

Masarykova univerzita, Lékařská fakulta

**Barevné a polarizační filtry
brýlových čoček a jejich význam při
ochraně zraku před slunečním zářením**
diplomová práce

Autorka diplomové práce:

Marie Tomanová

Vedoucí diplomové práce

prof. RNDr. Ivan Ohlídal, DrSc.

Brno, květen 2008

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Barevné a polarizační filtry brýlových čoček a jejich význam při ochraně zraku před slunečním zářením* vypracovala pod vedením prof. RNDr. Ivan Ohlídala, DrSc a za odborné konzultace s panem Mgr. Danielem Frantou, Ph.D. samostatně na základě vlastních zjištění a za použití pramenů uvedených v seznamu.

Brno, 12. 5. 2008

Děkuji panu profesoru Ivanu Ohlídaloovi za vedení při psaní diplomové práce a zejména panu doktoru Danielu Frantovi za trpělivost a odbornou konzultaci v oblasti fyziky.

Abstract

Sun light is crucial for all the life on Earth. However, its spectrum contains also UV light that can be damaging for human eyes, namely for sclerocornea, eye lens and retina. Moreover, it can cause cancer of eyelids. Our eyes should be protected against damages and sun glare by good quality sun glasses because they totally absorb UV radiation and decrease intensity of visible light falling into eyes. The comfort of our vision can be further improved by sun glasses covered by polarization filters because they decrease reflections from horizontal surfaces. In this thesis, the quality of selected sun glasses as concern their absorption filters was controlled by spectrophotometry. Ellipsometry was used for the studies of quality and orientation of their polarization filters.

Obsah

1	Úvod	7
2	Lidské oko	8
2.1	Anatomické poznámky	8
2.2	Stručně z fyziologie vidění	9
2.2.1	Barevné vidění	10
2.2.2	Skládání barev	12
3	Poškození oka zářením	13
4	Fyzikální podstata světla	18
4.1	Matematický popis elektromagnetické rovinné vlny	18
4.2	Intenzita světla	19
4.3	Polarizační stav světla	19
4.4	Jonesův formalismus	20
4.5	Stokesův vektor a Müllerova matice	21
5	Měření	25
5.1	Vymezení cíle měření	25
5.2	Výběrový soubor	25
5.3	Metody měření	27
5.3.1	Spektrofotometrie	27
5.3.2	Elipsometrie	29
5.4	Výsledky měření a jejich interpretace	33
5.4.1	Propustnost brýlových čoček s filtry	34

5.4.2	Propustnost starších brýlí	41
5.4.3	Elipsometrická měření	42
6	Závěr	44
A	Polarizační stavy	47
B	Optické prvky	49
C	Fashion colors	51

Kapitola 1

Úvod

Sluneční záření je základním zdrojem energie pro veškeré procesy, které probíhají v atmosféře a na zemském povrchu, je nezbytné pro náš život. Proč tedy náš zrak chránit před slunečním zářením? Sluneční záření s sebou na zemský povrch přináší i UV záření, které je součástí jeho spektra.

Oko je nejdůležitějším smyslovým orgánem člověka. Prostřednictvím zraku přijímáme až osmdesát procent všech informací. UV záření je pro člověka a jeho zrak ve vyšších dávkách škodlivé, jak je popsáno v kapitole 3. Mimoto, při velké intenzitě slunečního záření dopadajícího do oka, dochází k oslnění a tím zhoršení zrakového vjemu, což může nepřímo vést např. k dopravní nehodě, úrazu při sportu apod. Intenzita slunečního záření dopadajícího na zemský povrch závisí na řadě faktorů. Jsou jimi roční období, denní doba, nadmořská výška, zeměpisná poloha, oblačnost a znečištění ovzduší, kdy intenzita slunečního záření bývá obecně vyšší v létě než v zimním období, ve vyšších nadmořských výškách a zvyšuje se, čím blíže jsme rovníku.

Za všech okolností jsou důležitou ochrannou pomůckou před škodlivým působením UV záření a nepříjemným oslněním sluneční brýle. O kvalitě absorpčních a polarizačních filtrů vybraných typů brýlových čoček jsem se prostřednictvím metod spektrofotometrie a elipsometrie přesvědčila ve své diplomové práci.

Kapitola 2

Lidské oko

Na začátek své práce uvádím poznámky z anatomie oka a stručný popis samotné fyziologie vidění.

2.1 Anatomické poznámky



Obrázek 2.1: Schématické zobrazení oka.

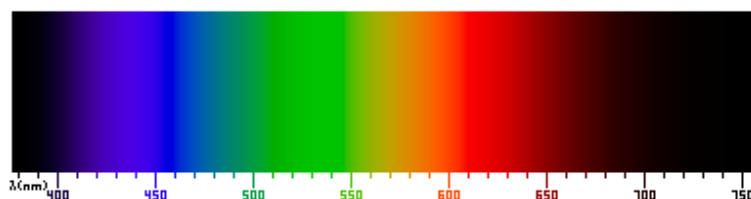
Lidské oko je uloženo v kostěné schránce, orbitě. Má přibližně tvar koule a podobně jako na zeměkouli na něm rozlišujeme přední a zadní pól. Jeho obal tvoří tři vrstvy. Zevní vrstva, ochranný obal, je tvořen bělimou (*sclera*), která v přední části bulbu přechází v průhlednou rohovku (*cornea*). Pod bělimou

leží žloutka (*uvea*), která se skládá ze tří samostatných tkání: cévnatky (*choroidea*), řasnatého tělíska (*corpus ciliare*) a duhovky (*iris*), tyto tkáně mají vyživovací funkci. Pigmentová vrstva (*stratum pigmenti retinae*) a sítnice (*retina*) jsou vnitřními vrstvami oka. Vnitřní prostory oka vyplňují čočka (*lens cristallina*), sklivec (*corpus vitreum*) a komorová voda (*humor aquaeus*). Schématické zobrazení oka je na obrázku 2.1.

Na zadním pólu oka se nachází světle žlutě pigmentovaná skvrna nazývaná macula lutea, jejíž součástí je i fovea centralis, ztenčené místo sítnice s velkou koncentrací čípků, místo nejostřejšího vidění. Asi tři milimetry od tohoto místa se nalézá papila očního nervu (*discus opticus*). V tomto místě se nenacházejí žádné zrakové receptory, proto je též označováno jako slepá skvrna [1].

2.2 Stručně z fyziologie vidění

Oči přeměňují světelnou energii viditelného spektra na akční potenciály vláken zrakového nervu. Světelné paprsky dopadající na sítnici vyvolají receptorové potenciály ve světločivných buňkách (fotoreceptorech). Vzruchy vzniklé v sítnici se přenášejí do mozkové kůry, kde vyvolají zrakový vjem. [2]



Obrázek 2.2: Spektrum viditelného záření.

Lidské oko vnímá světlo přibližně v rozmezí od 380 nm do 760 nm (viz. obrázek 2.2). Nejcitlivější je oko na světlo o vlnové délce 555 nm.

Světelné paprsky procházejí optickou soustavou oka a dopadají na sítnici. Sítnice obsahuje dva typy fotoreceptorů, tyčinky a čípky. Počet tyčinek je mnohem vyšší než počet čípků, je jich asi 120 milionů a jsou citlivější na změnu intenzity světla, zajišťují vidění za šera, tzv. skotopické vidění. Toto vidění však neumožňuje rozlišovat detaily a obrysy předmětů, ani jejich barvy.

Barevné vnímání oka zajišťuje šest až sedm milionů čípků, které jsou nejvíce koncentrovány ve žluté skvrně (tyčinky v tomto místě chybí). Čípky jsou mnohem méně citlivé na změnu intenzity světla než tyčinky. Jsou zodpovědné za tzv. fotopické vidění (vidění při jasném denním světle) a za barevné vidění.

Dopadající světlo je absorbováno barvivy obsaženými ve struktuře tyčinek a čípků a způsobuje změnu jejich stavu. To vede ke vzniku nervového vzruchu, který je veden očním nervem do mozku, kde je informace zpracována.

Oko je schopno fungovat ve velkém rozsahu intenzity světla. Intenzita vstupujícího světla je regulována zornicí, což je kruhový otvor, který se nalézá uprostřed duhovky. Zornice může měnit svůj průměr v rozsahu dvou až osmi milimetrů. Při zvýšeném osvitu se zornice zúží (přímá zornicová reakce). Osvítíme-li jednu zornici, automaticky se zúží i zornice druhého oka (nepřímá, konsenzuální reakce).

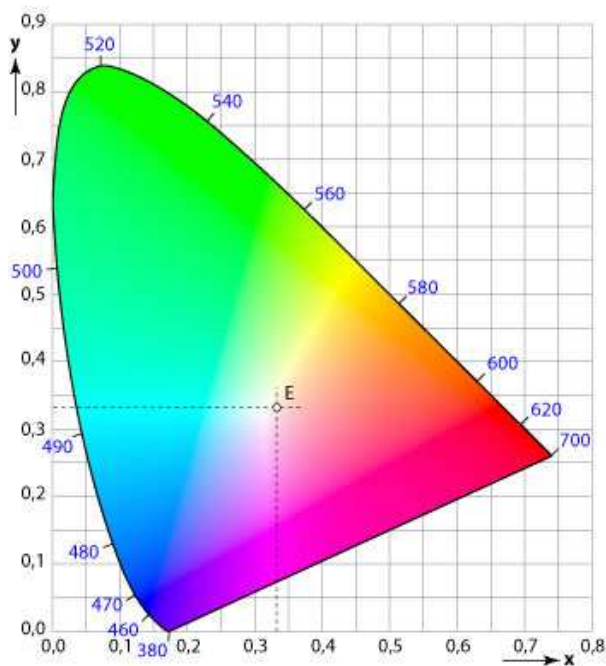
2.2.1 Barevné vidění

Vlastnosti barev, které jsou důležité pro zrakový vjem, jsou odstín, sytost a jas (intenzita). Odstín neboli tón barvy je dán vlnovou délkou světla, sytost barvy je daná podílem bílé složky ve světle dané barvy.

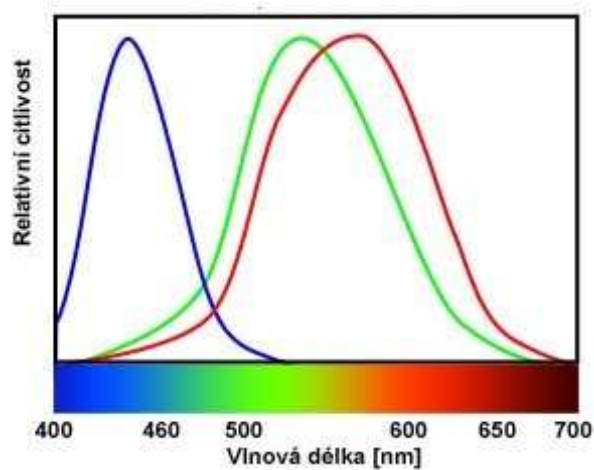
Víme, že každá spektrální barva má svoji vlnovou délku. Vjemu bílé barvy lze dosáhnout spojením světla červeného (723–647 nm), zeleného (575–492 nm) a modrého (491–450 nm), viz. obrázek 2.3. Červenou, zelenou a modrou barvu nazýváme barvami základními (primárními). Každá barva má svou doplňkovou (komplementární) barvu. Doplňkovou barvou k červené základní barvě je barva *azurová* (aditivní směs zelené a modré), k zelené barvě barva *purpurová* (aditivní směs červené a modré) a k modré barvě barva *žlutá* (aditivní směs zelené a červené) [3]. Nalézáme mnoho kombinací vlnových délek, které produkují shodné vnímání barvy.

Experimentální měření dokazují, že existují tři rozdílné typy vnímání barev a předpokládají existenci tří druhů čípků¹. Každý druh obsahuje jiný fotopigment s maximální citlivostí k jedné ze tří základních barev. Vnímání

¹Youngova-Helmholzova teorie barevného vidění



Obrázek 2.3: Diagram barev.



Obrázek 2.4: Citlivost čípků.

určité barvy je pak dáno poměrem frekvence vzruchů v těchto třech systémech čípků [2]. Modré čípky (obsahují pigment citlivý na modrou barvu, krátkovlnné světlo) absorbují maximálně světlo z modrofialové části spektra, čípky zelené (obsahují pigment citlivý na zelenou barvu, světlo střední vlnové délky) absorbují maximálně světlo ze zelené části spektra a čípky červené (obsahují

pigment nejcitlivější na červenou barvu, dlouhovlnné světlo) mají maximum absorpce ve žluté části spektra. Relativní citlivosti jednotlivých čípků jsou zobrazeny na obrázku 2.4.

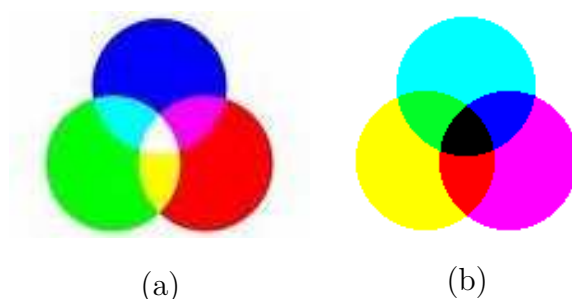
Zastoupení těchto tří druhů čípků na sítnici je následující: 64% červených, 32% zelených a 2% modrých. Zelené a červené čípky jsou koncentrovány do fovea centralis. Modré čípky leží rozestety po sítnici ve větší vzdálenosti od žluté skvrny.

2.2.2 Skládání barev

Existují dva základní typy skládání barev: Aditivní a subtraktivní.

Aditivní (součtové) skládání barev pracuje se třemi základními barvami, kterými jsou modrá, zelená a červená. Byla vytvořena tzv. RGB soustava, kde **R** označuje červenou barvu, **G** zelenou a **B** modrou. Smíšením těchto tří základních barev získáme barvu bílou.

Druhým typem skládání barev je tzv. subtraktivní (odečítací) způsob. Využívá skutečnosti, že v určitém filtru je vždy pohlcována určitá část spektra. Výsledná barva je chudší o tuto část spektra a je tedy obecně jiná než barva původní. Při použití žlutého, azurového a purpurového filtru současně neprojde žádné světlo a plocha je černá. Barva azurová (**C** z anglického *Cyan*), purpurová (**M**, *Magenta*), žlutá (**Y**, *Yellow*) a černá (**K**, *black*) tvoří soustavu barev, která se užívá pod zkratkou CMYK.



Obrázek 2.5: Skládání barev: (a) aditivní, (b) subtraktivní

Kapitola 3

Poškození oka zářením

Přestože okem vnímáme pouze viditelnou část spektra v rozmezí vlnových délek 380 nm až 760 nm, je naše oko nejvíce ohroženo vlněním o kratších vlnových délkách, které je pro nás neviditelné, UV zářením. UV záření je část elektromagnetického spektra o vlnových délkách od 10 nm do 400 nm. Jeho přirozeným zdrojem je Slunce.



Obrázek 3.1: Absorpce UV záření.

UV záření objevil v roce 1801 německý fyzik Johann Wilhelm Ritter. Dělíme jej do třech skupin UVA, UVB a UVC. Přestože má UV záření i své nesporné pozitivní účinky (je důležité například pro syntézu vitamínu D v kůži nebo je užíváno pro desinfekci vody, kde hubí škodlivé bakterie) je ve větších dávkách pro naše tělo nebezpečné. UVC záření o vlnových délkách nižších než 280 nm je pohlcováno z velké části ozonovou vrstvou, která leží ve výšce patnáct až čtyřicet kilometrů nad zemským povrchem (obrázek 3.1). V důsledku jejího ztenčování však proniká malá část na zemský povrch. Zde působí svými zhoubnými účinky na živé organismy. Záření v rozsahu vlnových délek 280 nm až 315 nm se řadí do skupiny záření UVB. Stejně jako UVC

záření je z větší části absorbováno v atmosféře. Nadměrná dávka UVB záření způsobuje zarudnutí kůže a má za následek spálení pokožky. Narušením DNA kožních buněk může způsobit rozvoj zhoubného onemocnění kůže, vážně může poškodit i náš zrak. Devadesát devět procent záření dopadajícího na zemský povrch patří do skupiny UVA záření, které má vlnovou délku od 315 nm do 400 nm. Tuto skupinu záření považujeme za nejméně škodlivou. Svým účinkem na melanin, který je přítomný v pokožce, způsobuje časnou pigmentaci kůže.

Oko odpovídá na poškození zářením zánětlivou nebo fotooxidační reakcí. Zánětlivá reakce prvotně poškozené tkáně může vyvolat celou kaskádu událostí, které vedou k širšímu poškození dalších vrstev. Jednotlivé vrstvy oka jsou poškozovány i při fotooxidačním ději. Poškození způsobují volné radikály a reaktivní kyslík, kteří při tomto ději vznikají [4].

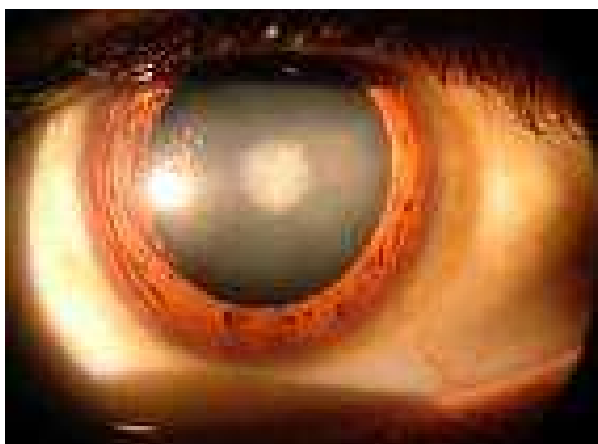


Obrázek 3.2: Oko postižené fotokeratitidou.

Při dopadu na oko je záření z velké části pohlcováno rohovkou. Nejvíce absorbujícími látkami jsou v tomto případě DNA a bílkoviny. Dlouhodobé nebo vysoké dávky zejména UVB záření vedou ke vzniku fotokeratitidy (*photokeratitis*), česky nazývané sněžná slepota (obrázek 3.2). Během šesti až dvanácti hodin po expozici dochází k zániku epitelu rohovky a obnažení citlivých zakončení nervových vláken v rohovce. Postižení trpí krutou bolestí, pocitem písku v očích, slzením a křečovitě svírají víčka (excesivní blefarospasmus) [5]. Po obarvení rohovky fluoresceinem jsou patrné mnohočetné povrchové mikroeroze. Většina defektů se zhojí během 24 hodin. Toto onemocnění vzniká ve větší míře ve vysokohorských oblastech, kde nízká ozonová vrstva nesníží do-

statečně průnik škodlivých UV paprsků, nebo v místech, kde odchází k odrazu světla od velkých písečných nebo sněhových ploch.

Obdobné potíže se objevují i při působení UV záření z umělých zdrojů (horské slunce, elektrický oblouk), kdy při manipulaci s nimi nebyly použity ochranné pomůcky. Pak toto onemocnění nazýváme keratitis elektrica. Některé publikace uvádějí tato postižení pod názvy ophthalmia nivalis a ophthalmia fotoelectrica.



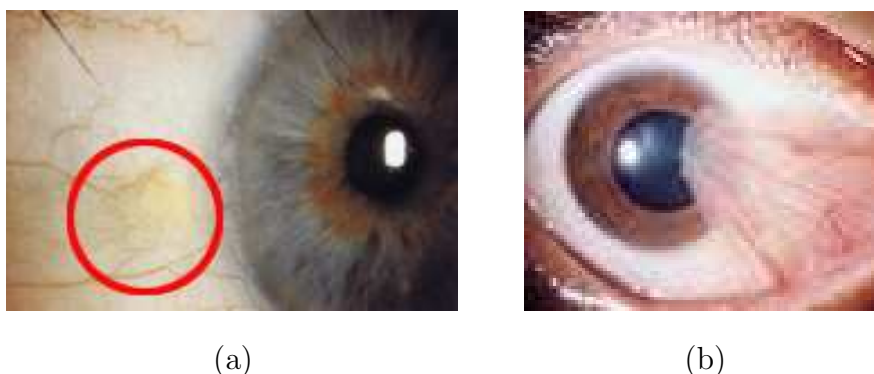
Obrázek 3.3: Oko s kataraktou.

Malá část UV záření proniká přes rohovku dále do oka a při dlouhodobém působení může být příčinou vzniku katarakty (obrázek 3.3). Oční čočka dospělého člověka obsahuje ochranný žlutý chromator (chemicky 3-hydroxykynurenin), který pohlcuje záření a rozptyluje jeho energii. Chrání tak sítnici před vstupujícím UV zářením. Ve středním věku však dochází k postupnému snižování látek, které zajišťují přirozenou enzymatickou a antioxidační ochranu očí proti UV záření. Narůstá produkce nežádoucích fotochemicky aktivních chromoforů, N-formyl kynureninu a xanthurenové kyseliny. Jakmile čočka absorbuje světlo (UV záření), jsou tyto chromofory aktivovány a způsobují denaturaci čočkových proteinů (α , β , γ krystaliny). To vede k narušení pravidelného uspořádání proteinových vláken, které za normálních okolností zajišťují vysokou průhlednost čočky, a je příčinou patologického zakalení, které působí překážku ve vidění. Pacienti si stěžují subjektivně na pocit rozostřeného obrazu. Toto onemocnění se v různém stupni vyvíjí na obou očích

a jedním z hlavních faktorů jeho vzniku je zvýšená expozice UV záření.

Věk, pohlaví, kouření a UV záření jsou jen některé z výčtu rizikových faktorů způsobujících vznik makulární degenerace. Makulární degenerace zaujímá čelní postavení v seznamu příčin nezvratné slepoty v populaci se stále se zvyšujícím věkovým průměrem. Postupný zánik buněk v makulární oblasti sítnice se projeví na počátku rozostřeným viděním, zdeformovaným vnímáním linií a barev objektů. V konečné fázi vzniká centrální skotom, kruhový výpadek zorného pole. Pacientům s makulární degenerací zůstává zachováno pouze periferní vidění. Záření je po dopadu na sítnici absorbováno řadou chemických látek, pigmentů, kterými jsou například rhodopsin obsažený v tyčinkách, opsin čípků, melanin. Funkcí těchto barviv je mimo jiné antioxidační filtrace modrého světla, neutralizace singuletového kyslíku a volných radikálů. Nicméně, se zvyšujícím se věkem se v sítnici hromadí nežádoucí fluorescentní materiál, známý jako lipofuscin – *stařecké barvivo*. Se vzrůstajícím množstvím lipofuscinu, klesá množství ochranného melaninu, což zapříčiňuje rozvoj makulární degenerace.

UV záření je uváděno jako možný vyvolávající faktor pro další onemocnění, která postihují zejména přední segment oka (obrázek 3.4). V oblasti oční štěrbině se na spojivce ¹ objevuje převážně u starších lidí žlutobělavé ztlustění, které nazýváme pinguekula [6]. Jedná se spíše o kosmetickou vadu, proto není pro toto postižení indikována žádná speciální léčba.



Obrázek 3.4: (a) Pinguekula; (b) Pterygium

¹spojivka – tenká průhledná blanka, která pokrývá vnitřní plochu víček, přechází na přední plochu oka, kde kryje bělimu a upíná se na limbus rohovky

Dalším patologickým útvarem objevujícím se na předním segmentu oka, který je způsoben nadměrným vystavováním slunečním paprskům, je pterygium. Nejčastěji je popisováno nazálně ve spojivce jako trojúhelníkovitá léze. Ze spojivky přerůstá na rohovku. Jeho *hlavička* směřuje k centru rohovky a způsobuje zhoršené vidění a vznik astigmatismu.

Stejně jako kdekoli jinde na kůži, může se i na očních víčkách vyvinout zhoubný nádor. Melanom kůže víčka začíná jako pigmentová skvrna. Zvýraznění pigmentace, zvětšování a vaskularizace nasvědčují pro malignitu. Ke vzniku malignity u disponovaných jedinců přispívá expozice UV záření, zejména získaná v dětství.

Nejběžnějším maligním nádorem oka je uveální melanom. I zde se v seznamu vyvolávajících faktorů na předním místě objevuje UV záření. Důležitou roli v ochraně této vrstvy oka proti škodlivému působení UV záření hrají oční pigmentové buňky (pigmentové epitelální buňky a melanocyty uvey), které obsahují ochranné barvivo melanin. Přesto i zde dochází působením UV záření ke tvorbě volných radikálů a reaktivního kyslíku, které podporují vývoj nádoru.

Všem výše uvedeným postižením můžeme zabránit nebo alespoň oddálit jejich vznik používáním slunečních brýlí, které absorbují škodlivou část spektra záření ještě před jeho vstupem do oka.

Kapitola 4

Fyzikální podstata světla

4.1 Matematický popis elektromagnetické rovinné vlny

Světlo je elektromagnetické vlnění, které je charakterizováno v neabsorbujícím prostředí třemi vzájemně kolmými vektory. Vlnovým vektorem $\vec{k}$, vektorem intenzity elektrického pole $\vec{E}$ a vektorem intenzity magnetického pole $\vec{H}$ [3]. Vlnový vektor $\vec{k}$ je daný vztahem:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} n \vec{\nu}, \quad (4.1)$$

kde λ je vlnová délka světla ve vakuu, n je index lomu světla a $\vec{\nu}$ je jednotkový vektor ve směru šíření vlny. Vektory $\vec{E}$ a $\vec{H}$ určují polarizaci světla. Protože vektory $\vec{E}$ a $\vec{H}$ jsou na sebe vzájemně kolmé, můžeme při studiu optických jevů uvažovat pouze jednu z obou intenzit a to směr vektoru elektrické intenzity $\vec{E}$.

Intenzita $\vec{E}$ je funkcí polohového vektoru $\vec{r}$ a času t :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{A} \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})], \quad (4.2)$$

kde ω je úhlová frekvence světla, která souvisí s rychlostí světla ve vakuu c následujícím způsobem:

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}, \quad (4.3)$$

Vektor $\vec{A}$ v rovnici (4.2) nazýváme vektor amplitudy. Pro popis jevu můžeme každou rovinnou vlnu rozložit na dvě navzájem kolmé lineárně polarizované

vlny, které leží ve dvou rovinách. V rovině horizontální H a v rovině vertikální V. Vektor $\vec{A}$ můžeme dále rozepsat následujícím způsobem:

$$\vec{A} = \hat{A}_H \vec{p}_H + \hat{A}_V \vec{p}_V, \quad (4.4)$$

kde $\vec{p}_H$ a $\vec{p}_V$ jsou jednotkové vektory ve směru polarizace H a V. Komplexní čísla $\hat{A}_H$ a $\hat{A}_V$ jsou amplitudy navzájem kolmých rovinných vln, které plně popisují polarizační stav světla a jeho intenzitu.

4.2 Intenzita světla

Intenzita vlnění je dána čtvercem modulu amplitudy [3], takže lze obecně psát:

$$I = |\vec{A}|^2, \quad (4.5)$$

kde $\vec{A}$ je komplexní vektor se složkami $\hat{A}_H$ a $\hat{A}_V$ definovanými v rovnici (4.4). Tyto dvě složky můžeme rozepsat:

$$\hat{A}_H = |\hat{A}_H| e^{i\varphi_H} \quad (4.6)$$

a

$$\hat{A}_V = |\hat{A}_V| e^{i\varphi_V}, \quad (4.7)$$

kde $|\hat{A}_H|$ a $|\hat{A}_V|$ jsou moduly, tj. absolutní hodnoty, H a V složek amplitud. Výrazy φ_H a φ_V značí odpovídající fáze amplitud. Pro intenzitu světla s takto definovanou amplitudou lze psát:

$$I = |\hat{A}_H|^2 + |\hat{A}_V|^2. \quad (4.8)$$

4.3 Polarizační stav světla

Kromě intenzity ještě charakterizuje světlo jeho polarizační stav. Polarizačním stavem chápeme tvar křivky, který opisuje koncový bod vektoru $\vec{E}$ [3]. Obecně je tímto tvarem elipsa, hovoříme o elipticky polarizovaném světle. Speciálními případy jsou přímka při lineárně polarizovaném světle nebo kružnice u kruhově polarizovaného světla.

Výsledný tvar křivky, který opisuje koncový bod vektoru $\vec{E}$, závisí pouze na poměru velikostí amplitud $|\hat{A}_H|$ a $|\hat{A}_V|$ a na fázovém rozdílu mezi úhly φ_H a φ_V . Proto poměr amplitud $\hat{A}_V$ a $\hat{A}_H$ může být považován za reprezentaci polarizačního stavu $\hat{\chi}$:

$$\hat{\chi} = \frac{\hat{A}_V}{\hat{A}_H} = \frac{|\hat{A}_V|}{|\hat{A}_H|} e^{i(\varphi_V - \varphi_H)}. \quad (4.9)$$

Podle hodnoty $\hat{\chi}$ rozlišujeme následující význačné polarizační stavy:

$\hat{\chi} = 0$	$\hat{A}_V = 0$	lineárně polarizovaná vlna (horizontálně)
$\hat{\chi} = \infty$	$\hat{A}_H = 0$	lineárně polarizovaná vlna (vertikálně)
$\hat{\chi} = 1$	$\hat{A}_H = \hat{A}_V$	lineárně polarizovaná vlna ($\frac{\pi}{4}$)
$\hat{\chi} = -1$	$\hat{A}_H = -\hat{A}_V$	lineárně polarizovaná vlna ($-\frac{\pi}{4}$)
$\hat{\chi} = i$	$ \hat{A}_H = \hat{A}_V $, současně	kruhově polarizovaná vlna (pravotočivá)
	$\varphi_H - \varphi_V = \frac{\pi}{2}$	
$\hat{\chi} = -i$	$ \hat{A}_H = \hat{A}_V $, současně	kruhově polarizovaná vlna (levotočivá)
	$\varphi_H - \varphi_V = -\frac{\pi}{2}$	

4.4 Jonesův formalismus

Jonesův formalismus¹ je matematický popis stavu ideálně polarizovaného světla, tj. jeho intenzity a polarizačního stavu, a slouží pro výpočet vývoje stavu světla při průchodu skrz prvky optické soustavy [7]. Jonesův formalismus je vhodný pouze pro plně polarizované světlo, není schopen popsat nepolarizované nebo pouze částečně polarizované světlo.

Jonesovy vektory popisují ideálně polarizované světlo pomocí následujícího komplexního vektoru:

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} \hat{A}_V \\ \hat{A}_H \end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

Jonesovy vektory pro vybrané polarizační stavy jsou uvedeny v příloze (viz. dodatek A).

Jonesova matice charakterizuje lineární změnu stavu světla při jeho

¹v roce 1941 jej formuloval R. Clark Jones

průchodu prvkem optické soustavy:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} \hat{M}_{VV} & \hat{M}_{VH} \\ \hat{M}_{HV} & \hat{M}_{HH} \end{pmatrix}. \quad (4.11)$$

Označíme-li Jonesův vektor pro světlo dopadající na prvek optické soustavy $\vec{\mathbf{J}}_i$ a Jonesův vektor pro světlo vystupující z tohoto prvku $\vec{\mathbf{J}}_o$, můžeme pro ně psát jednoduchou rovnici:

$$\vec{\mathbf{J}}_o = \tilde{\mathbf{M}}\vec{\mathbf{J}}_i. \quad (4.12)$$

Jonesovy matice pro vybrané polarizační stavy jsou uvedeny v příloze (viz. dodatek B).

4.5 Stokesův vektor a Müllerova matice

Přestože za pomoci Jonesova formalismus jsme schopni popsat stavy plně polarizovaného světla, nelze jej užít pro nepolarizované, resp. částečně polarizované světlo. Nepolarizované světlo je charakteristické tím, že se polarizační stav náhodně v čase mění. Proto není možné definovat amplitudy nepolarizovaného či částečně polarizovaného světla. V tomto případě je vhodné použít pro popis Stokesův vektor a Müllerovy matice [3, 8], kde v jednotlivých složkách nevystupují amplitudy, ale střední intenzity světla.

*Stokesův vektor*² je úplný popis stavu světla, který popisuje nejen světlo plně polarizované, ale i světlo nepolarizované, resp. částečně polarizované. Je to soubor hodnot, který zahrnuje údaje o celkové intenzitě, stupni polarizace a polarizačním stavu. Obecně Stokesův vektor zapisujeme v následujícím tvaru:

$$\vec{\mathbf{S}} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_V - I_H \\ I_{+\pi/4} - I_{-\pi/4} \\ I_R - I_L \end{pmatrix}, \quad (4.13)$$

kde I označuje střední intenzity světla:

I_0 – intenzita světla

²popsal v roce 1852 Sir George Gabriel Stokes

I_H – intenzita ve směru horizontální polarizace

I_V – intenzita ve směru vertikální polarizace

$I_{+\pi/4}$ – intenzita ve směru polarizace $+45^\circ$

$I_{-\pi/4}$ – intenzita ve směru polarizace -45°

I_R – intenzita ve směru kruhové pravotočivé polarizace

I_L – intenzita ve směru Kruhové levotočivé polarizace

Z definice Stokesova vektoru platí následující relace:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (4.14)$$

přičemž rovnost nastává pro plně polarizované světlo. Pro nepolarizované světlo jsou složky S_1 , S_2 a S_3 nulové, tj. Stokesův vektor má tento tvar:

$$\vec{S} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Platí-li ve vztahu (4.14) ostrá nerovnost, jedná se o světlo částečně polarizované, pro které můžeme definovat *stupeň polarizace* P :

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (4.16)$$

Jestliže je světlo popsáno Stokesovým vektorem, pak optické prvky popisujeme tzv. *Müllerovou maticí*:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Müllerovy matice pro vybrané polarizační prvky jsou uvedeny v příloze (viz. dodatek B). Zde navíc uvedeme pouze matici ideálního depolarizátoru $\tilde{\mathbf{D}}$:

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Podobně jako pro Jonesovy vektory a matice můžeme pro Stokesovy vektory a Müllerovy matice psát vztah:

$$\vec{\mathbf{S}}_o = \tilde{\mathbf{M}}\vec{\mathbf{S}}_i, \quad (4.19)$$

kde $\vec{\mathbf{S}}_i$ je Stokesův vektor pro světlo vstupující a $\vec{\mathbf{S}}_o$ Stokesův vektor pro světlo vystupující do optického systému.

Pro plné použití matematického aparátu založeného na Müllerových maticích je nutné ještě uvést matici pro transformaci souřadnic, abychom mohli vyjádřit obecnou polohu optických členů vzhledem k vertikální rovině. V dodatku B jsou uvedeny matice reprezentující polarizátor a kompenzátor otočených v rovině vertikální 0, horizontální $\frac{\pi}{2}$ a šikmých os $\pm\frac{\pi}{4}$. Je-li polarizátor otočený do obecného směru α , můžeme pro něj psát Müllerovu matici následujícím způsobem:

$$\tilde{\mathbf{P}}_H = \tilde{\mathbf{R}}(-\alpha)\tilde{\mathbf{P}}_V\tilde{\mathbf{R}}(\alpha), \quad (4.20)$$

kde $\tilde{\mathbf{R}}(\alpha)$ značí matici rotace:

$$\tilde{\mathbf{R}}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.21)$$

Pro Müllerovy matice popisující polarizátory uvedené v dodatku B můžeme psát následující vztahy:

$$\tilde{\mathbf{P}}_H = \tilde{\mathbf{R}}(-\pi/2)\tilde{\mathbf{P}}_V\tilde{\mathbf{R}}(\pi/2), \quad (4.22)$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{+\pi/4} = \tilde{\mathbf{R}}(-\pi/4)\tilde{\mathbf{P}}_V\tilde{\mathbf{R}}(\pi/4) \quad (4.23)$$

a

$$\tilde{\mathbf{P}}_{-\pi/4} = \tilde{\mathbf{R}}(\pi/4)\tilde{\mathbf{P}}_{\mathbf{v}}\tilde{\mathbf{R}}(-\pi/4) . \quad (4.24)$$

Stejné vztahy můžeme psát pro rotaci libovolného optického prvku.

Kapitola 5

Měření

5.1 Vymezení cíle měření

Cílem měření je získat data k posouzení propustnosti vybraných vzorků brýlových čoček pro viditelné záření a ověřit, zda splňují požadavky kladené na ochranu očí proti UV záření. U polarizačních čoček je měření zaměřeno na vyhodnocení parametrů, které vypovídají o funkci polarizačního filtru vybraných brýlových čoček.

5.2 Výběrový soubor

Na trhu s brýlovými čočkami jsou dnes k dostání brýlové čočky minerální, plastové, polykarbonátové aj.

Pro své měření jsem si vybrala brýlové čočky z běžně užívaného materiálu

Tabulka 5.1: Kategorizace filtrů brýlových čoček podle propustnosti.

Kategorie filtru	Propustnost daného filtru
Kategorie 0:	80–100%
Kategorie 1:	43–80%
Kategorie 2:	18–43%
Kategorie 3:	8–18%
Kategorie 4:	3–8%

CR39¹ s naneseným barevným filtrem. Na rozdíl od skla, již samotný materiál plastové čočky dobře absorbuje UV záření, jeho absorpci lze zvýšit použitím některých chemických látek (např. benzofenonu) při výrobním procesu. Molekuly této látky se zabudovávají do volných prostor makromolekulární sítě CR39, čímž snižují její propustnost pro UV záření a chrání tím nejen náš zrak, ale i samotný materiál brýlové čočky. Barevné filtry brýlových čoček se dělí do normalizovaných kategorií z hlediska propustnosti daného filtru pro viditelné záření, viz. tabulka 5.1. Filtry kategorie 3 a 4 nejsou vhodné pro řízení motorového vozidla.

V roce 1929 byl patentován nový materiál s obchodním názvem *Polaroid*. Tento materiál je tvořen velkým množstvím mikroskopických krystalů např. síranu chininového (hepatitu), které jsou vloženy do tekutého izotropního prostředí. Jehlovité krystalky jsou uspořádané tak, aby jejich osy byly vzájemně rovnoběžné. Tohoto efektu docílíme při výrobě tažením filmu nebo použitím elektrického nebo magnetického pole. Materiál s takto uspořádanými krystaly je tzv. dichroický. Má tedy schopnost světlo, které je polarizováno kolmo ke směru krystalového uspořádání, absorbovat a propouští světlo rovnoběžné s tímto uspořádáním krystalů. Takovýto materiál může být využitý jako polarizátor a setkáváme se s ním zejména u polarizačních slunečních brýlí [9].



Obrázek 5.1: Brýlová čočka Polaroid

Brýlové čočky s polarizačním filtrem mají tzv. sendvičovou strukturu. Viz.

¹CR39 označení pro umělou hmotu z kategorie allyldiglycolcarbonát, vyráběn technikou odlévání a polymerování (Columbia Resin s označením pořadí úspěšné série)

obrázek 5.1.

Světlo odrážející se od objektů na zemském povrchu (nejvíce odráží sluneční záření sníh, bílý písek, vodní hladina) je většinou horizontálně polarizované. Polarizátory v brýlových čočkách jsou orientovány vertikálně a mají tedy schopnost horizontálně polarizované světlo blokovat. Propouští pouze přímé nepolarizované sluneční paprsky a světlo orientované vertikálně.

Pro měření jsem vybrala brýlové čočky, kde je polarizační filtr nanesen na skle (Ray Ban) i na plastu (André Roy, Prego, Silhouette).

Celkem jsem pro svou diplomovou práci provedla měření padesátičtyř vzorků brýlových čoček. Brýlové čočky byly použity v tzv. plan provedení, tj. bez dioptrické hodnoty.

5.3 Metody měření

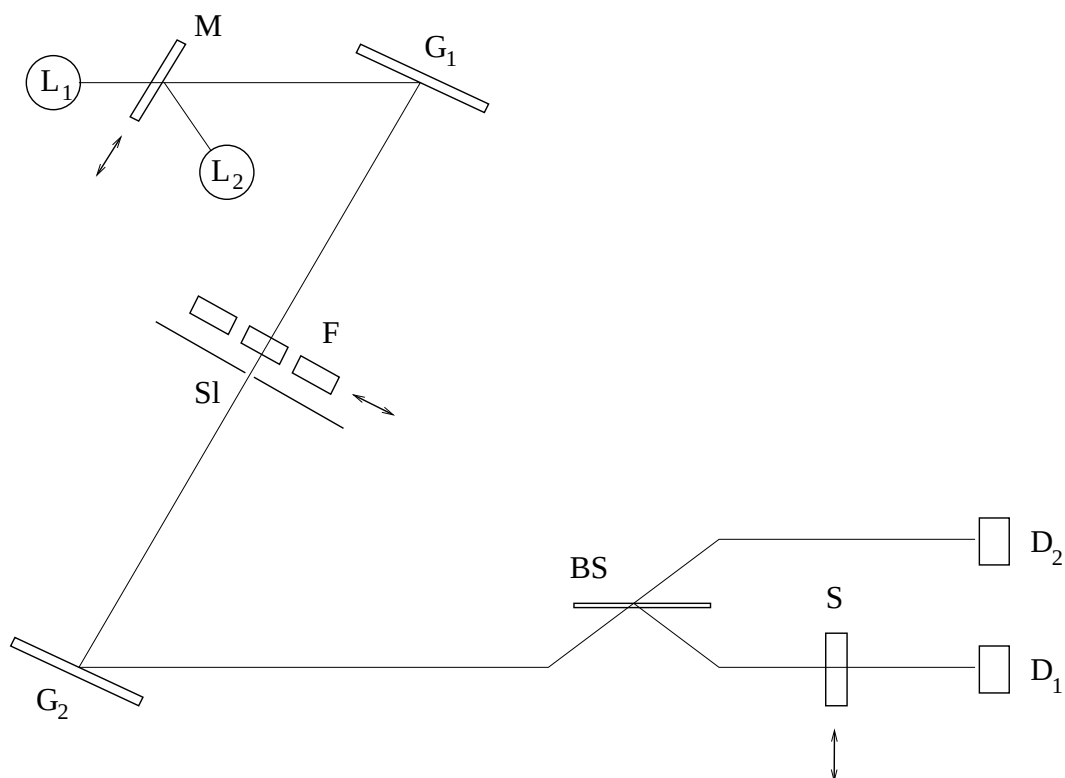
5.3.1 Spektrofotometrie

Spektrofotometrie je metoda, která měří intenzitu světla v závislosti na vlnové délce. Klasické spektrofotometry, tj. spektrofotometry s mřížkovými nebo hranolovými monochromátory, měří v rozsahu viditelného světla, blízké UV oblasti a blízké infračervené oblasti. Nejvíce využívanou aplikací ve spektrofotometrii je měření propustnosti optického systému T . Propustnost T je definována vztahem:

$$T = \frac{I_o}{I_i}, \quad (5.1)$$

kde I_i je intenzita světla dopadajícího na systém a I_o intenzita světla vystupujícího ze systému.

Pro měření byl v tomto případě použitý dvoukanálový spektrofotometr značky PerkinElmer Lambda 45. Schéma přístroje je znázorněno na obrázku 5.2. Prvním kanálem dvoukanálového spektrofotometru prochází měřící paprsek, druhým kanálem prochází referenční paprsek. Referenční paprsek slouží ke kompenzaci změn intenzity světla, které vychází ze zdroje, v závislosti na čase.



Obrázek 5.2: Schéma dvoukanálového spektrofotometru PerkinElmer Lambda 45: L_1 – UV zdroj (deuteriová lampa); L_2 – zdroj viditelného a IR světla (halogenová žárovka); M – zrcadlo přepínající zdroje světla; G_1 – mřížka předmonochromátoru; F – řádové filtry; Sl – první štěrba monochromátoru; G_2 – mřížka monochromátoru; Sl_2 – druhá štěrba monochromátoru; BS – rozdělovač svazku; S – měřený vzorek; D_1 – detektor měřicího kanálu; D_2 – detektor referenčního kanálu.

Nejprve provedeme měření na prázdno, tj. bez vzorku. V čase t_1 vychází ze zdroje světla paprsek o intenzitě I_s a pokračuje přes jednotlivé prvky optického systému spektrofotometru. Na prvku, který nazýváme rozdělovač svazku se paprsek rozdělí na dva, z nichž jeden je paprsek měřicí o intenzitě I_m , který dopadá do detektoru D_1 a druhý je paprsek referenční s intenzitou světla I_r , který dopadá do detektoru D_2 . Při výpočtu musíme zohlednit i skutečnost, že paprsek je jednotlivými prvky optického systému určitým způsobem ovlivněn, toto v sobě zahrnují přístrojové funkce α pro měřicí paprsek a β pro paprsek

referenční. Pro intenzity v měřicím a referenčním kanále potom platí:

$$I_m(t_1) = \alpha I_s(t_1) \quad (5.2)$$

a

$$I_r(t_1) = \beta I_s(t_1) . \quad (5.3)$$

Ve druhém kroku probíhá samotné měření vzorku. Na detektor dopadá v čase t_2 měřicí paprsek o intenzitě I_m , který je kromě intenzity světla I_s vycházející ze zdroje a přístrojové funkci α , závislý i na propustnosti vzorku T . Druhým kanálem prochází referenční paprsek stejně jako v měření na prázdno, jak je popsáno výše:

$$I_m(t_2) = \alpha T I_s(t_2) \quad (5.4)$$

a

$$I_r(t_2) = \beta I_s(t_2) . \quad (5.5)$$

Následující rovnice ilustrují rozdíl v měření na jednakanálovém a dvoukanálovém spektrofotometru. Při použití jednakanálového spektrofotometru se ve výsledku měření projevuje závislost intenzity na čase:

$$\frac{I_m(t_2)}{I_m(t_1)} = \frac{\alpha T I_s(t_2)}{\alpha I_s(t_1)} = T \frac{I_s(t_2)}{I_s(t_1)} . \quad (5.6)$$

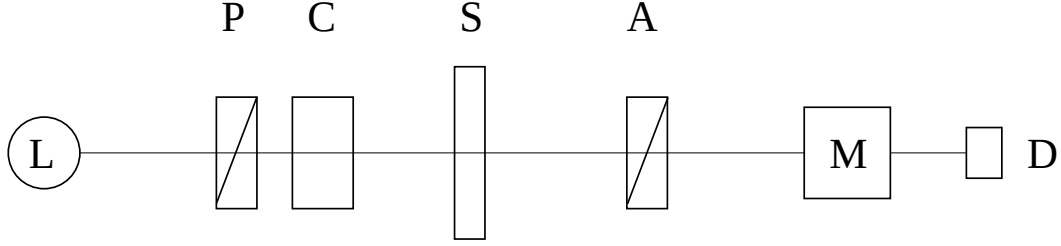
Při měření na dvoukanálovém spektrofotometru se ve výsledku závislost intenzity světla zdroje na čase neprojevuje:

$$\frac{I_r(t_1) I_m(t_2)}{I_m(t_1) I_r(t_2)} = \frac{\beta I_s(t_1) \alpha T I_s(t_2)}{\alpha I_s(t_1) \beta I_s(t_2)} = T . \quad (5.7)$$

5.3.2 Elipsometrie

Elipsometrie je citlivá nedestruktivní fyzikální metoda, která se v praxi často používá pro určování optických parametrů, tloušťek a ostatních parametrů charakterizujících systémy tenkých vrstev na různých substrátech. V této práci fázově modulovaná elipsometrie byla využita pro měření stavu polarizace světla po průchodu polarizačními skly.

Schéma měření pomocí fázově modulovaného elipsometru Jobin Yvon UVI-SEL je uvedeno na obrázku 5.3. Nepolarizované světlo vycházející ze zdroje



Obrázek 5.3: Schéma měření pomocí elipsometru Jobin Yvon UVISEL: L – zdroj světla (Xe-lampa); P – polarizátor; C – fotoelastický kompenzátor; S – měřený vzorek; A – analyzátor; M – monochromátor; D – detektor.

je popsáno vektorem $\vec{S}^i$ prochází polarizátorem P, ze kterého vystupuje jako lineárně polarizované pod úhlem P, prostupuje kompenzátozem C, který posune fázi složky ve směru C o fázový úhel δ , a dopadá na vzorek, který je charakterizován maticí $\tilde{S}$. Dále prochází analyzátozem A, což je polarizátor s osou orientovanou ve směru A a poté dopadá na detektor D jako světlo vystupující ze systému popasené vektorem $\vec{S}^o$. Matematicky lze tuto cestu světla popsat následovně:

$$\vec{S}^o = \tilde{R}(-A)\tilde{P}\tilde{R}(A)\tilde{S}\tilde{R}(-C)\tilde{C}\tilde{R}(C)\tilde{R}(-P)\tilde{P}\tilde{R}(P)\vec{S}^i, \quad (5.8)$$

kde $\tilde{P}$ a $\tilde{C}$ jsou matice vertikálně orientovaného polarizátoru a kompenzátozu a $\tilde{R}$ jsou matice rotace souřadného systému (viz. dodatek B a kapitola 4.5). Matice $\tilde{S}$ je Müllerova matice měřeného vzorku.

Polarizátor a kompenzátoz u fázově modulovaného elipsometru jsou mechanicky spojeny po úhlem $\frac{\pi}{4}$ a tedy lze psát:

$$\tilde{R}(C)\tilde{R}(-P) = \tilde{R}(C - P) = \tilde{R}(\frac{\pi}{4}). \quad (5.9)$$

Polarizátor mechanicky spojený s fotoelastickým kompenzátozem, tj. kompenzátozem, kde pomocí piezoelektrického efektu, se mění harmonicky fáze s frekvencí 50 kHz, se nazývá fotoelastický modulátor. Zavedeme-li úhel modulátoru M vzhledem k vertikální ose totožný s úhlem kompenzátozu C, potom rovnici (5.8) můžeme přepsat:

$$\vec{S}^o = \tilde{R}(-A)\tilde{P}\tilde{R}(A)\tilde{S}\tilde{R}(-M)\tilde{C}(\delta)\tilde{R}(\frac{\pi}{4})\tilde{P}\tilde{R}(M + \frac{\pi}{4})\vec{S}^i. \quad (5.10)$$

Jestliže předpokládáme, že vzorek je izotropní vzhledem k vertikální rovině, má matice $\tilde{\mathbf{S}}$ čtyři nezávislé parametry, které odpovídají dvěma Fresnelovým amplitudám:

$$\tilde{\mathbf{S}} = T \begin{pmatrix} 1 & s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 & -s_3 \\ 0 & 0 & s_3 & s_2 \end{pmatrix}, \quad (5.11)$$

kde T je propustnost vzorku a s_1 , s_2 a s_3 jsou tzv. přidružené elipsometrické parametry, které vzorek charakterizují. Parametr P není nezávislý a značí zde stupeň zachování polarizace definovaný nyní vztahem:

$$P = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}. \quad (5.12)$$

Vyjádríme-li z rovnice (5.10) intenzitu světla dopadající do detektoru, tj. složku S_0^o vektoru $\vec{\mathbf{S}}^o$, dostaneme výraz:

$$S_0^o \propto 1 + I_s \sin \delta + I_c \cos \delta, \quad (5.13)$$

kde symbol $\propto$ označuje přímou úměrnost. Veličiny I_s a I_c jsou při vhodně zvolených úhlech $\mathbf{M}$ a $\mathbf{A}$ přímo až na znaménka přidružené elipsometrické parametry matice $\tilde{\mathbf{S}}$ (viz. tabulka 5.2). Je vidět, že za pomoci měření na jedné sadě úhlů $\mathbf{M}$ a $\mathbf{A}$, můžeme určit nejvíce dva přidružené parametry. Proto měření provádíme na všech osmi sadách úhlů uvedených v tabulce 5.2.

Přidružené elipsometrické parametry s_1 , s_2 a s_3 , respektive I_s a I_c nejsou ale přímo měřitelné veličiny. Těmi jsou jak uvidíme dále první a druhá harmonická složka signálu detektoru. Je-li fázový úhel kompenzátoru δ harmonickou funkcí času, tj.

$$\delta(t) = a \sin(\omega t), \quad (5.14)$$

potom můžeme pro signál detektoru uvedený v (5.13) psát

$$S_0^o \propto 1 + I_\omega \sin(\omega t) + I_{2\omega} \cos(2\omega t) + \dots, \quad (5.15)$$

kde I_ω a $I_{2\omega}$ jsou první a druhá harmonická složka měřeného signálu detektoru a tečky zastupují vyšší harmonické složky signálu, které se neměří. První dvě

Tabulka 5.2: Přidružené parametry izotropního systému měřené na osmi základních sadách úhlů modulátoru M a analyzátoru A fázově modulovaných elipsometrů.

M	A	I_s	I_c
0	$\frac{\pi}{4}$	$-s_3$	s_2
0	$-\frac{\pi}{4}$	s_3	$-s_2$
$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{4}$	$-s_3$	$-s_2$
$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{4}$	s_3	s_2
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$-s_3$	$-s_1$
$\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	s_3	$-s_1$
$-\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$-s_3$	s_1
$-\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	s_3	s_1

harmonické složky přímo souvisí s I_s a I_c pomocí následujících vztahů:

$$I_s = \frac{J_2(a)I_\omega}{J_1(a)[2J_2(a) - J_0(a)I_{2\omega}]} \quad (5.16)$$

a

$$I_c = \frac{I_{2\omega}}{2J_2(a) - J_0(a)I_{2\omega}}, \quad (5.17)$$

kde J_n jsou Besselovy funkce n -tého řádu. Elipsometr vnitřně měří I_ω a $I_{2\omega}$, jeho software naměřené výsledky přepočítá a my tedy obdržíme hodnoty I_s a I_c .

Abychom mohli interpretovat výsledky měření, rozeberme si základní možné varianty, které mohou nastat:

$s_1 = 1, s_2 = 0, s_3 = 0$ a $P = 1$ – ideální polarizátor ve vertikálním směru, tzn. propustnost systému je v horizontálním směru nulová

$s_1 = -1, s_2 = 0, s_3 = 0$ a $P = 1$ – ideální polarizátor v horizontálním směru, tzn. propustnost systému je ve vertikálním směru nulová

$s_1 = 0, s_2 = 1, s_3 = 0$ a $P = 1$ – izotropní, ideálně průhledná destička, tzn. polarizační stav po průchodu systémem se nemění

$s_1 = 0, s_2 = -1, s_3 = 0$ a $P = 1$ – ideální půlvlnná destička

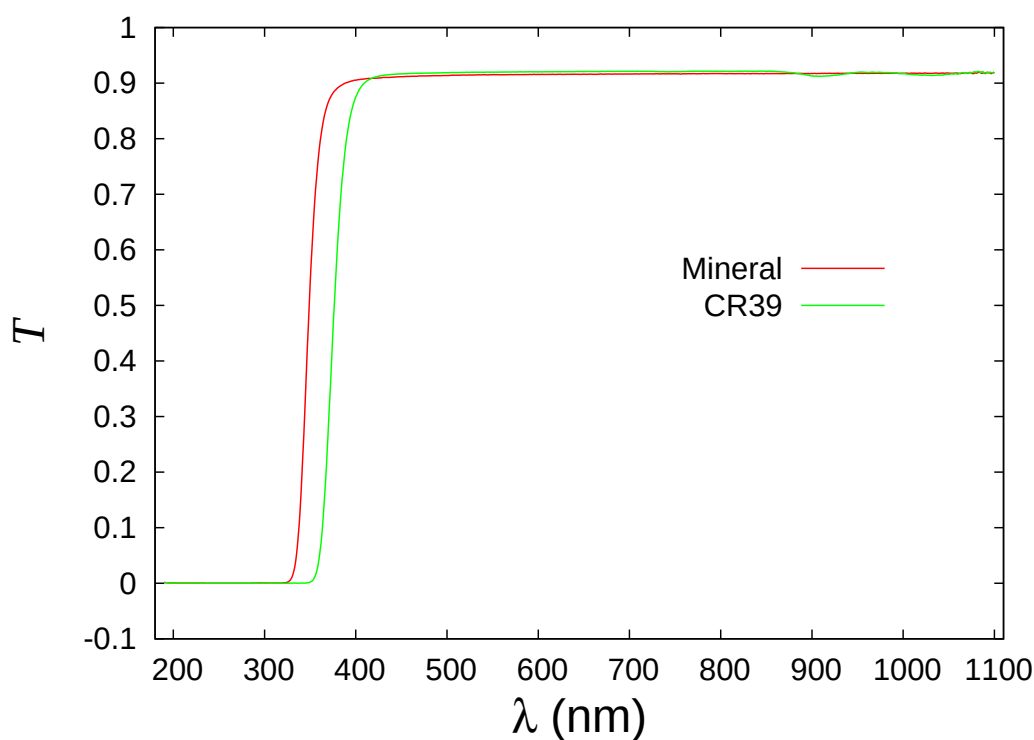
$s_1 = 0, s_2 = 0, s_3 = \pm 1$ a $P = 1$ – ideální čtvrtvlnné destičky

$s_1 = 0, s_2 = 0, s_3 = 0$ a $P = 0$ – ideální depolarizátor, tzn. mění libovolné polarizované světlo na nepolarizované

$s_1 = \pm a, s_2 = \sqrt{1 - a^2}, s_3 = 0$ a $P = 1$ – nedokonalý polarizátor, tzn. propouští světlo ve vertikálním i horizontálním směru s různou intenzitou, ale shodnou fází

$s_1 = 0, s_2 = \pm a, s_3 = \pm \sqrt{1 - a^2}$ a $P = 1$ – kompenzátor s obecnou fází

5.4 Výsledky měření a jejich interpretace



Obrázek 5.4: Propustnost skleněné brýlové čočky (minerál) a plastové brýlové čočky (CR39).

Na začátek této kapitoly uvádím pro srovnání graf, kde je patrný rozdíl v pohlcování UV záření minerální brýlovou čočkou a plastovou brýlovou čočkou z materiálu CR39. Pro zvýšení absorpce skleněné čočky jsou přidávány k základnímu materiálu např. oxid železitý Fe_2O_3 , oxid titaničitý TiO_2 nebo

oxid vanadný V_2O_5 . I přesto je z grafu na obrázku 5.4 patrné, že plastová čočka z materiálu CR39 lépe absorbuje UV záření než čočka skleněná.

5.4.1 Propustnost brýlových čoček s filtry

Pro měřené vzorky deklaruje výrobce stoprocentní absorpci UV záření pro vlnovou délku 355 nm. Z uvedených grafů je zřejmé, že dané brýlové čočky toto kritérium splňují – jejich propustnost pro oblast UV záření od 400 nm prudce klesá a pro vlnovou délku 355 nm je prakticky nulová. Pro barevné filtry výrobci uvádějí hodnotu stupně zabarvení čočky v procentech, ne tedy přímo propustnost T . Propustnost čočky a její stupeň zabarvení, označme si jej F , spolu souvisí podle vztahu:

$$F = 1 - T \quad (5.18)$$

Máme-li tedy brýlovou čočku se stupněm zabarvení $F = 15\%$, znamená to, že propustnost T dané čočky je 0,85. Propustnost čočky T se stupněm zabarvení $F = 85\%$ je 0,15. Čím je tedy vyšší hodnota stupně zabarvení F , tím nižší je propustnost čočky T .

Stupeň zabarvení v sobě zahrnuje hodnoty absorpance A a reflexe (odrazivosti) R daného materiálu, barevného filtru. Platí, že

$$R + T + A = 1, \quad (5.19)$$

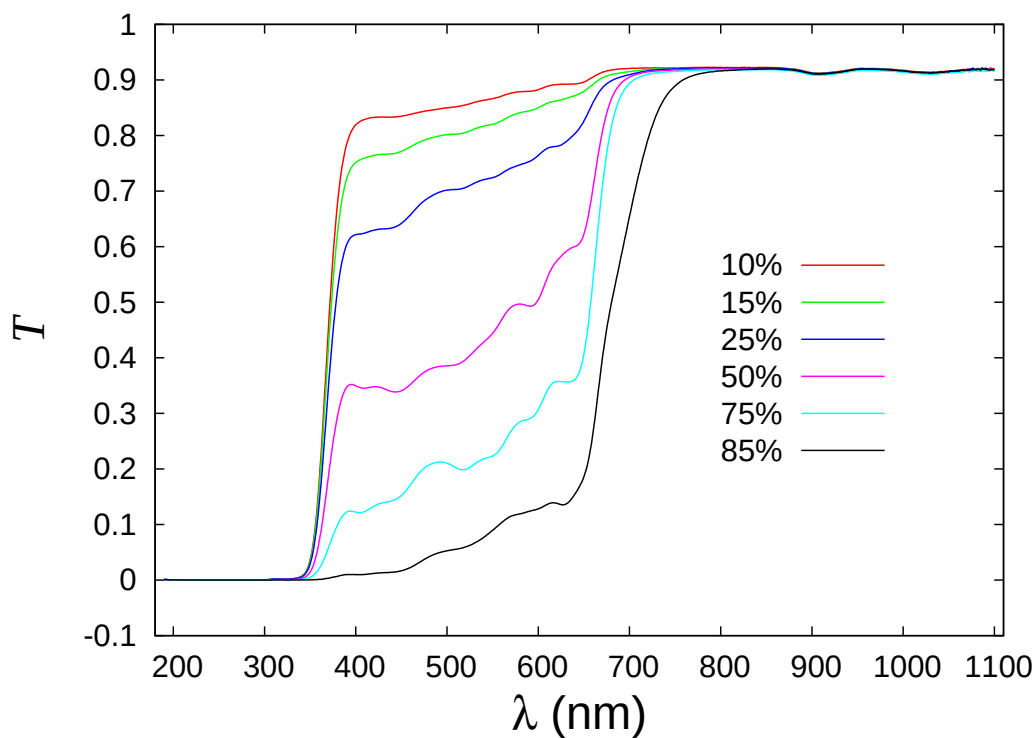
tedy

$$1 - T = R + A = F. \quad (5.20)$$

Protože hodnota odrazivosti je u brýlových čoček malá, můžeme říct, že

$$F \approx A. \quad (5.21)$$

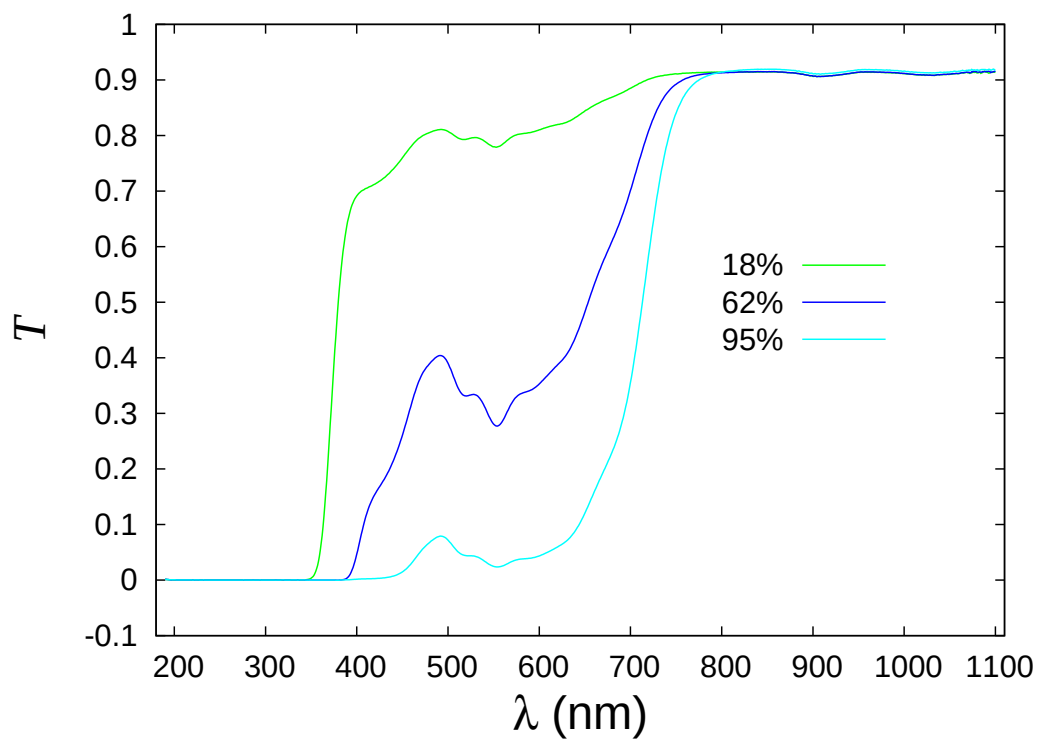
Protože výše uvedené veličiny absorpance, odrazivosti a propustnosti závisí na vlnové délce, je obtížné stupeň zabarvení definovat jedním číslem. V praxi se vždy jedná o jistou průměrnou hodnotu a vzhledem ke vztahu (5.21) není vždy zřejmé, zda výrobce uvádí u brýlových čoček stupeň zabarvení nebo samotnou absorpanci.



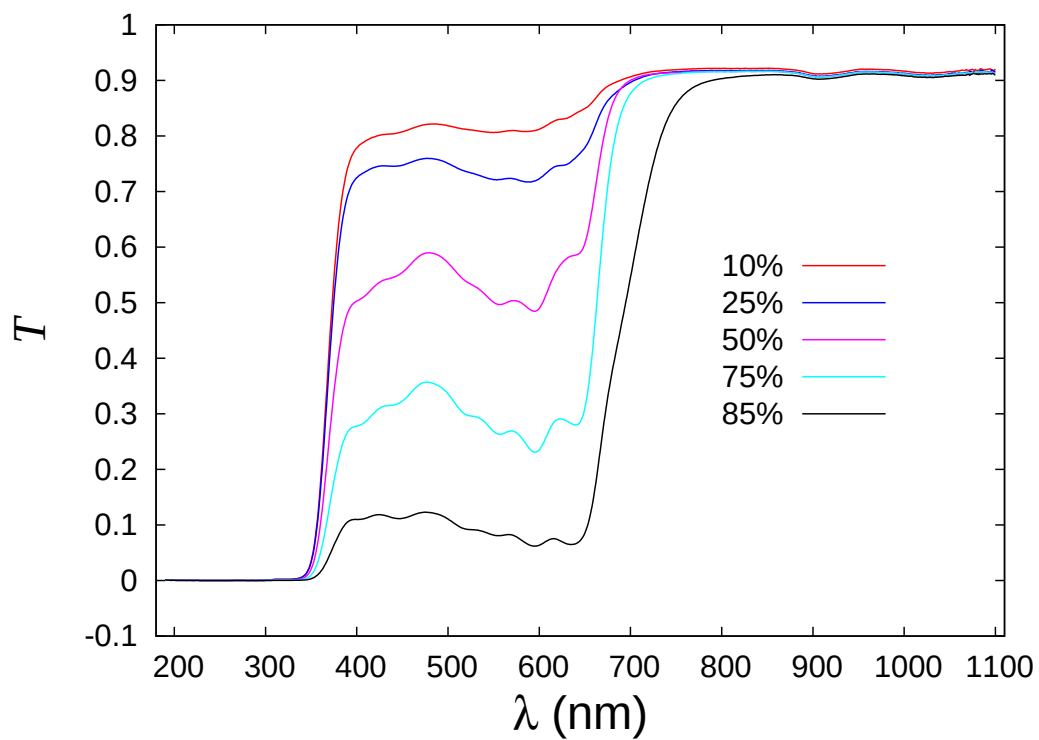
Obrázek 5.5: Spektrální závislost propustnosti T hnědého filtru (výrobce: Hoya).

Z obrázků 5.5–5.11 je zřejmé, že hodnoty stupně zabarvení barevných brýlových čoček uváděné výrobcem se rámcově shodují s naměřenými hodnotami propustnosti. V legendě grafů u jednotlivých křivek je uveden stupeň zabarvení, jak jej uvádí výrobce.

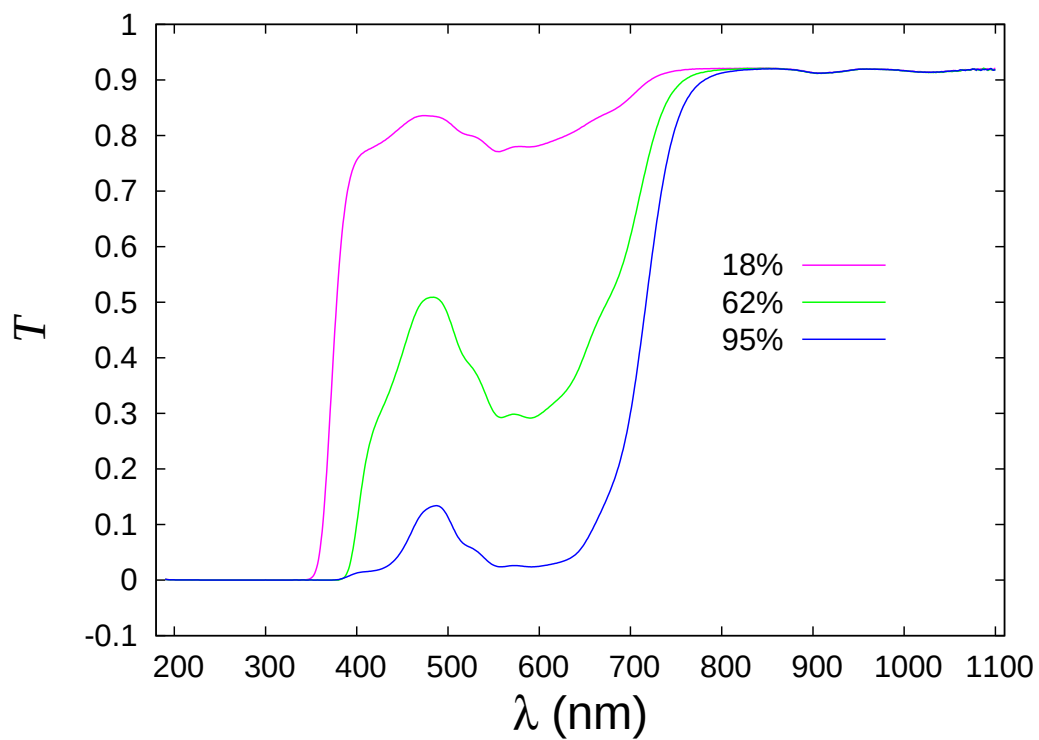
Pro grafy na obrázcích 5.12–5.15 jsou v legendě použity pro popis křivek komerční názvy jednotlivých barev brýlových čoček tak, jak je udává výrobce (výrobce neuvádí přesné barevné souřadnice barvy filtrů). Přibližné barevné odstíny filtrů jsou uvedeny v dodatku C.



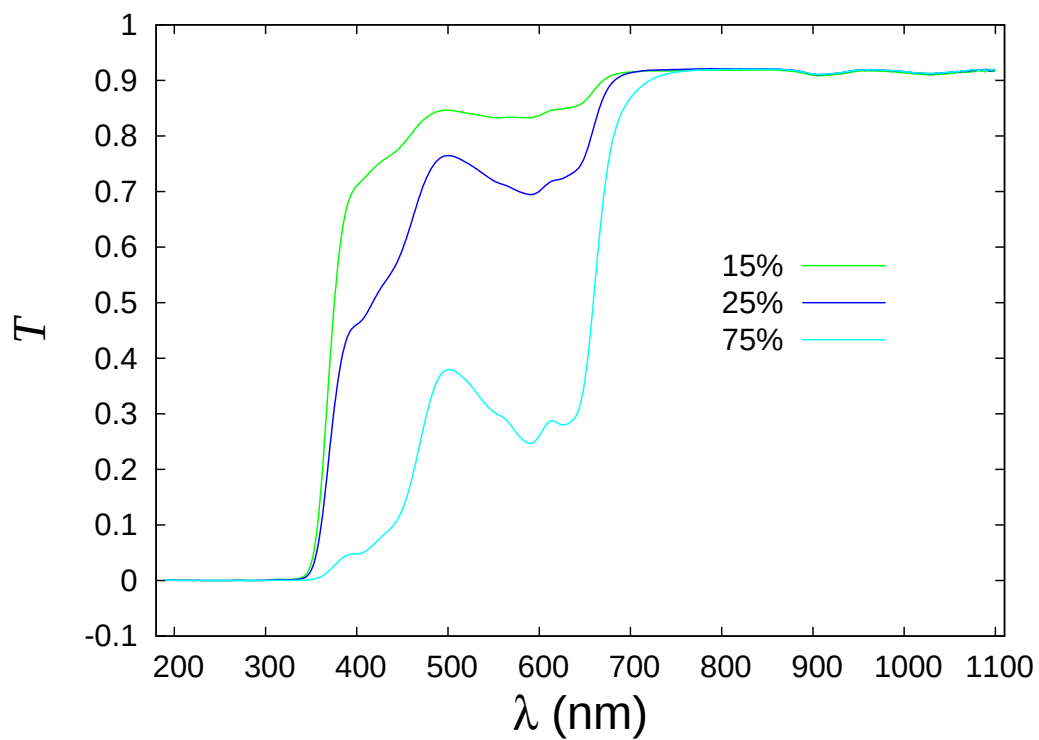
Obrázek 5.6: Spektrální závislost propustnosti T hnědého filtru *Physio Brown* (výrobce: Essilor).



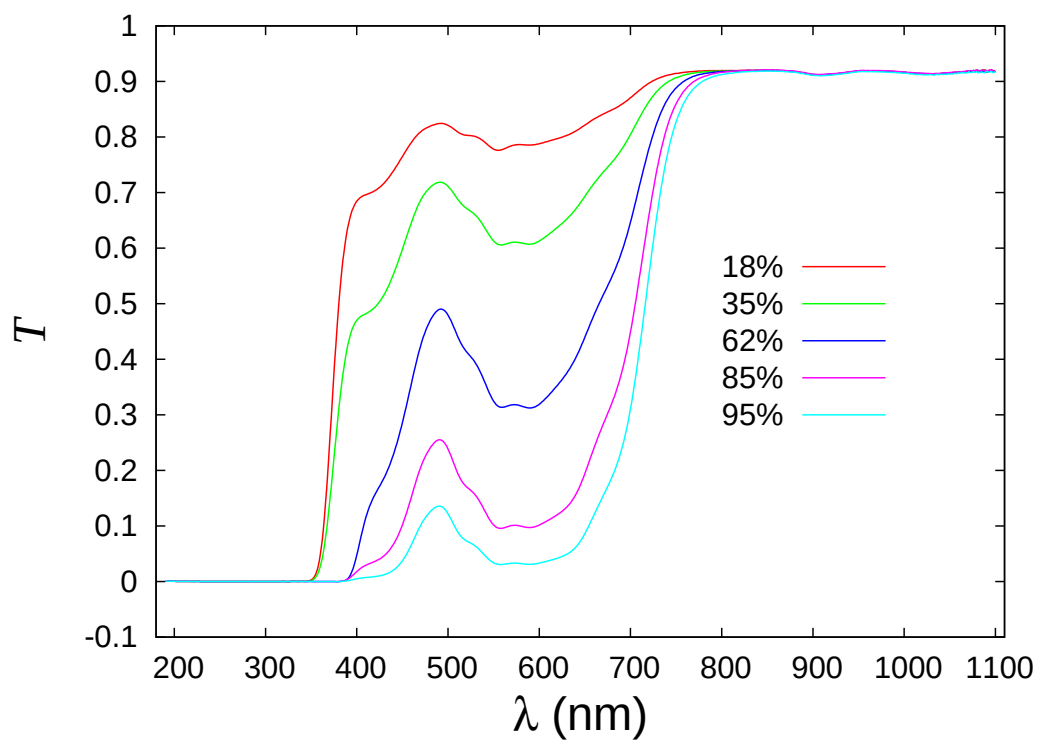
Obrázek 5.7: Spektrální závislost propustnosti T šedého filtru (výrobce: Hoya).



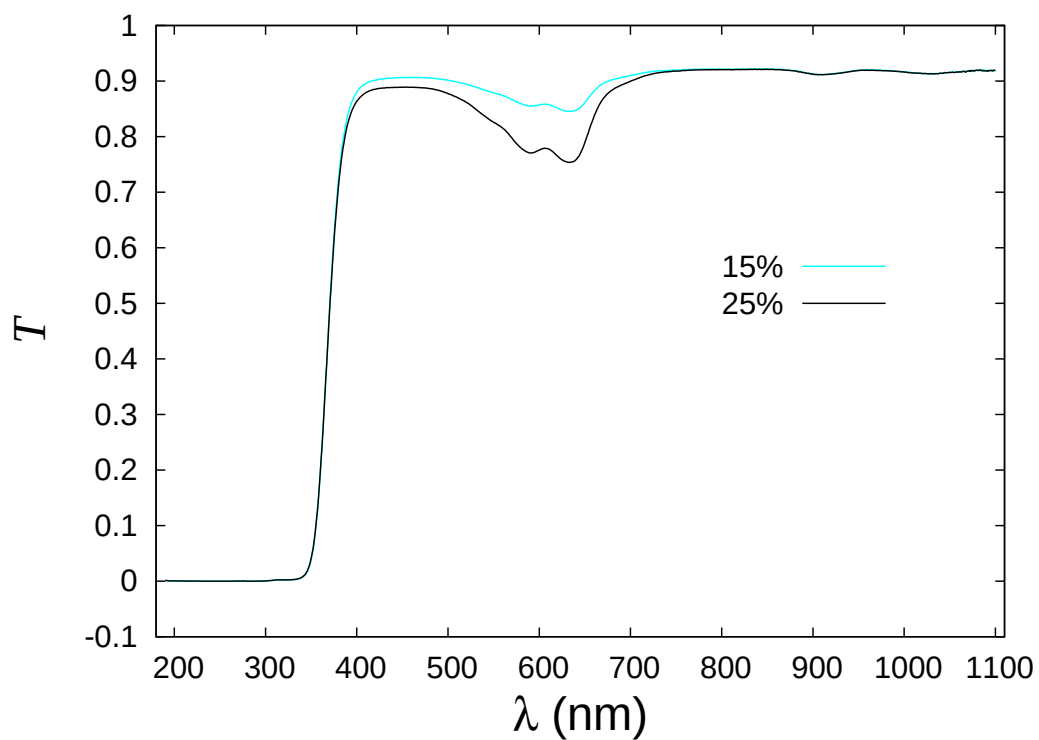
Obrázek 5.8: Spektrální závislost propustnosti T šedého filtru *Physio Grey* (výrobce: Essilor).



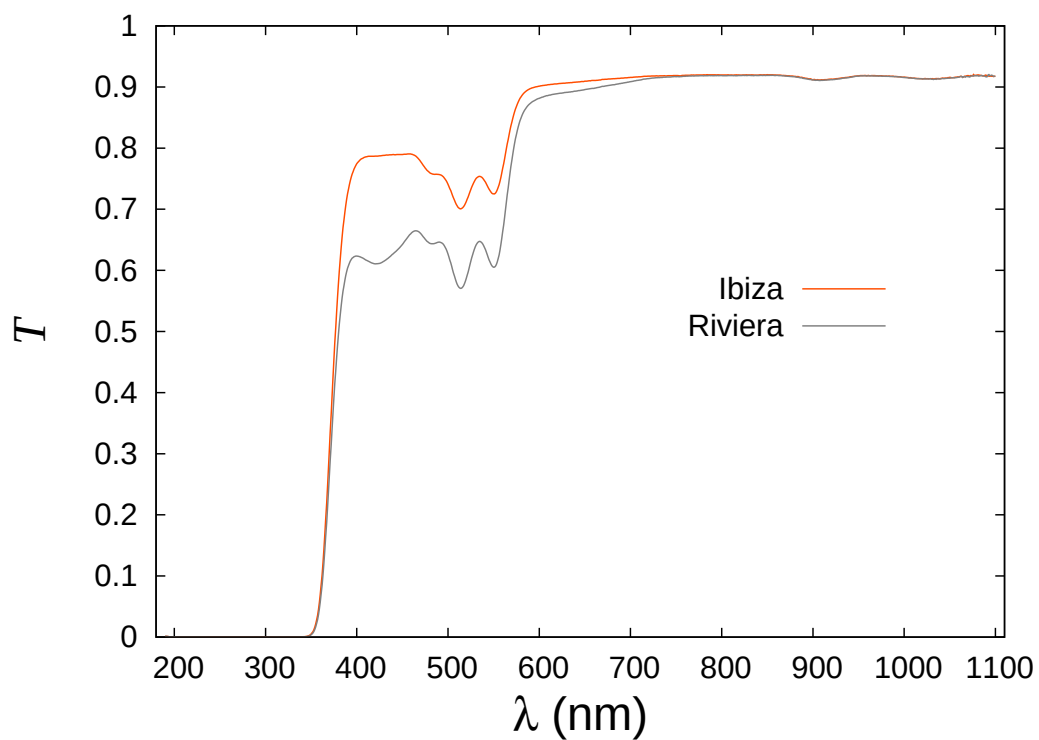
Obrázek 5.9: Spektrální závislost propustnosti T zelené filtru (výrobce: Hoya).



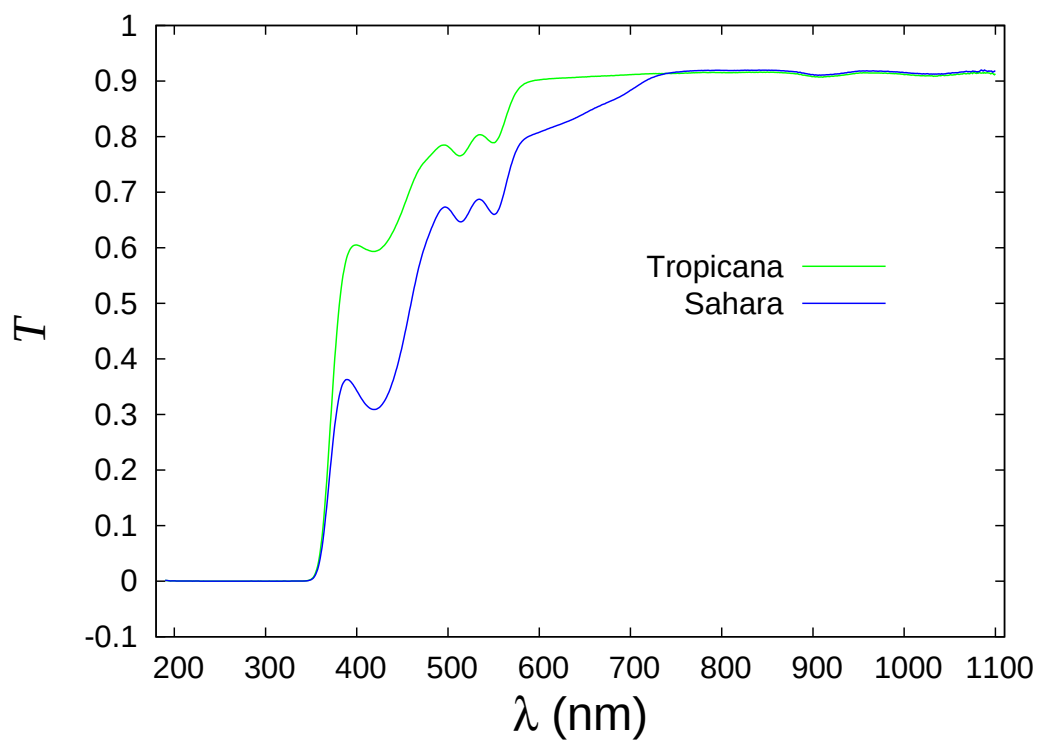
Obrázek 5.10: Spektrální závislost propustnosti T šedo-zeleného filtru *Physio Grey-Green* (výrobce: Essilor).



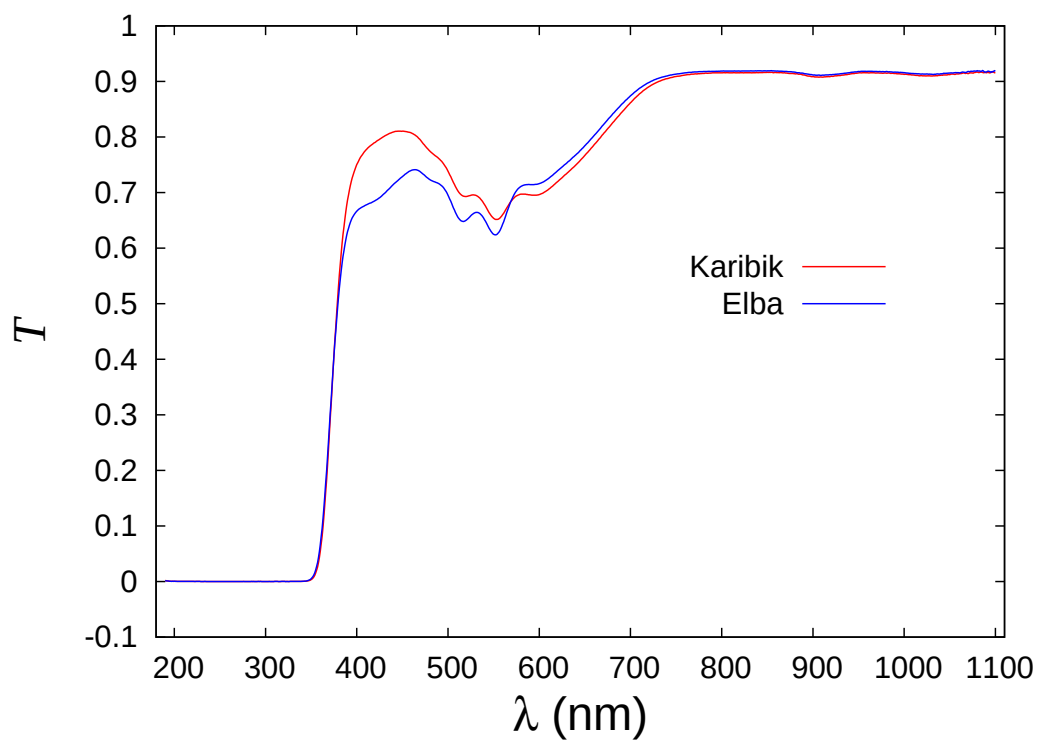
Obrázek 5.11: Spektrální závislost propustnosti T modrého filtru (výrobce: Hoya).



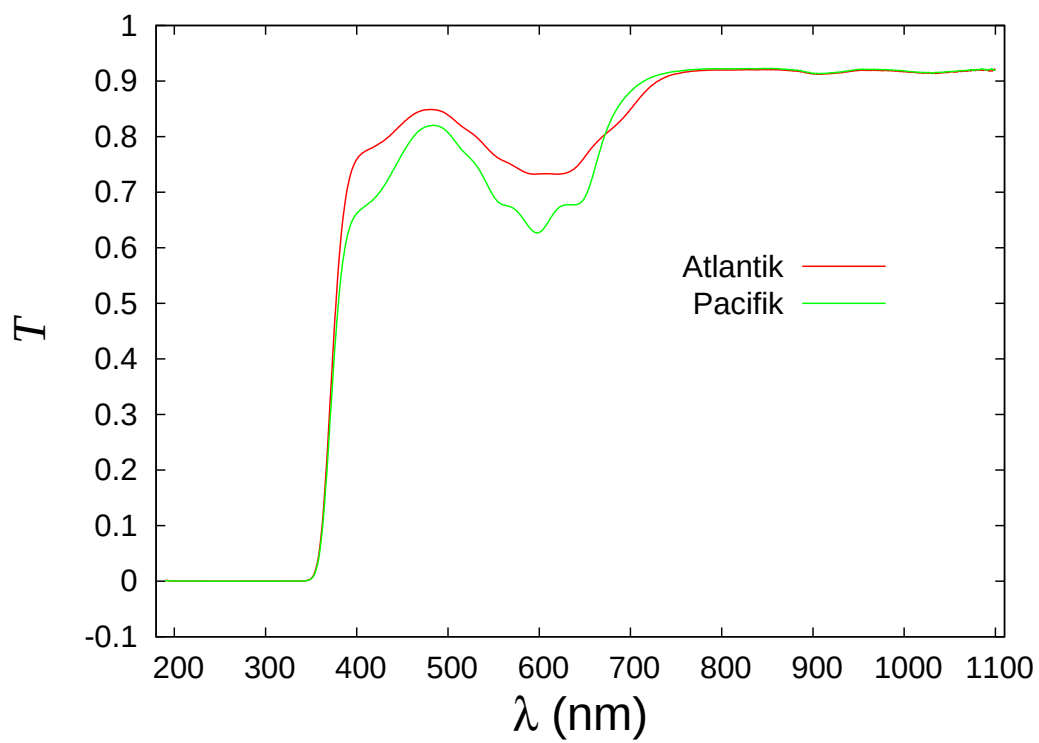
Obrázek 5.12: Spektrální závislost propustnosti T barevné filtrů: Ibiza (20%), Riviéra (24%) (výrobce: Essilor).



Obrázek 5.13: Spektrální závislost propustnosti T barevné filtrů: Tropicana (15%), Sahara (25%) (výrobce: Essilor).

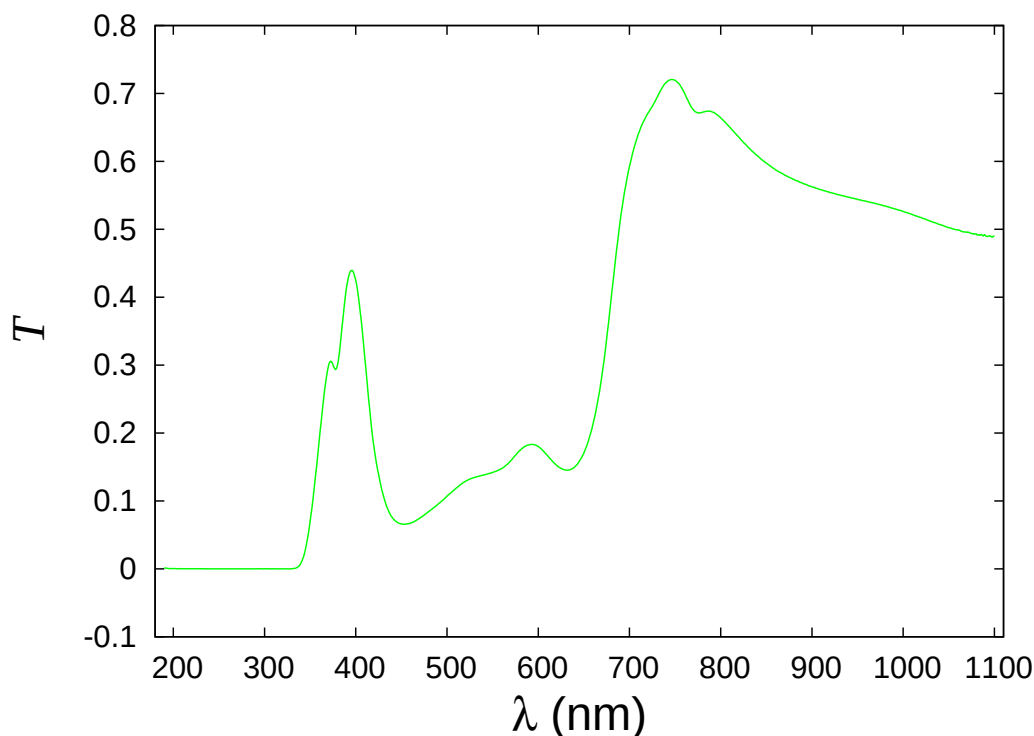


Obrázek 5.14: Spektrální závislost propustnosti T barevné filtrů: Karibik (28%), Elba (32%) (výrobce: Essilor).



Obrázek 5.15: Spektrální závislost propustnosti T barevné filtrů: Atlantik (24%), Pacifik (28%) (výrobce: Essilor).

5.4.2 Propustnost starších brýlí



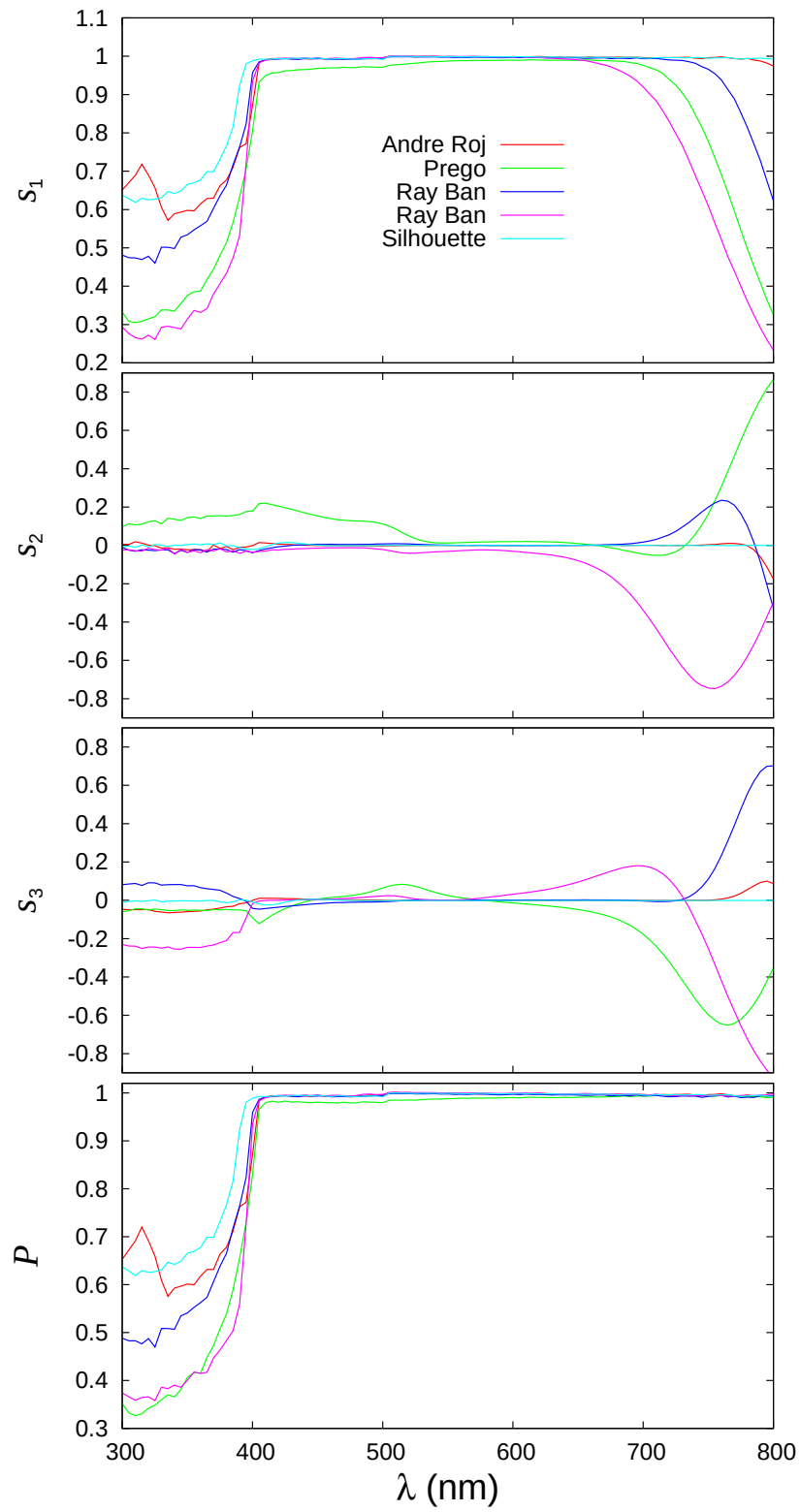
Obrázek 5.16: Spektrální závislost propustnosti T starších brýlí bez UV filtru neznámého původu.

Občas v domácnostech objevíme zapomenuté nebo odložené staré sluneční brýle. Některé z nich mohou být pro náš zrak nebezpečné. Nejsou opatřeny kvalitním UV filtrem a samotný barevný filtr může být vyroben tak, že ještě znásobí účinek škodlivého záření. Příklad takto nevhodných brýlí je uveden na obrázku 5.16. Je zde vidět, že tyto brýle mají relativně nízkou propustnost ve viditelné oblasti spektra, ale vykazují lokální maximum v UV oblasti na vlnové délce 370 nm. Barevný filtr těchto brýlí sice sníží množství záření z viditelné oblasti spektra, ale způsobí rozšíření zornic. Protože zde chybí bariéra v podobě kvalitního UV filtru, dovolí tím vstup většího množství UV záření, než by v tomto případě pronikalo do oka bez slunečních brýlí.

5.4.3 Elipsometrická měření

Teoreticky předpokládáme, že polarizační čočka jako polarizátor s osou polarizace orientovanou vertikálně, bude zastoupen přidruženými eliptickými parametry o hodnotách: $s_1 = 1$, $s_2 = 0$ a $s_3 = 0$ a stupněm zachování polarizace $P = 1$. Následující grafy na obrázku 5.17 ukazují, že měřené brýle splňují požadavky, které jsou z hlediska uživatele na ně kladeny, u všech vzorků dosahuje stupeň zachování polarizace v rozsahu vlnových délek viditelného záření, tj. 400 až 760 nm přibližně hodnotu $P = 1$, tj. brýle nedepolarizují světlo. Podle parametrů s_1 , s_2 a s_3 je však mezi jednotlivými vzorky patrný rozdíl. Čočky brýlí značky Ray Ban, Prego nejsou ideálními polarizátory. Z nenulových hodnot parametrů s_2 a s_3 je zřejmé, že propouštějí i část horizontální složky světla.

Z toho hlediska jsou nejlepšími polarizátory čočky brýlového klipu Silhouette, u nichž se parametry zjištěné měřením shodují s teoretickým předpokladem v celém spektrálním oboru viditelného světla.



Obrázek 5.17: Spektrální závislost přidružených elipsometrických parametrů s_1 , s_2 , s_3 a stupeň zachování polarizace P polarizačních filtrů vybraných brýlových čoček.

Kapitola 6

Závěr

Sluneční záření, které dopadá na zemský povrch, s sebou přináší i neviditelné a pro náš zrak škodlivé UV záření. UV záření je jednou z předních položek v seznamu rizikových faktorů, které způsobují rozvoj keratitid, katarakty, makulární degenerace, melanomu uvey nebo víček. Zabránit jeho průniku do oka a vzniku těchto postižení můžeme používáním slunečních brýlí s kvalitními brýlovými čočkami.

Pomocí metod spektrofotometrie a elipsometrie byla zkoumána kvalita vybraných vzorků barevných a polarizačních čoček. Prostřednictvím spektrofotometrie byla zkoumána propustnost brýlových čoček v širokém spektrálním oboru. Byla posuzována kvalita barevného filtru, tj. stupeň zabarvení čočky a její absorpční hrana v UV oblasti spektra. Pomocí elipsometrie byly zkoumány polarizační filtry brýlových čoček. Jako vzorky byly použity čočky brýlí současných renomovaných výrobců.

Měření prokázala, že moderní technologie, které užívají současní výrobci brýlových čoček, umožňují výrobu kvalitních UV, barevných i polarizačních filtrů.

Abychom demonstrovali kvalitu dnešních čoček, zařadili jsme i výsledky měření starých brýlí neznámého původu, které nebyly vyhovující z hlediska ochrany proti UV záření.

Závěrem lze konstatovat, že se každému uživateli vyplatí investovat do kvalitních slunečních a polarizačních brýlí, u kterých je zaručena výrobcem

udávaná kvalita, poněvadž běžný zákazník nemá možnost vlastnosti brýlových čoček ověřit pomocí uvedených metod. Proto nedoporučujeme experimentovat s levnými brýlemi zakoupenými například na stánku a riskovat tak poškození zraku.

Literatura

- [1] K. Kvapilíková, *Anatomie a embryologie oka* (Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, Brno, 2000).
- [2] W. F. Ganong, *Přehled lékařské fyziologie*, 20 ed. (Galén, Praha, 2005).
- [3] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 3 ed. (Pergamon Press, Oxford, 1965).
- [4] J. E. Roberts, “Ocular phototoxicity,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B* **64**, 136–143 (2001).
- [5] P. Kuchyňka, *Oční lékařství* (Grada Publishing, Praha, 2007).
- [6] K. Hanuš, *Kompendium očního lékařství* (Grada Publishing, Praha, 1997).
- [7] I. Ohlídal and D. Franta, “Ellipsometry of Thin Film Systems,” in *Progress in Optics*, E. Wolf, ed., (Elsevier, Amsterdam, 2000), Vol. 41, pp. 181–282.
- [8] U. Rossow, “Depolarization/mixed polarization corrections of ellipsometry spectra,” *Thin Solid Films* **313-314**, 97–101 (1998).
- [9] M. Tomanová, “Principy fyzikální optiky a lidské oko: polarizované světlo a oko,” *Bakalářská práce, Lékařská fakulta, Masarykova univerzita, Brno*, 2006.

Dodatek A

Polarizační stavy

Polarizační stav	Jonesův vektor	Stokesův vektor
Lineárně polarizovaná vlna (vertikálně)	$\sqrt{I_0} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
Lineárně polarizovaná vlna (horizontálně)	$\sqrt{I_0} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
Lineárně polarizovaná vlna ($+\frac{\pi}{4}$)	$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Lineárně polarizovaná vlna ($-\frac{\pi}{4}$)	$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$	$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Polarizační stav

Jonesův vektor

Stokesův vektor

Kruhově polarizovaná vlna
(pravotočivá)

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$$
$$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Kruhově polarizovaná vlna
(levotočivá)

$$\sqrt{\frac{I_0}{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$$
$$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Dodatek B

Optické prvky

Prvek optické soustavy	Jonesova matice	Müllerova matice
Polarizátor (vertikálně)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizátor (horizontálně)	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizátor $(+\frac{\pi}{4})$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizátor $(-\frac{\pi}{4})$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Optický prvek	Jonesova matice	Müllerova matice
Kompenzátor (vertikálně)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & -\sin(\delta) \\ 0 & 0 & \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}$
Kompenzátor (horizontálně)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}$
Kompenzátor ($+\frac{\pi}{4}$)	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{i\delta} & 1 - e^{i\delta} \\ 1 - e^{i\delta} & 1 + e^{i\delta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{pmatrix}$
Kompenzátor ($-\frac{\pi}{4}$)	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + e^{-i\delta} & 1 - e^{-i\delta} \\ 1 - e^{-i\delta} & 1 + e^{-i\delta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta) & 0 & -\sin(\delta) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{pmatrix}$

Dodatek C

Fashion colors

