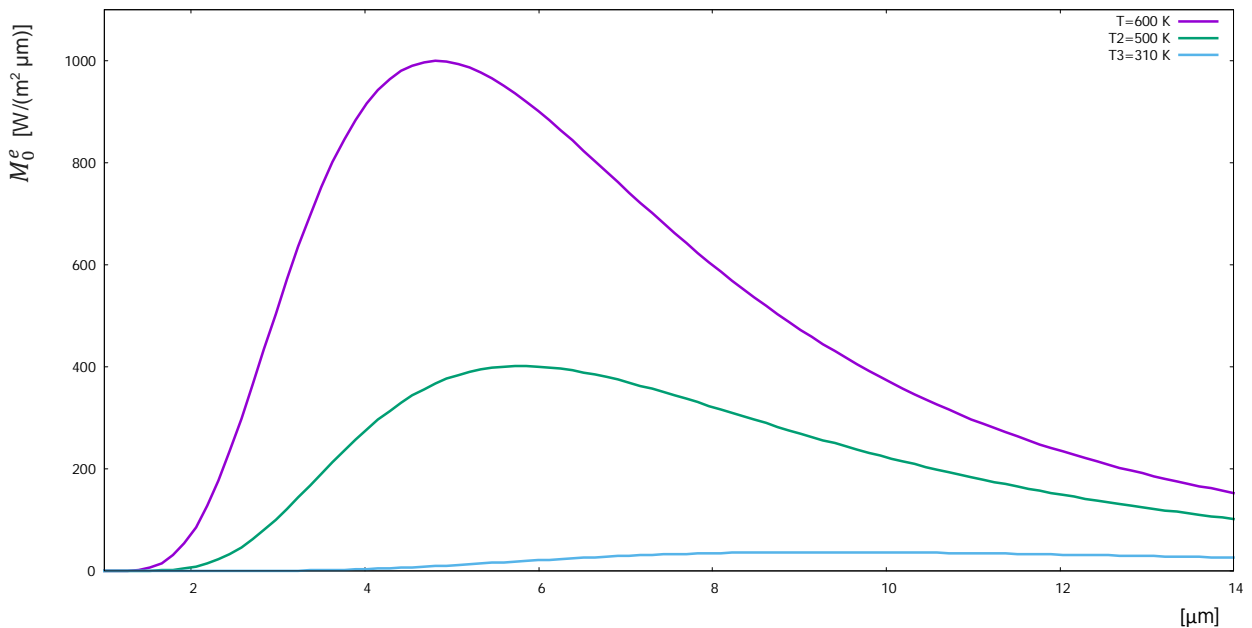
Pásmo LWIR je súčasť IČ spektra a je vymedzené vlnovými dĺžkami 8- 14μm. Dlhovlnné zobrazovacie systémy pracujú v rozsahu 8-14μm, toto je najviac vyžarované pri termálnej emisií. Zobrazovacie LWIR systémy môžu detekovať tepelnú stopu, či už ľudského tela v miestnosti, alebo tepelný únik cez okennú tabuľu skla hoci v úplnej tme. Či už sa jedná o rozpálené predmety, alebo aj zamrznuté telesá ako napríklad ľad.

1.3. Kvalitatívne parametre zobrazenia pre rôzne spektrálne pásma

Priepustnosť elektromagnetického žiarenia atmosférou sa blíži 80%, čo je znázornené na Obr.2. Z Planckového zákona vyžarovania absolútne čierneho telesa(Obr.3.), ktorý je daný vzťahom

$$M_0^e(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\frac{hc}{k\lambda T} - 1}, \quad (1.1)$$

potom k je Boltzmanová konštanta($\approx 1.381 \times 10^{-23}$ J/K), h je Plancková konštanta($\approx 6.626 \times 10^{-34}$ Js), T je absolútna teplota čierneho telesa, c je fázová rýchlosť svetla vo vakuu(2.998×10^8 m/s)[22].



Obr.3. Grafické vyjadrenie Plánkového vyžarovacieho zákona pre rôzne teploty. [17]

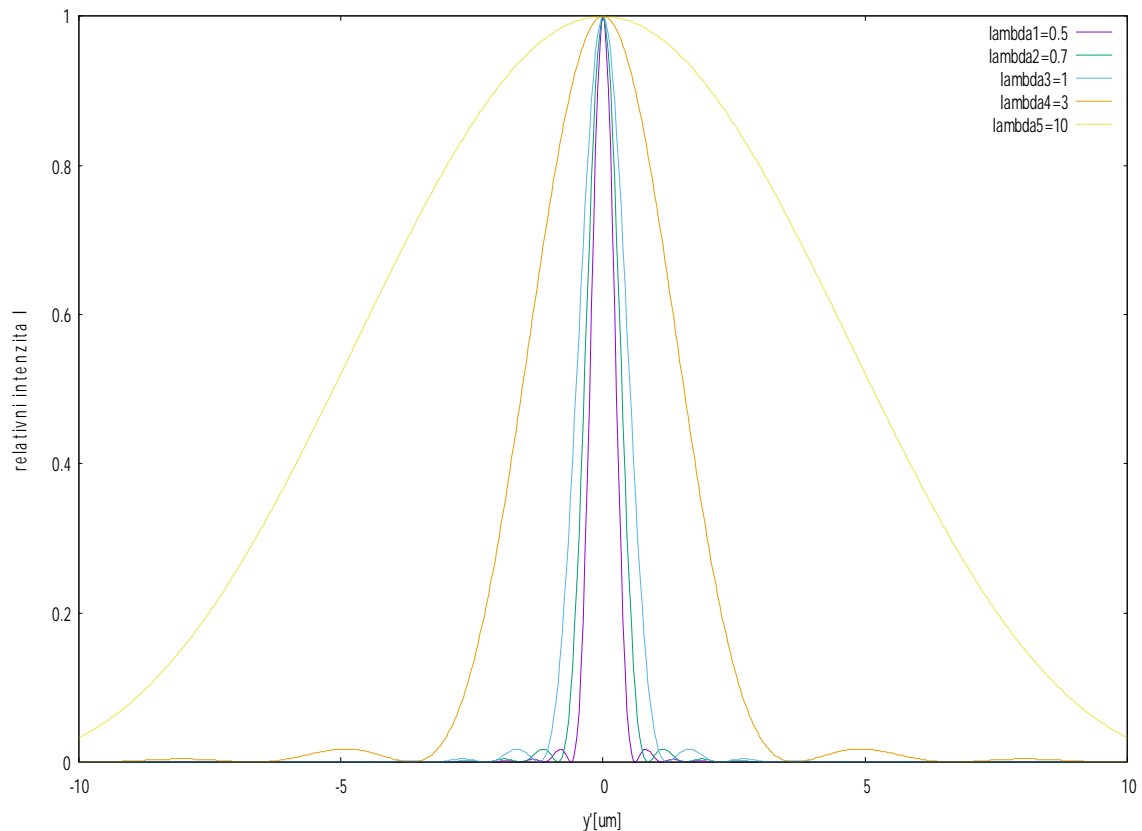
Význam fyzikálne dokonalej optickej sústavy (FDS) je zobrazenie predmetu bez optických vad. Kvalitu zobrazenia limituje len vlnová povaha svetla, ktorá sa prejavuje difrakciou na pupilách a objímkach optického systému. Tá sa prejaví v zníženým kontrastom obrazu. V reálnom prípade sa bod zobrazí ako plôška, tzv. Airyho disk, ktorého intenzitné rozloženie popisuje Besselová funkcia[1]. Intenzita bodu pre kruhovú pupilu s polomerom r je daná rovnicou:

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(\tau)}{\tau} \right]^2, \quad (1.2)$$

I_0 je maximálna intenzita v centre Airyho disku, J_1 je Besselová funkcia, c_A je clonové číslo, τ je normovaná vzdialenosť $(\pi y) / (\lambda c_A)$, potom c_A je dané vzťahom:

$$c_A = \frac{f'}{D}, \quad (1.3)$$

kde f' označuje ohniskovú vzdialenosť a D je veľkosť vstupnej pupily optického systému. Clonové číslo ovplyvňuje svetelnosť optickej sústavy a hĺbku ostrosti. Na Obr.4 je znázornená bodová rozptylová funkcia (PSF). Z jej priebehu je možné vidieť, že bod zobrazený v pásme LWIR má väčšie geometrické rozmery oproti zobrazeniu bodu vo viditeľnej oblasti.



Obr.4. Zobrazenie bodovej rozptylovej funkcie pre rôzne hodnoty lambda a clonové číslo 1.[4]

Pri optickom zobrazovaní dochádza k znižovaniu kontrastu obrazu. Kvalitatívne vlastnosti optických sústav popisuje funkcia prenosu kontrastu –MTF (Modulation Transfer Function). Udáva, s akým kontrastom bude zobrazený predmet a s akým kontrastom budú zobrazené štruktúry s rôznou priestorovou frekvenciou (č/mm- čiary/milimeter).

Zníženie kontrastu má významný vplyv na ostrosť obrazu a rozlišovaciu schopnosť optickej sústavy. Kontrast je vyjadrený ako:

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}, \quad (1.4)$$

kde L_{max} je maximálny jas a L_{min} je minimálny jas.

Funkcia prenosu kontrastu pri zobrazení nekoherentným svetlom s rovnomerne osvetlenou a rovnomerne priepustnou kruhovou pupilou má pre fyzikálne dokonalú sústavu tvar:

$$MTF(\omega) = \frac{2}{\pi}[\arccos\omega - \omega\sqrt{1 - \omega^2}] \quad (1.5)$$

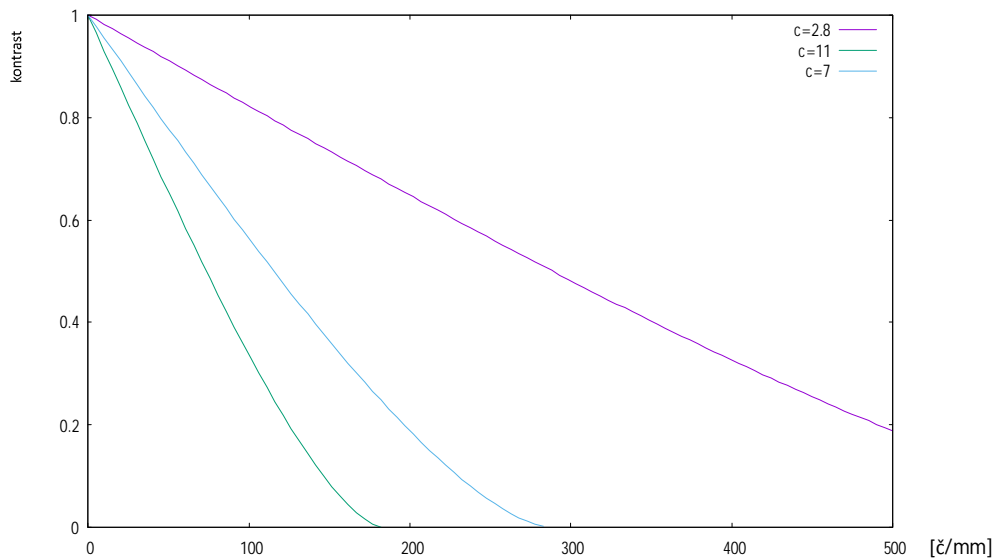
$$\omega = \lambda c_A R', \quad \omega \in \langle 0, 1 \rangle,$$

kde je redukovaná priestorová frekvencia ω a reálna priestorová frekvencia je $R' = \omega / \lambda c_A$

.Hraničná priestorová frekvencia, ktorú je schopná optická sústava preniesť R'_{max} :

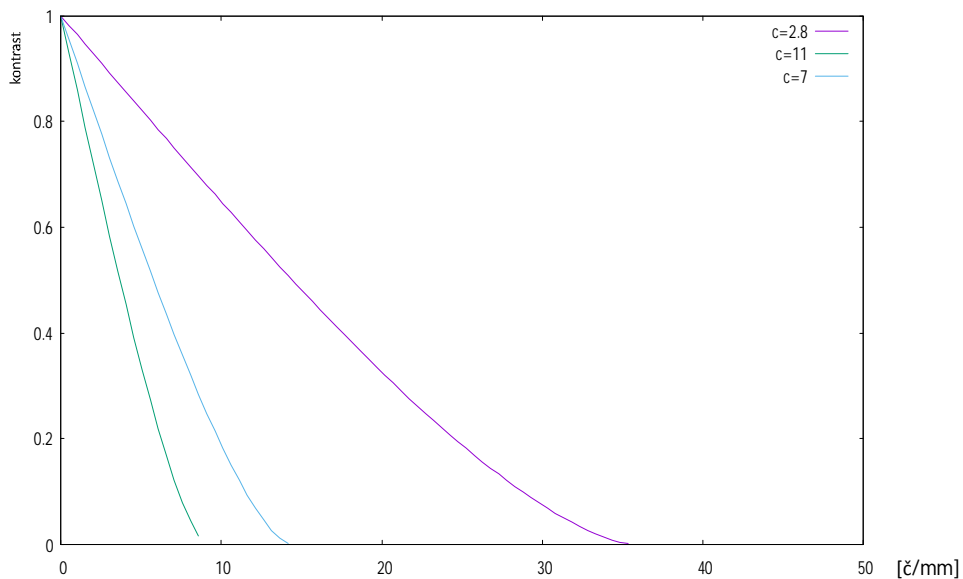
$$1 / \lambda c_A \quad (1.6)$$

Funkcia prenosu kontrastu fyzikálne dokonalej
optickej sústavy pre VIS

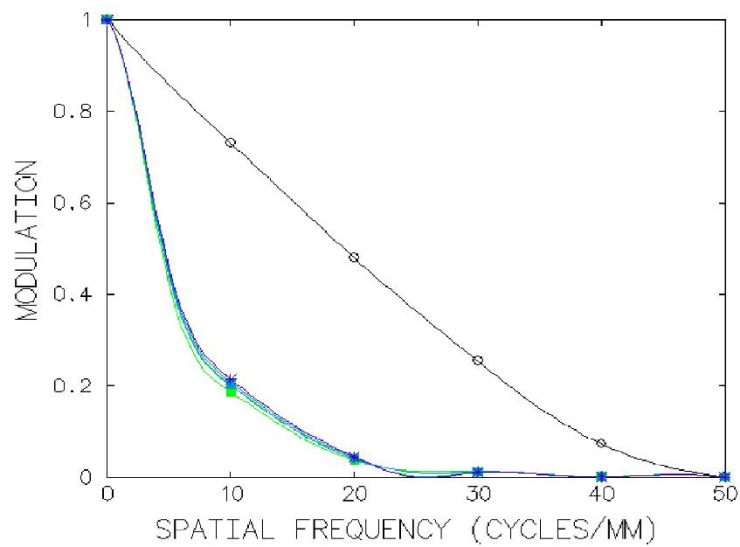


Obr. 5. Funkcie prenosu kontrastu pre vlnovú dĺžku $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ a rôzne clonové čísla.

Funkcia prenosu kontrastu fyzikálne dokonalej
optickej sústavy pre LWIR



Obr. 6. Funkcie prenosu kontrastu pre vlnovú dĺžku $\lambda=10\mu\text{m}$ a rôzne clonové čísla.



Obr.7. Funkcia prenosu kontrastu neoptimalizovaného dubletu pre clonové číslo 2 z programu OSLO.

Porovnaním obrázkov Obr.5 a Obr.6 je zrejmé, že s rastúcou vlnovou dĺžkou a s rastúcim clonovým číslom sa znižuje hraničná priestorová frekvencia, ktorú je možné fyzikálne dokonalou sústavou zobrazit' (vyplýva zo vzťahu 1.6). Na Obr.7. je znázornená čiernou farbou krivka priebehu pre fyzikálne dokonalou optickou sústavou, ostatné krivky znázorňujú priebeh MTF reálnej optickej sústavy - vypočítaného neoptimalizovaného achromatického dubletu Ge+ZnS (pre paraxiálny lúč modrá krivka, tyrkysová pre FOV 1.4° a zelená pre FOV 2°).

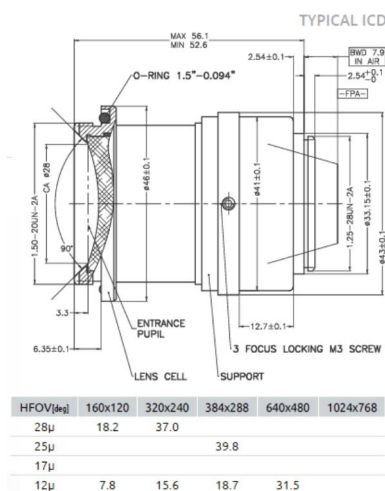
2. Prehľad vybraných výrobcov objektívov pre pásmo LWIR

Ophir Optics

Firma Ophir Optics má vo svojej ponuke veľa typov objektívov, ktoré sa líšia mnohými parametrami Tab.1.

Parameter	Hodnota:
Ohnisková vzdialenosť [mm]	12, 16, 18, 20, 25, 35, 50, 65, 75, 100, 140, 150, 210, 15-60, 15-100, 25-150, 45-135, 60-180, 114-342, 28-225, 30-100,
Clonové číslo	0.85, 1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6,
Typ ostrenia	manuálne, autofocus,
Zorné pole FOV [°]	2°
Rozlíšenie snímača [pix]	160x120, 320x240, 384x288, 640x480, 1024x768
Veľkosť pixelu [µm]	12, 17, 25,28

Tab.1. Prehľad parametrov objektívov firmy Ophir Optics.



Obr. 8. Objektívy pre pásmo LWIR firmy Ophir Optics, zľava technický popis s rozmermi, v strede 3D model a vpravo reálny objektív.[6]

Ďalšou firmou zaoberajúcou sa výrobou objektívov pre pásmo LWIR:

ISPOptics

Parameter:	Hodnoty:
Ohnisková vzdialenosť [mm]	45-135, 150, 19, 25, 35, 50, 60, 23, 19, 16.7, 10.65, 7.7, 5, 10.15, 8.6,
Clonové číslo	0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 4,
Typ ostrenia	Manuálne, fix focus, autofocus,
Zorné pole FOV [°]	30.4°, 27°, 22°, 19°, 12.93°, 20.4°,
Rozlíšenie snímača [pix]	384x288, 640x480, 640x512, 320x256, 256x256,
Veľkosť pixelu [μm]	17, 25, 30, 40,

Tab.2. Prehľad parametrov objektívov firmy ISPOptics.



Obr. 9. Objektívy firmy ISPOptics [7].

Komerčne dostupné objektívy pre pásmo LWIR je možné zakúpiť v rôznych variantoch Tab.1. a Tab.2.. Jedná sa o vysoko svetelné objektívy, preto je možné predpokladať, že tieto objektívy sú zložené z viacerých optických členov. Clonové číslo dosahuje najnižšiu hodnotu 0.85, alebo široké zorné pole 30.4°. Pri konštrukcii vlastných objektívov sa zvyčajne vychádza už z existujúcich optických sústav, preto je dôležité poznať orientačné parametre objektívov iných predajcov. Na trhu sa vyskytujú objektívy mnohých výrobcov a dodavateľov (Elcan Optical systems, Corning NetOptics, Coherent, Thorlabs, Optimum Optical, Telic OST...) , tu sú však spomenutí dvaja najvýznamnejší a s najväčšou ponukou produktov.

2.1. Vlastnosti a použitie objektívov v pásme LWIR

Objektívy navrhnuté pre pásmo LWIR majú viaceré charakteristické vlastnosti, ktoré sú aplikovateľné v rozličných odvetviach. Medzi jedny z významných vlastností je možné spomenúť teplotné vyžarovanie z plochy, čo je využívané pri teplotných zobrazovacích systémoch na meranie teploty objektov. Ďalšie využitie má pri realizácií dvojdimenzionálnych máp relatívnych, alebo aktuálnych teplôt rozmiestnených na meranej scéne.

Pasívne zobrazovanie využívajúce vyžarovanie, ktoré vychádza priamo z objektov na vytváranie teplotného obrazu objektov. Táto vlastnosť sa využíva na tepelné zobrazovanie pri takmer žiadnom externom osvetlení, alebo v podmienkach so slabým osvetlením. To umožňuje vidieť objekty aj v noci. Viditeľnosť niektorých objektov v noci, ako napríklad ľudské telo v pohybujúcom sa vozidle má pre vojenské zameriavanie cieľov dôležitý význam, keďže vozidlo sa svojou teplotou veľmi nelíši od pozadia.

Viditeľnosť cez dym a hmlu: Z dôvodu využívaných vlnových dĺžok, ktoré sú desať až dvadsaťkrát dlhšie ako vlnové dĺžky pre viditeľnú časť spektra, vyžarovanie nadobudne menší rozptyl na časticách v atmosfére. To má za výsledok, že sa rozsah viditeľnosti cez dym a hmlu výrazne zvýši. Táto vlastnosť je čiastočne dôležitá pre rôzne druhy záchranných a hasičských zložiek, ktoré ju využívajú pri prehľadávaní zadymených budov.

Teplotné merania: Veľa priemyselných a vedeckých aplikácií spadajúcich do tejto kategórie, kde je dôležité zistiť presnú teplotu, ako aj podmienky na zabezpečenie presnosti merania, parametrov, ako sú napríklad veľkosť a tvar objektu. Schopnosť rozlíšiť detail je taktiež veľmi dôležitá. [8]

3. Charakteristika materiálových parametrov a materiálov pre pásmo VIS a LWIR

Optickí konštruktéri sú obmedzení materiálmi, ktoré môžu byť použité pri návrhu zobrazovacích systémov v LWIR oblasti. Zatiaľ čo vo viditeľnej oblasti je k dispozícii stovka rôznych materiálov s vysokou rôznorodosťou optických, termálnych a mechanických vlastností. Existuje relatívne málo materiálov, schopných prepúšťať svetlo v LWIR oblasti. Tieto materiály sú často veľmi drahé a málo dostupné v porovnaní s materiálmi používanými pre viditeľné spektrum.

Napriek tomu, že existuje relatívne málo materiálov, je niekoľko vybraných na návrhy LWIR optických systémov. Väčšina materiálov má vyšší index lomu ako sklá pre viditeľnú oblasť, preto na dosiahnutie podobného refrakčného účinku je potrebný menší počet členov. Taktiež difrakčne limitovaná veľkosť bodu a hĺbka ostrosti sú väčšie pre LWIR systémy, z ktorých pomocou konštruktér dosahuje difrakčne limitovaný výkon oveľa jednoduchšie ako so systémami pre viditeľnú oblasť. Niektoré LWIR materiály majú malú disperziu, takže korekcia farebnej vady je jednoduchšia. Ďalšie výhody návrhov v infračervenej oblasti je, že materiály sú opracovateľné diamantom, takže je možné vyrobiť asférické plochy.

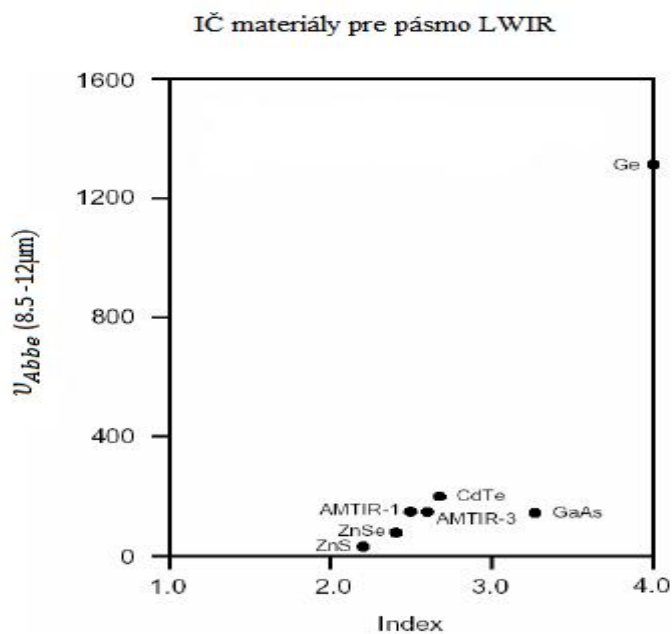
3.1. Optické parametre materiálov

Optické materiály sú látky s kryštalickou, alebo amorfnou vnútornou štruktúrou. Pre aplikácie použiteľné pre rôzne spektrálne oblasti zohráva dôležitú úlohu index lomu a priepustnosť týchto materiálov. Ďalším dôležitým konštrukčným parametrom pri výbere skla je Abbeovo číslo. V grafoch na Obr.10 sú hodnoty indexu lomu a Abbeovho čísla pre materiály používané pre viditeľnú oblasť. Dôležitý krok pre výber skla pre viditeľnú oblasť je jeho použitie. Index lomu n je bezrozmerná veličina a je definovaný ako

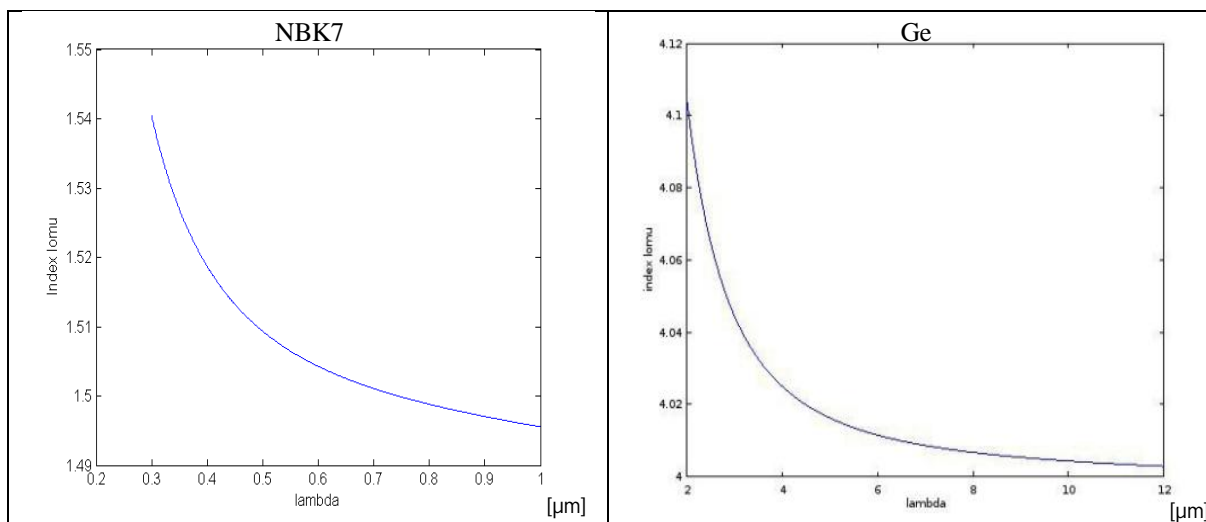
$$n = \frac{c}{v}, \quad (3.1)$$

c je konštanta, ktorá popisuje fázovú rýchlosť svetla šíriaceho sa vo vákuu ($299\,792\,458\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a v je rýchlosť svetla v danom materiáli. Abbeovo číslo je vyjadrené ako

$$v_{Abbe} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad (3.2)$$



Obr. 11. Abbeové diagramy pre vybrané IČ materiály.



Obr.12. Disperzné krivky pre materiály NBK7(vľavo) [11] a Ge(vpravo)[21] vypočítaná zo Sellmeierovho vzťahu.

Disperzia je závislosť fázovej rýchlosti svetelnej vlny na jej frekvencií. Prejavuje sa u všetkých optických materiálov, avšak u optických skiel pre viditeľnú oblasť, ktoré sa vyznačujú nízkym indexom lomu sa prejavuje výraznejšie. Z priebehu disperzných kriviek na Obr.12. je patrné, že disperzia klesá s rastúcou vlnovou dĺžkou lambda. V oblasti LWIR pre materiály s vysokým indexom lomu ako je Germánium preto už disperzia nie je až tak výrazná.

3.1.1. Priepustnosť optických materiálov pre IČ oblasť

Pri prechode svetla prostredím je energia fotónov pohlcovaná, alebo rozptýlená časticami materiálu. Táto energia sa premieňa na iné formy energie. Jedná sa o vlastnosť materiálu, ktorá popisuje množstvo svetla, ktoré prešlo materiálom v pomere k množstvu svetla, ktoré na materiál dopadalo. Optická priepustnosť závisí od viacerých parametrov, ako sú napríklad vlnová dĺžka, chemické zloženie materiálu, uhlu dopadu svetla, indexu lomu, polarizácie, povrchu materiálu.. Bola zavedená bezrozmerná veličina absorbancia(A), nadobúda hodnoty od (0- ∞), transmitancia(T) a reflektivita(R) sa udávajú najčastejšie percentách(0-100%).

$$T = \frac{4n'n}{(n'+n)^2}, \quad (3.4)$$

$$R = \left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2 \quad (3.5)$$

Platí pre kolmý dopad medzi dvoma prostrediami, kde n je index lomu prostredia a n' je index lomu materiálu platia vzťahy:

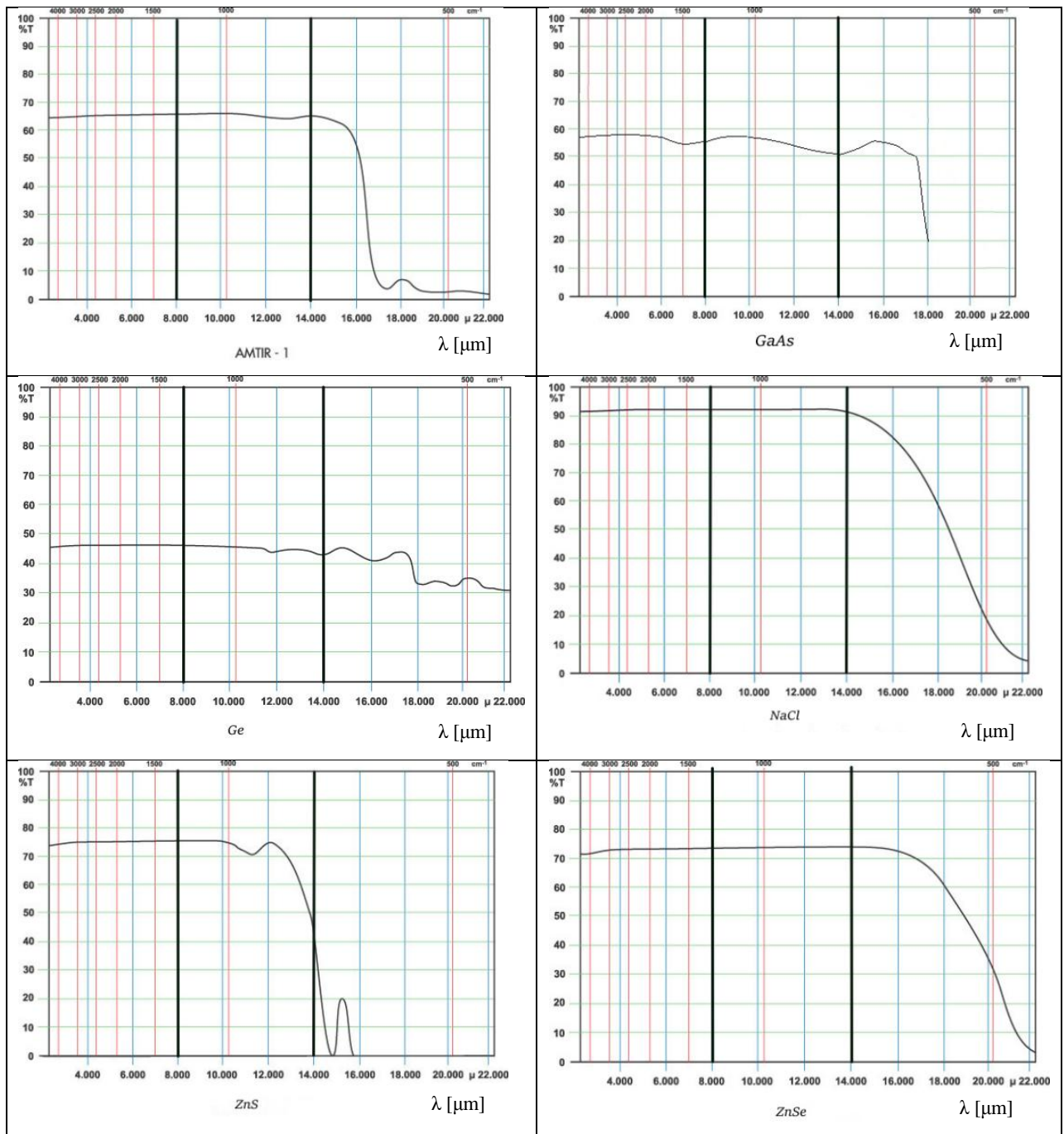
$$A = -\log \frac{\varphi}{\varphi_0} = -\log T, \quad (3.6)$$

$$A + R + T = 1, \quad (3.7)$$

kde φ_0 je vstupný žiarivý tok a φ je výstupný žiarivý tok. Vysoký index lomu optických materiálov spôsobuje vysokú odrazivosť na optických plochách.

Každý optický materiál je schopný prepúšťať žiarenie s určitými vlnovými dĺžkami. Spektrálna priepustnosť materiálov vyjadruje, akú má materiál priepustnosť v určitom rozsahu vlnových dĺžok. Podľa toho je možné určiť materiál vhodne využiť.

Výber vhodného optického materiálu so zodpovedajúcou spektrálnu priepustnosťou je veľmi dôležité pre ďalšie použitie. Na obrázku Obr.13 sú vykreslené grafy závislosti priepustnosti materiálov pre rôzne vlnové dĺžky.



Obr.13: Prehľad spektrálnych priepustnosti vybraných IČ materiálov. [12]

Krivka priepustnosti pre každý materiál je rozdielna. Na zvýšenie priepustnosti sa používajú antireflexné vrstvy. Ich vlastný návrh súvisí s požiadavkami na oblasť využitia, prípadne sú na nich nanosené aj iné typy vrstiev (ochranné vrstvy proti mechanickým vplyvom, voduodpudivé...). Priepustnosť pre oblasť LWIR je vytýčená čírenými vertikálnymi úsečkami.

3.2. Mechanické a termálne parametre optických materiálov

Medzi mechanické parametre materiálov patria teplotný koeficient dĺžkového predĺženia optickej dráhy, teplotný koeficient indexu lomu, Youngov modul pružnosti, strihový modul, elastické predĺženie, Knoopová tvrdosť. Všeobecne je známe, že LWIR materiály sú krehké, mäkké, ľahko rozbitné. Z toho dôvodu je zložitá spracovanie a ich montáž do mechaniky. Každý materiál pre LWIR oblasť je jedinečný svojimi vlastnosťami medzi materiálmi pre IČ oblasť. Záleží na použití, ktorú jedinečnú vlastnosť bude potrebné preferovať viac a ktorú menej. Najpoužívanejšie LWIR materiály sú germárium(Ge), sulfid zinočnatý(ZnS), selenid zinočnatý(ZnSe), chlorid sodný(NaCl), gálium arzenid(GaAs) a AMTIR-1(GeAsSe).

Prostredie, v ktorom bude optický systém použitý, zohráva dôležitú úlohu pri výbere vhodného materiálu. Pri zmene teploty dochádza k fyzickej zmene rozmerov, kvôli teplotnej rozťažnosti materiálov. Neexistuje žiaden materiál pre oblasť LWIR, ktorý má nízky koeficient teplotnej rozťažnosti.

Ďalšie faktory s ktorými treba počítať pri návrhu je cena materiálu, váha, rozpustnosť a technologická zložitosť spracovania nástrojmi. Cena materiálov pre infračervenú oblasť je vyššia ako sklá pre viditeľnú oblasť o dva rady a vyššie. Materiály majú často vyššiu hustotu a tak aj ich váha je vyššia v porovnaní s obyčajnými sklami. Niektoré materiály, napríklad chlorid sodný (NaCl) je vysoko rozpustný vo vode, takže je nepoužiteľný vo vlhkom prostredí. Veľa materiálov má vysokú odrazivosť, je dôležité zvoliť vhodné antireflexné vrstvy, ktoré majú dostatočnú priľnavosť na materiáloch a požadujúcu mechanickú odolnosť.

3.2.1. Teplotný koeficient indexu lomu

Pri zmene teploty dochádza k zmene indexu lomu. Teplotný koeficient indexu lomu(absolútna hodnota je hodnota nameraná pri 20°C) . V intervaloch -40-80°C sa vo vákuu používa interferenčný dilatometer na detekciu rozdielu dĺžok oboch dráh. Na výpočet teplotného koeficientu vo vzduchu pri normálnom tlaku 101,325 kPa sa používajú vzťahy:

$$\left(\frac{dn}{dT}\right)_{rel} \approx \left(\frac{dn}{dT}\right)_{abs} - n_{rel} \cdot \frac{dn_{vzduch}}{dT} \quad (3.8)$$

3.2.2. Teplotný koeficient dĺžkového predĺženia optickej dráhy

Pri zmene teploty optických materiálov sa mení dĺžka optickej dráhy. Veľkosť zmeny je vyjadrená pomocou koeficientu dĺžkového predĺženia optickej dráhy:

$$\frac{ds}{dT} = (n - 1)\alpha L + \frac{dn}{dT}, \quad (3.9)$$

kde n je index lomu skla, αL je koeficient dĺžkového teplotného predĺženia. Ak dôjde k zmene optickej dráhy pri zmene s teploty, spôsobí to deformáciu vlnoplochy a dôjde k zhoršeniu kvality zobrazenia. Tento jav môže spôsobiť vážne problémy pri systémoch s vysokým rozlíšením. Sklá so záporným $\frac{ds}{dT}$ takmer nulovým αL nesú označenie ako atermálne sklá.(ATC1, ATF2 a ATF4). Návrh optických sústav hlavne v IČ oblasti dbá, aby bol celý systém atermalizovaný.

3.2.3. Knoopová tvrdosť

Knoopovú tvrdosť charakterizuje tvrdosť materiálu. Pri optických materiáloch sa táto tvrdosť vzťahuje k tvrdosti plôch optických skiel. Na meranie sa všeobecne používa diamant pyramídového tvaru s uhlom vrcholu $172^{\circ}30'$ a 130° romboickou podstavou, ktorá sa pritlačí na plochu vzorky. Meraný kus sa zaťaží silou 0.9807N po dobu 15 sekúnd. Následne je zmeraná veľkosť vrypu. Výpočet Knoopovej tvrdosti:

$$H_k = 1.451 \frac{F}{l^2}, \quad (3.10)$$

Kde $F(N)$ je záťaž, l je dĺžka dlhšej diagonály výsledného vrypu. [13]

3.3. Vybrané optické materiály pre infračervenú oblasť LWIR.

Zobrazovať v dlhovlnnej infračervenej spektrálnej oblasti(LWIR) má veľa použiteľných aplikácií vo vojenskej, bezpečnostnej, konštrukčnej a vedeckej oblasti. Dlhovlnné zobrazovacie systémy pracujú v rozsahu 8-14 μ m, to je najviac vyžarované pri termálnej emisií. Z vyžarovacej krivky absolútne čierneho telesa je možné určiť, že objekty s teplotami v rozsahu -30 +90 °C majú vrchol vyžarovania v oblasti LWIR.

Aj keď je na výber pár materiálov pre oblasť LWIR, konštruktér potrebuje vybrať jeden, ktorý je optimálny pre čiastkovú aplikáciu. Môže nastať prípad, že žiaden z ponúkaných materiálov v LWIR nespĺňa požadované kritéria. V tom prípade je nutné nájsť kompromis medzi jednotlivými parametrami materiálov.

Germánium (Ge)

Germánium má najvyšší index lomu zo všetkých LWIR materiálov, z toho dôvodu je jednoduchšie dosiahnuť difrakčne limitovane dokonalú sústavu oproti materiálom s nízkym indexom lomu. Porovnanie sférickej vady u singletu z germánia a z obyčajného materiálu BK7 ukazuje, že prvom prípade je vada podstatne menšia. Germánium vykazuje extrémne nízku disperziu, jeho Abbeovo číslo má hodnotu až 942, preto nie je často ani nutná chromatická(farebná) korekcia. Priepustnosť germánia je relatívne konštantná pre pásmo LWIR a jej hodnota sa pohybuje nad 45%. Odrazivosť je veľmi vysoká (okolo 36%), to znamená, že je potrebné na povrchy naniesť antireflexné vrstvy. Germánium je veľmi citlivý materiál na zmeny teploty a pri teplote vyššej ako 100°C sa stáva nepriehľadný. Zmena teplotného koeficientu indexu s teplotou je vyše 400 krát vyššia ako u štandardného skla N-BK7.

Selenid zinočnatý (ZnSe)

Selenid zinočnatý je výnimočný materiál, pretože prepúšťa viditeľné spektrum, ako aj IČ spektrum. Jeho priepustnosť je vyše 70% v rozsahu od 0.5 μ m až do 20 μ m. Môže byť veľmi dobre použiteľný pri nastavovaní systémov LWIR, pretože viditeľné svetlo môže byť použité pri nastavovacích procesoch. Odrazivosť je taktiež vysoká kvôli svojmu indexu lomu(~2.4), preto je potrebné naniesť antireflexné vrstvy. Selenid zinočnatý je menej náchylný na teplotné

zmeny ako germánium. Môže byť použitý spolu s materiálom AMTIR-1 na vytvorenie achromatického dubletu s nízkou citlivosťou na teplotné zmeny.

Sulfid zinočnatý (ZnS)

Sulfid zinočnatý prepúšťa svetlo vo viditeľnom spektre, taktiež aj v IČ. V pásme LWIR má v multi-spektrálnej úrovni priepustnosť vyše 80%, bez nej len 60%. Pretože multi-spektrálna úroveň môže byť použitá v prípade viditeľného aj IČ spektra, môže to priniesť výhody pri nastavovaní ako aj pri ZnSe. Jedna forma ZnSe má názov Irtran 2, je vyrábaná firmou Eastman Kodak a je odolná na teplotné výkyvy. Z toho dôvodu môže odolávať poveternostným vplyvom prostredia ako u štandardných skiel pre viditeľné spektrum. Sulfid zinočnatý môže byť párovaný s inými LWIR materiálmi ako s germániom, selenidom zinočnatým a AMTIR-om1 a vytvárajú kvalitnejšie achromáty.

Chlorid sodný (NaCl)

Chlorid sodný (kamenná soľ) je rozpustný vo vode. Napriek tomu je to výborný materiál pre LWIR oblasť. Má spojitú hodnotu priepustnosti vyše 92% v pásme od 2-14 μ m. Z technologického hľadiska sa jednoducho leští a je obvykle používaný na okná spektrometrov, vysoko výkonné laserové okná a hranoly. Svojou kryštalickou štruktúrou a štiepateľnosťou je veľmi ťažko použitá na výrobu sférických plôch. Ochrana vrstva musí byť nanosená na povrchu, aby chránila povrch pred rozpúšťaním a vyparovaním. Medzi ďalšie jedinečné vlastnosti patrí záporná hodnota dn/dT pri vlnových dĺžkach väčších ako 0.22 μ m. Chlorid sodný je taktiež veľmi mäkký a krehký.

Gálium arzenid (GaAs)

Gálium arzenid je tvrdý a odolný materiál. Jeho Knoopova tvrdosť 731 kg/mm² a Youngov modul 83 GPa. Vďaka svojej pevnosti a odolnosti má využitie v rôznych smeroch a pre rôzne aplikácie. Jeho priepustnosť je 55% a v pásme nad 12 μ m je odrazivosť 45%. Index lomu pre LWIR pásmo má okolo 3.3. Citlivosť na teplotné zmeny je vyššia podobne ako u germánia a jeho teplotný koeficient indexu lomu dn/dT je 150 ppm/K.

AMTIR-1 (GeAsSe)

AMTIR-1 je jedinečný v tom, že oproti ostatným LWIR materiálom nemá kryštalickú štruktúru. Jeho priepustnosť je 65% v LWIR oblasti a jeho index lomu je okolo 2.5. Je to mäkkší materiál, jeho Youngov modul pružnosti je 22 GPa. Index lomu je náchylnejší na teplotnú zmenu oproti sklám pre viditeľné spektrum, ale jeho dn/dT je podstatne nižšia ako u germánia a gálium arzenidu. Môže byť použitý s ďalšími LWIR materiálmi na výrobu achromatických dubletov. Najzvyčajnejšia kombinácia spolu so selenidom zinočnatým tvorí achromatický atermálny dublet.

Prehľad materiálových vlastností vybraných materiálov pre pásmo LWIR je uvedený v tabuľke Tab.3.

materiál	$n(10\mu\text{m})$	$\nu_{Abbe}(8-12\mu\text{m})$	Teplotný koeficient indexu lomu dn/dT ($\times 10^{-6}$)	Teplotná sklená konštanta $T_R(\times 10^{-6})$	Koeficient tepelnej rozťažnosti/ $^{\circ}\text{C}$ α_L ($\times 10^{-6}$)
Ge	4.003	1000	396	126.2	5.7
ZnS	2.200	23	39	25.9	6.6
ZnSe	2.406	58	61	36.3	7.1
GaAs	3.278	110	185	76.2	5
AMTIR-1	2.498	110	72	36.1	12
NaCl	1.740	230	-89	-94.5	44

Tab.3. Tabuľka vybraných materiálov pre pásmo LWIR.

4. Optický návrh dubletu pre pásmo LWIR

4.1. Optické vady

Pri reálnom zobrazení optickou sústavou vznikajú optické vady (aberácie). Tie majú za následok zhoršenie kvality zobrazenia predmetu. Jedná sa o odchýlky od ideálneho zobrazenia. S narastajúcim zorným poľom (FOV) a účinným priemerom optických členov(šošoviek) pri rovnakej ohniskovej vzdialenosti sa odchýlky zväčšujú. To má potom následok, že zobrazením bodu reálnou sústavou sa zobrazí ako rozptylová plôška, rovina kolmá k optickej osi ako rotačne symetrická, alebo obrazom priamky bude krivka. Predmet je zobrazený na rôznych miestach a s rôznou veľkosťou pre rôzne vlnové dĺžky. Vyhodnotenie vad sa sleduje oddelene pre chromatické svetlo (viacerých vlnových dĺžok) a pre svetlo jednej vlnovej dĺžky samostatne. Na určenie aberácií je potrebné sledovať paraxiálne, ale aj mimoparaxiálne svetelné lúče. Vady optických sústav je možné rozdeliť na :

a) **Vady monochromatické:** Prejavujú sa už pri svetle jednej vlnovej dĺžky. Patria tu :

- Otvorová vada
- Kóma
- Skreslenie
- Zklenutie
- Astigmatizmus

b) **Vady chromatické (farebné):** Prejavujú sa pri svetle zloženom z viacerých vlnových dĺžok (biele svetlo) už v paraxiálnom priestore. Patria tu:

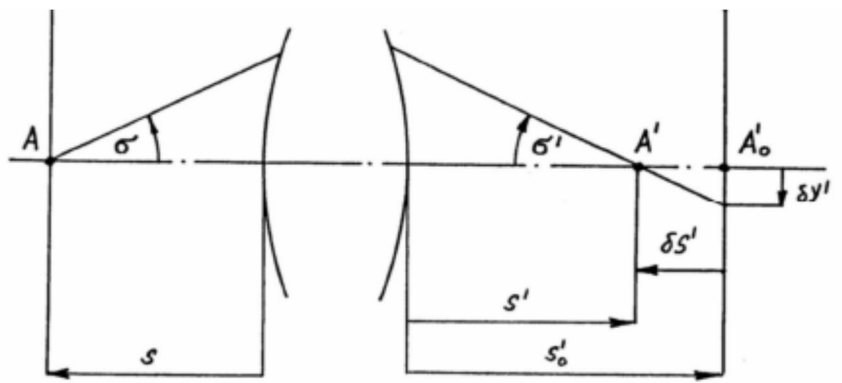
- Chromatická vada polohy
- Chromatická vada veľkosti

Monochromatické vady:

Otvorová vada

Prejavuje sa pri zobrazení osového bodu širokými zväzkami lúčov. Závisí na dopadovej výške svetelného lúča. Obraz bodu je kruhová rozptylová plôška. Pozdĺžna otvorová vada sa určí ako:

$$\delta s' = s' - s_0' \quad (4.1)$$



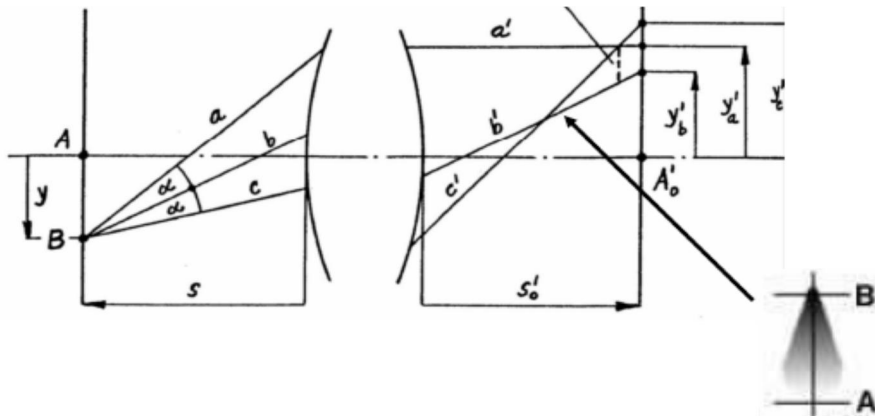
Obr.14 Otvorová vada.

Možné spôsoby odstránenia otvorovej vady sú kombinácie spojky a rozptylky, kde rozptylka má opačnú otvorovú vadu ako spojná šošovka a ich súčtom sa vada vykompenzuje. Ďalší spôsob je zmena materiálu s vyšším indexom lomu. Pre odstránenie je najjednoduchšie riešenie posunúť paraxiálnu obrazovú rovinu smerom k optickej sústave (defokus) a nájsť optimálnu obrazovú rovinu. Otvorová vada pri použití viacerých šošoviek je menšia ako pri použití jednej. Nahradenie sférických plôch asférickou šošovkou je taktiež možné docieľiť korekciu otvorovej vady. Náklady a náročnosť na jej výrobu sú podstatne vyššie, preto je potrebné zvážiť optimálne riešenie. Ďalší parameter ovplyvňujúci otvorovú vadu je veľkosť apertúry, čím je väčšia, tým je otvorová vada väčšia, čo súvisí s dopadovou výškou.

Kóma

Prejavuje sa pri zobrazení mimo-osového bodu širokým zväzkom lúčov. Obrazom bodu je plôška, ktorej tvar pripomína kométu (Obr.15 vpravo dole). Pre výpočet meridionálnej kómy platí:

$$K_m = \frac{y a' - y c'}{2} - y b' \quad (4.2)$$

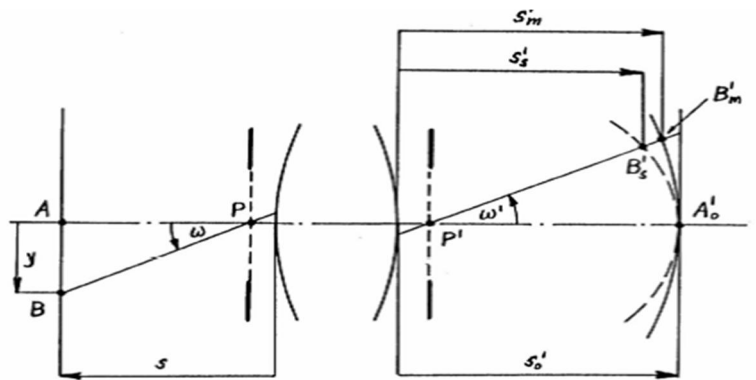


Obr.15 Kóma.

Posunom apertúrnej clony je možná korekcia kómy. V určitej vzdialenosti od šošovky bude jej hodnota nulová, táto poloha sa nazýva prirodzená poloha šošovky. Ďalším spôsobom jej odstránenia, podobne ako u otvorovej vady je metóda prehýbania šošoviek.

Zklenutie a astigmatizmus

Prejavuje sa pri zobrazovaní mimoosového bodu úzkymi zväzkami svetelných lúčov. Súčet zklenutia v sagitálnej (v rovine obrázku) a tangenciálnej rovine (rovine kolmej) sa nazýva astigmatizmus.



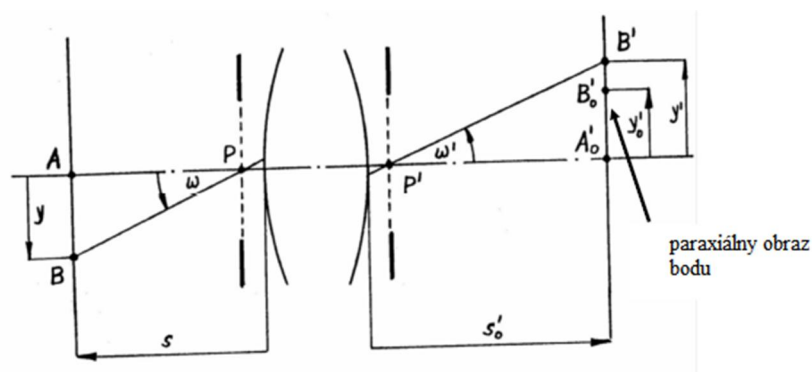
Obr.16. Zklenutie a astigmatizmus.

Korekciu je možné dosiahnuť nepriamo - zmenou veľkosti otvorovej vady, alebo kómy a posunom clony. Na veľkosť astigmatizmu má vplyv aj tvar šošovky. Najvhodnejší tvar na korekciu astigmatizmu je tzv. menisková šošovka.

Skreslenie

Jedná sa o uhlovú chybu závislú na zväšení. Môžu nastať dva prípady skreslenia: podúškovité, súdkovité. Výpočet:

$$\delta y_z' = y' - y_0' \quad (4.3.)$$



Obr.17 Skreslenie.

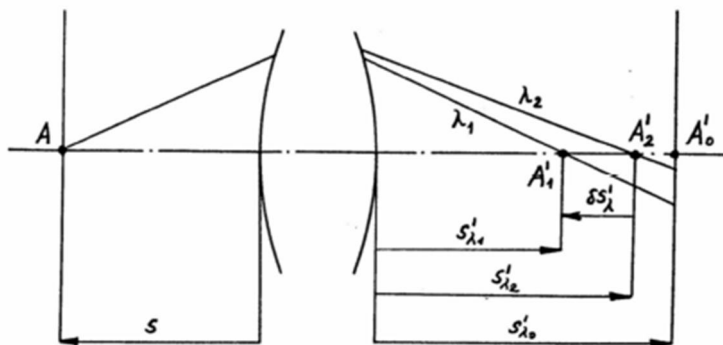
Na korigovanie skreslenia (Obr.17) sa používa posun apertúrnej clony do roviny šošovky. Postupné odstránenie je možné dosiahnuť nepriamo (sprostredkované) odstránením kómy, astigmatizmu a otvorovej vady. Ďalší nástroj je použitie princípu zrkadlovej symetrie - kde apertúrna clona leží medzi dvoma šošovkami v rovnakej vzdialenosti od oboch, druhá šošovka je zrkadlovým obrazom prvej šošovky. S rastúcou veľkosťou predmetu sa veľkosť skreslenia zvyšuje.

Chromatické vady

Chromatická vada polohy

Pri zobrazovaní bielym svetlom (polychromatickým) má paraxiálny obrazový bod pre každú vlnovú dĺžku inú polohu. Najviac sa láme svetlo s kratšími vlnovými dĺžkami.

$$\delta s_{\lambda'} = s_{\lambda_1'} - s_{\lambda_2'}, \quad \lambda_1 < \lambda_2 \quad (4.4)$$

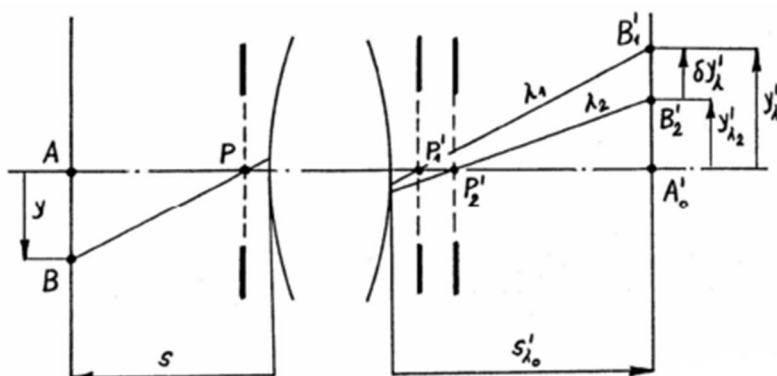


Obr.18 Chromatická vada polohy.

Chromatická vada veľkosti

Pri zobrazovaní sa prejaví tak, že paraxiálne obrazy majú pre rôzne vlnové dĺžky rôznu veľkosť obrazov.

$$\delta y_{\lambda'} = y_{\lambda_1'} - y_{\lambda_2'}, \quad \lambda_1 < \lambda_2 \quad (4.5)$$



Obr.19 Chromatická vada veľkosti. [14]

Korekcia chromatických aberácií je spojená s vhodným výberom a kombináciou materiálov s rôznymi indexami lomu. Závislosť Indexu lomu na vlnovej dĺžke určuje disperzná krivka (Obr.12). Kombinácia spojky s kladnou optickou mohutnosťou a rozptylky so zápornou, ktoré sú vyrobené z dvoch rozdielnych disperzných materiálov. Viac informácií v kapitole 4.4. [15]

4.2. Návrh tenkej a reálnej šošovky

Pri návrhu šošovky s požadovanou ohniskovou vzdialenosťou f' je potrebné zvoliť vhodný materiál s indexom lomu n , rádiusy optických plôch r_1 a r_2 . Reciproké hodnoty rádiusov sú krivosti c_1 a c_2 a t je šírka šošovky. Pri návrhu tenkej šošovky sa šírka t neberie do úvahy, potom platí :

$$\frac{1}{f'} = (n - 1)(c_1 - c_2). \quad (4.6)$$

Pre reálnu šošovku platí vzťah:

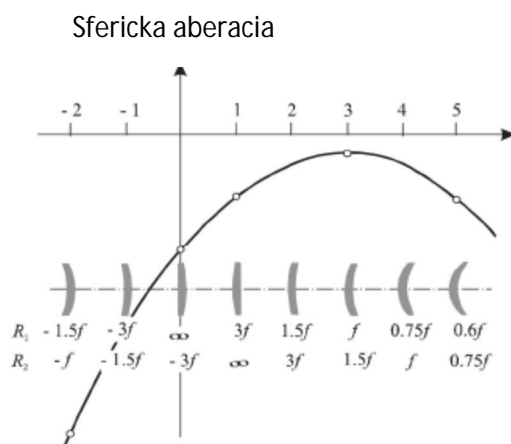
$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left[c_1 - c_2 + \frac{(n-1)}{n} c_1 c_2 t \right]. \quad (4.7)$$

Pri prechode od tenkej šošovky k reálnej jednoduchej šošovke (singletu) je potrebné získať polomery krivosti r_1 a r_2 pomocou vzťahov:

$$r_1 = \left[\frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)} \right] f', \quad (4.8)$$

$$r_2 = \left[\frac{(n-1)[2(n+2)f' - (2n+1)t]}{n(2n+1) - 2(n+2)} \right]. \quad (4.9)$$

Prehýbanie šošoviek–bending má vplyv na veľkosť sférickej vady, nie však na ohniskovú vzdialenosť jednoduchej šošovky.



Obr. 20 Zmena veľkosti sférickej aberácie pri zmene tvaru pre germánium. [16]

4.3. Návrh netmeleného dubletu pomocou tenkých šošoviek

Jednoduchá šošovka vykazuje veľkú otvorovú, chromatickú vadu, kómu.... Ak neuvažujeme s použitím asferického členu, potom jedným z najúčinnějších nástrojov na jej odstránenie je zvolenie metódy preháňanie šošoviek- zmena polomerov krivosti (bending). Pri jednoduchej šošovke sa nedá odstrániť chromatická vada. Ďalším spôsobom kompenzácie viacerých vad je rozdelenie jednej šošovky na viac šošoviek (splitting), vytvorením dubletu, tripletu... Najúčinnější spôsob na odstránenie chromatickej vady a zároveň otvorovej vady je voliť kombináciu spojky a rozptylky, zhotovených z vhodne zvolených materiálov s rozdielnymi Abbeovými číslami. [3]

Pre výpočet sa vychádza z úvahy na zobrazenie predmetu, ktorý sa nachádza v nekonečnu. Musíme si zvoliť vhodnú kombináciu materiálov, najvhodnejšie je voliť také, ktorých rozdiel Abbeových čísel je čím najväčší. Ďalej uvažujeme, že obe šošovky sú v tesnej blízkosti pri sebe a sú netmelené.

Cieľom bude korigovať súčasne chromatickú vadu polohy, pozdĺžnu otvorovú vadu a kómu. Paraxiálny lúč má dopadovú výšku rovnakú pre všetky plochy optického systému. Pri riešení vychádzame z postupu, ktorý rozpracoval Havelka[1]. Využívame tiež ním zvolené označenie.

Najskôr si označíme požadované premenné koeficientami, E je koeficient chromatickej vady polohy 1. rádu, A je koeficient otvorovej vady 3. rádu a B je koeficient kómy 3. rádu. Ak je teda K optická lámavosť celého systému, K_1 a K_2 sú optické lámavosti prvého a druhého členu. Je možné zapísať štyri základné rovnice:

$$K_1 + K_2 = K , \quad (4.10)$$

$$K_1\nu_1 + K_2\nu_2 = E , \quad (4.11)$$

$$M_1 + M_2 = A , \quad (4.12)$$

$$N_1 + N_2 = B. \quad (4.13)$$

Z prvých dvoch rovníc (4.10 a 4.11) pre voľbu $K=1$ a $E=0$ najskôr určíme lámavosti K_1 a K_2 . Z druhých dvoch rovníc (4.12 a 4.13) potom pre voľbu $A=0$ a $B=0$ vypočítame tvarové parametre ρ_1, ρ_2 .

Pre jednotlivé požadované hodnoty K, E, A, B potom z týchto rovníc pre zvolené optické materiály (n_1, ν_1) a (n_2, ν_2) môžeme vypočítať konštrukčné parametre tenkých šošoviek

(r_1, r_1', r_2, r_2') . Riešením prvých dvoch rovníc (4.10) a (4.11) vypočítame lámavosti K_1, K_2 obidvoch členov dubletu.

Pre jednotlivé veličiny M_1, M_2, N_1, N_2 platí:

$$M_1 = a_1 \rho_1^2 - 2b_1 \rho_1 + c_1 \quad (4.14)$$

$$M_2 = a_2 \rho_2^2 - 2b_2 \rho_2 + c_2 \quad (4.15)$$

$$N_1 = e_1 \rho_1 - b_1 \quad (4.16)$$

$$N_2 = e_2 \rho_2 - b_2 \quad (4.17)$$

Pre polohu predmetu v nekonečnu platí:

$$\xi_1 = K_1^2 \quad (4.18)$$

$$\xi_2 = K_1 + K_2^2, \quad (4.19)$$

Kde ξ_1 a ξ_2 sú polohové parametre. Výpočet tvarových parametrov ρ_1, ρ_2 :

$$\rho_1 = \frac{1}{2\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1'}\right) - \xi_1}, \quad (4.20)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{2\left(\frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2'}\right) - \xi_2} \quad (4.21)$$

Pre tenké šošovky vo vzduchu platia rovnice:

$$K_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right) \quad (4.22)$$

$$K_2 = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_2'} \right) \quad (4.23)$$

Pre výpočet ďalších koeficientov je potrebné použiť nasledujúce rovnice:

$$a_1 = (2n_1 + 1)K_1 \quad (4.24)$$

$$a_2 = (2n_2 + 1)K_2 \quad (4.24)$$

$$b_1 = K_1 \xi_1 \quad (4.25)$$

$$b_2 = K_2 \xi_2 \quad (4.26)$$

$$c_1 = K_1^3 (2 - 2n_1)^2 \quad (4.27)$$

$$c_2 = K_2^3 (2 - 2n_2)^2 \quad (4.28)$$

$$e_1 = (n_1 + 1)K_1 \quad (4.29)$$

$$e_2 = (n_2 + 1)K_2 \quad (4.30)$$

Sústava štyroch rovníc (4.20), (4.21), (4.22), (4.23), nám dá vzťahy pre výpočet polomerov krivosti jednotlivých plôch netmeleného dubletu.

$$\frac{1}{r_1} = \rho_1 + \xi_1 + \frac{K_1}{2(n_1-1)} \quad (4.32)$$

$$\frac{1}{r_1'} = \rho_1 + \xi_1 - \frac{K_1}{2(n_1-1)} \quad (4.33)$$

$$\frac{1}{r_2} = \rho_2 + \xi_2 + \frac{K_2}{2(n_2-1)} \quad (4.34)$$

$$\frac{1}{r_2'} = \rho_2 + \xi_2 - \frac{K_2}{2(n_2-1)} \quad (4.35)$$

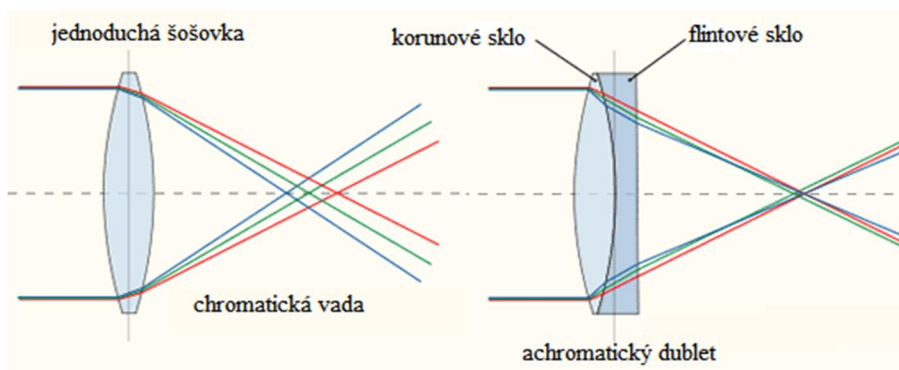
Z uvedených rovníc je možné zostaviť algoritmus pre program OSLO , ktorý po zadaní indexov lomu materiálov a Abbeových čísel vypočíta jednotlivé polomery krivosti pre oba členy dubletu. Zápis programu sa nachádza v prílohe ako *achr_dub_olso.txt* . [5]

Postupne kombinujeme vhodným spôsobom rôzne typy vybraných materiálov pre pásmo LWIR, kde dostávame dve riešenia pre každý člen dubletu. Pre reálne šošovky je potrebné zadať šírku každého členu, vzdialenosť medzi šošovkami a pomocou programu Oslo prepočítať dublet na požadovanú ohniskovú vzdialenosť.

4.4. Konštrukčný návrh achromatického netmeleného dubletu v priestore 3. radu

Pri zobrazovaní polychromatickým svetlom(zloženým z viacerých vlnových dĺžok) sa prejavuje disperzia. Tá spôsobuje, že paraxiálny ohniskový obrazový bod má pre každú vlnovú dĺžku inú polohu.

Chromatická vada sa prejavuje už pri paraxiálnom zobrazení(bližko optickej osi, svetelné lúče zvierajú s optickou osou malé uhly do 2°). Materiály pre LWIR s vysokým Abbeovým číslom vykazujú v porovnaní s materiálmi pre VIS podstatne menšiu relatívnu disperziu. [3]



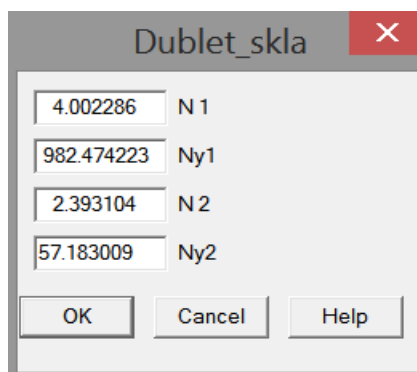
Obr.21 Porovnanie chromatickej vady u jednoduchej šošovky a achromatického dubletu. [18]

Achromatický dublet je dvojčlenný optický systém zložený najčastejšie so spojnej a rozptylnej šošovky. Táto kombinácia optických členov dokáže zároveň odstrániť aj otvorovú vadu. Predný člen vykazuje kladnú odchýlku a nízku relatívnu disperziu (vysoká hodnota Abbeovho čísla) a zadný člen zápornú odchýlku a vysokú relatívnu disperziu. Jedná sa o vykorigovaný optický systém pre dve vlnové dĺžky. Pre splnenie podmienky pre achromatický dublet musí platiť :

$$K_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} K, \quad (4.31)$$

$$K_2 = \frac{v_1}{v_2 - v_1} K. \quad (4.32)$$

Z vybraných materiálov pre pásmo LWIR (kapitola 3.3.) je potrebné zvoliť vhodné kombinácie materiálov pre návrh achromatického dubletu. Materiál NaCl je vynechaný kvôli svojej náchylnosti na atmosférické vplyvy (náchylnosť na vzdušnú vlhkosť). Pre výpočet jednotlivých polomerov krivosti nám poslúži postup a program z predchádzajúcej kapitoly (4.3.). Do programu zadáme hodnoty indexov lomu n_1 a n_2 a hodnoty Abbeových čísel v_1 a v_2 . Dublet musí byť netmelený. Optický tmel totiž neprepúšťa svetlo v tejto spektrálnej oblasti.



Obr.22 Výpočet polomerov krivosti pre kombináciu materiálov Ge + ZnSe.

```

Len Soe Rin Aoe Wav Pxc Abr Mra Chf Tra Sop Ref Fan Sod Auf Vav Onp Bp Slv Pko Aoe
n1 n2
982.474223 57.183009
Program aberace7.ccl
Vytisteno dne 8.04.2016 ve 20:18:04

fi1 fi2
1.061800 -0.061800

Prvni reseni
r1 0.998252 r1' 1.543003
r2 -4.090839 r2' -4.997820

Druhe reseni
r1 0.800515 r1' 1.116655
r2 0.285455 r2' 0.281885

```

Obr. 23 Vypočítané parametry sústavy v programe OSLO.

Kombinácia materiálov	Výpočet polomerov krivosti prvé riešenie				Výpočet polomerov krivosti druhé riešenie			
	r_1	r_1'	r_2	r_2'	r_1	r_1'	r_2	r_2'
AMTIR1 +ZnS	0.915141	13.702032	-10.055349	2.794831	0.402697	0.683290	0.272668	0.242441
AMTIR1 +ZnSe	0.829064	-0.501774	-0.489735	1.422727	0.103825	0.155461	0.118676	0.089516
Ge + ZnS	1.012457	1.664665	4.8553861	2.932742	0.689256	0.939969	0.326932	0.313117
Ge + ZnSe	0.998252	1.543003	-4.090839	-4.99782	0.800515	1.116655	0.285455	0.281885
Ge+ AMTIR1	1.012521	2.279865	3.265659	1.363866	0.422041	0.549321	0.290019	0.258062
ZnSe+ZnS	0.890410	-6.201891	-3.577865	2.552909	0.322748	0.551245	0.248302	0.212831

Tab.4. Vypočítané hodnoty pre jednotlivé polomery krivosti obidvoch šošoviek, kde boli odstránené optické vady 3. radu, boli následne zadané do programu OSLO.

Hodnoty polomerov sú všeobecne spočítané pre ohniskovú vzdialenosť 1mm. Následne boli dublety optimalizované pre hodnotu clonového čísla 2 a ohniskovú vzdialenosť 60mm. Ako optimalizačná metóda bola zvolená metóda najmenších tlmených štvorcov, ktorú má v sebe implementovaný program OSLO. Výsledky po optimalizácií sa nachádzajú v tabuľke Tab.5 v pravej časti.

Kombinácia materiálov	Výpočet polomerov krivosti prvé riešenie				Výpočet polomerov krivosti po optimalizácií
	r_1	r_1'	r_2	r_2'	r_1, r_1', r_2, r_2'
AMTIR1 +ZnS	0.915141	13.702032	-10.055349	2.794831	[D.1.]
AMTIR1 +ZnSe	0.829064	-0.501774	-0.489735	1.422727	[D.2.]
Ge + ZnS	1.012457	1.664665	4.8553861	2.932742	[D.3.]
Ge + ZnSe	0.998252	1.543003	-4.090839	-4.99782	[D.4.]
ZnS+ZnSe	0.890410	-6.201891	-3.577865	2.552909	[D.5.]
Ge+ AMTIR1	1.012521	2.279865	3.265659	1.363866	[D.6.]

Tab.5. Tabuľka vypočítaných polomerov krivosti pred optimalizáciou, pre prvé riešenie a polomerov krivosti po optimalizácií. Pre lepšie výsledky sa vychádza z vypočítaných parametrov pre prvé riešenie. V pravej časti sú odkazy na vypočítane polomery dubletov krivosti po optimalizácií metódou najmenších štvorcov. Hrúbka šošoviek jednotlivých členov dubletu sa pohybuje v rozmedzí 3-3.8mm.

Vyhodnotenie každého dubletu obsahuje štyri okná, ktoré budú popisovať parametre sústavy, jej kvalitu zobrazenia pomocou MTF, veľkosti optických väd, vzhľad.

Prvé okno obsahuje parametre zvolených materiálov ako hodnoty indexu lomu a Abbeových čísel. Pod nimi sa nachádzajú v prvom stĺpci rádiusy, v druhom hrúbky šošoviek, vzdialenosti medzi nimi, ďalšom polomery clôn a typy skiel.

Druhé okno obsahuje analýzu zaostrenia pomocou MTF pre osový a dva mimoosové lúče pre sagitálnu a tangenciálnu rovinu zaostrenia. Údaj TH[IMS] udáva posun roviny zaostrenia.

V treťom okne je znázornená MTF optickej sústavy.

Štvrté okno obsahuje geometricko-optické vady- veľkosti otvorovej vady pre rôzne uhly, astigmatizmu, chromatickej vady, skreslenia, pozdĺžnej sférickej vady a fyzický 2D vzhľad sústavy.

1. Dublet AMTIR 1 + ZnS 2/60

Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (3mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

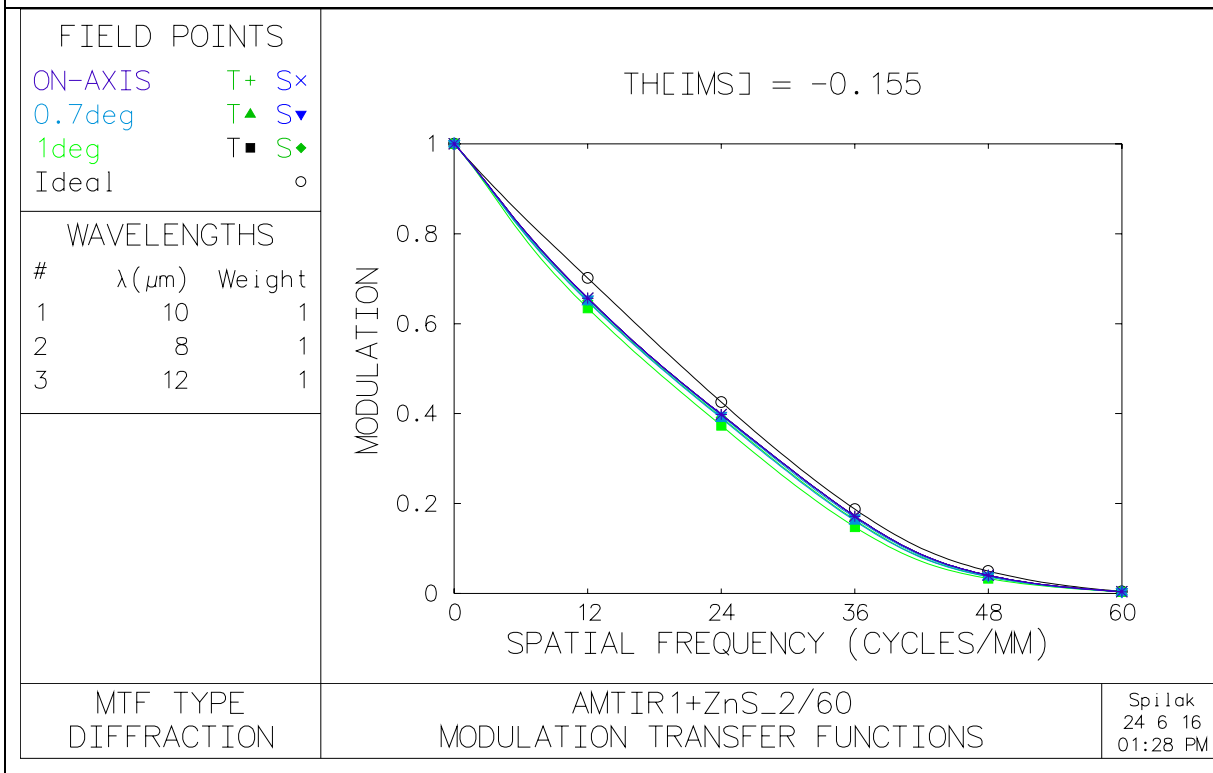
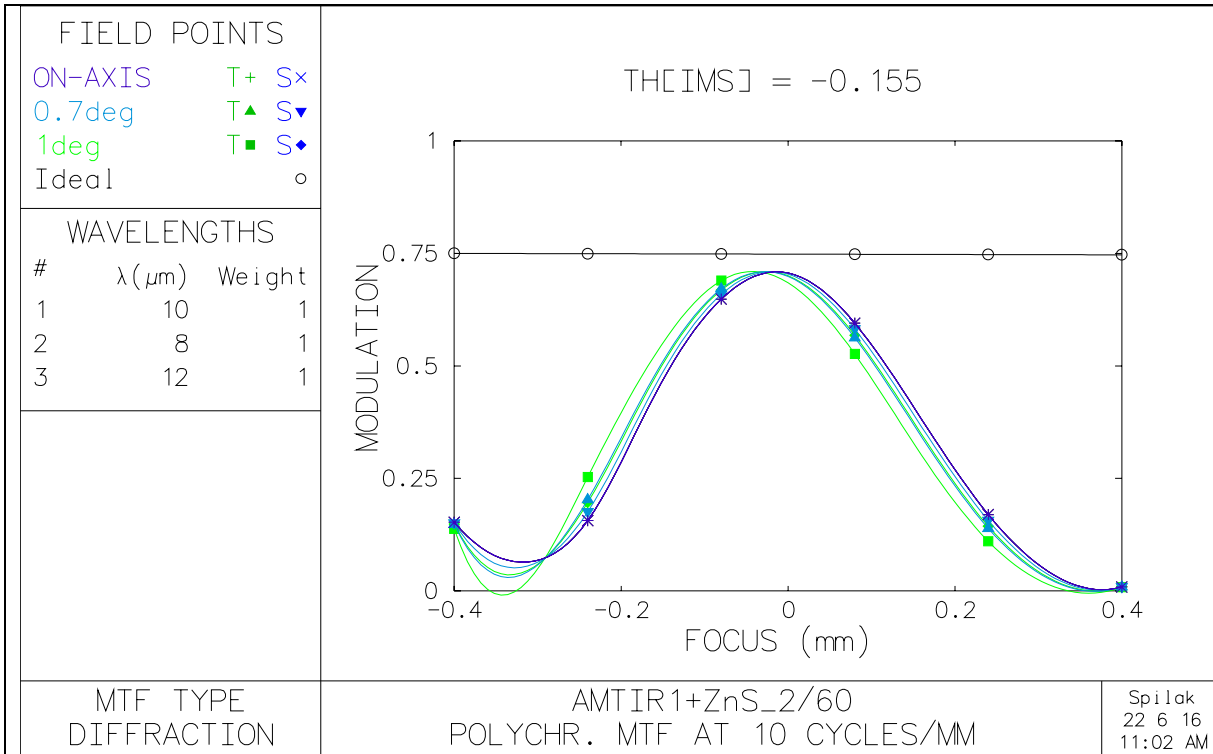
Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s malými odchýlkami v okne, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu -0.155mm (TH[IMS]).

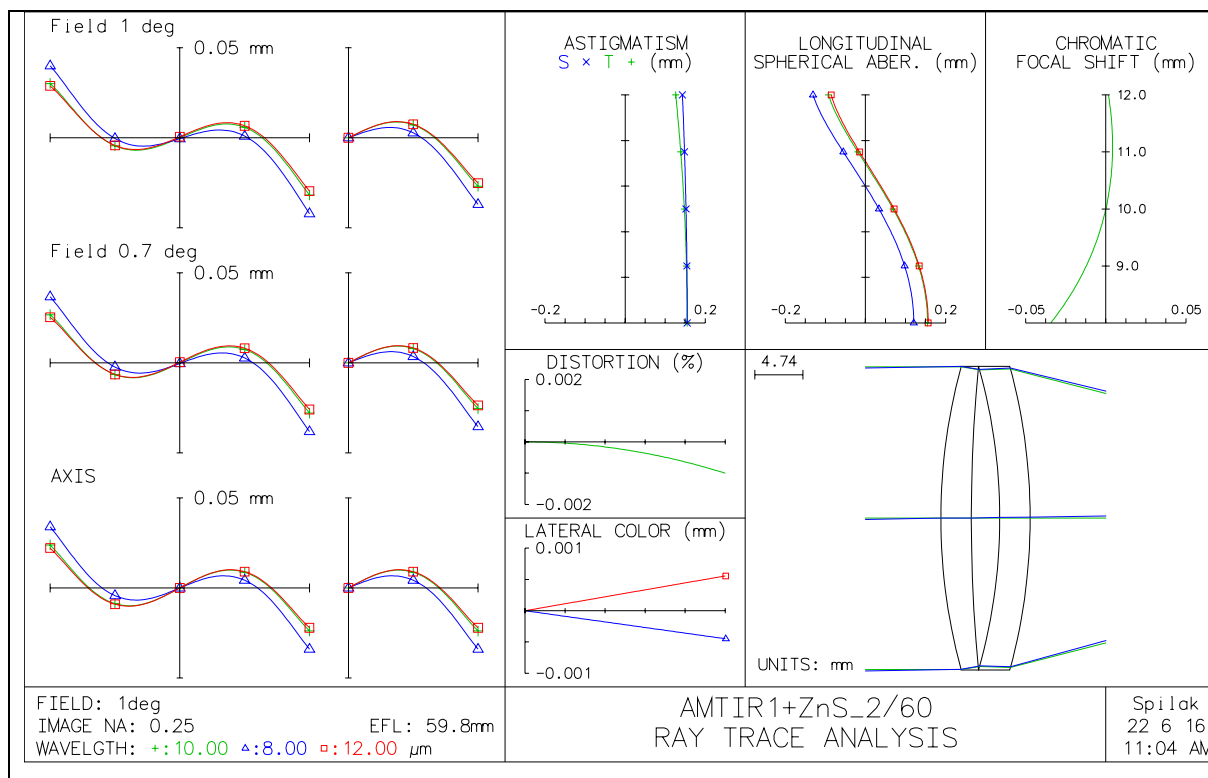
Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) nie je veľmi výrazná a jej hodnota je takmer totožná pre vlnové dĺžky WAVELENGTHS 10 μ m. a 12 μ m – dublet je achromatický.

*REFRACTIVE INDICES						
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	AMTR1	2.519412	2.519412	2.518264	1.3235e+03	120.000000
	MISC					
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNS	2.201554	2.201554	2.175530	46.170522	--
	MISC					
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					

*LENS DATA						
AMTIR1+ZnS_2/60						
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE	RADIUS	GLASS	SPE NOTE
OBJ	--	5.0334e+21	8.7858e+19		AIR	
AST	57.079402 V	3.000000	14.948209	AS	AMTR1	C
2	159.831469 V	2.800000	15.000000		AIR	
3	-55.024046 V	3.000000	15.000000		ZNS	C
4	-57.206743 V	55.199286 S	15.000000		AIR	
IMS	--	-0.155000	1.079778	S		

D.1.





2. Dublet AMTIR 1 + ZnSe 2/60

Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (~3mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s malými odchýlkami v okne, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu -0.101mm(TH[IMS]).

Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) nie je veľmi výrazná a jej hodnota je takmer totožná pre vlnové dĺžky WAVELENGTHS 10μm. a 12μm – dublet je achromatický. Táto sústava dosahuje lepšie výsledky oproti predchádzajúcej kombinácii materiálov.

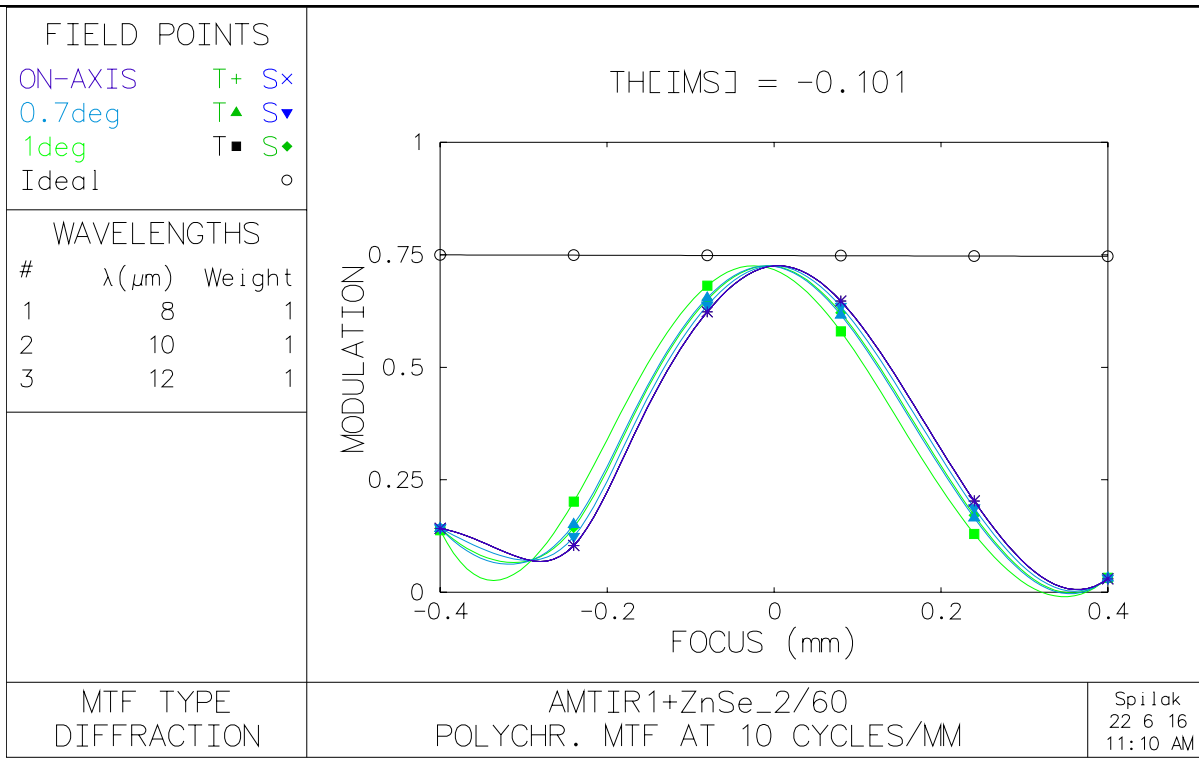
*REFRACTIVE INDICES

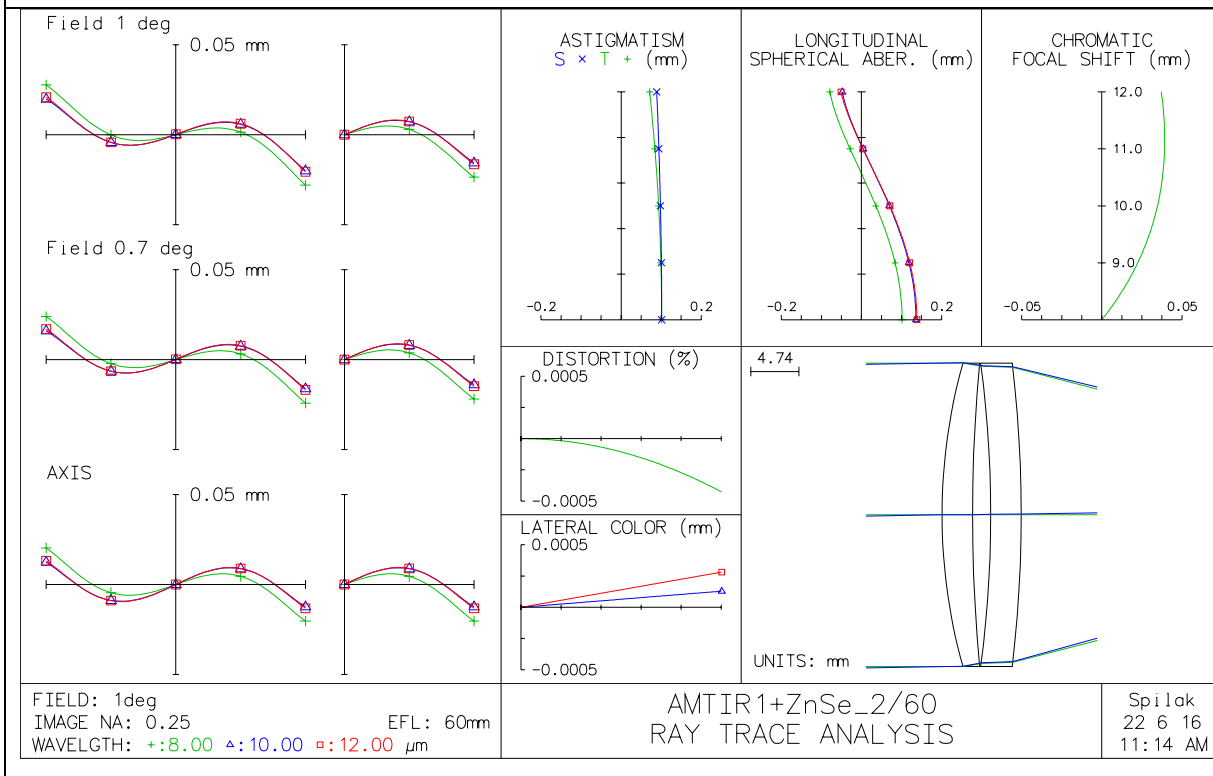
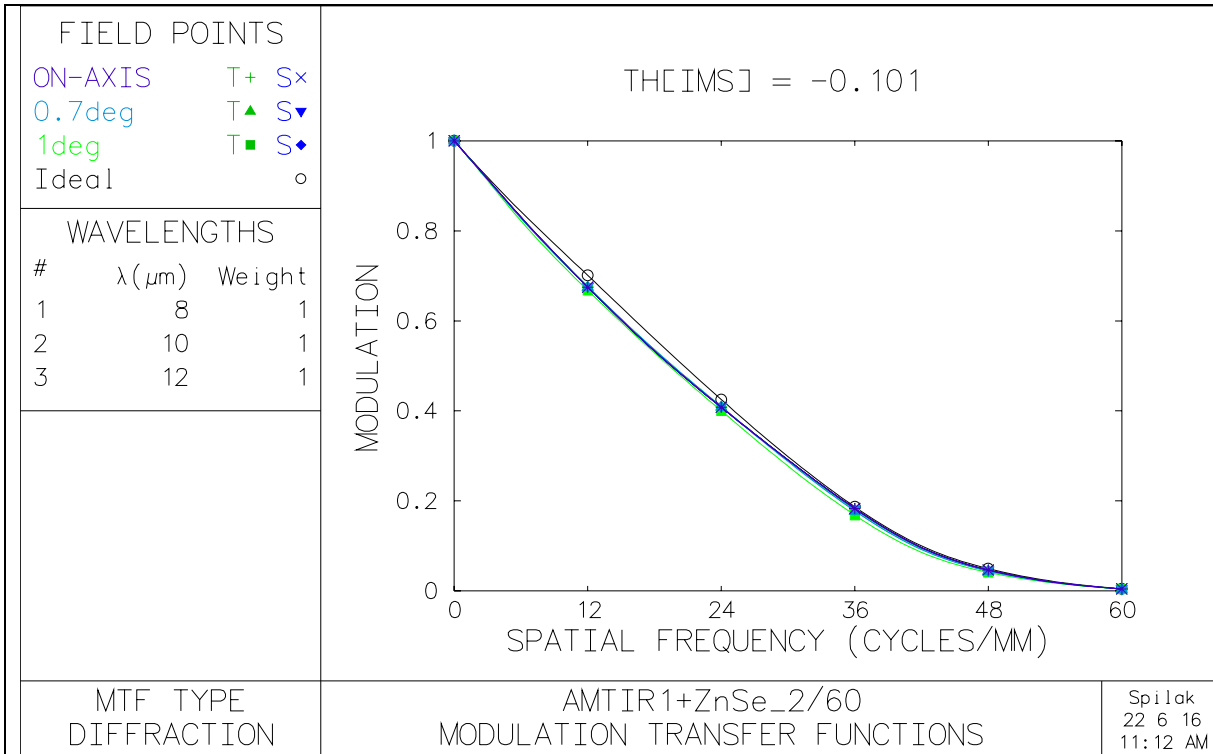
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	AMTR1	2.521138	2.519412	2.518264	1.3250e+03	120.000000
	MISC					
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNSE	2.417702	2.406575	2.393104	105.240898	--
	MISC					
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					

*LENS DATA

AMTIR1+ZnSe_2/60						
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	2.2031e+21	3.8455e+19	AIR		
AST	55.710357 V	3.000437	15.000000 AS	AMTR1	C	
2	157.746535 V	1.800262	15.002185	AIR		
3	-113.903229 V	3.000437	15.002185	ZNSE	C	
4	-127.246958 V	55.636967 S	15.002185	AIR		
IMS	--	-0.101285	1.070856 S			

D.2.





3.Dublet Ge +ZnS 2/60

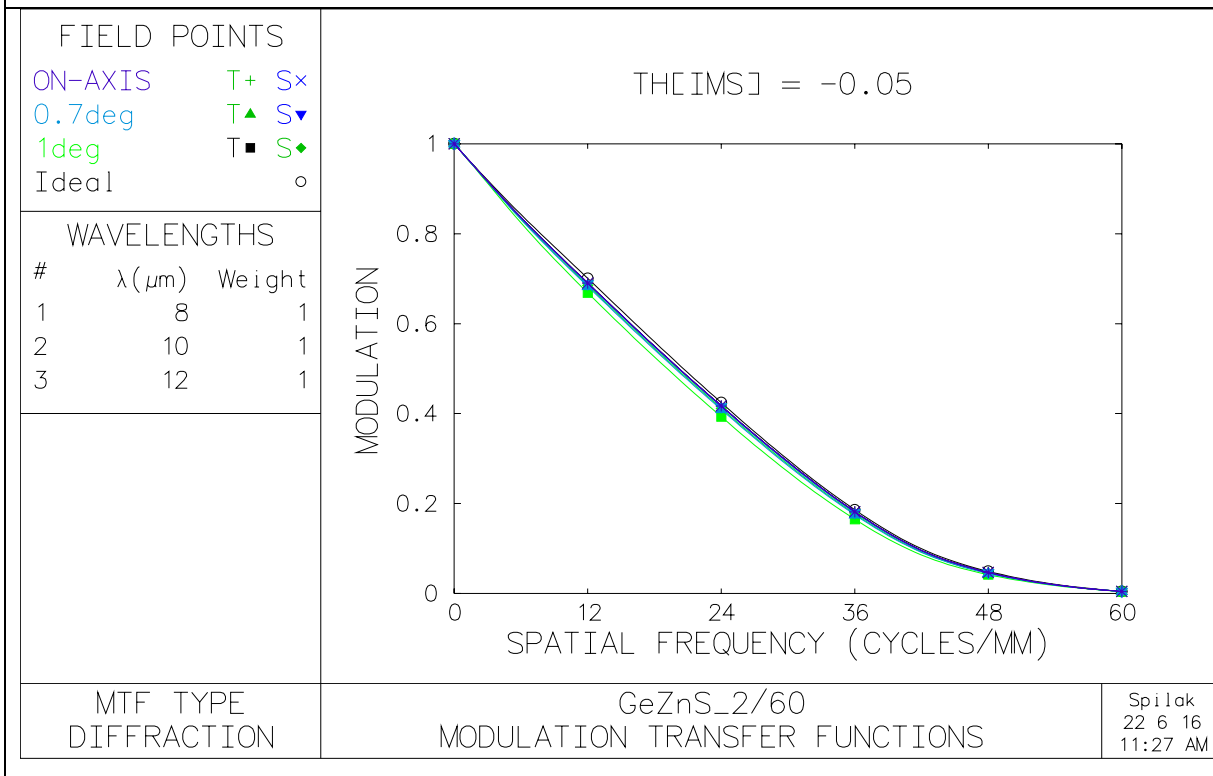
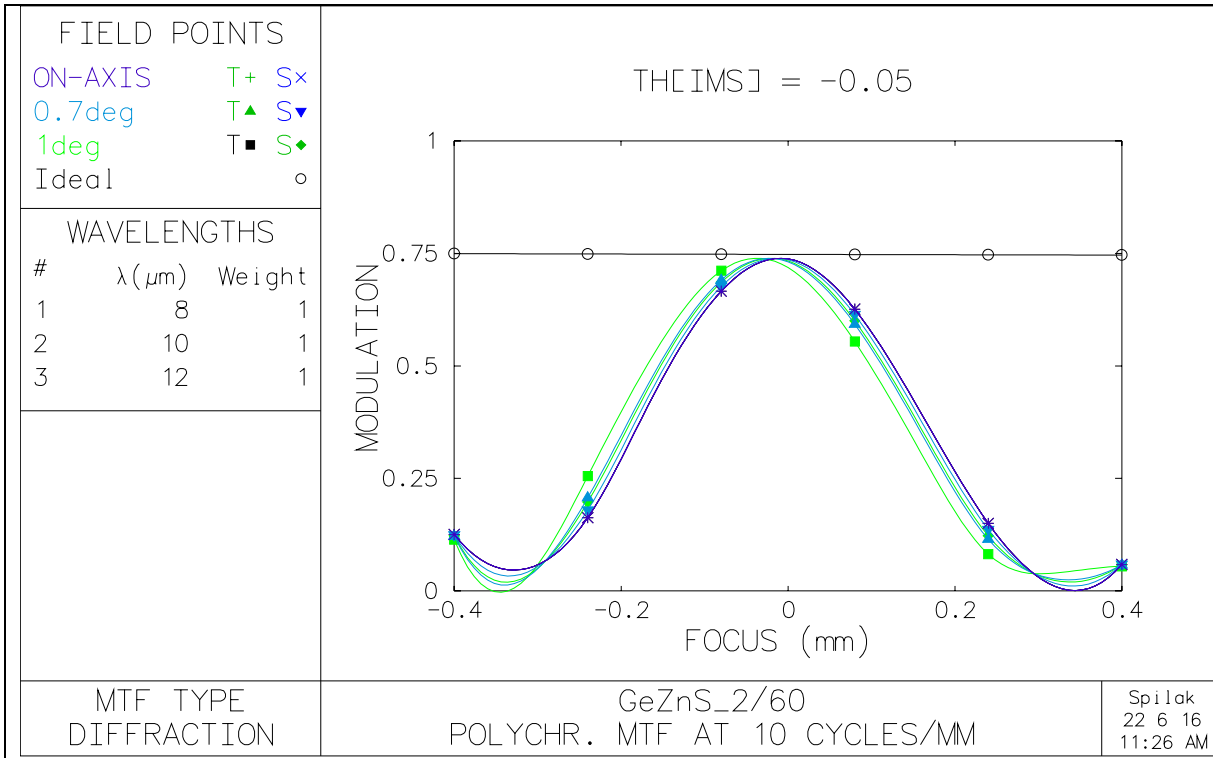
Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (~3mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

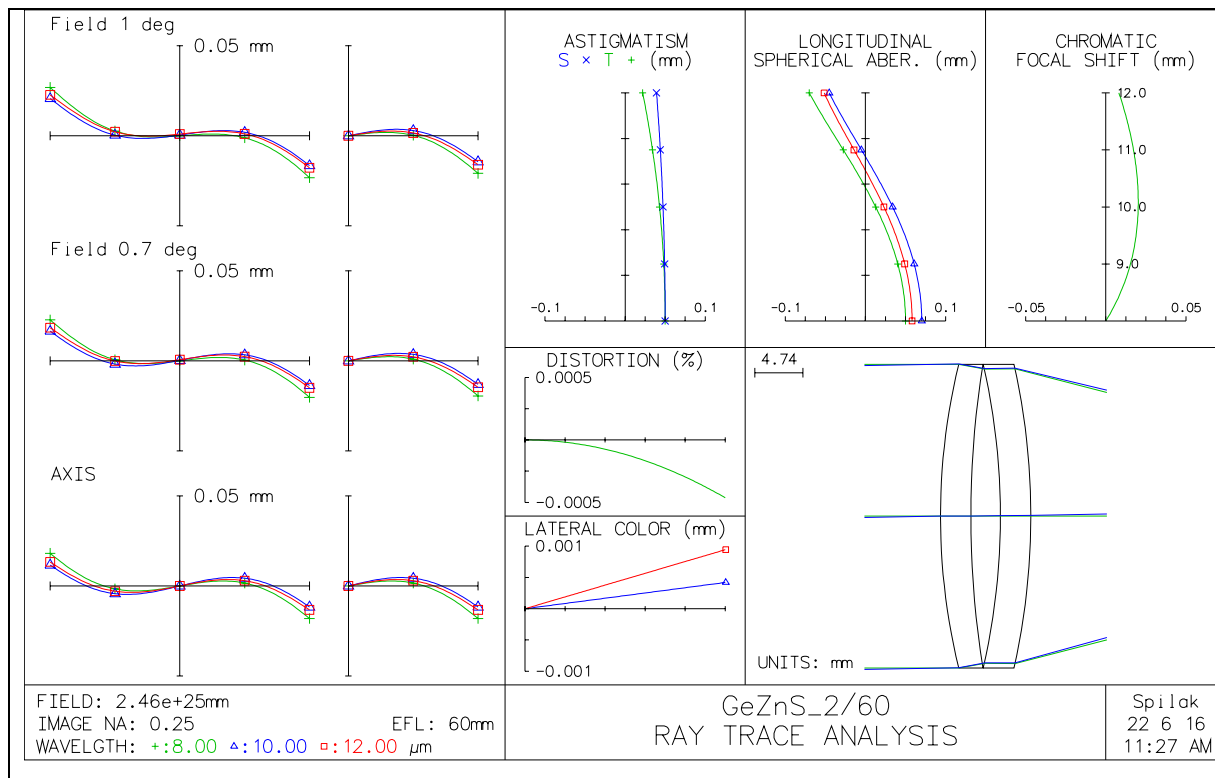
Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s takmer žiadnymi odchýlkami, vyplýva z ďalšieho okna, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu - 0.05mm(TH[IMS]).

Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) je veľmi malá a jej hodnota je takmer totožná pre vlnové dĺžky WAVELENGTHS 10μm. a 12μm – dublet je taktiež achromatický. Dobré výsledky sú zabezpečené vďaka vysokej hodnote indexu lomu Ge.

<u>*REFRACTIVE INDICES</u>						
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM	4.005343	4.003179	4.002286	3.3673e+03	--
	MISC					
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNS	2.222719	2.201554	2.175530	46.983800	--
	MISC					
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					
<u>*LENS DATA</u>						
GeZnS_2/60						
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	-1.4075e+27	1.4075e+21	AIR		
AST	63.475427 V	3.001191	15.000000 A	GERM	C	
2	95.716053 V	2.900000	15.000000	AIR		
3	-67.337680 V	3.001191	15.000000	ZNS	C	
4	-68.933123 V	54.866362 S	15.000000	AIR		
IMS	--	-0.050000	0.012560 S			

D.3.





4. Dublet Ge+ZnSe 2/60

Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (~3.14mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s malými odchýlkami v okne, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu -0.0209mm(TH[IMS]).

Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) nie je veľmi výrazná, dublet je achromatický. Kombinácia germánia s materiálom ZnSe dosiahlo menšiu pozdĺžnu vadu ako v predošlom prípade.

REFRACTIVE INDICES

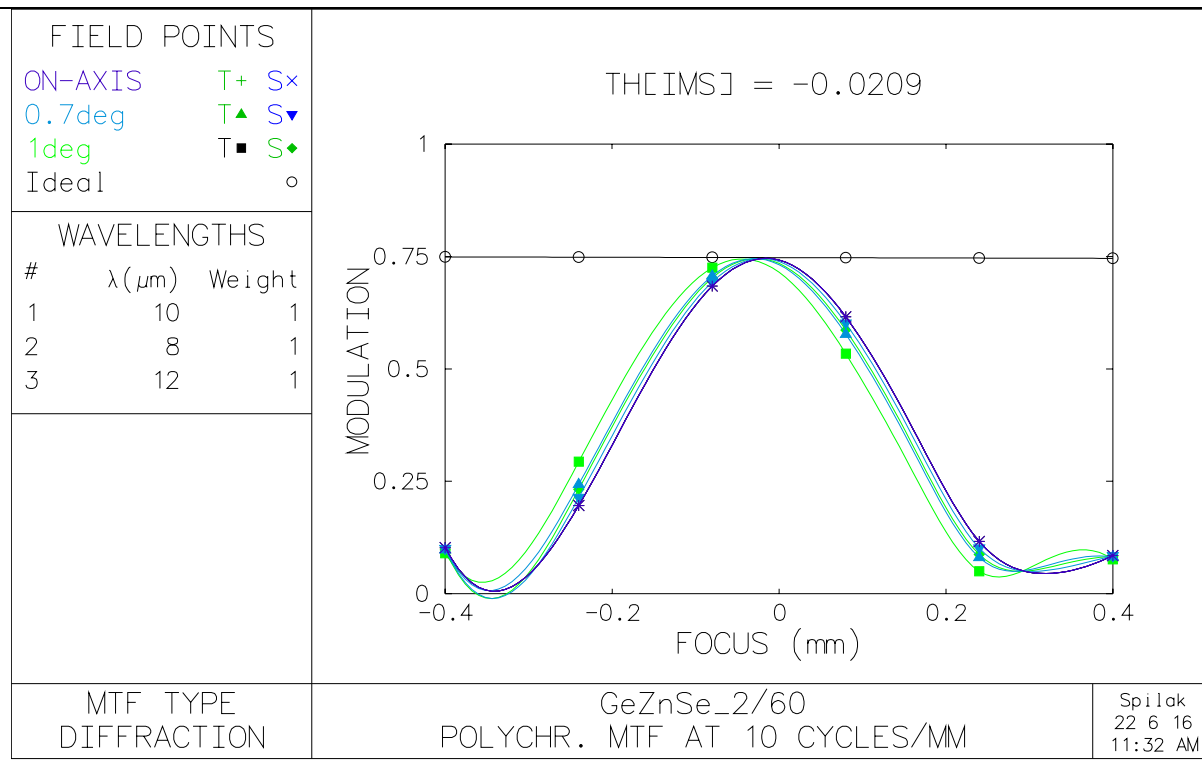
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNSE MISC	2.406575	2.417702	2.393104	57.183009	--
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					

LENS DATA

GeZnSe_2/60

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	6.4273e+21	1.1219e+20	AIR		
AST	64.158260 V	3.142338	15.005163 AS	GERM	C	
2	99.151220 V	1.571169	14.664246	AIR		
3	-262.214404 V	3.142338	14.664246	ZNSE	C	
4	-319.476651 V	55.163865 S	14.664246	AIR		
IMS	--	-0.020949	1.052529 S			

D.4.



5. Dublet ZnSe + ZnS 2/60

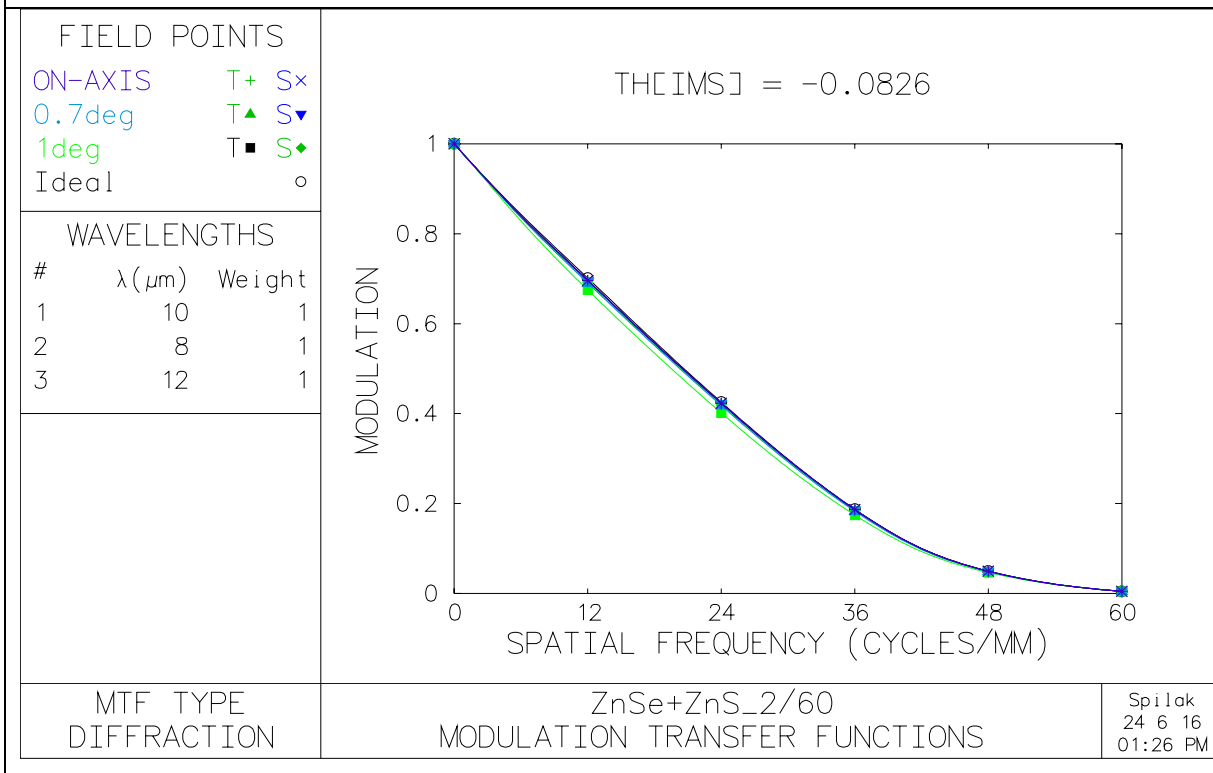
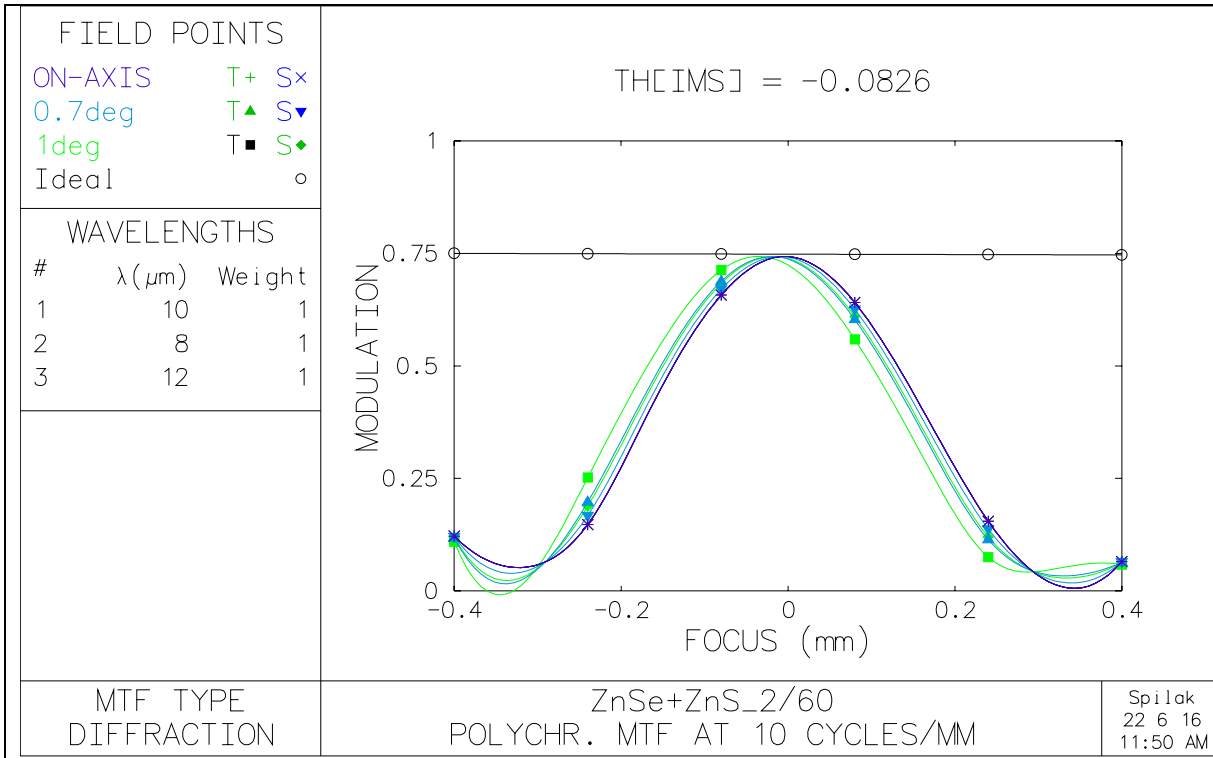
Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (~3.76mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

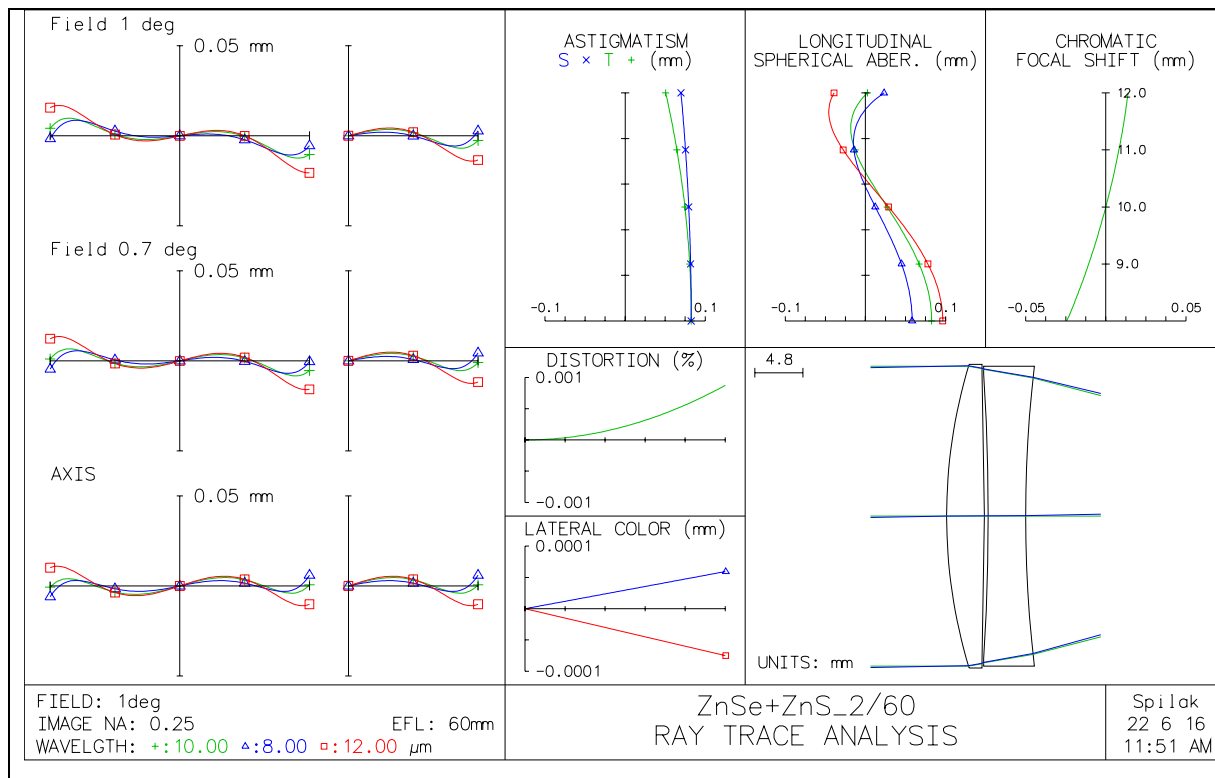
Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s malými odchýlkami v okne, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu -0.0826mm(TH[IMS]).

Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) nie je veľmi výrazná, dublet je pomerne dostatočne achromatický. Kombinácia ZnSe s materiálom ZnS dosiahlo dobré výsledky.

*REFRACTIVE INDICES						
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	ZNSE MISC	2.406575	2.417702	2.393104	57.183009	--
2	AIR MISC	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNS MISC	2.201554	2.222719	2.175530	25.462461	--
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					
*LENS DATA						
ZnSe+ZnS_2/60						
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE	RADIUS	GLASS	SPE NOTE
OBJ	--	3.0873e+20	5.3889e+18		AIR	
AST	52.501678 V	3.761130	15.200000	A	ZNSE	C
2	-451.610362 V	0.376113	14.399222	S	AIR	
3	-238.662604 V	3.761130	14.237772	S	ZNS	C
4	130.251554 V	54.252434	15.000000	S	AIR	
IMS	--	-0.082596	1.066456	S		

D.5.





6. Dublet Ge + AMTIR 1

Výsledok návrhu dubletu pri tejto kombinácii materiálov priniesol nasledujúce hodnoty polomerov krivosti uvedených v stĺpci RADIUS. Pomerne malá hrúbka materiálov THICKNESS (~3.2mm) zabezpečí dostatočnú vnútornú priepustnosť.

Navrhnutá optická sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave s malými odchýlkami v okne, kde je graf znázorňujúci priebeh funkcie MTF. K dosiahnutiu najoptimálnejšieho výsledku bolo treba posunúť rovinu zaostrenia o hodnotu -0.1mm (TH[IMS]).

Pozdĺžna sférická vada LONGITUDIAL SPHERICAL ABER.(mm) nie je veľmi výrazná, dublet je pomerne dostatočne achromatický. Kombinácia Ge s materiálom AMTIR1 dosiahlo horšie výsledky v porovnaní s predošlými dubletmi. Rozdiel Abbeových čísel je menší ako u predošlých sústav.

*REFRACTIVE INDICES

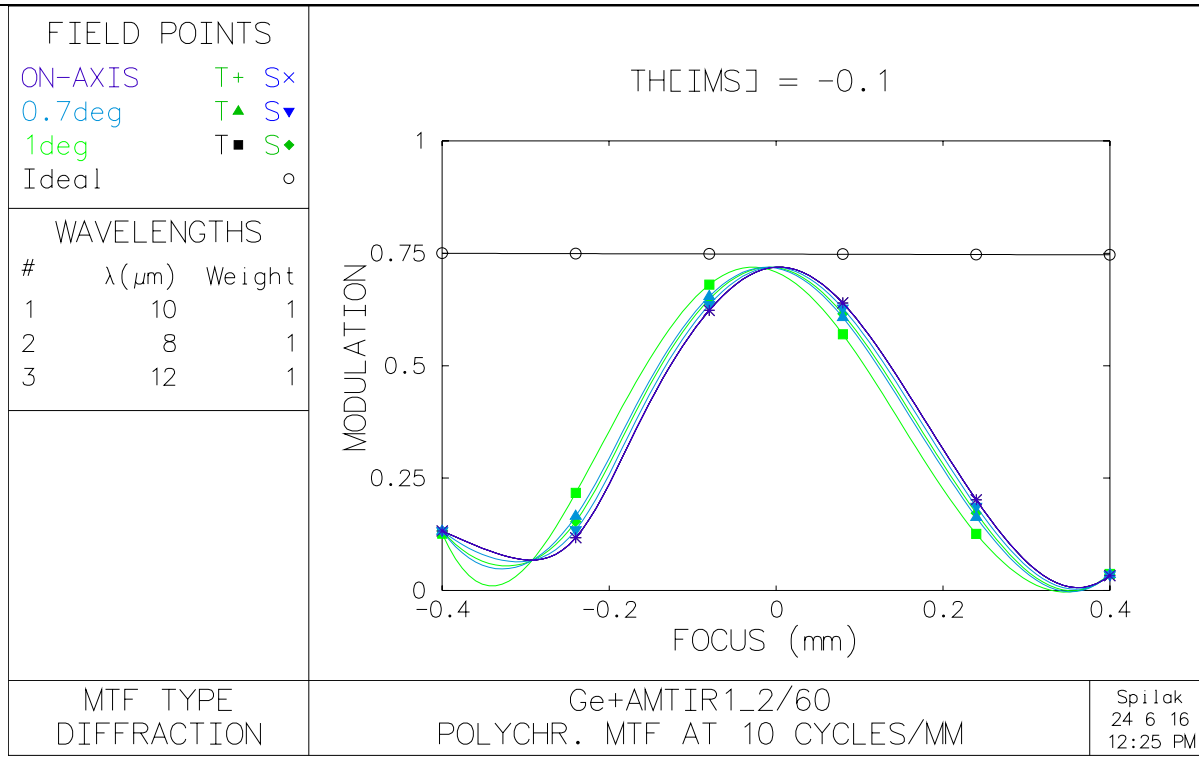
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
	MISC					
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	AMTR1	2.519412	2.521138	2.518264	528.797320	120.000000
	MISC					
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					

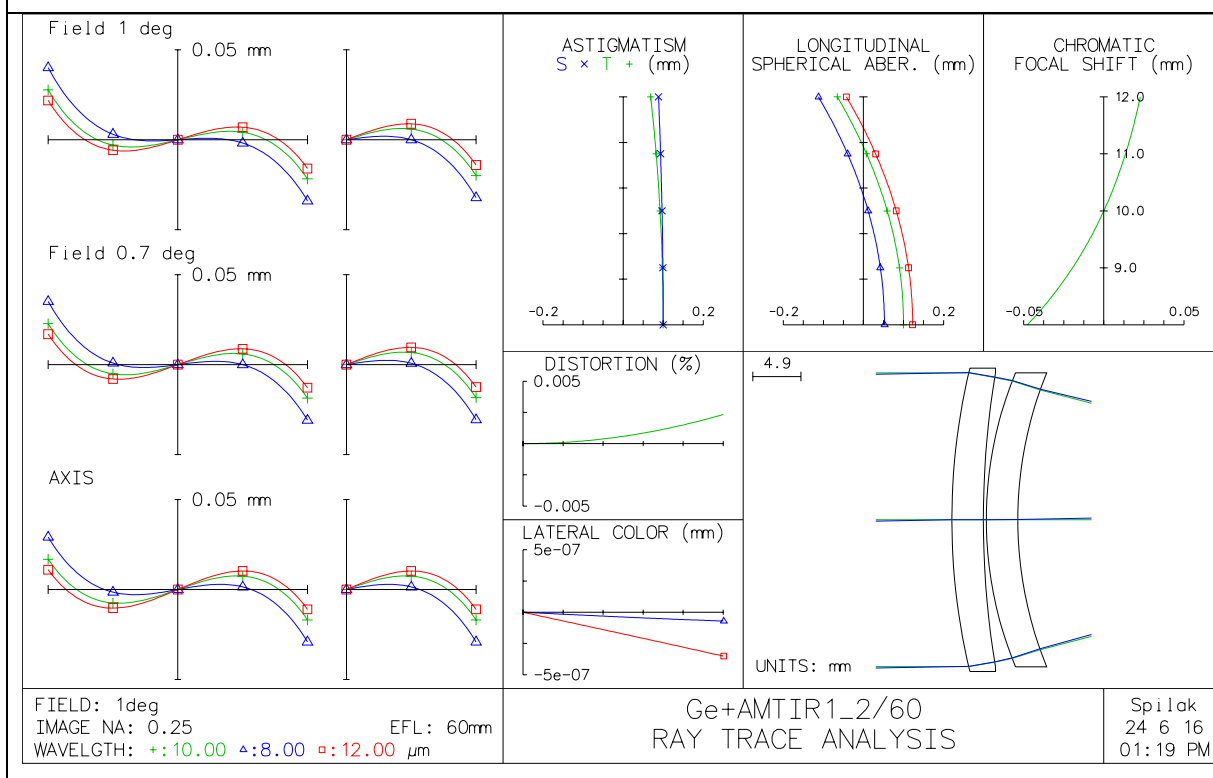
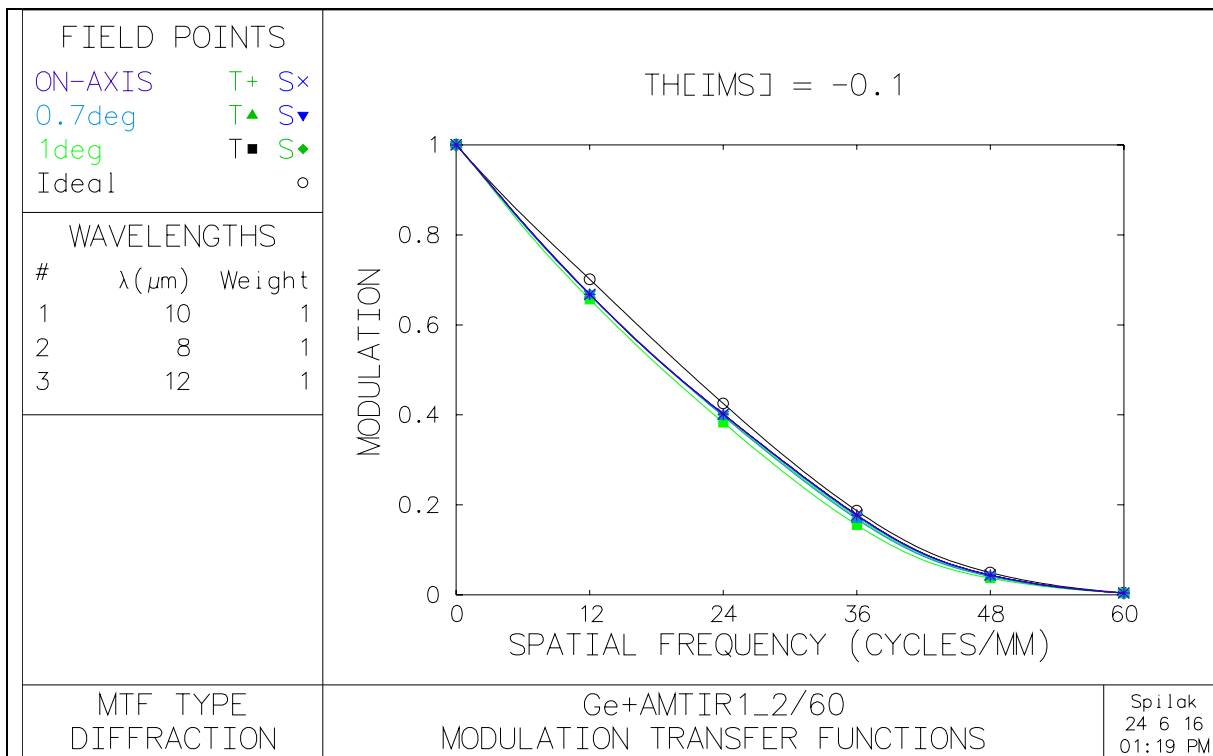
*LENS DATA

Ge+AMTIR1_2/60

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	3.7648e+24	6.5715e+22	AIR		
AST	66.614340 V	3.208235	15.505797 A	GERM	C	
2	92.627287 V	0.300112	15.005610	AIR		
3	39.347783 V	3.208235	15.005610	AMTR1	C	
4	39.729329 V	53.694738 S	15.005610	AIR		
IMS	--	-0.100036	1.070447 S			

D.6.





[DU].

5. Optický návrh tripletu pre pásmo LWIR

Najjednoduchší optický systém, kde je možné korigovať optické vady 3. radu je trojčlenná sústava –triplet. Uplatnenie tejto optickej sústavy sa našlo v mnohých typoch objektívov, či už snímacích, alebo projekčných. Pri konštrukcii návrhu dubletu kapitola (4.2.) je snaha čo najviac sa priblížiť realizácii fyzikálne dokonalej optickej sústave.

V porovnaní s dubletom je triplet schopný dosiahnuť difrakčný limit pri vyššej svetelnosti (nižšej hodnote clonového čísla c). Oproti riešeniu pre dublet sú pridané ďalšie rovnice, ktoré definujú podmienku pre korekciu chromatickej vady veľkosti pre parameter G , parameter C pre skreslenie a D pre astigmatizmus a pre Petzvalovú krivosť parameter P . Pre konštrukčný návrh tripletu vychádzame z rovníc:

$$K_1 + h_2 K_2 + h_3 K_3 = K, \quad (5.1)$$

$$\frac{K_1}{v_1} + h_2^2 \frac{K_2}{v_2} + h_3^2 \frac{K_3}{v_3} = E, \quad (5.2)$$

$$l_1 \frac{K_1}{v_1} + h_2 l_2 \frac{K_2}{v_2} + h_3 l_3 \frac{K_3}{v_3} = G, \quad (5.3)$$

$$\frac{K_1}{n_1} + \frac{K_2}{n_2} + \frac{K_3}{n_3} = P, \quad (5.4)$$

$$M_1 + h_2^4 M_2 + h_3^4 M_3 = A, \quad (5.5)$$

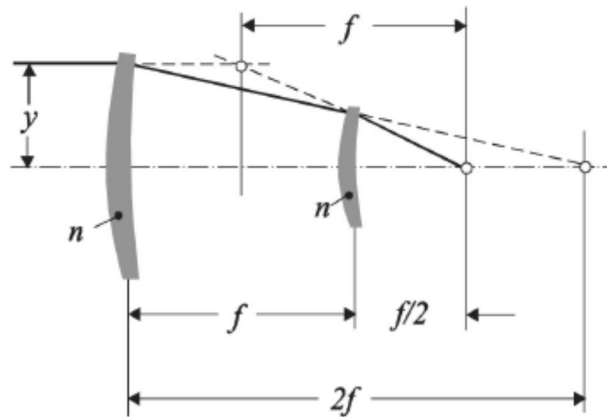
$$l_1 M_1 + N_1 + h_2^3 l_2 M_2 + h_2^2 N_2 + h_3^3 l_3 M_3 + h_3^2 N_3 = B, \quad (5.6)$$

$$l_1^2 M_1 + 2l_1 N_1 + K_1 + h_2^2 l_2^2 M_2 + 2h_2 l_2 N_2 + K_2 + h_3^2 l_3^2 M_3 + 2h_3 l_3 N_3 + K_3 = C, \quad (5.7)$$

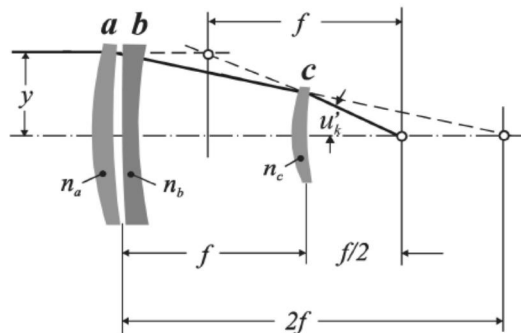
$$l_1^3 M_1 + 3l_1^2 N_1 + \frac{l_1}{n_1} \left(3K_1 + \frac{K_1}{n_1} \right) + l_2^3 h_2 M_2 + 3l_2^2 N_2 + \frac{l_2}{h_2} \left(3K_2 + \frac{K_2}{n_2} \right) + l_3^3 h_3 M_3 + 3l_3^2 N_3 + \frac{l_3}{h_3} \left(3K_3 + \frac{K_3}{n_3} \right) = D. \quad (5.8)$$

Pri riešení tripletu získavame osem rovníc a dvanásť parametrov ($r_1, r_1', n_1, d_1, r_2, r_2', n_2, d_2, r_3, r_3', n_3, d_3$). Ich riešenie je zdĺhavé a podmienky je možné splniť len sedem z ôsmich podmienok. Existuje viac spôsobov riešenia. Jeden spôsob je, že volíme skla (n_1 a v_1), (n_2 a v_2) a (n_3 a v_3). Ďalší spôsob je, že volíme skla (n_1 a v_1), (n_2 a v_2), a index lomu n_3 a Abbeovo číslo v_3) ostáva neurčené. Obidva spôsoby sú pomerne zdĺhavé, preto ďalší spôsob riešenia je modifikácia druhej varianty a namiesto rovnice (5.4) použiť rovnicu kde parameter p ovplyvňuje Petzvalovú krivosť:

$$K_1 + K_2 + K_3 = p. [1] \quad (5.9)$$



Obr. 24. Netmelený dublet, Petzvalov objektív použitý ako počiatočná konfigurácia pre návrh tripletu. [16]



Obr. 25. Navrhovaný triplet. [16]

Ďalšia možnosť ako postupovať je zvoliť jednoduchší prístup, kde vychádzame z dubletu, ktorý bol vypočítaný a optimalizovaný v kapitole 4.4. a pridáme k nemu šošovku z ďalšieho materiálu Obr.25.

Navrhovaný triplet bude riešený pre ohniskovú vzdialenosť 60mm clonové číslo 1.4, úzke zorné pole 2° a s uvažovaným pozorovaným predmetom v nekonečnu. Budú použité iba sférické plochy šošoviek.

Postupne obmieňame kombináciu materiálov a sledujeme priebeh funkcie MTF. Vykorigovaným dubletom ponechávame ich pôvodné parametre a pri pridanej tretej šošovke meníme vzdialenosť od dubletu a polomery krivosti r_3 a r_3' , prípadne vzdialenosť prvého členu od ostatných dvoch, ktoré sú v tesnej blízkosti(ako príklad triplet T.1.) .

Pri ďalšom kroku zvolíme v programe OSLO podmienku Variable(zabezpečí, že pri optimalizácii sa prepočítavajú len vybrané parametre), čo umožní pri iterácií dopočítať ich hodnoty.

Volíme len hodnotu Abbeovho čísla v_3 indexu lomu n_3 z katalógu MISC(podobne ako pri dubletoch), ktorý obsahuje program OSLO. Tripletly sú riešené pre ohniskovú vzdialenosť (v programe OSLO označené EFL) 60 mm a clonové číslo 1.4.Vybraná sústava s najlepšimi výsledkami bude riešená pre nižšie hodnoty clonového čísla, až na hodnotu $c_A = 1$. Sledujeme, pri ktorej najnižšej svetelnosti je možné sústavu ešte označiť za relatívne fyzikálne dokonalú. Hrúbky jednotlivých členov sa pohybujú v rozmedzí od 3-5mm. Z dôvodu vysokej hmotnosti, priepustnosti materiálov a ceny sa hrubšími šošovkami nepočíta.

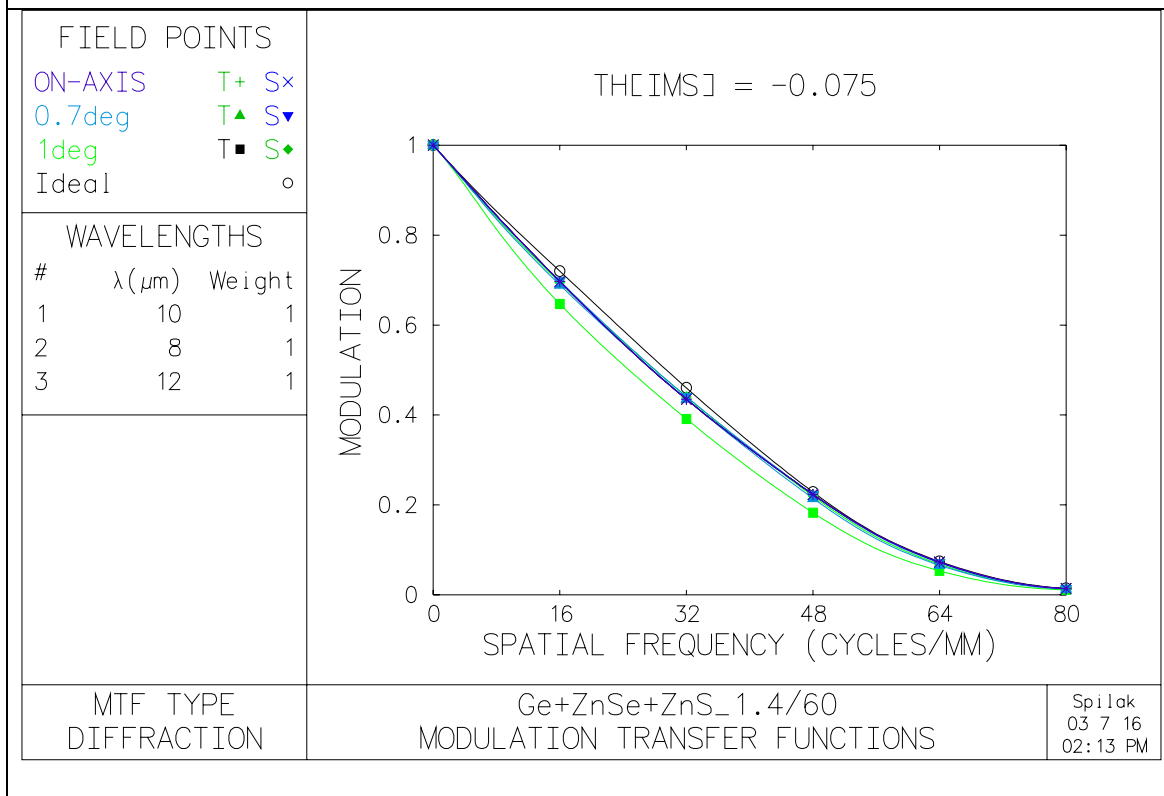
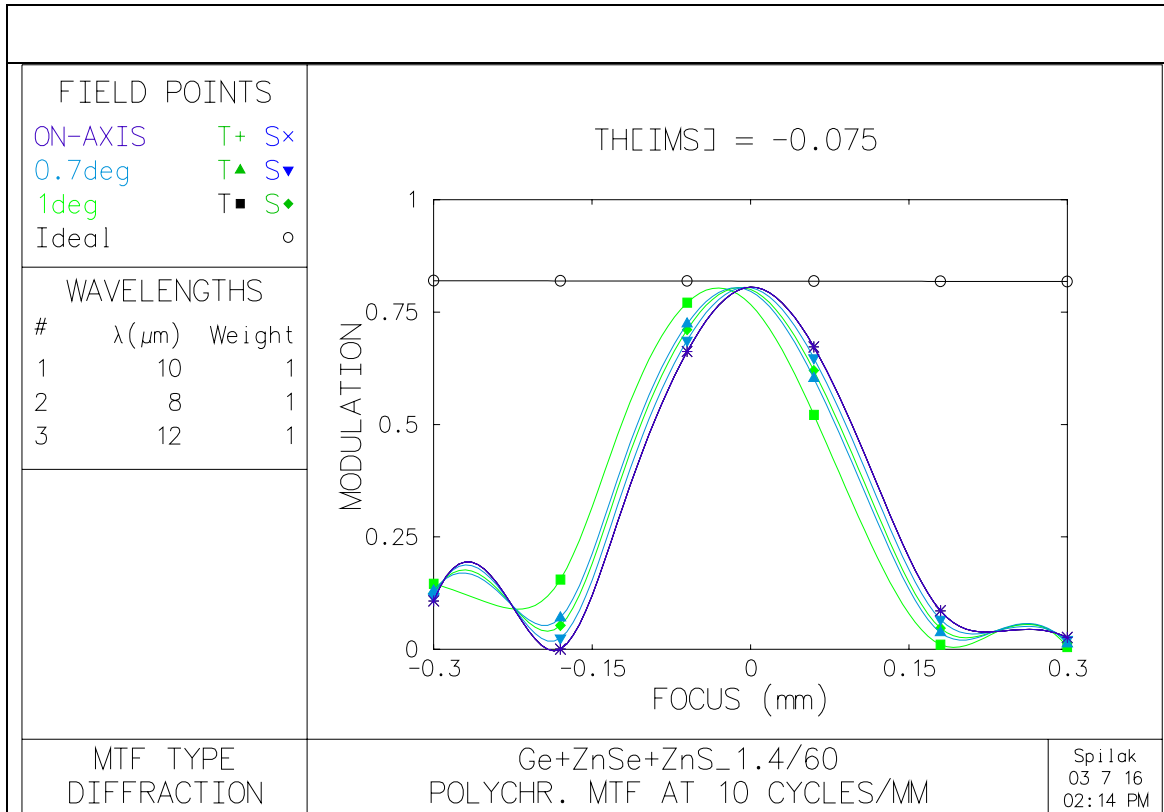
Vyhodnotenie sústav je totožné ako pri dubletoch. Každá sústava obsahuje štyri okná z programu OSLO ako v kapitole 4.4., kde sa nachádza vysvetlenie každého okna.

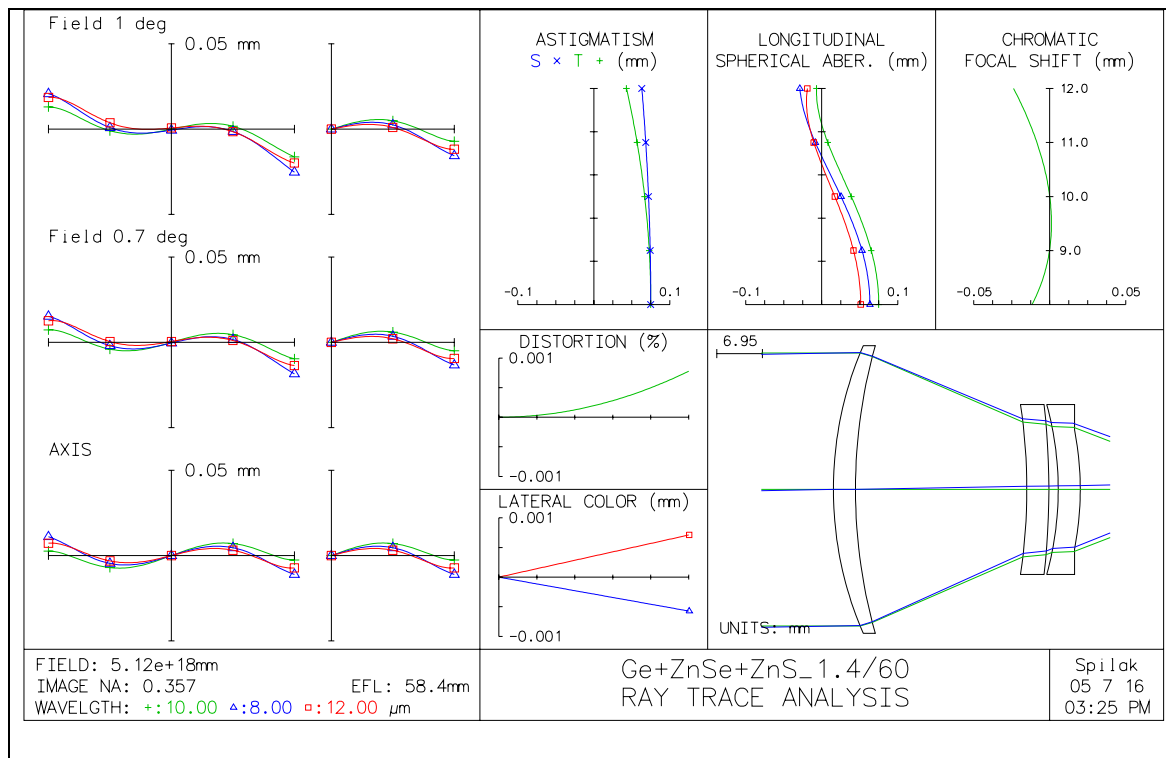
Triplet Ge+ZnSe+ZnS 1.4/60

Riešením tripletu kombinácie týchto materiálov sa podarilo dosiahnuť najlepšie výsledky. Neskôr bola použitá pre ďalšiu analýzu Obr.26, kde sa zisťovalo, pri akej najvyššej svetelnosti je triplet schopný dosiahnuť fyzikálne dokonalú optickú sústavu.

Podobne si všímame jednotlivé vyhodnocovacie okná , kde sa nachádzajú parametre optickej sústavy ako v predošlom prípade pri dubletoch a vyhodnocujeme veľkosť vad a kvalitu zobrazenia.

<u>*REFRACTIVE INDICES</u>						
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNSE MISC	2.406575	2.417702	2.393104	57.183009	--
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	ZNS MISC	2.201554	2.222719	2.175530	25.462461	--
6	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
7	IMAGE SURFACE					
<u>*LENS DATA</u>						
se+ZnSe+ZnS_1.4/60						
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	-2.9329e+20	5.1194e+18	AIR		
AST	55.50	1 V	3.365155	22.000000	A	GERM C
2	81.56	2 V	26.126670	22.000000		AIR
3	-88.46	9 V	3.365155	13.000000		ZNSE C
4	-117.72	9 V	1.425091	13.000000		AIR
5	-49.279752	V	3.365155	13.000000		ZNS C
6	-47.289606	V	23.865581	9.122181	S	AIR
T.1.	IMS	--	-0.075000	1.045283	S	





Triplet Ge+ZnS+ZnSe 1.4/60

Z predchádzajúceho tripletu je už zrejme, že optické systavy s vyššou svetelnosťou dosahujú vyššie hraničné priestorové frekvencie, ktoré je schopná zobrazit' fyzikálne dokonalá optická sústava. Táto sústava sa blíži fyzikálne dokonalej sústave, nedosahuje však úplne jej kvalitu. Pribeh pozdĺžnej sférickej vady pre 8μm 10μm sa v určitej vzdialenosti na horizontálnej osi pretínajú.

T.2.

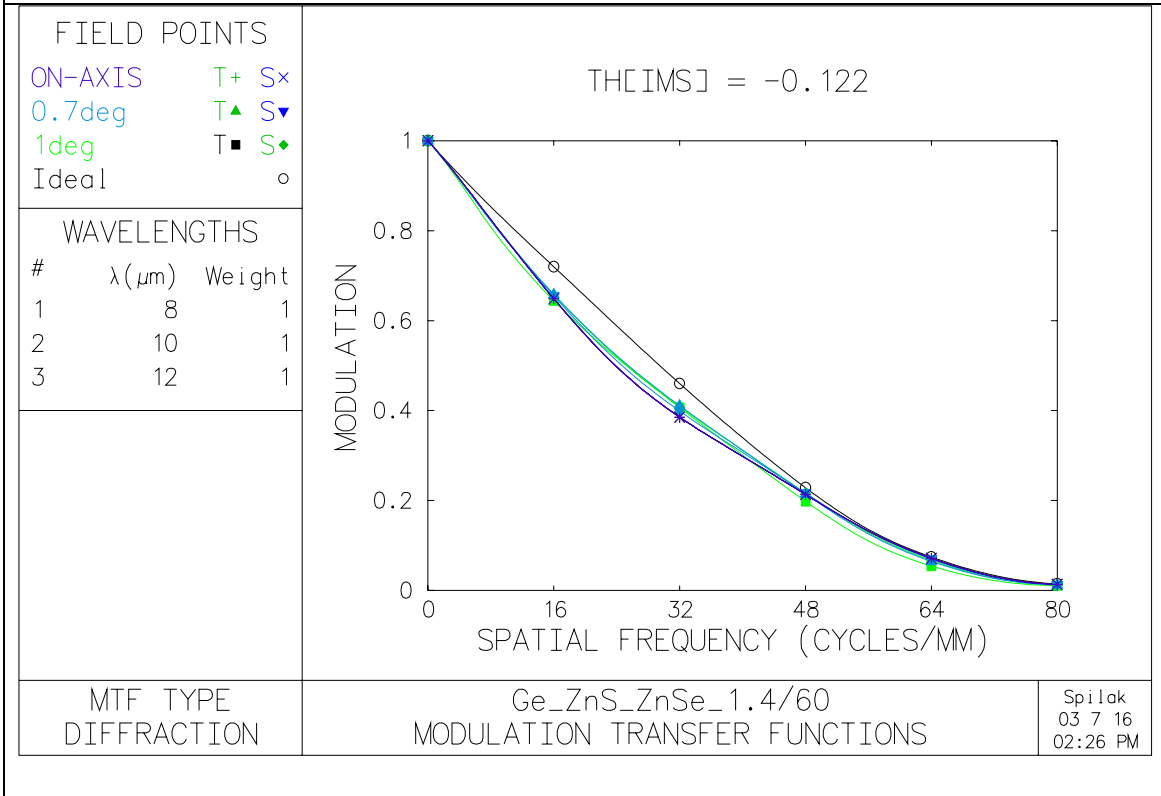
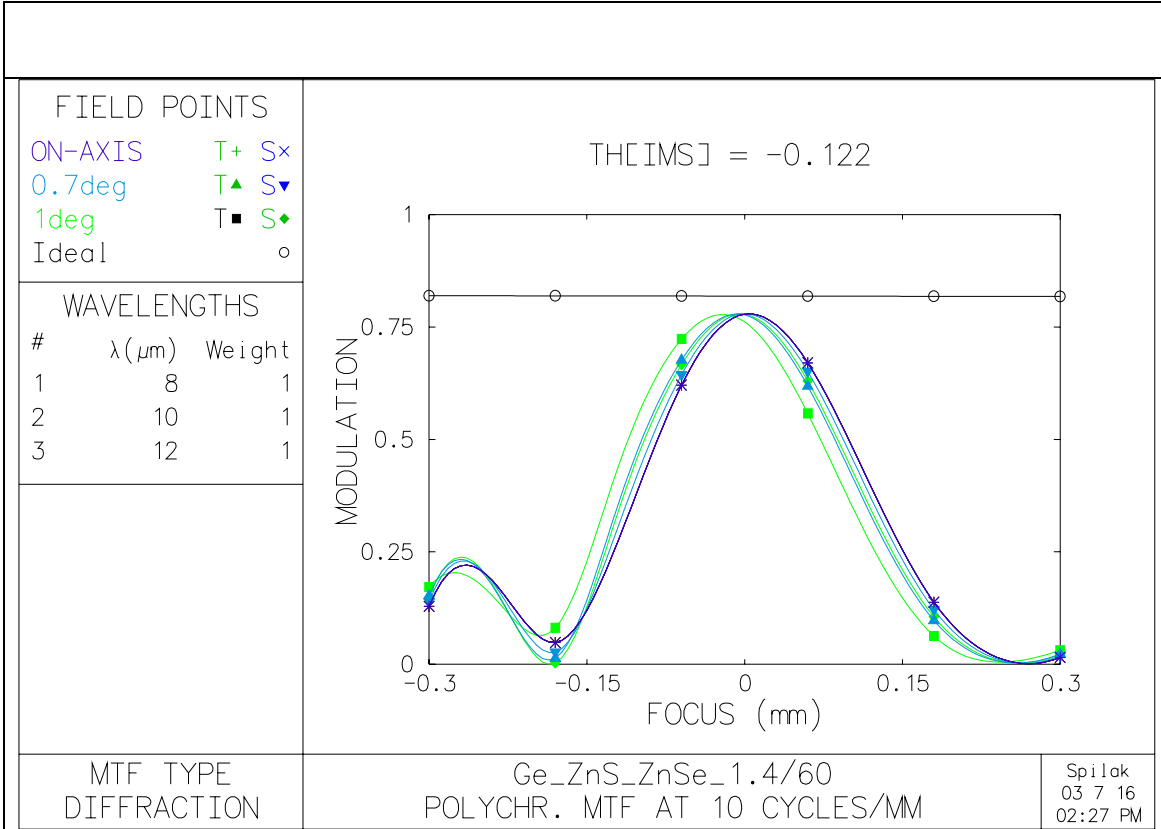
*REFRACTIVE INDICES

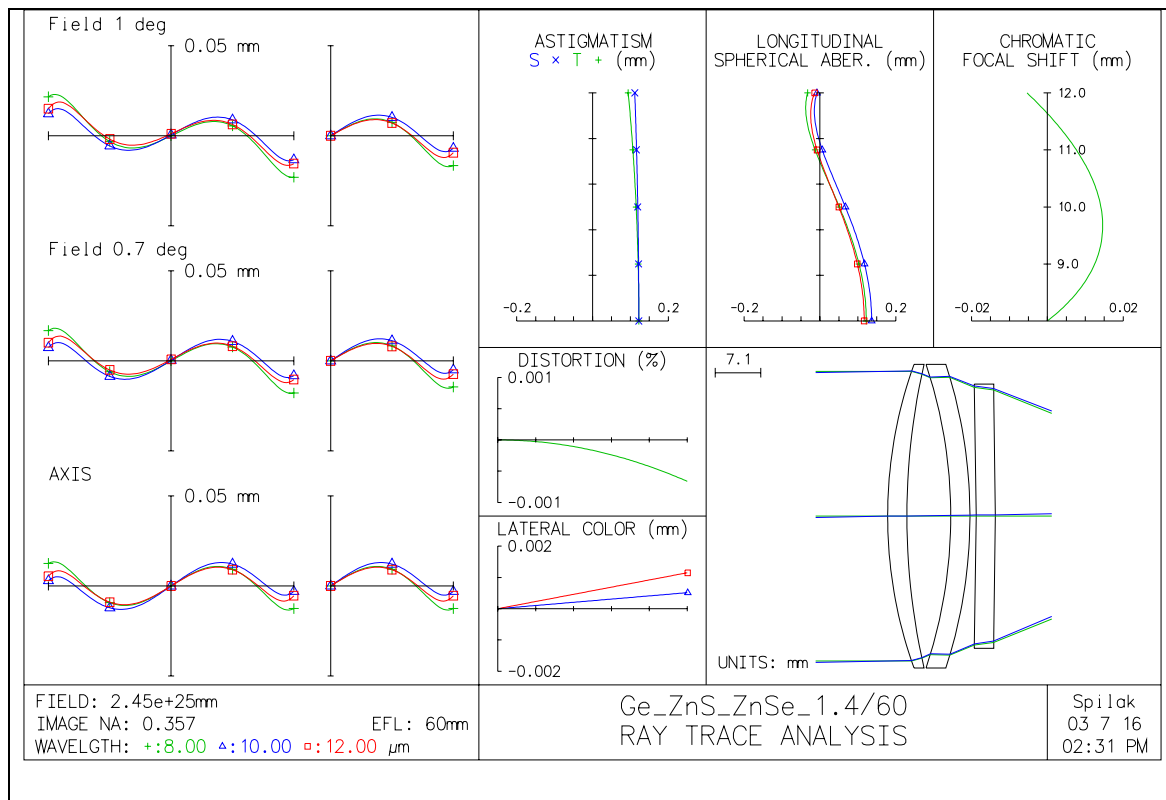
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM	4.005343	4.003179	4.002286	3.3673e+03	--
	MISC					
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNS	2.222719	2.201554	2.175530	46.983800	--
	MISC					
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	ZNSE	2.417702	2.406575	2.393104	105.240898	--
	MISC					
6	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
7	IMAGE SURFACE					

*LENS DATA

Ge_ZnS_ZnSe_1.4/60

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	-1.4053e+27	2.4530e+25	AIR		
AST	63.379833	3.003264	22.478553	GERM	C	
2	95.571905	6.841299	22.478553	AIR		
3	-67.236270	3.003264	22.478553	ZNS	C	
4	-68.829311	0.977328	22.478553	AIR		
5	-629.288034	3.003264	19.546568	ZNSE	C	
6	-624.157988	48.631735	17.570464	AIR		
IMS	--	-0.122166	1.088811			S





Triplet Ge+Ge+Ge 1.4/60

Táto optická sústava, kde boli použité všetky tri členy z Germánia poukazuje na fakt, že pre každú vlnovú dĺžku má pozdĺžna sférická aberácia inú hodnotu. Priebeh každej tejto vady je kopijou predchádzajúcej posunutej o malú vzdialenosť v smere horizontálnej osi.

T.3.

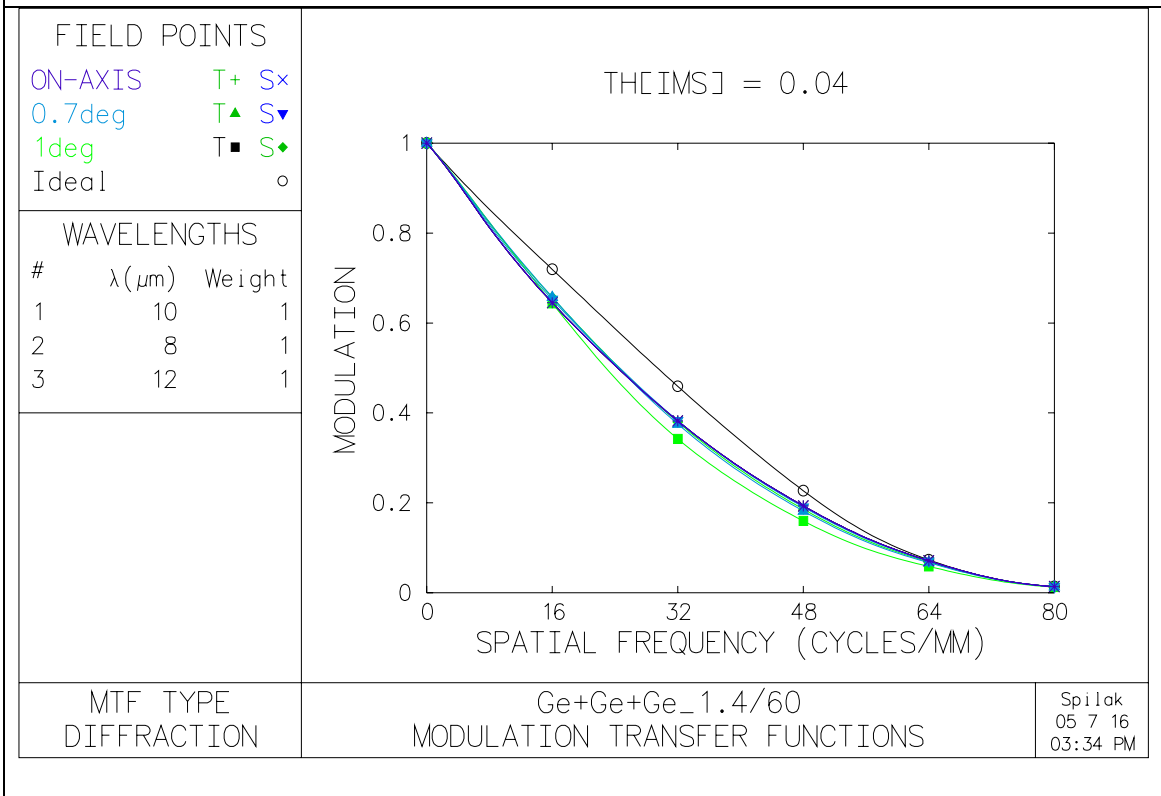
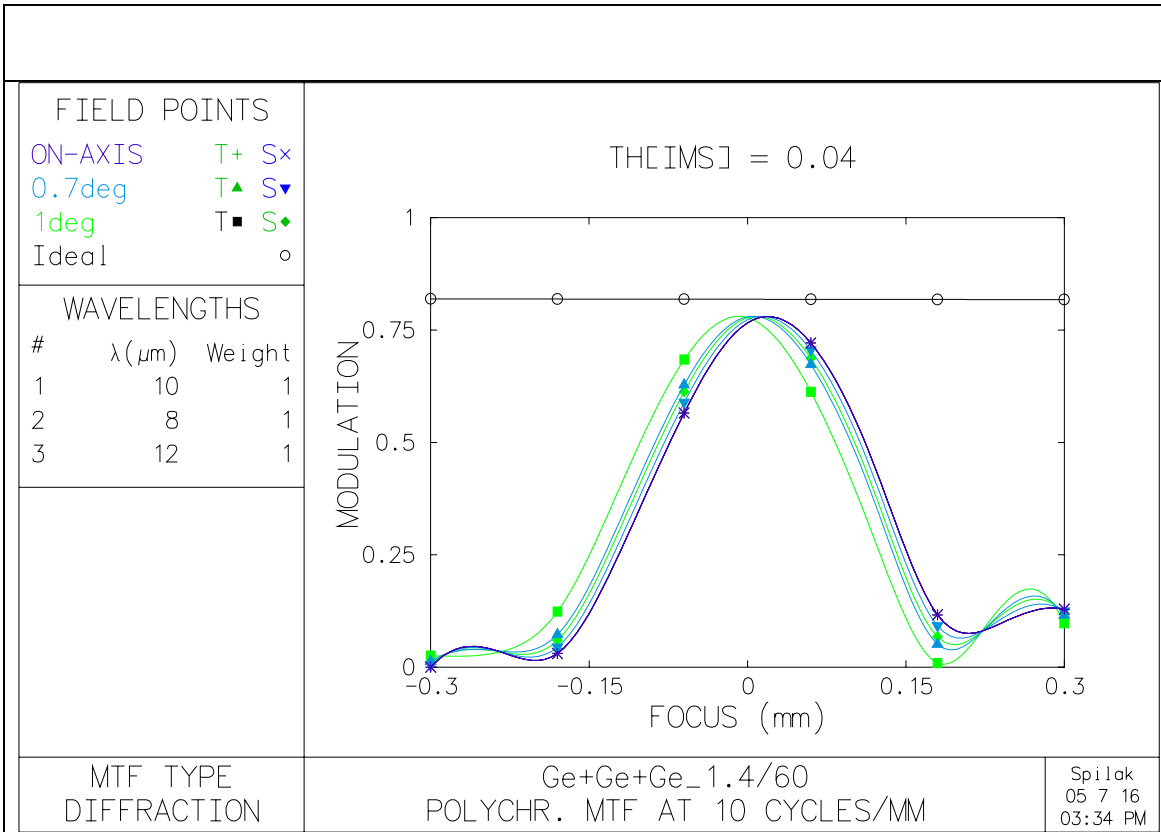
REFRACTIVE INDICES

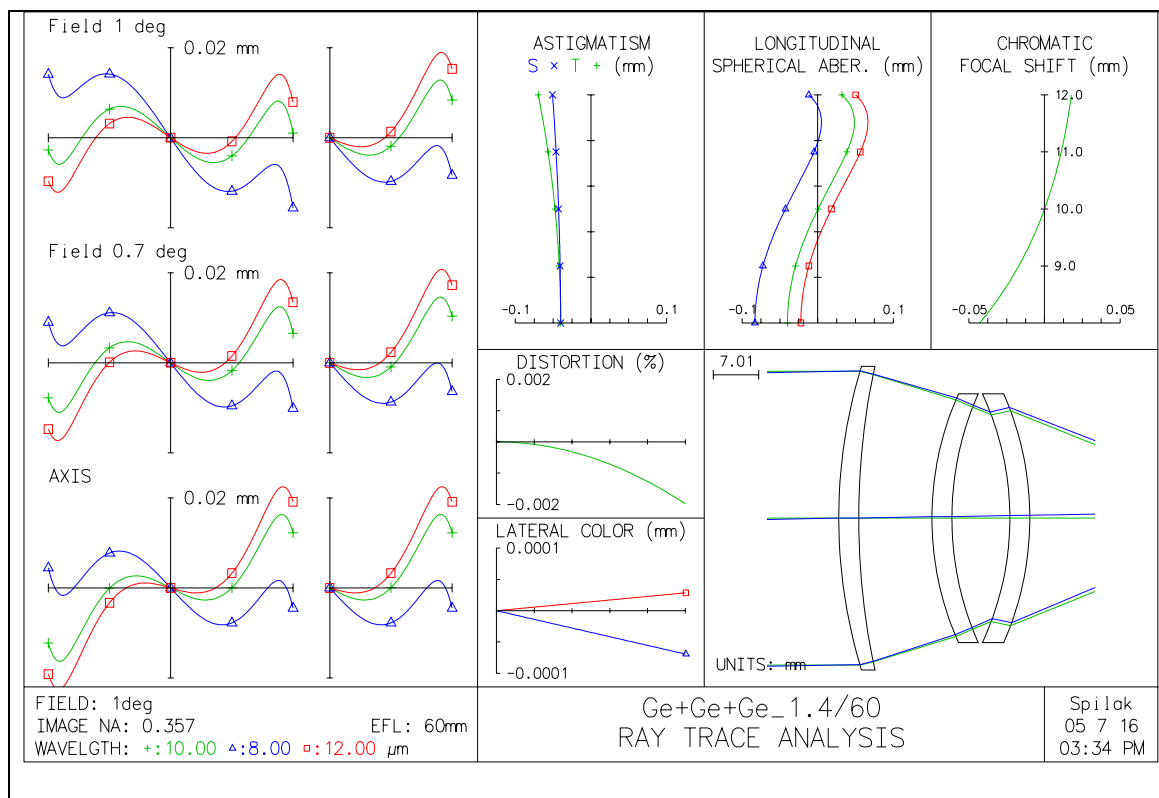
SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
6	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
7	IMAGE SURFACE					

LENS DATA

Ge+Ge+Ge_1.4/60

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	4.0360e+24	7.0448e+22	AIR		
AST	71.412910	3.084681	22.169881	GERM	C	
2	99.299701	11.313755	22.169881	AIR		
3	42.182203	3.084681	18.138993	GERM	C	
4	42.591235	8.945724	18.138993	AIR		
5	-40.917969 V	3.084681	18.138993	GERM	C	
6	-42.884075 V	38.110849 S	18.138993	AIR		
IMS	--	0.040047	1.062274	S		





Triplet Ge+ AMTR1+ZnS 1.4/60

Optická sústava s touto kombináciou má pre určité priestorové frekvencie dostatočný kontrast, nie však pre úplne všetky. Pre nižšie hodnoty priestorových frekvencií sa priebeh krivky MTF odchyľuje od fyzikálne dokonalej sústavy, pre vyššie priestorové frekvencie od približne 50č/mm začína krivka kopírovať priebeh FDS.

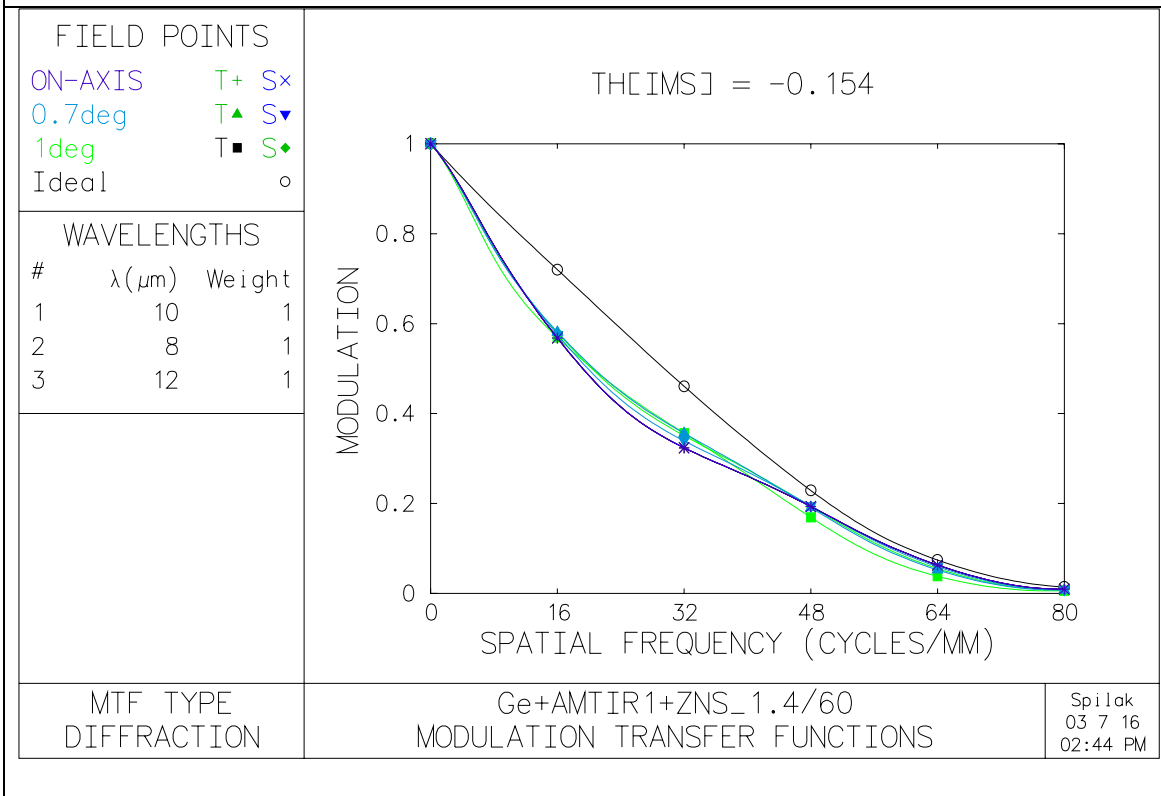
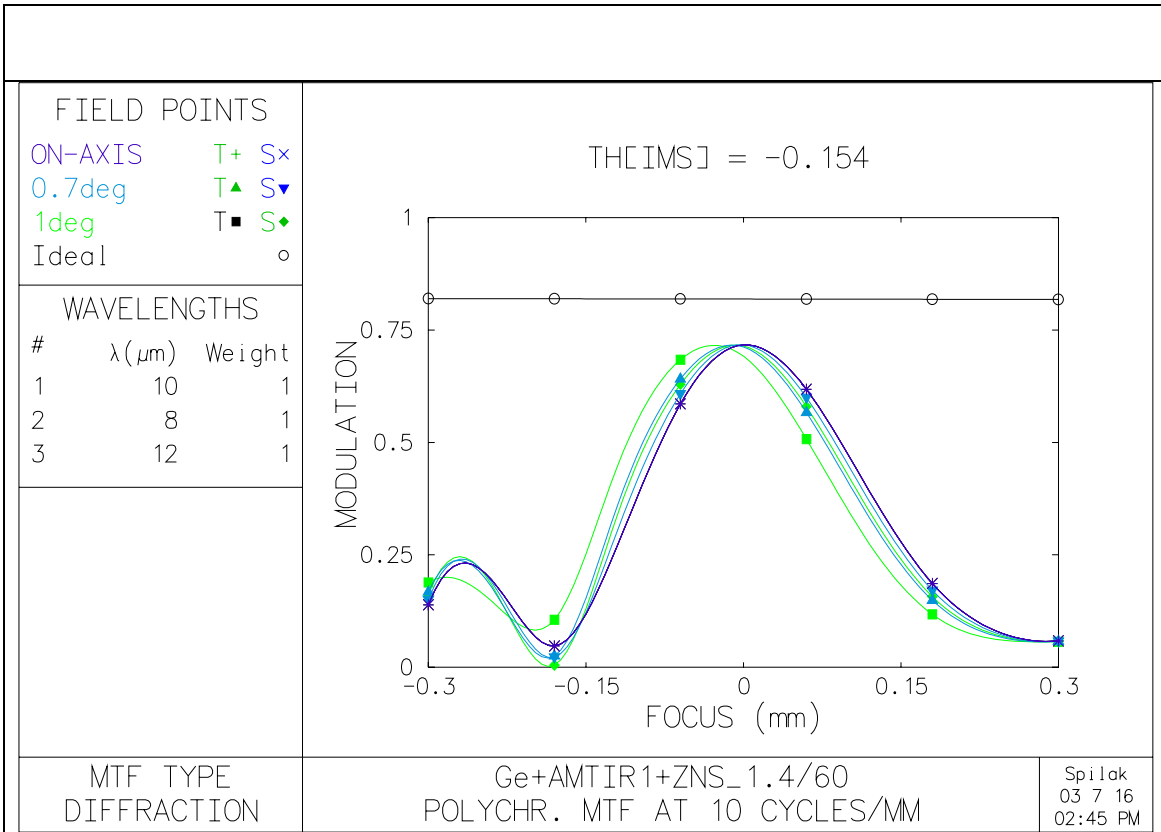
T.4.

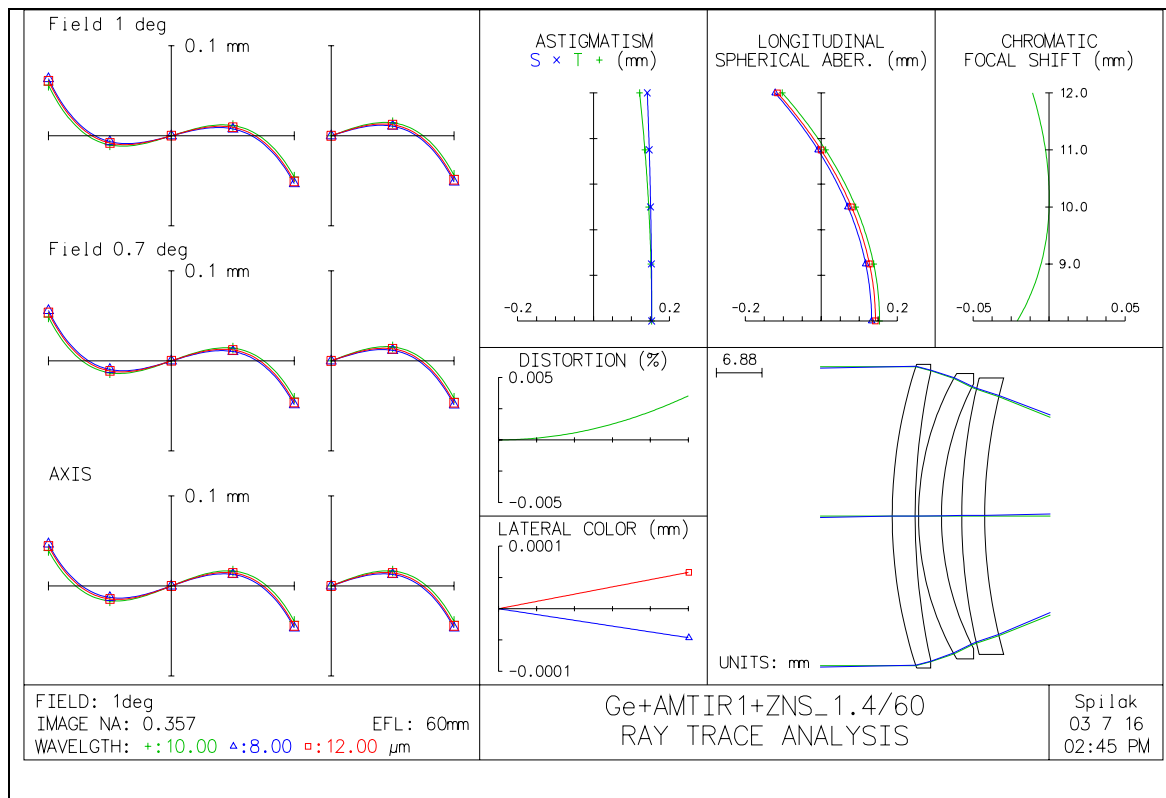
***REFRACTIVE INDICES**

SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	GERM MISC	4.003179	4.005343	4.002286	982.474223	--
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	AMTR1 MISC	2.519412	2.521138	2.518264	528.797320	120.000000
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	ZNS MISC	2.201554	2.222719	2.175530	25.462461	--
6	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
7	IMAGE SURFACE					

***LENS DATA**
Ge+AMTR1+ZNS_1.4/60

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	3.7514e+24	6.5480e+22	AIR		
AST	66.376883	3.465112	21.780702	GERM	C	
2	92.297102	0.511697	20.604472	AIR		
3	39.207521	3.465112	20.460360	AMTR1	C	
4	39.587708	3.070182	18.982480	AIR		
5	76.006703	3.465112	19.800638	ZNS	C	
6	69.767046	47.032519	19.800638	AIR		
IMS	--	-0.153509	1.099143			





Triplet AMTIR 1+ ZnSe+ZnS 1.4/60

Táto kombinácia materiálov už nedosahuje dostatočnú optickú kvalitu. Vady sústavy sú dosť výrazné a dochádza k výraznému poklesu kontrastu pre vyššie priestorové frekvencie. Materiály nemajú až tak výrazný rozdiel v indexe lomu oproti predchádzajúcim variantom, kde prvý člen tvorila šošovka z Germánia s vysokým indexom lomu.

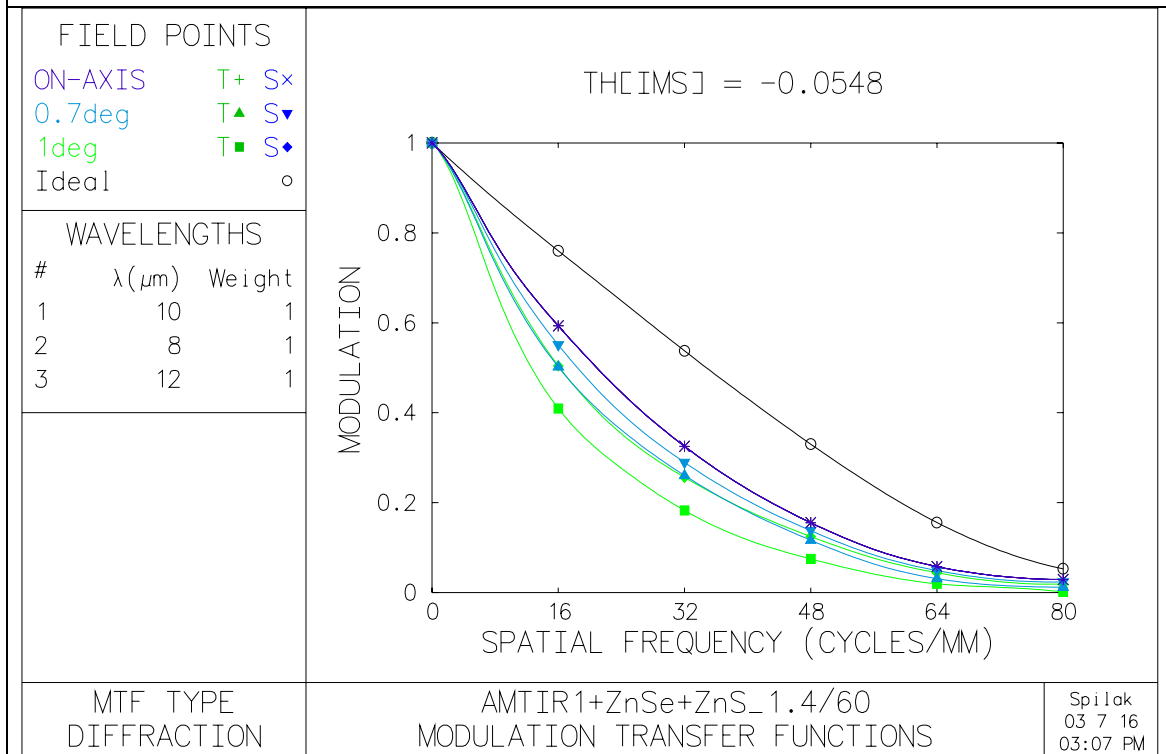
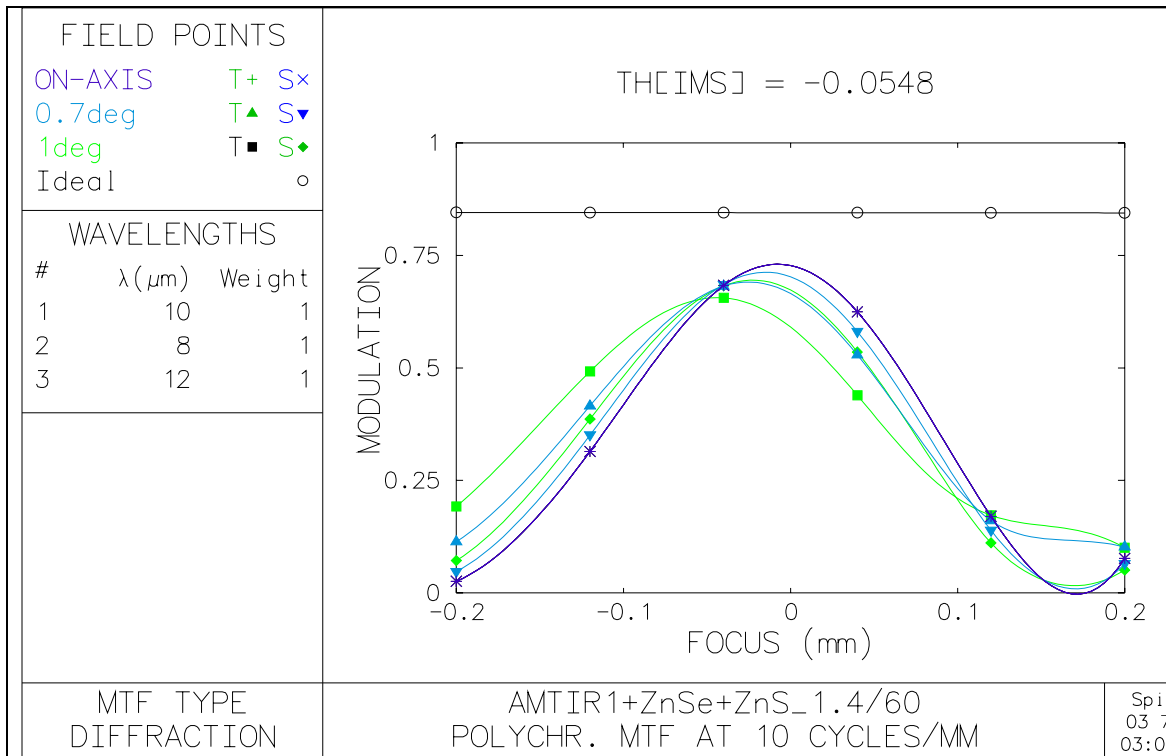
T.5.

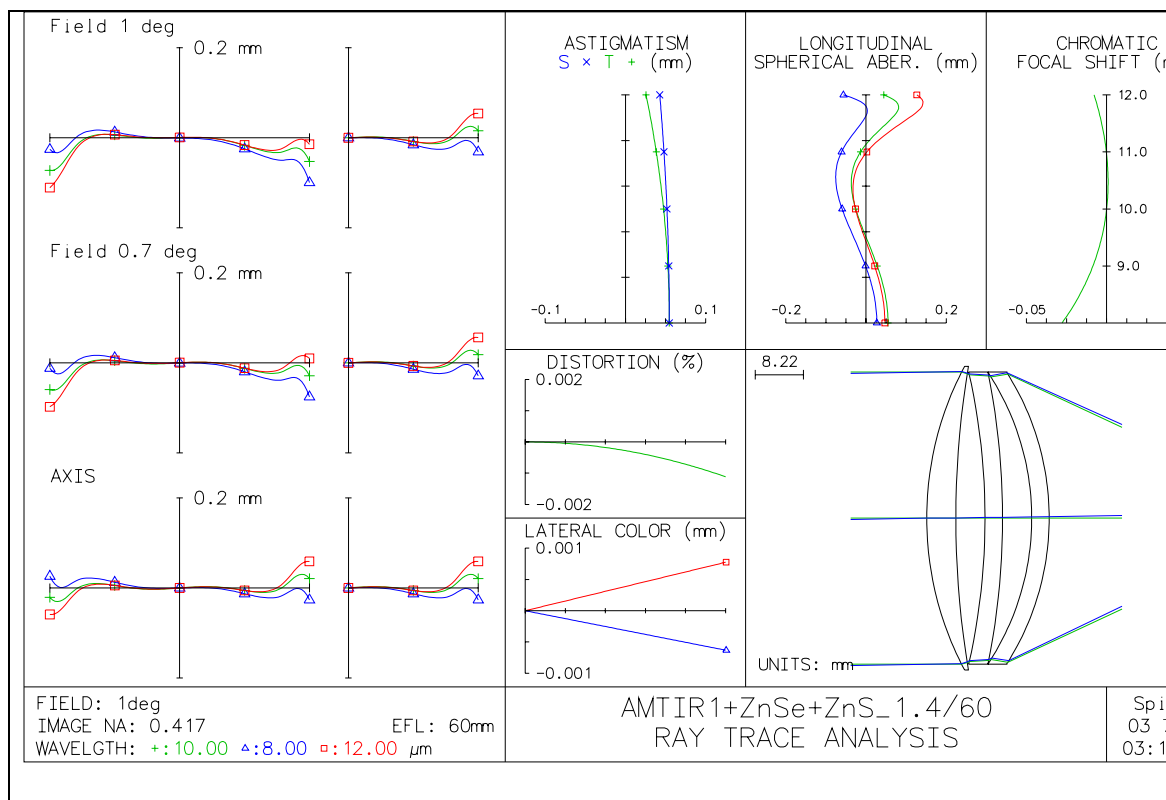
*REFRACTIVE INDICES

SRF	GLASS/CATALOG	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	AMTR1 MISC	2.519412	2.521138	2.518264	528.797320	120.000000
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	ZNSE MISC	2.406575	2.417702	2.393104	57.183009	--
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	ZNS MISC	2.201554	2.222719	2.175530	25.462461	--
6	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
7	IMAGE SURFACE					

*LENS DATA
AMTIR1+ZnSe+ZnS_1.4/60

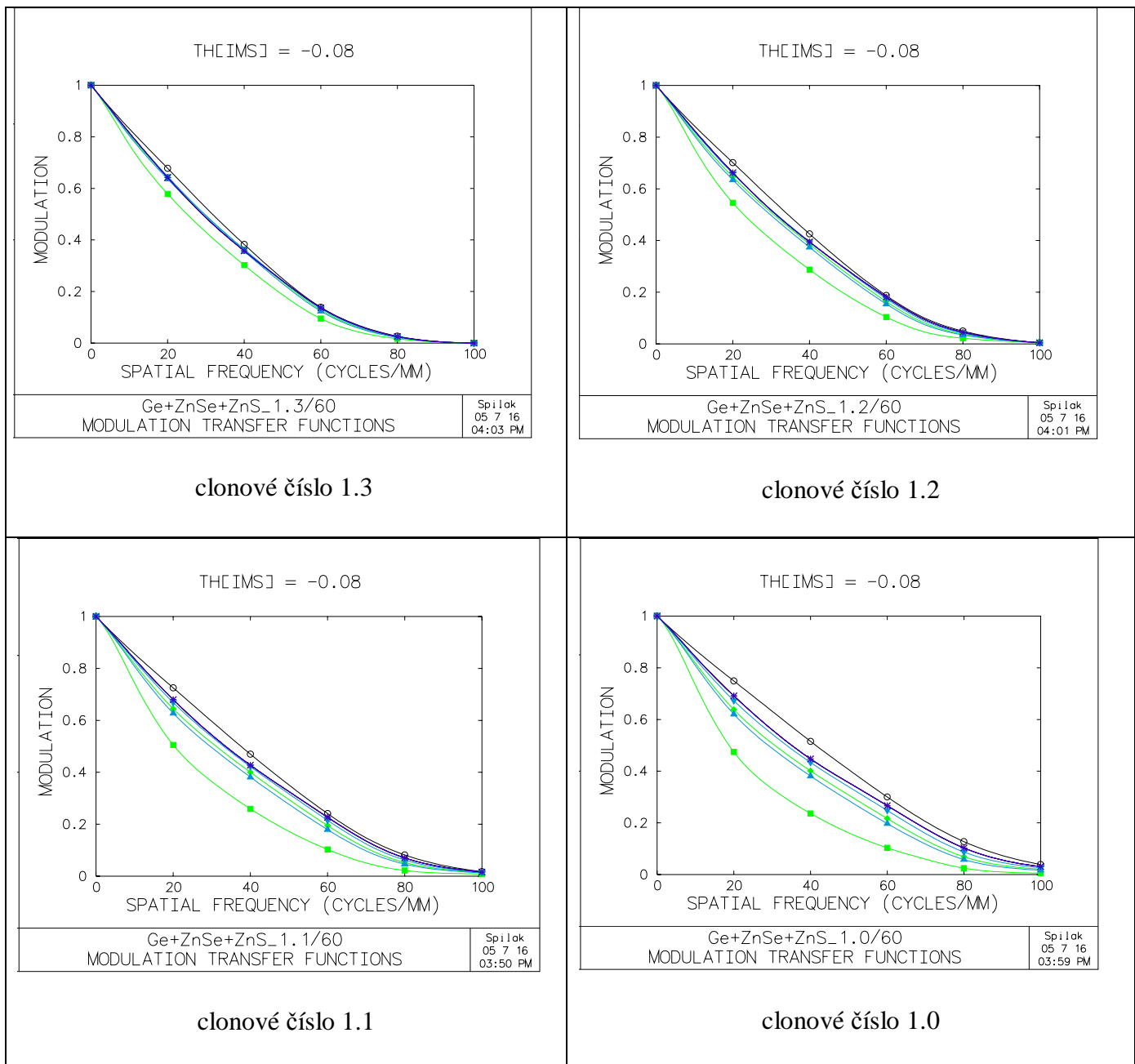
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	2.1941e+21	3.8299e+19	AIR		
AST	55.483355	4.979627	24.000000	A	AMTR1	C
2	157.103768	4.979627	25.894058		AIR	
3	-113.439109	2.987776	25.000000		ZNSE	C
4	-126.728467	4.979627	25.000000		AIR	
5	-45.438708	2.987776	25.000000		ZNS	C
6	-46.506847	45.901946	24.898133		AIR	
IMS	--	-0.054776	1.069197	S		





Triplety v zostave, kde šošovka z AMTIR 1 tvorí prvý člen nedosahujú dostatočnú kvalitu. Ostatné kombinácie tripletov pre pásmo LWIR sa nachádzajú v prílohe TRIP_LWIR.zip. [20]

Triplet s kombináciou materiálov **Ge+ZnS+ZnSe 1.4/60** je v porovnaní s ostatnými tripletmi lepší (odchylka priebehu MTF pre fyzikálne dokonalú sústavu a pre reálnu sústavu je minimálna). Ďalej u tejto trojčlennej sústavy sledujeme maximálnu svetelnosť, pri ktorej môžeme sústavu považovať ešte za prípustne fyzikálne dokonalú. Sledujeme priebeh MTF pre sústavu **Ge+ZnS+ZnSe 1.4/60** a postupne znižujeme clonové číslo až na hodnotu 1.0 s krokom 0.1.



Obr.26. Riešenie sústavy T.1. a priebeh funkcie MTF pre clonové čísla 1.3-1.0.

Sústave T.1. (Ge+ZnS+ZnSe 1.4/60) sa po zmene clonového čísla postupne zhoršoval kontrast pri rovnakej priestorovej frekvencii. Použitelná sústava pri maximálnej svetelnosti, kedy pokles kontrastu je ešte akceptovateľný, nastal pri clonovom čísle 1.2. Pri ďalšom znižovaní clonového čísla dochádzalo k výraznému poklesu kontrastu pre mimoosové lúče (krivky znázornené zelenou a bledomodrou farbou).

6. Záver

V tejto práci boli popísané základné parametre refraktívnych objektívov pre pásmo LWIR. Bolo poukázané na výhody a úskalia zobrazovania v tomto pásme. Boli spomenuté najčastejšie využívané materiály pre LWIR a ich špecifické vlastnosti a parametre. Ďalej boli spomenuté metódy návrhu optických sústav postupne od jednoduchej šošovky, návrhu a optimalizácií dubletu v priestore 3.rádu a následne návrhom tripletov.

Bolo overené, že na dosiahnutie fyzikálne dokonalej optickej sústavy s vyššou svetelnosťou a lepšou rozlišovacou schopnosťou pri dublete je nutné pridať ďalší člen. Navrhnuté vykorigované objektívy boli riešené pre ohniskovú vzdialenosť 60mm a clonové číslo 2 s relatívne úzkym zorným poľom 2° . Obdobne sa postupovalo s návrhom tripletu pre ohniskovú vzdialenosť 60mm, ten bol však riešený pre clonové číslo 1.4.

Boli popísané a vyhodnotené jednotlivé dublety a tripletety s rôznou kombináciou materiálov. Najlepšie dosiahnuté výsledky dubletu boli pri sústave **Ge+ZnSe 2/60** (D.4).

Najlepšia vybraná kombinácia materiálov pri riešení tripletu **Ge+ZnS+ZnSe 1.4/60** (T.1) bola ďalej riešená pre vyššiu svetelnosť až na hodnotu clonového čísla 1 a zisťované, kedy je možné sústavu vyhodnotiť ako použiteľnú. Bolo zistené, že u tohto tripletu môžeme zvyšovať svetelnosť až na hodnotu 1.2.

Zoznam použitej literatúry a zdrojov

- [1] B.Havelka: Metodika výpočtu optických soustav, UP, Olomouc, 1968
- [2] P.Malý :Optika, Karolinum 2014
- [3]A. Baudyš : Technická optika, scriptum, Praha, 1996
- [4] Príloha program: PSF.m
- [5] Príloha: *achr_dub_olso.txt*
- [6] <http://www.ophiropt.com/infrared-optics/catalog-infrared-lenses/lenses-for-uncooledcameras>
- [7] <http://www.ispoptics.com/catalog/8/IR%20Imaging%20Lenses>
- [8] Thomas L.Williams: Thermal imaging cameras, CRC press, New York, 2009
- [9] http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/schott-optical-glass-pocketcatalog-europe-october-2011-eng.pdf
- [10] http://fp.optics.arizona.edu/optomech/references/glass/Ohara_Glass_Catalog.pdf
- [11]Príloha program: Sellm_N-BK7.m
- [12] <http://www.crystran.co.uk/optical-materials>
- [13] <http://www.hoyaoptics.com/>
- [14] A.Mikš: Aplikovaná optika, Geometrická a vlnová optika, skriptum, Praha, 2000
- [15] M.J.Kinger : Principles of Lens Design, Proc. SPIE CR41, 1992
- [16] Riedl, Max J.:Optical design Applying the fundamentals, SPIE PRESS, Washington, 2009
- [17] Príloha program: planckov gnu
- [18] <http://www.opticaluniversescientificinstrument.com/product-1188143.html>
- [19] Príloha, dublety z programu OSLO: DU_LWIR.zip
- [20] Príloha, triplety z programu OSLO: TRIP_LWIR.zip
- [21] Príloha program: Sellm_Ge.m
- [22]J.Bajer, Optika 1,Univerzita Palackého v Olomouci,2015