

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**ALENA
BUSTOVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů

Analýza brýlových čoček s modifikovaným povrchem

Analysis of spectacle lenses with modified surface

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Alena Bustová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Písařík, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jan Mikšovský, Ph.D



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bustová** Jméno: **Alena** Osobní číslo: **495663**
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:

Analýza brýlových čoček s modifikovaným povrchem

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of spectacle lenses with modified surface

Pokyny pro vypracování:

V rámci práce student provede rešerši používaných materiálů pro výrobu brýlových čoček a jejich povrchových úprav (jako např. antireflexní vrstvy, UV vrstvy, vrstvy zvyšující odolnost a trvanlivost). Popíše jejich základní parametry a zhodnotí jejich výhody a nevýhody. Student popíše metody jejich přípravy. V praktické části student změří parametry nově připravených povrchových úprav brýlových čoček. Naměřená data zpracuje a vyhodnotí.

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] 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
- [3] MOHAMMED, J., Modern spectacle lens design, Clinical and Experimental Optometry, ročník 103, číslo 1, 2020, pp. 3-10 s., DOI: 10.1111/cxo.12930

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Písařík, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Jan Mikšovský, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2023**

prof. RNDr. MUDr. Petr Maršálek, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Název bakalářské práce: Analýza brýlových čoček s modifikovaným povrchem**Abstrakt:**

Tato bakalářská práce se zabývá povrchovými úpravami brýlových čoček a materiály používanými k jejich výrobě. Zaměřuje se na tvrdící, antireflexní, absorpční, reflexní a samočistící vrstvy a na fototropní a polarizační čočky, způsob jejich přípravy, vlastnosti a praktické použití. Praktická část bakalářské práce je zaměřena na spektrální propustnost absorpčně a reflexně upravených brýlových čoček. Další část experimentu se zaměřuje na propustnost diamantu-podobných uhlíkových vrstev, které by v budoucnu mohly být využité právě jako povrchové úpravy brýlových čoček.

Klíčová slova:

Brýlová čočka, povrchové úpravy, materiály brýlových čoček, absorpční vrstva, reflexní úprava

Bachelor's thesis title: Analysis of spectacle lenses with modified surface**Abstract:**

This bachelor's thesis deals with the surface treatments of lenses and the materials used to produce them. It focuses on hardening, anti-reflective, absorptive, reflective and self-cleaning coatings and on phototropic and polarising lenses, their preparation, properties and practical applications. The practical part is focused on spectral transmittance of absorption treated and reflective spectacle lenses. Other part of the experiment focuses on transmittance of diamond-like carbon layers, which could be used as lens coatings in the future.

Key words:

Spectacle lens, surface treatments, lens materials, absorption treated lenses, reflective lenses

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Ing. Petrovi Písaříkovi, Ph.D. za vedení mé práce, za trpělivost a cenné připomínky.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Analýza brýlových čoček s modifikovaným povrchem*“ vypracovala samostatně a použila 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	6
2	Základní vlastnosti.....	7
2.1	Index lomu	7
2.2	Disperze	7
2.2.1	Abbeovo číslo	8
2.3	Odrazivost.....	8
2.4	Absorpce	9
2.5	Propustnost.....	10
2.6	Polarizace.....	11
2.7	Specifická hmotnost a relativní hustota	12
2.8	Smáčivost povrchu.....	12
2.8.1	Kontaktní úhel	12
3	Materiály.....	14
3.1	Minerální materiály.....	14
3.1.1	Sklo.....	14
3.2	Organické materiály.....	15
3.2.1	CR-39	15
3.2.2	Polykarbonát.....	15
3.2.3	Polymethylmethakrylát.....	16
3.2.4	Trivex	16
3.3	Vysokoindexové materiály	16
4	Povrchové úpravy	18
4.1	Tvrzení	18
4.1.1	Tvrzení minerálních čoček	19
4.1.2	Tvrzení organických čoček.....	19
4.2	Antireflexní vrstva	21
4.2.1	Nanášení antireflexní vrstvy	23
4.3	Absorpční vrstva (barvení)	25
4.3.1	Barvení minerálních čoček	25
4.3.2	Barvení organických čoček	26
4.4	Samočistící vrstvy.....	29
4.4.1	Hydrofobní a hydrofilní vrstva.....	29

4.4.2	Protizamlžovací vrstva	30
4.4.3	Antistatická vrstva	31
4.5	Fototropní čočky	31
4.5.1	Minerální fototropní čočky	32
4.5.2	Organické fototropní čočky	33
4.6	Polarizační čočky	34
4.7	Reflexní vrstva	35
5	Uhlíkové vrstvy a DLC vrstvy	37
5.1	Pulzní laserová depozice	38
6	Experimentální část	39
6.1	Spektrometr	39
6.2	Testované brýlové čočky	40
6.2.1	Barvené brýlové čočky	41
6.2.2	Čočky s reflexní úpravou	49
6.3	DLC vrstvy	53
7	Diskuse	57
8	Závěr	60
	Seznam použité literatury	62
	Seznam symbolů a zkratk	67
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	70

1 Úvod

Pro člověka je zrak nejdůležitějším smyslovým orgánem – díky němu přijímáme až 80 % podnětů z okolí. Zrakové ústrojí nám umožňuje vnímat dění okolo nás, barvy, tvary, světlo nebo tmu a napomáhá nám s orientací v prostoru. Přibližně polovina populace má nějakou refrakční vadu, která se v dnešní době dá řešit pomocí široké palety korekčních pomůcek (brýle, kontaktní čočky) nebo refrakční operace. Brýle jsou sice jednou ze starších metod korekce zraku, jsou však stále jednou z nejdostupnějších a nejoblíbenějších korekčních pomůcek. Brýle i brýlové čočky si prošly postupem času značným rozvojem. Skleněné brýlové čočky byly nahrazeny lehčími a tenčími organickými materiály, které díky různým povrchovým úpravám umožňují nositeli brýlí pohodlí. Povrchové úpravy brýlových čoček, kromě ochrany a zlepšení zraku, mají navíc důležitou roli ve zlepšení optických a mechanických vlastností.

V této práci se zaměřuji na povrchové úpravy brýlových čoček. V první kapitole popisují základní fyzikální veličiny a vlastnosti brýlových čoček, které jsou důležité pro výrobu a hodnocení BČ. Další kapitola pojednává o materiálech pro výrobu čoček a jejich výhodách a nevýhodách. Třetí kapitola je zaměřena na povrchové úpravy brýlových čoček a jejich nanášení. Mezi popisované úpravy patří tvrzení, antireflexní vrstva, barvení čoček, samočisticí vrstvy a reflexní úprava. Dále popisují fototropní a polarizační materiály.

Experimentální část je zaměřena na propustnost absorpčně a reflexně upravených brýlových čoček a diamantu-podobných uhlíkových vrstev. Cílem experimentu bylo porovnat spektrální propustnost zbarvených a zrcadlových čoček, které se běžně používají jako ochrana proti slunečnímu záření a DLC vrstev, které by se v budoucnu mohly využít právě jako povrchová úprava slunečních brýlových čoček (DLC vrstvy mají vysokou oteřuvzdornost a tvrdost). Naměřené hodnoty budou porovnány a vyhodnoceny v kapitole Experimentální část.

2 Základní vlastnosti

Tato kapitola se zabývá optickými veličinami a vlastnostmi materiálů brylových čoček. Mezi tyto vlastnosti řadíme index lomu, Abbeovo číslo, disperzi, reflektanci, absorbanci, transmitanci atd. Uvedené veličiny charakterizují daný materiál nebo prostředí a popisují, jak se v něm šíří světlo.

2.1 Index lomu

Index lomu je materiálová konstanta udávající, v jaké míře bude daný materiál ohýbat nebo lámat světlo. Čím je index lomu vyšší, tím nižší je rychlost světla a tím více se světlo láme při vstupu. Index lomu n lze také vyjádřit poměrem rychlosti šíření světla ve vakuu c a rychlosti světla daného prostředí v . [1, 2, 3]

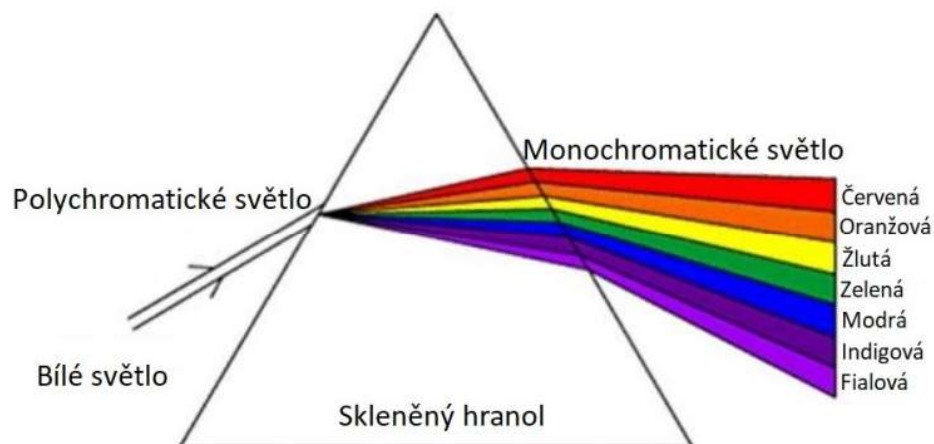
$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Většina materiálů pro výrobu brylových čoček má index lomu v rozsahu od 1,5 do 2. [1]

2.2 Disperze

Polychromatické, neboli bílé světlo je záření o různých vlnových délkách, přičemž každá vlnová délka odpovídá konkrétní barvě. Světlo při vstupu do hranolu se ohýbá směrem k bázi. Na obrázku 1 lze vidět, že delší vlnové délky (červené) se ohýbají pod menším úhlem, než kratší vlnové délky (fialové). Jelikož spojka se dá zobrazit jako dva optické hranoly bází k sobě a rozptylka jako dva optické hranoly bází od sebe, světlo procházející čočkou bude mít tendenci se rozdělit do příslušných barev. Tomuto jevu se také říká chromatická aberace a je charakterizována Abbeovým číslem. [4]

Disperze, označována také jako chromatická aberace, je závislost indexu lomu prostředí na vlnové délce optického záření. Důsledkem přítomnosti chromatické aberace je rozmazání obrazu a přítomnost barevného závoje na periferii zorného pole čočky. [1]



Obrázek 1: Disperze na optickém hranolu. [13]

2.2.1 Abbeovo číslo

Jedna z dalších důležitých vlastností materiálů brýlových čoček je Abbeovo číslo. Hodnota Abbeova čísla je nepřímo úměrná chromatické aberaci, která vznikne při průchodu světla čočkou. Jinak řečeno, čím vyšší je Abbeovo číslo, tím nižší je chromatická aberace. Obecně můžeme říct, že s rostoucím indexem lomu materiálu čočky roste chromatické aberace a zároveň klesá hodnota Abbeova čísla. Optimální Abbeovo číslo brýlových čoček v oční optice je více než 30. [4, 5]

Hodnotu Abbeova čísla můžeme vypočítat podle vzorce 2:

$$v = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2)$$

kde n_D , n_F a n_C jsou hodnoty indexů lomu měřené na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým spektrálními čarám d ($\lambda_d = 587,56$ nm), C ($\lambda_C = 656,28$ nm) a F ($\lambda_F = 486,13$ nm). [1]

2.3 Odrazivost

Odrazivost neboli reflektance, je veličina popisující míru schopnosti materiálu odrazet optické záření. Reflektanci R můžeme vypočítat podle vzorce 3 jako podíl výkonu P_t optického záření odraženého od tělesa a výkonu P_0 záření dopadajícího na těleso. [6]

$$R = \frac{P_t}{P_0} \quad (3)$$

Reflektance R závisí na látkových vlastnostech materiálu a na vlastnostech dopadajícího záření (frekvence, volný vektor, polarizace a úhel dopadu θ). [6]

Odraz je jev, který můžeme pozorovat při dopadu optického záření procházejícího určitým optickým prostředím na rozhraní materiálu s jiným prostředím. Tento jev vede k vytvoření záření, které se šíří prvním prostředím směrem od rozhraní. Podmínkou tohoto jevu je průzračnost prvního prostředí. [6]

Odrazivost je závislá na indexu lomu čočky n , na indexu absorpce k , na úhlu dopadu a na polarizaci světla. Obecný vzorec pro odrazivost brýlové čočky pod kolmým dopadem světla ve vzduchu je: [3, 7]

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (4)$$

S rostoucím indexem lomu roste i podíl odraženého světla od povrchu. K eliminování nežádoucích odrazů se na čočku aplikují antireflexní vrstvy. [8]

2.4 Absorpce

Absorpce je jev, který vzniká, když je frekvence dopadajícího světla stejná (v rezonanci) s excitační frekvencí atomu nebo molekuly. V uvedeném případě bude paprsek záření během postupu do prostředí zeslaben, resp. absorbován. Za zbarvení optických materiálů je zodpovědná selektivní absorpce. Příkladem selektivní absorpce je červený rubín, který absorbuje modré a zelené záření, ale ne červené. [9]

Absorpce souvisí s disperzí. Monochromatické světlo o vlnové délce λ dopadá na rozhraní dvou optických prostředí, kde část tohoto záření se odrazí a zbytek záření o intenzitě I_0 pronikne do druhého prostředí. Pokud se intenzita I_0 při průchodu prostředím nezmění, pak nazýváme toto prostředí průhledným či propustným. Naopak při změně intenzity I_0 hovoříme o absorpci záření. Absorpce souvisí s tloušťkou prostředí. [6]

Pro malé hodnoty intenzit monochromatického záření platí Lambertův zákon, který slouží pro výpočet intenzity I prošlého záření prostředím a je závislý na absorpční konstantě α prostředí, intenzitě záření I_0 vnikající do prostředí, tloušťce prostředí l . [6]

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l} \quad (5)$$

2.5 Propustnost

Transmitance neboli propustnost, je veličina charakterizující schopnost tělesa propouštět optické záření. Propustnost T je definována podle vzorce 6 jako poměr výkonu P_{tr} vystupujícího z tělesa a výkonu P_0 záření dopadajícího na těleso. Propustnost je závislá na vlastnostech optického záření a na geometrických a materiálových parametrech. [3]

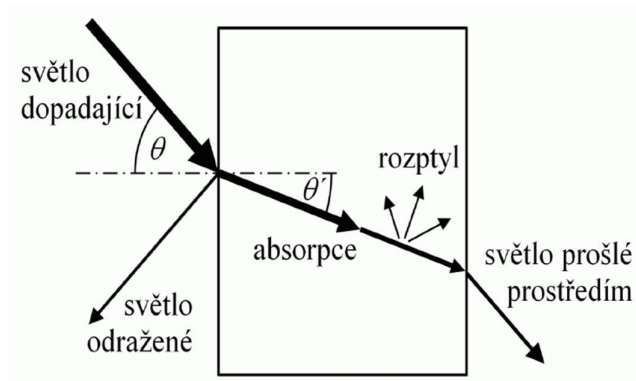
$$T = \frac{P_{tr}}{P_0} \quad (6)$$

Transmise souvisí s absorpcí, protože pouze neabsorbované světlo může být propuštěno prostředím. V případě, kdy nedochází k absorpci nebo rozptylu, součet reflektance R a transmitance T bude roven jedné. [9]

$$R + T = 1 \quad (7)$$

V opačném případě, část dopadajícího světla na prostředí bude odražena, část projde skrz a část světla bude absorbována materiálem čočky (obrázek 2). Jestliže je intenzita záření reprezentována číslem 1, odrazivostí R , absorpcí A a propustností T můžeme intenzitu záření vyjádřit pomocí vzorce 8: [8]

$$R + A + T = 1 \quad (8)$$



Obrázek 2: Světlo procházející látkou. [3]

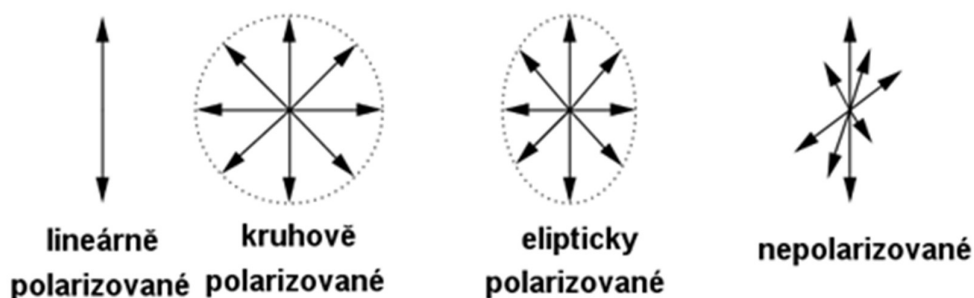
2.6 Polarizace

Světlo lze pochopit jako elektromagnetické vlnění popsané vektorem elektrické intenzity E a vektorem magnetické indukce B . Vektor elektrické intenzity je kolmý na směr, kterým se vlnění šíří a směr kmitání vektoru magnetické indukce je kolmý jak na směr šíření vlnění, tak na vektor intenzity. Právě vektor elektrického pole udává, jestli je světlo polarizované, resp. nepolarizované. [3]

Pokud má vektor E v dané rovině nahodilý směr a intenzitu, mluvíme o nepolarizovaném světle. Příkladem nepolarizovaného světla je přirozené světlo (Slunce, žárovka). Polarizované světlo získáme omezením směru kmitání vektoru E (resp. B). Polarizované světlo můžeme dělit na lineární (vektor E kmitá v jednom určitém směru) a na kruhovou polarizaci. Nepolarizované světlo lze přeměnit na polarizované odrazem, lomem nebo absorpcí. [3, 29]

Dopadne-li přirozené světlo (při šikmém dopadu) na rozhraní mezi vzduchem (nebo na prostředí o indexu lomu n_2) a materiálem s indexem lomu n_1 , je část paprsku látkou pohlcena a druhá část odražena. Pokud je úhel dopadu shodný s Brewsterovým úhlem θ_B , potom je odražené světlo polarizováno v rovině kolmé k rovině dopadu. V tomto případě hovoříme o lineární polarizaci. Brewsterův úhel můžeme vypočítat pomocí vzorce 9: [3]

$$\theta_B = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (9)$$



Obrázek 3: Polarizace světla. [29]

2.7 Specifická hmotnost a relativní hustota

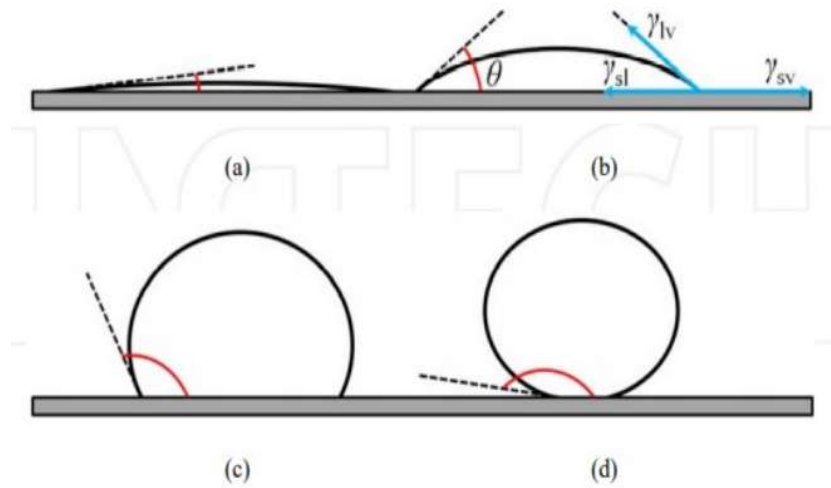
Specifická hmotnost je bezrozměrná veličina, která se vypočítá poměrem hustoty materiálu k hustotě vody při 4 °C. Relativní hustota je hmotnost na jednotku objemu. Jednotka relativní hustoty je g/cm^3 . Čočka s nízkou specifickou hmotností bude lehčí než ta samá čočka o stejných rozměrech s vysokou specifickou hmotností. Tato vlastnost se se využívá při navrhování čoček, jelikož pro nositele brýlí jsou pohodlnější lehčí čočky. [10, 11]

2.8 Smáčivost povrchu

Další z vlastností určující kvalitu brýlové čočky je její smáčivost. Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných látek. Stanovení smáčivosti je založeno na měření povrchového kontaktního úhlu. Smáčivost je závislá na drsnosti povrchu a na jeho chemickém složení. Změny těchto parametrů mohou ovlivnit hodnoty kontaktního úhlu, a tudíž i smáčivosti. [12]

2.8.1 Kontaktní úhel

Kontaktní úhel θ je parametr určující tvar kapky přivedené do kontaktu s povrchem (obrázek 4). Tvar kapky se projevuje povrchovou energií, která je závislá, jak již bylo řečeno dříve, na chemické struktuře a drsnosti povrchu. Je-li kontaktní úhel vody na povrchu větší než 90°, nazývá se povrch hydrofobní, je-li menší než 90°, nazývá se hydrofilní. Nízký kontaktní úhel ukazuje vysokou míru smáčivosti, a naopak vysoká hodnota kontaktního úhlu značí slabou smáčivost. [14, 15]



Obrázek 4: Kontaktní úhel. a) skoro úplná smáčivost ($\theta \approx 0^\circ$) b) dobrá smáčivost ($\theta < 90^\circ$) c) špatná smáčivost ($\theta > 90^\circ$) d) téměř nesmáčivý povrch ($\theta \approx 180^\circ$) [12]

3 Materiály

Brýlové čočky mohou být vyrobeny z různých minerálních (sklo) nebo organických (plasty) materiálů. Tyto materiály musí splňovat několik požadavků, aby byly vhodné pro výrobu brýlových čoček. Mezi tyto požadavky patří transparentnost pro všechny vlnové délky viditelného spektra, bezvadnost, homogenita, chemická a fyzikální stabilita, odolnost, a lehkost. Ideální brýlová čočka by měla mít vysoký index lomu a nízkou disperzi. [16]

Dnes se k výrobě brýlových čoček nejčastěji používá sklo, dále tzv. vysokoindex, CR-39, polykarbonát (PC), a polymethylmethakrylát (PMMA).

3.1 Minerální materiály

Minerální materiály jsou známy jako anorganické materiály. Mezi minerální materiály řadíme sklo korunové (draselnovápenaté) a flintové (draselnoolovnaté) sklo. [17]

3.1.1 Sklo

Až do 70. let 20. století bylo sklo nejpoužívanějším materiálem pro výrobu brýlových čoček. Sklo poskytuje vynikající optickou kvalitu a má nejodolnější povrch proti poškrábání. Má však několik omezení – vysokou hmotnost, větší tloušťku a nízkou odolnost proti nárazu. [10]

Vlastnosti materiálu skla závisí na jeho složení. Například korunové sklo je tvořeno 71,5 % oxidu křemičitého (SiO_2), 14 % NaO_2 , který pochází z uhličitanu sodného (Na_2CO_3), 13 % vápna (CaO) a malým množstvím oxidu hlinitého (Al_2O_3). Každá uvedená sloučenina podporuje různé vlastnosti skla. NaO_2 snižuje bod tání, zatímco vápno zlepšuje chemickou odolnost a oxid hlinitý dodává sklu odolnost. Další hojně rozšířené aditivum ve sklářském průmyslu je oxid boritý, který také snižuje bod tání a viskozitu. Za zmínku stojí také oxid olovnatý, který zvyšuje index lomu skla. [1]

Korunové sklo je optické sklo s relativně nízkým indexem lomu (1,45 až 1,68) a s relativně vysokým Abbeovým číslem (50 až 70), tzn. s nízkou disperzí. Opačné optické vlastnosti má flintové sklo, tedy relativně vysoký index lomu (1,54 až 1,8), nízké Abbeovo číslo (21 až 46) a vysokou disperzi. Byly snahy vytvořit sklo s vysokým indexem lomu a nízkou disperzí. Koncem 19. století se to podařilo objevem skla s příměsí oxidu barnatého. [1, 6]

3.2 Organické materiály

Spolu s minerálními materiály se pro výrobu brýlových čoček používají organické materiály (plasty). Plasty můžeme dále dělit na termosety a termoplasty. [16]

Termoplast je plast, který při zahřívání měkne a při ochlazení opět tuhne. Termoplasty jsou složeny z vláknitých makromolekul, které leží přes sebe jako vlákna plsti. Mezi termoplasty řadíme polykarbonát (PC), polyvinylchlorid (PVC) nebo polystyren (PS). Nejčastější výrobní proces pro výrobu čoček termoplastu se nazývá vstřikování. [16, 19]

Termosety ve vytvrzeném stavu nelze ani změkčit, ani roztavit, a to i při silnějším zahřátí. Skládají se z makromolekul vytvořených polykondenzací různých monomerů, které mají prostorově zesíťovaný tvar. Termosety lze vrtat, frézovat řezat a pilovat. Termosety se nejběžněji vyrábí litím. Většina termosetových čoček jsou vyráběny z allylových esterů. [16, 19]

3.2.1 CR-39

Tento materiál byl poprvé vyroben v roce 1939 v USA pro vojenské účely pod názvem Columbia Resin. Díky výborným optickým i mechanickým vlastnostem se začal později v 50. letech 20. století využívat pro výrobu brýlových čoček. Jedná se o speciální čirou pryskyřičnou plastickou hmotu ze skupiny allylových esterů – allyldiglykolkarbonátu. [11]

I přes to, že CR-39 poskytuje výborné optické vlastnosti, Columbia Resin je více náchylný k poškrábání a často musí být povrchově upravený za účelem vytvrzení a snížení odrazivosti. Další výhodou je odolnost proti nárazu a nízká hustota ($1,32 \text{ g/cm}^3$). Index lomu CR-39 se pohybuje okolo 1,5 a s Abbeovým číslem 36. [4, 11]

Polykarbonátové čočky a většina plastových čoček s vysokým indexem mají zabudovanou 100% ochranu proti UV záření, ale čočky CR-39 potřebují k tomu speciální povrchovou úpravu. CR-39 sám o sobě absorbuje UV záření do 380 nm, dodatečná úprava zajišťuje absorpci UV záření až do 400 nm. UV-absorbér je u čoček z CR-39 implementován dodatečně při barvení. Všechny měřené čočky absorbují záření do cca 345 nm, z toho plyne, že malou část UV záření (nejméně škodlivé UVA) čočky propouštějí. [21, 40, 41]

3.2.2 Polykarbonát

Na rozdíl od CR-39 je polykarbonát (PC) termoplastická hmotu s mnohem měkčím a houževnatějším charakterem. Polykarbonátová brýlová čočka je vhodnou volbou pro riziková

zaměstnání, sportovce nebo děti, jelikož je velmi lehká, tenká a odolná vůči nárazu. Další výhodou je UV ochrana a až o 30 % tenčí profil, než ostatní skla nebo plastové čočky. Nevýhody zahrnují vysokou chromatickou aberaci způsobena nízkým Abbeovým číslem a náchylnost vůči poškrábání, která vyžaduje speciální povrchovou úpravu. [10, 11, 16]

Oproti sklu nebo CR-39 má polykarbonát mnoho výhod, mezi které se řadí například nízká hmotnost. Další výhodou je vysoký index lomu, který činí 1,586, oproti korunovému sklu (1,523) nebo CR-39 (1,498). Díky uvedeným vlastnostem bude polykarbonátová čočka výrazně lehčí a tenčí než čočky o stejné velikosti a optické mohutnosti vyrobené ze skla nebo CR-39. [20]

3.2.3 Polymethylmethakrylát

Polymethylmethakrylát (PMMA) je termoplast vynalezený ve 20. letech 20. století v Německu. PMMA je dobře opracovatelný, průhledný materiál s nízkou měrnou hmotností a indexem lomu 1,49. Nevýhodou PMMA je malá odolnost proti oděru. V současnosti se PMMA pro výrobu brýlových čoček nepoužívá. [21, 22]

3.2.4 Trivex

Trivex je polyuretanový polymer s částečně zesíťovanou strukturou, který má nejlepší vlastnosti z termoplastů i termosetů. Ve srovnání s polykarbonátem, trivex má nižší index lomu (1,53) a vyšší Abbeovo číslo (45), tudíž nižší disperzi. Tento materiál poskytuje výbornou odolnost proti nárazu, nízkou hmotnost, minimální chromatickou aberaci, lepší optické vlastnosti než polykarbonát, 100% UV ochranu, odolnost proti působení chemikálií a zároveň je dobře barvitelný. Nevýhodou může být náchylnost k poškrábání, která je řešitelná správnou povrchovou úpravou. Díky nízké hmotnosti a tenkému profilu je trivex vhodný pro brýlové čočky do ± 3 D. [4, 8, 10, 21]

Existují i různé modifikace trivexu. Nejznámější z nich je Hivex, směs trivexu a vysokoindexového materiálu brýlových čoček. Index lomu hivexu je 1,57 s Abbeovým číslem 46. [21]

3.3 Vysokoindexové materiály

Vysokoindexové materiály jsou definovány indexem lomu vyšším než 1,6 a mohou být jak plastové, tak minerální. Brýlové čočky vyrobené z tohoto materiálu jsou, oproti ostatním materiálům, mnohem tenčí a lehčí ale zároveň mají stejný účinek ohybu světla. Sklo sice

poskytuje lepší odolnost vůči otěru než polymery, každopádně je mnohem těžší. I když lze skleněnou čočku vyrobit s vyšším indexem lomu než čočky plastové, výsledná skleněná čočka bude hodně ztenčená a tím pádem mnohem více křehká. Na úkor vyššího indexu lomu bude mít výsledná čočka nižší Abbeovo číslo, resp. vyšší disperzi. [10, 16, 23]

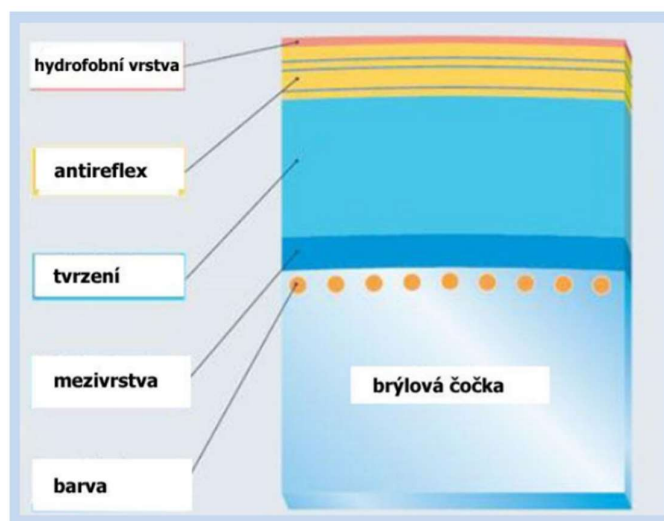
Aby se zvýšil index lomu skleněných čoček, přidával se v minulosti do složení skla oxid olovnatý. Tímto způsobem vzniklo křemenné sklo. Dnes se, za účelem zvýšení indexu lomu skleněných skel, nahrazuje oxid olovnatý za oxidy titanu, čímž dosáhneme vysokého indexu a zároveň snížené hustoty skla. Pro úpravu optických vlastností se do příměsí přidávají i některé další prvky, jako je niob, zirkonium nebo stroncium. [8]

Vysoký index lomu organických materiálů zajišťuje látka thiourethan, který obsahuje převážně síru. Materiály obsahující thiourethan se dají dobře vrtat a drážkovat. Episulfidy jsou také látky přidávány pro zvýšení indexu lomu. Episulfidy umožňují vytvořit větší hustotu sírových atomů v látce a to umožňuje vyrobit materiál s indexem lomu vyšším než 1,74. Nevýhodou těchto materiálů je horší tepelná odolnost, větší náchylnost ke zlomení a hůře se také barví. Obecně můžeme říct, že čím větší obsah síry je v materiálu BČ, tím vyšší bude index lomu. [21]

4 Povrchové úpravy

Kromě barvení můžeme na povrch čoček nanést určité povlaky, které zlepšují mechanické nebo optické vlastnosti brýlových čoček. Každá taková nanesená vrstva se chová jako zakřivené zrcadlo, které odráží část dopadajícího světla. Tyto nechtěné obrazy nazýváme parazitní. Zatímco velikost a jasnost parazitních obrazů se mění se silou čočky, intenzita nechtěných obrazů roste se zvyšujícím se indexem lomu. Příkladem povrchových úprav může být antireflexní vrstva, která minimalizuje odrazy na povrchu čočky, nebo poškrábání vzdorné vrstvy zvyšující odolnost brýlových čoček. [16]

U plastových čoček jdou povrchové vrstvy následovně podle obrázku 5.



Obrázek 5: Systém povrchových úprav na plastové čočce. [21]

4.1 Tvrzení

Mezi nejčastější problémy nositelů brýlových čoček je poškození nebo poškrábání o různé předměty nebo prachové částice. Tento problém se týká jak skleněných, tak plastových materiálů, i když jsou skleněné čočky považovány za odolnější proti poškrábání než čočky plastové. Poškrábané brýlové čočky působí kosmeticky rušivě a mohou ovlivnit kvalitu vidění. V dnešní době většina brýlových čoček mají povrchovou úpravu proti poškrábání, včetně vysokoindexových čoček nebo čoček vyrobených z polykarbonátu nebo Trivexu. Tvrdicí vrstva se nanáší jak na přední, tak i zadní plochu brýlové čočky. [24, 25]

4.1.1 Tvrzení minerálních čoček

Tvrzené sklo by mělo podle Evropské normy (BS EN ISO 14889) z roku 1997 vydržet účinek v průměru 22 mm velké kovové kuličky působící na čočku silou 100 N (10 kg) po dobu 10 s. Minerální čočky můžeme tvrdit dvěma způsoby – tepelným tvrzením a chemickým tvrzením. [21]

Při tvrzení teplem se čočka zahřívá na teplotu 650 °C a následně je prudce ochlazena vzduchem. Doba zahřívání je závislá na tloušťce čočky a trvá od 50 do 200 s. Povrch čočky se během několika sekund ochladí, vnitřní část čočky však zůstává teplá. Materiál tak získá vnitřní napětí a tím i lepší mechanické vlastnosti. Zároveň má povrch čočky rozdílný index lomu oproti jádru čočky. Je důležité dávat pozor na tloušťku čočky (zejména u vysokoindexových a astigmatických), protože vysokou teplotou může dojít k destrukci materiálu. [21, 26]

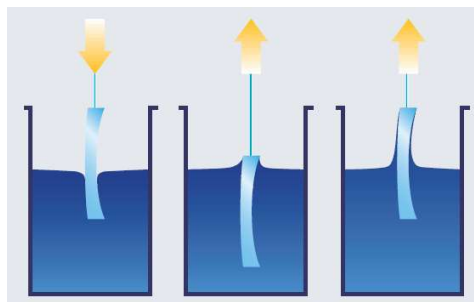
Chemické tvrzení je proces ohřívání čočky v lázni s kyselinou křemičitou, dusičnanem draselným a dusičnanem sodným při teplotě 400 °C po dobu 16 hodin. Principem chemického tvrzení je náhrada některých sodných iontů ionty dusičitými. Draslíkové ionty nahradí ionty sodíku, které vyvolají smrštění materiálu. Při chemickém tvrzení je menší riziko deformace. Nevýhodou je dlouhá doba trvání tvrzení. [21]

4.1.2 Tvrzení organických čoček

Plastové brýlové čočky nejsou tak odolné, jako čočky minerální a jsou více náchylné k poškrábání nebo jiné mechanické deformaci. Abychom snížili riziko poškození, můžeme čočky tvrdit. Organické čočky nelze tvrdit stejným způsobem, jako minerální, jelikož tak vysokou teplotou by čočky zežloutly. Možností tvrdit plastové BČ je více – tvrzení ponořením do tvrdícího laku (dip coating), tvrzení rotačním nanášením tvrdícího laku (spin coating), tvrzení ve formě (in-mold coating), vakuové tvrzení (PVD, LP-CVD, PECVD). [21, 22, 24]

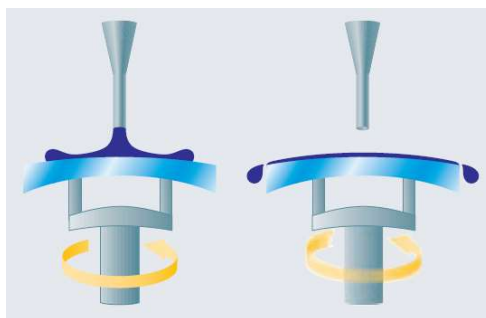
Prvním zmíněným tvrdícím způsobem je ponoření do tvrdícího laku. Dokonale očištěnou čočku z ultrazvukového přístroje ponoříme do tvrdícího laku. Na vysokoindexové materiály se ještě před ponořením do laku nanáší vrstva tzv. primeru (složený převážně z destilované vody), který zajistí lepší adhezi tvrdící směsi na BČ. Tloušťka vrstvy laku je závislá na viskozitě tvrdícího roztoku a rychlosti vytahování čočky z něj – čím rychleji se čočka vytáhne z laku, tím silnější bude tvrzená vrstva. Poté následuje proces polymerizace při teplotě 100 až 120 °C po dobu dvou až tří hodin. Tloušťka tvrdící vrstvy je kolem 1,5 až 2 μm. Čím vyšší bude vrstva tvrdícího laku, tím lepší bude povrchová odolnost čočky proti poškrábáním. Index lomu tvrdícího

roztoku by měl být podobný materiálu brýlové čočky (tzv. index matching proces). Důvodem index matchingu je eliminace nerovnosti povrchu čočky. Lak obsahuje silikonový monomer a titanový dioxid, většinou se ještě ředí na požadovanou hustotu methanolem a T-butylalkoholem. Laky mohou být barvitelné nebo nebarvitelné, vhodnější jsou však laky nebarvitelné, kvůli své větší tvrdosti. Dip coating metoda (obrázek 6) je nejnáročnější metoda ze všech metod tvrzení. Místnost musí být klimatizována a mít konstantní teplotu a vlhkost vzduchu. [21]



Obrázek 6: Dip coating. [21]

Druhá nejpoužívanější metoda tvrzení organických čoček je rotační nanášení tvrdícího laku (spin coating) znázorněná na obrázku 7. Očištěná BČ methanolem a izopropylalkoholem je upnuta na rotující zařízení, které umožňuje kontrolovat rotaci. Do středu čočky je aplikován proud laku, který se rotací rozprostře po celé ploše čočky. Při rotačním nanášení se používá lak o indexu lomu 1,5. Poté se čočka nechá zpolymerizovat UV zářením po dobu několika minut. Celkové zalakování jedné strany čočky trvá cca 5 minut. Výsledná tloušťka tvrdící vrstvy je přibližně 3 až 5 mikronů. I když je vrstva silnější než u dip coating metody, vrstva je méně odolná proti poškrábání. Důvodem je fakt, že lak u spin coating metody je měkčí než u dip coating procesu. Výhodou je možnost budoucího barvení brýlových čoček. Metoda svou rychlostí a jednoduchostí je vhodná pro malovýrobu. [21]



Obrázek 7: Spin coating. [21]

Tvrzení ve formě (in-mold coating) se provádí přímo ve formě při formování čočky. Do zahřáté formy vložíme silikonový vak, který obsahuje roztok aktivovaného termosetu s iniciátorem a mechanickou solí (tvrdící lak na bázi akrylátu). Pomocí zvýšeného tlaku uvnitř silikonového vaku (5 až 20 PSI na 1,5 až 5 minut) vytvoří tenká vrstva laku naléhající na vnitřní stranu formy. Následně vstříkneme termoplastickou hmotu, která zformuje výslednou brýlovou čočku. Výhodou je dobrá adheze tvrzené vrstvy k základnímu materiálu. Nevýhoda je, že tyto čočky nelze dodatečně barvit. [21]

K základním metodám vakuového tvrzení patří PVD (physical vapor deposition), LP-CVD (low pressure chemical vapor deposition) nebo PECVD (plasma-enhanced CVD). Jedná se o nanášení tenké vrstvy, většinou atomů křemíku, na povrch brýlové čočky. U PVD metody se nanášené atomy odpařují z pevného povrchu zdrojového materiálu. CVD metoda je založena na principu chemické evaporace základního materiálu, který je rozkládán chemicky nebo teplem. K lepšímu nanášení pomáhá reakce nanášených atomů s atomy plynů kyslíku, dusíku nebo oxidu křemíku. Tvrdost tvrdící vrstvy u CVD metody je možné regulovat přívodem plynu. U PE-CVD se obvykle nanáší hexamethyldisiloxan (HMDS) nebo tetraethylorthosilikát (TEOS). Výhodou technologie PE-CVD je možnost používat na jedné výrobní lince proces tvrzení s procesem antireflexu. [21]

4.2 Antireflexní vrstva

Normální čočkou se při průchodu každou plochou asi 4 % světla odrazí. Z toho můžeme usoudit, že kolem 92 % světla dosáhne do oka. Antireflexní vrstva je tenká vrstva eliminující nechtěné odrazy a odlesky odrážející se od přední a zadní plochy čočky. Tato povrchová úprava také snižuje odlesky okolo světelných zdrojů a zlepšuje transmisi světla čočkou na 99 %. Díváme-li se na nositele brýlí, jehož brýlové čočky nemají antireflexní úpravu, všimneme si, že odrazy a odlesky světla nám skoro neumožní vidět jeho oči. Právě antireflexní vrstva tomuto efektu zabraňuje. Antireflexní vrstvou jsou dnes upravovány skoro všechny druhy materiálů brýlových čoček, zejména pak polykarbonátové, vysokoindexové a asférické čočky, které odrážejí více světla než ostatní čočky. [24, 25, 27]

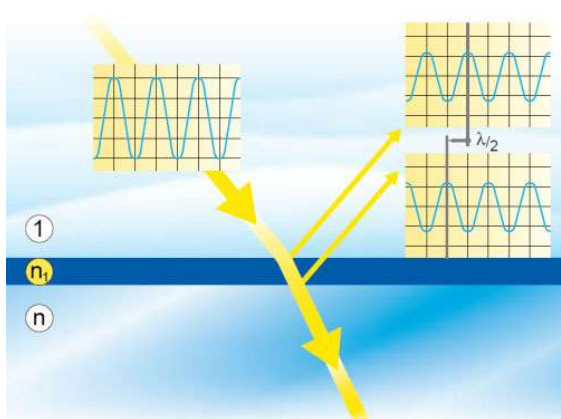
AR vrstvy eliminují vznik parazitních paprsků na přední i zadní ploše čočky s využitím tzv. destruktivní interference. Antireflex je tenká vrstva o jasně definované tloušťce d . Aby se mohly dvě světelné vlny eliminovat, musí být splněna fázová podmínka, to znamená, že vlny musí být posunuty o polovinu své vlnové délky λ . Zároveň musí platit i amplitudová podmínka, kdy velikost obou amplitud musí být stejná. Princip antireflexní vrstvy je zobrazen

na obrázku 8. Výpočet indexu lomu antireflexní vrstvy je roven druhé odmocnině indexu lomu brýlové čočky (vzorec 10). Tloušťka vrstvy se vypočítá podle vzorce 11 a je závislá na vlnové délce λ (optimalizované na 550 nm) a na indexu lomu vrstvy. [21]

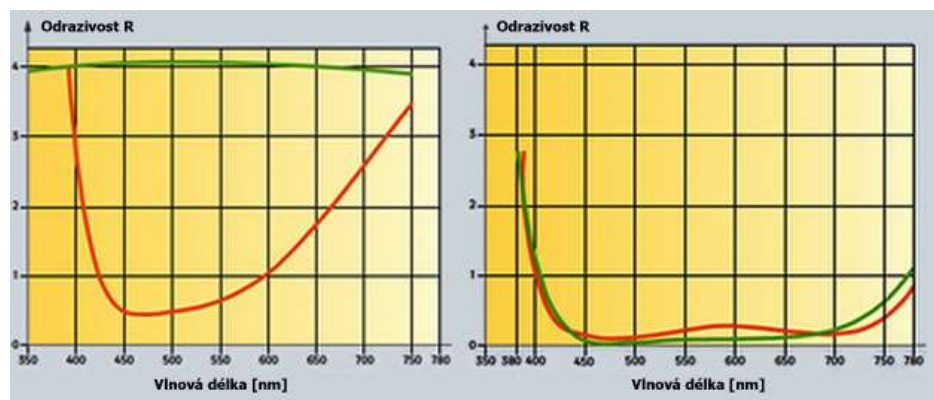
$$n_{vrstvy} = \sqrt{n_{\text{čočky}}} \quad (10)$$

$$d = \frac{\lambda}{4n_{vrstvy}} \quad (11)$$

I přesto, že AR vrstva dokáže eliminovat většinu parazitních paprsků, tak nedokáže však eliminovat tyto nechtěné paprsky stoprocentně. Proto se v praxi nanáší 7 až 8 antireflexních vrstev, které minimalizují odraz světla pro širší pásmo vlnových délek světla (obrázek 9). AR vrstvy můžeme dělit podle účinnosti do tří skupin: standartní účinnost (transparentnost je 95 až 97 %), střední účinnost (transparentnost je 96 až 97 %) a vysoká účinnost (transparentnost je 98 až 99 %). [21]



Obrázek 8: Princip antireflexní vrstvy. [21]

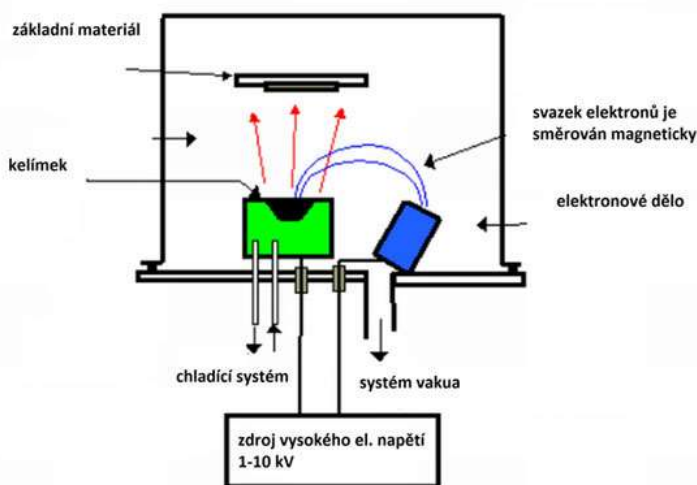


Obrázek 9: Účinek jednovrstvé a vícevrstvé antireflexní úpravy. [21]

4.2.1 Nanášení antireflexní vrstvy

Při nanášení antireflexní vrstvy je důležité, aby vrstva měla konstantní specifický index lomu, byla absolutně transparentní, měla stejnou tloušťku, dobrou přilnavost k čočce, aby povrch byl hladký jako povrch brýlové čočky a aby optické vlastnosti byly podobné podkladu. Tyto požadavky umí zajistit technologie vakuového nanášení. Díky zmíněné technologii můžeme kontrolovat množství nanášeného materiálu, jeho chemické složení a čistotu. [21]

Fyzikální vakuové napařování (PVD) je proces, při kterém je možné nanášet materiál na různé povrchy. Tato technologie se skládá ze třech kroků: sublimace materiálu, dále atomy nebo molekuly materiálu procházející vakuem k cílovému povrchu, a jako poslední krok, usazení materiálu na povrch cílového povrchu. Vakuové napařování může být tepelné, plazmatické nebo se může napařovat iontovým svazkem. Tepelné napařování můžeme dále dělit na napařování elektrickým odporem a napaření proudem elektronů. Graficky je PVD metoda popsána na obrázku 10. [21]



Obrázek 10: PVD. [21]

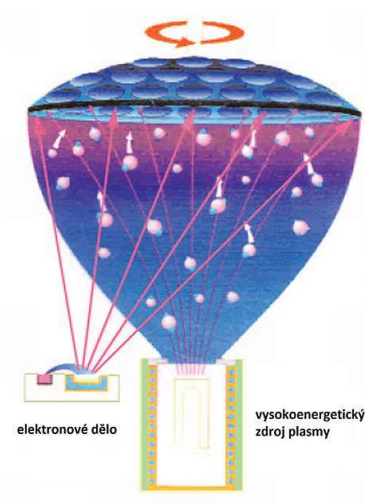
Principem napařování elektrickým odporem je převod nanášeného stavu do plynného stavu – vypaření. Brýlové čočky jsou připnuty na tzv. kalotu, v jejíž blízkosti se nachází nádoba z vysokotavitelného materiálu (např. wolfram nebo tantal), v níž se nachází nanášený materiál. K nádobě je připojen zdroj střídavého nebo stejnosměrného proudu. K nanášení antireflexní vrstvy se používají materiály s nízkým indexem lomu, ale zároveň s odlišným koeficientem roztažnosti vzhledem k základnímu materiálu. Materiály s uvedenými vlastnostmi vhodné k nanášení AR vrstvy jsou fluorid manganatý (MnF_2), fluorid hořečnatý (MgF_2), oxid křemičitý (SiO_2), dále oxid železa, yttria, lanthanu nebo titanu. Během napařování je nutné kontrolovat

teplotu uvnitř napařovací komory pomocí pyrometru (infračervený teploměr). Tloušťka nanesené vrstvy se měří opticky (interference) nebo piezo-elektrickým krystalem. Obvyklá tloušťka antireflexní vrstvy je 500 nm. [21]

Před samotným napařením vrstvy je nutné povrch čočky očistit detergenty aktivované ultrazvukem. Ultrazvuk funguje na principu jevu zvaného kavitace. Takto očištěné čočky se potom ukládají do vakuových komor, aby se zachovali čisté a aby se elektrické napětí na jejich povrchu snížilo na minimum. Nevýhodou napařování elektrickým odporem je kontaminace nanášeného materiálu materiálem z rezistoru, malá rychlost napařování, znehodnocení cílového produktu vysokou teplotou, nízká tvrdost a špatná odolnost nanesené vrstvy. [21]

Napařování proudem elektronů je modifikace předchozí technologie. Tato metoda využívá tzv. elektronové dělo obsahující napařovaný materiál ve formě granulí v malých kelímcích kolem kaloty, které jsou chlazeny vodou. Chlazením je zamezeno kontaminaci nanášeného materiálu. Každý kelímek obsahuje potřebné množství pro nanesení antireflexní vrstvy. Kvalita povrchu (vrstvy) se dá regulovat změnou intenzity elektronového paprsku. Výhodami této metody je zabránění kontaminace nanášeného materiálu díky chlazení, čistota nanášeného materiálu, možnost nanášet dielektrické materiály a větší pevnost vrstvy. Zápornými vlastnostmi je vysoká energetická spotřeba a neschopnost řádně kontrolovat elektronový paprsek, který může poničit cílovou plochu. [21]

Další možností nanášení antireflexní vrstvy je napaření za pomoci plazmy (obrázek 11). Generátorem plazmy je např. elektromagnetické pole. Tuto metodu lze použít na minerální i plastové čočky. AR vrstva se nanáší na čočku s již aplikovanou tvrdící vrstvou. Výhodou je pevnější, hustší a méně porézní aplikace AR materiálu na povrch čočky. Fluorid hořečnatý nelze při této metodě použít, neboť je znehodnocován plazmatickým zdrojem. Místo něj se jako AR vrstva používá oxid křemičitý ($n = 1,432$). Dle amplitudové podmínky musí být pod touto vrstvou nanesena ještě vysokoindexová vrstva (např. TiO_2). [21]



Obrázek 11: Schéma plazmatického napařování. [21]

Nejvíce efektivní metodou nanášení antireflexu je napaření za pomoci svazku iontů. Vedle nanášeného materiálu je umístěn iontový zdroj, který „bombarduje“ nanášený povrch čočky. Tyto velké částice poskytují vysokou adhezi nanášeného materiálu. Díky nezávislosti iontového děla je možné manipulovat s proudem iontů, úhlem rozptylu, napětím apod. [21]

4.3 Absorpční vrstva (barvení)

Absorpční úprava je nanášena na brýlové čočky za účelem filtrace přebytečného světla a škodlivých slunečních paprsků (např. pro oči nebezpečné UV-C záření, které za normálních podmínek pohltí ozonová vrstva), které se mohou dostat do našich očí. Minerální skla, aniž by byla nějak absorpčně upravena, zcela pohlcují nebezpečné UV-C záření. Vysokoindexové minerální čočky absorbují i UV-A a UV-B. Princip barvení je založen na absorpci a snížení transmitance světla. Část světla procházející čočkou je odražena od povrchu, část absorbována a část pohlcena. Brýlové čočky mohou být barveny kvůli estetickému vzhledu. Žlutý odstín zvyšuje kontrast, zatímco šedý odstín nemění vnímání barev přes brýle. Brýlové čočky absorbující více než 20 % viditelného světla nazýváme sluneční brýle. [25, 28]

4.3.1 Barvení minerálních čoček

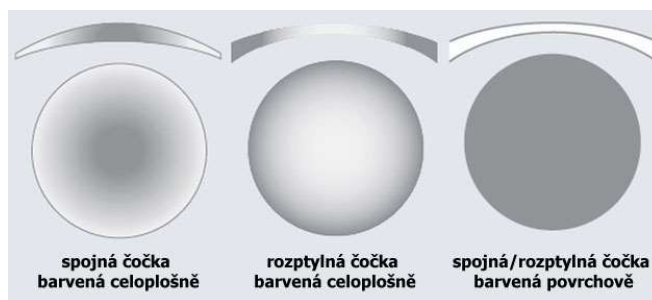
Skleněné čočky jsou nejčastěji barveny napařovací metodou (PVD) při teplotě 200 až 300 °C. Na čočku se nanáší tenká vrstva kovových oxidů absorbující světlo. K nanášení se používají chromové, molybdenové nebo titanové oxidy smíchané s křemíkem, křemíkovým monoxidem nebo magnesiovým fluoridem. Kovové sloučeniny se odpaří pod tlakem (ve vakuu) a ukládají se na povrch čočky ve vrstvách. Tloušťka nanášené barevné vrstvy je v řádech nanometrů. Míra

absorpce světla je závislá na tloušťce absorpční vrstvy a barva výsledného povlaku na použitém materiálu. Hnědá barva je tvořena většinou oxidy a šedá barva zase smícháním kovových sloučenin s křemíkem. PVD metodou se obdobně nanáší antireflexní vrstva. [21, 28]

Další metodou barvení minerálních čoček je přidáním barevného pigmentu do taveniny při výrobě skla. Velkou nevýhodou je fakt, že čočky s vyšší dioptrickou hodnotou (rozdílnou tloušťkou na okrajích a ve středu) barvené tímto způsobem budou nerovnoměrně zabarvené na okrajích a ve středu. Pro barvení skla se do taveniny přidává např. Fe_2 nebo CuO . Přidáním různé koncentrace oxidů můžeme upravit absorpční koeficient a změnit tak výslednou propustnost záření. [1, 28]

4.3.2 Barvení organických čoček

Plastové brýlové čočky se mohou barvit více způsoby, a to pevným barvením nebo nanášením barvy na povrch čočky (lakováním). Při pevném barvení je barva smíchána s monomerem před polymerizací. Do směsi se může ještě přimíchat UV absorbér benzotriazol, který ochraňuje oči před škodlivým UV zářením. Nevýhoda pevného barvení je opět fakt, že intenzita barvy bude nerovnoměrná na čočce s vyšší dioptrickou hodnotou (viz obrázek 12). Z toho důvodu se pevným barvením barví pouze nedioptické sluneční brýle. [21, 24, 28]



Obrázek 12: Pevné a povrchové barvení. [21]

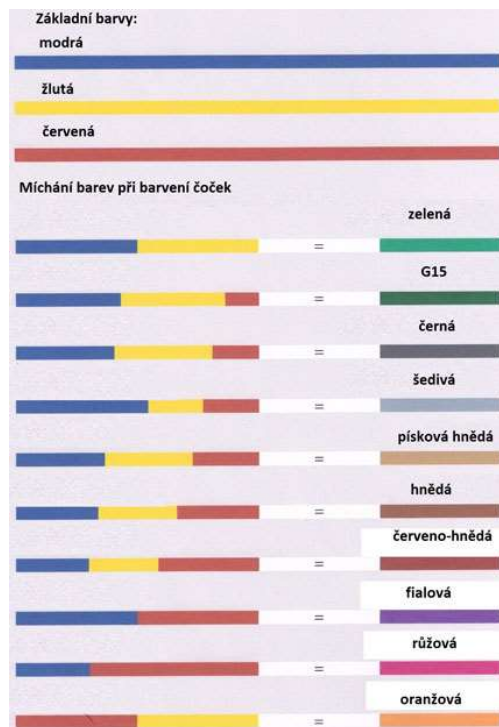
Naopak nanášením barvy na povrch docílíme rovnoměrného zabarvení brýlové čočky. Lakování je prováděno imerzní technikou (barvicí lázeň, viz obrázek 13), kdy je čočka ponechána v barvicí lázni po dobu jedné minuty až po 2 hodiny (čím déle necháme čočku v lázni, tím tmavší a výraznější bude barevný povrch). Proces barvení začínáme rozehrátím roztoku barvy a aditiv podporující proces barvení na pracovní teplotu (cca. 90 až 95 °C). Alkoholem nebo saponátem vyčištěnou čočku vnoříme do držáku a předehejeme ji na 95 °C. Poté čočku vnoříme do nádoby s barvou. Po vyjmutí čočky z barvy čočku neutralizujeme v roztoku saponátu a vody o 95 °C, abychom eliminovali zbytky barvy v materiálu čočky

a předešli tak nechtěnému odstínu. Barvení se provádí před a po aplikaci tvrdící vrstvy (závisí na schopnosti tvrdící vrstvy propouštět barvivo) a výsledný barevný povlak proniká cca 6 až 10 mikronů pod povrch. Vysokoindexové čočky, polykarbonátové čočky nebo čočky s povrchovým tvrzením barvíme opakovaně, tzn. čočku barvíme v lázni po dobu 10 minut, poté ji ochladíme a omyjeme. Proces opakujeme do té doby, než dosáhneme požadovaného odstínu. [21, 28]



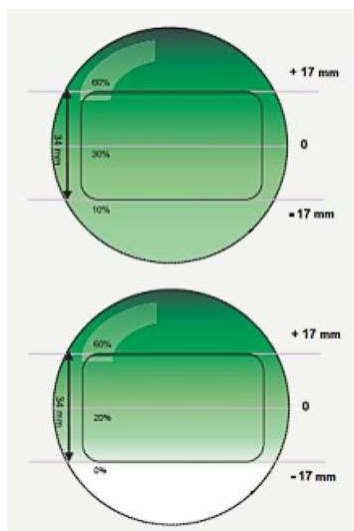
Obrázek 13: Hromadné barvení brýlových čoček. [21]

Oproti barveným minerálním čočkám, které mohou být pouze hnědé nebo šedé, mají organické čočky výhodu většího barevného spektra. Barvení plastových čoček spočívá v míchání tří základních barev – modrá, červená a žlutá. Smícháním těchto barev v různém poměru dostaneme neuvěřitelné barevné kombinace od zelené, modré až po fialovou nebo oranžovou (obrázek 14). [21]



Obrázek 14: Míchání barev při barvení brýlových čoček. [21]

Další výhodou organických skel oproti minerálním je možnost tzv. gradientního barvení (intenzita barvy se stupňuje od nejtmaší po nejsvětější). Gradientní čočky se vyrábí pomalým vyjímáním čočky z barvicí lázně. Tímto způsobem můžeme dosáhnout i dvojbarevného gradientního zbarvení (obrázek 15), kdy nejprve gradientně nabarvíme horní část čočky jednou barvou a poté spodní část gradientně nabarvíme jinou barvou. Gradient nalezneme jak u dioptrických, tak i u nedioptrických slunečních brýlí. [21, 24]



Obrázek 15: Gradientní brýlová čočka. [21]

4.4 Samočistící vrstvy

Z výsledku provedených testů vyšlo najevo, že antireflexní vrstvy jsou poměrně pórovité a mají tendenci k usazování prachu a jiných nečistot. Proto se na AR vrstvu nanáší ještě další vrstva s hydrofobním a oleofobním účinkem. Tloušťka takové vrstvy je v řádech nanometrů a nemá žádný vliv na funkci antireflexu. [21]

4.4.1 Hydrofobní a hydrofilní vrstva

Samočistící sklo je založeno na principu hydrofobity a hydrofility, který zabraňuje usazování nečistot na povrch minerální čočky. Usazování prachu, ušpinění, otisky prstů, mastnota a kapky vody jsou díky samočistící vrstvě téměř eliminovány. Vzhledem k faktu, že odrazy na skle s antireflexním povlakem mizí, je i nepatrné množství prachu nebo mastnoty viditelné. Díky samočistící povrchové úpravě je zabráněno znečištění skla a s tím se i snižuje potřeba čočky čistit. Na minerální skla se nejprve aplikuje antireflexní vrstva a poté hydrofobní vrstva. Naproti tomu u organických skel nejprve nanášíme tvrzení, antireflexní vrstvu, a nakonec hydrofobní povlak. [21, 28]

Hydrofobní povrch je založen na principu snížení adhezní síly mezi kapkou vody a povrchem čočky. Adhezní síla vody (neboli vnitřní adheze) je slabší než adheze mezi kapkou a čočkou – povrch čočky je smáčivý. Kapka se po styku s povrchem „přilepí“ a zůstane kulatá – velký kontaktní úhel. A jelikož vnitřní adhezi kapky vody nemůžeme změnit, vnější adhezi mezi kapkou vody a povrchem čočky se pokoušíme snížit hydrofobními vrstvami. [28, 30]

Hydrofobní vrstva se připravuje z fluoridů (fluorizované polysilazany) a hydrouhlíkatých řetězců. Uvedené látky obsahují specifické molekuly, které je pomáhají udržet na povrchu brýlové čočky. Koncové části těchto molekul jsou většinou nepolární nebo neutrální, zatímco na druhém konci tyto látky velice silně odpuzují vodu a nečistoty. [21]

Hydrofobní povrch minerální čočky zajišťuje vrstva polymeru a vosku metodou iontového leptání, iontového kapání nebo plazmatickým chemickým rozrušením povrchu skla. Povrch čočky se pak stává hydrofobním, ale materiál je křehký a lehce poškoditelný. Zároveň je tato metoda finančně náročná. U organických čoček se hydrofobní vrstva nanáší metodou dip coating, vakuově nebo plazmatickou polymerizací. [21]

Povrchy s hydrofobní vrstvou mohou mít také antistatické vlastnosti, které zabraňují usazování prachových částic. [21]

Hydrofilní povrchy, na rozdíl od hydrofobních povrchů, jsou obvykle silně přilnavé, protože mají vysokou povrchovou energii. Superhydrofilní povrch zajistíme tenkou vrstvou TiO_2 na již hydrofilní materiál. Usazená voda pak na brýlové čočce netvoří kapky, ale tenký film. [21,30]

4.4.2 Protizamlžovací vrstva

Antifogová vrstva má za úkol, jak plyne z názvu, zabránit kondenzaci vlhkosti na brýlových čočkách. Většinou se s tímto nepříjemným jevem setkáváme při sportu nebo při přechodu ze studeného do teplého prostředí. Příčin zamlžování čoček je mnoho, většinou je teplota na povrchu čočky blízká rosnému bodu, nebo je vzduch v blízkosti povrchu čočky ochlazován na teplotu, která zamezí odpařování vody z povrchu čočky. Dalším důvodem může být rozdílné povrchové napětí mezi kondenzovanou vodou a povrchem čočky. [21]

Organické čočky, oproti minerálním, mají menší tepelnou vodivost, která způsobuje delší odpařování kondenzované tekutiny z povrchu čočky. Proto se na oba povrch čočky aplikuje vrstva polyethylenu, která zvyšuje povrchové napětí usazované tekutiny a tím snižuje její kontaktní úhel. Antifogová vrstva se aplikuje na plastové, polykarbonátové, vysokoindexové i na fototropní čočky. [21, 31]

Protizamlžovací úpravu můžeme nanést na čočku přímo během procesu výroby. Pro dosažení kýžených vlastností je čočka potažena pryskyřicovým filmem, který absorbuje vlhkost. V momentě, kdy absorpce dosáhne bodu nasycení, mezifázový aktivátor uvnitř pryskyřice změní kapku vody na tenký vodný film. S protizamlžovacími systémy se nejčastěji setkáváme u sportovních brýlí, zejména u plaveckých. Ne všechny dioptrické brýlové čočky tuto vrstvu však mají. K ochraně před zamlžením dioptrických čoček používáme speciální spreje a kapky. Ne všechny spreje nebo kapky proti zamlžení jsou však kompatibilní s antireflexní vrstvou. [17]

Další alternativou v technologii proti zamlžování čoček jsou čočky Optifog od Essiloru. Antifogové vlastnosti jsou aktivovány kapkou Optifog aktivátoru na každou stranu čočky a následným otřením mikrovláknovým hadříkem za účelem rovnoměrné distribuce kapaliny po celé ploše čočky. Touto metodou zůstanou brýlové čočky odolné proti zamlžení po dobu jednoho týdne. [31]

4.4.3 Antistatická vrstva

Funkce antistatické vrstvy je odpuzovat prachové částice. Povrch čočky tak zůstává díky antistatické úpravě déle čistý, nemusí se tak často čistit a tím snižuje riziko jejího nechtěného poškrábání. Obrázek 16 znázorňuje čočky s antistatickou úpravou a bez ní. [22]



Obrázek 16: Antistatická vrstva u čočky vpravo. [21]

4.5 Fototropní čočky

Samozabarvovací brýlové čočky (obrázek 17) jsou čočky, které mírou svého zbarvení reagují na osvit UV záření. Princip fototropních čoček je podobný fotografickému filmu, kdy ozářený fototropní materiál mění svou strukturu molekul obsahující stříbro a čočka se tak zbarvuje. [32]

Fototropie je vratná změna mezi stavy s různou absorpcí, která je vyvolána světlem (fotony) nebo obecněji elektromagnetickým zářením. Fototropie je fotochemický jev, který se řídí Grothusovým-Draperovým zákonem, tj. účinné je pouze to světlo, které je absorbované fototropní látkou. Při nepřetržité expozici se barva mění, dokud není dosaženo rovnováhy mezi přímou a zpětnou reakcí. Fototropie je vratná. Po vypnutí světla se systém vrátí do původního stavu. [33]

Vlnová délka světla, které způsobuje změnu propustnosti světla, a rychlost, s jakou tento proces probíhá, závisí na povaze látky a na teplotě. Zvýšení teploty posouvá absorpční pásmo k delším vlnovým délkám. Vyšší teploty také urychlují regenerační reakci, která probíhá současně s barevnou reakcí a působí proti fototropnímu procesu. [33]

Samozabarvovací brýlové čočky s fototropní látkou ve hmotě čočky je dnes již zastaralá metoda zbarvování. Fotoaktivní látka je obsažena rovnoměrně v tavenině čočky. Množství přidaného barviva do fototropních čoček roste s tloušťkou (dioptrickou hodnotou) čočky. Dvě čočky o rozdílné dioptrické hodnotě budou mít rozdílný odstín zbarvení a celkový dojem brýlí bude působit neesteticky. [32]

Více efektivní a i dnes více užívaná metoda barvení čoček je lakování nebo tmelení fototropní vrstvou. Molekuly reagující na světlo jsou obsaženy v tenké vrstvě nacházející se pod povrchem brýlové čočky. Touto metodou jsou barveny dnes velmi populární čočky Transitions. Výhodou tmelené vrstvy je stejná intenzita zbarvení a to i při rozdílné tloušťce (dioptrické hodnotě) čoček. [32]



Obrázek 17: Fototropní čočka. [18]

4.5.1 Minerální fototropní čočky

Skleněné samozabarvovací brýlové čočky se dnes již skoro nepoužívají. Kromě vysoké hmotnosti a větší náchylnosti k rozbití skla, je hlavní nevýhodou ne vždy 100% hodnota UV filtru minerálních materiálů. Mezi další nevýhody je již zmíněná závislost míry probarvení skel na jejich tloušťce, pomalejší a méně intenzivní zbarvování a odbarvování čoček a rychlejší „stárnutí“ fotochromatického efektu. Minerální fototropní čočky jsou dostupné v odstínech hnědé a šedé. [32]

K výrobě skleněných fototropních čoček se používá borosilikátové sklo, do kterého se přidávají halogenidy stříbra (např. chlorid stříbrný, bromid stříbrný nebo jodid stříbrný), díky nimž se bude čočka zbarvovat. Po ochlazení se sklo však ještě nestává fototropním, ale má jasně modrou barvu. Sklovina poté prochází řízeným tepelným procesem zahřívání asi na 600 °C po dobu několika hodin. Uvedený postup zajistí rovnoměrně hustě rozložené shluky mikrokryсталů halogenidů stříbra. Aby sklo splňovalo požadovaný fototropní efekt, musí být rozměry krystalů přesně dodrženy. Sklo s krystalky do 5 nm nevykazuje fotosenzitivitu. krystalky o velikosti 5 až 20 nm zapříčiní průhledné a fotosenzitivní sklo. Krystalky větší než 30 nm dávají skleněné čočce namodralý až mléčný vzhled. [22]

Na čočku dopadnou fotony krátkovlnného a ultrafialového záření. Z iontu halogenového prvku (Cl^- , Br^-) se uvolní elektron, který se naváže na iont Ag^+ a tak vzniknou neutrální atomy Cl, Br

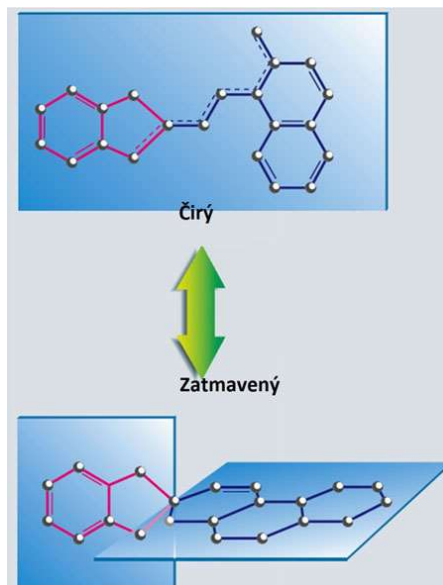
a Ag. Tmavnutí je zapříčiněno atomy kovového stříbra pohlcující světlo, které vnímáme jako zatmavení čočky. Po snížení nebo přerušení vyvolávajícího záření se elektrony z atomu stříbra opět uvolní a vrátí se do původního stavu za vzniku AgCl, kterým světlo prochází. Sklo tak postupně bledne. Za účelem zvýšení citlivosti reakce se do směsi přidává např. Cu₂O, který snadněji uvolňuje elektrony. [22]

4.5.2 Organické fototropní čočky

Výhodou organických samozabarvovacích materiálů oproti minerálním je rychlejší aktivace a také podstatně rychlejší odbarvování. V odbarveném stavu jsou plastové fototropní čočky prakticky čiré (cca 8 % zbytkového zbarvení) a při maximální aktivaci dosahují zbarvení až 88 %. Podstatnou výhodou organických fototropních čoček je 100% UV filtr při aktivovaném, ale i deaktivovaném stavu. [32]

Organické materiály, obzvláště pryskyřice, mají obecně mnohem lepší UV ochranu než minerální materiály. Plastové fototropní čočky jsou vyráběny ze speciálního materiálu schopný měnit vlivem UV záření svojí prostorovou konfiguraci tak, aby při záření docházelo k absorpci procházejícího světla a zároveň aby po přerušení UV záření docházelo k návratu do původního stavu. Mezi nejběžnější fototropní molekuly schopné této reakce jsou indolinospironaftoxaziny. Po ozáření ultrafialovým zářením nebo krátkovlnným modrým světlem indolinospironaftoxaziny mění svojí chemickou strukturu („rozvinou se“) a pohlcují procházející světlo. Tato reakce se nám jeví jako tmavnutí čočky. Molekuly se opět „zavinou“ jakmile se záření přeruší a čočka bledne (viz obrázek 18). [22]

Jak již bylo řečeno, pryskyřice sama o sobě má 100% ochranu před UV zářením. Proto se nejčastěji fotosenzitivní molekuly aplikují pouze na přední plochu již hotových polotovarů čoček. Molekuly však pronikají jen asi desetinu milimetru pod povrch přední plochy brýlové čočky. Nehledě na to, jestli jsou fotosenzitivní molekuly obsaženy jen na povrchu nebo v celé hmotě, UV záření reaguje vždy jen na molekuly, které jsou na povrchu. Kvůli 100% UV ochraně pryskyřice krátkovlnné světlo neprojde do hlubších vrstev. Tímto postupem předejdeme rovnoměrnému obarvení čoček bez ohledu na její středovou a okrajovou tloušťku. Na povrch čočky se vždy ještě nanáší ošetrná vrstva. Místo klasické pryskyřice CR-39 se používá vhodnější kopolymer CR-307, do kterého se lépe vpravují zmíněné fototropní látky. Zmíněným způsobem vyrábí fototropní brýle např. firma Transition Optical. [22]



Obrázek 18: Reakce spiro-oxazinových molekul u fototropických plastových čoček. [21]

4.6 Polarizační čočky

Přirozené světlo je nepolarizované, tj. vektor elektrické intenzity v rovině kolmé na šíření světla má nahodilý směr ve všech směrech. Ve chvíli, kdy se paprsky světla dopadnou na odrazivý povrch (voda, vozovka), světelné paprsky se odkloní v určitém směru zpět. Odražené světlo se stává polarizovaným. Úkolem polarizačních čoček je filtrovat horizontálně polarizované světlo odražené od horizontálních ploch (voda, silnice) kmitajících ve vertikální rovině. Princip polarizace je podrobněji vysvětlen v kapitole 2.6. [21, 34]

Polarizační čočky jsou vhodné pro všechny příznivce lyžování nebo vodních sportů ale i pro řidiče, jenž nepříjemně oslňuje odražené světlo od mokré vozovky. Odražené světlo od vodní hladiny, vozovky nebo lyžařské sjezdovky vytváří nepříjemné odlesky, které oslňují sportovce. Právě polarizační úprava nechtěným odleskům zabraňuje a zlepšuje tak vnímání barev okolí. [34]

Čočky s polarizací se vyrábí se zabarvením do šedé, zelené nebo hnědé. Polarizační čočky obsahují speciální filtr blokující intenzivní odražené světlo. Čočky obsahují krystaly, které pohlcují horizontální paprsek (řádný paprsek) a propouští vertikální paprsek (mimořádní paprsek), který je zeslaben absorpcí. Sluneční polarizační brýle se vyrábí nejčastěji z polyvinylacetátu (PVA). Dioptrické polarizační brýle se vyrábí vložením tenké vrstvy polarizačního materiálu (35 až 40 μm) na povrch brýlové čočky. U materiálu CR-39 se tato vrstva vloží do formy před vlastní polymerací (tzv. technologie zapuštění). Další technikou je

plátková technologie, která se používá u polykarbonátu a vysokoindexových materiálů. Ještě před vytlačněním vlastní čočky se pod poslední vrstvu přední plochy čočky vloží tenký polarizační film. Při výrobě je důležité dbát na správnou orientaci roviny polarizace (např. při výrobě sférocylindrických čoček). [21, 35]

4.7 Reflexní vrstva

Účel antireflexní vrstvy je zvýšení propustnosti a snížení povrchové odrazivosti brýlových čoček. Dnes je antireflexní povrchová úprava běžnou součástí skoro každé brýlové čočky. Oproti tomu vysoce reflexní povlaky (HR) naopak zvyšují povrchovou odrazivost a mohou tak vytvářet zrcadla odrážející veškeré světlo daného rozsahu vlnových délek, které na ně dopadá. Brýlové čočky s reflexní vrstvou (obrázek 19) mají funkční i kosmetickou funkci. Zrcadlová úprava umožňuje nositeli brýlí, aby přes ně okolí nevidělo jeho oči. Se zrcadlovou vrstvou se nejčastěji setkáme u slunečních brýlí. Vysoce reflexní povrchové povlaky mají využití také v aplikacích laserové optiky, jako je např. skládání dráhy paprsku laseru. [25, 37]

Reflexní vrstvy snižují transparentnost brýlové čočky ve viditelné oblasti světla. Důvodem je zvýšená odrazivost na přední straně čočky. HR povlaky se nejčastěji vyrábějí z materiálu o vyšším indexu lomu, než je index lomu základního materiálu (brýlové čočky). Světlo dopadající na HR vrstvu je částečně pohlceno a přeměněno na tepelnou energii. Reflexní povrchy fungují na principu tzv. konstruktivní interference, oproti antireflexním povrchům, který využívají destruktivní interferenci. Konstruktivní interference nastává, když je amplituda výsledné vlny součtem amplitud původních vln (amplituda výsledné vlny u destruktivní interference je menší než součet amplitud původních vln). [21, 38]

Odrazivé vrstvy jsou buď z kovového (např. stříbro, hliník, zlato, ocel) nebo dielektrického materiálu (např. oxidy chromu, dioxydy křemíku a titanu). Čím lépe vede materiál HR vrstvy elektrický proud, tím vyšší bude odrazivost čočky. Odrazivost je závislá na indexu lomu BČ, na absorpci nanášeného kovu a na intenzitě zbarvení čočky (s vyšším zbarvením je efekt reflexní vrstvy větší). Závislost odrazivosti na indexu lomu n čočky a na indexu absorpce k nanášeného kovu vysvětluje vzorec 12: [3, 21, 37]

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (12)$$

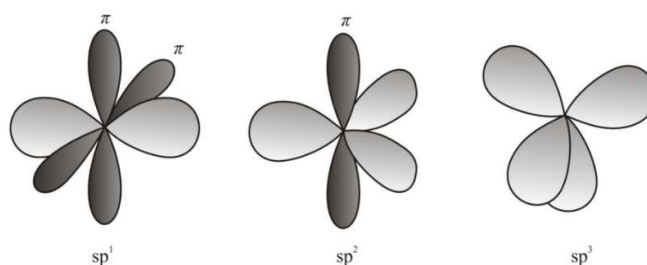
K nanášení reflexních vrstev se nejčastěji používá technologie vakuového napaření pomocí iontů nebo plazmy (vysvětleno v kapitole 4.2.1) nebo vakuovým nanášením vrstev z práškových oxidů, kovů, lakovaných plastů nebo jiných dostupných sloučenin. Zrcadlové povlaky se skládají z konstruktivních interferenčních vrstev, které ruší světlo procházející čočkou tím, že ho odrážejí. Čím hustší jsou interferenční vrstvy, tím více odrazu se vyvolá, čímž vzniká zrcadlový efekt. HR vrstvy mohou být nanášeny jak na minerální, tak na organické materiály, zejména na přední plochu čočky. Skleněné čočky s reflexní vrstvou mají propustnost pro světlo od 25 % do 75 %. Plastové čočky dosahují odrazivosti jen 25 až 35 %. [21, 39]



Obrázek 19: Čočka s reflexní úpravou. [21]

5 Uhlíkové vrstvy a DLC vrstvy

Diamantu-podobné uhlíkové vrstvy jsou metastabilní formou amorfního uhlíku s rozdílným zastoupením hybridizace sp^2 a sp^3 (v malé míře i sp^1). DLC vrstvy se vyznačují vysokou tvrdostí, dobrou chemickou a mechanickou odolností a transparentností pro viditelnou část spektra. Uhlík se běžně vyskytuje ve třech různých hybridizacích, a to sp^3 , sp^2 a sp . Typický zástupce sp^3 hybridizace je diamant, zástupcem sp^2 hybridizace je grafit a hybridizace sp se uplatňuje u nerozvětvených lineárních systémů. Obsah vazeb sp^2 , sp^3 má vliv na optické, elektrické a mechanické vlastnosti. [42, 43]



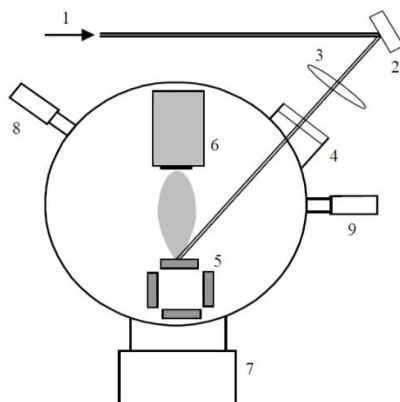
Obrázek 20: Hybridizace uhlíku [52]

Diamantu-podobný uhlík a vrstvy z něj připravované mají vlastnosti podobné diamantu, ale jsou amorfni (nemají pravidelnou krystalickou strukturu). Největší výhodou DLC vrstev je jejich transparentnost ve viditelné a infračervené oblasti spektra. Díky biokompatibilitě a thromboresistenci by do budoucna DLC vrstvami mohly být pokrývány ortopedické kloubní implantáty, umělé chlopně nebo stenty. Své využití najdou také ve strojírenství jako ochranné vrstvy zvyšující mechanickou a chemickou odolnost výchozího materiálu. Vrstvy DLC díky své propustnosti ve viditelné a infračervené oblasti by mohly najít využití také v optice jako antireflexní a oteřuvzdorné povrchové úpravy. [42, 44, 45]

Díky amorfniému charakteru (absence krystalové struktury) vrstvy postrádají zrnitý charakter a mohou vytvářet hladké a spojitě povrchy s extrémně malými tloušťkami. Dalším pozitivním aspektem je možnost depozičních procesů prováděných při pokojových teplotách. Nevýhoda je omezená tepelná stabilita, díky které může dojít k vlastnostním změnám nebo až k oxidaci vrstvy. Problémy mohou být i s vnitřním pnutím, které souvisí s maximální dosažitelnou tloušťkou a následnou adhezí na substrát. [42]

5.1 Pulzní laserová depozice

DLC vrstvy jsou nanášeny tzv. pulsní laserovou depozicí (PLD). Princip nanášení tenkých vrstev metodou PLD spočívá ve fokusovaném laserovém svazku (nejčastěji excimerový laser) dopadající na terč. Materiál terče (v našem případě grafitický terč) se vysokou hustotou záření převede do plazmového obláčku a poté materiál kondenzuje na podložce z taveného křemene umístěné nad terčem a vytvoří zde tenkou vrstvu. Depozici lze ovlivnit teplotou substrátu, tlakem plynu, vzdáleností podložky od terče a hustotou energie laseru na terči. Kvalita a tloušťka vrstvy je závislá na parametrech laseru (frekvence, vlnová délka, ...), materiálových vlastnostech podložky aj. [44, 46]



Obrázek 21: Schéma laserové depozice (1 - laserový svazek, 2 - odražeč, 3 - čočka, 4 - vstupní okno depoziční komory, 5 - karusel, 6 - topný stůl s podložkou, 7 - vakuový čerpací systém, 8, 9 - vakuové měřky) [44]

6 Experimentální část

Experimentální část mé bakalářské práce se zabývá spektrální propustností DLC vrstev a běžně dostupných absorpčně a reflexně upravených čoček, většinou značky HOYA. Část měření byla provedena v laboratoři biomateriálů a nanotechnologií na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT a část ve Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR. Brýlové čočky použité v tomto experimentu mi byly zapůjčeny Fakultou biomedicínského inženýrství, DLC vrstvy byly zhotovené na půdě Fyzikálního ústavu akademie věd ČR.

Propustnost byla měřena na spektrometru v oblasti vlnových délek 200 až 800 nm, jen DLC vrstvy měřené na půdě AV ČR byly zkoumány na vlnových délkách v rozsahu 200 až 1100 nm. Brýlové čočky byly zhotoveny z organického materiálu CR-39, DLC vrstvy byly nanášeny buď také na CR-39 nebo na tavený křemen.

6.1 Spektrometr

Zkoumané vzorky byly měřeny na UV-VIS dvoupraskovém spektrofotometru UV-2600i od společnosti Shimadzu s rozsahem vlnových délek 185 až 1400 nm. UV-2600i je univerzální spektrofotometr vybavený patentovanou difrakční mřížkou Lo-Ray-High, díky které přístroj dosahuje vysoké účinnosti a nízké úrovně rozptýleného světla. [47]



Obrázek 22: Spektrometr [47]

Před samotným měřením se čočka důkladně vyleštila, zbavila nečist nebo mastnoty a poté se vložila do speciálního stojánku, který se s čočkou vložil dovnitř spektrometru. Měřené vzorky se do přístroje vkládaly tak, aby paprsek ze spektrometru procházel jejich středem a měření bylo co nejpřesnější.

6.2 Testované brýlové čočky

Transmisivita byla měřena na běžně dostupných čočkách s reflexní (zrcadlovou) a absorpční úpravou, skoro ve všech případech značky HOYA. Testované brýlové čočky jsou vyrobeny z materiálu CR-39, přesný index lomu není známý, ale podle odborných literatur se index lomu CR-39 pohybuje okolo 1,5. Všechny brýlové čočky HOYA mají optickou mohutnost rovnou nule, jediná čočka od rakouské firmy Michael Pachleitner má optickou mohutnost +0,50/-0,25 D. Absorpčně upravované čočky nemají žádné povrchové úpravy, na rozdíl od reflexních čoček, které mají antireflexní vrstvu (AR) na zadní ploše čočky. Měřené čočky jsou shrnuty v tabulce 1.[48]

Výsledky měření jsou zaneseny do grafů a propustnosti jednotlivých brýlových čoček jsou porovnávány buď na základě povrchové úpravy, barvy nebo procentem absorpce. Všechny čočky byly měřeny na spektrometru v oblasti 200 nm až 800 nm. Naměřené porovnávané hodnoty jsou rozděleny do dvou podkapitol na základě jejich úpravy, a to na barvené čočky a na čočky s reflexní úpravou. Fotografie brýlových čoček byly mnou vyfocené.

Tabulka 1: Měřené čočky s absorpční úpravou.

	Výrobce	Opt. mohutnost φ [D]	Název čočky (% zbarvení)	Povrchová úprava
1.	HOYA	0,00	Spectrum Granite 75%	Absorpční
2.	HOYA	0,00	Spectrum Maroon 75%	Absorpční
3.	HOYA	0,00	Spectrum G15 85%	Absorpční
4.	HOYA	0,00	Spectrum Rose 15%	Absorpční
5.	HOYA	0,00	Spectrum Blue 25%	Absorpční
6.	HOYA	0,00	Spectrum Green 75%	Absorpční
7.	HOYA	0,00	Spectrum Grey 75%	Absorpční
8.	HOYA	0,00	Spectrum Brown 75%	Absorpční
9.	Michael Pachleitner	+0,50/-0,25	Brown 75%	Absorpční

Tabulka 2: Měřené reflexní čočky (pokračování tabulky 1).

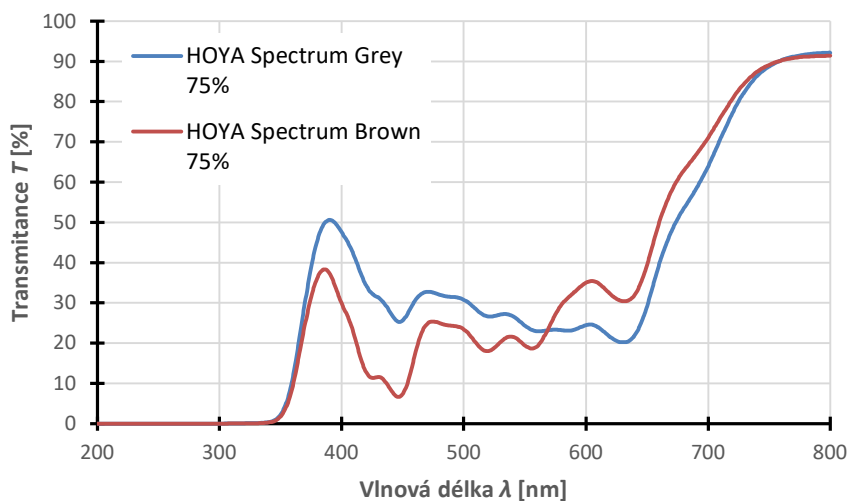
	Výrobce	Opt. mohutnost φ [D]	Název čočky (% zabarvení)	Povrchová úprava
10.	HOYA	0,00	Mirrior Blue (Granite 85%)	Reflexní + AR
11.	HOYA	0,00	Mirrior Silver (Granite 85%)	Reflexní + AR
12.	HOYA	0,00	Mirrior Gold (Granite 85%)	Reflexní + AR
13.	HOYA	0,00	Light Mirrior Violet (Granite 75% - 15%)	Reflexní + AR
14.	HOYA	0,00	Light Mirrior Silver (Granite 75% - 15%)	Reflexní + AR
15.	HOYA	0,00	Light Mirrior Copper (Granite 75% - 15%)	Reflexní + AR
16.	HOYA	0,00	Light Mirrior Blue (Granite 75% - 15%)	Reflexní + AR

6.2.1 Barvené brýlové čočky

Absorpčně upravené brýlové čočky jsem porovnávala na základě jejich odstínu (např. barva Granite a Grey jsou si velmi podobné) nebo na základě procentuálního zabarvení (skoro všechny BČ měly 75% nebo 85% zabarvení). Zabarvené brýlové čočky se používají zejména jako čočky do slunečních brýlí a jejich úkolem je eliminace určitých vlnových délek. Absorpce a propustnost světla je více popsána v kapitole 2.4 a 2.5.

HOYA Spectrum Tint Range je škála barevných odstínů, kterými je možné barvit většinu materiálů s různými indexy lomu značky HOYA a to jak dioptrické, tak nedioptrické čočky. Nejoblíbenější odstíny, jako jsou hnědá, šedá nebo zelená, mohou být zabarveny v rozmezí od 10 % do 90 % (záleží na indexu lomu a materiálu BČ). Brýlové čočky je také možné individuálně vyrobit také do „gradientního“ odstínu. [49]

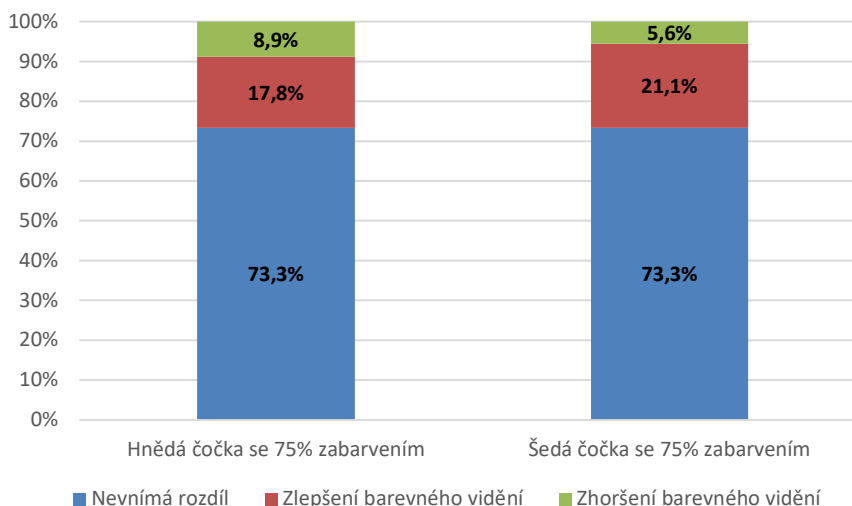
První graf na obrázku 23 porovnává dva nejčastěji používané odstíny pro výrobu slunečních brýlových čoček – šedou a hnědou. Hnědé i šedé zbarvení se hodí pro každodenní nošení, zvýrazňují kontrast, snižují jas a nezkrslují barvy. Čočky začínají propouštět světlo na 346 nm. Okolo 400 nm začne jejich transmittance prudce stoupat až k 50 % a poté zase klesat. Od cca 450 do 635 nm (velká část viditelného záření) mají křivky rozdílný průběh, což je dáno rozdílným zbarvením čoček. Brýlová čočka Brown propouští výrazně méně modrého světla ($T = 7,5 \%$), na rozdíl od šedé, která propouští 25,6 % modrého záření. Transmittance pro červené světlo se opět velmi liší, hnědá čočka propouští 39,5 % a šedá propouští o 10 % méně ($T = 29,3 \%$). Zelené světlo brýlová čočka Brown propouští z 18,7 %, šedá čočka propouští 23,4 % zeleného záření. Od cca 630 nm křivky propustnosti začnou růst k 90 %. Z hlediska ochrany očí proti modrému záření vykazuje lepší výsledky hnědá čočka, kterou projde až o 18 % méně modrého záření. Odstín Brown také lépe blokuje UV záření pod 400 nm. [50]



Obrázek 23: Graf transmisivity hnědé a šedé čočky.

Výzkum jihoafrické univerzity KwaZulu Natal z roku 2012, který se zabýval kontrastní citlivostí a barevným viděním skrz absorpčně upravené brýlové čočky, ukázal, že vidění přes šedě a hnědě zbarvenou čočku nijak výrazně nemění barevné vidění. Následující graf zobrazený na obrázku 24 je převzat a upraven z uvedeného výzkumu a porovnává změny vnímání barev přes šedou a hnědou čočku se 75% zbarvením. 73,3 % probandů uvedlo, že nevnímají rozdíl barevného vidění přes obě zbarvené čočky v porovnání s čirou čočkou. Zlepšení vnímání barev přes hnědou čočku uvedlo 17,8 % probandů, 8,9 % naopak uvádí, že se jim barevné vidění přes hnědou čočku zhoršilo. Obdobné výsledky jsou i u šedě zbarvené čočky, 21,1 %

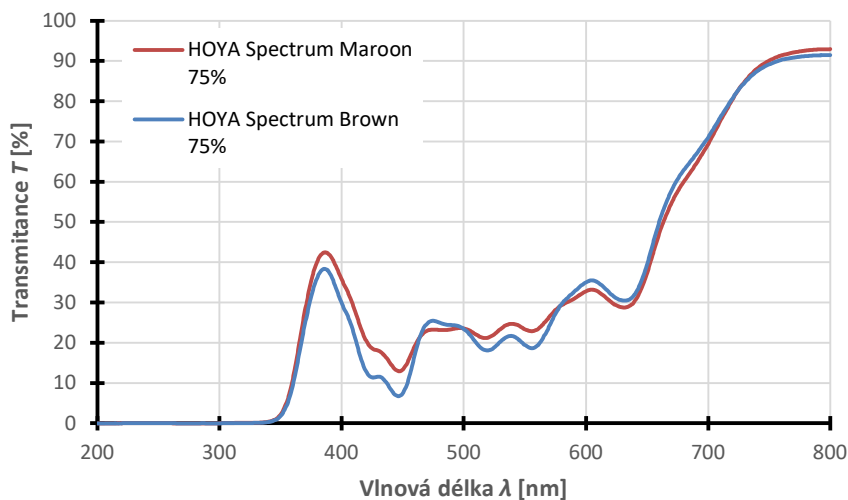
dotázaných subjektivně pociťují zlepšení vidění barev a zbylých 5,6 % uvádí zhoršení barevného vidění. [51]



Obrázek 24: Graf vlivu zbarvených čoček na barevné vidění, upraveno. [51]

V grafu na obr. 25 jsou porovnány dvě hnědě zbarvené čočky značky HOYA. Obě brýlové čočky mají 75% zbarvení, přičemž barva Brown se na přirozeném světle jeví tmavší než barva Maroon (viz obrázek 26). Jak již bylo řečeno, hnědé zbarvení se hodí pro aktivity spojené se silnicí (cyklistika, řízení auta). Hnědá barva je také vhodná pro vodní sporty a rybaření. Další výhodou hnědě zbarvených čoček je blokace modrého světla, která snižuje propustnost modrého záření a zvyšuje kontrast a ostrost vidění. [36]

Obě čočky mají velmi podobný průběh (barva Maroon propouští o trochu více světla než barva Brown). Čočky nepropouští UV záření do 346 nm, poté začne propustnost velmi rychle stoupat a na vlnové délce 390 nm činí transmitance 40 %. V rozsahu od 420 do 630 nm je průběh obou křivek téměř totožný, barva Brown však propouští asi o 10 % méně modrého záření. Od 630 nm propustnost obou čoček stoupá z 40 na 90 %. Z grafu můžeme potvrdit, že hnědě zbarvené čočky skutečně propouští velmi málo modrého záření. Hnědá barva má nejbližší k barvě červené, tudíž hnědé čočky budou propouštět červené světlo nejvíce ze všech barev, zatímco modrou a zelenou složku budou z části absorbovat. Čočka s názvem Brown propouští 39,5 % červeného záření a 7,4 % záření modrého. Spektrální propustnost čočky Maroon pro červené světlo je rovna 37,3 %, modré záření tato čočka propouští z 13,3 %.



Obrázek 25: Graf transmisivity dvou hnědých čoček

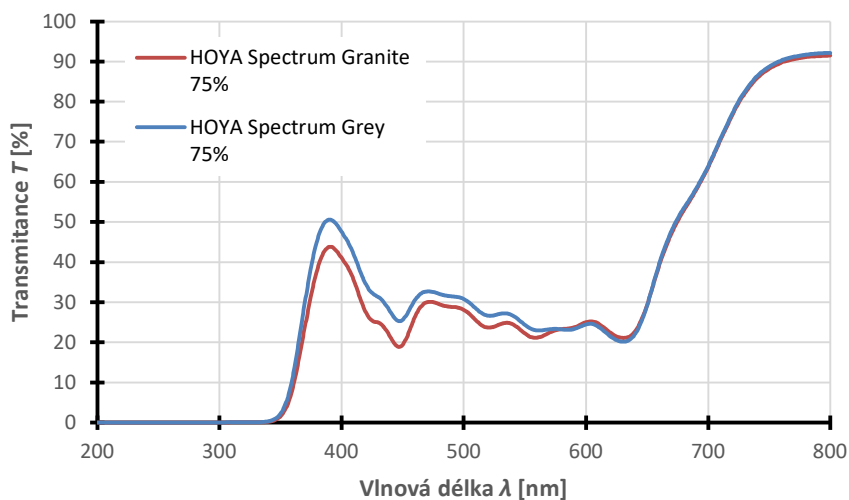


Obrázek 26: Čočka Maroon (vlevo) a čočka Brown (vpravo)

Graf vyobrazený na obrázku 27 obdobně porovnává dvě podobně zbarvené čočky značky HOYA, a to šedě zbarvené BČ bravy Grey (která se jeví na přirozeném světle jako tmavomodrá) a Granite (tmavě šedá). Rozdílné odstíny jsou viditelné na obrázku 28. Opět obě čočky mají 75% absorpci. Šedé čočky se hodí k řízení motorových vozidel a ke sportům jako je cyklistika, běh, in-line brusle nebo turistika. [36]

Šedé brýlové čočky propouští světlo od 346 nm. První výrazný vrchol se opět nachází okolo 400 nm, kde propustnost pro UV záření stoupá až k 50 %. Poté propustnost klesá a kolísá v závislosti na zbarvení a propustnosti pro dané vlnové délky. Opět propustnost obou šedě zbarvených čoček je téměř stejná, jen světleji zbarvená čočka s názvem Grey propouští o necelých 10 % více modré a zelené záření. Podle očekávání tmavší Granite propouští méně světla než o něco světlejší Grey. Transmittance čočky Grey pro červené světlo je 29,3 %, pro zelené světlo je transmittance rovna 23,3 % a světlo modré tato čočka propouští z 25,6 %. Obdobně Granite propouští červené světlo z 19,5 %, propustnost pro zelené světlo činí 21,3 %

a propustnost pro světlo modré je rovna 19,5 %. Od cca 640 nm propustnost strmě stoupá k 90 %.



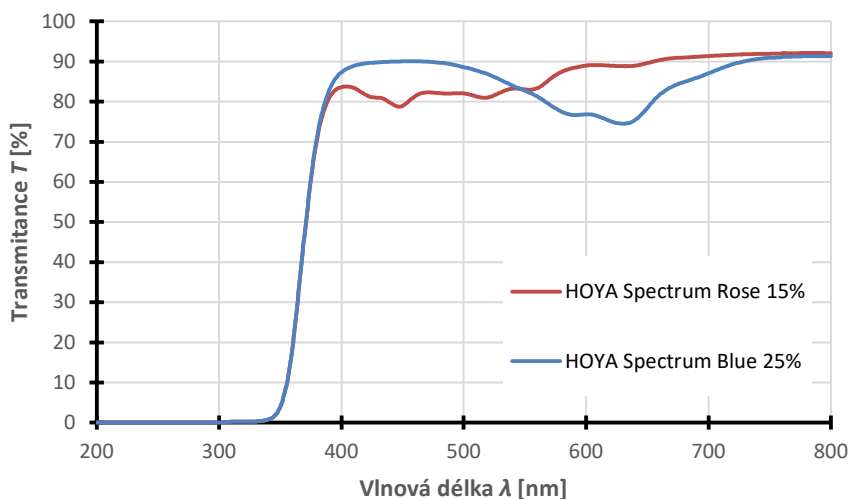
Obrázek 27: Graf transmisivity dvou hnědých čoček.



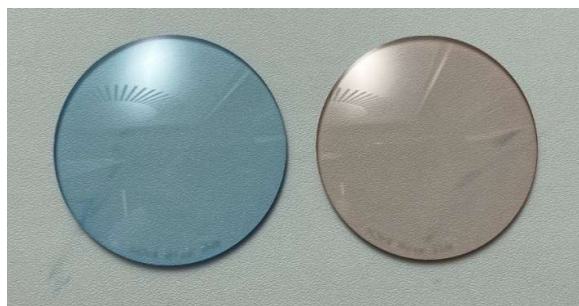
Obrázek 28: Čočka Granite (vlevo) a čočka Grey (vpravo)

Následující graf (obr. 29) zobrazuje propustnost světla pro dvě čočky s nejnižším procentem zabarvení z testovaných absorpčně upravených brýlových čoček značky HOYA a to světlo modrou Blue s 25% zabarvením a pudlově růžová Rose se zabarvením 15 % (viz obr. 30). Modré zabarvení brýlových čoček ocení hlavně tenisté, neboť modrá barva zdůrazňuje kontrast žlutého míčku. Růžová barva blokuje modré světlo a je vhodná pro práci s počítačem. Nevýhodou je velké zkreslení barev. Svě uplatnění najde u lyžování a snowboardingu. [36, 50] Obě čočky blokují UV záření do 342,5 nm, oproti ostatním měřeným čočkám, které začínají propouštět světlo na cca 347 nm. Od 242,5 do 400 nm transmittance strmě stoupá a poté se jejich propustnost pohybuje mezi 75 a 90 %. Díky svému světlému zabarvení mají nejvyšší propustnost ze všech měřených čoček. Spektrální propustnost čiré čočky by se pohybovala okolo 100 %. Pokud je čočka zabarvená, bude určitá část spektra potlačena a jiná část spektra

bude převládat. Toho je důkazem modře zbarvená Blue, která propouští z 90 % modrou část spektra, naopak červené záření je, oproti modrému, výrazně potlačené ($T = 78,5 \%$). Růžová Rose zase dobře propouští červené světlo ($T = 89,6 \%$), a naopak propustnost BČ pro modré záření je 79 %.



Obrázek 29: Graf transitivity dvou světelně zbarvených čoček.

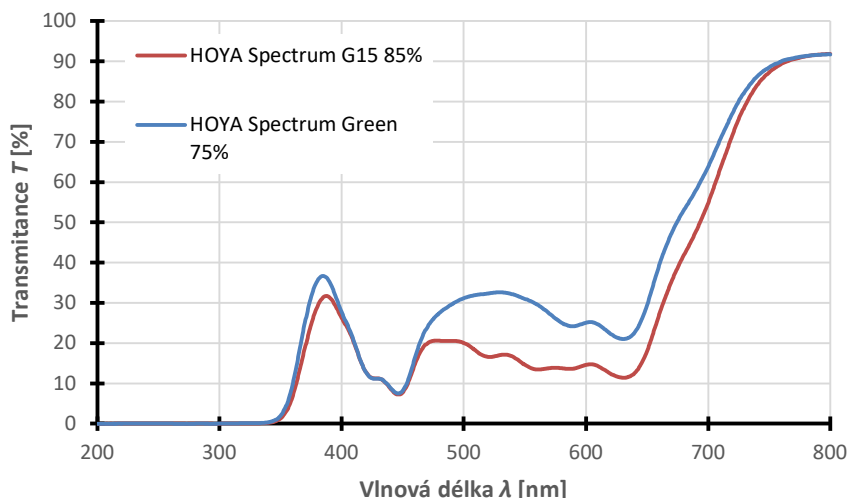


Obrázek 30: Čočka Blue (vlevo) a čočka Rose (vpravo)

Propustnost světla pro dvě tmavě zelené čočky značky HOYA je vyobrazena v grafu na obrázku 31. Zabarvení Green má 75% zabarvení, na rozdíl od tmavě zelené G15 se zabarvením 85 %. Zeleně zbarvené BČ se hodí na golf a obecně zelené zabarvení nezkrsluje barevné vnímání a snižuje oslnění. Další výhodou zelené barvy je blokáce modrého světla a menší únava očí při vysoké intenzitě slunečních paprsků. [21, 50]

Z grafu na obrázku 31 můžeme potvrdit, že čočka Green se 75% absorpcí opravdu propouští více světla než z 85 % zbarvená G15 (viz obr. 32). Od 347 nm (na této vlnové délce obě měřené zelené čočky začínají propouštět světlo) do 390 nm spektrální propustnost stoupá k hodnotám okolo 35 %, od 400 do 450 nm propustnost klesá pod 10 %. Od 460 nm se propustnost pro

zelené záření výrazně liší v závislosti na procentuálním zbarvení (tmavší čočka bude propouštět méně světla). Obě čočky výrazně absorbují modré světlo. Propustnost modrého záření se v obou případech pohybuje okolo 8 %, což je nejmíň ze všech měření. Transmittance pro zelené a červené světlo u světleji zbarvené Green se pohybuje okolo 30 %. Tmavší G15 propouští 14 % zeleného světla a 18 % světla červeného. Od 630 nm hodnoty propustnosti prudce stoupají k 90 %.



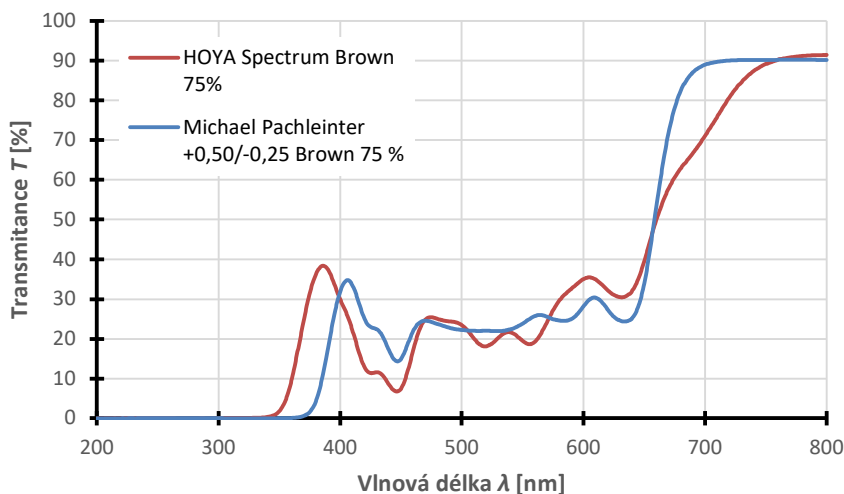
Obrázek 31: Graf transitivity dvou zelených čoček.



Obrázek 32: Čočka Green (vlevo) a čočka G15 (vpravo)

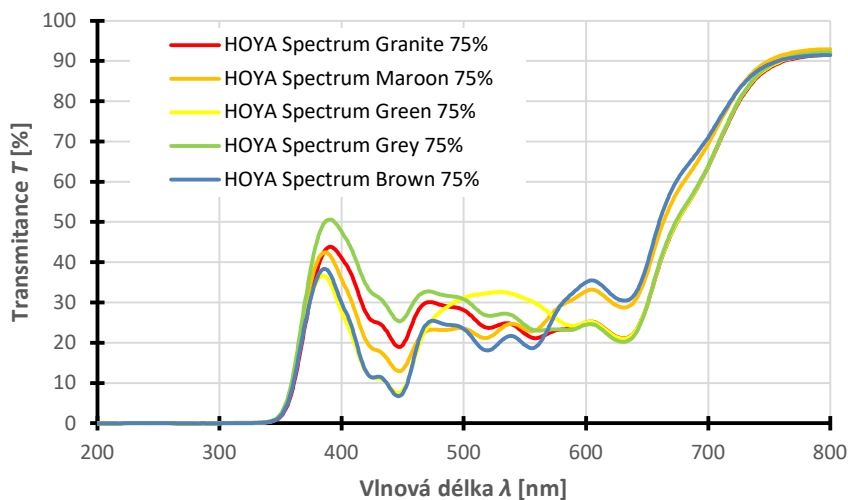
Následující graf (obr. 33) porovnává dvě hnědé brýlové čočky se 75% zbarvením. Čočka značky HOYA má optickou mohutnost rovné nule, oproti čočce Michael Pachleitner (MP), která +0,50 D s cylindrickou hodnotou -0,25 D. Čočka Michael Pachleitner jako jediná ze všech měřených čoček začíná propouštět světlo ve 373 nm. Z grafu vyplývá, že čočka MP má nejvyšší ochranu proti UV záření ze všech měřených čoček. I když jsou obě čočky stejně zbarvené, průběh jejich křivek spektrální propustnosti se mírně liší. Důvodem může být odlišná optická mohutnost, jelikož paprsky světla vycházející ze spektrometru se mohou více rozbíhat na čočce

s vyšší optickou mohutností. Výsledky měření transmittance světla můžou být tedy zkresleny. První výrazný ‚peak‘ se u HOYA čoček nachází na cca 390 nm, oproti čočce MP, která ho má na 410 nm. Hodnoty transmittance MP čočky od 630 do cca 715 nm velmi rychle stoupají k 90 %. Od 720 do 800 nm je propustnost čočky MP rovna 90 %. Čočka Michael Pachleitner propouští méně červeného světla ($T = 34\%$) a více světla modrého ($T = 14,8\%$), oproti čočce HOYA, kterou prochází 39,5 % červeného záření a 7,4 % záření modrého.



Obrázek 33: Graf transmisivity dvou hnědých čoček s rozdílnou optickou mohutností.

Poslední graf vyobrazený na obrázku 34 kapitoly Barvené brýlové čočky porovnává čočky značky HOYA se 75% zbarvením – odstíny Granite, Maroon, Green, Grey a Brown. Všechny porovnávané čočky blokují UV záření do 346 nm a poté začínají postupně propouštět světlo. Na 390 nm se nachází první výrazný vrchol, který klesá stejně rychle, jako stoupá. Propustnost na této vlnové délce se pohybuje od 35 do 50 %. Všechny křivky mají velmi podobný průběh, ale v rozmezí od 400 do 650 nm se propustnost pro dané vlnové délky liší v závislosti na zbarvení brýlové čočky. Od 640 nm všechny křivky strmě stoupají a propustnost na vlnové délce 800 nm přesahuje 90 %. Čočka s nejlepší blokací modrého světla je zelená Green a hnědá Brown, obě čočky nepropustí více jak 8 % modrého záření. Nejvíce propustná čočka pro modré světlo je šedá Grey, která propustí 25,6 %. Pro zelené světlo je, podle očekávání, nejvíce propustná čočka s názvem Green ($T = 30,4\%$). Všechny uvedené čočky propouští více jak 29 % červeného světla; čočka s nejvyšší propustností pro červené záření o vlnové délce je hnědá Brown s transmittancí 39,5 %. Nejméně propustné brýlové čočky pro červenou jsou zelená Green a šedá Grey a Granite, které propustí 29 % červeného záření.



Obrázek 34: Graf transmissivity čoček se 75% zabarvením.

6.2.2 Čočky s reflexní úpravou

Zrcadlová vrstva se především používá jako kosmetická úprava brýlových čoček. Oproti antireflexní vrstvě, která má za úkol zvýšení propustnosti světla a snížení povrchové odrazivosti, reflexní povlaky zvyšují odrazivost daného materiálu. Vytvářejí tak zrcadla, které odrážejí veškeré světlo daného rozsahu vlnových délek dopadající na materiál.

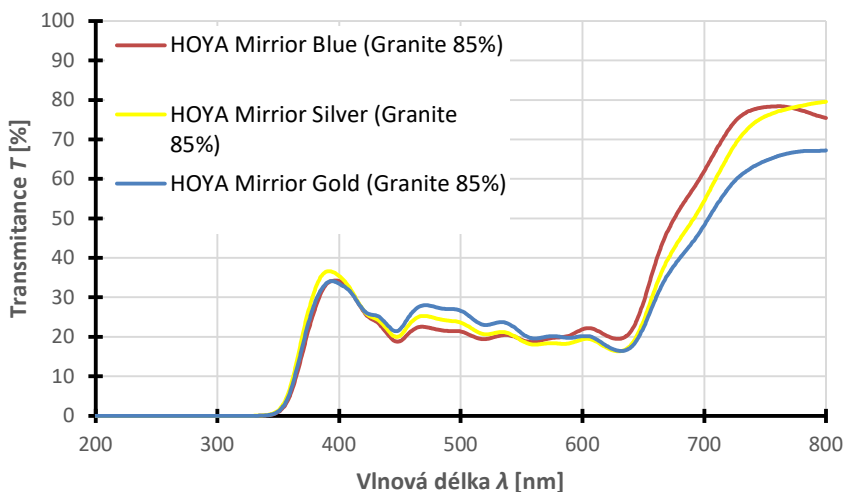
Reflexní vrstvy jsou nanášeny na absorpčně upravenou čočku v odstínu Granite, přičemž celoplošně zrcadlová vrstva je nanášena na čočku s odstínem Granite s 85% zabarvením (odstín Mirrior Blue, Mirrior Silver a Mirrior Gold) a gradientní úprava je nanášena na také gradientně upravené čočky v odstínu Granite s postupným zabarvením v rozsahu 75% - 15% (odstíny Mirrior Light Violet, Mirrior Light Silver, Mirrior Light Copper a Mirrior Light Blue). Všechny reflexně upravené čočky mají antireflexní vrstvu na zadní ploše čočky a nulovou dioptrickou hodnotu.

Celoplošně reflexně upravené čočky HOYA Mirrior jsou nabízeny v odstínech Gold, Blue a Silver. Barevná zrcadlová vrstva může být nanášena na skoro všechny odstíny absorpčně upravených čoček, a to na odstíny Maroon, Granite a Green v rozsahu zabarvení 50 %, 75 % a 85 %, dále mohou být aplikované na odstíny G15 (85% zabarvení) a na odstín G25 (75% zabarvení). Reflexní vrstva může být nanášena na všechny materiály se různými indexy lomu.

Gradientně upravené zrcadlové čočky Light Mirrior jsou dostupné v barvách Silver, Blue, Copper a Violet a mohou být na gradientně zbarvené čočky v odstínech Maroon a Granite

v rozsahu zbarvení 85% - 15% nebo 75% - 15%. Tato povrchová úprava může být aplikována na většinu materiálu s různými indexy lomu.

Tři zrcadlové čočky HOYA Mirrior v odstínech Gold, Silver a Blue jsou porovnávány v grafu níže (obr 35 a 36). Reflexní vrstva je nanášena na šedou čočku v odstínu Granite s 85% zbarvením. Všechny tři čočky začínají propouštět světlo okolo 350 nm (podobně jako absorpčně upravené čočky). Oproti zabarveným čočkám, které propouští infračervené světlo o vlnové délce 800 nm z cca 92 %, každá zrcadlová čočka propouští IR světlo v jiné míře – modrá Blue propouští světlo o vlnové délce 800 nm ze 75,4 %, stříbrná čočka s názvem Silver propouští totéž světlo z 79,5 % a zlatá Gold propouští nejméně tohoto záření, pouze 67,2 %. První výrazný vrchol se nachází na vlnové délce 400 nm a propustnost zde dosahuje 45 %. Do 650 nm mají křivky relativně podobný průběh, poté začnou stoupat. Paradoxně modře upravená čočka propouští nejméně modrého záření ze všech ($T = 18,9\%$). Modrá Blue zároveň propouští nejvíce červeného světla, a to konkrétně z 28,7 %. Stříbrná a zlatá povrchová úprava vykazují mezi sebou podobné výsledky. Zlatá čočka Gold propouští 21,9 % modrého záření a 22,3 % záření červeného, propustnost čočky s názvem Silver pro modré světlo je 20,3 % a propustnost pro světlo červené činí 24 %.



Obrázek 35: Graf transmissivity tří reflexně upravených čoček.



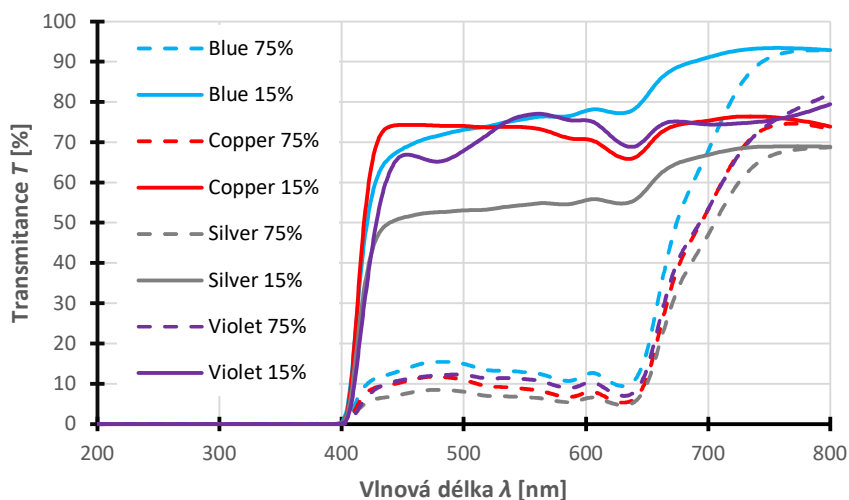
Obrázek 36: Reflexní čočky Blue (vlevo), Gold (uprostřed) a Silver (vpravo)

Následující graf na obrázku 37 porovnávají nejnižší a nevyšší zbarvení u gradientně upravených zrcadlových čoček v odstínech Blue, Copper, Violet a Silver (obr. 38). Reflexní vrstva je ve všech případech nanesená na gradientní šedý odstín Granite, který ze 75% zbarvení postupně přechází na 15%. Měření bylo trochu komplikované, jelikož světelný svazek spektrometru prochází těsně pod středem čočky umístěné ve stojánku a tudíž tímto způsobem nemohly být měřeny gradientní brýlové čočky (obě hodnoty by byly naměřené ve středu BČ a tím pádem i stejné). Aby světelný svazek mohl procházet konkrétní částí čočky, byla čočka ke stojánku připevněna gumičkou. Paprsek tedy neprocházel středem čočky a byl odkloněn.

Všechny čočky z řady HOYA Light Mirrior nejlépe blokují UV záření ze všech měřených čoček, a to do 400 nm bez ohledu na procentuální zbarvení. Díky tomu se na 400 nm neobjevuje ‚peak‘, který byl přítomný u všech čoček HOYA Spectrum se zbarvením 75 % a více. Nejvíce světla propouští modrá Blue, dále fialová Violet a měděná Copper a nejméně světla propouští stříbrná Silver. Propustnost infračerveného záření o vlnové délce 800 nm se u jednotlivých barev liší – modrá čočka propouští 92 %, měděná Copper propouští 74 % a propustnost pro stříbrnou Silver je pod 70 %. Propustnost světla na 800 nm pro 15% a 75% zbarvení u fialové Violet se mírně liší o pár procent, obě hodnoty se však pohybují okolo 80 %.

Křivky znázorňující 75% zbarvení do 650 nm mají velice podobný průběh. Nejvíce světla propouští modrá Blue a nejméně stříbrná Silver. Poté křivky strmě stoupají a hodnoty transmitance na vlnové délce 800 nm se liší. Rozdíl propustnosti mezi maximálním zbarvením modré a stříbrné čočky je necelých 10 %. Významnější rozdíl v propustnosti světla je vidět u minimálních zbarvení. Barva Silver propouští až o 20 % méně záření než všechny ostatní čočky. Modré světlo o vlnové délce $\lambda = 450$ nm stříbrná čočka propouští z 68,4 %, červené záření o vlnové délce $\lambda = 650$ nm propouští z 81,7 %. Minimální zbarvení měděné a fialové čočky vykazují podobné hodnoty propustnosti mezi 65 a 80 %. Měděná Copper zároveň

propouští nejvíce modrého světla ($T = 74,3 \%$). Na 640 nm propustnost nepatrně klesne a potom následně mírně stoupá.

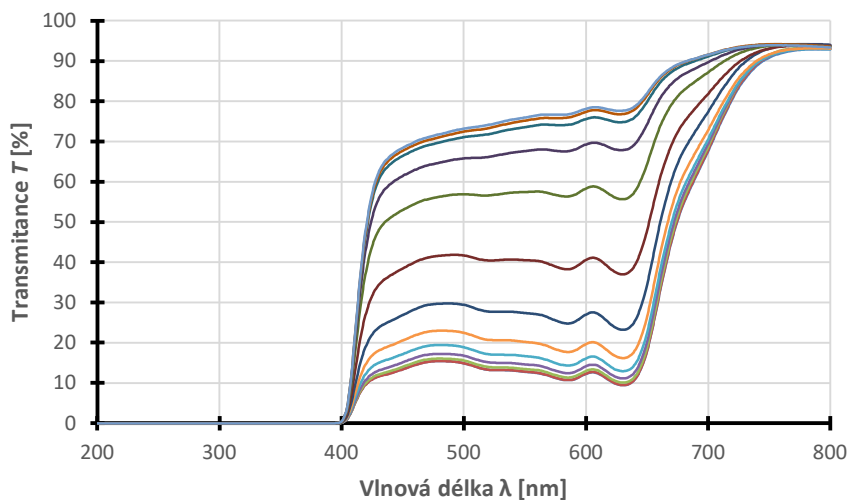


Obrázek 37: Graf transmisivity čtyř gradientních reflexních čoček.



Obrázek 38: Odstín Violet (vlevo), Silver, Copper a Blue (vpravo)

Následující graf na obrázku 39 porovnává propustnost pro různá zbarvení gradientní čočky HOYA Light Mirrior v odstínu Blue. Čočka byla měřena od nejtmaší po nejsvětlejší zbarvení po 15°, dohromady třináct měření (viz obrázek 40). Největší rozdíl propustnosti (více jak 15 %) je vidět ve střední části čočky, kde je přechod barev nejvýraznější. Naopak první tři měření nejtmaší části brýlové čočky jsou téměř totožné, stejně jako poslední tři měření nejsvětlejší části.



Obrázek 39: Graf měření gradientní čočky po 15°.



Obrázek 40: Reflexní gradientní čočka měřená po 15°

6.3 DLC vrstvy

Vrstvy DLC byly připraveny metodou PLD na Akademii věd ČR. Laser použitý při experimentech byl eximerový laser s vlnovou délkou $\lambda = 245$ nm a s opakovací frekvencí $f = 10$ Hz. Experiment byl zaměřen na spektrální propustnost těchto vrstev nanesených na brýlovou čočku z materiálu CR-39 (první část pokusu) a na taveném křemenu (druhá část pokusu). Pro porovnání bylo připraveno vícero vrstev s různým zastoupením diamantu-podobných a grafitu podobných uhlíkových vazeb, které ovlivňují průhlednost vrstvy. Toho bylo docíleno za pomoci různé hustoty laserové energie na terči. Se zvyšující se hustotou laserové energie roste počet sp^3 , neboli diamantu-podobných uhlíkových vazeb, a tím se zvyšuje i průhlednost vrstvy. Tloušťka vrstvy je ovlivňována změnou počtu pulsů.

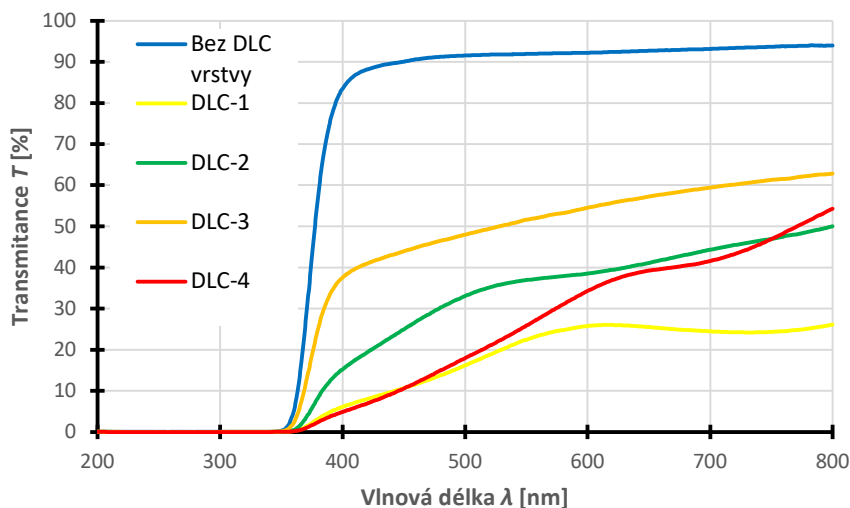
Prvních pět měření DLC vrstev bylo provedeno na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT. Materiál, na který jsou nanášeny DLC vrstvy, je CR-39. Parametry zohledňované

v měření byly optická mohutnost BČ, tloušťka nanesené DLC vrstvy a hustota energie laseru (viz tabulka 3). Čočky s vyšší optickou mohutností mohly více lámat svazek paprsků spektrometru, tudíž mohly ovlivnit výsledek měření.

Tabulka 3: DLC vrstvy

	Název	Optická mohutnost φ [D]	Přibližná tloušťka vrstvy [nm]	Hustota energie laseru [J/cm ²]
1	Bez DLC vrstvy	0	-	-
2	DLC-1	1,5	100	6
3	DLC-2	1,5	100	12
4	DLC-3	0	50	10
5	DLC-4	0	300	10

Na grafu z obrázku 41 je vidět, že největší propustnost světla má čočka bez DLC vrstvy, která má více jak 90% propustnost. Z toho můžeme usoudit, že DLC vrstvy výrazně snižují propustnost světla. Všechny vrstvy začínají propouštět světlo cca od 340 nm, stejně jako měřené brýlové čočky výše. Povlaky (DLC, reflexní i absorpční) jsou nanášeny na CR-39, který jako jediný plastový materiál propouští část UV záření. Čočky s vrstvou DLC-1 a DLC-2 mají obě optickou mohutnost 1,5 D a přibližnou tloušťku vrstvy 100 nm, liší se však hustotou energie laseru. Z grafu vidíme, že DLC-1 propouští až o polovinu méně záření než DLC-2. Důvodem je vyšší zastoupení sp³ vazeb, které způsobují vyšší transparentnost dané vrstvy. DLC-3 a DLC-4 disponují stejnou hustotou energie laseru, avšak rozdílnou tloušťkou nanesené vrstvy. Vrstva s 300 nm tloušťkou, DLC-4, propouští méně záření než 50nm DLC-3.



Obrázek 41: Graf transmissivity DLC vrstev na materiálu CR-39

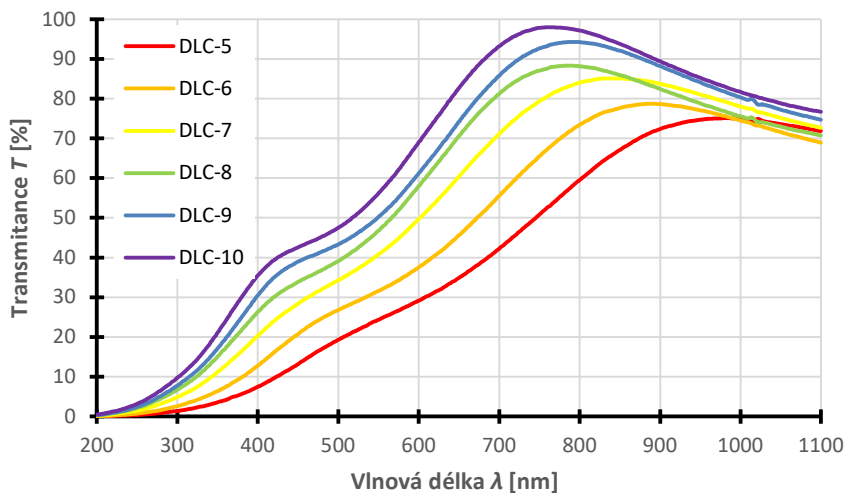
Následující graf na obrázku 42 představuje naměřené propustnosti vrstev DLC. Vrstvy byly připraveny z grafitického terče metodou pulzní laserové depozice (PLD). Podložkou byl tavený křemen (fused silica) velikost 1x1 cm. Vzorčky se liší hustotou energie laserového záření na terči od 4 do 14 J/cm² (tabulka 4). Tloušťka samotných vrstev je 110±8 nm (neboli od 102 do 118 nm). Měřeno na stejném typu spektrometru. Jako reference byl použit tavený křemen a pomocí nastavení spektrometru byla měřena transmissivita přímo samotných DLC vrstev.

Tabulka 4: DLC vrstvy

	Název	Hustota energie laseru [J/cm ²]
6	DLC-5	4
7	DLC-6	6
8	DLC-7	8
9	DLC-8	10
10	DLC-9	12
11	DLC-10	14

Z grafu lze vyčíst, že nejvíce světla propouští vrstva DLC-10, poté propustnost jednotlivých vrstev klesá s klesajícím číslem vzorku. S rostoucí hustotou energie laseru roste i počet sp³ vazeb, tedy i průhlednost. Všechny vrstvy začínají propouštět světlo téměř okamžitě, od cca

230 nm (DLC-10 začíná propouštět světlo od 216 nm, DLC-5 od 286 nm) a tudíž všechny vzorky propouští UVA. Maximální propustnost vrstvy DLC-10 je 98,01 % na 762 nm. Nejmenší propustnost světla má vrstva DLC-5 s hodnotou maximální transmittance je 75,08 % při vlnové délce 983 nm.



Obrázek 42: Graf transmisivity DLC vrstev na taveném křemenu.

7 Diskuse

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na propustnost UV záření a viditelného světla absorpčně a reflexně upravených brýlových čoček a diamantu-podobných uhlíkových vrstev. V této diskusi budou shrnuty výsledky a všechny poznatky z měření.

Všechny absorpčně upravené brýlové čočky začínají propouštět světlo od cca 340 nm a na vlnové délce 400 nm propustnost pro UV záření stoupá až k 50 %. Nejlepší ochranu před UV zářením z barevných čoček měla čočka značky Michael Pachleitner, která blokuje světlo do 373 nm. Propustnost světla na vlnových délkách viditelného světla brýlových čoček (se zabarvením více jak 75 %) se pohybuje od 8 do 40 % v závislosti na barevném odstínu čočky. Od 640 nm průběh křivek stoupá a hodnota propustnosti na 800 nm dosahuje 90 %.

Šedé a hnědé zabarvení jsou nejčastější volbou pro výběr brýlových skel do slunečních brýlí. Oba odstíny nezkrasují barvy, snižují jas a zvyšují kontrast a budou tedy nejlepší volbou pro řidiče. Právě v hnědé a šedé variantě se také nejčastěji vyrábí fototropní a polarizační brýlové čočky. Z měření vyšlo, že hnědá barva výrazně lépe blokuje modré záření (nejlépe ze všech měřených absorpčních čoček). Propustnost pro vlnové délky viditelného spektra u šedé čočky se pohybuje mezi 20 až 30 %, hnědá čočka má propustnost pro modré záření výrazně nižší a pro červenou složku světla zase výrazně vyšší než šedá čočka.

Studie jihoafrické univerzity KwaZulu Natal z roku 2012, která se zabývala kontrastní citlivostí a barevným viděním skrz absorpčně upravené brýlové čočky ukázala, že vidění přes šedě a hnědě zbarvenou čočku se 75% zabarvením nijak výrazně nemění barevné vidění. 73,3 % probandů uvedlo, že nevnímají rozdíl barevného vidění přes obě zbarvené čočky v porovnání s čirou čočkou. Zlepšení vnímání barev přes hnědou čočku uvedlo 17,8 % probandů, 8,9 % naopak uvádí, že se jim barevné vidění přes hnědou čočku zhoršilo. Obdobné výsledky jsou i u šedě zbarvené čočky, 21,1 % dotázaných subjektivně pociťují zlepšení vidění barev a zbylých 5,6 % uvádí zhoršení barevného vidění. Výzkum tedy dokázal, že koukání přes hnědě a šedě zbarvenou čočku nemá vliv na kvalitu barevného vidění, a tudíž sluneční brýle v šedém nebo hnědém zabarvení jsou univerzální volbou jak pro řidiče, tak pro denní nošení.

Světle zbarvené absorpčně upravené čočky (15% nebo 25% zbarvení) podle očekávání propouští významně více světla než ze 75 nebo 85 % zbarvené brýlové čočky. Propustnost pro tyto světlé odstíny se pohybuje v rozmezí 75 až 90 %. Brýlové čočky s takto nízkým

zabarvením se však nehodí pro řidiče ani pro dlouhodobé aktivity na přímém slunečním osvětlení.

U celoplošně upravených čoček byla reflexní vrstva nanесena na šedou čočku s 85 % zbarvením. Tři měřené čočky blokují UV záření do 350 nm a na 400 nm propouští záření z 33 %. Průběh všech tří křivek je velmi podobný, propustnost přes tyto čočky pro vlnové délky, které jsou schopné dopadnout na receptory sítnice lidského oka, se pohybuje od 15 do 30 %. Opět od 640 nm propustnost IR záření stoupá, míra propustnosti konkrétních čoček na 800 nm se pohybuje od 67 do 90 %. Z měření také vyšlo, že barva reflexního povrchu nemá velký vliv na propustnosti dané brýlové čočky, protože křivky znázorňující propustnost měly relativně podobný průběh na všech vlnových délkách.

Gradientně upravené reflexní čočky vykazovaly nejlepší absorpci proti UV záření ze všech měřených brýlových čoček, propouštět světlo totiž začínají od 400 nm. Reflexní vrstva byla nanесena na šedou čočku s postupným barevným přechodem ze 75 na 15 %. Hodnoty transmitance maximálního zbarvení se pohybovaly mezi 5 a 15 %. Významné rozdíly jsou však viditelné u 15% zbarvení, kde propustnost jednotlivých barevných čoček se lišila až o 20 %. Nejnižší propustnost měla stříbrně zbarvená čočka, jejíž transmitance se pohybovala mezi 50 až 60 % (u minimálního zbarvení), u maximálního zbarvení nestoupala hodnota propustnosti nad 10 %. Propustnost minimálního zbarvení pro fialové, modré a měděné zbarvení se pohybovala okolo 75 %.

Cílem bakalářské práce bylo naměřit a porovnat propustnost absorpčních a brýlových čoček. Z měření vyšlo, že valná většina měřených čoček nemá dostatečnou ochranu proti UV záření, což je jeden z hlavních požadavků pro sluneční brýle. Naopak podle očekávání se potvrdilo, že barva a procento zbarvení mají vliv na průběh transmitance na různých vlnových délkách.

Dalším cílem práce bylo potvrdit, že by se DLC vrstvy mohly v budoucnu používat jako povrchové úpravy brýlových čoček. Z měření vyšlo najevo, že propustnost DLC vrstev závisí na hustotě energie laserového svazku a na tloušťce dané vrstvy. Diamantu-podobné uhlíkové vrstvy nanесené na materiálu CR-39 začínají propouštět od 340 nm (CR-39 blokuje část UV záření). DLC vrstvy nanесené na tavený křemen (tavený křemen byl použit jako reference, tudíž naměřená transmisivita je transmisivita přímo samotných DLC vrstev) propouštějí světlo téměř okamžitě (od 200 nm). Nejvyšší spektrální propustnosti (až 90 %) docílily vrstvy s vysokými hodnotami hustoty energie laseru (14 J/cm^2). Podobné výsledky naměřila i Bc. Lucie Portová ve své bakalářské práci s názvem *Povrchové úpravy brýlových čoček* z roku

2018, která kromě propustnosti měřila také tribologické vlastnosti diamantu-podobných uhlíkových vrstev. Otěruvzdornost diamantu-podobných uhlíkových vrstev je velmi vysoká a srovnatelná s dnes nejlepšími připravovanými povrchovými úpravami. Výhodou DLC vrstev oproti ostatním vrstvám je, že propustnost roste skrz celou viditelnou oblast pozvolna. Kombinací DLC vrstvy a základního materiálu na výrobu brýlových čoček bude čočka blokovat UV záření a zároveň pozvolna propouštět viditelné světlo. DLC vrstvy s nižší hustotou energie svazku by mohly v budoucnu představovat povrchovou úpravu pro sluneční brýlové čočky díky svým skvělým optickým a tribologickým vlastnostem.

8 Závěr

Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na základní fyzikální vlastnosti optických prostředí a materiálů, ze kterých se brýlové čočky vyrábí. Podrobně popsány jsou jak materiály minerální, tak i v dnešní době více používané organické materiály, jejich optické i mechanické vlastnosti a jejich výhody či nevýhody. Dále jsem provedla rešerši, jak z názvu bakalářské práce vyplývá, na povrchové úpravy brýlových čoček. Zaměřila jsem se na antireflexní, tvrdící, samočistící, absorpční a reflexní úpravy a dále na čočky polarizační a fototropní. Na základě této rešerše byla navržena praktická část.

Experimentální část bakalářské práce se zabývá transmisivitou běžně dostupných absorpčně a reflexně upravených brýlových čoček a DLC vrstvami. Cílem práce bylo zjistit, jak jednotlivá zbarvení nebo povrchové úpravy ovlivňují spektrální propustnost čoček. K měření transmisivity byl použit goniometr na půdě Fakulty biomedicínského inženýrství. Naměřené čočky byly porovnávány na základě barvy (hnědá, šedá, zelená...) nebo procentuálního zbarvení (většinou 75 %) a poté vneseny do grafů.

Cílem bakalářské práce bylo porovnat absorpční, reflexní a DLC vrstvy. Jelikož samotný materiál CR-39 neblokuje dostatečně UV záření, většina měřených povrchově upravených brýlových čoček propouští část UV spektra. Pouze čtyři z patnácti měřených brýlových čoček dostatečně blokují UV záření do 400 nm. Ostatní čočky začínají propouštět světlo od cca 340 nm, u některých čoček propustnost na vlnové délce okolo 390 nm stoupá dokonce až k 50 %. Nejlepší blokaci modrého záření mají čočky hnědé, které propouští méně než 10 % záření, naopak nejvíce modrého světla propouští šedě zbarvené čočky (okolo 25 %). Obě nejčastěji používané zbarvení, hnědé i šedé, vykazují dobrou, avšak logicky rozdílnou propustnost.

Jednotlivé barevné povrchové úpravy mají vliv na propustnost reflexních, gradientně upravených brýlových čoček (reflexní vrstva byla nanášena na šedou gradientní čočku se zbarvením od 75 do 15 %). Nejlépe je to vidět u nejnižšího (15%) zbarvení, kde se rozdíl propustností liší až o 20 %. Naopak barva reflexního povlaku nemá tak významný vliv na propustnost u čoček se 75 nebo 85% zbarvením. Právě gradientní reflexní čočky jako jediné z měřených čoček blokují UV záření do 400 nm.

DLC vrstvy prokázaly velmi dobrou propustnost na celém spektru vlnových délek. Samotné diamantu-podobné uhlíkové vrstvy propouští UV záření téměř okamžitě (od 200 nm), v kombinaci s materiálem CR-39 blokují světlo do 340 nm. S rostoucí hustotou energie

laserového svazku zároveň roste i míra propustnosti záření, avšak i čočka s nejnižší hustotou energie laseru (4 J/cm^2) vykazuje maximální propustnost 75 %. Diamantu-podobné uhlíkové vrstvy jsou zároveň velmi ořeru-vzdorné a poskytují skvělé tribologické vlastnosti. V budoucnu by právě brýlové čočky blokující UV záření s DLC povrchovou úpravou mohly být používány jako ochrana proti slunečnímu záření právě díky výborným optickým a tribilogickým vlastnostem.

Seznam použité literatury

- [1] ALONSO, José, José A. GÓMEZ-PEDRERO a Juan Antonio QUIROGA. *Modern ophthalmic optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-1-107-11074-8.
- [2] HEITING, Gary. Lens coatings: Anti-reflective, scratch resistant, anti-fog, UV. All About Vision [online]. 2020, srpen 2017 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.allaboutvision.com/lenses/coatings.htm>
- [3] JELÍNEK, Miroslav, Leopold CUDZIK, Jan REMSA, Veronika VYMĚTALOVÁ, Helena JELÍNKOVÁ a Tomáš KOCOUREK. *Biofotonika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05709-4.
- [4] Lens materials. Laramy-K Optical Lab [online]. 2010 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.laramyk.com/resources/education/lens-options-and-materials/lens-materials/>
- [5] Materiál brýlových čoček. Optikabystrice.cz. [online]. Dostupné z: <https://www.optikabystrice.cz/brylove-cocky-material.html>
- [6] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).
- [7] BAŠTECKÝ, Richard. *Praktická brýlová optika*. Praha: R H Optik, 1997
- [8] BHOOTRA, Ayay Kumar. *Ophthalmic lenses*. Jaypee Brothers, Medical Publishers Pvt. Limited, 2009. ISBN 8184486049, 9788184486049
- [9] FOX, M. *Optical Properties of Solids (Oxford Master Series in Physics, 3)* (2nd ed.). Oxford University Press, 2010. ISBN 9780199573370
- [10] NAYAN, S. a OKE, I. Lens Material Properties. EyeWiki [online]. 2020 [cit. 2021-11-5]. Dostupné z: https://eyewiki.ao.org/Lens_Material_Properties
- [11] NAJMAN, Ladislav. *Dílenská praxe očního optika*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2001. ISBN 80-7013-328-7.
- [12] ALIOFKHAZRAEI, M., *Wetting and Wettability*, ed. 1, InTech, 2015, ISBN 978-953-51-2215-9

- [13] Development and implementation of creative, solutive and smart teaching (CS2T) to improve 21 st century capability on wave and optics. In: ResearchGate [online]. 2019 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dispersion-of-light-by-the-glass-prism_fig1_337443690
- [14] Měření smáčivosti. Katedra makromolekulární fyziky, UK MFF. [online]. Dostupné z: <https://kmf.troja.mff.cuni.cz/okno/vyzkum.php?idv=26>
- [15] BERG, J. (Ed.). (1993). Wettability (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482277500>
- [16] MEISTER, Darryl a James E. SHEEDY. Introduction to Ophthalmic Optics. 5. Carl Zeiss Vision, 2004.
- [17] K. RÉVAYOVÁ: Povrchové úpravy brýlových čoček. Kladno 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Petr Písařík
- [18] Brýlové čočky | Easy Optic. *Elegantní dioptrické a sluneční brýle* | Easy Optic [online]. Copyright © Easy Eye Wear s.r.o. Všechna práva vyhrazena [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.easyoptic.cz/brylove-cocky/>
- [19] Základní dělení plastů. *Pedagogická fakulta MU* [online]. Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wtech/petrik/pracestechnickymimaterialy/plasty/zakladnideleniplastu.html>
- [20] RUBIN, Melvin L. Spectacles: Past, present, and future. Survey of Ophthalmology [online]. 1986, 30(5), 321-327 [cit. 2021-10-24]. ISSN 00396257. Dostupné z: doi:10.1016/0039-6257(86)90064-0
- [21] VESELÝ, Petr, Peter ŠIMOVIČ a Sylvie PETROVÁ. *Konvenční a free-form technologie výroby brýlových čoček*. Brno: Národní centrum ošetřovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2014. ISBN 978-80-7013-566-2.
- [22] RANDULOVÁ, J., Sklo a plasty jako materiály brýlových čoček, povrchové úpravy brýlových čoček, 2010, Brno, Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně
- [23] Manufacturing: Materials selection. Open Learn [online]. 1999 [cit. 2020-11-9]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/designinnovation/manufacturing/content-section-7.9>

- [24] Essilor. Ophthalmic optics files. [online]. Coatings [online]. 2011 [cit. 2021-11-28]
Dostupné z: <https://www.essiloracademy.eu/sites/default/files/10.Coatings.pdf>
- [25] A Simple Guide to Eyeglass Lens Coatings | Vision Source. *Vision Source: Premier Network of Independent Optometrists* [online]. Copyright © 2010 [cit. 08.12.2021].
Dostupné z: <https://visionsource.com/blog/eyeglass-lens-coatings/>
- [26] Kalení skla, Tvrzení skla, Bezpečnostní sklo | IMAGE GLASS. Sklo pro moderní interiér | IMAGE GLASS [online]. Dostupné z: <https://www.imageglass.cz/kaleni-skla/>
- [27] Manufacturing: Anti-reflective coatings. Open Learn [online]. 1999 [cit. 2021-11-10].
Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/designinnovation/manufacturing/content-section-7.11>
- [28] Büyükyıldız HZ. Coatings and Tints of Spectacle Lenses. *Turk J Ophthalmol* 2012;42:359-369. [online]. Copyright © Galenos Publishing House. [cit. 12.12.2021].
Dostupné z: <https://www.ofthalmoloji.org/archives/archive-detail/article-preview/gzlk-cami-kaplamalari-ve-renkli-camlar/3961>
- [29] Polarizace světla | Eduportál Techmania. *Eduportál | Eduportál Techmania* [online]. Copyright © Techmania Science Center o.p.s. [cit. 11.05.2022]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/polarizace-svetla>
- [30] DAOUD, Walid A. Self-Cleaning Materials and Surfaces: A Nanotechnology Approach [online]. Spojené Království: Chichester : John Wiley, 2013, 368 s. [cit. 2021-12-12]. ISBN 978-1-118-65236-7.
- [31] HEITING, Gary. Lens coatings: Anti-reflective, scratch resistant, anti-fog, UV. All About Vision [online]. 2020, srpen 2017 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.allaboutvision.com/lenses/coatings.htm>
- [32] Optik Skrbková - Kdo lépe vidí, více vidí. *Optik Skrbková - Kdo lépe vidí, více vidí* [online]. Copyright © [cit. 15.12.2021]. Dostupné z: <https://www.optikskrbkova.cz/uzitecne-informace/slovnicek-odbornych-vyrazu/samozabarvovaci-brylove-cocky>
- [33] GLIEMEROTH, G. and MADER, K.-H. (1970), Phototropic Glass. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 9: 434-445. <https://doi.org/10.1002/anie.197004341>

- [34] ZEISS Polarizované sluneční brýlové čočky. *301 Moved Permanently* [online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/vision-care/zeiss-vyrobky/slunecni-brylove-cocky/polarizovane-slunecni-brylove-cocky.html#what>
- [35] L. PORTOVÁ: Povrchové úpravy brýlových čoček. Kladno 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Petr Písařík
- [36] Sluneční brýle - jak vybrat správný odstín - Moderní optika. *Moderní optika - online magazín o Vašem zraku a všem co s ním souvisí* [online]. Copyright © 2019 [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://www.modernioptika.cz/slunecni-bryle/jak-vybrat-spravny-odstin-slunecnich-bryli/>
- [37] Highly Reflective Coatings. Edmund Optics: Worldwide [online]. [cit. 2021-12-7]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/applicationnotes/optics/highly-reflective-coatings/>
- [38] Interference vln: shrnutí (článek) | Khan Academy. *Khan Academy | Bezplatné online kurzy, lekce a cvičení* [online]. Copyright © 2021 Khan Academy [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-vlneni-a-zvuk/x34b3f391df7f0014:mechanicke-vlneni/x34b3f391df7f0014:interference-vlneni/a/wave-interference-ap1>
- [39] World Optic - Mirror Coatings for Lenses. *Broken Eyeglasses Repairs, Fixing Sunglasses Lenses, Modifying Prescription Eyewear* [online]. Copyright © [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://www.worldoptic.com/sunglasses-eyeglasses-lens-tints-coatings/mirror-coatings.php>
- [40] *The Differences in Lens Types for Glasses in Chicago*. (2021, April 17). Gerstein Eye Institute. [online]. Dostupné z: <https://www.gersteineye.com/blog/2018/12/the-differences-in-lens-types-for-glasses/>
- [41] GALLAGHER, Richard & LEE, Tim & BAJDIK, Chris & BORUGIAN, Marilyn. (2010). Ultraviolet radiation. Chronic diseases in Canada. 29 Suppl 1. 51-68. 10.24095/hpcdp.29.S1.04.
- [42] HUBÁČEK, T. a ŠVORČÍK, V. 2016. Příprava a vlastnosti tenkých uhlíkových vrstev. *Chemické listy*. 110, 6 (čer. 2016), 430-439.
- [43] PÍSAŘÍK, P., JELÍNEK, M., SMETANA, K., DVOŘÁNKOVÁ, B., KOCOUREK, T., ZEMEK, J., & CHVOSTOVÁ, D. (2012). Study of optical properties and

- biocompatibility of DLC films characterized by sp³ bonds. *Applied Physics A*, 112(1), 143–148. <https://doi.org/10.1007/s00339-012-7216-8>
- [44] JELÍNEK, Miroslav. Laserová depozice tenkých vrstev pro biomedicínu. Praha, 2008. ČVUT FJFI.
- [45] PÍSAŘÍK, Petr. Biokompatibilní materiály – Uhlík [přednáška]. Kladno: ČVUT v Praze, 2021.
- [46] EASON, R. (Ed.). (2006). Pulsed Laser Deposition of Thin Films [online]. [cit. 2022-4-9] Dostupné z: [doi:10.1002/0470052120](https://doi.org/10.1002/0470052120)
- [47] UV-2600i, UV-2700i: UV-VIS-NIR Spectrophotometer. Shimadzu [online]. 2021 [cit. 2022-3-27]. Dostupné z: <https://www.shimadzu.com/an/products/molecularspectroscopy/uv-vis/uv-vis-nir-spectroscopy/uv-2600i-uv-2700i/index.html>
- [48] PILLAY, Rayishnee, Rekha HANSRAJ a Nishanee RAMPERSAD. Historical Development, Applications and Advances in Materials Used in Spectacle Lenses and Contact Lenses. *Clinical Optometry* [online]. 2020, 12, 157-167 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1179-2752. Dostupné z: [doi:10.2147/OPTO.S257081](https://doi.org/10.2147/OPTO.S257081)
- [49] Hoya 2021 catalogue. [online]. Dostupné z: <http://hoyalens.co>
- [50] Barvy slunečních čoček. *OptikDoDomu.cz* [online]. Copyright © 2009 [cit. 24.04.2022]. Dostupné z: <https://optikdodomu.cz/zrakove-testy/barvy-slunecnich-cocek>
- [51] SHAIK, M., MAJOLA, P., NKGARE, L., NENE, N., SINGH, C., HANSRAJ, R., & RAMPERSAD, N. (2013). The effect of tinted spectacle lenses on contrast sensitivity and colour vision. *African Vision and Eye Health*, 72(2), 61-70. [doi:https://doi.org/10.4102/aveh.v72i2.51](https://doi.org/10.4102/aveh.v72i2.51)
- [52] Robertson, J. (2002) Diamond-Like Amorphous Carbon. *Materials Science and Engineering: R*, 37, 129-281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)

Seznam symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
BČ	Brýlová čočka
PC	Polykarbonát
CR-39	Columbia Resin
DLC	Diamond-like carbon
PMMA	Polymethylmethakrylát
UV	Ultrafialové (ultraviolet) záření
PVD	Physic Vapour Deposition
LP-CVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma-enhanced Chemical Vapour Deposition
AR	Antireflex
IR	Infračervené (infrared) záření
HR	High Reflective (vysoce reflektivní vrstva)
PLD	Pulsed Laser Deposition
VIS	Viditelné (visible) světlo

Seznam obrázků

Obrázek 1: Disperze na optickém hranolu. [13].....	8
Obrázek 2: Světlo procházející látkou. [3]	11
Obrázek 3: Polarizace světla. [29].....	12
Obrázek 4: Kontaktní úhel. a) skoro úplná smáčivost ($\theta \approx 0^\circ$) b) dobrá smáčivost ($\theta < 90^\circ$) c) špatná smáčivost ($\theta > 90^\circ$) d) téměř nesmáčivý povrch ($\theta \approx 180^\circ$) [12].....	13
Obrázek 5: Systém povrchových úprav na plastové čočce. [21].....	18
Obrázek 6: Dip coating. [21]	20
Obrázek 7: Spin coating. [21].....	20
Obrázek 8: Princip antireflexní vrstvy. [21].....	22
Obrázek 9: Účinek jednovrstevné a vícevrstevné antireflexní úpravy. [21]	22
Obrázek 10: PVD. [21].....	23
Obrázek 11: Schéma plazmatického napařování. [21]	25
Obrázek 12: Pevné a povrchové barvení. [21]	26
Obrázek 13: Hromadné barvení brýlových čoček. [21]	27
Obrázek 14: Míchání barev při barvení brýlových čoček. [21].....	28
Obrázek 15: Gradientní brýlová čočka. [21]	28
Obrázek 16: Antistatická vrstva u čočky vpravo. [21].....	31
Obrázek 17: Fototropní čočka. [18].....	32
Obrázek 18: Reakce spiro-oxazinových molekul u fototropních plastových čoček. [21].....	34
Obrázek 19: Čočka s reflexní úpravou. [21]	36
Obrázek 20: Hybridizace uhlíku [52].....	37
Obrázek 21: Schéma laserové depozice (1 - laserový svazek, 2 - odražeč, 3 - čočka, 4 - vstupní okno depoziční komory, 5 - karusel, 6 - topný stolek s podložkou, 7 - vakuový čerpací systém, 8, 9 - vakuové měřky) [44]	38
Obrázek 22: Spektrometr [47]	39
Obrázek 23: Graf transmisivity hnědé a šedé čočky.	42
Obrázek 24: Graf vlivu zbarvených čoček na barevné vidění, upraveno [51]	43
Obrázek 25: Graf transmisivity dvou hnědých čoček	44
Obrázek 26: Čočka Maroon (vlevo) a čočka Brown (vpravo)	44
Obrázek 27: Graf transmisivity dvou hnědých čoček.	45
Obrázek 28: Čočka Granite (vlevo) a čočka Grey (vpravo).....	45
Obrázek 29: Graf transmisivity dvou světle zbarvených čoček.	46

Obrázek 30: Čočka Blue (vlevo) a čočka Rose (vpravo)	46
Obrázek 31: Graf transmisivity dvou zelených čoček.....	47
Obrázek 32: Čočka Green (vlevo) a čočka G15 (vpravo)	47
Obrázek 33: Graf transmisivity dvou hnědých čoček s rozdílnou optickou mohutností.	48
Obrázek 34: Graf transmisivity čoček se 75% zabarvením.....	49
Obrázek 35: Graf transmisivity tří reflexně upravených čoček.....	50
Obrázek 36: Reflexní čočky Blue (vlevo), Gold (uprostřed) a Silver (vpravo)	51
Obrázek 37: Graf transmisivity čtyř gradientních reflexních čoček.....	52
Obrázek 38: Odstín Violet (vlevo), Silver, Copper a Blue (vpravo).....	52
Obrázek 39: Graf měření gradientní čočky po 15°	53
Obrázek 40: Reflexní gradientní čočka měřená po 15°	53
Obrázek 41: Graf transmisivity DLC vrstev na materiálu CR-39	55
Obrázek 42: Graf transmisivity DLC vrstev na taveném křemenu.	56

Seznam tabulek

Tabulka 1: Měřené čočky s absorpční úpravou.	40
Tabulka 2: Měřené reflexní čočky (pokračování tabulky 1).	41
Tabulka 3: DLC vrstvy	54
Tabulka 4: DLC vrstvy	55