

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY

# **FINÁLNÍ ÚPRAVY BRÝLOVÝCH ČOČEK A JEJICH VÝROBA**

Bakalářská práce

VYPRACOVALA:

Eliška Brychtová

obor 5345R008 OPTOMETRIE

studijní rok 2018/2019

VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:

RNDr. Jaroslav Wagner, Ph.D.

**Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Jaroslava Wagnera, Ph.D. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 7. 5. 2019

.....

Eliška Brychtová

**Poděkování:**

Tímto bych chtěla poděkovat panu RNDr. Jaroslavu Wagnerovi, Ph.D. za pomoc, rady a čas, který mi při konzultacích věnoval. V neposlední řadě také mé rodině a blízkým za podporu během celého studia.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci s názvem „Optometrie a její aplikace“, č. IGA\_PrF\_2018\_007 a IGA\_PrF\_2019\_005.

# Obsah

Obsah .....	4
Úvod.....	5
1 Běžné povrchové úpravy .....	6
1.1 Tvrzení.....	6
1.1.1 Výroba .....	6
1.1.2 Kontrola kvality tvrdících vrstev .....	9
1.2 Antireflexní vrstvy .....	10
1.2.1 Reflexe na brýlové čočce a jejich význam .....	10
1.2.2 Fyzikální princip.....	14
1.2.3 Výroba .....	16
1.2.4 Kontrola kvality antireflexních vrstev .....	21
1.3 Hydrofobní a oleofobní úprava.....	22
1.3.1 Výroba .....	22
1.4 Antistatická vrstva .....	23
2 Speciální povrchové úpravy.....	25
2.1 Barvení.....	25
2.1.1 Výroba .....	26
2.2 UV-filtr .....	27
2.2.1 Výroba .....	27
2.3 Polarizační filtr .....	28
2.3.1 Výroba .....	28
2.4 Reflexní vrstva.....	29
2.5 Filtr modrého světla .....	30
2.5.1 Výroba .....	31
2.6 Fototropní úprava.....	31
2.6.1 Výroba .....	32
Závěr .....	33
Seznam použité literatury .....	34

# Úvod

V dnešní době existuje několik možností, jak korigovat refrakční vady oka. Významnou skupinu korekce refrakčních vad tvoří brýlové čočky. Ty se vyrábějí z materiálů, kterými jsou sklo a plasty. Pro zlepšení jejich mechanických vlastností a také zvýšení komfortu nositele se na ně nanášejí zušlechťující tenké vrstvy. Momentálně jsou více preferovány plastové brýlové čočky především kvůli jejich nižší váze, méně pracnému opracování a rozmanitější nabídce povrchových úprav.

Cílem mé práce je tedy vytvořit přehled používaných povrchových úprav nanášených na brýlové čočky. Dále chci přiblížit čtenáři jejich význam a u vybraných typů také popsat fyzikální princip a technologický postup výroby. Myslím si, že toto téma může být užitečné nejen pro optometry a oční optiky, ale také pro laickou veřejnost, při porozumění jednotlivým povrchovým úpravám a při jejich správném výběru splňujícím stanovené požadavky.

Práce je rozdělena na dvě části. První část je zaměřena na běžné povrchové úpravy, přičemž její stěžejní část tvoří kapitola o antireflexních vrstvách, kde jsou zmíněny reflexe na plochách brýlové čočky, fyzikální princip, technologický postup výroby a metody kontroly kvality těchto vrstev. Dále se tato část věnuje tvrzení plastových i minerálních brýlových čoček, hydrofobním, oleofobním a antistatickým vrstvám. Ve druhé části jsou popsány úpravy speciální, které ovlivňují propustnost pro různé části spektra. Tím chrání oči před škodlivým zářením, či přinášejí nositeli komfortní dívání na ostrém slunci nebo při práci na počítači. Patří mezi ně barvení, reflexní vrstvy, filtr modrého světla aj.

# 1 Běžné povrchové úpravy

Plastové i minerální brýlové čočky mají své charakteristické mechanické a optické vlastnosti, z toho plynou jejich výhody i nevýhody, mezi které mohou patřit třeba špatná mechanická odolnost, vysoká odrazivost nebo jejich obtížné čištění. Aby se těmto negativním jevům předešlo, nanáší se na povrch brýlových čoček soustava tenkých vrstev.

## 1.1 Tvrzení

Tvrzení čili antiabrazivní vrstva, slouží ke zvýšení odolnosti čoček vůči mechanickému poškození. Na plastových brýlových čočkách se při běžném užívání mohou tvořit jemné, či hlubší škrábance, které snižují komfort dívání jednak vlivem difrakce, ale při velké míře poškrábání také snižují průhlednost čočky. Proto se na povrch čočky aplikuje tenká vrstva tvrdícího, nebo nanokompozitního laku, která zvyšuje povrchovou tvrdost a chrání čočku vůči otírání jemnými částicemi (např. prachem) a zároveň je dostatečně pružná, aby zabránila vytváření hlubokých škrábanců. Zároveň vyhladí nedoleštěné mikroskopické rýhy. [1] [2]

Minerální čočky jsou odolnější proti poškrábání než plastové, tvrdí se proto z jiného důvodu, a to, aby se zabránilo poškození oka při jejich případném rozbití. Takto upravená minerální čočka se totiž roztříští na menší a neostře kousky. [3]

### 1.1.1 Výroba

Výroba tvrzení se u plastových a minerálních čoček liší. Na povrch plastových čoček je nanášena tenká vrstva tvrdícího laku, kdežto čočky minerální se tvrdí tepelně nebo chemicky.

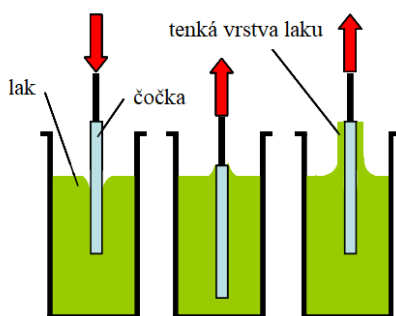
## Lakování plastových čoček

Aplikace tvrdících laků na plastovou čočku může probíhat několika způsoby, a to buď metodou zvanou dip-coating (ponoření s řízeným vytahováním), spin-coating (rotační roztírání), anebo vakuovým napařováním, kterým jsou nanášeny nanokompozitní laky. Poslední z metod bude popsána v kapitole zabývající se výrobou antireflexních vrstev.

## Dip-coating

Před aplikací vrstvy tvrdícího laku musí být čočky dokonale čisté, aby bylo dosaženo co nejlepší přilnavosti mezi lakem a povrchem čočky. Proto jsou nejdříve očištěny v ultrazvukové lázni a také během celého procesu je důkladně dbáno na čistotu (místnost je klimatizována a je zde udržována bezprašnost, konstantní teplota a vlhkost vzduchu). Veškerý objem laku v soustavě je navíc několikrát denně filtrován, aby se v něm netvořily sraženiny, které by mohly snížit kvalitu tvrzení. Pokud je lak nanášen na čočky vyrobené z vysokoindexového materiálu, je na ně ještě před lakem nanesena mezivrstva tzv. primeru, která zajišťuje lepší adhezi. [1]

Čočky jsou před lakováním uchyceny do speciálního držáku, pomocí kterého jsou ponořeny do vaničky s tvrdícím lakem, jehož index lomu by měl být co nejvíce podobný indexu lomu tvrzených čoček. Potom nedochází k optickým jevům na rozhraní – přechod mezi povrchem čočky a antiabrazivní vrstvou není vidět. Tomuto typu výběru laku říkáme „index matching“. Princip této metody spočívá v řízeném vytažení čoček z laku. Přesně kontrolovaná viskozita laku a rychlost vytažení čoček z lázně určuje výslednou tloušťku vrstvy, která obvykle dosahuje 2  $\mu\text{m}$  z obou stran. Pravidlem je, že čím je vytažení rychlejší, tím je tloušťka laku na povrchu čočky silnější a naopak. Tloušťka vrstvy ovšem ovlivňuje kvalitu tvrzení. Pokud je tvrdící vrstva silnější, než má být, snižuje se odolnost vůči ořezu. Pokud tenčí, je pak snížena povrchová tvrdost. Jestliže se během lakování na povrchu čočky najdou nečistoty, je možno již nanesený lak chloridem sodným z čočky odstranit a při dalším cyklu ji znovu nalakovat. Po nanesení tvrdící vrstvy a její kontrole putují čočky do pece, kde se dvě až tři hodiny tvrdí při 80–100 °C. Po polymeraci se vrstva laku mění na pružný pevný film s vysokou odolností proti poškrábání. [1] [4]

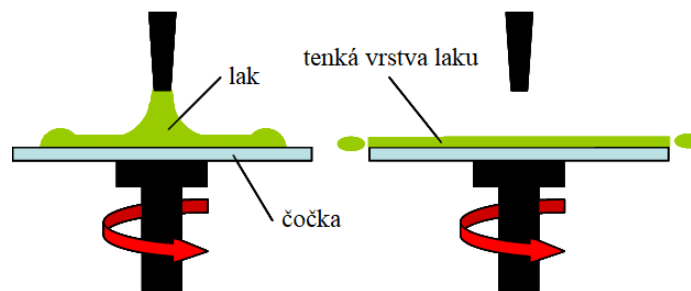


Obr. 1 – Schéma nanášení tvrdícího laku metodou dip-coating [5] Upraveno.

## Spin-coating

Tento postup je založen na stejnoměrném rozlití tvrdícího laku po povrchu čočky vlivem řízené rotace a používá se většinou k tvrzení zadní plochy čočky vyrobené z polotovaru s přední lakovanou plochou. Tvrzená vrstva vyrobená touto metodou není příliš vhodná jako podklad pro antireflexní vrstvy a není tak odolná jako u dip-coating. Výhodou ovšem je, že výroba je jednoduchá a levná. [6]

Před zahájením procesu nanášení antiabrazivní vrstvy je čočka opět důkladně očištěna, zde pomocí methanolu nebo isopropylalkoholu. Následně je čočka upnuta na rotující vřeteno, na kterém je možné nastavit požadovaný počet otáček, aby se čočka otáčela určitou rychlostí. Do středu rotující čočky je pak vstříknut proud laku (většinou o indexu lomu 1,5), který se díky odstředivé síle rovnoměrně rozleje po celém povrchu čočky a jeho přebytek je „odstříknut“. Následně je tato vrstva vytvrzena UV zářením. Tloušťka tvrdící vrstvy aplikované touto metodou je větší než u metody minulé, a to 3–5  $\mu\text{m}$ . [1] [4]



Obr. 2 – Schéma nanášení tvrdícího laku metodou spin-coating [5] Upraveno.

## Tvrzení minerálních čoček

Tvrzení minerálních čoček neprobíhá nanášením tvrdících vrstev, ale úpravou samotného materiálu čočky, a to tepelně nebo chemicky.

### Tepelné tvrzení

Při tepelném tvrzení se minerální čočka zahřeje na teplotu měknutí, která obvykle dosahuje 600 °C až 700 °C. Délka zahřívání se určuje podle tloušťky čočky, vyhodnocuje se její nejtenčí a nejtlustší místo (50–200 s). Po zahřátí čočky na požadovanou teplotu dochází k prudkému ochlazení proudem vzduchu, nebo chladicí kapalinou. Vlivem toho se povrchová vrstva ochladí rychleji než jádro čočky



a při dalším postupném ochlazování dochází ke vzniku vnitřního pnutí mezi povrchem a jádrem čočky, protože jádro má snahu se dále smršťovat, ale již ztuhlý povrch tomu brání. Protichůdně zde tedy působí tahové napětí (jádro) a tlakové napětí (povrch). Tato napětí lze sledovat pomocí tenzoskopu. Důležité je, aby před procesem tvrzení byla čočka již zabroušena na požadovaný tvar a řádně očištěna, protože pokud by se do ní dále zasahovalo, hrozilo by její popraskání. Toto je jednoduchá, rychlá a finančně nenáročná metoda, která se však nehodí pro čočky vysokoindexové, bifokální a čočky s vysokými cylindry. Také na ně nelze dále nanášet antireflexní vrstvy a barvu. [1] [3]

### **Chemické tvrzení**

Principem této metody je výměna iontů mezi kapalinou a povrchovou vrstvou čočky z korunovaného skla. Tvrzená čočka je na 16 hodin ponořena do roztoku tvořeného dusičnanem draselným a malým množstvím kyseliny křemičité, který má celou dobu teplotu přibližně 400 °C. Během toho dochází k již zmíněné difúzi iontů. Sodíkové ionty jsou uvolňovány ze skla do kapaliny a jejich místo zaujímají ionty draselné, které jsou větší než ty sodíkové, a proto po vyjmutí čočky z lázně a jejím následném ochlazení dochází ke smrštění povrchové vrstvy skla a vzniku tlakového napětí. Po celém tomto úkonu je čočka řádně očištěna od zbytků lázně a opláchnuta vodou. Výhodou této metody je, že tvrzení je rovnoměrné, a při jejím využití nezáleží na tloušťce čočky. Ovšem je časově i finančně náročnější. [1] [3]

### **1.1.2 Kontrola kvality tvrdicích vrstev**

Aby bylo možné ověřit účinnost antiabrazivních vrstev, vyvinuli výrobci několik zkušebních metod, které testují vzorky čoček všech šarží.

#### **Bayerův test**

Testovaná čočka je přichycena na dno kovové nádoby, která je následně umístěna na oscilační přístroj. Do nádoby pracovník nasype přesné množství abrazivního materiálu, který má definovanou velikost zrna, je jím často písek, nebo oxid hliníku. Poté je přístroj zapnut a nádoba se pohybuje doprava a doleva, tím se rozpohybuje i abrazivní materiál, který se přesypává po povrchu čočky. Po dokončení celého cyklu, který trvá asi čtyři minuty (tj. 600 cyklů), je čočka vyjmuta, měří se množství způsobeného oděru a výsledek se porovnává s kontrolním vzorkem. [7]

## Test ocelovou vatou

Před testováním je čočka s antiabrazivní vrstvou řádně očištěna alkoholem a umístěna do testovací místnosti na nejméně 24 hodin, kde je stálá teplota (23 °C) a vlhkost (50 %). Tím se minimalizuje riziko ovlivnění testu těmito faktory. Poté je čočka upnuta do testovacího zařízení, které provede 20 otření jejího povrchu ocelovou vatou o jemnosti 0000 při zátěži 500 g. Následuje porovnání míry oděru čočky s testovanou vrstvou a bez ní. [6] [8]

## 1.2 Antireflexní vrstvy

Při průchodu svazku světla přes brýlovou čočku dochází k odrazu a lomu na dvou rozhraních prostředí (vzduch – materiál čočky) a kvůli tomu dochází ke ztrátám na intenzitě světelného toku. Cílem antireflexních vrstev je právě minimalizovat tyto ztráty a u brýlových čoček také potlačit odrazy okolních zdrojů světla, jako jsou lampy, okna aj., které znemožňují pohled nositeli do očí. Tyto vrstvy mají také velký význam pro nositele brýlí za šera a v noci, zvláště pro řidiče, protože nežádoucí odražené paprsky mohou snižovat kontrast předmětů a zvyšovat oslnění. [1]



Obr. 3 – Brýlová čočka bez a s antireflexní úpravou

### 1.2.1 Reflexe na brýlové čočce a jejich význam

Reflexe světla na brýlové čočce lze rozdělit podle místa, kde vznikají. Jsou to odrazy od přední a zadní plochy čočky a vnitřní odraz. Společně pak snižují propustnost světla skrz čočku a působí nežádoucí odlesky vnímané nositelem brýlí i jeho okolím. Tyto jevy jsou eliminovány právě antireflexními vrstvami.

## Odraz od přední plochy čočky

Tento odraz způsobuje asi nejznámější úkaz, který sice nijak neovlivňuje samotného nositele brýlí, ale je nepříjemný pro člověka, který s ním např. hovoří, protože mu znemožňuje pohled do jeho očí. Díky odrazivosti čočky totiž vznikají obrazy okolních zdrojů světla (slunce, osvětlení v místnosti aj.), které oči za nimi překrývají. Proto mají antireflexní vrstvy i důležitý estetický význam i s ohledem na to, že brýlovým čočkám dávají zajímavější vzhled díky zbytkové barvě. [9] [10]

## Odrazy od přední a vnitřní plochy čočky

Při dopadu světla na přední plochu čočky se paprsek nejen odráží, ale i lomí, a to podle Snellova zákona. Lomený paprsek se pak dále šíří celou tloušťkou čočky až na vnitřní stranu zadní plochy čočky, kde dochází ke stejnému jevu – odrazu i lomu. Tyto fenomény poté způsobují snížení intenzity procházejícího světla čočkou (tzv. fresnelovské ztráty). [10] [2]

Antireflexní úprava je důležitá hlavně u vysokoindexových čoček, jelikož čím vyšší je index lomu čočky, tím větší je její odrazivost. [9] Pro kolmý dopad světla tuto skutečnost vyjadřuje vzorec

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2,$$

kde  $R$  je odrazivost,  $n_1$  je index lomu prvního prostředí (vzduchu) a  $n_2$  je index lomu druhého prostředí (čočky). [11]

Jako příklad je uvedena tabulka odrazivosti jedné plochy čočky vyrobené z užívaných indexů lomu, umístěné ve vzduchu ( $n_1=1$ ), kde  $n_2$  je index lomu čočky a  $R$  odrazivost.

**Tab. 1 – Závislost odrazivosti na indexu lomu čočky**

$n_2$	1,50	1,60	1,67	1,74
R	4,00 %	5,33 %	6,30 %	7,29 %

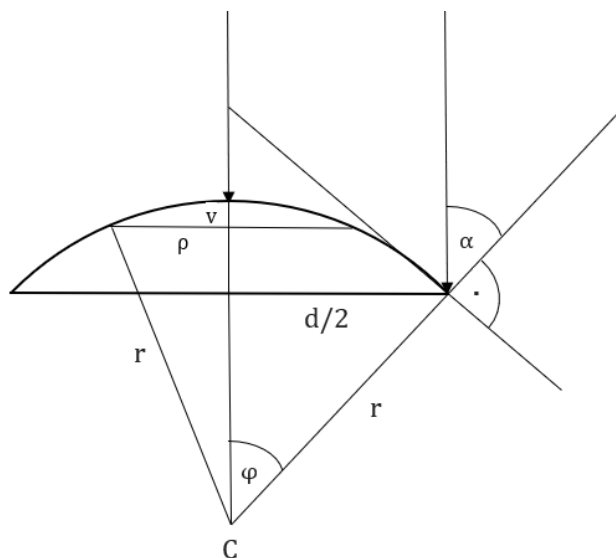
Pro výpočet odrazivosti nepolarizovaného světla při úhlu dopadu jiném než  $90^\circ$  pak platí vztah

$$R = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right],$$

kde  $R$  je odrazivost,  $\alpha$  úhel dopadu a  $\beta$  úhel lomu. [12]

Vzhledem k tomu, že brýlová čočka je klenutá, je hodnota odrazivosti při dopadu rovnoběžných paprsků světla na různá místa čočky odlišná.

Jako modelový příklad bude vypočítána odrazivost na okraji čočky, umístěné ve vzduchu, o indexu lomu  $n_2 = 1,74$ , průměru  $d = 65,0$  mm a bází 6, pak výška kulového vrchlíku šablony na měření báze čočky je  $v = 2,20$  mm a poloměr  $\rho = 20,0$  mm.



**Obr. 4 – Schéma pro výpočet odrazivosti čočky**

Poloměr zakřivení přední plochy čočky je možné vypočítat ze vztahu

$$r^2 = (r - v)^2 + \rho^2,$$

kde  $r$  je poloměr zakřivení přední plochy čočky,  $v$  výška a  $\rho$  poloměr kulového vrchlíku. [13] Po dosazení dostaneme  $r = 92,0$  mm. Dále je třeba zjistit úhel  $\varphi$ , tedy

$$\sin \varphi = \frac{d}{2r},$$

kde úhel  $\varphi$  určuje místo dopadu okrajového rovnoběžného paprsku a zároveň je totožný s jeho úhlem dopadu  $\alpha$ ,  $d$  je průměr čočky a  $r$  poloměr zakřivení její přední plochy. [13] Pak  $\varphi = \alpha = 20,7^\circ$ . Poslední potřebnou hodnotou pro výpočet odrazivosti je úhel lomu, ten získáme ze Snellova zákona lomu

$$\sin \alpha * n_1 = \sin \beta * n_2,$$

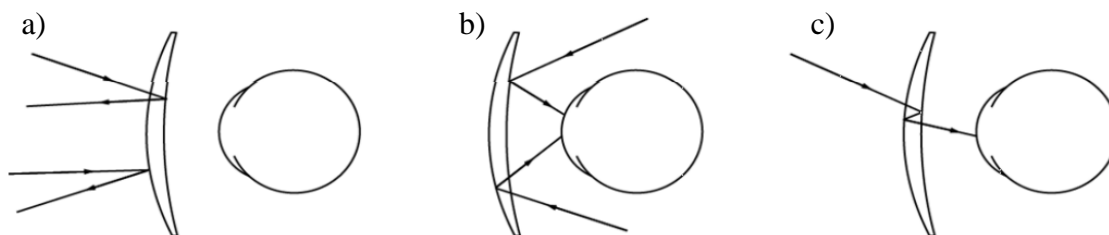
kde  $\alpha$  je úhel dopadu,  $n_1$  index lomu vzduchu,  $\beta$  úhel lomu a  $n_2$  index lomu čočky. [12] Tedy  $\beta = 11,7^\circ$ . Poté vše dosadíme do vzorce pro výpočet odrazivosti nepolarizovaného světla uvedeného výše. Výslednou hodnotou odrazivosti pro uvedené parametry čočky je  $R = 7,33 \%$ . V porovnání s hodnotami z tab. 1, je rozdíl v odrazivosti ve středu a na kraji též čočky  $0,0376 \%$ .

### **Odrazy od zadní plochy čočky**

Pokud se nositel brýlí nachází v situaci, kdy světlo vychází ze zdrojů umístěných za ním (např. při řízení auta), dochází ke snížení kontrastu vlivem odražených paprsků od zadní plochy čočky, které se překrývají s paprsky jdoucími skrz čočku z pozorované oblasti. Navíc může být nositel nepříjemně oslněn. Proto se antireflexní vrstvy nanášejí i na zadní plochu čočky. [2]

### **Vnitřní dvojitý odraz**

Další jev zhoršující kvalitu vidění přes brýlovou čočku vzniká dvojitým vnitřním odrazem mezi přední a zadní plochou čočky. Jak je již zmíněno v předchozích odstavcích, světlo se nejdříve odráží a láme na přední ploše čočky. Lomené světlo dále prochází skrz čočku k její zadní ploše, kde se také odráží a lomí. Odražené světlo od zadní plochy čočky se vrací zpět k přední ploše, kde se znovu odráží a lomí, takto nastává druhý vnitřní odraz, díky kterému následně vzniká další obraz sledovaného předmětu, který je oproti prvnímu primárnímu obrazu mírně odchýlen, má také nižší intenzitu, a tudíž snižuje kontrast. Proto je tento fenomén opět rizikový zejména pro řidiče za šera nebo za tmy a může být redukován aplikací antireflexní vrstvy na obě plochy brýlové čočky. [2]



**Obr. 5 – Schéma reflexí na brýlové čočce [6] Upraveno.**

Na obr. 4 je postupně schematicky znázorněna reflexe a) na přední ploše a vnitřní ploše, b) na zadní ploše a vnitřní ploše, c) vnitřní dvojitý odraz.

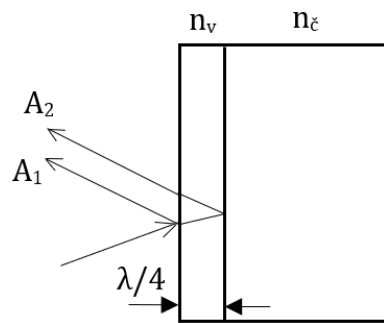
### 1.2.2 Fyzikální princip

Základním principem antireflexní úpravy je destruktivní interference na tenké vrstvě. Pro zjednodušení bude uvažována pouze jedna vrstva nanesená na povrch brýlové čočky. Světlo, procházející touto vrstvou až k přední ploše čočky, se odrazí a lomí na dvou rozhraních prostředí, a to vzduch – vrstva a vrstva – čočka. Vznikají tedy dva odražené paprsky, které se setkávají poté, co se paprsek odražený na druhém rozhraní vrátí skrze vrstvu zpět k její přední ploše. Při dvojitém odrazu získají paprsky vůči sobě opačnou fázi. Tyto paprsky se následně skládají a navzájem se vyruší. Tak je díky antireflexní vrstvě snížena odrazivost čočky a zároveň se zvýší její propustnost. Aby celý proces fungoval, musejí být splněny určité podmínky, nazývané fázová a amplitudová. [10] [14]

Fázová podmínka říká, že odražené vlny se vzájemně zeslabí, pokud se setkávají s opačnou fází. Pokud k tomuto jevu má dojít, je důležité zvolit vhodnou tloušťku antireflexní vrstvy tak, aby se rozdíl optických drah odražených paprsků  $\Delta l$  rovnal přesně polovině jejich vlnové délky. Tzn., že jestliže paprsek prochází vrstvou dvakrát, pak aby bylo splněno  $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$ , musí mít vrstva tloušťku rovnu  $\frac{\lambda}{4}$ . Taková tloušťka se nazývá čtvrtvlnová. [10] [15] Tento požadavek je zároveň nutno zkombinovat s podmínkou pro interferenční minimum, kdy se dráhový rozdíl interferovaných vln rovná lichému násobku půlvln. [14] Pak výsledným vztahem pro výpočet ideální tloušťky antireflexní vrstvy je

$$h_v = \frac{\lambda}{4 * n_v},$$

kde  $h_v$  je tloušťka antireflexní vrstvy,  $\lambda$  je vlnová délka uvažovaného světla a  $n_v$  index lomu vrstvy. [10]



**Obr. 6 – Odrazy na antireflexní vrstvě [15]**

Amplitudová podmínka udává: Má-li dojít k vyrušení výsledné vlny, tedy nastat interferenční minimum, musejí mít odražené vlny, ze kterých je složená, stejné amplitudy. Tuto podmínku lze splnit, jestliže bude mít tenká vrstva odpovídající index lomu. Pro kolmou odrazivost na prvním rozhraní vzduch – vrstva  $r_1$  a pro kolmou odrazivost na druhém rozhraní vrstva – čočka  $r_2$  platí

$$r_1 = -\frac{n_v - 1}{n_v + 1}$$

a

$$r_2 = -\frac{n_c - n_v}{n_c + n_v},$$

kde  $n_v$  je index lomu vrstvy a  $n_c$  je index lomu čočky. [15]

Pokud má být amplitudová podmínka splněna, tj.  $A_1 = A_2$ , musí zároveň platit i  $r_1 = r_2$ . Z tohoto vztahu lze následně odvodit, že index lomu antireflexní vrstvy jde vypočítat pomocí vzorce, který se nazývá Strongova podmínka [15]

$$n_v = \sqrt{n_c}.$$

Doposud byla uvažována pouze jedna antireflexní vrstva, což znamená, že nežádoucí odrazy byly utlumeny pouze pro jednu vlnovou délku světelného spektra. U brýlových čoček je základem zvýšit propustnost pro zelenožlutou barvu, která má vlnovou délku okolo 555 nm, protože lidské oko je na ni nejcitlivější. Pokud bychom chtěli eliminovat odrazy pro větší část viditelného spektra, je nutné na čočku nanést více

antireflexních vrstev v kombinaci materiálů s vysokým a nízkým indexem lomu. V běžné praxi je to mezi třemi až osmi vrstvami. Paprsky odražené od vnějších i vnitřních rozhraní těchto vrstev mají k sobě navzájem opačnou fázi, mohou tedy spolu interferovat a navzájem se vyrušit. [1] [4]

### 1.2.3 Výroba

Výroba antireflexních vrstev spočívá v nanesení několika čirých vrstev materiálu na čočku, které odpovídají uvedeným podmínkám. Čočka musí být před aplikací tenkých vrstev řádně vyčištěna, aby se zabránilo ulpění jakýchkoliv nečistot na jejím povrchu, tím by mohla být narušena kvalita antireflexních vrstev. Proto jsou i místnosti, kde se vrstvy nanášejí, chráněny různými typy opatření proti proniknutí prachu a jiných nečistot. [2]

Při výrobě se využívají fyzikální a chemické procesy, nebo jejich kombinace. Většinou je však používáno nanášení ve vysokém vakuu (tlak je zde od  $10^{-4}$  do  $10^{-7}$  hPa), aby se zabránilo srážkám napařovaného materiálu se zbytkovými molekulami obsahu vakuové aparatury. [4]

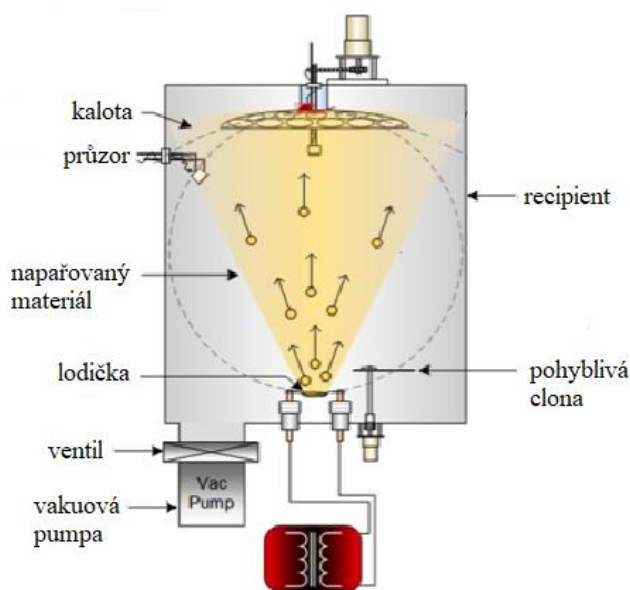
### Čištění čočky

Před nanášením tenkých vrstev je nutno čočku řádně očistit od reziduí, které mohou na jejím povrchu ulpívat po předchozích krocích výroby čočky. Tyto nečistoty způsobují špatné přilnutí tenké vrstvy na povrch čočky a tím snižují jejich kvalitu. Čisticí proces má tři fáze: mechanické odstranění částic, namáčení a oplachování v různých kapalinách a sušení. Mechanické očištění nečistot probíhá dvěma způsoby, vlhčenou tkaninou nebo vysokotlakovým stříkáním, které díky smykové síle odstraňuje částice ve velikosti mikrometru. Roztoky, které se používají k čištění čoček, se obecně nazývají saponáty a obvykle obsahují tři složky: povrchově aktivní látku, odmašťující emulgátor a složku zabraňující srážení. Tyto roztoky se využívají ve formě ultrazvukových mycích lázní. Po ponoření do saponátu se čočka několikrát opláchně destilovanou vodou a následně je možné ji opláchnout ještě v několika kapalinách, a to v isopropanolu, metanolu, nebo acetonu. Tyto látky mohou být však zdraví nebezpečné. Závěrečným krokem v procesu čištění čoček je jejich sušení, poté již na povrchu čočky nesmějí být žádné nečistoty. [16]



## Fyzikální vakuové napařování

Fyzikální vakuové napařování spočívá v převedení nanášeného materiálu zahřátím ze skupenství pevného do skupenství plynného. Materiál v tomto skupenství putuje vakuem za nízkého tlaku ( $10^{-4}$  hPa až  $10^{-7}$  hPa) až k povrchu čočky, kde ulpí kondenzací, tedy přechází opět do pevného skupenství, a vytvoří tak požadovanou tenkou vrstvu. Částice se vakuem šíří přímočaře a struktura vrstvy záleží na směru jejich dopadu. [4]



Obr. 7 – Schéma vakuové aparatury [17] Upraveno.

### Napařování odporovým ohřevem

Tato metoda se používá při nanášení materiálů, které mají nižší teplotu tavení nebo sublimace. Proces probíhá ve vakuové komoře a za sníženého tlaku, který dosahuje hodnoty  $10^{-4}$  hPa. Vakuum se zde vytvoří pomocí difúzní, rotační nebo turbomolekulární vývěvy. Čisté dokonalé čočky jsou uvnitř vzduchotěsného recipientu připevněny na kalotě, která má tvar kulového vrchlíku a rotuje konstantní rychlostí. Poté jsou zahřáty na teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby byla zvýšena jejich přilnavost. Pokud je ovšem plastová čočka zahřata na teplotu vyšší, žloutne. Materiál, který má být napařován, je uložen na lodičce, kelímku, nebo spirále, které jsou vyrobeny z materiálu o vysoké teplotě tání (např. z wolframu, tantalu, molybdenu, případně keramiky nebo uhlíku). Lodička je připojena ke zdroji elektrického proudu, pomocí kterého je materiál zahříván až na teplotu, kdy začne sublimovat ( $1000\text{--}2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Poté molekuly materiálu

procházejí vakuem ve všech směrech a přímočaře. I když se na výrobu lodiček a ostatních nádobek na nanášený materiál používají těžkotavitelné kovy, nelze úplně vyloučit kontaminace antireflexní vrstvy částicemi materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Tomuto jevu lze předejít tzv. reaktivní metodou napařování, která spočívá ve vytvoření atmosféry v recipientu z kyslíku o tlaku  $10^{-2}$  Pa, díky kterému částice nanesené na povrch čočky dodatečně oxidují. Tak je možno nanášet i materiály, které jsou pomocí napařování odporovým ohřevem těžko aplikovány. Tato metoda se využívá pro výrobu vrstev např. z TiO nebo SiO, z těchto látek se po oxidaci stane TiO<sub>2</sub> a SiO<sub>2</sub>. [4] [18]

### **Napařování elektronovým svazkem**

Při napařování elektronovým svazkem v první fázi dochází k přípravě materiálu, která probíhá v několika krocích. Materiál je do kelímku vložen ve formě tablet nebo granulí, mezi kterými nesmí zůstat žádný plyn, jinak by materiál při zahřívání mohl explodovat. Poté je ve vakuu elektronovým dělem předehřán, nataven, a tím upraven do formy tzv. puku. Svazek elektronů emitovaný katodou elektronového děla je urychlován elektrickým polem o velikosti 3 kV až 9 kV a odchylován o 270° polem magnetickým tak, aby byla energie fokusována pouze na malou plošku materiálu. Pokud je jedna vrstva materiálu dobře roztavena, operátor otevře recipient, vloží do kelímku další vrstvu tablet, v recipientu se pomocí vývěv obnoví vakuum a tato vrstva se opět roztaví. Takto se tedy vytvoří puk z několika vrstev různého materiálu a na čočku se následně může aplikovat vícevrstevná antireflexní úprava. Na roztavení jedné vrstvy materiálu je potřeba o 20 % více energie než na samotné odpařování. Po fázi přípravy materiálu se v recipientu opět vytvoří vakuum, sníží tlak na  $10^{-4}$  hPa a pomocí elektronového děla dochází k sublimaci jednotlivých vrstev materiálu, svazek elektronů je ovšem během toho odchýlen tak, aby nezasahoval do proudu odpařovaných částic materiálu. 85 % kinetické energie přenášené svazkem elektronů se přitom absorbuje ve formě tepla, a tak je umožněno napařování i těžko tavitelných materiálů. [16]

### **Napařování elektronovým svazkem s plazmovým zdrojem**

Tato metoda poskytuje vytváření velmi kvalitních tenkých vrstev s dobrými optickými i mechanickými vlastnostmi, které se vyznačují také dobrou přilnavostí k čočce. Další výhodou je, že se aplikují při nižší teplotě čoček. Nanášení vrstev tímto způsobem využívá opět elektronového děla, ovšem ve spojení s vysoce energickými

argonovými ionty, které jsou vysílány z plazmatického zdroje, umístěného ve středu recipientu. Tlak v soustavě je  $10^{-4}$  mbar. Na začátku celého procesu dochází k upravení nanášeného materiálu ve vysokém vakuu tak jako u předchozí metody. Čočky, na které mají být vrstvy nanášeny, jsou upevněny na kalotu a umístěny do recipientu. Kalota se během nanášení otáčí stálou rychlostí, která zaručuje vytvoření stejnorodé vrstvy. Materiál je elektronovým dělem převeden do plynného skupenství a jeho částice přímočaře prostupují vakuem směrem ke kalotě. Během toho je do prostoru uvnitř recipientu vyslán proud argonových iontů, díky kterým se částice materiálu rychleji pohybují a také poté na povrchu čočky obsazují energeticky výhodnější pozice, a tak je vytvářející se vrstva stabilnější a odolnější. [4]

### Katodové naprašování

Částice materiálu jsou vyráženy z katody (targetu) pomocí elektrických výbojů, které jsou vysílány z plazmatického nebo iontového zdroje. Tyto částice poté vytvářejí kondenzací vrstvu na čočkách (substrátu), které jsou uchyceny v místě anody. Touto metodou je možno nanášet mnohvrstevnaté antireflexní vrstvy. Recipient je naplněn naprašovacím plynem, kterým je obvykle argon a je zde tlak  $10^{-4}$  Pa, ale výboj je prováděn při tlaku  $10^{-1}$  Pa až 100 Pa. Mezi targetem a substrátem je napětí mezi 500 a 3000 V. Počet atomů vyražených z katody záleží na jejím materiálu, typu a energii iontů a úhlu jejich dopadu. Protože mají naprašované částice vysokou energii, není nutno substrát zahřívat, ovšem rychlost nanášení vrstev touto metodou je pomalejší než např. elektronovým dělem nebo odporovým ohřevem. Tento problém řeší magnetronové naprašování. [16] [18]

Pro tvorbu antireflexních vrstev jsou vhodné a technologicky odzkoušené materiály uvedené v tab. 2.

**Tab. 2 – Vybrané materiály na výrobu antireflexních vrstev [18]**

název	chemická značka	index lomu
Fluorid hořečnatý	MgF <sub>2</sub>	1,38
Fluorid vápenatý	CaF <sub>2</sub>	1,43
Oxid křemičitý	SiO <sub>2</sub>	1,45
Oxid hlinitý	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,77
Oxid křemnatý	SiO	2,36
Oxid titaničitý	TiO <sub>2</sub>	2,65

## **Metody kontroly tloušťky nanášených vrstev**

Aby byla dodržena fázová podmínka, je nutné během nanášení antireflexní vrstvy její tloušťku kontrolovat. Pro tuto kontrolu bylo vyvinuto několik metod, které jsou v této podkapitole popsány.

### **Navážková metoda**

Tato metoda vychází z předpokladu, že při napařování je zcela spotřebován obsah materiálu v lodičce. Množství napařovaného materiálu je tedy předem stanoveno tak, aby se po jeho odpaření vytvořila vrstva o požadované tloušťce. Nevýhodou tohoto postupu však je, že při jednom odčerpání vakuové komory může dojít pouze k napaření jedné vrstvy z jedné lodičky. Tato metoda se v praxi již nepoužívá. [18]

### **Metoda piezokrystalu**

Ve vakuové komoře je během napařování umístěn piezokrystal. Tento krystal je většinou vyrobený z křemene a je postříbřený, či pozlacený a kmitá svojí vlastní frekvencí 5 MHz až 6 MHz. Při napařování pak napařovaný materiál nekondenzuje pouze na substrátu, ale také na povrchu tohoto krystalu, čímž mění jeho hmotnost a vlastní frekvenci kmitání. Tato změna je přímo úměrná tloušťce napařené vrstvy na krystalu, a tedy i na čočce. Rychlostí změny kmitání je dána i rychlost vytváření vrstvy. Výhodou je, že piezokrystal je možné použít vícekrát a hodí se při napařování vícevrstevných systémů. [4] [18]

### **Optický monitoring**

Při měření tloušťky napařované vrstvy touto metodou je využíván princip spektrometrie. Vrstva je napařována také na referenční sklo, na kterém je během nanášení proměřována propustnost, nebo odraznost. Spektrální veličiny se vzhledem k tloušťce vrstvy mění a k vyhodnocení slouží extrémy křivek, které nastávají, pokud tloušťka vrstvy dosahuje násobku  $\frac{1}{4}$  vlnové délky použitého světla. Jestliže je během jednoho odčerpání vakuové komory nanášeno více vrstev, pak se tyto jednotlivé vrstvy na referenční sklo nanášejí pouze na určitá místa jednotlivě tak, aby nedocházelo k jejich míchání. [18]

## **1.2.4 Kontrola kvality antireflexních vrstev**

Na kvalitu antireflexních vrstev jsou kladeny vysoké nároky. Existuje několik testů, kterými je možné nasimulovat podmínky, kterým jsou čočky během každodenního používání vystaveny. Takto se mohou vyřadit čočky, na které jsou antireflexní vrstvy nanesené nestandardně.

### **Test odolnosti vrstvy proti stárnutí**

Jedná se o test životnosti vrstvy, který imituje dlouhodobé používání brýlových čoček za proměnlivých podmínek. Čočky jsou umístěny do skříně testovacího zařízení, ve které jsou během 240 hodin vystavovány různým teplotám do 60 °C, střídavé vlhkosti vzduchu a UV záření s vlnovou délkou 340 nm. [6]

### **Test tepelné odolnosti**

Testované čočky s nanesenou vrstvou jsou vloženy do pece, ve které teplota dosahuje 65 °C, 75 °C a 100 °C. Tento teplotní test trvá celkem šest hodin a po jeho dokončení jsou čočky porovnávány s kontrolními vzorky. [6]

### **Test odolnosti vůči střídání teplot**

Během tohoto procesu je čočka s antireflexní vrstvou pevně upnuta na držák a postupně ponořována do dvou kádí, kde v první je vařící 5% roztok NaCl a ve druhé čistá voda o pokojové teplotě. Ponořování probíhá v deseti cyklech, které se skládají ze dvou minut ve vařící lázni a poté jedné minuty ve vodě. Následně je čočka osušena a je vyhodnocen rozsah poškození vrstvy. [6]

### **Test adheze antireflexních vrstev**

Tento test je ze všech zmíněných nejjednodušší a nejméně technicky i finančně náročný. Na obou stranách čočky se skalpelem do vrstvy nařeže několik proužků kolmo na sebe, které mají rozstup přibližně 1 mm. Přes tuto vzniklou mřížku se nalepí kousek lepicí pásky a následně se prudce strhne. Pokud je vrstva nekvalitní, strhne se společně s páskou. [6]

## 1.3 Hydrofobní a oleofobní úprava

Povrch čočky, na kterou je nanесena antireflexní vrstva, je nepravidelný. Vyskytují se na něm mikroskopické póry, ve kterých se i při běžném používání čočky usazují nečistoty, jako je například mastnota nebo vodné částice. Proto se na antireflexní vrstvu navíc nanáší velmi tenká vrstva, která vytvoří hladký a kluzký povrch. Díky tomu se čočka méně špiní, snadněji čistí a zároveň se zvýší její vodoodpudivost. [9]

Hydrofobního efektu je dosaženo díky uhlovodíkovým řetězcům, které jsou obsaženy v materiálu pro výrobu této vrstvy (viz níže). Ty snižují adhezi kapek vody k povrchu čočky, poté tedy převažují kohezivní síly nad adhezivními a kapka vody nemá tendenci se rozprostřít po povrchu čočky, ale držet spíše kulovitý tvar, ve kterém snadněji steče. [6] [9]

### 1.3.1 Výroba

Tuto povrchovou úpravu lze nanést dvěma způsoby, a to lakováním nebo vakuovým napařováním. Aby hydrofobní vrstva nesnížila účinek antireflexní vrstvy tak, že by došlo k porušení fázové podmínky, tedy tloušťka antireflexní vrstvy by byla navíc navýšena o tloušťku vrstvy hydrofobní, musí být tato zmiňovaná svrchní vrstva co nejtenčí. Tloušťka hydrofobní vrstvy pak musí být menší než 10 nanometrů. [1] [9]

### Lakování

Tento proces probíhá podobně jako nanášení antiabrazivní vrstvy pomocí metody dip coating. Čočka se ponoří do speciálního silikonového laku, a poté je vysušena v peci. V tomto bodě výroby však vrstva není všude stejně silná, následuje proto krátké ponoření do organického rozpouštědla a ruční mechanické přešetění povrchu měkkým hadříkem, kterým je docíleno hladkého povrchu a zároveň je tloušťka vrstvy ve všech místech stejná. [2]

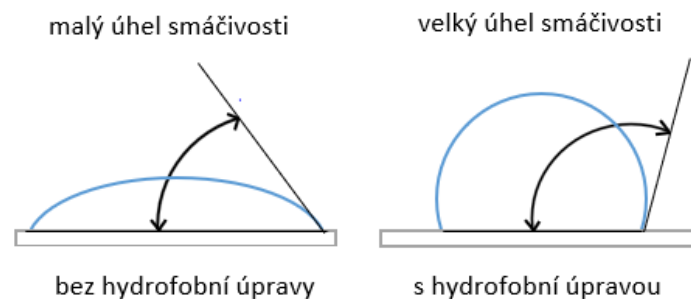
### Vakuové napařování

Průběh vakuového napařování tenkých vrstev byl již popsán v kapitole zabývající se výrobou antireflexních vrstev. Pro výrobu hydrofobních vrstev tímto způsobem se nejčastěji využívají alkylsilany, které obsahují fluorové a uhlovodíkové řetězce, které zajišťují hydrofobní a oleofobní efekt a také atomy křemíku, které přispívají k dobré

adhezi této vrstvy k vrstvě antireflexní. Materiál je do vakuové aparatury dodáván v podobě pórovité keramické tablety, která je jím napuštěna. Po kondenzaci materiálu na povrchu čočky následuje polymerace. Nanášení hydrofobní vrstvy probíhá ihned po napáření vrstvy antireflexní. [1] [2]

Protože se na výrobu hydrofobních vrstev postupně začaly používat materiály s čím dál větším obsahem fluoru, začal být povrch čoček s touto úpravou hodně kluzký, a to by mohlo vést k uvolnění a posunutí zablokované čočky během broušení do finálního tvaru. Proto se na hydrofobní vrstvu aplikuje ještě dodatečná dočasná vrstva modré barvy, která zmírňuje kluzký efekt a po dokončení zábrusu je lehce setřena. [2]

Pro kontrolu kvality hydrofobní vrstvy se běžně používají dva testy. Jedním z nich je měření úhlu smáčivosti mezi povrchem přední plochou vrstvy a tečnou k okraji kapky vody na něm usazené. Tento úhel by při správné funkci hydrofobní vrstvy měl být větší než bez ní. Druhým testem je test kluzkosti povrchu, při kterém je čočka položena na šikmou plochu s hladkým měkkým povrchem a měří se úhel sklonu této roviny, při kterém dojde ke sklouznutí čočky po povrchu dolů. Naměřené hodnoty se pohybují mezi 3° až 15°. [6]



Obr. 8 – Schéma měření úhlu smáčivosti [1]

## 1.4 Antistatická vrstva

Mastnota a kapky vody nejsou jedinými nečistotami, které mohou ulpít na povrchu čočky. Další významnou část tvoří prach. Přestože je materiál, ze kterého jsou čočky vyrobeny nevodivý, může se na jejich povrchu vytvořit záporný náboj, který přitahuje kladně nabitě částice, kterými jsou právě částice prachu. Tento záporný náboj

je nejčastěji vytvořen při čištění brýlových čoček hadříkem, tedy jeho třením po povrchu čočky. Aby se tomuto jevu co nejvíce zamezilo, již při nanášení antireflexní vrstvy se na povrch čočky nanese dodatečná vodivá vrstva. Během nanášení je důležitá kontrola její vodivosti a průhlednosti. Elektrostatické záporné náboje jsou pak během několika milisekund po jejich vzniku odváděny z povrchu čočky pryč, a tím se zamezí přitahování kladně nabitých částic prachu a jejich usazování na povrchu čočky. [1] [2]



## 2 Speciální povrchové úpravy

Moderní doba je spojena nejen s rozvojem technologií, ale také s klimatickými změnami, které vedou například ke ztenčení ozónové vrstvy v atmosféře Země. Proto je nutné oči chránit o něco více než dříve. K tomu byly vyvinuty speciální povrchové úpravy, které z velké většiny fungují jako filtry určité části světelného spektra. Mezi tyto úpravy patří barvení čoček, UV-filtr, polarizační filtr, reflexní vrstva, filtr modrého světla a fototropní úprava.

### 2.1 Barvení

Čočky se barví z několika důvodů. Poskytují dobrou ochranu před slunečním světlem, ale také se mohou používat jako čočky terapeutické (tzv. hranolové filtry) při světloplachosti, makulární degeneraci, renititis pigmentosa aj., nebo z čistě estetických důvodů. [1]

Nejpoužívanějšími barvami jsou hnědá, šedá a šedozelená, avšak každá firma nabízí širokou nabídku barevných odstínů. U plastových čoček je barevná škála větší než u minerálních. Výsledná barva je dána částí spektra, kterou nabarvená čočka propouští a může být zvolena také podle činnosti, při které budou brýle používány např. určitý sport. [1] [4]

Podle propustnosti lze zabarvené čočky rozdělit do pěti skupin viz tab. 3.

**Tab. 3 – Rozdělení čoček dle propustnosti světla [1]**

popis	rozsah světelné propustnosti	
	nad %	do %
čirý nebo velmi světlý	80	100
světlý	43	80
středně barvený	18	43
tmavý	8	18
velmi tmavý, nevhodný pro řízení	3	8

### 2.1.1 Výroba

U minerálních čoček je barvení prováděno buď přidáním speciální soli, která je schopná absorbovat požadovanou část spektra, nebo vakuovým nanášením. Barvení plastových brýlových čoček může probíhat dvojím způsobem. Buď je barva přidána přímo do monomeru při výrobě čočky, nebo je založeno na difúzi barviva rozpuštěného ve vodě do materiálu čočky, a to asi 6-10 mikrometrů pod povrch. Používají se barviva složená z červených, modrých a žlutých pigmentů. Kombinací těchto složek v různém poměru je následně možno dosáhnout spousty barevných odstínů. Aby došlo k dobrému proniknutí pigmentů do povrchu čočky, musí mít roztok barviva správnou teplotu. Ta se pohybuje v rozmezí 92-96 °C, avšak var barvu znehodnocuje. Čočka je před barvením očištěna alkoholem nebo saponátem, umístěna na speciální držák a dále předežhřána na 90 °C ve vodě. Barva může být nanesena dvěma způsoby: celoplošně nebo s tzv. gradálem. [1] [4]

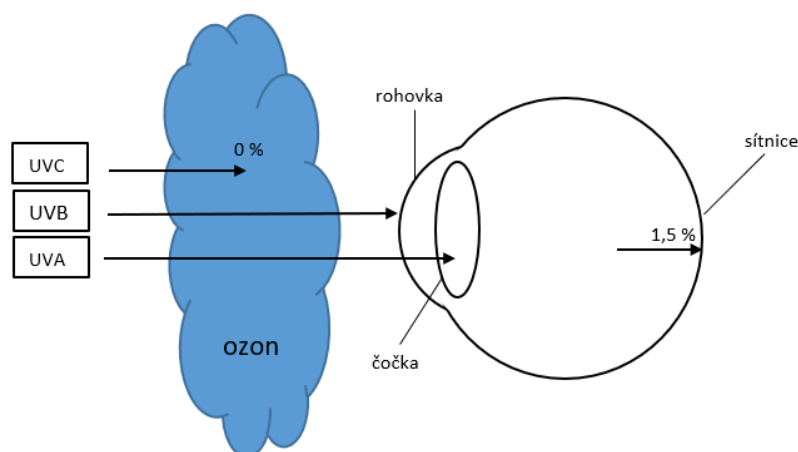
Při celoplošném barvení je celá čočka ponořena do nádržky s roztokem barviva. Intenzita barevného odstínu je tím vyšší, čím déle je v ní čočka ponořena a čím větší je koncentrace barviva. Spektrální propustnost se naopak snižuje. Délka expozice je tedy různá, pohybuje se od jedné minuty až po dvě hodiny. Gradální barvení probíhá postupným pomalým vytahováním čočky z lázně, barva má největší intenzitu v místě, které bylo v roztoku namočené nejdéle, tedy dole. Tvrzené čočky a čočky o indexu lomu větším než 1,5 se barví opakovaně. Po dokončení barvení je čočka očištěna v roztoku vody a saponátu. Protože se při tomto čištění malá část pigmentu vymyje, má před ním čočka o něco intenzivnější barvu. Následuje sušení v pecích při teplotě od 90 °C do 110 °C po dobu 10 až 30 minut a chlazení. [1] [4]

Hlavními faktory, které ovlivňují proces barvení čočky, jsou teplota barvicí lázně, čas, jak dlouho je čočka v této lázni ponořena, a množství pigmentu v ní obsažené. Proto se v každém cyklu tyto faktory kontrolují. [4]

Nevýhodou barvení plastových čoček je, že i když je barveno vícero čoček ze stejného materiálu naráz, každá čočka se může zabarvit do jinak sytého odstínu. Je to dáno možnou odlišností místní struktury molekul materiálu jednotlivých čoček a také velikostí pigmentů barviva. Proto je tento proces prováděn ručně zkušeným odborníkem. Antireflexní vrstvy se u barvených čoček nanášejí převážně jen ze zadní strany. [4]

## 2.2 UV-filtr

UV záření se nachází mimo viditelnou část světelného spektra. Jeho vlnová délka se nachází v rozmezí 400-100 nm. Dělí se na UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm), UV-C (280-200 nm) a UV-vakuum (200-100 nm). Poslední dvě zmíněné složky jsou odstíněny ozonem ve stratosféře, takže na zemský povrch vůbec nedopadají. Čím kratší je vlnová délka, tím větší energii toto záření má a mění se i účinky na oko. Většina UV-B je absorbována rohovkou a UV-A čočkou, ovšem nadměrné působení tohoto záření je považováno za rizikový faktor mnoha očních patologických změn, jako je například fotokeratitida a katarakta. [19]



Obr. 9 – Schéma průchodu UV světla okem [20] Upraveno.

### 2.2.1 Výroba

Samotné brýlové čočky nabízejí určitou ochranu před UV zářením. Čočky z materiálu CR 39 absorbují vlnové délky do 355 nm, přičemž míra absorpce se s vyšším indexem lomu zvětšuje. Pokud je ale požadována ochrana vyšší, je možné při výrobě čočky do materiálu přidat složku snižující propustnost pro toto záření, kterou může být oxid železitý, oxid titaničitý, nebo melanin. Melanin oko zároveň chrání i před modrým světlem. Další možností je, před barvením čočky nanést na její povrch UV filtr namáčením do speciálního roztoku. Takto upravené čočky poskytují ochranu před zářením až do vlnové délky 400 nm. [1] [2]

## 2.3 Polarizační filtr

Světlo je elektromagnetické vlnění a je popsáno vektorem elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  a vektorem magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Tyto dvě složky neustále periodicky kmitají kolmo k sobě navzájem a zároveň kolmo na směr šíření tohoto vlnění. Přirozené světlo je nepolarizované, to znamená, že vektor elektrické intenzity má v dané rovině zcela nahodilý směr i velikost. Pokud se ovšem světlo odrazí od horizontální lesklé plochy, kterou může být např. vodní hladina nebo mokrá vozovka, pak se odražené světlo částečně lineárně polarizuje. Vektory odraženého elektromagnetického vlnění nadále kmitají pouze ve vertikálním a horizontálním směru. Vertikálně polarizované světlo umožňuje člověku vidět kontrastně, horizontálně polarizované však oslňuje, proto se tato složka světla polarizačním filtrem odstraní. Brýlové čočky s touto úpravou tedy pomáhají nositeli vidět kontrastněji, rozjasňují barvy a zlepšují prostorové vidění. [14] [21] [22]

### 2.3.1 Výroba

Existuje několik technik na výrobu polarizačního filtru, liší se podle toho, jestli se jedná pouze o folie do slunečních brýlí, nebo o korekční zabarvené čočky. Folie do slunečních brýlí se vyrábějí z polyvinylacetátu (PVA). Polarizace je v tomto případě zajištěna již materiálem absorpcí. Dlouhé molekuly PVA jsou při výrobě řazeny navzájem rovnoběžně ve svislém směru, a horizontální složka světelného vlnění se tím eliminuje. Obvyklé zabarvení těchto čoček je šedá, hnědá, nebo zelená. U dioptrických čoček je polarizace dosaženo dvojitým způsobem, a to zapuštěním (embedded film technology) nebo plátkovou metodou (wafer technology). Technologie zapuštění se provádí u materiálu CR 39, vložení PVA do formy na výrobu čočky ještě před vyplněním a polymerizací. Plátková metoda je užívána u materiálů s vyšším indexem lomu a polykarbonátů. Polarizační filtr je při výrobě před lisováním vložen pod poslední vrstvu na přední ploše čočky. Pokud má korekční čočka i cylindrickou osu, je nutné dodržet kromě osy cylindru i správnou rovinu polarizace. [14] [23]



Obr. 10 – Pohled řidiče s brýlemi bez polarizace (vlevo) a s polarizací (vpravo) [24]

## 2.4 Reflexní vrstva

Reflexní vrstva, známá také jako zrcadlová, dokáže intenzivně odrážet dopadající světelné paprsky, zvyšuje tedy reflektivitu čočky, a tím redukuje oslnění nositele. Nanáší se pouze na přední plochu čirých i barvených brýlových čoček. Pro zvýšení komfortu vidění se na zadní plochu vždy aplikuje vrstva antireflexní. Tato povrchová úprava je vhodná zejména pro sportovce, kteří jsou vystaveni intenzivnímu slunečnímu záření (např. lyžařské brýle), ale často je také vyhledávána z čistě estetických důvodů na brýle sluneční díky rozmanité nabídce zrcadlicích se barev. [25]

Tohoto efektu je možné dosáhnout konstruktivní interferencí, jde tedy o opačný princip než u vrstev antireflexních. Paprsek dopadající na rozhraní vzduch – reflexní vrstva se z části odráží a lomí. Lomený paprsek dále prochází vrstvou až na druhé rozhraní s čočkou, zde se opět odráží a lomí. Existují tedy dva odražené paprsky, které však mají k sobě stejnou fázi. Jejich interferencí dochází k zesílení odraženého světla. [14] V tomto případě je odrazivost dána vztahem

$$R = \frac{(n_v - 1)^2 + k^2}{(n_v + 1)^2 + k^2},$$

kde  $R$  je odrazivost,  $n_v$  index lomu reflexní vrstvy a  $k$  index absorpce. [1]

Zrcadlová úprava zvyšuje zabarvení čočky o 20 %, proto se doporučuje do brýlí pro řidiče motorových vozidel barvit čočky v kombinaci se zrcadlovou úpravou maximálně na 60 %. [20]

Výroba probíhá ve vakuových aparaturách plazmatickým nebo iontovým napařováním. Jako materiály se nyní využívají dielektrika, jako jsou např. oxidy chrómu, dioxydy křemíku a titanu. [1]



Obr. 11 – Brýle s čočkami s reflexní vrstvou

## 2.5 Filtr modrého světla

Modré světlo je součástí viditelného světla a jeho vlnová délka se pohybuje mezi 380 a 500 nm. Je také známo pod názvem vysoce energetické viditelné světlo (HEV). Tato část spektra je důležitá hlavně pro skotopické (noční) vidění, protože na vlnovou délku přibližně 500 nm jsou nejcitlivější tyčinky, které obsahují barvivo rodopsin. Vlnová délka okolo 460 nm je zase absorbována fotopigmentem melanopsinem, který se podílí na řízení cirkadiálních rytmů tím, že mění hladinu hormonu melatoninu v těle. Tento tzv. hormon spánku je produkován přibližně 90 minut poté, kdy ustane expozice sítnice modrému světlu. Přírodním zdrojem HEV je Slunce, avšak je produkováno také např. displeji digitálních zařízení (mobilní telefony, počítače, televize), úspornými žárovkami a xenonovými světly. Jelikož jsou zmíněné umělé zdroje světla nyní používány v podstatně větší míře než dříve, byla provedena celá řada výzkumů, které měly podat důkaz o fototoxicitě modrého světla. Potencionálně rizikové jsou hlavně vlnové délky v rozmezí 380-440 nm. Je nutné však podotknout, že hodina pobytu venku při zatažené obloze vystaví oko 30krát větší expozici modrému světlu než hodina práce před obrazovkou. [26] [27] [28]

Studována byla hlavně souvislost s makulární degenerací. Tuto spojitost potvrdila až studie publikována v červenci 2018 výzkumníky z university v Toledu. [29] Ovšem proběhly také výzkumy týkající se benefitů filtrů modrého světla nanášených na brýlové čočky uváděných výrobci. Ze studie profesorů Johna Lawrensona, Christophera Hulla a doktorky Laury Downie vyplývá, že není dostatek důkazů, že by nošení brýlí s čočkami s filtrem modrého světla vedlo k ostřejšímu vidění a zmírnění únavy očí při práci na počítači či zlepšení kvality spánku. [30] Samotná doktorka ve svém článku uvádí, že některé firmy byly dokonce pokutovány za lživou reklamu. [31] Profesori Tsz Wing Leung, Roger Wing-hong Li a Chea-su Kee ve své práci dokonce uvádí, že u 30 % účastníků došlo ke snížení citlivosti skotopického vidění z 2,4 % na 9,6 % a potlačení melatoninu z 5,8 % na 15 %. [32]

### **2.5.1 Výroba**

Filtrace modrého světla lze dosáhnout dvěma způsoby, tedy nanesením tenké vrstvy na povrch brýlové čočky, nebo úpravou materiálu, ze kterého je čočka vyrobena. V prvním případě jde vlastně o součást antireflexní vrstvy, jejíž vlastnosti jsou uzpůsobeny tak, aby vrstva propouštěla vlnové délky až nad 500 nm (hradlová vrstva). Některé firmy uvádějí hranici 450 nm, tím údajně oko nepřijde o prospěšný účinek modrého světla. Nanášení probíhá ve vakuových aparaturách technologií popsanou v kapitole týkající se výroby antireflexních vrstev. [20] [26]

Další variantou je přidání syntetizovaného melaninu do materiálu čočky, který zároveň poskytuje UV ochranu, nebo zabarvením čočky do odstínu žluté. To ovšem vede k mírnému zkreslení barev, což vnímavějším lidem může vadit. [2]

## **2.6 Fototropní úprava**

Ochrana oka před intenzivním slunečním zářením je důležitá, ale pokud jsou využívány celoplošně zabarvené brýlové čočky, nastává problém při přechodu z vnějšího prostředí do místnosti kvůli vysoké absorpci světla. Proto byly vyvinuty fototropní čočky, které mění intenzitu zabarvení podle množství dopadajícího UV záření.

Princip využívaný při postupném zabarvování a odbarvování čočky se nazývá fotochromismus. Pokud vysokoenergetické UV záření dopadá na fotoaktivní molekuly v povrchových vrstvách čočky, tyto částice dočasně mění svou konformaci na plochou,

a tak zvyšují absorpci světla. Čočka ztmavne. Jestli expozice UV záření ustane, molekuly se vracejí do svého původního rozložení. Vzhledem k tomu, že je používáno několik druhů fotochromatických sloučenin, může být i způsob změny struktury odlišný (např. tvorba nebo přerušení molekulárních vazeb, izomerace). Čočky se nejčastěji zabarvují do šedé, hnědé nebo šedo zelené barvy. V aktivovaném stavu dosahuje absorpce výše až 85 % a v deaktivovaném okolo 7 %. [2] [33]

Existuje i varianta fototropních čoček zabarvujících se i v autě, kde dochází k filtraci UV záření předním sklem, pod obchodním názvem tzv. XTRActive. V autě dosahuje absorpce světla čočkou až 50 %, v deaktivovaném stavu však zůstává zbytkové zabarvení vyšší než u klasické varianty. Pro řidiče je také výhodná kombinace s polarizací (fotopolarizační čočky). [34]

Rychlost i intenzita odbarvení je závislá na teplotě, v chladnějším prostředí proces probíhá pomaleji a zbytkové zabarvení je vyšší než v prostředí teplém. Aby nedocházelo k zavádějícím informacím, stanovili výrobci jednotnou teplotu, ke které se procento absorpce vztahuje (21-23 °C). [23]

### **2.6.1 Výroba**

Pro výrobu plastových samozabarvovacích čoček se používají fotoaktivní látky, kterými jsou oxazinové molekuly, pyrans a fulgidy. Tyto látky je možné přidat do monomeru ještě před polymerizací. Je však nutné chemicky upravit materiál, ze kterého se čočky vyrábějí. Další možností je nanášení na hotovou čočku, a to tzv. imbibicí nebo trans-bondingem. Imbibice je tepelné začlenění fotoaktivních částic 100-150 μm pod povrch čočky. Tuto metodu však nelze aplikovat u všech materiálů čoček, zvláště u vysokondexových. U těch se užívá trans-bonding, čili vytvoření tenké vrstvy zapuštěné pod tvrzení a antireflexní úpravu. [35]



## Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá tématem finálních povrchových úprav brýlových čoček a jejich výrobou. Je členěna na dvě velké kapitoly, přičemž první z nich popisuje běžné povrchové úpravy, které se vyrábí kvůli zvýšení životnosti čoček, jejich snadnější údržbě a pro komfortní dívání. Jejich výčet na sebe navazuje tak, jak jsou postupně na brýlovou čočku nanášeny. Jako první je tedy charakterizována tvrdicí vrstva, která slouží ke zvýšení odolnosti proti oděru u čoček plastových a jako ochrana oka při případném rozbití u čoček minerálních. Plastové čočky se tvrdí nanesením tenké vrstvy laku na její povrch ponořením s řízeným vytahováním (dip-coating) nebo rotačním roztíráním (spin-coating), minerální čočky se tvrdí tepelně nebo chemicky. Následuje nejvíce obsáhlá podkapitola o antireflexních vrstvách. Zde jsou popsány reflexe světla na přední i zadní ploše brýlové čočky, fyzikální princip antireflexních vrstev včetně odvození fázové a amplitudové podmínky, jejichž splnění je nutné pro správnou funkci těchto vrstev. Dále pak výroba fyzikálním vakuovým napařováním a metody kontroly kvality. V této kapitole je také uveden stručný popis hydrofobní, oleofobní a antistatické úpravy.

Druhá kapitola se věnuje speciálním úpravám brýlových čoček a jejich výrobě, kam patří barvení, UV-filtr, polarizační filtr, reflexní vrstva, filtr modrého světla a fototropní úprava. Tyto úpravy, kromě filtru modrého světla, jsou užívány především pro sluneční brýle při ochraně oka před intenzivním slunečním zářením a oslněním. Zvláštní skupinu zde tvoří fototropní čočky, které kombinují vlastnosti čirých i zabarvených čoček. Pokud jsou vystaveny UV záření ztmavnou. Filtr modrého světla a UV-filtr jsou pak nanášeny pro eliminaci škodlivého záření.

Myslím si, že má bakalářská práce může pomoci optometristům, kteří začínají svoji praxi v očních optikách, v nichž je orientace v nabízených povrchových úpravách nezbytná.

## Seznam použité literatury

- [1] VESELÝ, P. ŠIMOVIČ, P. PETROVÁ, S. *Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček*. 1. vyd. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2014. ISBN 978-80-7013-566-2.
- [2] MESLIN, D. *Ophthalmic optics files. Materials & Treatments*. Paříž: Essilor Academy Europe, 2010. ISBN 979-10-90678-11-8.
- [3] Tvrzení čoček. *Omega Optix*. [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://www.omega-optix.cz/tvrzeni-cocek>.
- [4] BLIEDTNER, J. GRÄFE, G. HECTOR, R. *Optical technology*. Místo neznámé: The McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 978-0-07-166791-3.
- [5] Procédé sol-gel. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SpinDipSolGel.png?uselang=cs>.
- [6] KOLÁČNÝ, J. *Antireflexní vrstvy*. Marketingové materiály Optika Čivice, 2018.
- [7] Bayer Abrasion Test. *Taber Industries* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.taberindustries.com/bayer-abrasion-test>.
- [8] Rotary steel wool scratch testers. *Performance Coatings International* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.pcoatingsintl.com/wp-content/uploads/2014/04/Steel-Wool-Test-B.pdf>.
- [9] NAJMAN, L. *Dílenská praxe očního optika*. 1. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2001. ISBN 80-7013-328-7.
- [10] MALÝ, P. *Optika*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2008. ISBN 9788024613420.
- [11] JEXO VÁ, S. *Geometrická optika*. 1. vyd. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2010. ISBN 978-80-7013-521-1.
- [12] BAJER, J. *Optika I*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. ISBN 978-80-244-4532-8.

- [13] WAGNER, J. *Optické technologie – výukové materiály k předmětu Brýlová technologie 2*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2018.
- [14] SVOBODA, E. a kol. *Přehled středoškolské fyziky. 5. přepracované vyd.* Místo neznámé: Prometheus, 2014. ISBN 978-80-7196-438-4.
- [15] BAJER, J. *Optika 2. 1. vyd.* Olomouc: chlup.net, 2018. ISBN 978-80-907098-0-5.
- [16] BAUMEISTER, P. *Optical coating technology. 1. vyd.* Bellingham: SPIE, 2004. ISBN 0-8194-5313-7.
- [17] HARDY, N. Thin Film Deposition Control By Quartz Crystal Monitor Tooling Factor. *Semicore Equipment, Inc* [online]. © 2019, 2013-5-15 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.semicore.com/news/72-thin-film-deposition-control-quartz-crystal>.
- [18] KŘEPELKA, J. *Vybrané kapitoly z optiky tenkých vrstev. Přehled použití tenkých vrstev. 1. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4042-2.
- [19] WALSH, K. *UV záření a oko. Česká oční optika. 2009, roč. 50, č. 3, str. 82-85.* ISSN 1211-233X.
- [20] ESSILOR. Produktový ceník 2018: Technické informace o produktech.
- [21] VYŠÍN, I. ŘÍHA, J. *Paprsková a vlnová optika. 1. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3334-9.
- [22] Technologie slunečních polarizačních brýlí Polaroid. *Polaroid-sluneční-brýle.cz* [online]. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://www.polaroid-slunecni-bryle.cz/technologie>.
- [23] VESELÝ, P. ŠIMOVIČ, P. *Technologie výroby brýlových čoček 3. část. Organické fototropní, polarizační a ftopolarizační materiály. Česká oční optika. 2013, roč. 54, č. 3, str. 10-14.* ISSN 1211-233X.

[24] Polarizační čočky XPERIO™: Brýlové čočky Xperio odstraňují odlesky, a zajišťují tak maximální zrakové pohodlí. *Essilor* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: [https://www.essilor.cz/CS/brylove\\_cocky/slunecni\\_a\\_barevne\\_brylove\\_cocky/polarizacni\\_cocky\\_Xperio/Stranky/default.aspx](https://www.essilor.cz/CS/brylove_cocky/slunecni_a_barevne_brylove_cocky/polarizacni_cocky_Xperio/Stranky/default.aspx).

[25] Omega Optix. Produktový ceník 2019.

[26] Modré světlo: klady a zápory. Kolik modrého světla potřebujeme? A jak a kdy se před ním chránit?. *Carl Zeiss AG* [online]. 2017-10-16 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/vision-care/lepsi-videni/pochopeni-zraku/modre-svetlo-klady-a-zapory.html?fbclid=IwAR0qn5X-Ky3xXkcSwSWayeex5VFibCFYdUEca6hdzUalfIKuwnjyo-9Nhl0>.

[27] ANTON, M. Význam modrého světla pro vidění. *4oci.cz* [online]. 2007-06-14 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: [http://www.4oci.cz/vyznam-modreho-svetla-pro-videni\\_4c265?fbclid=IwAR0edMYFvU13hiOCyplHBv5dv9nRAmScbdruJ9ISXxXCOX3CNCqgv0CMSuA](http://www.4oci.cz/vyznam-modreho-svetla-pro-videni_4c265?fbclid=IwAR0edMYFvU13hiOCyplHBv5dv9nRAmScbdruJ9ISXxXCOX3CNCqgv0CMSuA).

[28] ANTON, M. Modré světlo a oko. *4oci.cz* [online]. 2008-06-09 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: [http://www.4oci.cz/modre-svetlo-a-oko\\_4c182?fbclid=IwAR0sV6STId0fWxuKPiF9tCbeyE8Z7dkraU7nKgi3nLY9-teLfcvuv8GjQDs](http://www.4oci.cz/modre-svetlo-a-oko_4c182?fbclid=IwAR0sV6STId0fWxuKPiF9tCbeyE8Z7dkraU7nKgi3nLY9-teLfcvuv8GjQDs).

[29] RATNAYAKE, K. PAYTON, J. HARSHANA LAKMAL, O. KARUNARATHNE, A. *Blue light excited retinal intercepts cellular signaling*. *Nature* [online]. 2018-08-05 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-28254-8#Sec2>.

[30] LAWRENSEN, J. G. HULL, CH. DOWNIE, L. E. *The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: a systematic review of the literature*. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2017, roč. 37, č. 6, str. 644-654. ISSN 0275-5408.

[31] DOWNIE, Laura E. *Blue-light filtering ophthalmic lenses: to prescribe, or not to prescribe?*. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2017, roč. 37, č. 6, str. 640-643. ISSN 0275-5408.

- [32] LEUNG, T. W. LI, R. W. KEE, C. S. Blue-Light Filtering Spectacle Lenses: Optical and Clinical Performances. *PloS one* [online]. 2017-01-03 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0169114#sec016>.
- [33] ZEISS PhotoFusion. Střídání brýlí patří minulosti. *Carl Zeiss AG* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/vision-care/pro-lekare-ci-optometristy/produkty/slunecni-filtrove-cocky/samozabarvovaci-brylove-cocky/zeiss-photo-fusion.html>.
- [34] Samozabarvovací čočky. *Omega Optix* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.omega-optix.cz/brylove-cocky/samozabarvovacicocky>.
- [35] JALIE, M. *Ophthalmic Lenses and Dispensing*. 3. vyd. Edinburgh: Elsevier, 2008. ISBN 9780750688949.