

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2023

**RICHARD
DUPAL**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů**

Vliv teploty na samozabarvovací brýlové čočky

Temperature impact on photochromatic frame lenses

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Mgr. Richard Dupal, DiS.

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jana Urzová, Ph.D

Kladno 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dupal** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **50008**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra přírodovědných oborů**
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**
Studijní obor: **Optika a optometrie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv teploty na samozabarvací brýlové čočky

Název bakalářské práce anglicky:

Temperature impact on photochromatic spectacle lenses

Pokyny pro vypracování:

Výše teploty okolního prostředí má vliv na vlastnosti samozabarvacích brýlových čoček. Formou rešerše zpracujte přehled veličin a jevů, které se dané problematiky týkají. Popište základní vlastnosti a rozdělení materiálů brýlových čoček a jejich povrchových úprav. Popište historii fototropních brýlových čoček, princip jejich fungování a výrobu. Navrhněte a proveďte experimentální výzkum, jehož obsahem bude zahřívání, respektive ochlazování samozabarvacích brýlových čoček na určité teploty a měření rychlosti zbarvení dané brýlové čočky při určité teplotě. Výsledky experimentu analyzujte a formulujte závislost této rychlosti na teplotě.

Seznam doporučené literatury:

- [1] VESELÝ, P., ŠIMOVIČ, P., PETROVÁ, S., Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček, ed. 1., NCONZO Brno, 2014, 141 s., ISBN 978-80-7013-566-2
- [2] VESELÝ, P., ŠIMOVIČ, P., Z praxe optika. Technologie výroby brýlových čoček – 3. část. Organické fototropní, polarizační a fotopolarizační materiály., Česká oční optika, ročník 54, číslo 3, 2013, s. 10-14
- [3] RUTRLE, M., Brýlová optika, ed. 2., Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993, Učební text pro střední zdravotnické školy, ISBN 80-7013-145-4

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jana Urzová, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2024**

doc. Ing. Petr Kudrna, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

Název bakalářské práce: Vliv teploty na samozabarvovací brýlové čočky

Abstrakt:

V předkládané práci na téma „*Vliv teploty na samozabarvovací brýlové čočky*“, jejímž cílem bylo zjištění vlivu teploty na rychlost zbarvení a odbarvení brýlových čoček, je formou rešerše zpracován základní přehled veličin a jevů, jež se dané problematiky týkají. Práce se zabývá brýlovými čočkami, jejich jednotlivými materiály a povrchovými úpravami. V hlavní kapitole této práce, *Fotochromatické brýlové čočky*, je popsána historie, výroba a základní princip fungování zmíněných čoček. V experimentální části je navržen postup, jak prozkoumat závislost teploty na samozabarvovací brýlové čočky. Tato část práce popisuje zahřívání jednotlivých brýlových čoček, respektive jejich ochlazování na určitou teplotu, která začíná na 22 °C a je odstupňována po 5 °C. Zahřívání čoček probíhalo pomocí vzduchového termostatu a ochlazování pomocí suchého ledu. Po teplotní „úpravě“ byly čočky vystaveny UV záření (pod UV lampou) a následně byla změřena rychlost jejich zbarvení, respektive odbarvení. K zjištění procentuálního zbarvení byl využit přístroj vláknový spektrometr USB2000+ s rozsahem 200-900 nm pro spektrofotometrická měření (transmisní a reflexní).

Klíčová slova:

Fotochromatické brýlové čočky, samozabarvovací brýlové čočky, fotosenzitivní brýlové čočky, organické fototropní materiály, Transitions

Bachelor's Thesis title: Temperature impact on photochromatic frame lenses

Abstract:

In the presented thesis on the topic „*Temperature impact on photochromatic frame lenses*“, the aim of which was to determine the effect of temperature on the speed of tinting and discolouration of spectacle lenses, a basic overview of quantities and phenomena related to the given issue is prepared in the form of research. The thesis deals with spectacle lenses, their individual materials and surface treatments. In the main chapter of this thesis, *Photochromatic frame lenses*, the history, production and basic principle of operation of the mentioned lenses are described. In the experimental part, a procedure is proposed to investigate the dependence of temperature on self-tinting spectacle lenses. Furthermore, the thesis describes the heating of individual spectacle lenses, or their cooling to a certain temperature, which starts at 22 °C and is graduated in 5 °C increments. The lenses were heated using an air thermostat and cooled using dry ice. After the temperature „adjustment“, the lenses were exposed to UV radiation (under a UV lamp) and then the speed of their coloring and discoloration was measured. A USB2000+ fiber spectrometer with a range of 200-900 nm for spectrophotometric measurements (transmittance and reflectance) was used to determine the percentage coloration.

Key words:

Photochromatic frame lenses, self-tinting frame lenses, photosensitive frame lenses, organic phototropic materials, Transitions

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval více lidem. Prvně bych rád poděkoval paní doktorce Urzové za věcné rady a podněty při psaní bakalářské práce. Panu doktoru Písaříkovi, který mi pomohl s experimentální částí této práce. Panu inženýrovi Michálkovi, s kterým jsem konzultoval praktickou část této práce. Katedře přírodovědných oborů v čele s paní Šiffnerovou a paní doktorkou Žákovou, které zajistily finance a nákup samozabarvovacích brýlových čoček. Paní doktorce Široké za půjčení a dodání suchého ledu a termostatu. Mé mamince bych rád poděkoval za gramatickou korekturu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své ženě a svým dětem za trpělivost a umožnění studia na této škole.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Vliv teploty na samozabarvovací brýlové čočky*“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne

.....

podpis

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Základní optické jevy a veličiny	9
2.1	Světlo.....	9
2.2	Index lomu	9
2.3	Odraz a lom světla.....	10
2.4	Odrazivost	11
2.5	Absorpce	12
2.6	Propustnost.....	13
3	Materiály brýlových čoček.....	14
3.1	Anorganické materiály	14
3.2	Organické materiály	15
3.2.1	Čočky se standardním indexem lomu	16
3.2.2	Čočky se středním indexem lomu	17
3.2.3	Čočky s vysokým a velmi vysokým indexem lomu.....	17
3.3	Organické fototropní materiály	18
4	Povrchové úpravy brýlových čoček	19
4.1	Tvrzení	19
4.1.1	Tvrzení organických čoček	19
4.1.2	Tvrzení minerálních čoček	22
4.2	Antireflexní úpravy	23
4.3	Barvení brýlových čoček.....	25
4.3.1	Barvení plastových brýlových čoček	25
4.3.2	Barvení minerálních brýlových čoček.....	27
4.4	Samočistící vrstvy	28
4.4.1	Hydrofilní vrstva	28

4.4.2	Hydrofobní vrstva	29
4.5	Hydrofobní, olejofóbní a antistatické vrstvy	29
4.6	Reflexní vrstvy	30
5	Fotochromatické brýlové čočky	31
5.1	Historie fotochromatických čoček	31
5.2	Výroba fotochromatických čoček	35
5.2.1	Výroba minerálních fotochromatických čoček	35
5.2.2	Výroba plastových fotochromatických čoček	35
5.3	Základní princip fungování fotochromatických čoček	37
5.3.1	Princip fungování minerálních fotochromatických čoček	37
5.3.2	Princip fungování plastových fotochromatických čoček	39
5.3.3	Princip fungování řidičských fotochromatických čoček	40
6	Cíle práce	45
6.1	Cíl práce	45
6.2	Hypotézy	45
7	Experimentální část	46
7.1	Porovnání Transitions VI. - VIII. generace	47
8	Výsledky práce	49
8.1	Výsledky transmise za stálé okolní teploty	49
8.2	Výsledky transmise při zahřívání brýlových čoček	52
8.3	Výsledky transmise při ochlazování brýlových čoček	54
9	Diskuze	56
	Závěr	58
	Seznam použité literatury	59

1 Úvod

Fototropní brýlové čočky jsou ve světě oční optiky zajímavým tématem, ať už z pohledu zákazníka (uživatele), či očního optika. Jedná se o dynamickou skupinu organických brýlových čoček, která se v posledních desetiletích významně technologicky rozvíjela a stále rozvíjí. Výrobou samozabarvovacích brýlových čoček se zabývá zejména firma Transitions Optical, Inc., která byla první firmou, jež uvedla na trh tento typ brýlových čoček. Ale i další přední světoví výrobci brýlových čoček, jako jsou firmy Hoya, Zeiss či Rodenstock, se snaží nabízet tento druh brýlových čoček a nezůstávat v tomto optickém odvětví pozadu.

Samozabarvovací brýlové čočky prošly od počátku svého vývoje, jež je datován v 60. letech 20. století, různými proměnami spojenými hlavně s kvalitou a rychlostí jejich zbarvení, respektive odbarvení.

Hlavním úkolem fototropních brýlových čoček je absorpce neboli změna intenzity světla. Struktura materiálu se mění v závislosti na intenzitě slunečního záření. K tomuto procesu dojde u většiny fototropních materiálů pouze za pomoci UV záření. Tedy i za podmínek, kdy na čočku nedopadá přímé sluneční záření, ale odráží se od určitých předmětů jako je např. sníh nebo vodní plocha. Zbarvení, respektive odbarvení brýlových čoček je závislé hlavně na teplotě okolního prostředí. Při vyšší teplotě dochází ke zvýšenému pohybu molekul a čočky i za stejného přístupu UV záření rychleji blednou. Naopak v prostřední chladném dochází k pomalejšímu a méně intenzivnímu odbarvení. Proto se samozabarvovací čočky mohou jevit tmavší v zimě než v létě. Intenzita zbarvení je výrobci proto obvykle vztahováno k teplotě 21-23 °C. To je hlavní důvod, proč se budu zabývat samozabarvovacími brýlovými čočkami ve své bakalářské práci.

Jejím cílem bude zjištění vlivu teploty na rychlost zbarvení brýlových čoček.

Téma bakalářské práce jsem si vybral díky několikaletému působení v oboru oční optiky, abych prozkoumal funkčnost nových typů samozabarvovacích brýlových čoček, které jsou optickému světu představovány.

2 Základní optické jevy a veličiny

V kapitole základní optické jevy a veličiny jsou shrnuty poznatky, zákony a vzorce, které se týkají dané problematiky.

2.1 Světlo

Světlo nebo také optické záření můžeme definovat jako elektromagnetické záření, jehož vlny jsou pozorovány v širokém spektrálním intervalu. V optice se zabýváme oblastí elektromagnetických vln, které jsou viditelné lidským okem (viditelná spektrální oblast), tj. oblast vlnových délek od 350 nm do 750 nm, přičemž lidské oko je nejcitlivější na světlo o vlnové délce 550 nm, a zároveň vlnami z ultrafialové a infračervené spektrální oblasti. Světlo je charakterizováno vlnovou délkou „ λ “ a je vyjádřeno poměrem frekvence a rychlosti světla ve vakuu. [1, 2]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Šíření světla je dáno prostředím, kterým prochází. Světlo a dané prostředí mezi sebou interagují, což je dáno vlastnostmi tohoto prostředí, které ovlivňuje průchod světla tímto prostředím. Na základě tohoto můžeme rozdělit prostředí na homogenní a nehomogenní, izotropní a anizotropní, lineární a nelineární. [1, 2]

2.2 Index lomu

Index lomu je bezrozměrná fyzikální veličina charakterizující dané prostředí a je dána vztahem [3]

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a v je fázová rychlost světla vlnové délky λ v prostředí. Takto je definován absolutní index lomu. Zároveň rozeznáváme relativní index lomu, který je charakterizován poměrem absolutních indexů lomu dvou prostředí.

$$\frac{n_\lambda}{n'_\lambda} \text{ resp. } \frac{n'_\lambda}{n_\lambda} \quad (3)$$

Z praktického hlediska má význam index lomu vztažený ke vzduchu,

$$n_{\lambda} = \frac{v_{o\lambda}}{v_{\lambda}} \quad (4)$$

kde $v_{o\lambda}$ je fázová rychlost světla vlnové délky λ ve vzduchu. Index lomu materiálu udáváme vzhledem ke vzduchu. Index lomu vzduchu závisí na jeho teplotě, tlaku, vlhkosti a dalších veličinách a je přibližně roven jedné.

Rychlost šíření světla je závislá na vlnové délce světla, tedy i index lomu bude záviset na vlnové délce světla. Závislost indexu lomu daného prostředí na vlnové délce světla nazýváme disperze prostředí. [1]

2.3 Odraz a lom světla

Definice zákona odrazu nám říká, pod jakým úhlem se světelný paprsek odráží a zákon lomu, pod jakým úhlem se bude paprsek lámat. Dopadne-li paprsek na rozhraní dvou optických prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi, rozdělí se na dva paprsky, které od místa dopadu postupují změněnými směry. Paprsek, který se vrací do původního prostředí, tedy se odráží a zůstává v prvním prostředí, nazýváme odraženým. A paprsek, který postupuje do druhého prostředí a láme se, nazýváme lomený. Světlo se na rozhraní tedy částečně odráží a částečně láme do druhého prostředí. Nastává odraz a lom světla. [4, 5]

Odraz světelného paprsku je ovlivněn kvalitou povrchu, na jehož základě rozlišujeme odrazivost neboli reflexi směrovou, difúzní a smíšenou. Drsnost povrchu směrové reflexe je malá ve srovnání s vlnovou délkou dopadajícího světla, povrch plochy se zrcadlí. Difúzní reflexe vzniká naopak na drsnějším povrchu a k reflexi světla dochází všemi směry (rozptyl). Na hladkém, ale nevyleštěném povrchu vzniká reflexe smíšená. [4]

„Odražené světlo se šíří od rozhraní ve směru určeném odraženým paprskem. Ten svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu α' . Vztah mezi úhlem dopadu a úhlem odrazu určuje zákon odrazu světla“: [5]

$$\alpha' = \alpha \quad (5)$$

„Velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α . Odražený paprsek pak leží v rovině dopadu.“ [5]

Úhel odrazu není závislý na frekvenci světla, proto jsou paprsky světla různých barev odraženy stejně.

Změnu ve směru chodu, kterým se světelný paprsek po přechodu z jednoho prostředí do druhého šíří, nazýváme jako lom světla. Příčina lomu světla je ve změně rychlosti světla, která souvisí se změnou indexu lomu prostředí.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \quad (6)$$

Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro dvě daná prostředí stálou veličinou a je roven poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Lomený paprsek pak zůstává v rovině dopadu. [5]

Podíl rychlostí světla v_1 a v_2 vyjadřuje veličinu výše zmíněnou, index lomu, který charakterizuje rozhraní optických prostředí. Podíl rychlostí je pro daná prostředí konstantní. Prostředí, jež má větší index lomu nazýváme prostředím opticky hustším, světlo se zde šíří pomaleji. Zatímco prostředí, které má nižší index lomu, nazýváme prostředím opticky řidším a světlo se zde šíří rychleji. Vyjádřeno dle zákona lomu, přechází-li světelný paprsek z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího, láme se ke kolmici a naopak přechází-li z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího, láme se od kolmice. Dle výše zmíněného můžeme definovat zákon lomu takto: Poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je pro daná prostředí konstantní a je roven převrácenému poměru indexů lomu obou prostředí, což vyjadřuje vzoreček: [3, 4, 5]

$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon' \quad (7)$$

kde ε je úhel dopadu, tedy úhel, který svírá dopadající paprsek s normálou k ploše rozhraní a ε' je úhel lomu, tj. úhel, který svírá lomený paprsek s normálou k ploše rozhraní, přičemž dopadající paprsek, lomený paprsek a normála k ploše rozhraní v místě dopadu leží v jedné rovině tzv. rovině dopadu.

2.4 Odrazivost

Odrazivost je definována jako podíl intenzity světla odraženého a intenzity světla dopadajícího.

$$R = \frac{I''}{I} \quad (8)$$

Část světla bude odrážena, jeho intenzita bude označováno jako I'' a část světla bude procházet, jeho intenzitu budeme označovat jako I' . Nebudou-li nastávat ztráty světla absorpcí a světlo se nebude prostředím pohlcovat, pak platí:

$$I = I' + I'' \quad (9)$$

Část světla, která se odráží, je určena činitelem odrazivosti (8).

Jaká část světla se odráží a jaká část světla se láme je vyjádřena Fresnelovými vzorci pro odrazivost:

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon')} + \frac{\operatorname{tg}^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\operatorname{tg}^2(\varepsilon + \varepsilon')} \right] \quad (10)$$

Kde R je odrazivost, ε je úhel dopadu a ε' je úhel lomu. Tento vztah však platí pouze pro úhly větší než 2° .

Fresnelův vztah pro odrazivost pro malé úhly dopadu (menší než 2°) a kolmý dopad platí:

$$R = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad (11)$$

Odrazivost je vyjádřena v procentech a je závislá na indexu lomu optických prostředí, na úhlu dopadu a na vlnové délce světla. Čím vyšší index lomu daného materiálu je, tím větší je podíl odraženého světla od povrchu. [4]

2.5 Absorpce

Absorpce je jev, ke kterému dochází, pokud světlo prochází určitým prostředím a jehož intenzita se zmenšuje. Množství absorbovaného záření je závislé na chemickém složení, na čistotě, na zabarvení optického materiálu, na vlnové délce dopadajícího světla a také na tloušťce prostředí. Z logického hlediska je zřejmé, že čím je tloušťka větší, tím více světla je pohlceno. Dopadá-li světlo na rozhraní, část světla se odráží a část světla prochází. Činitel absorpce A_d , nám udává, jaký poměr z celkového dopadajícího světla je absorbován neboli jde o poměrnou intenzitu (množství) světla, které je pohlceno prostředím při průchodu o tloušťce d . Pak platí:

$$A_d = 1 - (1 - a)^d \quad (12)$$

A_d je absorpce světla v tloušťce d , a definujeme jako činitel absorpce pro tloušťku 1 mm a d je tloušťka. [4]

2.6 Propustnost

Propustnost neboli transmise je definována jako poměrná intenzita (množství) světla, které projde optickým prostředím a zároveň není pohlceno. Je udávána v procentech prošlého světla, označována písmenem T a je vyjádřena jako podíl intenzity světla procházejícího rozhraním (I') a intenzity světla dopadajícího na rozhraní (I).

$$T = \frac{I'}{I} \quad (13)$$

Pokud nedojde ke ztrátám světla absorpcí, pak platí:

$$R + T = 1 \quad (14)$$

Je-li optická soustava složená z více lámavých ploch, dochází na každé ploše ke ztrátám světla odrazem. Tyto ztráty jsou nežádoucí a snažíme se je minimalizovat např. antireflexními úpravami, které snižují ztráty světla odrazem, ale zároveň zvyšují propustnost dopadajícího světla a zlepšují kvalitu vidění.

Propustnost na n -rozhraních, kdy nedochází ke ztrátám absorpcí, vyjadřuje vzorec:

$$T = (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) \quad (15)$$

Propustnost je vyjádřena písmenem T , n je počet lámavých ploch a R_1 , R_2 až R_n je odrazivost na první, druhé až n -té lámavé ploše. [4]

3 Materiály brýlových čoček

V této kapitole uvádím rozdělení materiálů brýlových čoček na materiály organické a anorganické a jejich jednotlivé podkategorie. U organických brýlových čoček se jedná o materiály z termosetu a z termoplastu. Další dělení je na materiály se standardním, středním, vysokým a velmi vysokým indexem lomu. V neposlední řadě se věnuji v této kapitole organickým fototropním materiálům.

3.1 Anorganické materiály

Mezi anorganické materiály v brýlové optice řadíme skleněné, jinak zvané minerální nebo také silikátové, čočky. Tyto čočky jsou po několik století, od začátků optiky do poloviny 20. století, výhradním materiálem pro výrobu brýlových čoček v oční optice. Pouze v několika desetiletích byly nahrazeny organickými materiály. [6]

Sklo

Sklo je tvrdý, ale zároveň křehký materiál s nízkou tepelnou vodivostí, který může praskat, pokud je vystaven prudkým teplotním změnám (zvláště ochlazení). Jedná se o ztuhlou taveninu sklotvorných oxidů s příměsí taviv a stabilizátorů. Tavenina ze sklotvorných oxidů, nejčastěji oxidu křemičitého, je hlavní podstatou skla. Taviva, jako oxid sodný nebo draselný, podstatně snižují teplotu tavení oxidu křemičitého, zatímco stabilizátory jako oxid vápenatý a olovnatý, zvyšují chemickou stálost skla a ovlivňují jeho výsledné vlastnosti.

Základními optickými veličinami optické skloviny je index lomu, který pro běžné korunové sklo odpovídá hodnotě $n = 1,523$. Pro vysoko indexové čočky se skla vyrábějí do hodnoty indexu lomu $n = 1,9$. Druhou charakteristickou veličinou je Abbeovo číslo, které udává stupeň disperze brýlové čočky. Abbeovo číslo souvisí nepřímo úměrně s indexem lomu. Čím vyšší je hodnota indexu lomu brýlové čočky, tím nižší je Abbeovo číslo. Z pohledu výroby by Abbeovo číslo nemělo být nižší, než je hodnota 30, jelikož s jeho klesající hodnotou roste disperze, která u optického skla je nežádoucí a zhoršuje kvalitu zobrazení čočkami. Další veličinou je hustota neboli měrná hmotnost použité skloviny, která se pohybuje u minerálních čoček v rozsahu $2,55 \text{ g/cm}^3$ a u čoček z běžného korunového skla do $4,0 \text{ g/cm}^3$. V ideálním případě by měla být měrná hmotnost co nejnižší. [7]

3.2 Organické materiály

Organické materiály neboli plasty, jsou využívány v oční optice od 60. let 20. století a okamžitě nahradily minerální čočky. V současné době tvoří hlavní výrobu brýlových čoček. Plastové materiály můžeme rozdělit do dvou skupin na materiály z termosetu a z termoplastu.

Materiály z termosetu

Materiály z termosetu jsou produktem chemické transformace, která tepelným účinkem, vytváří tvrdé, rigidní a 3D makromolekulární sloučeniny. Tyto sloučeniny jsou složeny z relativně krátkých, ale vysoce reaktivních molekulárních řetězců, které jsou spojeny chemickými vazbami. Za pomoci tepla je vytvořena chemická reakce nazývaná „sítování“, která tvoří rigidní spoje mezi všemi molekulami představující 3D síť. Vytvořená struktura pojmenovaná mřížkování, obohacuje materiál o vlastnosti jako je mimořádná chemická stabilita a mechanická síla. Polymerizační reakce, tvořená monomerem, jehož vlastností je být polymerizován na základě tepla nebo katalýzy, je tvořená spojením identických monomerních jednotek. Výsledkem je nová molekula, polymer, s odlišnými vlastnostmi, velikostí a podstatou samotnou. Transformace materiálu má chemický charakter, a právě proto je nevratná. Jakmile je monomer obsazen a polymerizován, získá tyto vlastnosti: tvrdost, neroztavitelnost, nerozpustnost, odolnost vůči nárazům a chemikáliím a rozměrovou stabilitu.

Materiály z termosetu jsou vyráběny metodou litím (casting) a jsou hojně využívány v oční optice. Mezi nejznámější a nejpoužívanější materiál patří CR39. [6]

Materiály z termoplastu

Tyto materiály jsou tvořeny seskupením dlouhých lehce rozvětvených molekulárních řetězců, které nejsou spojeny, ale jsou do sebe namotány. Jejich složitá struktura a mezimolekulární síly dávají materiálu vzhled tvrdosti. Jednotlivé řetězce nejsou chemicky spojeny. Tato volná molekulární struktura dává těmto materiálům výborné nárazu odolné vlastnosti. Dalšími vlastnostmi termoplastických materiálů je měkčení vlivem tepla, tvarovatelnost za tepla a další. Transformace na rozdíl od termosetů je vratná, a i díky tomu mají recyklovatelný charakter.

V oční optice se vyrábí z termoplastických materiálů pouze polykarbonát a polymethylmethakrylát (PMMA). Jsou vyráběny metodou lisováním (molding). [6]

Polymethylmethakrylát (PMMA)

V současné době se čočky z PMMA již nevyrábějí, jelikož materiály jako CR39, Trivex nebo Polykarbonát mají lepší vlastnosti. PMMA má ve srovnání s nimi nižší otěruvzdornost. Zároveň se jedná o materiál, který je dobře opracovatelný, průhledný a s nízkou měrnou hmotností. Index lomu materiálu je 1.49, hustota je v rozmezí od 1.17 až po 1.20 g/cm^3 . Jedná se o materiál, který vzniká polymerizací methylnmethakrylátu, což je organická sloučenina acetonu a kyanovodíku s kyselinou sírovou. [6, 8]

3.2.1 Čočky se standardním indexem lomu

Mezi čočky se standardním indexem lomu řadíme čočky s indexem větším nebo roven 1,48 a menším než 1,54. Mezi takovéto čočky řadíme CR39 a Trivex. [6]

CR-39

Materiál CR39 je tekutý monomer, který může být polymerizován účinkem tepla nebo na základě katalyzace. V oční optice má materiál z CR39 nespočet výhod oproti materiálům z minerálu. Jsou jím index lomu 1,5 (který je blízko tradičním minerálním čočkám), hustota materiálu 1,32 g/cm^3 (prakticky polovina skla), Abbeovo číslo 58-59 ukazující na nízkou disperzi, vysoká odolnost proti nárazu, vysoká propustnost a nespočet možností pro barvení a nanášení povrchových úprav brýlových čoček. [6, 8]

Trivex

Tento materiál se chová něco jako termoset, ale kombinuje vlastnosti jak termosetů, tak termoplastů. Původně byl tento materiál použit na výrobu hledí armádních helem. Odtud pochází jeho polymerizační schopnosti. Na druhé straně, jeho specifická chemická struktura dovoluje kontrolovat určitý stupeň vzájemného propojení molekul v průběhu polymerizace, která dává vlastnosti blízké termoplastickým materiálům. [6]

Trivex kombinuje tři kvalitativní požadavky uživatelů v oční optice. Díky tomu také získal své jméno Trivex. Za prvé je to nízká hmotnost a odolnost. Za druhé optická čírost, která vychází z čistoty monomeru, propustnost a nízká disperze materiálu (Abbeovo číslo 43-45) a za třetí schopnost materiálu být zušlechťován povrchovými úpravami proti poškrábání a

reflexům. Nízká hmotnost materiálu vychází z jeho velmi nízké hustoty ($d = 1.11$), kombinována s vyšším indexem lomu, než je CR39 a schopností být vyráběn s minimální tloušťkou 1 mm v centru mínusové brýlové čočky. Bezpečnost materiálu je dána jeho vysokou odolností vůči nárazům a přirozenou odolností vůči ultrafialovému záření. Nevýhodou naopak je náchylnost na poškrábání. [6]

3.2.2 Čočky se středním indexem lomu

Jedná se o čočky s indexem lomu vyšším nebo rovném 1,54 a nižším než 1,64. V porovnání s materiálem z CR39 je možné vyrábět čočky z tohoto materiálu lehčí a tenčí. Obvykle mají nižší hustotu (mezi 1,20 – 1,32) než CR39, projevují se vysokou disperzí (Abbeovo číslo mezi 31 a 42), vysokou senzitivitou na teplo a lepší ochranou proti UV záření. Tyto materiály jsou choulostivé na poškrábání, je možné je barvit či je zušlechťovat samozabarvovacími vlastnostmi. Většina z těchto materiálů jsou termosety, pouze polykarbonát má termoplastický charakter. [6]

Polykarbonát

Výroba polykarbonátu je datována kolem roku 1955. V oční optice se začal používat až v 90. letech. Tento materiál nabízí podobné vlastnosti srovnatelné s dalšími plastovými materiály. Z chemického pohledu patří polykarbonát do poly-aromatických karbonátů. Jedná se o amorfně strukturovaný lineární polymer, jehož uhlíkové jádro je tvořeno karbonovými a fenolovými jednotkami. Materiál je vyráběn za pomoci chemické polykondenzace.

V oční optice jsou oceňovány hlavně jeho výborná nárazuvzdornost, která je nejvyšší ze všech optických materiálů, vysoký index lomu, extrémně nízká váha daná nízkou hustotou, možnost výroby s nízkou tloušťkou, efektivní ochrana před UV zářením a vysoká odolnost před teplem. Materiál z polykarbonátu je možné barvit za pomoci speciálních technologií a jako všechny čočky se středním indexem lomu je jeho nevýhodou náchylnost k poškrábání. [6]

3.2.3 Čočky s vysokým a velmi vysokým indexem lomu

U čoček s vysokým indexem lomu se bavíme o indexu lomu vyšším nebo rovno 1,64 a nižším než 1,74. Vyšší index lomu látky je zajištěn látkami Thiourethan a thiooly bohatými na

síru ($n = 1.67$). Tyto materiály je možné díky jejich chemické povaze vrtat i drážkovat. K získání ještě vyššího indexu lomu ($n = 1.74$) je použito episulfidů, které umožňují zavedení atomů síry ve vyšší koncentraci. Na jedné straně tyto materiály umožňují vyrobit brýlové čočky tenčí. Na straně druhé je jejich nevýhodou snížená možnost barvení, jednoduchost k rozbití a vysoká senzitivita k teplu (nižší odolnost k teplu). [6, 8, 9]

3.3 Organické fototropní materiály

Materiál, který je využíván pro výrobu organických fototropních čoček, je speciální kopolymer CR-307, do kterého jsou lépe vkládány fotosenzitivní látky. Ty jsou vkládány do struktury materiálu tak, že aktivní látka (spiro-oxazinové molekuly) je smíchána s tekutým monomerem před polymerací nebo inkorporací do povrchu materiálu po procesu polymerizace (imbibice). Vlivem UV záření začne pravá část této molekuly rotovat a tím způsobí ztmavnutí čočky. [8]

4 Povrchové úpravy brýlových čoček

Tato kapitola bude popisovat povrchové úpravy aplikované na brýlové čočky, kde povrchovými úpravami jsou myšleny všechny průmyslové procesy, které jsou jako výsledný produkt navrženy k tomu, aby vylepšily souhrn ať už mechanických nebo optických vlastností brýlových čoček, nezávisle na jejich dioptrické síle. Mezi tyto povrchové úpravy řadíme tvrzení, antireflexní úpravy, absorpční vrstvy neboli barvení čoček, reflexní (zrcadlové) úpravy. V rámci minerálních brýlových čoček popisujeme ještě samočisticí vrstvy (hydrofilní a hydrofobní) a u plastových brýlových čoček vrstvy hydrofobní, olejofobní a antistatické vrstvy. [10]

4.1 Tvrzení

Primárním cílem tvrdící vrstvy je zvýšit odolnost vůči poškrábání. Další funkcí tvrdící vrstvy je zvýšení adheze neboli přilnavosti, která umožňuje lepší „uchycení“ následných vrstev. Rozlišujeme tvrzení organických a minerálních brýlových čoček. [6, 8]

4.1.1 Tvrzení organických čoček

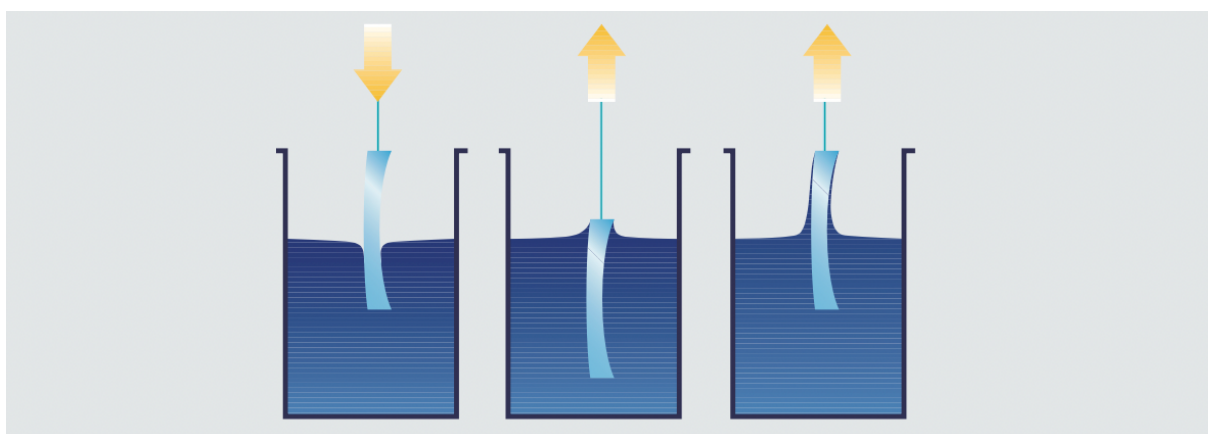
První generace tvrzených povrchových úprav z roku 1970 byla postavena na teorii tvrdosti, která říkala, že „plastové čočky se poškrábají jednodušeji díky měkčímu materiálu, z kterého jsou vyrobeny, zatímco minerální brýlové čočky jsou skoro „nepoškrabatelné“, protože jsou z tvrdého materiálu.“ Procedura nanášení povrchové úpravy se označovala „quartzing“ a spočívala v principu nanášení minerální vrstvy na povrch čočky (z materiálu CR39), metodou vakuového napařování, kdy nanášenými molekulami byly látky z křemíku. Hlavní problém procedury byla rozdílná teplotní roztažnost použitých materiálů, což vedlo k porušení nanášené vrstvy vlivem teplotních změn. Druhá generace povrchových úprav tvrzení se datuje k roku 1975. Ve výrobním procesu tvrzení došlo k řadě změn, které se stále používají dodnes, a díky nimž byla povrchová vrstva čočky nejen tvrdší, ale i elastičtější, což zajišťovalo její správnou adhezi k povrchu čočky. Vrstva se na povrch čočky nanášela dvěma způsoby, metodou nazvanou „dip coating“ neboli „ponořování“ (Obr. 4.1) a metodou zvanou „spin coating“, kterou můžeme přeložit jako „roztírání“ (Obr. 4.2). Nová generace tvrzení se objevila v raných devadesátých letech a její velkou výhodou byla vysoká odolnost proti poškrábání, relativně

vysoká pružnost vrstvy a zároveň nízký koeficient tření. Tato úprava potvrdila schopnost funkčnosti s antireflexní vrstvou, což byl do té doby velký problém. Jednalo se o nanokompozitní materiál, který je nanášen na povrch čočky ve vakuu a obsahuje téměř 50 % křemíku v elastickém pojivu. [6, 8, 10]

Tvrzení ponořením do tvrdícího laku (Dip coating)

Před samotným nanášením laku jsou nejprve brýlové čočky vyčištěny pomocí ultrasonického přístroje, aby mohla vzniknout dokonalá adheze mezi lakem a čočkou. Poté jsou čočky ponořeny do lázně tvrdícího roztoku, z kterého jsou následně postupně konstantní rychlostí vytahovány. Finální tloušťka vrstvy laku závisí jak na viskozitě roztoku, tak na rychlosti vytahování čočky z roztoku. Čím rychleji vytahujeme čočku z laku, tím silnější tvrzená vrstva bude. Lak se následně polymerizuje při teplotě 100 °C přibližně 2-3 hodiny, což zajistí vytvrzení vrstvy laku s povrchovou odolností čočky proti poškrábání. Důležitým bodem v tomto procesu je tloušťka vrstvy laku, která se pohybuje kolem 2 (± 0.5) mikrometrů. Čím vyšší tloušťka laku je, tím nižší je odolnost proti otěru. Se snižující se tloušťkou klesá povrchová tvrdost čočky. [6, 8, 10]

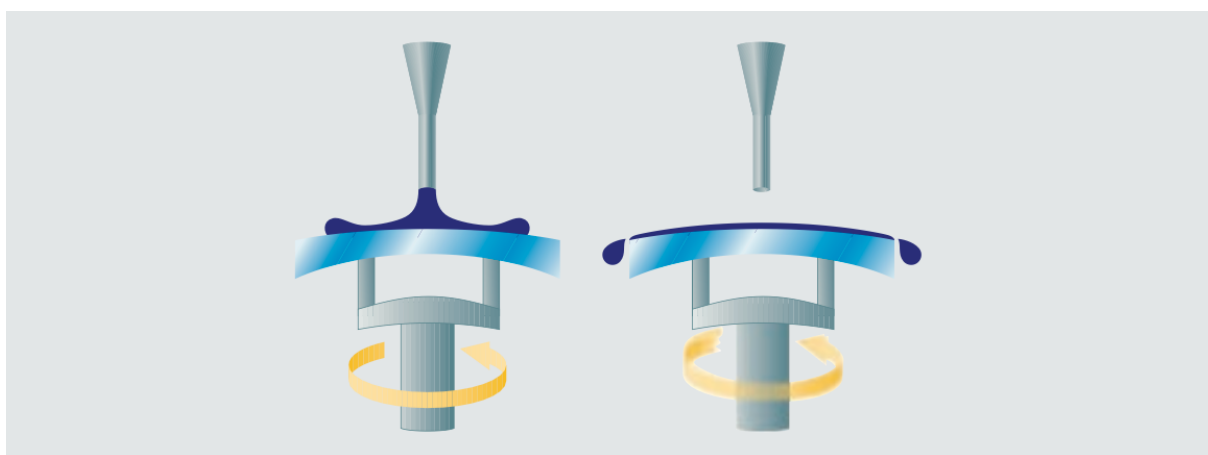
Veškeré úkony jsou prováděny v plně kontrolovaných atmosférických podmínkách s monitorovanou teplotou a vlhkostí. [10]



Obrázek 4.1 Dip coating [10]

Tvrzení rotačním nanášením tvrdícího laku (Spin coating)

Procedura Spin coating je ve svém principu jednoduchá a vhodná pro malé předměty, které mohou symetricky rotovat. Nejvíce se využívá k lakování konkávních povrchů v amerických laboratořích. Při výrobě je nejprve brýlová čočka uchycena na rotujícím zařízení. Následně je kapka tvrdícího laku umístěna do středu brýlové čočky a poté pomocí rotačního otáčení s kontrolovanou rychlostí, je vrstva laku rozprostřena po povrchu čočky. Výsledná povrchová úprava má častěji slabší ošetrivost než tvrzení pomocí Dip coating. Na druhé straně lak dobře funguje jako „houba“ a je možné jej barvit, čehož se využívá zejména u vysoko indexových čoček. [6, 8, 10]



Obrázek 4.2 Spin coating [10]

Tvrzení ve formě (In-mold coating)

Tvrzení je prováděno přímo ve formě při formování čočky. Nejprve se zahřeje forma, do které je následně vložen silikonový vak se zahřátým roztokem obsahující tvrdící lak na bázi akrylátu. Následně se uvnitř silikonového vaku pomocí zvýšeného tlaku vytvoří tenká vrstva laku, která naléhá na vnitřní stranu formy. Po vstříknutí termoplastické hmoty je zformována výsledná brýlová čočka, jejíž výhodou je velmi dobré přilnutí tvrzené vrstvy k základnímu materiálu. Nevýhodou je, že již není možné čočky dodatečně barvit. [8, 10]

Vakuové tvrzení (PVD, LP-CVD, PECVD)

Toto tvrzení probíhá pomocí vakuového nanášení tenké vrstvy na povrch brýlové čočky. Mezi základní metody patří PVD (physical vapor deposition), LP-CVD (low pressure chemical vapor deposition) nebo PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition). Jednotlivé

metody se od sebe liší chemickým odpařováním. Kdy u metody PVD se z pevného povrchu zdrojového materiálu odpařují nanášené atomy, zatímco u metody CVD dochází k evaporaci základního materiálu, který je rozkládán chemicky nebo teplem. Metodu PECVD je možné používat společně s procesem nanášení antireflexu na jedné výrobní lince. [8, 10]

4.1.2 Tvrzení minerálních čoček

U minerálních brýlových čoček mluvíme spíše o zušlechťování materiálu, jelikož tvrzením vyvoláme v čočce vysoké vnitřní nebo povrchové pnutí, které způsobí několikanásobné zpevnění a tím i vyšší odolnost proti rozbití. Tvrzením tedy spíše vyvoláme menší náchylnost na rozbití než zvýšenou odolnost vůči poškrábání, která je sama o sobě díky tvrdosti materiálu dostatečná. Rozlišujeme tvrzení tepelné a chemické. [8, 11]

Samotné tvrzení se řídí normami pro tvrzené sklo. Podle Evropské normy z roku 1997 (BS EN ISO 14889) musí tvrzené sklo vydržet účinek 22 mm veliké kovové kuličky, která na čočku působí silou 100 N neboli 10 kg po dobu 10 sekund. Podle FDA (Food and Drug Administration) by tvrzené sklo mělo vydržet náraz ocelové kuličky o velikosti 5/8 palce z výšky 50 palců. [8]

Tepelné tvrzení

Při tepelném tvrzení je čočka řízeně zahřívána na teplotu 620-650 °C, odpovídající teplotě blízké měknutí brýlové skloviny. Následně dochází k rychlému ochlazení, ať už ve vodní lázni nebo proudem vzduchu (častější varianta). Zahřátím, které trvá přesně stanovenou dobu od 50 do 200 sekund (v závislosti na tloušťce čočky) a následným ochlazením brýlové čočky, získává čočka vysokou pevnost. Ta spočívá právě v ochlazení povrchu, který ztuhne. Následným ochlazením se čočka uvnitř smrští, čímž vznikne na jejím povrchu tlakové napětí a uvnitř čočky napětí tahové. Velká pozornost je upřena na tloušťku čočky, jelikož rychlost vytvrzování závisí na hmotnosti čočky a zároveň u čoček s vyšší středovou, respektive okrajovou tloušťkou hrozí deformace optických ploch. [8, 10, 11]

Chemické tvrzení

Chemickým tvrzením nevznikají deformace čoček z důvodu nižší použité teploty (400 °C), která je hluboko pod bodem měknutí skloviny. Velkou nevýhodou je naopak dlouhá doba tvrzení a ekonomicky náročný proces. Principem chemického vytvrzení je náhrada draslíkových iontů za ionty sodíku v povrchové vrstvě brýlové čočky. Díky draslíkovým iontům, jež nahradily ionty sodné, dochází ke smrštění. Celkový proces vytvrzení trvá 12-16 hodin, kdy po tuto dobu jsou brýlové čočky ohřívány v lázni s kyselinou křemičitou a dusičnanem draselným. Na povrchu čočky vznikne vrstva silná 0,07mm, která má velmi vysoké tlakové napětí až 700 MPa, které dodává čočce značnou pevnost a odolnost proti poškrábání. [8, 10, 11]

4.2 Antireflexní úpravy

Hlavním úkolem antireflexních povrchových úprav je snížení nežádoucích rušivých odrazů a zároveň i zvýšení propustnosti daného skla pro světlo. Na brýlové čočce mohou vznikat vnitřní, vnější a rohokové reflexy. Vnitřní reflexy vznikají, když se světelné zdroje při šikmém dopadu světla odrážejí na pupile a za určitých podmínek vzniká dvojí zobrazení. Vnější reflexy vznikají na přední ploše čočky a pro uživatele samotného moc rušivé nejsou, zatímco pro lidi z okolí nejsou příjemné, protože omezují pohled do očí. Rohokové reflexy vznikají, jak už z názvu vyplývá, mezi rohovkou a brýlovým sklem. Tyto reflexy jsou méně rušivé díky nízké reflexní schopnosti přední plochy rohovky, ale při vyšších dioptriích mohou způsobovat dvojitý obraz. K eliminaci těchto parazitních paprsků dochází jak na přední, tak na zadní ploše brýlové čočky na základě takzvané destruktivní interference kvůli vlnové povaze světla. Světlo se totiž chová jako částice i jako vlna. Aby mohly antireflexní povrchové úpravy fungovat, musí splňovat dvě podmínky, fázovou a amplitudovou. Fázová podmínka nám říká, že dvě světlené vlny musí být posunuty o polovinu vlnové délky (λ), aby se mohly eliminovat, zatímco amplitudová podmínka nám říká, že velikost obou amplitud těchto světelných vln musí být stejná ($n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$). Zároveň tloušťka vrstvy se musí rovnat $\frac{1}{4}$ vlnové délky světla, aby došlo k vyrušení obrazů. Dříve se používaly jednovrstevné antireflexní povrchové úpravy, které redukovaly vlastní reflexy brýlové čočky do 1,35 %. Parazitní paprsky nejde eliminovat však stoprocentně, právě proto se v současnosti používají vícevrstevné antireflexní povrchové úpravy, které redukuje reflexy do 0,2 %. Podle jejich účinnosti je můžeme rozdělit do tří skupin, standardní s celkovou propustností 95 až 97 %, střední s 96 až 98 % a vysoká s 98 až 99 %

transparentností. Se zvyšující se lomivostí brýlové čočky stoupá i její vlastní reflexe. Reflexe pro jednotlivé indexy lomu se dá vypočítat podle následujících vzorců: [12]

$$R_S = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (16)$$

$$R_T = \frac{2 * R_S}{(1 - R_S)} \quad (17)$$

R_S reflexe pro jednu stranu brýlové čočky

R_T celková reflexe (pro obě strany brýlové čočky)

n index lomu brýlové čočky

Z výše uvedených vzorců vyplývá, že pro materiál o indexu lomu 1,5 je celková reflexe 8,64 % neboli propustnost světla je 92,4 %. Zatímco pro index lomu 1,7 je celková reflexe 13,61 %, převedením na propustnost světla je 87,4 % (propustnost = 100 % - reflexe). [6, 8, 10, 11, 12]

Výrobní technologie antireflexních povrchových úprav se musí skládat z nahromaděných tenkých vrstev se specifickými vlastnostmi k dosažení finálního výsledku. Specifickými vlastnostmi se míní zajištění konstantní a určité hodnoty indexu lomu, absolutní transparentnost společně s metodami implementovanými k dosažení požadované konfigurace, jako je vysoká kvalita vrstev nebo jejich tloušťka, výborná přilnavost k čočce, vnější povrchová úprava tak hladká, jako je povrch brýlové čočky a zároveň, aby optické vlastnosti byly podobné podkladu (žádné defekty způsobené izolovanými částicemi prachu, nepožadovaný rozptyl a další). V současnosti pouze jediná technologie nabízí uspokojující řešení všech výše zmíněných specifických vlastností a tou je vakuové napařování. [6, 8, 10, 12]

Fyzikální vakuové napařování (Physical Vapor Deposition)

Fyzikální vakuové napařování můžeme definovat jako proces, kdy materiály (anorganické oxidy kovů) s různým indexem lomu jsou vypařovány elektronovým paprskem na povrch brýlové čočky ve vysokém vakuu o přesně vymezené tloušťce/váze a díky kterému je možné nanášet materiál na různé povrchy. Nejčastěji používané anorganické oxidy kovů jsou ZrO_2 , SiO_2 , Ti_3O_5 , Ta_2O_5 , Ti-Al-O a SiO. Tato technologie se skládá ze tří kroků. Prvním krokem je sublimace materiálu. V druhém kroku dochází k procházení atomů nebo molekul materiálu vakuem k cílovému povrchu a v posledním kroku dochází k usazování materiálu na povrchu cílového povrchu. [8, 10, 12]

Existují tři metody vakuového napařování:

1. Tepelné napařování (Thermal Evaporation Deposition)
2. Plazmatické napařování (Plasma Sputtering Deposition)
3. Napařování iontovým svazkem (Ion Beam Assisted Deposition)

4.3 Barvení brýlových čoček

Z pohledu výrobního procesu můžeme rozlišovat dva hlavní typy barvení brýlových čoček. Pevné barvení, při kterém je materiál brýlové čočky barven před aplikací povrchových úprav a barvení povrchu brýlové čočky, které spočívá z nanesení barvy po aplikaci povrchových úprav. Obě techniky mohou být využívány jak na plastové, tak na minerální brýlové čočky. Výběr jedné techniky oproti té druhé závisí samozřejmě na použitém materiálu, ale i na logistickém omezení, jako je množství čoček k barvení. Souhrnně můžeme říct, že nedioptrické sluneční brýlové čočky jsou vyráběny metodou pevného barvení, zatímco korekční sluneční brýlové čočky jsou vyráběny technikou barvení na povrch. [6]

4.3.1 Barvení plastových brýlových čoček

Barvení plastových brýlových čoček rozlišujeme na barvení viz výše pevné, barvení na povrch a dále na barvení impregnační povrchu čočky lakem, barvení sublimačním odstínem a barvení vložení tenkého povlaku. [6]

Pevné barvení (Solid tinting)

Plastový materiál pro pevné barvení je využíván zejména pro výrobu afokálních slunečních brýlových čoček. Zřídka kdy se využívá pro výrobu čoček korekčních. Výroba se liší pro materiály z termosetu, kdy barvu smícháme s monomerem před polymerací a pro termoplasty (výhradně polykarbonát), kdy jsou barvy přímo vmíchány do polymeru v procesu výroby. Tento proces výroby umožňuje vyrábět sluneční brýle ve všech možných zbarveních a intenzitách. [6]

Barvení impregnací povrchu brýlové čočky (Surface tinting)

Technika spočívá v impregnaci povrchu brýlové čočky barevným odstínem. Barva je ve většině případů aplikována před použitím tvrdících úprav. Samotný proces se skládá z ponoření brýlové čočky do roztoku obsahujícího různé barvy a aditiva, která penetrují do materiálu brýlové čočky v hloubce 6 až 10 mikronů. Intenzita zabarvení je dána barevným odstínem, koncentrací barvy a časem ponoření čočky v roztoku, který se pohybuje od jedné minuty pro jemné odstíny až po dvě hodiny pro odstíny tmavé. Barevný odstín je tvořen koncentrací tří barev červené, žluté a modré, které nabízejí neomezený počet zabarvení. Brýlové čočky můžeme barvit po celé jejich ploše se stejným odstínem nebo můžeme využít takzvané gradientní neboli postupné barvení, které spočívá v odstupňování intenzity zabarvení. Při tomto procesu je čočka držena vzhůru nohama a zároveň kompletně ponořena do barvicí lázně odkud je velmi pomalou rychlostí vytahována. Tímto procesem získá svůj finální vzhled, kdy nejtmaší odstín, který je ponořen v lázni nejdéle je na horním okraji a nejsvětější na spodním okraji brýlové čočky. [6, 8]

Barvení impregnací povrchu čočky lakem

Materiály z termoplastů jako polykarbonát jsou obtížněji barvitelné oproti materiálu z CR39 vzhledem k absorpčním kvalitám. Barvicí techniky jsou vytvářeny blokováním UV paprsků od povrchu čočky difúzí barevného odstínu skrz celou čočku nebo aplikací speciálního laku na zadní stranu čočky a následnou impregnací barevného odstínu. [6]

Barvení sublimačním odstínem

Tato technika je nejnovější metodou v rámci barvení a je hojně využívána pro barvení vysoko indexových brýlových čoček, které nemohou být barveny metodou dip coating. Barevný odstín, který chceme použít na brýlovou čočku, je natisknutý na speciální kus papíru, který je následně položen na brýlové čočky. Takto projde skrz vakuovou pec, která způsobí, že barva přejde ze skupenství pevného do skupenství plynného (sublimace) a uloží se na povrchu čočky. Čočky jsou následně vloženy do pece zahřáté na 150 °C po několik hodin. To umožní barvě migrovat skrz povrch čočky a ustálit se pod jejím povrchem. [6]

Barvení vložení tenkého povlaku

Dalším speciálním případem barvení jsou čočky polarizované. Tyto čočky jsou barveny vložení velmi tenké vrstvy nabarveného polyvinylacetátu s maximální tloušťkou 35 až 40 mikronů přímo doprostřed brýlové čočky. Pro korekční brýlové čočky jsou využívány dvě výrobní techniky, technologie vtisknuté vrstvy a technologie pomocí membrán. [6]

Technologie vtisknutí vrstvy se používá pro termoplasty (např. CR39) a skládá se z vložení polarizované vrstvy do formy, nalití monomeru přes danou vrstvu, celé zakončené procesem polymerizace. [6]

Výrobní technologie pomocí membrán se skládá z navrstvení polarizovaných vrstev mezi dvě tenké vrstvy polykarbonátu o maximální tloušťce 0,6 mm. Tato sloučená vrstva je poté vložena do přední části formy, která je následně vložena do tlakovaného odlitku. Tato technologie je využívána pro polykarbonátové čočky. [6]

4.3.2 Barvení minerálních brýlových čoček

U minerálních brýlových čoček dělíme metody barvení na pevné (Solid tinting) a na barvení povrchu brýlové čočky (Surface tinting).

Pevné barvení (Solid tinting)

Pevné barvení minerálních čoček provedeme vložení metalických solí společně s kovy se specifickými absorpčními vlastnostmi, jako je nikl, kobalt, měď, chrom, železo, kadmium, zlato nebo selen, do minerální sazby. Pevné barvení je využíváno pro masovou produkci afokálních slunečních brýlových čoček, avšak v současnosti se používá tato metoda čím dál tím méně, jelikož jsou minerální brýlové čočky nahrazovány plastovými. [6]

Barvení povrchu brýlové čočky (Surface tinting)

Barvení povrchu brýlové čočky spočívá v uložení složených kovových vrstev na povrchu čočky ve vakuu. Čočky jsou následně zahřívány na teplotu 200 až 300 °C a vrstva je aplikována pomocí vakua napařováním. Používanými kovovými prvky mohou být chrom, molybden nebo titanové oxidy smíchané společně s křemíkem, křemíkovým monooxidem nebo magnesiovým fluoridem. Absorpce je závislá na tloušťce vrstvy a barva na použitém materiálu. Oxidy vytvářejí většinou hnědou barvu, zatímco šedá barva je složena smícháním kovových částic s křemíkem. [6]

4.4 Samočisticí vrstvy

Samočisticí vrstvy se skládají z tenkého titanového nebo křemičitého potahu tlustého 10-25 nm naneseného na povrch skla. Samočištění na skle je založeno na dvou principech, jež snižují usazování nečistot na povrchu čočky. Na principu hydrofobity a hydrofility. Samočisticí schopnost je dosažena smáčivostí daného povrchu. Prvním stěžejním bodem je dosažení vysušení na takovém povrchu, kde kapalina má sférický charakter a tím je hydrofobní povrch. Abychom získaly hydrofobní povrch musíme na něj aplikovat SiO_2 . Druhým bodem je dosažení totální smáčivosti, a to na takovém povrchu, na kterém tekutina vytvoří tenkou vrstvu. Jedná se o hydrofilní povrch. Aplikováním TiO_2 se stane povrch hydrofilním. Aplikují se z důvodu snížení usazování částic prachu a mastnot na povrchu brýlové čočky. V případě dopadu dešťových kapek na povrch dochází k rozptylu světla a tím pádem ke snížení kvality zobrazení. [8, 13]

4.4.1 Hydrofilní vrstva

Povrch, jehož kontaktní úhel mezi vodou a čočkou je menší než 90°, se nazývá hydrofilní povrch. Tento stav získáme v případě všech čoček s tvrzením a antireflexní úpravou. Super hydrofilní povrch nazýváme tehdy, pokud je kontaktní úhel menší než 50°. Aplikováním tenké vrstvy oxidu titanu, který je za normálních podmínek hydrofobní, ale působením UV záření se stává hydrofilním, zajistíme hydrofilnímu povrchu čočky superhydrofilitu. Oxid titaničitý je průhledný polovodič s širokým pásmovým odstupem, s vysokým refrakčním indexem a dobrými mechanickými vlastnostmi. [8, 13]

4.4.2 Hydrofobní vrstva

Superhydrofobní povrch definujeme tak, že kontaktní úhel je větší než 150° a úhel posuvu je menší než 10° . Úhel posuvu můžeme popsat jako kritický úhel náklonu povrchu, při kterém kapka vody začne sklouzávat z povrchu materiálu. Velkou nevýhodou hydrofobních povrchů je časová a finanční náročnost celého procesu a také jejich náchylnost k poškození díky jejich křehkosti. Abychom vytvořili nesmáčivý povrch, musíme opět použít tenkou vrstvu oxidu titaničitého nebo oxidu křemičitého. Vysoká drsnost povrchu a nízká povrchová energie jsou předpokladem pro vysokou vodoodpudivost. Příkladem přírodních hydrofobních materiálů může být třeba lotosový list, taro (druh tropické rostliny) nebo motýlí křídla. [8, 13]

4.5 Hydrofobní, olejofobní a antistatické vrstvy

Vícevrstevné antireflexní povrchové úpravy mají tendenci k usazování prachu a jiných nečistot díky jejich pórovitosti. Z tohoto důvodu se implementovaly do výroby další vrstvy, které dávají čočce olejofobní a hydrofobní vlastnosti. Tyto vrstvy jsou v řádech nanometrů silné a nemají žádný negativní dopad na antireflexní vrstvy. Výše zmíněné vrstvy jsou připravovány z fluoridů nebo hydrouhlíkových řetězců. Což jsou látky, které obsahují molekulární spojky, jež je pomáhají udržet na povrchu brýlové čočky. Zároveň tyto látky mají schopnost odpuzovat vodu a nečistoty. Na povrch brýlové čočky mohou být nanášeny dvěma způsoby. První způsobem nám známý Dip coating, popsany výše, i když v tomto případě je o mnoho lehčí. Druhým způsobem aplikace je vakuová nebo plazmatická polymerizace. Specifické povrchové vlastnosti vrstev umožňují dopadající vodě na povrch brýlové čočky vytvářet kapičky, které snadno stékají pryč. Současně je většina hydrofobních úprav i antistatická, což zamezuje usazování prachových částic na povrchu brýlové čočky. [8, 10]

4.6 Reflexní vrstvy

Odrazivost (R) neboli reflexe závisí na indexu lomu (n), absorpci naneseného kovu dle vztahu:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (18)$$

Zároveň závisí i na intenzitě zabarvení čočky. Čím vyšší je procento zabarvení, tím větší je efekt reflexní vrstvy. Cílem reflexních vrstev je snížení propustnosti světla za pomoci odrazivosti, jelikož se odrazivost vlivem interference zvyšuje. Jedná se o takzvanou konstruktivní interferenci neboli mluvíme o principu obráceného antireflexu. K výrobě zrcadlových vrstev se používají materiály o vyšším indexu lomu, které jsou odolnější vůči mechanickému poškození a jsou stálejší na vzduchu, než je index lomu základního materiálu. K výrobě se používají dielektrické materiály, jako jsou oxidy chromu, dioxidy křemíku a titanu, protože dopadem světla na volné elektrony dochází k jeho pohlcení a přeměně v tepelnou energii. Čím lépe vede kov elektrický proud, tím je vyšší odražená část světla. [14]

5 Fotochromatické brýlové čočky

Hlavní kapitola této práce nese název fotochromatické brýlové čočky. Budu se zde věnovat historii, výrobě plastových i minerálních fotochromatických brýlových čoček a na závěr popíšu základní princip fungování těchto speciálních brýlových čoček.

5.1 Historie fotochromatických čoček

V roce 1966 představila firma Corning „Photogray“ brýlové čočky, které obsahovaly stříbrný/měděný halogenidový fotochromatický systém v minerálních čočkách. Krystaly halogenidu stříbra přidáné do roztaveného skla způsobily, že brýlové čočky ztmavly vlivem UV záření během několika minut a plného stavu zbarvení bylo dosaženo asi po 15 minutách. Čím intenzivnější UV záření bylo, tím tmavší čočky byly a mohly poskytovat neustále se přizpůsobující komfort v různě světelných podmínkách. Zároveň tyto čočky chránili před UV zářením, což nebylo v té době bráno jako výhoda. Popularita fotochromatických minerálních čoček a nástup čoček plastových vedlo k poptávce po fotochromatickém systému kompatibilním i s plastovými brýlovými čočkami. [15, 16]

První komerčně dostupné plastové fotochromatické brýlové čočky zvané „Photolite“ byly představeny v roce 1982 firmou American Optical Corporation. Základní hmotou pro brýlové čočky byl polymer z diglykol karbonátu, která představuje nejznámější hmotu v brýlových čočkách. „Photolite“ obsahoval indolino spironaftoxazin, který umožňoval funkci zbarvení. [15]

Rodenstock

Firma Rodenstock představila v průběhu desetiletí několik typů fotochromatických brýlových čoček. Prvním byl Perfalit ColorMatic v roce 1986, který vykazoval v aktivovaném stavu modrou barvu. Pro dosažení neutrální barvy v aktivovaném stavu měla čočka trvalý hnědý odstín s 25 % absorpcí. Při vystavení UV záření (50kLux a teplotě 23 °C) čočky ztmavly až na 60 % absorpce s modrošedým odstínem. Ale tato první generace fotochromních čoček měla ve srovnání s minerálními fotochromními materiály velkou nevýhodu: odolnost proti „únavě“, kterou můžeme definovat jako ztrátu absorpce aktivovaného stavu v průběhu času. V průběhu dalších let se firma snažila zvětšit barevný rozsah, který uvedla na trh v roce 1988 jako

Photocolor. Nový Perfalit ColorMatic byl v roce 1995 uveden jako druhý typ fotochromatických brýlových čoček firmy Rodenstock. Byl složený ze směsi sedmi fotochromatických barev, spiroxazinů stejně jako naftopyranů, aby v celkovém důsledku vytvořil hnědou barvu v aktivovaném stavu. Ve srovnání s první generací se zvýšila propustnost v inaktivovaném stavu ze 75 na 90 procent, respektive 95 procent s antireflexní úpravou. Současně se zvýšila absorpce aktivovaného stavu z 60 na 75 procent. Dalším typem, v pořadí třetím, byl Perfalit ColorMatic Extra představený v roce 1999. Tento produkt měl na základě inovativního výzkumu zcela nový design. Došlo k syntetizování naftopyranů s fialovou až modrou barvou v aktivovaném stavu s malou změnou v chemické struktuře. Výsledkem bylo ohromné zlepšení absorpce při plné aktivaci, rychlosti blednutí, barevné stability a odolnosti proti únavě. Výhodou nového typu fotochromní molekuly byl širší absorpční pík v aktivovaném stavu. V porovnání s druhou generací měla třetí generace o 5 procent vyšší absorpci, zároveň vykazovala signifikantně rychlejší odbarvování. V roce 2006 Rodenstock představil novou čočku se středním indexem lomu 1.54 v barvě hnědé a šedé. Transmise v inaktivovaném stavu byla vylepšena na více jak 92 % (s AR úpravami). Tyto nové fotochromatické čočky nabízely již 100 % UV ochranu. Další vývoj se zabýval vysokoindexovými fotochromickými brýlovými čočkami, které jsou postaveny na kompletně jiné chemické povaze. Představen byl ColorMatic IQ s indexy lomu 1.6 a 1.67. Transmittance v inaktivovaném stavu dosahuje 92 %. V porovnání s hlavními soupeři je ColorMatic IQ o 50 procent rychlejší v prvních dvou minutách odbarvování a po třech minutách blednutí vykazuje o 20 % vyšší stupeň transmise. [17]

Transitions

V roce 1990 firma PPG vyvinula na základě slunečního záření automaticky se barvící čočky blokující UV záření. Čočky byly uvedeny na trh ve spojení s firmou Essilor International (největší evropská oční společnost a jeden ze světových čelních představitelů v brýlových čočkách) pod názvem Transitions. PPG a Essilor na základě spokojenosti s výsledky tržního testování vytvořili společný podnik pod názvem Transitions Optical, Inc. Později se ukázalo, že Transitions Optical pro výrobu svých fotochromatických čoček nepoužil monomer CR39, který byl do té doby běžně užívaným plastem k jejich výrobě. Použitím jiných patentovaných monomerů pro brýlové čočky použil podnik proces zvaný imbibice, ve kterém fotochromní barviva byla nanášena na přední plochu čočky, která byla poté zahřátá, aby pomohla barvivům proniknout do pórů čočky materiálu. Následná tvrzená vrstva byla umístěna přes takto upravený povrch, aby utěsnila a chránila fotochromatická barviva. Vystavení kyslíku mělo tendenci ničit

schopnost molekul měnit se ze světlého do tmavého stavu a zpět, takže povrchová úprava tvrzení prodloužila životnost fotochromatického efektu čočky zpomalením oxidačního procesu. Tento druh čoček se po vystavení slunečnímu záření dostatečně rychle nezabarvoval a neztemňoval. V roce 1992 firma vydala druhou generaci čoček, která měla zmíněné vlastnosti vylepšené. V roce 1996 Transitions představily světu nové čočky Transition XTRActive, které byly designované více pro jednotlivce trávící svůj čas více venku. Výhodou těchto brýlových čoček bylo extra zabarvení v šedém odstínu a také zabarvení za předním sklem auta. Nevýhodou naopak byl velmi pomalý proces zabarvení čoček právě v automobilu, jelikož čelní sklo auta blokuje většinu ultrafialového záření, které spouští ztmavovací efekt. V roce 1997 byla uvedena na trh třetí generace Transitions čoček, které reagovaly rychleji na světlené podmínky a zároveň byly tmavší než generace druhá. V následujícím roce byly uvedeny na trh čočky z polykarbonátu, který byl lehčí, tenčí a odolnější než klasické plastové brýlové čočky. Všechny následující generace (2002 – čtvrtá, 2005 – pátá generace) měnily rychlost zabarvení a odbarvení oproti generacím předchozím, respektive pátá generace byla světlejší ve vnitřních prostorech a podávala lepší výkon při vysokých venkovních teplotách. Rokem 2006 došlo ke změně představením čoček, které měnily zabarvení nejen po expozici ultrafialového záření, ale i záření viditelném. Jednalo se o novou řadu polarizovaných řidičských brýlových čoček, jež vyřešily problém, které měly standartní fotochromatické čočky, které se nezabarvovaly za čelním sklem auta. [18, 26]

Firma Transitions Optical, Inc. za posledních patnáct let vydala několik řad fotochromatických brýlových čoček. Jednalo se o generace Transitions VI (2008), Transitions Xtractive (2010), Transitions Vantage (2012), Transitions VII (2014), Transitions Style colors and mirrors (2018) a poslední vydanou fotochromatickou brýlovou čočkou je Transitions Signature GEN8 (2019). Přičemž každá nová generace těchto čoček představovala unikátní nové vlastnosti, které poskytovali nositelům výjimečný komfort. [25]

Transitions Signature VII generace využívají patentovanou technologii Chromea7TM, která umožňuje lépe reagovat brýlovým čočkám na UV záření za všech situací a podmínek reálného života. Technologie Chromea7TM zajišťuje více aktivovaných molekul, které absorbují větší množství světla (lépe reagují na nepřímé sluneční světlo a zároveň lépe zachycují odražené sluneční světlo) a zajišťuje tím tak vyšší výkonnost brýlových čoček. [22, 23]

Transitions Vantage neboli v dnešní podobě Transitions Xtractive polarizované brýlové čočky využívají novou technologii vícevrstevné matrice. Optimalizací prostředí jednotlivých vrstev bylo dosaženo výrazného vylepšení ve fotochromatickém systému, jehož výsledkem je

technologie, která se aktivuje a rychleji odbarvuje a zároveň poskytuje vysoké zabarvení, odolnost a schopnost polarizace. K dosažení vysoké účinnosti polarizace a rychlého odbarvení v ten samý čas je vyžadována matice, která má opačné vlastnosti. Účinnost polarizace, aktivace a následné odbarvení jsou opět závislé na intenzitě a expozici UV záření. Jakmile brýlové čočky ztmavnou, tak jsou zároveň i více polarizované a jakmile se začnou odbarvovat stávají se méně polarizovanými. Neboli čočky jsou čiré a nepolarizované uvnitř, a naopak tmavé a polarizované venku a ve všech mezifázích je aktivace závislá na daném prostředí. Tento jev se nazývá dynamická polarizace, která je tvořena ultra rychlými dichroickými barvivy, která jsou uspořádána v lineárním vzoru matice pro polarizaci. Díky této invenci bylo rozbito paradigma konvenční polarizace a tradičních fotochromatických čoček. [27]

Transitions Signature GEN8 obsahují nový inovativní systém, který reprezentuje změnu paradigmatu (viz výše). V této nové generaci fotochromatických brýlových čoček došlo k významnému zlepšení nejen barviv, ale i matrice, ve které je barva uložena. Tyto čočky kombinují trhavou nanokompozitní matici a novou generaci ultra agilních fotochromatických barviv zajišťujících lepší výkon. Tato rušivá nanokompozitní matrice napodobuje semi-krytalickou strukturu, která vytváří více definované tvrdé a měkké oblasti. Obvykle, když dosáhneme zlepšení v jedné dimenzi (např. ztmavení nebo zrychlení zabarvení), tak ztratíme v jiné (např. na tvrdosti). Vytvořením tvrdých a měkkých míst, mohou barviva jednodušeji vyhledávat měkké prostředí, což jim umožňuje zvýšenou mobilitu. Výsledkem jsou čočky, které se rychle aktivují a zeslabují, aniž by ztrácely na procesu ztmavování nebo docházelo ke snížení jejich trvanlivosti. [29]

5.2 Výroba fotochromatických čoček

Výrobu fotochromatických brýlových čoček rozlišujeme jak pro plastové, tak pro minerální brýlové čočky.

5.2.1 Výroba minerálních fotochromatických čoček

Fotochromatický efekt u minerálních brýlových čoček je dosaženo vložením fotochromatické substance (krystalu halogenidu stříbra) přímo do materiálu samotného. Krystaly halogenidu stříbra jsou vnášeny do skla při výrobě v okamžiku, kdy se různé složky tvořící sklo spojují při vysoké teplotě. Fotochromatický efekt je možné použít na všechny typy brýlových čoček od jednoohniskových po bifokální či progresivní v refrakčních indexech 1.5 a 1.6. U vysokoindexových minerálních brýlových čoček je dosaženo efektu fotochromie pomocí tenkého filmu fotochromatického skla, který je nanesen na přední plochu čočky, avšak použití tohoto typu čoček je v dnešní době velmi omezené. Nevýhodou vložení fotochromatické substance přímo do materiálu samotného je ztmavení čočky na základě jeho tloušťky. Plusové brýlové čočky jsou tmavší v jejich středu, zatímco mínusové na okrajích. [6]

5.2.2 Výroba plastových fotochromatických čoček

Výroba plastových fotochromatických čoček oproti minerálním obsahuje vložení fotosenzitivních barviv do brýlových čoček. V současné době existují čtyři metody pro dosažení fotochromatického chování u korekčních čoček: [6, 16]

- Imbibice (impregnace) předního povrchu brýlové čočky
- „Transbonding“ neboli usazení vrstvy na přední ploše čočky
- Přidání barviv do kapalného monomeru před polymerací (In mass)
- Vložení fotochromatické membrány („wafer“) do čočky

První dvě technologie jsou využívány pro výrobu čoček firmou Transitions Optical Inc. [21] Zatímco technika přidávání složek fotochromního barviva do monomeru před polymerací je využívána některými výrobci jako firma Corning s jejich čočkami zvanými Sunsensor. Technologie „wafer“ je pro výrobu fotochromatických čoček využívána velmi zřídka. [6]

Imbibice předního povrchu brýlové čočky

Proces imbibice je dovozen z latinského slova Imbibere, což znamená „napít se“ a provádí se na polotovarech čoček (o refrakčním indexu 1.5) vyrobených z materiálu, jehož chemické složení je přizpůsobeno požadavkům fotochromismu. Tato metoda využívá teplo k vtažení fotochromatického barviva do samotné čočky. [21]

Lak obsahující fotochromní barviva je nanesen na přední plochu polotovaru pomocí centrifugy nebo pomocí metody Spin-coating. Čočka je následně vystavena vysoké teplotě v peci, která způsobuje pronikání barviv do povrchového materiálu čočky tím, že se struktura materiálu otevře. Barviva pronikají do hloubky 150 až 200 mikronů a zůstávají zde i po vychladnutí čočky. Fotochromní lak, který je následně bez barviv, se opláchne z povrchu čočky. Finální povrchovou úpravou je tvrzení, které je aplikované přes fotochromní vrstvu. [6, 16]

Transbonding

Technologie „Transbonding“ je využívána pro vysokoindexové plastové a polykarbonátové čočky. Lak obsahující fotochromní molekuly je nanesen přímo na přední povrch čočky (v maximální hloubce 15-20 mikronů) před tím, než jsou aplikované antireflexní a proti poškrábání odolné vrstvy. Zároveň lak poskytuje základ pro nanášení těchto vrstev. Mechanické vlastnosti laku jsou nezbytné pro harmonickou práci s podkladem antireflexních a proti poškrábání odolných vrstev, aby pomohl vytvořit dokonale konzistentní a odolnou čočku. [6]

Řada materiálů čoček neumí „nasát“ fotochromatické barvivo jednoduše. A právě v těchto případech se používá metoda Transbonding. Tam, kde se při metodě Imbibice umístí fotochromatická technologie pod povrch čočky, tam se pomocí metody Transbonding umísťuje fotochromatická technologie na povrch čočky. [21]

In mass technologie

Model „In mass“ přeloženo jako „ve hmotě“ může být použit i pro minerální brýlové čočky. Fotochromní molekuly se smíchají a stanou se homogenní součástí materiálu skleněné nebo plastové čočky. Originální brýlové minerální čočky vyrobené metodou „In mass“ a představené firmou Corning, byly uvedeny na trh v roce 1966 a plastové v roce 1999 jako SunSensors. [16]

Technologie Wafer

Fotochromatická barviva se přidávají metodu „in mass“ do pryskyřičné membrány, která je nalita do formy, a následně spojeny silnější, čirou odlévanou čočkou. Povrchová úprava odolná proti poškrábání je aplikována na přední povrch čočky pro ochranu fotochromního materiálu. [16]

5.3 Základní princip fungování fotochromatických čoček

Stejně jako je výroba rozlišována pro minerální a plastové čočky, tak je i rozdělen základní princip jejich fungování. Z technického hlediska je základní vlastností fotochromatických čoček schopnost ztmavnout působením ultrafialového záření a vrátit se do čirého stavu za jeho nepřítomnosti a za nepřítomnosti působení okolního tepla. Reverzibilní povaha a transmisní vlastnosti těchto čoček oscilují mezi dvěma extrémy. První je nejjasnější stav nazývaný „inaktivovaný“ a druhý je stav nejtmavší nazvaný „aktivovaný“. Z chemického hlediska je fotochromismus reverzibilní transformace mezi dvěma stavy, které poskytují čočkám různé propustné vlastnosti a barvu. Fotochromismus funguje dle následujícího způsobu. Ultrafialové záření (vlnové délky 340-380 nm) obsahuje energii potřebnou k zahájení chemické transformace, která čočku ztmaví, zatímco odstranění zdroje způsobí, že se čočka vrátí do původního čirého stavu. [6, 21]

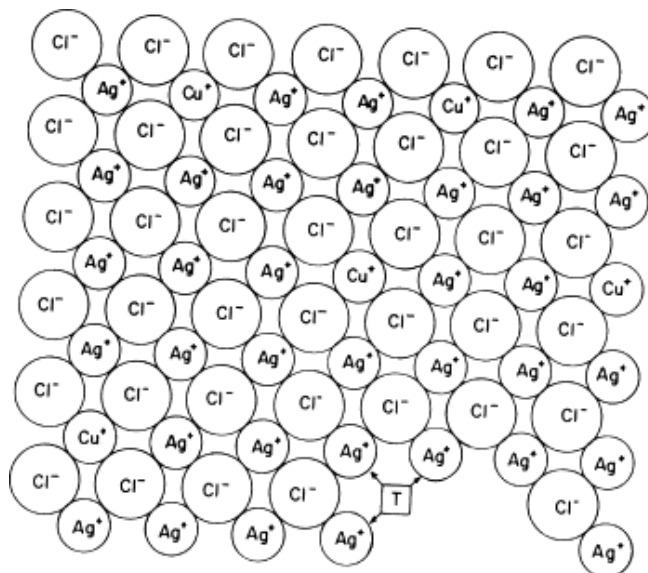
5.3.1 Princip fungování minerálních fotochromatických čoček

Základní princip fungování fotochromatických čoček se nezměnil za posledních 25 let. Ztmavnutí a vyblednutí fotochromatických skel lze do značné míry připsat fotolýze drobných krystalů halogenidu stříbra, které jsou součástí inertního skla. Na atomové úrovni je základním mechanismem výměna elektronů mezi atomy stříbra a atomy chloru, přítomnými ve formě chloridu stříbrného a jejich bezprostřednímu okolí. Efektu ztmavnutí bylo dosaženo při vystavení ultrafialového záření. Za nepřítomnosti světla je vazba stříbro-chlór iontová a atom stříbra je průhledný, čímž se čočka udržuje v čirém stavu. Při UV záření se nestabilní elektron odlomí od iontu chloru a naváže se na iont stříbra, který se přemění na svou kovovou formu a tím blokuje světlo, které následně způsobí ztmavnutí čočky. [16, 19, 20]



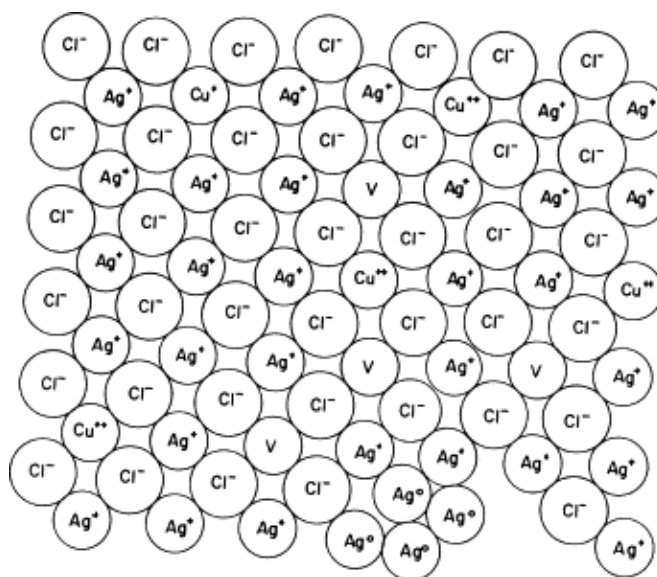


Jakmile se UV záření sníží nebo úplně vymizí, oddělí se další elektron od atomů stříbra (Ag^0), vrátí se znovu k atomu chloru (Cl^0) a dojde k obnovení původního stavu krystalu a absorpce fotonu nezpůsobí žádnou změnu. [19, 20]



Obrázek 5.1 Halogenid stříbra před zabarvením [19]

Pokud elektron dosáhne atomu stříbra, který není ekvivalentní těm na vnitřních místech mřížky (vyznačeno T v obrázku 5.1), uvízne tam. Tento zachycený elektron (Ag^0 na povrchu) střídavě přitahuje další elektrony a ionty stříbra, dokud se nevytvoří skvrna značné velikosti (Obr. 5.2). Tato skvrna nebo koloid stříbra je entita, která absorbuje viditelné světlo ve velké míře stejným způsobem jako kov a to způsobuje, že se fotochromatické sklo jeví jako tmavé.

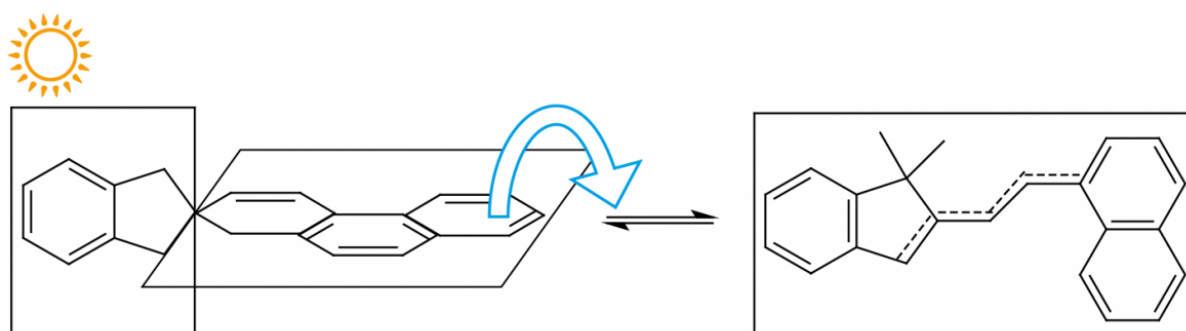


Obrázek 5.2 Halogenid stříbra po zabarvení [19]

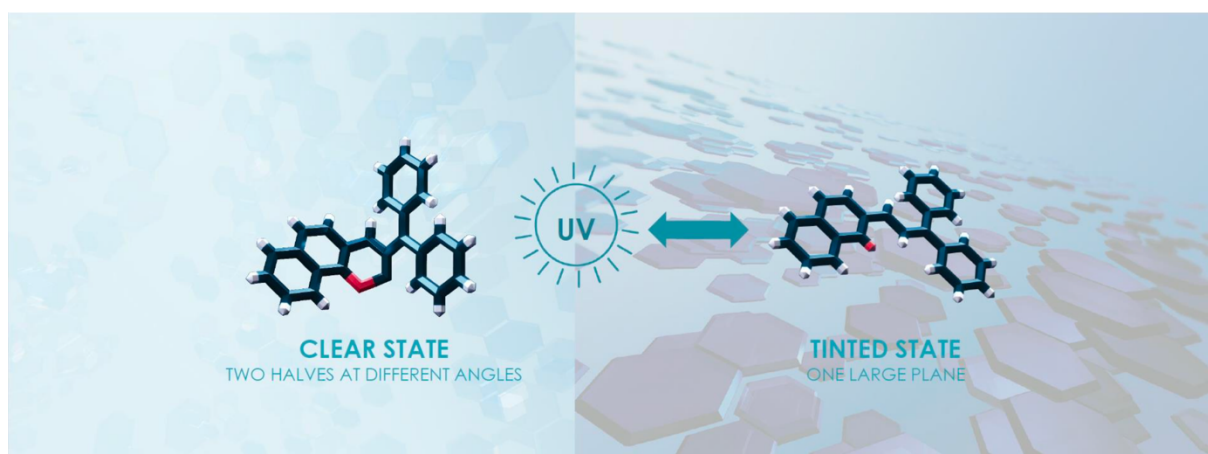
Tvorba stříbrné skvrny na povrchu krystalitu halogenidu stříbrného způsobila, že některá místa pro kladné ionty jsou prázdná. Tato místa nazýváme volná a jsou na Obr. 5.2 vyznačena symbolem V. [19, 20]

5.3.2 Princip fungování plastových fotochromatických čoček

Fotochromního efektu se dosahuje u plastových čoček fotosenzitivními látkami (např. Naftopyrany či Spirooxaziny) zavedenými do samotného materiálu nebo jako vrstva na čočku. Používá se několik „rodin“ molekul, jejichž strukturní změny mohou nastat různými způsoby jako je tvorba nebo rozbití molekul vazeb, izomerizace a další. Princip, na kterém fotochromní molekula použitá v čočkách Transitions funguje, je znázorněn na obrázku 5.3 a 5.4.



Obrázek 5.3 Princip fungování fotochromní molekuly [24]



Obrázek 5.4 Jak fungují fotochromatické čočky [25]

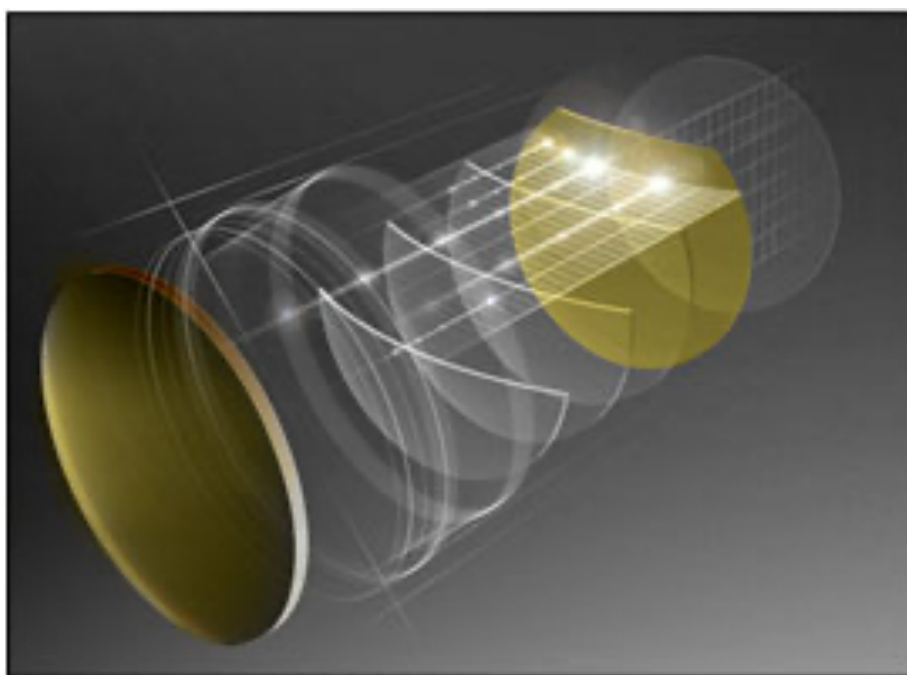
Jakmile je molekula vystavena UV záření, otevře se a rozprostře na povrchu čočky tak, že dočasně zaujme plochou konfiguraci, ve které je maximální posunutí elektronů. Tento stav

vytváří vysokou absorpci viditelného světla, které způsobuje ztmavnutí čočky. Pokud tato UV stimulace skončí, molekula se vrátí do původního čirého stavu. Plastové fotochromní čočky využívají několik typů molekul současně, jejichž kombinovaný efekt může v závislosti na jejich vlastnostech vytvořit šedé nebo hnědé odstíny. [6]

Na světlo reagující čočky mají biliony fotochromatických molekul, které neustále mění tvar na základě jejich vystavení světlu. Jakmile je čočka vystavena UV záření, fotochromní molekula se se přeskupí do jedné ploché roviny, což způsobí zabarvení čočky. Když je UV záření mimo dosah čočky, dojde k přeskupení molekul teplem a čočky se vrátí do čirého stavu. Jelikož molekuly mění svůj tvar, potřebují v matici spoustu prostoru, aby se mohly pohybovat. Ideálním případem by byla velmi měkká matice, aby se barviva mohla snadno pohybovat. [29]

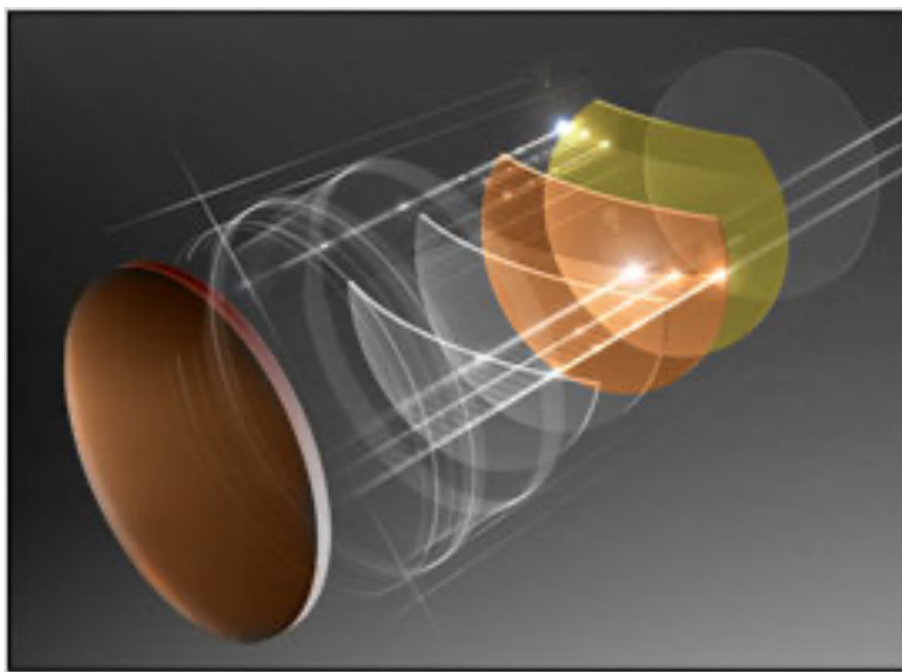
5.3.3 Princip fungování řídičských fotochromatických čoček

Brýlové čočky Transitions drivewear se vyznačují vysoce účinným polarizátorem, který je konstruován ve vysokém kontrastu a světlé barvě. Barva čočky byla vybrána a navržena tak, aby maximalizovala užitečné světlo dopadající na oko při slabém osvětlení nebo zatažených podmínkách. Tato polarizovaná fólie (Obr. 5.5) je aktivní za všech světelných podmínek, aby blokovala oslnující odlesky a zlepšila zrakovou ostrost.



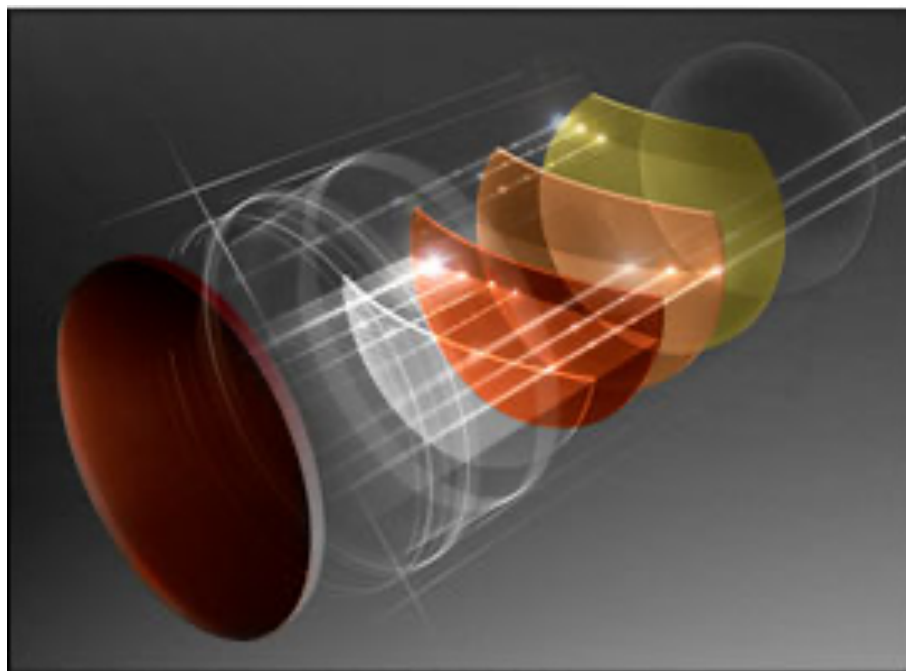
Obrázek 5.5 Drivewear ve světlé barvě [28]

Jedním z nejunikátnějších a zároveň nejzvláštnějších atributů těchto čoček je, že se jedná o jediné brýlové čočky, které se zabarví za předním sklem automobilu. Při vystavení viditelnému světlu (390-760 nm) čočka změní svoji barvu na měděnou (Obr. 5.6), aby odstranila přebytečné světlo a zajistila tak dobré rozpoznání dopravních signálů.



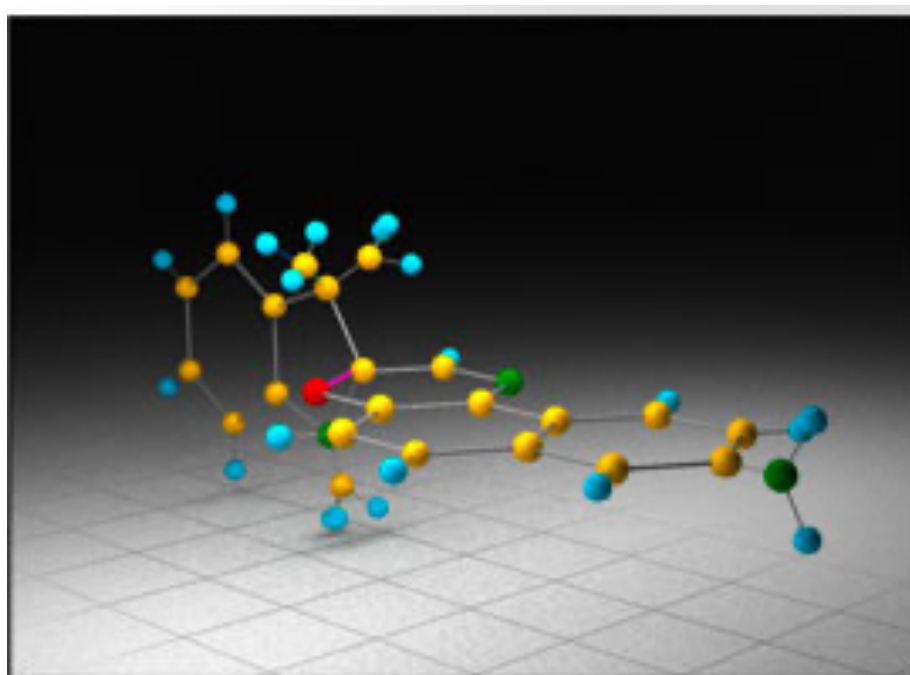
Obrázek 5.6 Drivewear v měděné barvě [28]

Venku se brýlové čočky aktivují pomocí UV záření a viditelným světlem, a změní svoji barvu do tmavě červenohnědé (Obr. 5.7). Tato barva byla navržena pro maximální filtraci přebytečného světla a pro zajištění maximální ochrany před jasným světlem a oslňujícími odlesky. Hnědá barva čočky poskytuje vynikající rozpoznání barev se zvláštním důrazem na zvýraznění zelené barvy z důvodu toho, že zelená barva je nejběžnější barvou v přírodní krajině.



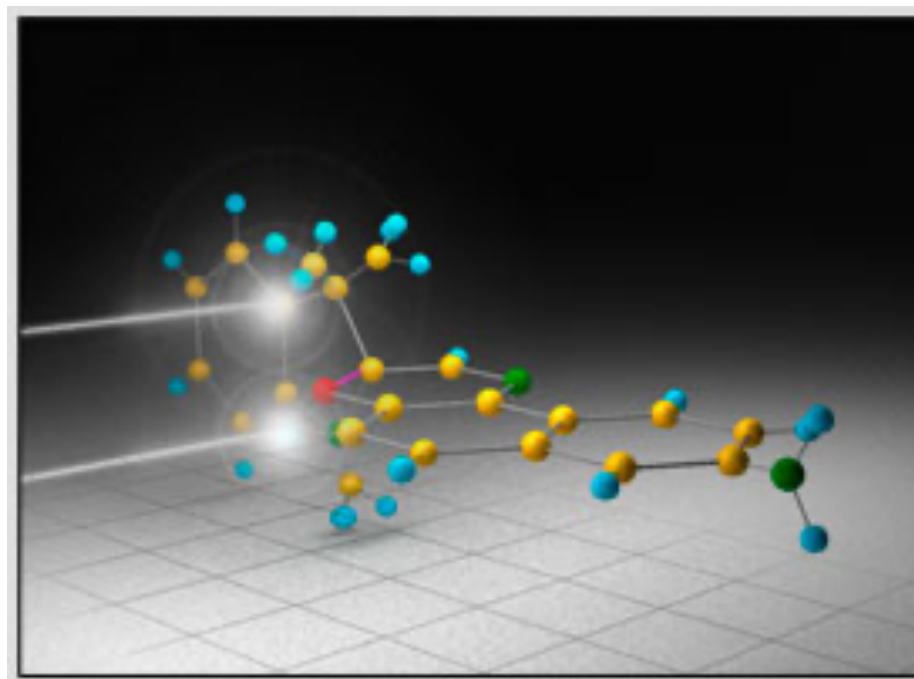
Obrázek 5.7 Drivewear v červenohnědé barvě [28]

Za špatných světelných podmínek, jako je zataženo, jsou fotochromatické molekuly brýlových čoček v neinicializovaném nebo „klidovém“ stavu (Obr. 5.8). V tomto stavu molekula umožňuje, aby veškeré světlo procházelo čočkou a zároveň blokuje 100 % UV A a UV B záření.



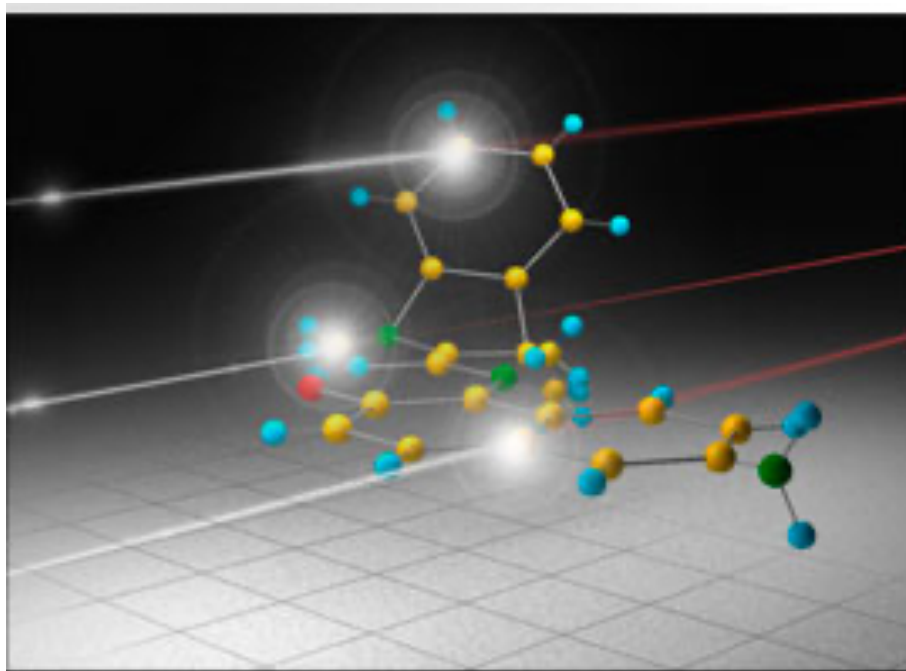
Obrázek 5.8 Fotochromatické molekuly v neinicializovaném stavu [28]

Jakmile je fotochromní molekula vystavena zdroji energie (slunečnímu světlu), dojde ke složité reakci, změně chemické vazby a tvaru molekuly (Obr. 5.9). Tato aktivace je iniciována nejen ultrafialovým (UV) světlem, ale také světlem viditelným.



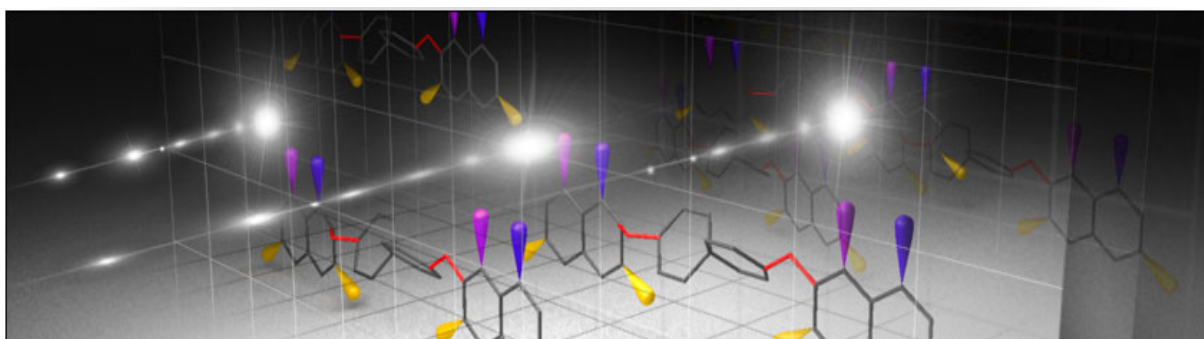
Obrázek 5.9 Fotochromní molekuly po vystavení slunečnímu světlu [28]

V plně aktivovaném stavu jsou fotochromní molekuly složeny do nových konfigurací (Obr. 6). Tyto konfigurace absorbují světlo účinněji než v klidovém stavu, a proto je čočka tmavá. Po odstranění zdroje energie se molekula vrátí do své původní polohy a čočky se zesvětlí. Tento proces je opakovatelný po celou dobu životnosti čočky.



Obrázek 5.10 Fotochromní molekuly po změně konfigurace [28]

Polarizované čočky jsou vytvořeny vložením integrálního spojení tenkého kousku polarizované fólie uvnitř čočky. Tenký film je obarven dichroickými materiály jako jsou krystaly jódu a speciální organické molekuly. Natažením filmu se tyto dichroické materiály vyrovnají ve stejném směru, aby vytvořili rovinu pro absorbování světla. Když jsou zasaženy jasným, oslepujícím oslněním, tyto zarovnané molekuly absorbují (blokuji) světlo v této preferované rovině a odfiltrují oslnění z užitečného světelného signálu. Tato absorpce a filtrace je znázorněna na Obr. 6.1.



Obrázek 5.11 Absorpce světla dichroických materiálů v rovině [28]

K účinné polarizaci (obvykle) dochází pouze tehdy, když je přítomno velké množství absorbérů, tedy když jsou čočky tmavé. [28]

6 Cíle práce

6.1 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je zjištění, jakou závislost má teplota na rychlost zbarvení a odbarvení fotochromatických brýlových čoček Transitions nové generace konkrétněji na Transitions Signature GEN 8.

Pro výzkum byly použity brýlové čočky od firmy Essilor s ceníkovým označením Smile Transitions GEN 8 o indexu lomu 1,5 a optické mohutnosti – 1,0 dioptrie a povrchovými úpravami HMC+.

6.2 Hypotézy

Před začátkem měření jsem si stanovil hypotézy, které jsem následně potvrdil nebo vyvrátil.

Hypotézy:

H_0 : Se vzrůstající teplotou se budou čočky Transitions Signature GEN 8 rychleji odbarvovat.

H_A : Vyšší teplota samozabarvovacích brýlových čoček nebude mít vliv na rychlost jejich zbarvení.

7 Experimentální část

Experimentální část této práce se bude zabývat výzkumem, jehož obsahem bude zahřívání, respektive ochlazování samozabarvovacích brýlových čoček na určité teploty. Po procesu zahřátí a ochlazení budou čočky vloženy pod UV lampu a po námi stanoveném časovém intervalu (10 sekund) budou vkládány pod spektrometr, který zjistí propustnost brýlové čočky při určité teplotě. Měření jsem prováděl na půdě Fakulty biomedicínského inženýrství v rámci ČVUT.

Nejprve jsme provedli testovací měření, abychom zjistili rychlost zabarvování (vyjádřenou transmisí), respektive odbarvování brýlových čoček za stálé okolní teploty (22,2 °C). Dalším testovacím měřením jsme zjišťovali, k jakým ztrátám teploty bude docházet vlivem ohřívání, respektive ochlazování brýlových čoček. V neposlední řadě byly čočky (v inaktivovaném stavu), podrobeny transmisí, abychom zjistili, jaká je jejich propustnost s antireflexními povrchovými úpravami.

Na základě provedených testovacích měření jsme vyhodnotili a stanovili, že brýlové čočky budou pod UV zářičem vystaveny UV záření po dobu deseti sekund. Tato hodnota byla vybrána jako maximální vzhledem k rychlosti zabarvování těchto čoček a vzhledem k velkým ztrátám teploty při delších časových intervalech.

Vstupní teplota měření byla 22 °C. Tuto teplotu jsme přijali jako výchozí i vzhledem k tomu, že se jedná o teplotu, kterou výrobce používá (21-23 °C) pro testování brýlových čoček. [31, 32]

Ochlazování, respektive zahřívání čočky bylo odstupňováno po 5 °C. Maximální (50 °C) a minimální (-6 °C) teploty budou brány jako extrémní vzhledem k poloze České republiky, respektive Evropy.

K zahřívání čoček jsme využili vzduchový inkubátor ICT 18 od výrobce FALC s teplotní stabilitou $\pm 0,5^\circ\text{C}$ a funkcí digitální regulace teploty. K ochlazování na požadovanou teplotu byla využita pevná forma oxidu uhličitého neboli suchý led. Pomocí Termometru TES 1320 typ K, ke kterému jsme měli připojenou teplotní sondu, jsme měřili námi požadovanou teplotu brýlových čoček. [33, 34]

K zjištění transmitance byl využit vláknový spektrometr S2000 od firmy Ocean Optics, Inc. Na detektor s rozsahem vlnové délky 200-900 nm dopadá světlo, které je přenášeno optickým vláknem. Přístroj DH-2000 slouží jako zdroj světla a umí volně kombinovat světlo z deuteriové

a halogenové lampy. Pro naše měření byla použita lampa halogenová. Tento přístroj je taktěž od firmy Ocean Optics, Inc. [35, 36]

Brýlové čočky byly vystavovány UV záření pomocí UV lampy Suntec Tester s výkonem UV lamp 2xTL6W a příkonem 0,07A.

7.1 Porovnání Transitions VI. - VIII. generace

Molekuly ve fotochromní technologii jsou aktivovány na základě UV záření. Nicméně teplota může ovlivňovat reakční dobu molekul. Jakmile jsou brýlové čočky ovlivněny chladem, molekuly se začnou pohybovat pomalu. To znamená, že bude trvat poněkud déle, než se čočky adaptují z tmavé na čirou. Na druhou stranu, když budou čočky ovlivněny teplem, molekuly zrychlí a stanou se více reaktivními. Výsledkem bude rychlejší odbarvení brýlových čoček. Zároveň pokud se s brýlovými čočkami budeme pohybovat během horkých slunečních dní, ale budeme ve stínu, tak budou rychleji detekovat UV záření a zesvětlí svoji barvu. Naopak, pokud budeme venku za slunečného dne, ale v chladném klimatu, a poté se přesuneme do stínu, tak se čočky budou přizpůsobovat pomaleji než za teplého klimatu. Stejná fotochromatická čočka tak bude v zimě na horách vypadat tmavší než v létě na pláži. [21]

U Transitions VI. generace se po 30 sekundách, vlivem aktivace zabarvení, sníží propustnost čočky přibližně na 30 % (udáváno při teplotě 35 °C). Po jedné minutě se sníží na 20 % a po dvou minutách na 15 %. Rozdílnost hraje i barevné zabarvení brýlové čočky, kdy s šedým odstínem vykazují brýlové čočky o něco větší schopnost ztmavení než hnědé. Slabší stránkou fotochromatických čoček bylo a bude rychlost odbarvení vzhledem k rychlosti zabarvení. Za 30 sekund dosáhne transmise 25 % a po 2 minutách 45 %. K tomu, aby se čočka vrátila po plně aktivovaném stavu k 70 % propustnosti, potřebuje čočka 7 a 9 minut pro hnědou, respektive šedou barvu čočky. Návrat do plně čirého stavu vyžaduje přibližně 20 až 25 minut. Fotochromatická brýlová čočka poskytuje v čirém stavu přibližně 90 % transmise, která se zvýší použitím antireflexních vrstev. V deaktivovaném stavu se tak fotochromní brýlová čočka ukáže jako dokonale čirá a s antireflexní úpravou ještě průhlednější než čirá čočka bez povrchové úpravy. Je dokázáno, že antireflexní vrstva zvyšuje fotochromní jev zvýšením intenzity světla, které proniká čočkou, a právě proto jsou tyto povrchové úpravy doporučovány právě pro tento typ čoček. [6]

Transitions VII. je v porovnání s VI. generací průlomovou, jelikož obsahuje inovativní technologii Chromea7TM (více v kapitole 5.1). Ve srovnání procentuálního zabarvení (při teplotě 27 °C) je Transitions Signature VII u šedého zabarvení o 15 %, respektive o 21 % u hnědého zabarvení venku tmavší než Transitions VI generace. Zároveň jsou tyto čočky méně závislé na teplotě než Transitions VI. Jsou stejně tak tmavé, když je teplo nebo když je chladno. Při podmínkách, kdy je částečně oblačno nebo zataženo, jsou čočky Signature VII průměrně o 3 % v šedém odstínu a průměrně o 9 % v hnědém odstínu zabarvenější než čočky VI. generace. Tyto průlomové čočky jsou o 20 % rychlejší v procesu odbarvování (nezávisle na barvě) a poskytují až 95 % transmisi s nejlepšími antireflexními povrchovými úpravami. [30]

Transitions Signature GEN 8 jsou oproti dvěma předchozím rychlejší v procesu odbarvování 1,3 krát (přibližně 35 %) u Signature VII., respektive 1,5 krát u Transitions VI. V porovnání s předchozí generací jsou čočky osmé generace o 30 % rychlejší v procesu zabarvení a přináší i větší ztmavení. Prvně se i dodavatel u čoček Transitions zmiňuje o blokaci tzv. modrého světla. Transitions osmé generace blokuje 20 % škodlivého modrého světla uvnitř a dokonce přes 87 % modrého světla venku. [29]

8 Výsledky práce

V následujících kapitolách, jednotlivých tabulkách a grafech budou uvedeny výsledky experimentální části. Hodnoty transmise u testovaných brýlových čoček budou vždy uváděny pro vlnovou délku o hodnotě 500 nm. Tato hodnota byla vybrána z důvodu, že čočka má nejvyšší hodnoty transmise (průměr 100,2 %) právě v této oblasti. Zároveň hodnoty kolem 500 nm odpovídající modrému světlu mají nejvyšší intenzitu energie než ostatní vlnové délky viditelného spektra. [37]

Experimentální část byla měřena na čočkách Transitions Signature GEN8 o indexu lomu 1,5 a s povrchovými úpravami HMC+ a tedy i veškeré výsledky budou vztahovány k těmto brýlovým čočkám.

Transmise po zahřátí a ochlazování brýlových čoček bude vyhodnocována po časovém intervalu deseti sekund. Tento časový interval byl vyhodnocen jako nejlepší, vzhledem k nízkým ztrátám tepla na základě provedených testovacích měření.

Před samotnými výsledky je ještě nutné zmínit, že v následujících kapitolách se budeme bavit o termínu zabarvení, který není technickým parametrem brýlové čočky, ale tento termín nám bude sloužit k lepšímu vyjádření aktuálního stavu dané brýlové čočky. Stupeň zabarvení zahrnuje optické veličiny reflexe a absorbance daného materiálu.

8.1 Výsledky transmise za stálé okolní teploty

V tabulkách 1, 2 a 3 jsou uvedeny výsledky transmise za stálé okolní teploty, které jsou doplněny grafy vycházejícími z těchto hodnot. Tabulka 1 je výchozí tabulkou, která nám ukazuje transmisivitu brýlové čočky v jejím neaktivovaném stavu (bez vystavení UV záření). Tabulka 2 ukazuje hodnoty transmisivity po určitých časových intervalech, kterým čočka byla vystavena UV záření. Výsledky jsou vztaženy k stále okolní teplotě, jejíž hodnota byla 22 °C.

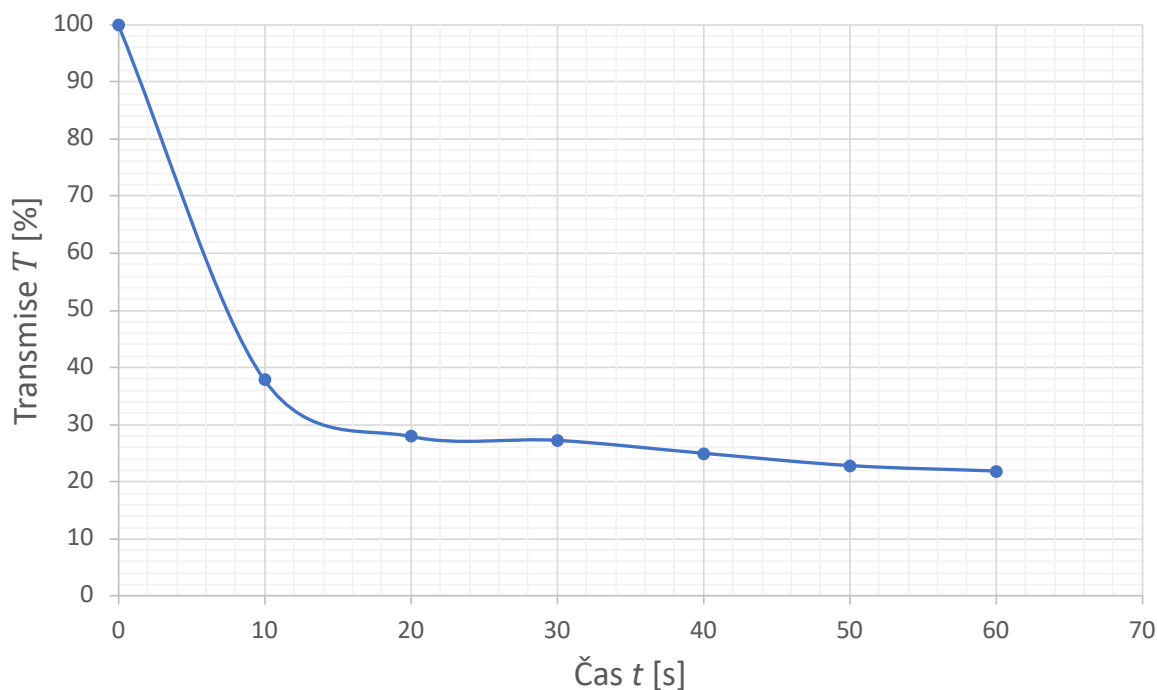
Tabulka 1: Transmise brýlových čoček v neaktivovaném stavu

Index lomů	Materiál	Povrchové úpravy	Maximální transmisivita T_{max} [%]	Vlnová délka v T_{max} [nm]	Transmisivita při 500 nm ²
1,5	CR-39	HMC+	104,9	707,8	100

Tabulka 2: Transmise brýlových čoček při procesu zabarvování za stálé okolní teploty

Transmise po 10 s [%]	Transmise po 20 s [%]	Transmise po 30 s [%]	Transmise po 40 s [%]	Transmise po 50 s [%]	Transmise po 60 s [%]
37,8	27,9	27,2	24,9	22,8	21,8

Graf číslo 1, vycházející z tabulek 1 a 2, nám ukazuje výsledky naměřených hodnot transmise po určitých časových intervalech, kdy brýlové čočky byly vystavovány UV záření (za stálé pracovní teploty). Můžeme vidět, že za prvních deset sekund se brýlová čočka aktivovala nejrychleji a dosáhla hodnot zabarvení přes 60 %. S postupujícím časem hodnoty transmise klesají a s nimi i rychlost zabarvování. Čočky vystavené UV záření po dobu 30 sekund byly zabarvené na více než 70 %. Po 60 sekundách se tyto hodnoty blíží k necelým 80 %.

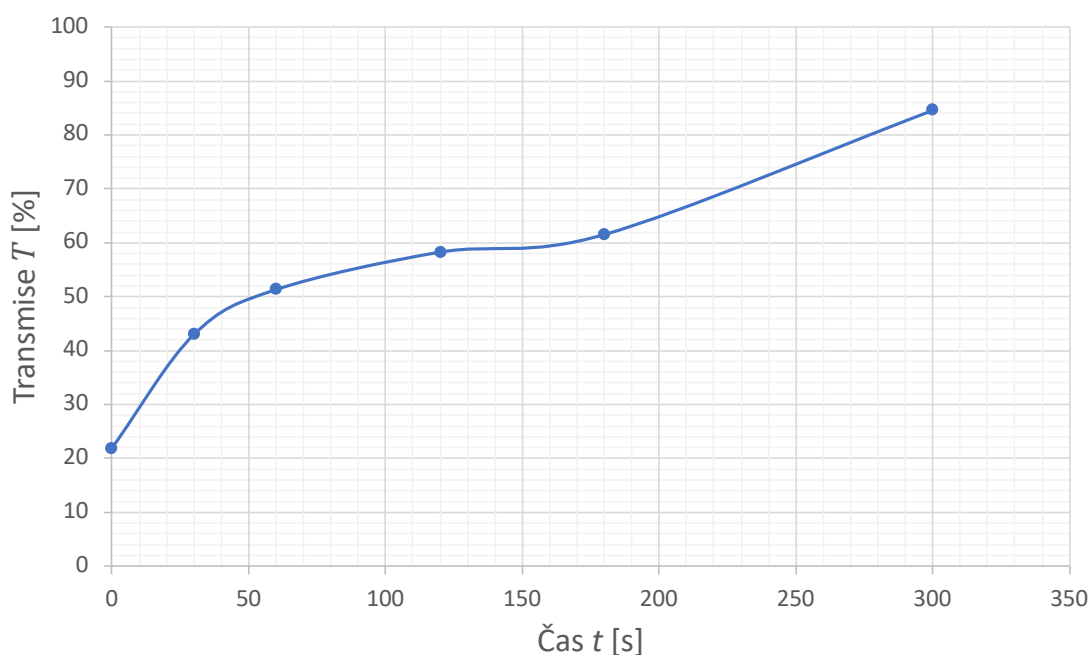


Graf 1: Transmise brýlových čoček po vystavení UV záření za stálé okolní teploty

Tabulka 3 nám naopak poskytuje hodnoty transmise, kdy se čočka po aktivovaném stavu vrací do stavu původního (opět za stále pracovní teploty). Tyto výsledky jsou zpracovány do grafu 2, jehož výchozí hodnotou (21,8 %) byla hodnota transmise po 60 sekundách z tabulky 2, tedy nejnižší naměřená transmise po vystavení čočky UV záření. Z grafu můžeme vyčíst, že již po prvních 30 sekundách se transmise brýlové čočky zvýšila na více než 40 %. Po dalších 30 sekundách neboli po jedné minutě se hodnota transmise zvýšila na více než 50 %. Transmise tedy stoupla o necelých 30 % po jedné minutě. Po dvou minutách je hodnota transmise více než 60 % a nárůst je o necelých 40 % z původní hodnoty. Po třech minutách se zvýšila transmise o 67 % a po 5 minutách dokonce dosahuje necelých 96 %, což více méně odpovídá čočce v jejím neaktivovaném stavu.

Tabulka 3: Procentuální transmise brýlových čoček při procesu odbarvování za stále okolní teploty

Transmise po 30 s [%]	Transmise po 60 s [%]	Transmise po 90 s [%]	Transmise po 120 s [%]	Transmise po 180 s [%]	Transmise po 240 s [%]	Transmise po 300 s [%]
42,9	51,3	58,2	61,5	84,6	89,1	95,9



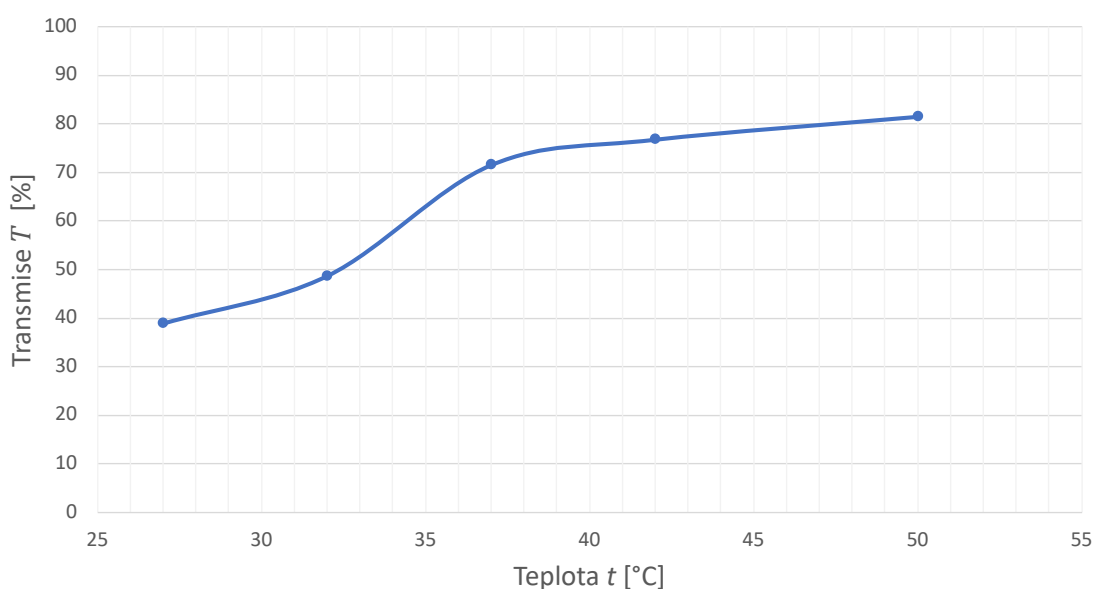
Graf 2: Transmise brýlových čoček při procesu odbarvování za stále okolní teploty

8.2 Výsledky transmise při zahřívání brýlových čoček

V průběhu měření byly brýlové čočky zahřívány na teploty: 27 °C, 32 °C, 37 °C, 42 °C a 50 °C. Po zahřátí na určitou teplotu byly vloženy pod UV zářič po stanovenou dobu deseti sekund a následně byly vloženy pod spektrometr k vyhodnocení transmise. Naměřené hodnoty transmise po zahřátí na výše zmíněné teploty představuje tabulka 4. Graficky jsou pak tyto výsledky zobrazeny v grafu 3, který nám ukazuje průběh transmise pro jednotlivé teploty. Nejnižší rozdíl transmise má teplota s hodnotou 27 °C, hodnota relativně blíží se okolní teplotě, a naopak nejvyšší nárůst transmise zaznamenala teplota s hodnotou 50 °C.

Tabulka 4: Transmise brýlových čoček po zahřátí a vystavení UV záření po dobu 10 sekund

Transmise při 27 °C [%]	Transmise při 32 °C [%]	Transmise při 37 °C [%]	Transmise při 42 °C [%]	Transmise při 50 °C [%]
38,9	48,7	71,5	76,8	81,5

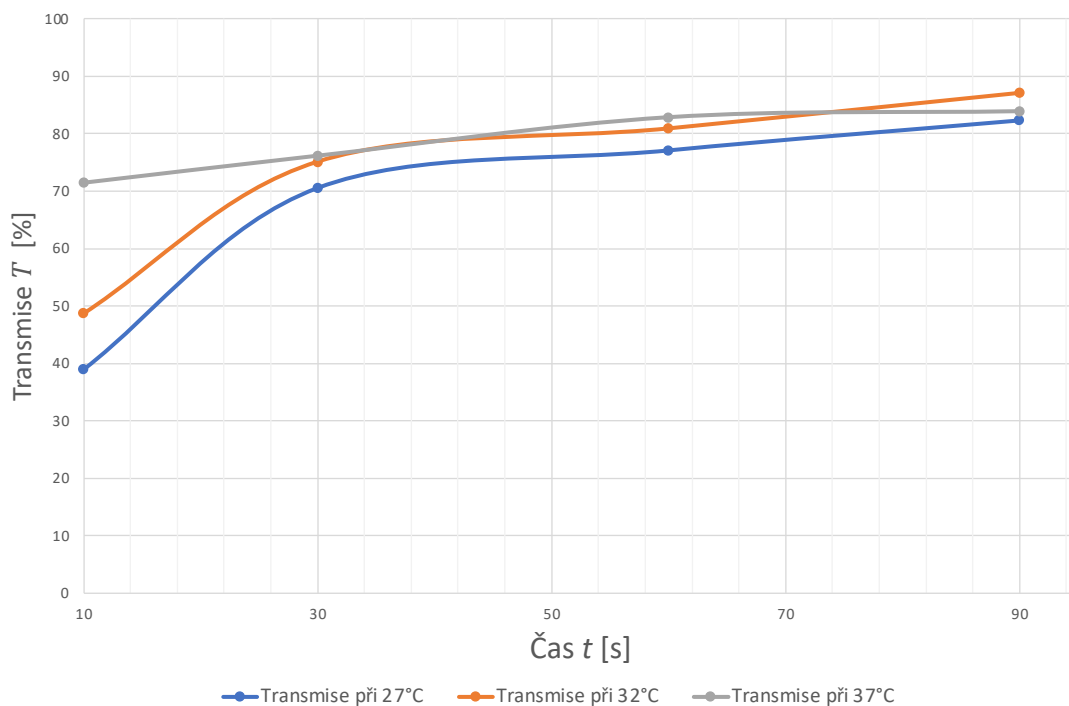


Graf 3: Transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu zabarvování

V tabulce číslo 5 jsou porovnávány hodnoty odbarvování brýlových čoček po 30, 60 a 90 sekundových intervalech pro jednotlivé teploty. Zároveň v grafu číslo 4 můžeme vidět průběh transmise v závislosti na čase pro jednotlivé teploty. Čočky s vyššími teplotami jak 40 °C nebyly do porovnávání zahrnuty z důvodu velkých ztrát tepla během měření. Výchozí hodnoty, z kterých bylo měřeno odbarvování brýlových čoček, jsou uvedeny v tabulce 4. Z níže uvedených výsledků můžeme vyčíst, že u teplot 27 °C a 32 °C je průběh transmise relativně podobný. I přes to čočka s teplotou 27 °C vykazuje o něco vyšší nárůst hodnot. Zatímco nejnižší nárůst vykazuje čočka s teplotou 37 °C. Nárůst těchto hodnot je v korelaci s původními hodnotami, z kterých tyto výsledky vycházejí.

Tabulka 5: Transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu odbarvování

Teplota	Transmise po 30 s [%]	Transmise po 60 s [%]	Transmise po 90 s [%]
27 °C	70,5	77,1	82,3
32 °C	75,1	80,9	87,1
37 °C	76,2	82,9	83,9



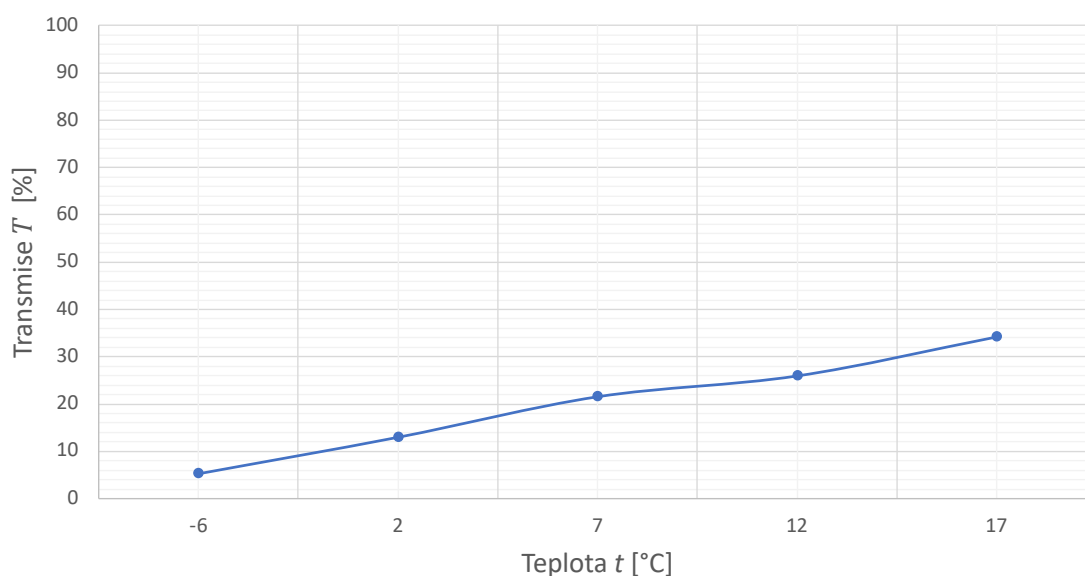
Graf 4: Průběh transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu odbarvování

8.3 Výsledky transmise při ochlazování brýlových čoček

V rámci měření byly nejprve brýlové čočky ochlazovány na teploty: 17 °C, 12 °C, 7 °C, 2 °C a -6 °C. Poté byly vloženy pod UV zářič po stanovenou dobu deseti sekund a následně byly vloženy pod spektrometr k vyhodnocení transmise. Graf 5 nám opět nabízí průběh transmise v závislosti na teplotě. Výchozí hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. Z výsledků můžeme vyčíst, že nejvyšší hodnoty transmise dosáhla brýlová čočka při 17 °C. Naopak nejnižší hodnoty transmise dosáhla čočka při -6 °C. Můžeme tedy říci, že čím nižší je teplota, tím nižší je i transmise a naopak.

Tabulka 6: Transmise po ochlazení brýlových čoček a vystavení UV záření po dobu 10 sekund

Transmise při 17 °C [%]	Transmise při 12 °C [%]	Transmise při 7 °C [%]	Transmise při 2 °C [%]	Transmise při -6 °C [%]
34,1	25,9	21,5	12,9	5,2

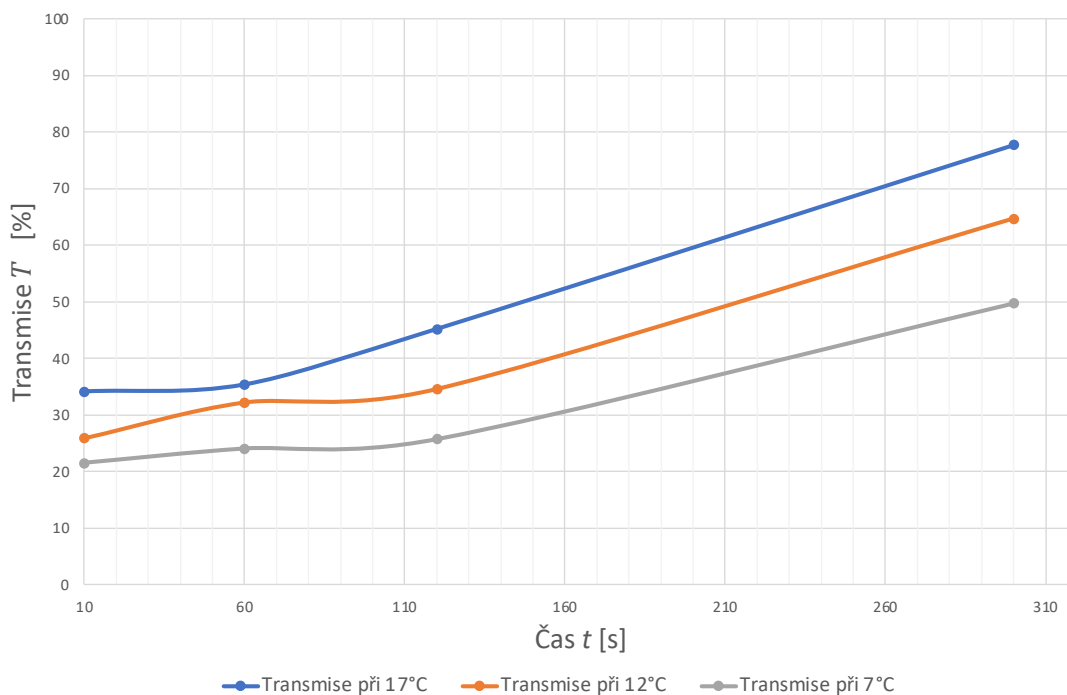


Graf 5: Průběh transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu zbarvování

Naopak tabulka 7 nám poskytuje hodnoty transmise při procesu odbarvování. Porovnávanými hodnotami budou výsledky transmise při procesu odbarvování po 60, 120 a 300 sekundách pro jednotlivé teploty. Do výsledků nebyly uvedeny hodnoty pro 2 °C a – 6 °C z důvodu velkých ztrát tepla během měření. Průběh transmise vychází z hodnot při procesu zabarvování, které najdeme v tabulce 6. V prvních 60 sekundách má nejvyšší nárůst hodnot transmise brýlové čočka s teplotou 12 °C, nejnižší naopak čočka s teplotou 17 °C. Porovnáme-li nárůst transmise mezi první a druhou minutou, tak nejvyšší nárůst zaznamenala čočka s teplotou 17 °C a nejnižší s teplotou 7 °C. Průběh transmise mezi 120 a 300 sekundami je pro všechny teploty relativně podobný.

Tabulka 7: Transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu odbarvení

Teplota	Transmise po 60 s [%]	Transmise po 120 s [%]	Transmise po 300 s [%]
17 °C	35,4	45,2	77,8
12 °C	32,2	34,6	64,7
7 °C	24,0	25,7	49,8



Graf 6: Průběh transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu odbarvování

9 Diskuze

Experimentální část této práce se zabývá transmisivitou samozabarvovacích brýlových čoček Transitions Signature GEN8, které jsme zahřívali a ochlazovali, abychom zjistili závislost teploty na jejich vlastnosti. Experimentu byly podrobeny čočky o indexu lomu 1,5, optické mohutnosti -1,0 dpt s povrchovými úpravami HMC+. Z výsledků uvedených níže se nám závislost podařila potvrdit. Výsledky jsou i určitým způsobem zkráceny, a to na základě ztrát tepla v průběhu měření.

Brýlové čočky Transitions Signature GEN8 nabízí již po 10 sekundách vystavení UV záření hodnotu transmise 37,8 % neboli přes 60 % zabarvení za okolní teploty 22 °C. Po jedné minutě se hodnota transmise sníží na 21,8 % a zabarvení se blíží necelým 80 %.

Zahřátím brýlových čoček na teploty 27 °C a 32 °C měla transmise lehce vzrůstající tendenci. Hodnoty transmise stoupaly k 40 %, respektive k 50 %. Nárůst transmise přes 70 % zaznamenalo ohřívání brýlových čoček na teploty 37 °C a vyšší. Alternativní hypotéza náš předpoklad, že vyšší teplota brýlových čoček nebude mít vliv na rychlost jejich zabarvení se nám nepotvrdila a na základě výsledků tedy můžeme říct, že je zde značný vliv teploty na rychlost zabarvení brýlových čoček. Se vzrůstající teplotou se brýlové čočky jeví v letním období ve stínu světlejší, což nám i potvrdily výsledky transmise při odbarvování brýlových čoček. Předpoklad, že se vzrůstající teplotou se budou brýlové čočky rychleji odbarvovat se nám potvrdil. Pro čočky GEN8 platí, že při odbarvování stoupne transmise za 30 sekund na hodnoty přes 70 % a po jedné minutě na hodnoty dokonce přes 80 %. Čím vyšší tedy byla jejich teplota, tím světlejší brýlové čočky byly.

Na druhou stranu, jakmile jsme čočky GEN8 ochladili na teplotu 17 °C, tak výsledek transmise byl o něco nižší oproti původní hodnotě. Snížení transmise na hodnoty 26 % a 21 % vyvolalo ochlazení brýlových čoček na teploty 12 °C a 7 °C. Následné ochlazení na teploty 2 °C a -6 °C vedlo ještě k většímu snížení transmise na hodnoty 13 % a 5 %. Výsledky odbarvování jasně ukazují na to, že pokud budeme za chladného podnebí s brýlovými čočkami ve stínu, tak jim bude trvat déle návrat do původního stavu. Výsledky transmise při odbarvování se pro jednotlivé teploty velice liší. Transmise necelých 50 % dosáhne za 2 minuty čočka s teplotou 17 °C, zatímco ty samé hodnoty bude vykazovat čočka s teplotou 7 °C po 5 minutách. V porovnání s předchozími výsledky jsou brýlové čočky se snižující se teplotou tmavší.

Porovnáme-li Transitions Signature GEN8 s generací Transitions VI v rychlosti aktivace, tak novější generace dosáhne o jednu třetinu rychlejšího zabarvení za časový interval 30 sekund při teplotě 35°C. Kde však nová generace těchto brýlových čoček vyčnívá, je v procesu odbarvování. Nárůst hodnot transmise byl po 30 sekundách i 2 minutách u nové generace o 10 %. [6]

Hodnoty transmise pro Transitions VII generace nám nejsou známy, proto je nemůžeme porovnat s našimi výsledky.

Pro další experimentální výzkumy tohoto typu bych doporučil snížit ztráty tepla na minimum. Tomu by teoreticky mohla sloužit klimatická komora s možností úpravy teploty podle potřeby. Vně této komory by se nacházel světelný zdroj, který by zajišťoval aktivaci brýlových čoček. Uvnitř komory by se nacházela uchycená brýlová čočka, jejíž transmise by byla měřena pomocí spektrometru, který by měření prováděl kontinuálně. Veškerá data by měla být zpracovávána a uchována v počítači s potřebným softwarem.

Následně bych doporučil porovnat brýlové čočky od různých výrobců mezi sebou. Výsledky transmise by měly být odlišné i vlivem použité technologie na výrobu těchto brýlových čoček. Musí však být dodrženy stejné klimatické podmínky pro testování jednotlivých brýlových čoček, aby mohlo dojít k jejich porovnání.

Závěr

Cílem práce bylo zjištění závislosti teploty na samozabarvovací brýlové čočky. Pro tento výzkum byly použity brýlové čočky Smile od firmy Essilor, o stejném indexu lomu a optické mohutnosti. Na základě testovacích měření jsme stanovili kritické body popsané v experimentální části, které byly stěžejní pro následná měření. Zkoumanou závislost jsme testovali ohříváním a ochlazováním brýlových čoček na námi stanovené teploty. Jakmile byly brýlové čočky zahřáty, respektive ochlazeny na určitou teplotu, tak byly vloženy pod UV zářič po stanovenou dobu 10 sekund. Po působení UV záření, které aktivovalo fotochromní molekuly, jsme vložili brýlové čočky pod spektrometr a změřili jejich transmissi. Výsledky ukazují na to, že se zvyšující se teplotou transmise brýlových čoček stoupá, a naopak se snižující se teplotou jejich transmise klesá. Závislost teploty na brýlové čočky Transitions Signature GEN8 se nám podařilo potvrdit a cíl práce byl tedy splněn.

Na základě výzkumu i osobní několikaleté praxe bych výrobcům samozabarvovacích brýlových čoček do budoucna doporučil hledání dalších možností, jak zlepšit funkci jejich odbarvování, která je stále Achillovou patou tohoto výrobku, a tím tak zlepšit komfort a praktické využití u koncového nositele. S přihlédnutím na dnešní technologické možnosti by výhledově nositel samozabarvovacích brýlových čoček mohl mít možnost volby v rámci daného produktu, jestli bude mít variantu čirou nebo zabarvenou. Věřím, že s touto možností by produkt samozabarvovacích brýlových čoček mohl lépe konkurovat dalším produktům na trhu jako jsou například brýle s magnetickým klipem.

Seznam použité literatury

- [1] MIKŠ, Antonín. *Aplikovaná optika*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-0104-254-0
- [2] MALÝ, Petr. *Optika*. 2020. Praha: Karolinum. ISBN 978-80-246-2246-0
- [3] MALACARA, Daniel a Zacarias MALACARA. *Handbook of Optical Design*. 2nd. New York: Headquarters, 2004. ISBN 0-8247-4613-9.
- [4] JEXO VÁ, Soňa. *Geometrická optika*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2010. ISBN 978-80-7013-521-1.
- [5] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. Čtvrté. Praha: Prometheus, 2008. ISBN 978-80-7196-307-3.
- [6] MESLIN, Dominique. *Ophthalmic Optics Files: Materials & Treatments*. Paris: Essilor Academy Europe, 2010. ISBN 979-10-90678-11-8.
- [7] NAJMAN, Ladislav. *Dílenská praxe očního optika: Druhy brýlových obrub a čoček*. Druhé. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2010. ISBN 978-80-7013-529-7.
- [8] VESELÝ, Petr, Peter ŠIMOVIČ a Sylvie PETROVÁ. *Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček*. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2014. ISBN 978-80-7013-566-2.
- [9] NAJMAN, Ladislav. *Česká oční optika: Základy brýlové optiky* [online]. 2010. Brno: EXPO DATA spol., 2010. (03/2010), 36-42. ISSN 1211-233X.
- [10] *Ophthalmic optic files: Coatings*. 04/97. Paris, 1997.
- [11] BAŠTECKÝ, Richard. *Praktická brýlová optika*. Praha: R+H Optik, 1997
- [12] ŠIMOVIČ, Peter. *Česká oční optika: Antireflexné úpravy a kontrola kvality* [online]. Brno: EXPO DATA spol., 2012, 53 (04/2012), 46-49. ISSN 1211-233X.
- [13] KRISHNAN, Sureka a Sureshbabu SUNDARARAJAN. *Self-cleaning glass*. In: ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. *Anti-Abrasive Nanocoatings - Current and future applications*. Woodhead publishing, 2015. ISBN 978-0-85709-217-5.

- [14] JALIE, Mo. *Ophthalmic lenses and dispensing*. 3rd edition. Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978 0 7506 8894 9.
- [15] CRANO, John, T. FLOOD, D. KNOWLES, A. KUMAR a B. VAN GEMERT. *Photochromic compounds: Chemistry and application in ophthalmic lenses. Pure and Applied Chemistry* [online]. 2009, [cit. 2023-02-07]. 1996, 81(7), 1367-1371. ISSN 1365-3075. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac199668071395/html>
- [16] *Photochromic lenses: A brief look at their history, how they work, and the various manufacturing technologies* [online]. 2016 [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: https://www.visionease.com/wp-content/uploads/2016/09/ChangeRxWhitePaper211_pagebypage.pdf
- [17] *25 years of ColorMatic lenses*. Opticianonline [online]. 2011. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.opticianonline.net/features/25-years-of-colormatic-lenses>
- [18] *History of Transitions Optical*. In: Encyklopedia.com. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.abdo.org.uk/wp-content/uploads/2019/09/History-of-Transitions-Optical.pdf>
- [19] MEYERS, Robert A. *Encyclopedia of Physical Science and Technology: Photochromic glasses* [online]. 3rd. California, 2001. [cit. 2023-02-17]. ISBN 978-0-12-227410-7. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/photochromic-glass>
- [20] GUENTHER, Robert D. *Encyclopedia of Modern Optics: Photochromic Glass* [online]. [cit. 2023-02-17]. Durham: Elsevier, 2005. ISBN 978-0-12-369395-2. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/photochromic-glass>
- [21] *Photochromic technology: How do photochromics work?* [online]. 2023 [cit. 2023-03-01]. Dostupné také z: <https://www.transitions.com/en-us/why-transitions/the-technology/photochromic-tech/>
- [22] *Transitions signature VII* [online]. [cit. 2023-03-04]. Transitions Optical, 2015. Dostupné z: <https://global.transitions.com/Signature7/CZ/default.htm>

- [23] *Transitions Signature VII adaptive lenses: Frequently asked questions* [online]. Transitions Optical, 2015. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: https://www.icoatcompany.com/wpcontent/uploads/2015/12/Transitions_Signature_VI_I_Frequently_Asked_Questions.pdf
- [24] *The science behind photochromatic lenses: What makes plastic photochromic lenses work?* [online]. 2017 [cit. 2023-03-05]. Dostupné také z: <https://www.spectrum-anz.com/science-behind-photochromic-lenses/>
- [25] HEINZ, Roman. *Prezentace: Transitions – Chraňte oči vašich zákazníků: Transitions GEN8*. 2021.
- [26] *History of photochromic lenses* [online]. 2010 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.visio-rx.com/vision-topics/history/history-of-photochromic-lenses>
- [27] *Xtractive polarized: The only and best ever photochromatic polarized lenses* [online]. Transitions Optical, 2021. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://trade.transitions.com/resources/public/10723/TransitionsXTRActivePolarizedWhitePaper.pdf>
- [28] *Transitions drivewear engine* [online]. Transitions Optical, 2006. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.drivewearlens.com/engine.php?changelang=1&lang=cz>
- [29] *Transitions signature GEN8* [online]. Transitions Optical, 2019. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://trade.transitions.com/resources/public/10625/GEN8_WhitePaper.pdf
- [30] *Life360 performance: Transitions Signature VII* [online]. Transitions Optical, 2013. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: https://global.transitions.com/TransitionsCanadaPro/Education/Transitions%20Signature/Life360_TechNotes_CAN_English.pdf
- [31] *Transitions Signature GEN8* [online]. Transitions Optical, 2023. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://trade.transitions.com/gen8>
- [32] *Transitions XTRActive new generation* [online]. Transitions Optical, 2023. Dostupné z: <https://www.transitions.com/en-us/products/transitions-xtractive/>
- [33] *Inkubátor ICT | FALC* [online]. 2023. [cit. 2023-04-16]. Dostupné také z: <https://www.p-lab.cz/inkubator-ict-falc>

- [34] *Dvoukanalový termočlánekový teploměr TES 1320* [online]. 2003. [cit. 2023-04-16]. Dostupné také z: <https://www.hotair.cz/detail/merici-pristroje/teplomery-a-sondy/dvoukanalovy-termoclankovy-teplomer-tes-1320.html>
- [35] *Operating manual and users guide: S2000 miniature fiber optic spectrometers and accessories* [online]. Ocean Optics, 2005. [cit. 2023-04-16]. Dostupné také z: https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Ocean%20Optics/S2000_Operating_Manual.pdf
- [36] *DH-2000-BAL Light Source* [online]. 2003. [cit. 2023-04-16]. Dostupné také z: <https://www.oceaninsight.com/products/light-sources/uv-vis-nir-light-sources/dh-2000-bal/?qty=1>
- [37] BAILLET, Gilles a Berangere GRANGER. *How Transitions lenses filter harmful blue light*. Point de Vue: International review of ophthalmic optics [online]. 2016. [cit. 2023-04-16]. Rozsah stran 4-5. Dostupné z: <https://www.pointsdevue.com/article/how-transitionsr-lenses-filter-harmful-blue-light#tab1>

Seznam zkratek

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
<i>UV</i>	Ultrafialové záření
<i>nm</i>	Nanometr
<i>CR39</i>	Columbia Resin, 39: pořadí vyrobené formuly
<i>CR307</i>	Columbia Resin, 307: pořadí vyrobené formuly
<i>PMMA</i>	Polymethylmethakrylát
<i>PC</i>	Polykarbonát
<i>AR</i>	Antireflex (antireflexní vrstva)
<i>PVD</i>	Physical vapor deposition
<i>LP-CVD</i>	Low pressure chemical vapor deposition
<i>PECVD</i>	Plasma-enhanced chemical vapor deposition

Seznam symbolů

<i>Zkratka</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
λ	nm	vlnová délka
c	m/s	rychlost světla
f	Hz	frekvence světla
v	m/s	rychlost světla určité vlnové délky
n	bezrozměrná veličina	index lomu
α'		úhel dopadu
α		úhel odrazu
ε'		úhel lomu
ε		úhel dopadu
R	%	odrazivost
A_d	%	absorpce světla
T	%	propustnost
I'	lux	intenzita světla procházejícího rozhraním
I	lux	intenzita světla dopadajícího na rozhraní

Seznam obrázků a grafů

Obrázek 4.1 Dip coating [10]	20
Obrázek 4.2 Spin coating [10]	21
Obrázek 5.1 Halogenid stříbra před zabarvením [19]	38
Obrázek 5.2 Halogenid stříbra po zabarvení [19]	38
Obrázek 5.3 Princip fungování fotochromní molekuly [24]	39
Obrázek 5.4 Jak fungují fotochromatické čočky [25]	39
Obrázek 5.5 Drivewear ve světlé barvě [28]	40
Obrázek 5.6 Drivewear v měděné barvě [28]	41
Obrázek 5.7 Drivewear v červenohnědé barvě [28]	42
Obrázek 5.8 Fotochromatické molekuly v neinicializovaném stavu [28]	42
Obrázek 5.9 Fotochromní molekuly po vystavení slunečnímu světlu [28]	43
Obrázek 5.10 Fotochromní molekuly po změně konfigurace [28]	44
Obrázek 5.11 Absorpce světla dichroických materiálů v rovině [28]	44
Graf 1: Transmise brýlových čoček po vystavení UV záření za stálé okolní teploty	50
Graf 2: Transmise brýlových čoček při procesu odbarvování za stálé okolní teploty	51
Graf 3: Transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu zabarvování	52
Graf 4: Průběh transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu odbarvování	53
Graf 5: Průběh transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu zabarvování	54
Graf 6: Průběh transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu odbarvování	55

Seznam tabulek

Tabulka 1: Transmise brýlových čoček v neaktivovaném stavu.....	50
Tabulka 2: Transmise brýlových čoček při procesu zabarvování za stálé okolní teploty.....	50
Tabulka 3: Procentuální transmise brýlových čoček při procesu odbarvování za stálé okolní teploty.....	51
Tabulka 4: Transmise brýlových čoček po zahřátí a vystavení UV záření po dobu 10 sekund	52
Tabulka 5: Transmise po zahřátí brýlových čoček při procesu odbarvování.....	53
Tabulka 6: Transmise po ochlazení brýlových čoček a vystavení UV záření po dobu 10 sekund	54
Tabulka 7: Transmise po ochlazení brýlových čoček při procesu odbarvení	55