

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
BIOMEDICÍNSKÉHO
INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2021

**KAMILA
RÉVAYOVÁ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra přírodovědných oborů

Povrchové úpravy brýlových čoček

Surface treatment of spectacle lenses

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Optika a optometrie

Autor bakalářské práce: Kamila Révayová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Písařík, PhD.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jan Mikšovský, PhD

Kladno 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Révayová** Jméno: **Kamila** Osobní číslo: **486898**
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:

Povrchové úpravy brýlových čoček

Název bakalářské práce anglicky:

Surface treatment of spectacle lenses

Pokyny pro vypracování:

V rámci práce proveďte rešerši historicky a dnes používaných materiálů pro přípravu brýlových čoček a zhodnoťte jejich základní výhody a nevýhody. Poté se zaměřte na povrchové úpravy brýlových čoček (antireflexní vrstvy, absorpční vrstvy, reflexní a samočisticí vrstvy) a jejich způsoby přípravy, důležité vlastnosti a principy použití. V rámci praktické části změřte transmisivitu čoček pomocí UV-VIS spektrometru od firmy Shimadzu a kontaktní úhel pomocí goniometru od firmy Krüss. Proveďte vyhodnocení naměřených výsledků a porovnání s dostupnou literaturou.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ALIOFKHAZRAEI, M., Wetting and Wettability, ed. 1, InTech, 2015, ISBN 978-953-51-2215-9
- [2] RANDULOVÁ, J., Sklo a plasty jako materiály brýlových čoček, povrchové úpravy brýlových čoček, 2010, Brno, Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně
- [3] 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

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: **15.02.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**


prof. RNDr. MUDr. Petr Maršálek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
podpis děkana(ky)

Název bakalářské práce: Povrchové úpravy brýlových čoček

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá povrchovými úpravami brýlových čoček a materiály používanými k jejich výrobě dříve a nyní. Zaměřuje se hlavně na antireflexní, absorpční, reflexní a samočistící vrstvy, způsoby přípravy těchto vrstev, jejich důležité vlastnosti a principy použití. Praktická část je poté zaměřena na hodnocení vlastností brýlových čoček a jejich povrchových úprav. Konkrétně se zabývá měřením transmisivity a smáčivosti běžných brýlových čoček a čoček s vrstvou oxidu titaničitého.

Klíčová slova:

Brýlová čočka, povrchové úpravy, smáčivost, transmisivita, samočistící povrchy

Bachelor's thesis title: Surface treatment of spectacle lenses

Abstract:

This bachelor's thesis deals with surface treatment of spectacle lenses and with materials used for spectacle lenses then and now. It focuses mainly on antireflective, absorbent, reflective and self-cleaning coatings, methods of preparation of these coatings, their important properties and principled use. The practical part is focused on the evaluation of the properties of spectacle lenses and their surface treatments. Specifically, it deals with the measurement of transmissivity and wettability of conventional spectacle lenses and lenses with a TiO₂ layer.

Key words:

Spectacle lens, surface treatments, wettability, transmissivity, self-cleaning surfaces

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Ing. Petru Písaříkovi, PhD. za pomoc, jeho cenné rady a trpělivost při mé práci a jejím vedení. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi práce Ing. Janu Mikšovskému, PhD. za pomoc při měření experimentální části, získávání dat a za ochotu.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „*Povrchové úpravy brýlových čoček*“ 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	1
2	Historie	2
3	Základní vlastnosti.....	4
3.1	Index lomu.....	4
3.2	Abbeovo číslo.....	4
3.3	Odrazivost	5
3.4	Absorpce.....	5
3.5	Propustnost.....	6
3.6	Disperze.....	6
3.7	Specifická hmotnost (relativní hustota).....	7
3.8	Smáčivost povrchu	7
4	Materiály.....	9
4.1	Minerální materiály	9
4.1.1	Sklo	9
4.2	Organické materiály	10
4.2.1	CR-39.....	10
4.2.2	Polykarbonát	11
4.2.3	Polymethylmethakrylát.....	12
4.2.4	Trivex.....	12
4.3	Vysokoindexové materiály.....	13
5	Povrchové úpravy	15
5.1	Tvrzení	15
5.1.1	Tvrzení minerálních brýlových čoček	16
5.1.2	Tvrzení organických brýlových čoček.....	17
5.2	Antireflexní vrstva.....	18

5.2.1	Způsob nanášení	19
5.3	Absorpční vrstva (barvení).....	20
5.3.1	Barvení minerálních brýlových čoček	22
5.3.2	Barvení organických brýlových čoček	23
5.4	Reflexní vrstva (zrcadlová).....	24
5.4.1	Způsob nanášení	25
5.5	Samočistící vrstva	25
5.5.1	Hydrofobní a hydrofilní vrstva	25
5.5.2	Protizamlžovací vrstva (antifog).....	27
6	Experimentální část	29
6.1	Vrstvy TiO ₂	29
6.1.1	Pulsní laserová depozice	31
6.2	Měření	32
6.2.1	Spektrometr.....	32
6.2.2	Goniometr	33
6.3	Testované čočky	36
6.4	Výsledky měření	38
6.4.1	Transmisivita	38
6.4.2	Smáčivost.....	46
7	Diskuse	49
8	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury	53
	Seznam zkratek	59
	Seznam obrázků.....	60
	Seznam tabulek	62

1 Úvod

Zrak je nejdůležitějším lidským smyslem. Díky zraku přijímáme 80 % podnětů z okolí – očima sledujeme dění okolního života, barvy, tvary, světlo, pomáhá nám s komunikací či orientací v prostoru. Náš zrak bereme jako samozřejmost, dokud nepozorujeme výraznější zhoršení. Asi polovina populace má nějaké refrakční vady, ale dnes již naštěstí existuje mnoho cest, jak tento problém vyřešit. Od brýlí, přes kontaktní čočky, až po refrakční operace. Nejčastějším a nejdostupnějším řešením špatného vidění jsou ale stále brýle. Ty vznikly sice už před dávnou dobou, ale materiály, z nichž se vyrábějí brýlové čočky, i samotné brýle prošly obrovským rozvojem. Dnes už se těžké skleněné čočky vyměňují za lehké a tenké plastové. Cílem je co největší pohodlí nositele brýlí, které mohou ještě zlepšit povrchové úpravy brýlových čoček. Povrchové úpravy hrají velmi důležitou roli jak v komfortu nositele, tak v ochraně a zlepšení jeho zraku.

V této práci se zabývám povrchovými úpravami brýlových čoček. Úvodní kapitola se zabývá historií brýlových čoček a jejich vývojem. V další kapitole představuji základní parametry materiálů brýlových čoček, na které je potřeba brát ohled při jejich výrobě a hodnocení. Kapitola čtvrtá pojednává přímo o materiálech používaných k výrobě brýlových čoček, o materiálech minerálních a organických. V páté, a zároveň poslední kapitole teoretické části, se zaměřuji na samotné povrchové úpravy – tedy tvrzení, antireflexní vrstvy, absorpční, reflexní a samočisticí vrstvy – a způsoby nanášení těchto vrstev. Na základě této rešerše byl proveden experiment.

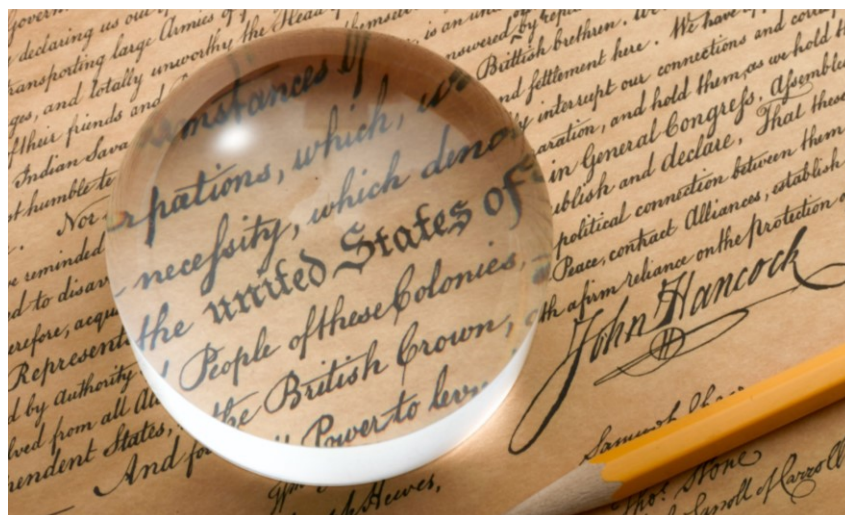
Experimentální část této bakalářské práce se zabývá transmisivitou a smáčivostí běžně dostupných brýlových čoček a čoček s vrstvou TiO_2 . Cílem experimentu je zjistit, jak jednotlivé povrchové úpravy ovlivňují propustnost i smáčivost brýlových čoček. Po naměření těchto čoček budou získaná data vyhodnocena.

2 Historie

První zmínky o používání optických pomůcek pocházejí ze starověkého Řecka. Řekové byli známí pro používání skleněných koulí naplněných vodou, které zvětšovaly obraz. Zvětšovací schopnosti připisovali ale vodě a ne sklu. Ptolemaios jako první popsal elementární optiku už okolo roku 100 našeho letopočtu. O 150 let později vládce Nero ve starověkém Římě sledoval gladiátorské zápasy přes smaragdový kámen, který si držel před okem. Nepoužíval ho ale za účelem zvětšení obrazu, ale k ochraně před silným slunečním zářením. [1, 2]

Číňanům je zaslouženě připisováno mnoho raných vědeckých vývojů, které později přejali Evropané. Někteří jim dokonce připisují vývoj brýlí asi před 2000 lety. Stejně jako Nero používal svůj smaragd, oni používali brýle pouze k ochraně očí před silným světlem. Nevyvinuli tedy brýlové čočky, které by pomohly zlepšit vidění, ale předchůdce dnešních slunečních (absorpčních) brýlí. [1]

Kolem roku 1000 našeho letopočtu byl vyroben čtecí kámen – dnes známý také jako lupa. Arabský astronom Ibn Al-Haitham – v Evropě známý jako Alhazen – formuloval teorie o lomu světla a je autorem díla „Poklad optiky.“ V něm poukazuje na možnost použití vhodně řezané optické čočky jako pomůcky ke čtení a popisuje účinek čtecího kamenu jako plankonvexní čočky. Neprovedl ale žádný praktický závěr své teoretické úvahy. Čtecí kámen umožňoval presbyopickým mnichům číst a jednalo se pravděpodobně o první korekční pomůcku. [1, 2, 3]



Obrázek 1: Čtecí kámen [4]

V roce 1250 Roger Bacon popsal princip zvětšující čočky a shrnul všechny předchozí teorie v dílech „Opus majus.“ Ale stejně jako Alhazen nedokázal svou teorii podložit prakticky.

Jednalo se ale o další posun ke vzniku brýlí. V této době už věděli o presbyopii, a dokonce i o myopii. Ve svém díle „De oculis“ obě refrakční vady popsal Petrus Hispanus. [1, 3]

Neví se, kdy a kde přesně vznikly brýle, ale za kolébku výroby brýlí jsou považovány Benátky 13. století. Benátčané po dlouhou dobu vyráběli sklo na čtecí kameny a později dokonce vynalezli čočky, které se daly zasadit do rámečku. Člověk tak čočky mohl držet před očima místo jejich přikládání přímo na čtený text. Jedná se tak o první předchůdce dnešních brýlí. [1, 3]

Brýle, které se poté vyvinuly z čtecích kamenů, sloužily pouze ke korekci presbyopie. První brýle ke korekci myopie byly sice vyrobeny už kolem roku 1500, ale trvalo dalších 200 let, než se opravdu začaly běžně používat. Stále ale neexistovala nauka o refrakci, a proto nebylo možné pořádně korigovat refrakční vady. V roce 1600 nizozemský matematik Willebrord Snell konečně definoval zákony lomu, ale až v 19. století byla možnost začít refrakční vady měřit přístroji. Osobnosti jako např. Gullstrand, Tschering nebo Oswald měli velký podíl na vývoji optiky 19. století. Díky nim je dnes optika na vysoké úrovni. [1, 5]

Je velká pravděpodobnost, že tuto práci čtete jen díky brýlím. Nebyly ale vynalezeny přes noc. Brýlové čočky a obecně brýle si prošly velkým vývojem, který se neustále posouvá objevováním nových materiálů a jejich vylepšováním (např. povrchovými úpravami).

3 Základní vlastnosti

Tato kapitola nás seznámí se základními vlastnostmi materiálů brýlových čoček. Mezi ně patří index lomu, Abbeovo číslo, reflektance, absorpance, transmitance a disperze. Těmito veličinami jsou popisovány optické vlastnosti materiálů a samotných brýlových čoček.

3.1 Index lomu

Index lomu materiálu udává, v jaké míře bude daný materiál ohýbat nebo lámat světlo, které do něj vstupuje ze vzduchu. Čím vyšší je index lomu materiálu, tím více se světlo láme při vstupu. Šíření paprsku médiem je popsáno indexem lomu n . Ten je definován jako poměr rychlosti světla c ve vakuu a rychlosti světla v v látce. [6, 7]

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

Rozsah indexů lomu je od 1,45 do 1,90. [8]

3.2 Abbeovo číslo

Bílé světlo se skládá z viditelného spektra vlnových délek, z nichž každá odpovídá jiné barvě. Když světlo vstupuje do hranolu, je ohnuto směrem k bázi hranolu. Kratší vlnové délky (fialové) jsou ohnuty pod větším úhlem než delší vlnové délky (červené). Vzhledem k tomu, že čočku lze přirovnat ke dvěma hranolům (vrchol k vrcholu – rozptylka, báze k bázi – spojka), světlo procházející čočkou má tendenci se rozdělovat do příslušných barev, protože jeho různé vlnové délky jsou zaměřeny na různé body. Tendence materiálu oddělit světlo tímto způsobem se nazývá chromatická aberace a měří se jeho Abbeovým číslem. [6]

Abbeovo číslo materiálu je nepřímo úměrné chromatické aberaci vyvolané průchodem světla. Obecně řečeno čím vyšší je index lomu materiálu čočky, tím vyšší je chromatická aberace a tím nižší je hodnota Abbeova čísla. [6, 9]

Vypočítat hodnotu Abbeova čísla můžeme pomocí vzorce (2)

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

kde n_d , n_f a n_c jsou indexy lomu daných materiálů na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým čarám D ($\lambda=589$ nm), F ($\lambda=486,1$ nm) a C ($\lambda=656,3$ nm). [10]

Rozsah Abbeova čísla je od 20 do 70. [8]

3.3 Odrazivost

Reflektance materiálu popisuje procento dopadajícího světla odraženého od vysoce leštěného povrchu tohoto materiálu. Odrazivost je jev, ke kterému dochází na každém povrchu čočky. Výsledkem je ztráta průhlednosti a nežádoucí odrazy. Když světlo normálně narazí na povrch čočky ve vzduchu, je procento světla odraženého na každém povrchu dáno vztahem 3. Jedná se o poměr výkonu optického záření odraženého od tělesa a výkonu záření dopadajícího na těleso. [6, 11]

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

Čím vyšší je index lomu, tím větší je podíl světla odraženého od povrchu. Nežádoucí reflexy mohou být téměř eliminovány aplikací antireflexní vrstvy. [11]

3.4 Absorpce

K absorpci dochází, pokud je frekvence světla rezonanční s frekvencemi atomů v médiu. V tomto případě bude paprsek během postupu zeslaben. Selektivní absorpce je zodpovědná za zbarvení mnoha optických materiálů. Například rubíny jsou červené, protože absorbují modré a zelené světlo, ale ne červené. [12]

Pokud prochází záření určitým prostředím, dochází k jevu jeho pohlcení – absorpci. Ta blízce souvisí s disperzí. Množství absorbovaného záření závisí na tloušťce prostředí. Tedy čím tlustší prostředí, tím větší je absorpce. K absorpci čočkou dochází podle Lambertova zákona. [9, 11]

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad (4)$$

Kde I je intenzita světla prošlého prostředím o tloušťce l . I_0 je intenzita světla, které prošlo nulovou tloušťkou a konstanta α představuje absorpční koeficient. [8]

3.5 Propustnost

Transmitance materiálu čočky popisuje množství světla (obvykle určeného pro dané vlnové pásmo), které projde tímto materiálem. Koeficient přenosu nebo propustnosti T je definován podobně jako reflektance – jako poměr výkonu vystupujícího záření k vstupujícímu. [7, 12]

$$T = \frac{P_{tr}}{P_0} \quad (5)$$

Pokud nedochází k absorpci nebo rozptylu, musíme zachováním energie mít součet reflektance a transmitance roven jedné. [12]

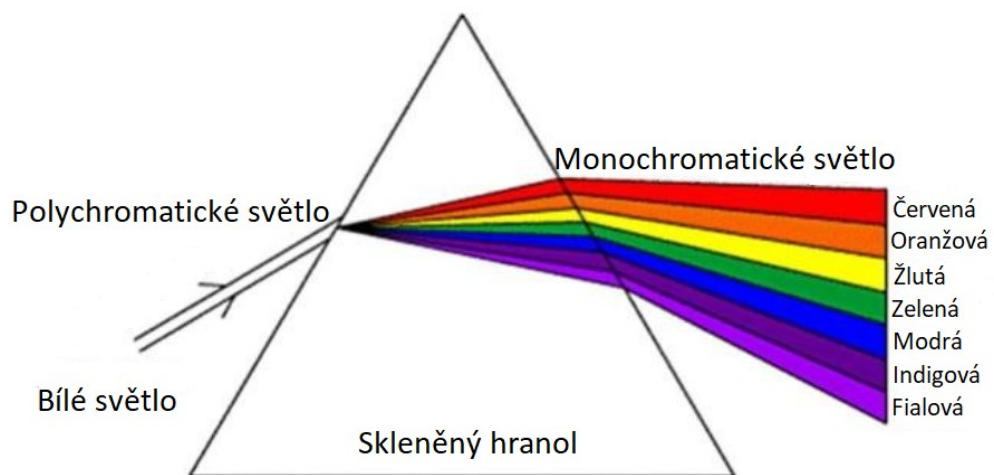
$$R + T = 1 \quad (6)$$

Míra podílu světla odraženého od povrchu se nazývá odrazivost, míra podílu absorbovaného světla je absorpce a míra podílu procházejícího světla je propustnost. Každý z nich je vyjádřen jako zlomek celkového množství světla v paprsku. Pokud je intenzita paprsku světla reprezentována číslem 1, odrazivostí R , absorpcí A a propustností T , lze intenzitu vyjádřit takto [11]:

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

3.6 Disperze

Chromatická disperze, označovaná také jako aberace, je jev, při kterém rychlost a směr šíření světla v optickém médiu závisí na vlnové délce světla. Interakce konkrétní vlnové délky světla s elektrony v médiu vede k tomuto jevu. [8]



Obrázek 2: Disperze bílého světla [13]

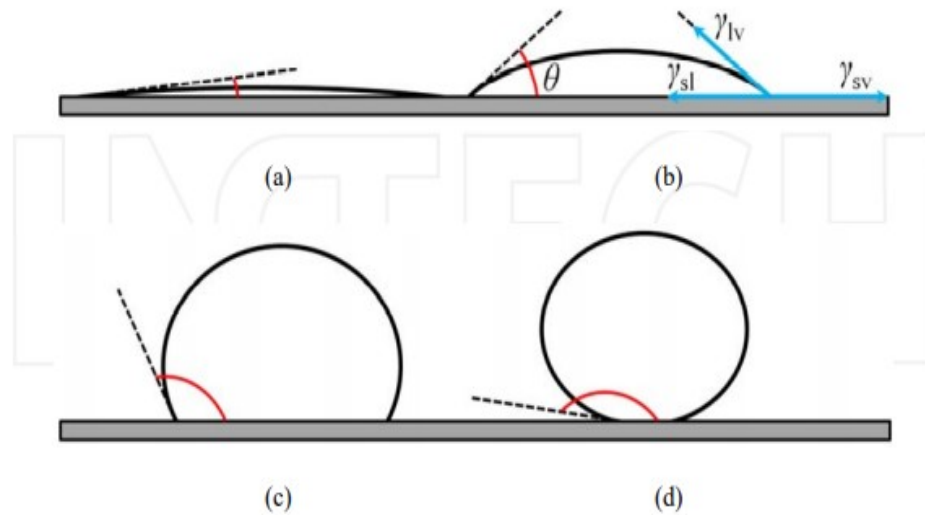
Index lomu látky závisí na frekvenci, vlnové délce nebo barvě světla. Tato vlastnost vede během lomu bílého polychromatického světla k jeho rozkladu na monochromatické složky. Tento jev se nazývá disperze. Rozdíly indexu lomu pro jiné vlnové délky jsou často nazývány částečnou disperzí. Důležitou veličinou pro korelaci chromatických aberací je Abbeovo číslo typu skla. [7]

3.7 Specifická hmotnost (relativní hustota)

Specifická hmotnost popisuje hustotu materiálu čočky porovnáním jeho hustoty s hustotou vody (při 4 °C). Čím vyšší je měrná hmotnost materiálu čočky, tím vyšší je hustota a v důsledku toho bude čočka tohoto materiálu pro danou silu a velikost těžší. [6]

3.8 Smáčivost povrchu

Smáčivost povrchu je důležitou vlastností související s volnou energií povrchu a geometrickými strukturami. Smáčivost nám udává, jak moc kapalina přilne k určitému povrchu. Smáčivost je řízena rovnováhou mezi intermolekulárními interakcemi – adhezí a kohezí. Obecně platí, že povrch s kontaktním úhlem vody větším než 90°, se nazývá hydrofobní. Povrch se nazývá superhydrofobní, pokud je kontaktní úhel větší než 150°. Hydrofilní jsou povrchy s kontaktním úhlem vody menším než 90°, superhydrofilní povrchy mají kontaktní úhel menší než 5°. Obrázek č. 3 ukazuje různé stupně smáčení – malé kontaktní úhly (pod 90°) odpovídají vysoké smáčivosti, zatímco velké kontaktní úhly (nad 90°) odpovídají nízké smáčivosti. [14, 15]



Obrázek 3: Kontaktní úhly **a)** skoro úplná smáčivost ($\theta \approx 0^\circ$) **b)** dobrá smáčivost ($\theta < 90^\circ$)
c) špatná smáčivost ($\theta > 90^\circ$) **d)** téměř nesmáčivý povrch ($\theta \approx 180^\circ$) [15]

Hladké kovové a keramické povrchy jsou vysoce hydrofilní, zatímco mnoho polymerů je hydrofobních.[15]

4 Materiály

Brýle existují již nějaký čas – předpokládá se, že brýlové čočky byly poprvé použity do brýlí na konci 13. století. Původně byly tyto BČ broušeny z relativně drahého křemenného krystalu. Dnes se od tohoto krystalu upustilo a přešlo se na modernější a levnější materiály. [16]

Brýlové čočky mohou být vyrobeny z různých materiálů – minerálních (sklo) nebo organických (plasty). Tyto materiály musí mít určité vlastnosti, aby byly vůbec použitelné pro výrobu brýlových čoček. Materiály musí být téměř transparentní pro všechny viditelné vlnové délky, bez vad (např. bubliny), musí být homogenní, chemicky i fyzikálně stabilní, odolné a lehké. Také by měly mít vysoký index lomu a minimální disperzi. Hmotnost materiálu je řízena jeho hustotou. Čím nižší hustota, tím lehčí bude materiál. To může výrazně ovlivnit pohodlí nošení brýlí. Organické materiály lze dále klasifikovat podle toho, zda se jedná o termosety nebo termoplasty. [16]

Existuje pět materiálů, které se běžně používají pro výrobu brýlových čoček. Jedná se o sklo, dále tzv. vysokoindex, CR-39 (Columbia resin), polykarbonát (PC) a polymethylmethakrylát (PMMA).

4.1 Minerální materiály

Minerální materiály jsou známy také jako anorganické nebo silikátové. Do těchto materiálů řadíme sklo – korunové (draselnovápenaté) a flintové (draselnoolovnaté). [5]

4.1.1 Sklo

Sklo je amorfní, nekystalický, anorganický materiál, který je tuhý a křehký při nízkých teplotách a měkne při teplotách vysokých. Jeho objem se zvyšuje s rostoucí teplotou. Sklo může být bezbarvé nebo barevné, průhledné nebo neprůhledné (jsou-li přítomny nečistoty). Zatímco technické sklo sestává hlavně z přírodních surovin, většina optických skel je vyrobena z chemicky čisté syntetické suroviny. Typy skla s Abbeovým číslem vyšším než 55 známe jako korunové sklo (nízkoindexové), s číslem pod 50 jako flintové sklo (vysokoindexové). Relativně vysoká pružnost skla nezaručuje pevnost materiálu. Chování skla je ovlivněno leštěním jeho povrchu, nanášením vrstev a okolními vlivy. Chemická odolnost optického skla je do značné míry charakterizována svou hydrolytickou odolností (pět tříd, 1 - voděodolné, 5 - vodní koroze) a odolností vůči kyselinám (tři třídy, mírně, středně až silně ovlivněné kyselinou). [7]

Většina minerálních čoček je vyrobena ze skla známého jako korunové sklo. To v průmyslu dominovalo po celá staletí. Je složeno ze sklotvorných oxidů, převážně z oxidu křemičitého. Opticky je korunové sklo velmi podobné CR39. Nabízí mnohem větší odolnost proti poškrábání, ale je také mnohem těžší. [16]

4.2 Organické materiály

Jak je již zmíněno výše, organické materiály – plasty – lze dělit na termosety a termoplasty.

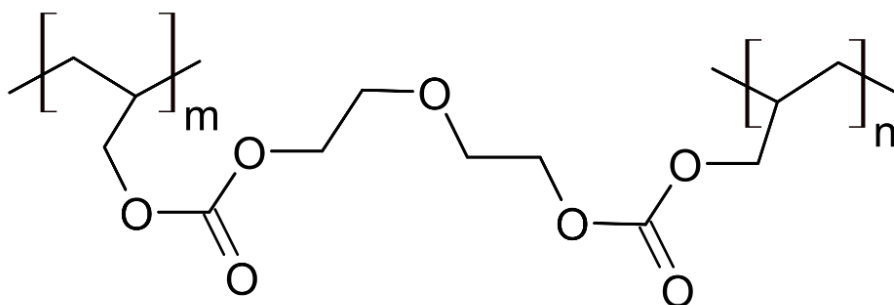
Termosety začínají v kapalném stavu jako monomerní pryskyřice, která se nakonec polymeruje na pevný polymerní materiál. Běžný výrobní proces pro výrobu čoček vyrobených z termosetů se nazývá lití. Termosety se skládají z chemicky těsně kombinovaných makromolekul. Aktivní jsou také fyzikální vazebné síly. Termosetové plasty jsou obvykle velmi tvrdé a křehké při pokojové teplotě. Jsou odolné vůči teplotě, nejsou tavitelné, svařitelné, rozpustné a botnají jen minimálně. Většina brýlových čoček je vyrobena z allyl diglykolkarbonátu, termosetového plastového materiálu, označovaného jako CR39. [7, 16]

Termoplasty nejsou zesíťovány jako termosety a lze je roztavit a ochladit zpět z kapalného do pevného stavu. Jsou pevné nebo viskoelastické při pokojové teplotě a lze je tvarovat a přetvářet opakovaně zahříváním bez chemické transformace. V termoplastech mohou být lineární makromolekuly rovnoměrně uspořádány paralelně a tvořit krystaly, které jsou viditelné pod mikroskopem. Struktura postrádající jakýkoli druh řádu se nazývá amorfní. Termoplasty jsou tavitelné, svařitelné, botnavé a rozpustné. Běžný výrobní proces pro výrobu čoček z termoplastů se nazývá vstřikování. Nejběžnějším materiálem termoplastických čoček je polykarbonát známý svou výjimečnou odolností proti nárazu. Dalším je termoplastický materiál, akryl zvaný polymethylmethakrylát. [7, 16]

4.2.1 CR-39

Termosetová pryskyřice Columbia Laboratory Resin, 39. v řadě výzkumných produktů, byla původně vynalezena ve 40. letech 20. století pro vojenské účely. Tento termoset byl poprvé použit do kokpitů letadel jako ochrana pilotů před větrem – „sklo“ muselo být transparentní a nezkrasovat. Největší výhodou CR39 je, že chrání nositele brýlí lépe než sklo. Pokud se plast rozbije, jsou fragmenty větší, tupější a odletí menší rychlostí, což dělá CR39 bezpečnější. Ačkoli se do konce 70. let nestal populární jako materiál na výrobu brýlových čoček, dnes se

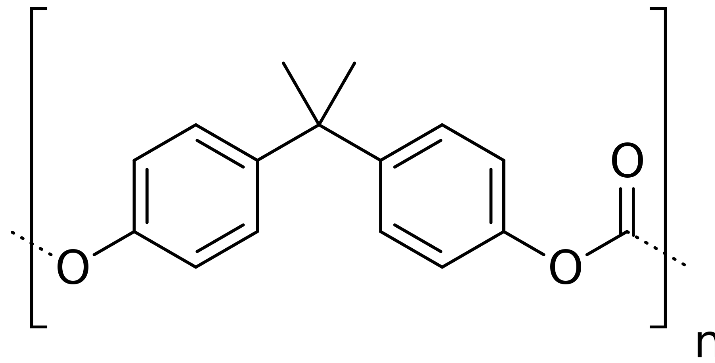
považuje za standard, podle kterého se srovnávají ostatní materiály. Je lehký, odolný proti nárazu a lze jej chemicky tónovat do různých odstínů. [1, 16]



Obrázek 4: Vzorec CR-39 [17]

4.2.2 Polykarbonát

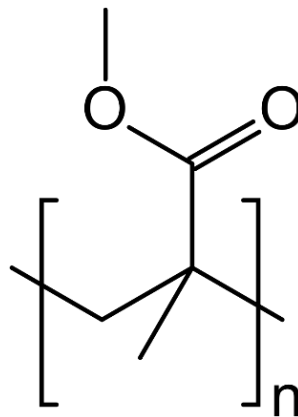
Polykarbonát je nejběžnějším materiálem termoplastických čoček. Vynalezla ho společnost General Electric v 50. letech minulého století pod obchodním názvem Lexan. Tento termoplast byl v 70. letech využíván pro letectvo – na přilby a hledí. Polykarbonát má řadu výhod proti tvrdému CR39. Říká se mu termoplastický „kov“ kvůli jeho extrémně vysoké rázové pevnosti. Polykarbonát dokáže odolávat rozbití i po zasažení předmětem ve vysoké rychlosti (například hokejový puk). Je to nejbezpečnější materiál. Dalšími výhodami oproti sklu a CR39 je například nízká hmotnost. Polykarbonát má i vysoký index lomu (1,586) ve srovnání s korunovým sklem (1,523) a CR39 (1,498). Díky těmto faktorům jsou polykarbonátové čočky (o stejné velikosti a optické mohutnosti jako CR39 nebo skleněné) tenčí a lehčí. Polykarbonát mnohem lépe absorbuje UV záření, a tedy lépe chrání oči (nepropouští světlo o vlnové délce menší než 380 nm). Jakýkoli druh plastu je mnohem odolnější proti zamlžení než sklo, protože sklo má proti plastům vyšší tepelnou vodivost. Polykarbonát je ale měkčí než sklo a snadno se poškrábe, proto je nejlepší na brýlové čočky přidat vrstvu tvrzení a zodpovědně o ně pečovat. [1, 16, 18]



Obrázek 5: Vzorec polykarbonátu [19]

4.2.3 Polymethylmethakrylát

PMMA neboli plexisklo je nejběžněji používaný optický plast, ale pro výrobu brýlových čoček se v současné době běžně nepoužívá. Poprvé byl tento termoplast vyroben pro vojenské účely ve 20. letech minulého století. Je levný, snadno tvarovatelný, vysoce transparentní a odolný proti nárazům, ale ne proti poškrábání. PMMA vzniká polymerizací esterů kyseliny methakrylové – z monomerů vznikají polymery. Index lomu PMMA dosahuje 1,49. [2, 18]



Obrázek 6: Vzorec polymethylmethakrylátu [20]

4.2.4 Trivex

Trivex, polyuretanový polymer, je částečně zesítný materiál. Má nejlepší vlastnosti z termosetů i termoplastů. Výsledkem je vynikající odolnost proti nárazu a optické vlastnosti ($n = 1,53$, $\nu = 45$). Brýlová čočka vyrobená z trivexu je tenká a lehká. Pravděpodobně jde o jedinou čočku, která je nejlepší pro bezobroučkové brýle. Materiál má 100% ochranu proti UV záření. Lze jej snadno tónovat a potahovat antireflexní vrstvou. Výroba těchto čoček se provádí

litím, která zajistí větší homogenitu, mechanickou stabilitu a menší pnutí. Smícháním vysokoindexového materiálu s trivexem vznikne materiál pojmenovaný jako HIVEX ($n = 1,57$, $\nu = 46$). [11, 18]

4.3 Vysokoindexové materiály

Vysokoindexové materiály mohou být minerální i organické. Jedná se o materiály s vyšším indexem lomu, než 1,5. Z materiálu s vysokým indexem lomu mohou být vyrobeny ztenčené čočky – lehčí a tenčí čočky se stejným účinkem ohybu světla jako má normální materiál. Stejně jako u většiny materiálových vlastností však existuje několik kompromisů. Sklo je proti poškrábání odolnější než polymery, je ale mnohem těžší. A i když sklo lze vyrobit s vyšším indexem lomu než polymery, je hodně ztenčené a tím pádem mnohem křehčí. [21]

Materiály minerálních skleněných čoček mohou obsahovat určité oxidy kovů, jako je například titan nebo lanthan. Přidávají se právě za účelem zvýšení indexu lomu. Dnes se vyrábí skleněné brýlové čočky až do indexu lomu 1,9. A i když jsou skleněné vysokoindexy ztenčené, nemusí být nutně lehčí než běžné korunové sklo. Dalšími nevýhodami skleněných vysokoindexů je velká disperze, odrazivost a menší chemická i mechanická odolnost. [5, 16]

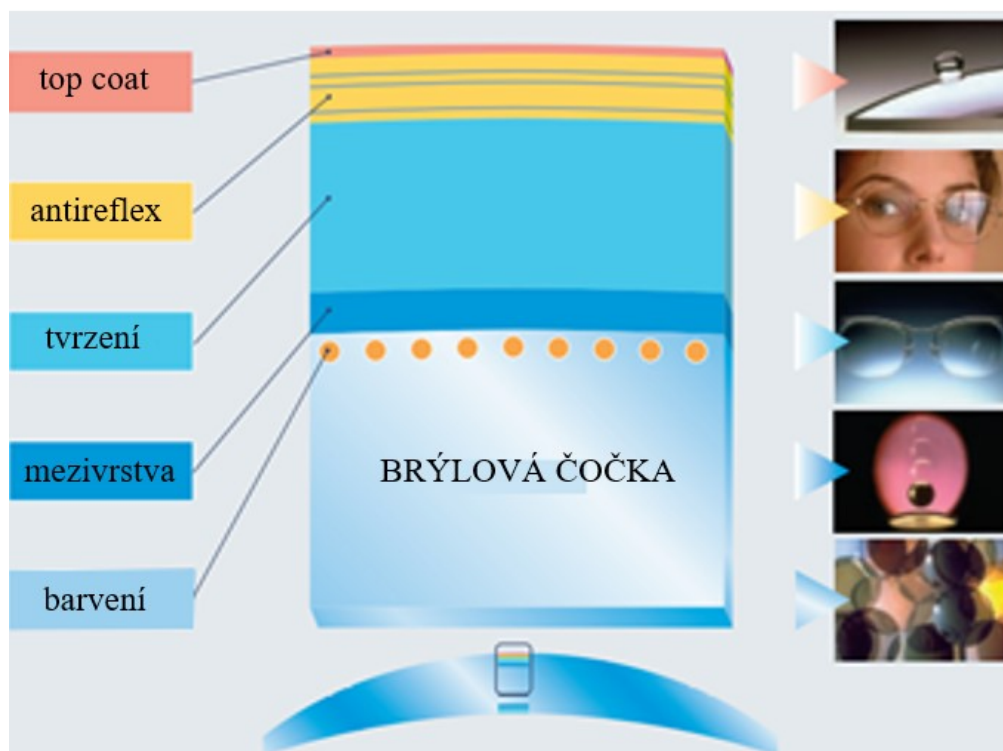
Vysokoindexové mohou být ale i termosetové plasty jako je polyuretan (trivex) s vyššími indexy lomu. Dalším materiálem je termoplast polykarbonát. Vysokého indexu v organických čočkách lze docílit pomocí thiourethanu s vysokým obsahem síry. Zjednodušeně lze tedy říci, že čím vyšší obsah atomů síry, tím vyšší index lomu. Vysokoindexové brýlové čočky jsou tenčí na úkor nižších hodnot Abbeova čísla. Plasty s vyšším indexem lomu jsou obvykle lehčí než běžné CR39. Důvodem je to, že vysokoindexy jsou tenčí a lehčí. Tyto materiály mají také nižší hustotu než CR39. [16, 18]

U dnes nejpoužívanějších plastů je index lomu mezi 1,45 a 1,60, Abbeovo číslo mezi 30 a 58. To znamená, že plasty jsou důležitým doplňkem silikátových čoček ve spodním rozsahu indexu lomu a Abbeova čísla. Charakteristickým rysem plastů je jejich UV absorpce v neviditelné spektrální oblasti až do cca 350 nm, což je způsobeno přidáním tzv. světelných stabilizátorů na plastové materiály, aby se zabránilo předčasnému rozkladu řetězců makromolekul kyslíkem a UV zářením (žloutnutí). Index lomu klesá s rostoucí teplotou. Zatímco u optického skla je tento účinek zanedbatelný, je jedním z důvodů, proč se pro vysoce přesnou optiku plasty dosud nepoužívají. Je třeba zdůraznit, že s ohledem na mechanické vlastnosti jsou termoplasty (PMMA a PC) kvůli jejich struktuře měkčí než minerální materiály.

Důsledkem toho je, že následné povrchové úpravy jsou ve většině případů zásadní. Chemická a mechanická odolnost plastových brýlových čoček není pouze v závislosti na jednotlivých použitých materiálech, ale také na povrchové úpravě, jako je například tvrzení nebo antireflexní vrstva. [7]

5 Povrchové úpravy

Kromě barvení čoček se na čočky často nanáší různé povlaky za účelem zlepšení jejich mechanických nebo optických vlastností – nebo obojího. Antireflexní vrstvy lze aplikovat na skleněné i plastové čočky, aby se minimalizovaly odlesky na brýlích. Pro zlepšení odolnosti plastových čoček lze využít povlaky odolné proti poškrábání. Každý povrch brýlové čočky slouží jako zakřivené zrcadlo a odráží část dopadajícího světla. Odražený obraz objektu se často označuje jako parazitní. Zatímco velikost a jasnost odražených obrazů se mění se silou čočky, jasnost nebo intenzita parazitních paprsků se zvyšuje s indexem lomu materiálu čočky. Tato kapitola se zaměří hlavně na antireflexní, absorpční, reflexní a samočistící vrstvy. [16]



Obrázek 7: Systém povrchových úprav [22]

5.1 Tvrzení

Mezi každodenními nepřáteli brýlových čoček je poškození způsobené třením o různé předměty a prachové částice. To platí pro všechny čočky, skleněné nebo plastové, i přestože jsou skleněné čočky obecně považovány za mnohem odolnější proti poškrábání než plastové materiály. Poškrábané brýlové čočky působí rušivě (zhoršují kosmetický vzhled) a mohou ovlivnit i kvalitu našeho vidění. Dnes má mnoho BČ nanesené povlaky odolné proti poškrábání, včetně čoček s vysokým indexem, z PC a trivexu. Tyto typy čoček jsou zepředu i zezadu

opatřeny čirým povlakem odolným proti poškrábání a mají mnohem tvrdší povrch. S povrchovou úpravou se majitel brýlí nemusí tolik starat o drobné škrábance, ale neznamená to, že jeho BČ mají 100% odolnost proti poškrábání. Všechny materiály jsou náchylné k poškrábání, jen některé méně a některé více. [22, 23]

Tvrdit lze jak minerální, tak organické brýlové čočky. Minerální BČ se tvrdí, aby byly odolnější proti rozbití nebo odštěpování, organické tvrdíme kvůli jejich měkkosti a nízké odolnosti proti poškrábání. Tento tvrdý pryskyřicový povlak je standardně dodáván s běžnými čočkami nebo s antireflexním povlakem.

5.1.1 Tvrzení minerálních brýlových čoček

Oproti plastovým čočkám jsou skleněné čočky mnohem odolnější proti poškrábání, ale už nejsou odolné vůči roztržení např. po nárazu.

Během **tepelného tvrzení** se brýlová čočka musí zahřát na teplotu měknutí – mezi 600 až 700°C. Zahřívání by mělo trvat 50 až 200 sekund podle tloušťky čočky a poté se čočka musí prudce zchladit buď ponořením do chladicí kapaliny (silikonový olej) nebo proudem vzduchu. Díky prudkému ochlazení dojde k tomu, že se povrchová vrstva ochladí dříve než jádro čočky a dojde k velkému tlakovému napětí mezi jádrem a povrchem čočky. Velké vnitřní napětí zajistí to, že je BČ nyní pevná a odolná vůči nárazům. [24, 25]

Tato metoda je jednoduchá, rychlá a poměrně levná. Nevýhodou je, že minimální středová nebo okrajová tloušťka BČ musí být asi 2 mm, aby bylo možno čočku tvrdit. Nelze tuto metodu použít u čoček s velkými cylindrickými hodnotami z důvodu kolísání tloušťky čočky. Nedá se použít ani u povrchově zušlechťených čoček, vysokoindexových čoček ani u fotochromatických (mohla by se měnit barva čočky a narušit rychlost zabarvování). [22, 24, 25]

Při **chemickém tvrzení** se skleněné BČ – obsahující ionty sodíku – ponořují do lázně s dusičnanem draselným a minimálním množstvím kyseliny křemičité (asi 0,5 %). V lázni se čočky ponechají ve speciálním nosiči přibližně 16 hodin při teplotě 450°C. Zatímco jsou čočky ponořeny v lázni, dochází k výměně iontů (difuzi) – některé ionty sodíku jsou nahrazovány za draselné ionty. Draselné ionty jsou asi o 30 % větší než ty sodné, díky čemuž vyvolají po ochlazení skla velké tlakové napětí na povrchu BČ. Tato metoda tvrzení je proti tepelnému stejnoměrnější. Byla vyvinuta další technika ke zkrácení procesu ultrazvukovou stimulací lázně. [18, 24, 25]

Výhodou chemického tvrzení je používání čoček s normální tloušťkou a stejnoměrnost. Nevýhodou je ale dlouhá doba zpracování a velký počet čoček potřebných k tomu, aby šarže byla ekonomická (metoda je nákladná). [24, 25]

5.1.2 Tvrzení organických brýlových čoček

Organické čočky jsou měkčí, než minerální a jsou tedy náchylnější k poškrábání. Aby k tomu nedocházelo nebo aby se alespoň snížilo riziko poškrábání, můžeme čočky tvrdit. Plastové BČ nelze tvrdit jako minerální, protože je nemůžeme zahřát na tak velkou teplotu – plastové čočky by zežloutly. Nejčastěji se organické čočky tvrdí metodou Dip coating. [2]

Při metodě **dip coating** se BČ tvrdí ponořením do tvrdícího laku. Příkladem kapalného tvrdého povlaku je směs pyrrolidonu, akrylátu a butyanolu. Lak se nanáší na přední i zadní plochu čočky. Čočky se ponoří do tvrdícího laku a vytáhne. Přebytečný materiál se nechá odkapat. Čím rychleji je čočka vytažena z tvrdícího laku, tím silnější bude vrstva tvrzení. Po vytažení z laku je čočka umístěna do polymerizační pece, kde se nechá přibližně 3 hodiny při teplotě 100-120°C. Čím silnější je vrstva tvrzení, tím lépe přilne antireflexní vrstva. Tloušťka vrstvy při dip coatingu je asi 2 mikrony. Stejně jako při všech postupech nanášení povlaku musí být čočka před nanesením dokonale čistá. Tato metoda se používá při masových výrobcích. [18, 22, 25]

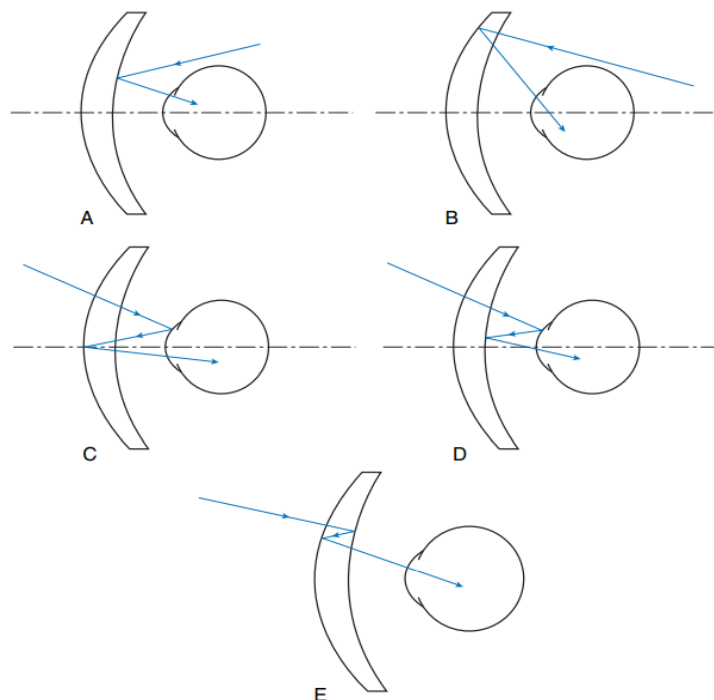
Metoda **spin coating** je rotační nanášení tvrdícího laku na BČ. Čočka je upevněna na rotující zařízení, na přední stranu se kápne tvrdící lak a rotací se rozprostře po celé čočce. Tloušťka vrstvy při tomto způsobu tvrzení je 3-5 mikronů. Jedná se o velice rychlou metodu, celé lakování trvá zhruba 5 minut. Po tomto tvrzení je čočka ale méně odolná než po dip coatingu. Po této metodě jsou čočky dobře barvitelné. Tento způsob tvrzení se používá při malých výrobcích BČ. [18, 25]

Nejnovější technologie tvrzení je **vakuové tvrzení**. Jedná se o nanášení vrstvy oxidu křemíku na čočku ve vakuové komoře. Vrstva je silná více než 3 mikrony. Tato metoda vyžaduje drahé vybavení a BČ poté nelze následně tónovat. Tento typ povlaku se však často používá před aplikací AR povlaku. Mezi základní metody patří PVD, LP-CVD a PECVD. Metodou PVD se ale nanáší hlavně antireflexní vrstva. [18, 25]

Posledním způsobem tvrzení je **in-mold coating** neboli tvrzení ve formě. K tvrzení dochází přímo ve formě již při výrobě čočky. Tvrdící vrstva při této metodě výborně přilne k čočce, ale nevýhodou je, že tyto čočky poté už nelze barvit. [18]

5.2 Antireflexní vrstva

U normální čočky se při průchodu každou plochou čočky odrazí asi 4 % světla. To znamená, že přibližně asi jen 92 % světla dosáhne do oka. Část odraženého světla může vytvořit tzv. parazitní paprsky tím, že se odrazí od zadní plochy čočky zpět dopředu a poté se odrazí zepředu do očí, jak můžete vidět na obrázku (8). Další problém může vzniknout v důsledku odlesku světla vstupujícího zpoza čočky, které se poté odrazí od přední plochy čočky. Tyto úkazy ovlivňují kvalitu obrazu, který vidíte (odlesky). [18, 26]



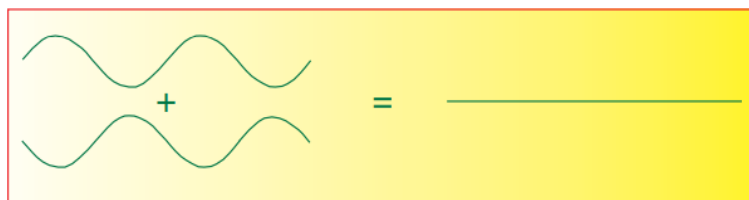
Obrázek 8: Reflexy vznikající na brýlových čočkách [27]

AR vrstvy se skládají z jedné nebo více tenkých vrstev různých anorganických oxidů, jako je například fluorid hořečnatý, oxid titaničitý a oxid křemičitý. Tyto filmy jsou nejčastěji nanášeny PVD metodou, kdy u minerálních čoček lze použít vyšší teploty než u plastových. U plastových se nesmí přesáhnout teplota 200 °C, protože pak zežloutnou a rozloží se. Kdyby se ale takto nízká teplota použila na skleněných čočkách, byly by křehčí a vrstva by nepřilnula tak dobře. U těchto vrstev se využívají principy destruktivní interference světla. Dochází k minimalizaci reflektovaných paprsků od přední a zadní plochy čočky – díky amplitudové (8) a fázové (9) podmínce:

$$n_{vrstvy} = \sqrt{n_{čočky}} \quad (8)$$

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_{\text{vrstvy}}} \quad (9)$$

kde d je tloušťka vrstvy, λ vlnová délka světla a n index lomu vrstvy.



Obrázek 9: Destruktivní interference [27]

Antireflexní povlaky na skleněných čočkách obecně používají jednu vrstvu, moderní povlaky na plastových čočkách často používají pět nebo více vrstev (až deset), kdy se střídají indexy lomu jednotlivých vrstev. Vícevrstevné povlaky jsou schopny vyrušit odražené světlo v širším barevném pásmu. Aplikace AR vrstvy může zvýšit transmitanci čočky až na téměř 100 %, přičemž prakticky eliminuje viditelné odrazy od povrchu čočky. Doporučuje se u všech brýlových čoček, hlavně u polykarbonátových a vysokoindexových, protože odrážejí nejvíce světla. AR vrstvy můžeme podle účinnosti rozdělit do tří základních skupin – standardní (transparentnost 95-97 %), střední (96-98 %) a s vysokou účinností (98-99 %). [16, 18, 22, 26]

Hlavními výhodami antireflexní vrstvy je jasné, ostré a nepřerušované vidění. Brýle jsou tím pádem atraktivnější a pro jejich nositele příjemnější. Ulevuje také od bolestí hlavy a unavených očí. Nevýhodou může být pro některé nositele zbytkový odraz, který má specifickou barvu, nejčastěji zelenou, modrou nebo fialovou. [28]

Antireflexe je nejdůležitější optická vlastnost. Antireflexní vrstvy jsou testovány na skleněných brýlích asi už 50 let, na plastových asi 40 let. V moderním inženýrství je k dispozici velké množství technik povrchových úprav. Povrchové úpravy hrají důležitou roli při zlepšování „výkonu“ výsledné čočky. [18]

5.2.1 Způsob nanášení

První AR vrstvy byly jednovrstevné, později se počet vrstev ustálil na šest až deset vrstev. Poslední vrstva většinou bývá oleofobní nebo hydrofobní za účelem lepšího a jednoduššího čištění BČ. Dnes se používá více způsobů nanášení AR vrstvy, ale nejlepší a nejpoužívanější metodou je vakuové napařování PVD podobně jako u tvrzení. Existují tři způsoby PVD –

tepelný (Thermal Evaporation Deposition), plazmatický (Plasma Sputtering Deposition) a iontovým svazkem (Ion Beam Assisted Deposition). [18, 29]

Při **tepelné metodě** jsou anorganické oxidy kovů s různými indexy lomu na povrch BČ napařovány ve vakuu elektronovým dělem. Nejčastěji používanými anorganickými oxidy kovů jsou ZrO_2 , SiO_2 , Ti_3O_5 nebo Ti-Al-O. Wolframové kelímky s různými druhy chemikálií jsou rozžhaveny až na teplotu $1600^\circ C$. Z kelímků se poté začne jejich obsah odpařovat na čočky umístěné v kalotách. V kalotě se čočky otáčejí po dobu napařování rychlostí 24 otáček za minutu, aby došlo k rovnoměrnému rozprostření vrstvy. [24, 29]

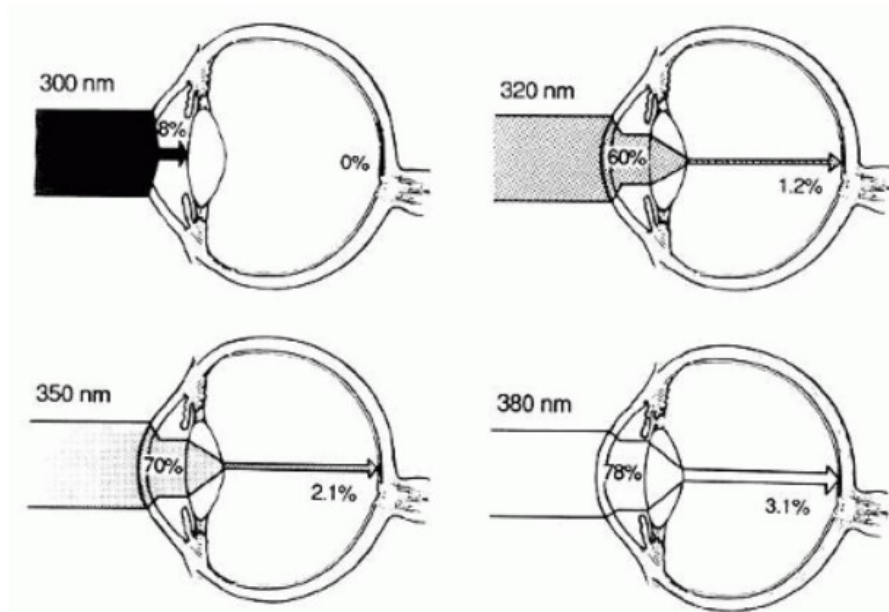
Při **plazmatické metodě** je antireflexní vrstva nanášena pomocí plazmy, která je generovaná například elektromagnetickým polem. Tato technologie může být použita na minerální i organické brýlové čočky. Při této metodě ale nelze použít MgF_2 , protože je znehodnocen plazmatickým zdrojem. Používá se tedy SiO_2 . [18]

Aplikace **iontovým svazkem** je nejefektivnější způsob nanášení. Nanesení AR vrstvy probíhá iontovým dělem pomocí svazků iontů. Dělo vysílá poměrně velké částice na čočku a tím zajistí vysokou přilnavost nanášeného materiálu. [18]

Princip AR vrstvy spočívá v aplikaci vrstvy na nepotažený povrch čočky tak, že odražené vlny na vrstvě a na rozhraní vrstva-čočka jsou ve fázové opozici. Je nutné, aby vrstva měla specifickou a stálou hodnotu indexu lomu, byla naprosto transparentní, měla stálou tloušťku a výbornou adhezi k čočce. Napařování umožňuje nanášení chemicky velmi čistých materiálů na BČ. Vakuové napařování umožňuje vytváření vrstev s požadovanou přesností i když jsou velmi tenké. PVD technika zaručuje optimální přilnavost, protože rozhraní mezi čočkami a vrstvami neobsahuje žádná rezidua. [22]

5.3 Absorpční vrstva (barvení)

Absorpční úpravy se používají na brýlové čočky za účelem snížení transmitance. Zjednodušeně se jedná o metodu absorpce světla. Tónované brýlové čočky se používají k mnoha účelům – filtrování nadbytečného světla a škodlivého slunečního záření (UV). Minerální skla zcela absorbují UV-C záření. Tónování čoček nám může pomoci s viděním nebo je esteticky vylepšit. Žlutý odstín BČ může zvýšit kontrast a šedý odstín nemění vnímání barev u slunečních brýlí. Kosmetické odstíny přicházejí v různých odstínech a gradacích. [23, 30]



Obrázek 10: Míra absorpce záření strukturami oka [31]

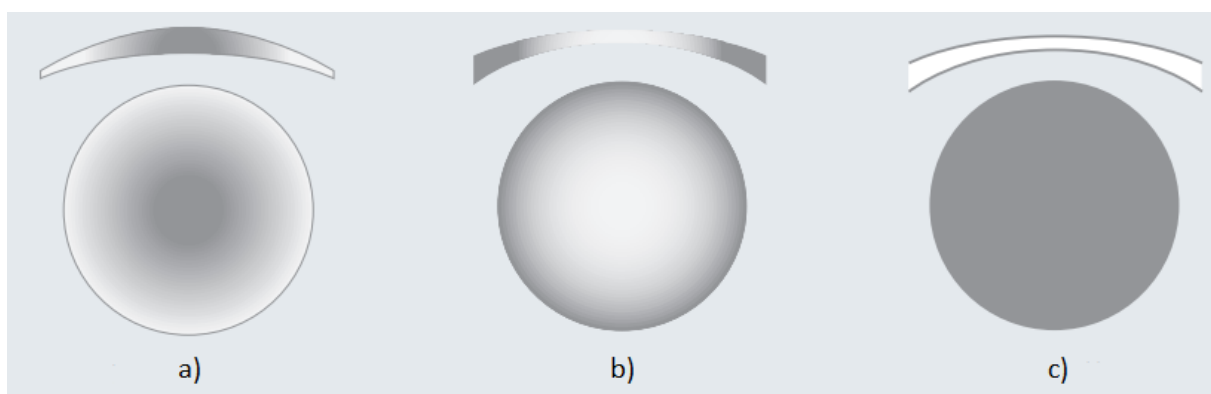
Odstín čočky je určen chromatickým složením světla, které propouští. Normální propustnost světla pro čočky ve slunečních brýlích je obvykle mezi 15 a 30 %. Sluneční brýle, které propouští více než 30 %, nemusí průměrnému nositeli dostačovat při plném slunečním světle. Ty, které propouštějí méně než 15 %, mohou na druhou stranu způsobovat problémy kvůli odrazu od zadní strany BČ. Tyto problémy lze ale odstranit použitím antireflexního povlaku na zadní straně. [22, 27]

Je obtížné přesně posoudit vlastnosti propustnosti čočky pouze na základě jejího odstínu. Platí však určité všeobecné zásady – šedý odstín transmituje viditelné záření rovnoměrněji, hnědý odstín je více absorpční v modrozeleném spektru než v oranžovo-červeném, zelený odstín je více absorpční v oranžovo-červené oblasti než v modrozelené. Myop může preferovat hnědou, hypermetrop může preferovat zelenou, ale záleží i na vlastním vkusu nositele. [22]

Korunové sklo a CR-39 propouštějí přibližně 92 % viditelného světla, zbylých 8 % je ztraceno odrazem. Veškeré UV světlo pod 290 nm je korunovým sklem absorbováno. Z praktického hlediska bohužel může být rušivější UV záření od 290 do viditelného světla. Většina UV záření pod 290 nm, které je pro oko neškodlivější, je pohlceno atmosférou. Korunové sklo propouští IR záření ve stejném poměru jako viditelné paprsky. CR-39 používaný při běžném nošení brýlových čoček obsahuje UV inhibitor, který neblokuje veškeré UV světlo, ale blokuje UV světlo pod 350 nm. [27]

5.3.1 Barvení minerálních brýlových čoček

Pokud jsou skleněné čočky barveny již při výrobě samotných čoček – přidáním kovů nebo oxidů kovů do roztavené skleněné směsi – nebude jejich barva ve všech místech stejná. Protože jsou tyto oxidy rozptýleny rovnoměrně po celém polotovaru čočky, propustnost se bude lišit podle tloušťky čočky, takže tento typ barvení by se neměl používat pro čočky s vysokou optickou mohutností. Mínusová tónovaná čočka je tmavší na okraji než ve středu a plusová čočka je tmavší ve středu než na okraji. Tónovaná čočka s velkou optickou mohutností může být ve středu příliš tmavá pro běžné použití. [32]



Obrázek 11: Pevné vs povrchové barvení **a)** plusová čočka **b)** mínusová čočka **c)** plusová nebo mínusová čočka barvená povrchově [22]

Minerální brýlové čočky se ale barví nejčastěji pomocí metody PVD. Vakuové tónování skleněných čoček spočívá v nanesení vrstvy kovových sloučenin absorbujících světlo na zadní stranu čočky. Očištěné čočky jsou umístěny do kalot, ve kterých se zahřívají na 200 až 300 °C. Povlak se nanáší ve vakuu odpařováním materiálů, jako je např. chrom, molybden nebo oxidy titanu ve směsi s oxidem křemičitým nebo fluoridem hořečnatým. Oxidy kovů se vypařují z elektrod a lze je nechat vypařovat z více elektrod najednou, čímž se docílí toho, že se nanese několik vrstev najednou. V závislosti na použitých materiálech a požadované barvě může povlak sestávat z jediné, silné, spojité vrstvy, která vytváří celkovou tloušťku v řádech mikronů. [22, 24, 32]

Intenzita odstínu je určena tloušťkou nanesené vrstvy a barva je určena použitými materiály: oxidy obecně produkují hnědé odstíny, zatímco šedý odstín se získává z kombinace kovů a transparentních sloučenin, jako je oxid křemičitý. Aplikované vrstvy mají skutečně stejnou tloušťku, což zajišťuje, že odstín čočky zůstane trvale rovnoměrný. Rozsah dostupných odstínů je relativně omezený. Technologie použitá k vakuovému napařování čoček s barevným sklem

je velmi propracovaná a je obdobou technologie používané k nanášení antireflexního povlaku. [18, 22]

Barevné povlaky jsou tedy pro skleněné čočky rozhodně výhodnější, protože barva povlaku je stejná, bez ohledu na tloušťku čočky. Vakuově napařené čočky mají předvídatelný odstín, zatímco čočky, kde je barva přidána do roztaveného skla, mají tmavší odstín tam, kde sklo zesiluje. [27]

5.3.2 Barvení organických brýlových čoček

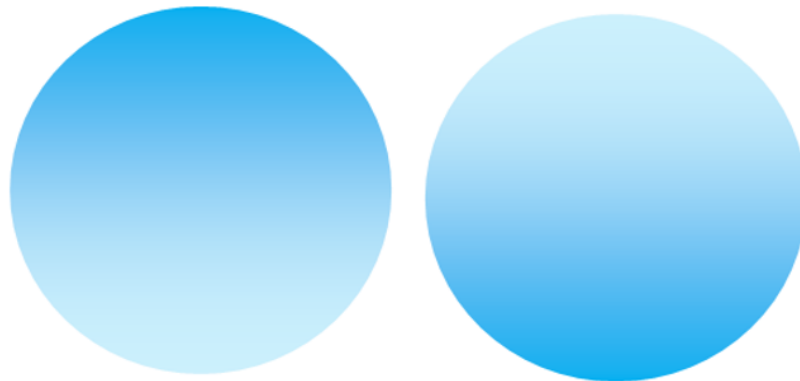
Plastové čočky jsou obvykle barveny ponořováním do horké barvy rozpustné ve vodě. Barva proniká rovnoměrně do povrchu čoček a poskytuje odstín se stejnou barvou a propustností ve všech bodech čočky. Plastové čočky nabízejí velkou univerzálnost tónování, protože mohou být obarveny téměř na jakoukoli barvu a mohou být také vyrobeny podle potřeby jako světlé nebo tmavé. Používají se základní RGB barvy (červená, zelená a modrá) a jejich smícháním získáme mnoho dalších barevných kombinací. Jedná se o levný a efektivní způsob tónování. [18, 25, 27, 32]

Gradientní odstíny, které se zesvětlují od horní části k dolní části čočky a naopak, se vytvářejí ponořením pouze části čočky do barviva a pomalým vytahováním. BČ lze také obarvit několika barvami najednou. Barvivo lze z tónované čočky téměř úplně odstranit namočením do odstraňovače barvy nebo do „bělidla“, horkého alkoholového roztoku. Díky této variabilitě je spolehlivé a opakovatelné tónování plastových čoček stejně umění jako věda. [32]

Plastové čočky se liší svou schopností přijmout odstín, stejně jako čočky s různými povrchovými úpravami jako je například tvrzení nebo anti-reflex. Polykarbonát, tvrzené čočky a některé plasty se středním indexem a vysokým indexem lomu, se barví obtížněji. Dojde k tomu, že čočky z těchto materiálů přijmou tmavý odstín pouze pokud mají tónovatelný tvrdý povlak. [32]

Číré plastové čočky se po očištění a odmaštění jednoduše namočí do roztoku barviva požadované barvy. Teplota lázně se musí pohybovat od 80 do 90°C. Čím déle je čočka ponechána v barvivu, tím tmavší je odstín. Protože je barva absorbována přes povrch čočky, kvalitní a dobře vytvrzené plastové čočky vedou k rovnoměrnému odstínu nezávisle na síle a změně tloušťky čočky. Odstín pak není světlejší v tenčích částech ani tmavší v tlustších, jako při použití tónovaného skla (jak již bylo znázorněno na obr. 11). Avšak plastová čočka, která

nebyla řádně vytvrzena při lití během výroby, může být skvrnitá a nerovnoměrně obarvená. [24, 27]

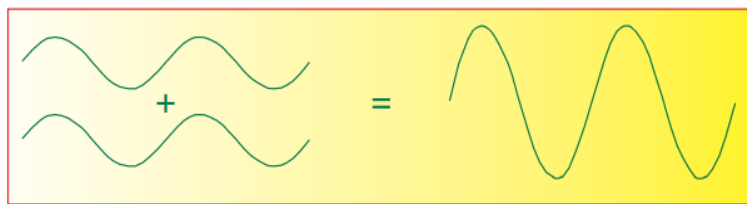


Obrázek 12: Gradientní barvení čočky

5.4 Reflexní vrstva (zrcadlová)

Antireflexní vrstvy zvyšují propustnost a snižují tak povrchové odrazy a běžně se používají na brýlích, fotografických čočkách a solárních člancích. Vysoce reflexní povlaky (HR) naopak zvyšují povrchovou odrazivost a mohou vytvářet zrcadla, která odrážejí prakticky veškeré světlo daného rozsahu vlnových délek, které na ně dopadá. [33]

Zrcadlové povlaky se používají z funkčních a estetických důvodů. Obvykle se aplikují na sluneční brýle. Brýle na lyžování, vodní sporty a jednoduše kosmetické použití jsou dobrým příkladem brýlí s reflexní vrstvou. Zrcadlové povlaky se dodávají v různých barvách, jako je stříbrná, zlatá a modrá. První reflexní vrstvy měly hnědou barvu. Propustnost čoček s HR vrstvou může být odstupňovaná – u minerálních může být 25%, 50%, ale klidně i 75%, u organických jen 25% až 35%. Vysoce reflexní zrcadlové vrstvy se používají i ke snížení transparentnosti a zvýšení odrazivosti čočky při používání laserů či jiných světelných zdrojů. Naopak od antireflexních vrstev se zde uplatňuje princip konstruktivní interference. Velká část paprsků dopadajících na BČ se odrazí a část je pohlcena (zbytek se přemění na tepelnou energii). Absorpce a rozptyl během odrazu vedou ke snížení propustnosti a možnému poškození očí laserem nebo jakýmkoli světelným zdrojem. HR povlaky se používají v běžných aplikacích laserové optiky, jako je skládání dráhy paprsku laseru. [16, 18, 23, 33]



Obrázek 13: Konstruktivní interference [27]

5.4.1 Způsob nanášení

HR povlaky lze aplikovat na téměř jakýkoli povrch materiálu čočky a nejčastěji se nanášejí na vnější povrch čočky. Zrcadlové vrstvy se na BČ nanášejí vakuovým nanášením interferenčních vrstev z práškových oxidů, kovů nebo jiných dostupných sloučenin. Lze použít metodu vakuového napařování pomocí iontů nebo plazmy (vysvětleno v kap. 5.2.1). Zrcadlové povlaky se skládají z konstrukčních interferenčních vrstev, které interferují se světlem procházejícím čočkou. Čím hustší jsou interferenční vrstvy, tím více je indukován obraz, což vytváří zrcadlový efekt. Vrstva musí mít dobrou mechanickou odolnost, aby se hned neopotřebovala. [18, 34]

5.5 Samočistící vrstva

Žádný povlak bohužel nezajistí to, že už si člověk nikdy nebude muset čistit brýle. Čočky však mohou být potaženy samočistící vrstvou. Díky této povrchové úpravě je povrch čočky hladký, což ztěžuje přichycení nečistot a prachu. Čím hladší je povrch čočky, tím lépe. Tato povrchová úprava je skvělým bonusem zejména u antireflexních čoček – povrch AR vrstvy bývá drsný, což vede ke snazšímu zachycování nečistot. Vzhledem k tomu, že odrazy na skle potaženém AR povlakem mizí, i nepatrné množství prachu nebo jakéhokoli znečištění bude viditelné. [2, 15, 30]

Samočistící vrstvy fungují na dvou principech – na hydrofobitě a hydrofilitě. Tyto dva principy zajistí, že se na čočce bude méně usazovat prach a další jiné nečistoty. [18]

5.5.1 Hydrofobní a hydrofilní vrstva

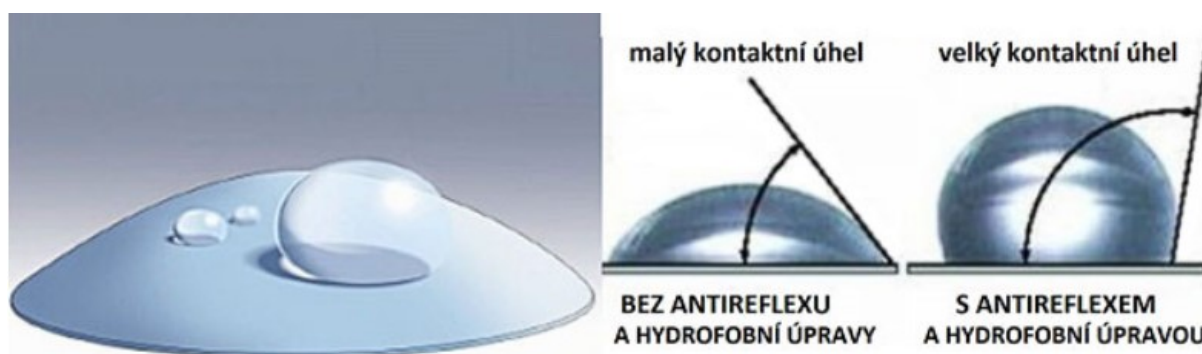
Jedním ze způsobů, jak mohou být povrchy samočistící, je odpuzování vody tak účinně, že se na něj nemohou zachytit nečistoty přenášené vodou – jsou superhydrofobní. To zvláště dobře dokazuje indický lotos, jehož listy zůstávají čisté i v kalné vodě. Fenomén sběru nečistot

klouzáním kapiček vody na povrchu lotosového listu je obecně známý jako „lotosový efekt“. Tento účinek je patentován a používán v technických systémech. [15, 35]

Čisticí povlak, také známý jako **hydrofobní** (vodoodpudivý), je povlak proti nečistotám. Výhodami hydrofobního povlaku jsou například ty, že zabraňuje tomu, aby se na čočky brýlí dostal prach a veškeré nečistoty, otisky prstů, mastnota a déšť. Také jeho antistatický účinek zabraňuje ulpívání prachu a chmýří na povrchu BČ. Díky funkci zabraňující tvorbě skvrn je obtížné brýle zašpinit a jednodušší je očistit. Vrstva vypadá leskle a čistě jako čerstvě vyleštěné auto. [35]

Princip působení hydrofobního povlaku je založen na snížení adhezní síly mezi kapkou vody a povrchem čočky. Adhezní síla vody (kapek deště), nazývaná vnitřní adheze, je slabší než adheze mezi kapkou a čočkou – povrch je smáčitelný. To vede k tomu, že se kapka po styku s BČ na čočku „přilepí“ a zůstane kulatá (velký kontaktní úhel). A protože vnitřní adhezi kapky vody nelze změnit, pokoušíme se snížit vnější adhezi mezi kapkou vody a povrchem čočky těmito hydrofobními vrstvami. Když se tedy kapka vody dotkne BČ, nemůže se na ni přilepit, ale sama z povrchu sklouzne – povrch je nesmáčitelný. [30, 35]

Tento povlak se nanáší na přední stranu brýlové čočky. U minerálních skel se nejprve nanese antireflexní vrstva a na ni se poté nanese hydrofobní vrstva. U organických skel je na povrchu skla nejprve tvrzení, antireflexní povlak a na něm hydrofobní povlak. [30]



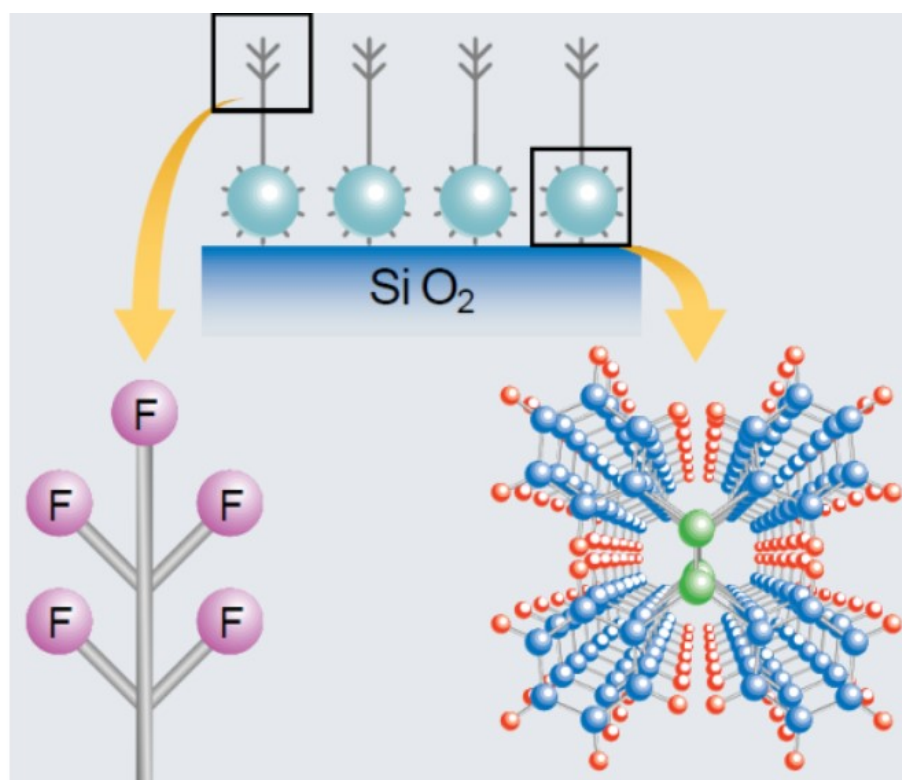
Obrázek 14: Kontaktní úhel s hydrofobní úpravou [29]

Na **minerální čočky** se aplikuje vosk a polymer buď plazmatickým chemickým rozrušením povrchu skla nebo metodou iontového leptání nebo kapání. Tímto se vytvoří povrch s **hydrofobními** vlastnostmi, ale metoda je finančně náročná. [18]

Opakem hydrofobity je **hydrofilita**. Hydrofilní povrchy jsou obvykle silně přilnavé, protože mají vysokou povrchovou energii. Na již hydrofilní povrch lze nanést tenkou vrstvu TiO_2 a

z hydrofilního materiálu tak udělat materiál superhydrofilní. Voda pak tedy na brýlových čočkách netvoří kapky, ale tenký film. [18, 35]

Na **organické čočky** se hydrofobní a olejofobní vrstva nanáší buď metodou dip coating, vakuově nebo plazmatickou polymerizací. Antireflexní vrstvy jsou velmi pórovité, což vede k velkému usazování nečistot. Nanesením hydrofobní vrstvy, která je tenká jen několik nanometrů, se vytvoří hladký povrch a má dokonce i antistatické účinky. Tyto hydrofobní a olejofobní vrstvy se připravují z uhlovodíků, křemičitanů, fluorokřemičitanů a fluorokarbonátů. [18]



Obrázek 15: Struktura hydrofobní vrstvy [22]

5.5.2 Protizamlžovací vrstva (antifog)

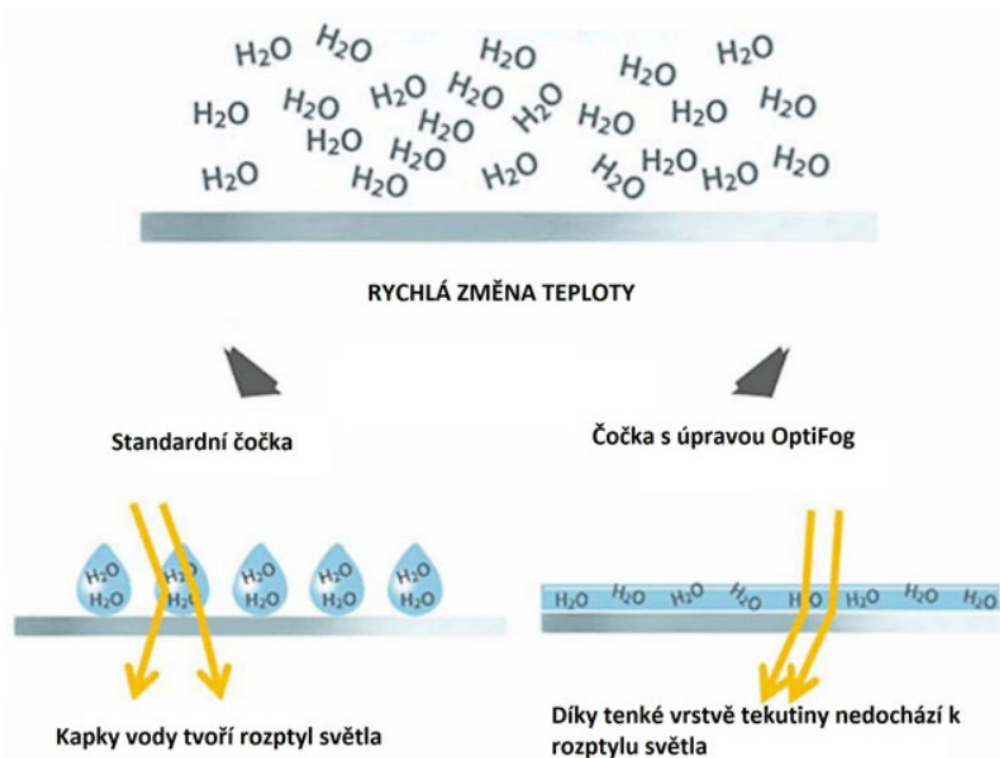
Antifogová vrstva eliminuje kondenzaci vlhkosti na čočkách, která způsobuje zamlžování (přechod ze studeného do teplého prostředí, při sportu). Protizamlžovací vrstvy lze aplikovat na plastové, polykarbonátové a jiné brýlové čočky, včetně čoček s vysokým indexem a fotochromatických čoček. [36]

Zamlžování brýlí je způsobeno malými kapičkami vody, které se tvoří kondenzací na povrchu brýlových čoček, když jsou čočky výrazně chladnější než teplota okolního vzduchu. Protože mají organické BČ menší tepelnou vodivost než minerální, zkondenzovaná kapalina se

z nich odpařuje déle. Na čočky lze nanést vrstvu polyethylenu, který zvýší povrchové napětí kapek na povrchu a tím sníží jejich kontaktní úhel. [18, 36]

Antifogové povlaky lze vyrobit jako trvalé povlaky nanášené přímo na čočku během výroby. Pro dosažení vlastností proti zamlžení je čočka potažena pryskyřičným filmem, který absorbuje vlhkost. Když absorpce dosáhne bodu nasycení, mezifázový aktivátor (uvnitř pryskyřice) změní kapičky vody na tenkou vnější vrstvu vody. Nejčastěji se setkáváme s trvale nanesenými protizamlžovacími povlaky ve sportovních brýlích, jako jsou například plavecké brýle. Dioptrické čočky s vrstvou proti zamlžování nejsou vždy k dispozici. Naštěstí existují spreje a kapky, které lze aplikovat i na běžné brýlové čočky ke snížení zamlžování. Ne všechny spreje nebo kapky proti zamlžování jsou kompatibilní s AR vrstvou. [27]

Další možností v technologii proti zamlžování čoček jsou čočky Optifog (Essilor). Vlastnosti zamlžování čoček Optifog se aktivují nanesením kapky aktivátoru Optifog na každou stranu čočky a následným otřením čočky hadříkem z mikrovlákna, aby se kapalina důkladně rozptýlila po celém povrchu čočky. Toto ošetření udržuje čočky bez zamlžení po dobu jednoho týdne. Kapičky se spojí do jedné tenké vrstvy, která se rychle odpaří a čočka tak zůstává stále průhledná a čistá. [36]



Obrázek 16: Technologie optifog [18]

6 Experimentální část

Experimentální část práce se zabývá optickými a povrchovými vlastnostmi brýlových čoček. Část svého měření jsem provedla na půdě Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT v laboratoři biomateriálů a nanotechnologií a část ve Fyzikálním ústavu AV ČR, kde byly i připraveny vrstvy oxidu titaničitého (TiO_2) na skle.

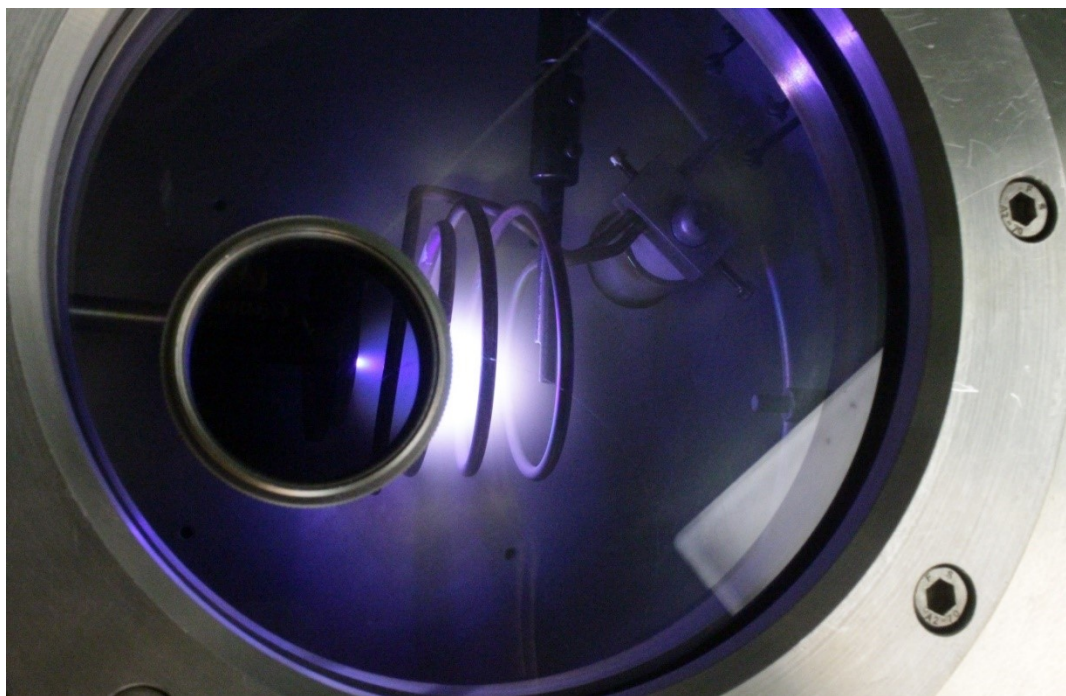
Experiment se skládá ze dvou částí. První část se zabývá transmisivitou brýlových čoček, konkrétně jejich propustností pro světlo o vlnové délce od 200 do 800 nm. Druhá část se zaměřuje na jejich smáčivost.

Pro experiment byly použity komerčně dostupné brýlové čočky (převážně od firem Zeiss a Omega Optix) a námi připravené vrstvy TiO_2 na skle. Komerčně dostupné čočky se liší svými povrchovými úpravami, indexy lomu a optickou mohutností. Čočky mi byly poskytnuty Fakultou biomedicínského inženýrství v Kladně.

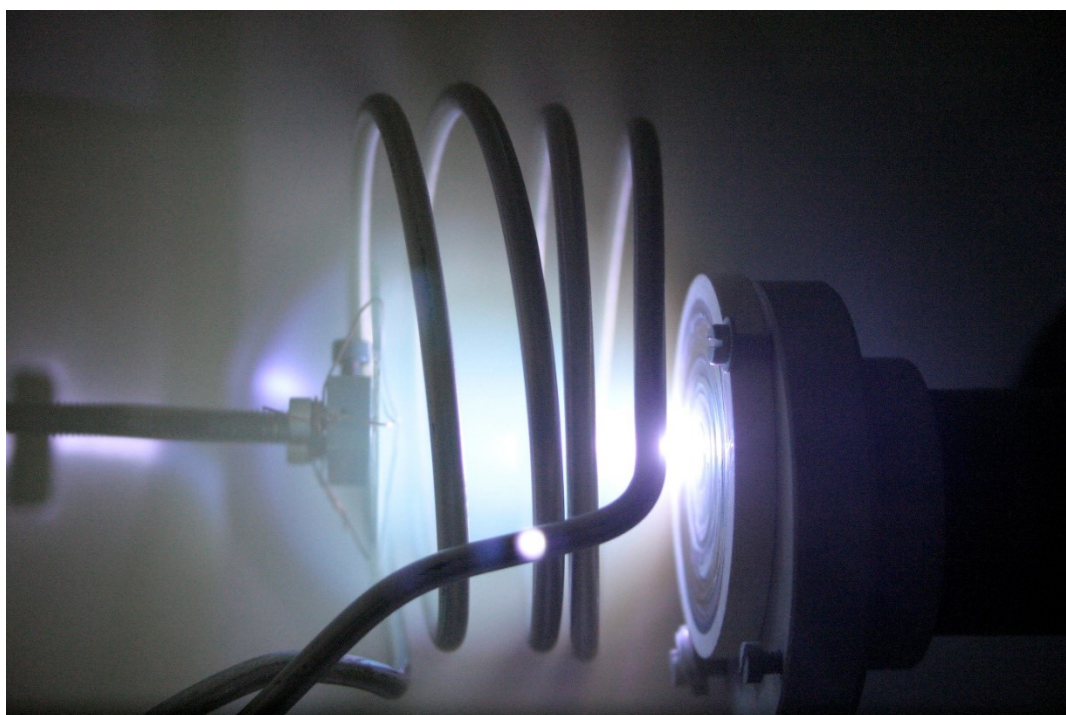
6.1 Vrstvy TiO_2

Oxid titaničitý (TiO_2), přirozeně se vyskytující oxid titanu, je hojný v zemské kůře. Často je součástí mnoha každodenních potřeb (např. zubní pasty, potraviny, léky a kosmetika) jako bílé barvivo. TiO_2 má vynikající povrchovou aktivitu vůči ultrafialovému (UV) záření, a to buď rozptylem slunečního záření nebo absorpcí spektra (polovodivý účinek). Oxid titaničitý je bohatý, biokompatibilní a levný polovodič s jedinečnými optoelektronickými vlastnostmi (výborná transmisivita ve viditelném a blízkém IR spektru) a vysokou chemickou stabilitou. Je známý díky svému vysokému indexu lomu (2,7). V přírodě se vyskytuje ve třech formách jako rutil, anatas a brookit. [37, 38, 39]

Tenké vrstvy lze nanášet různými metodami, jak jsem již zmínila v kapitole 5.2.1, ať už tepelně (Thermal Evaporation Deposition), plazmaticky (Plasma Sputtering Deposition) či iontovým svazkem (Ion Beam Assisted Deposition). Vzorke použité pro měření transmisivity i smáčivosti byly připraveny pomocí pulsní laserové depozice (PLD = Pulsed Laser Deposition) na substrát – podložní sklo. Všechny vrstvy byly připraveny z terče TiO_2 na podložní sklo za použití excimerového laseru (vlnová délka 248 nm) s opakovací frekvencí 10 Hz, s délkou pulzu 20 ns a velikostí stopy na terči $9,75 \text{ mm}^2$. Aby byly vrstvy kvalitnější, byl při depozici použit radiofrekvenční výboj. [18]



Obrázek 17: Depozice na tyčku



Obrázek 18: Depozice na podložní sklo

Podmínky se u jednotlivých vzorků liší počtem pulzů, hustotou energie laseru a tlakem kyslíku použitého při nanášení vrstvy. V následující tabulce 1 jsou tyto depoziční podmínky připravených TiO_2 vrstev uvedeny.

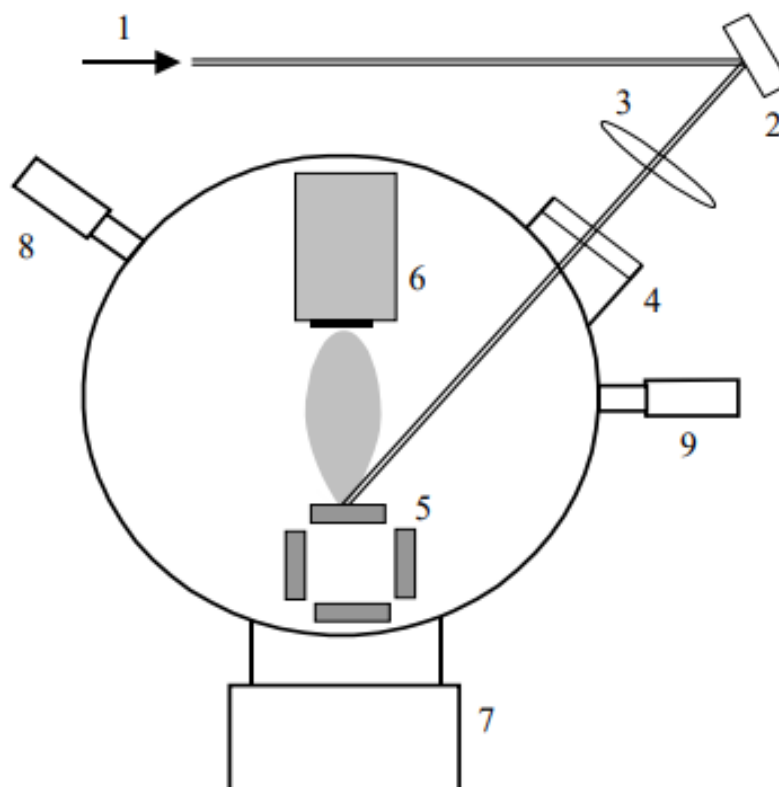
Tabulka 1: Depoziční podmínky TiO₂ vrstev

Číslo vzorku	Hustota energie laseru na terči [J/cm ²]	Počet pulsů [$\times 10^3$]	Tlak O ₂ při depozici [Pa]
10	3,5	4,2	13
11	2	4,2	3
12	2	4,2	1
18	3,36	4,2	3
19	3,36	4,2	2
20	3,36	4,2	1
21	2	4,2	2
22	3,36	2,1	3
23	2	2,1	3

6.1.1 Pulsní laserová depozice

Pulsní laserová depozice (PLD) je relativně nová, univerzální a jedinečná depoziční technologie. Byla popularizována na konci 80. let a měla několik charakteristik, díky nimž byla ve srovnání s jinými technikami vývoje tenkých filmů pozoruhodně konkurenceschopná. Těmito hlavními atraktivními rysy byly především stechiometrický přenos a jednoduchost při počátečním nastavení a při výzkumu jakýchkoliv oxidových sloučenin. Významný vývoj depozice pulzního laseru pokračoval a za posledních 15 let se PLD vyvinula do široce používané techniky pro výzkum nanášení tenkých vrstev. Dnes se PLD používá při depozici izolátorů, polovodičů, kovů, polymerů, a dokonce i biologických materiálů. [40, 41]

Použitelnost a přijetí pulzní laserové depozice ve výzkumu tenkých vrstev spočívá do značné míry v její jednoduchosti při implementaci. Pulsní laserová depozice je proces fyzické depozice par, prováděný ve vakuovém systému. Při metodě PLD je laser (nejčastěji excimerový) zaměřen na terč. Každý laserový puls z něj vypařuje nebo abluje malé množství materiálu, který vytvoří malý plazmový obláček. Tento vypařený/ablaovaný materiál lze zachytit na substrát (v našem případě tedy podložní sklo) a tím na něm vytvořit velmi tenkou vrstvu (zde TiO₂). Depozici lze ovlivnit podmínkami, za jakých bude probíhat. Záleží tedy např. na teplotě substrátu, tlaku plynu, vzdálenosti podložky od terče, velikosti stopy laseru na terči a samozřejmě na hustotě energie laseru na terči. Na kvalitu vrstvy a její tloušťku a plochu má vliv ale i parametr laseru (vlnová délka, frekvence, ...), materiálové vlastnosti podložky aj. [38, 40, 41]



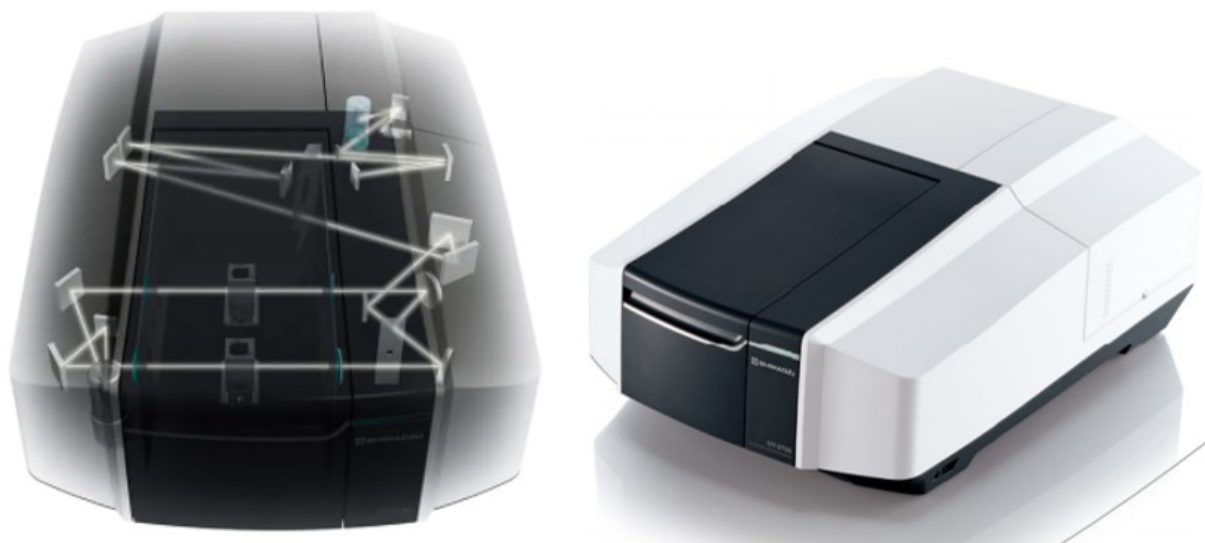
Obrázek 19: Schéma PLD (1 - laserový svazek, 2 - odražeč, 3 - čočka, 4 - vstupní okno depoziční komory, 5 - karusel, 6 - topný stůlek s podložkou, 7 - vakuový čerpací systém, 8, 9 - vakuové měřky [40])

Metoda PLD je jednoduchá, velmi univerzální a i přesto, že zařízení je poměrně finančně náročné, lze pomocí něj nadeponovat mnoho povrchů. Hlavními nevýhodami jsou například ty, že se na povrchu tvoří kapičky a vrstvy lze nadeponovat jen malou plochu (o průměru až 10 cm).

6.2 Měření

6.2.1 Spektrometr

Při měření transmisivity byl použit UV-VIS dvoupráskový spektrofotometr UV-2600i od firmy Shimadzu s rozsahem 185-900 nm. Jedná se o univerzální spektrofotometr pro výzkumné účely, který lze použít v široké škále oborů a lze jej snadno rozšířit tak, aby vyhovoval měřenému objektu. UV-2600i je také vybaven patentovanou difrakční mřížkou Lo-Ray-Ligh od společnosti Shimadzu, která dosahuje vysoké účinnosti a nízké úrovně rozptýleného světla. [42]



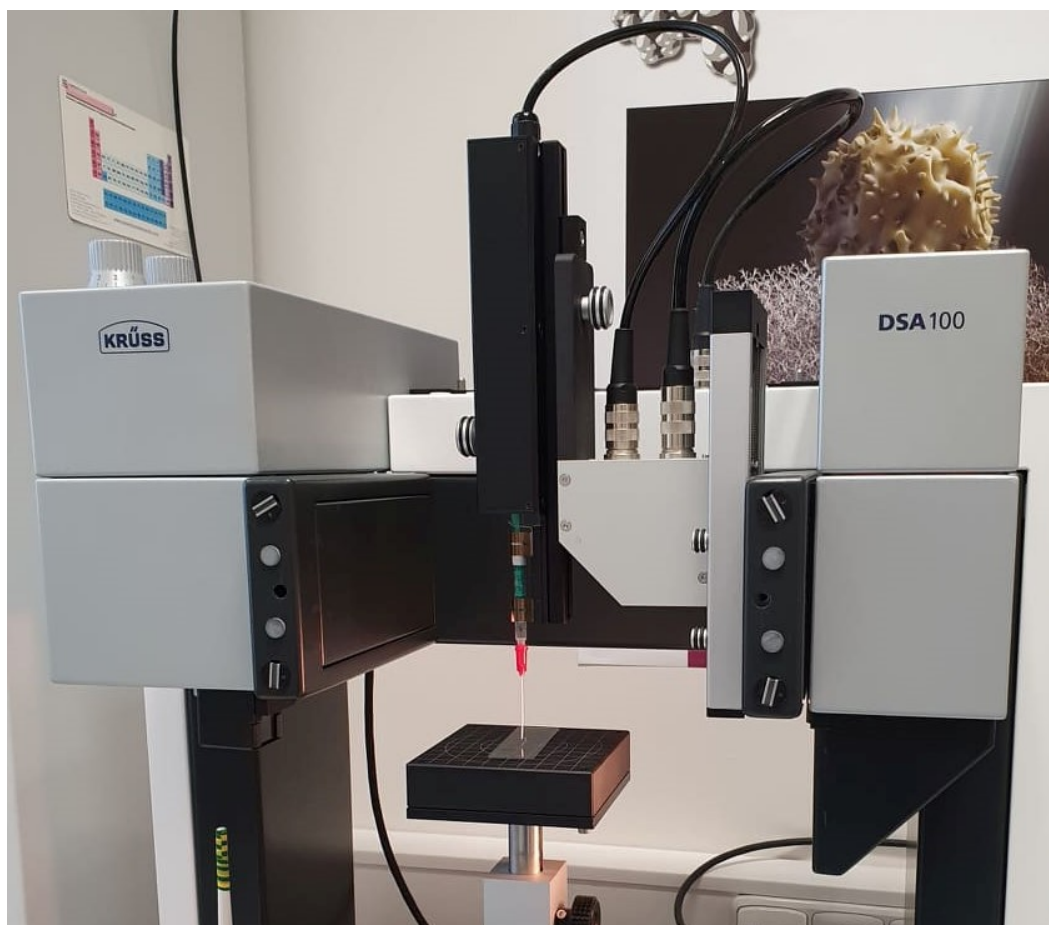
Obrázek 20: UV-VIS spektrofotometr Shimadzu [42]

Měření propustnosti probíhalo v laboratoři na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT. Každá čočka se opatrně vyndala z obalu, vyleštila a umístila do stojánku, který se poté i s čočkou vložil do spektrometru. Čočka se do spektrometru vkládala tak, aby paprsek světla prošel jejím středem. Během měření je možné sledovat křivku na monitoru v softwaru, který nakonec vyhodnotí propustnost čočky. Naměřená data se zpracovala a vynesla do grafů.

6.2.2 Goniometr

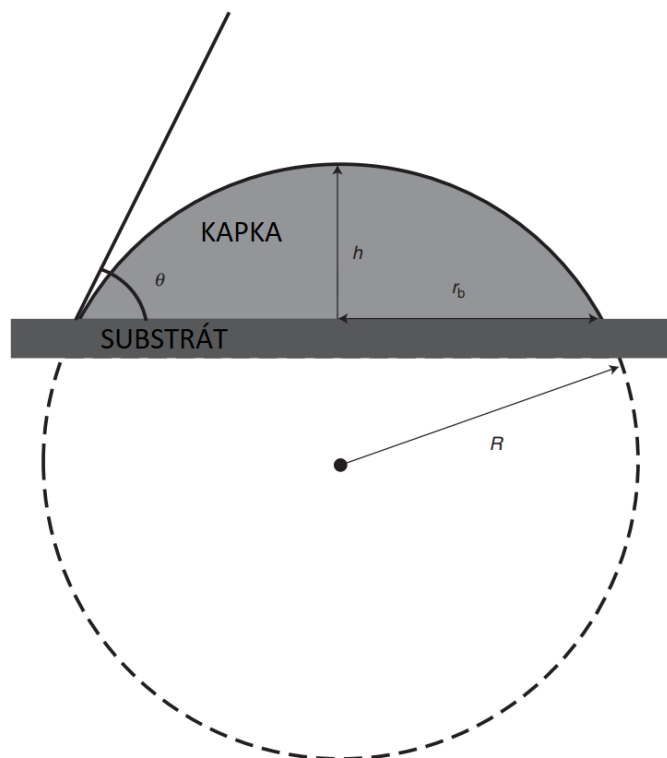
Pro další měření – měření smáčivosti – byl použit fakultní goniometr DSA 100 od firmy Krüss GmbH, který je umístěn na půdě FZU AV ČR, kde toto měření probíhalo.

Drop Shape Analyzer DSA100 umožňuje komplexní analýzu pevných látek a kapalin ve smáčecích procesech. Vysoký stupeň automatizace se snadno programovatelnými postupy zajišťuje naměření kontaktního úhlu a povrchového napětí. Goniometr je vybaven fotoaparátlem s vysokým rozlišením a kvalitním objektivem se zoomem pro přesné zobrazení kapky s optimální velikostí. Vysoká kvalita obrazu, které se tím dosahuje, vede k přesně měřenému kontaktnímu úhlu nebo povrchovému napětí. [43]



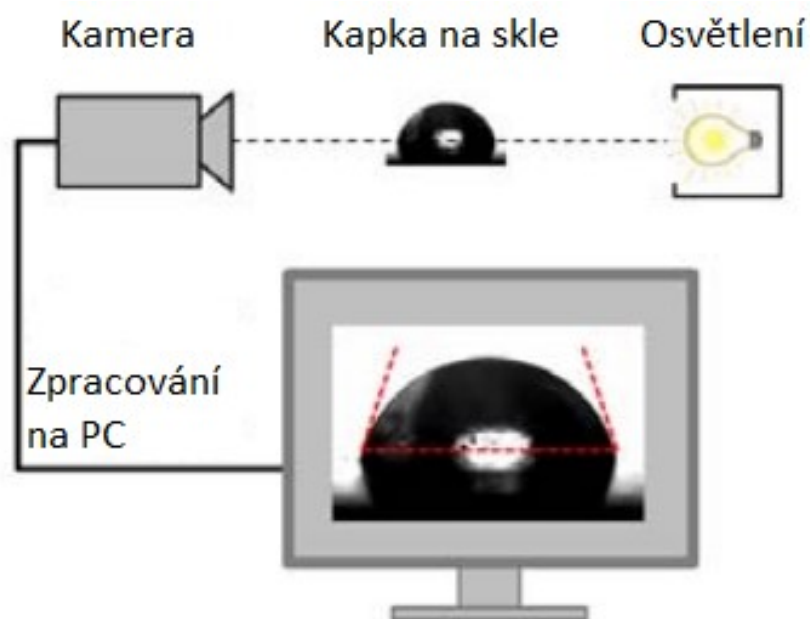
Obrázek 21: Goniometr DSA100 s automatikou

Než měření začalo, byla potřeba nastavit stolek, kontrast a zaostřit kameru tak, aby byla čočka co nejlépe a nejostřeji zaznamenána. Osvětlení bylo po celou dobu měření nastaveno na 60 lx (luxů). Každá čočka se opět opatrně vyndala z obalu, vyleštila a položila na stolek goniometru tak, aby byla kapka kápnuta na střed. Měřilo se přímou metodou přisedlé kapky. Tzn. injekční pipeta se přiblížila k čočce, vytvořila kapku destilované vody objemu 0,5 μl , umístila ji na povrch čočky a zase se oddálila. Dávkování je plně automatizované, takže objem kapky je pokaždé stejný a přesný. Kontaktní úhel se poté odečítal z videa od 30. do 40. snímku (z celkových 250 snímků) po dosednutí kapky. U některých čoček byl úhel měřen lineárně, u většiny ale pomocí kružnic.



Obrázek 22: Analýza profilu kapky pomocí kružnice [44]

Měření probíhalo tak, že se kápily čtyři kapky na každou čočku – první kapka na střed a další tři kapky v blízkém okolí středu. Nekapalo se přesně na stejné místo, a proto není kontaktní úhel pokaždé stejný. Přesnost této metody u goniometru DSA100 je $\pm 3^\circ$.



Obrázek 23: Schéma měření kontaktního úhlu metodou přisedlé kapky [15]

6.3 Testované čočky

Transmisivita byla testována u běžně dostupných čoček s různými povrchovými úpravami nebo bez jakékoli povrchové úpravy a u skel s vrstvou TiO₂. Testované čočky byly převážně plastové, ale pro porovnání byly přidány i některé z PMMA, CR-39 nebo minerální. Měřeny byly po skupinách se stejnou povrchovou úpravou, ale rozdílným indexem lomu a naopak.

V následujících tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny čočky, které byly použity k měření propustnosti světla. Povrchovými úpravami na čočkách jsou vrstvy HMC (antireflexní plus hydrofobní úprava), HMC+ (stejně jako HMC plus oleofobní úprava), super AR nebo AR, HC, UV, EyeDrive, MAR (multi AR), DV (Duravision) a BlueProtect (ochrana proti modrému světlu). Do grafů ale nakonec nebyly vyneseny všechny měřené čočky – nehodily se kvůli mnoha rozdílným parametrům.

Tabulka 2: Testované běžně dostupné brýlové čočky (1-13) – transmisivita

	Výrobce	Index lomu n [-]	Opt. mohutnost φ [D]	Povrchová úprava	Materiál
1.	Zeiss	1,50	+0,50	HMC	-
2.	Omega optix	1,50	0,00	Super AR	plast
3.	Zeiss	1,60	+2,00	HMC+	
4.	Omega optix	-	+3,75/-0,25	AR	CR-39
5.	Omega optix	-	+1/-0,25	HC	CR-39
6.	Omega optix	1,50	0,00	-	plast
7.	Omega optix	1,67	0,00	Super AR	plast
8.	Omega optix	1,60	0,00	Super AR	plast
9.	Omega optix	1,50	0,00	Super AR	plast
10.	Omega optix	-	0,00	HC	PMMA
11.	Omega optix	1,60	0,00	HC	plast
12.	Omega optix	1,50	0,00	HC	plast
13.	Omega optix	1,59	0,00	HMC	PMMA

Tabulka 3: Testované běžně dostupné brýlové čočky (14-30) – transmisivita

	Výrobce	Index lomu n [-]	Opt. mohutnost φ [D]	Povrchová úprava	Materiál
14.	Omega optix	1,56	0,00	HMC	
15.	Omega optix	1,53	0,00	HMC	trivex
16.	Essilor	1,50	+1,50	UV	plast
17.	-	1,50	+1,25	-	mineral
18.	Omega optix	1,50	+1/-0,75	Eye drive	-
19.	Omega optix	1,60	+4,00	Eye drive AS	-
20.	Sola	-	+0,25/-2,00	MAR	CR-39
21.	Zeiss	-	-2,5/-1,00	DV silver	-
22.	Zeiss	-	+1,5/-0,5 (add 2,00)	Blue protect	-
23.	Zeiss	1,50	0/-1,25	Duravision platinum	-
24.	Zeiss	1,60	+2,50	Duravision platinum	-
25.	Zeiss	1,50	+1,50	LotuTec	-
26.	Zeiss	1,60	-1,00/-0,50	LotuTec	-
27.	Zeiss	1,60	-2,25	LotuTec	-
28.	Zeiss	-	+1,75 (add 2,25)	DV drivesafe	-
29.	Zeiss	1,50	+1/-0,50	Combi NT	-
30.	Zeiss	1,60	-4,75	Duravision sun	-

Smáčivost jsme opět testovali u běžně dostupných čoček s různými povrchovými úpravami nebo bez jakékoli povrchové úpravy a u skel s vrstvou TiO_2 . V této sadě jsou čočky opět převážně z plastu a dvě z CR-39. Oproti předešlé sadě se zde objevuje i povrchová úprava SHMC, která je totožná s HMC+ (stejně jako HMC plus oleofobní úprava).

Měřené čočky byly v obou případech buď opracované (byly poškozeny při zábrusu, ale na měření to absolutně nemělo vliv) nebo neopracované.

Tabulka 4: Testované běžně dostupné čočky – smáčivost

	Výrobce	Index lomu n [-]	Opt. mohutnost φ [D]	Povrchová úprava	Materiál
1.	Omega optix	-	+3,75/-0,25	AR	CR-39
2.	Omega optix	-	+1/-0,25	HC	CR-39
3.	Zeiss	1,60	+2,00	HMC+	-
4.	-	1,6	-1,00	SHMC	plast
5.	Omega optix	1,56	0,00	HMC	-
6.	Omega optix	1,50	0,00	HC	plast
7.	Omega optix	1,67	0,00	super AR	plast
8.	Omega optix	1,60	0,00	super AR	plast
9.	Omega optix	1,50	0,00	-	plast

6.4 Výsledky měření

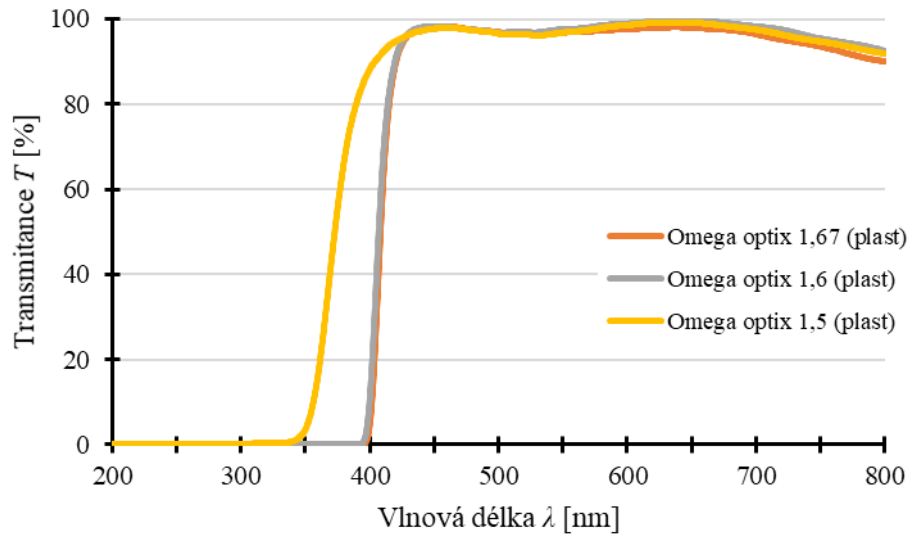
Výsledky jsou rozděleny do dvou kapitol – transmisivita a smáčivost – a několika podkapitol dle typu povrchové úpravy nebo indexu lomu.

6.4.1 Transmisivita

Antireflexní vrstva

AR vrstvy by měly zajišťovat téměř až 100% propustnost brýlových čoček. Jedná se o běžnou úpravu čoček a má ji dnes už většina brýlí.

V grafu na obrázku číslo 24 můžeme vidět, že index lomu materiálu propustnost čočky mění. Plastová čočka s indexem lomu 1,5 propouští světlo ve větším spektru než zbylé dvě čočky, které se svou propustností shodují. Tyto čočky s antireflexní vrstvou měly téměř 100% propustnost.

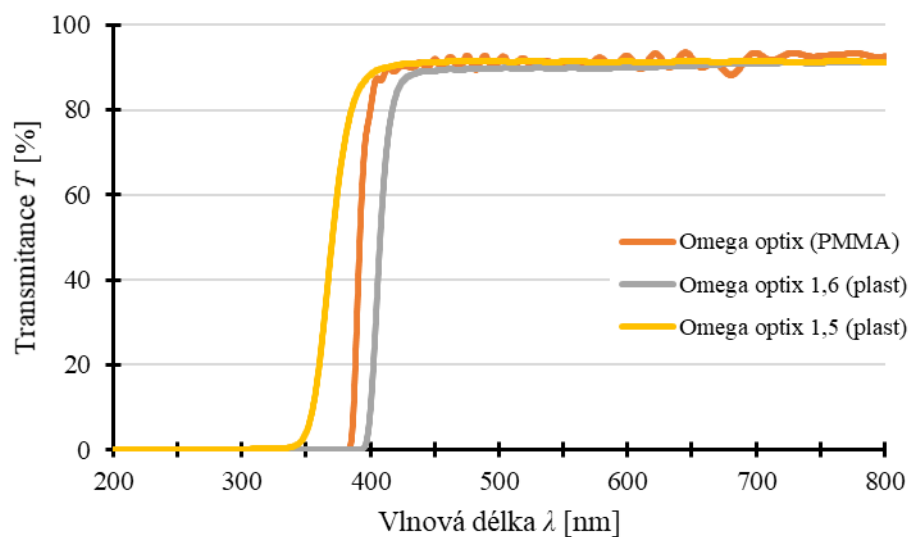


Obrázek 24: Graf transmisivity čoček s AR úpravou

Tvrzení

Tvrzení se u brýlových čoček používá proti jejich opotřebení a zničení. Opět se jedná o povrchovou úpravu, kterou disponuje dnes v podstatě každá BČ.

I přesto, že tyto tři měřené čočky nemají antireflexní úpravu, propouštějí velké množství světla. Na obrázku 25 můžeme vidět, že u čočky z PMMA docházelo při měření k interferenci, což je způsobeno odlišným materiálem proti čočkám plastovým. Bohužel není znám index lomu čočky z polymethylmethakrylátu, který její chování mohl také ovlivnit. Propustnost těchto tvrzených čoček se pohybovala kolem 90 %.

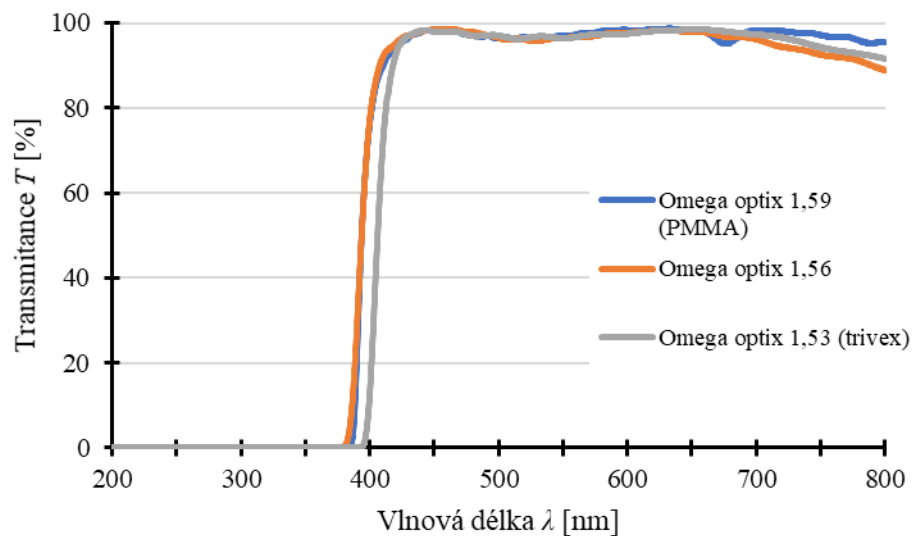


Obrázek 25: Graf transmisivity čoček s tvrzením

HMC

HMC vrstva, jak již bylo zmíněno, je AR vrstva spolu s vrstvou hydrofobní. Tato vrstva by měla zajistit jak větší propustnost pro světlo, tak menší náročnost péče o brýlové čočky.

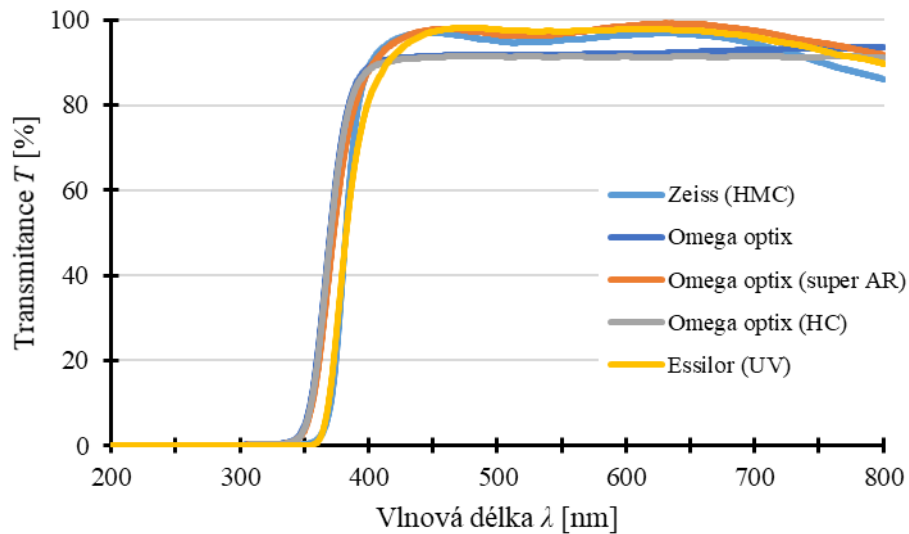
V této skupině byly měřeny čočky s různými indexy lomu i materiály, ale se stejnou povrchovou úpravou HMC. V grafu na obrázku 26 je opět vidět, že u čočky z PMMA docházelo při měření k interferenci. Transmisivita je ale u všech tří čoček velmi podobná a pohybuje se okolo 98 %.



Obrázek 26: Graf transmisivity čoček s HMC úpravou

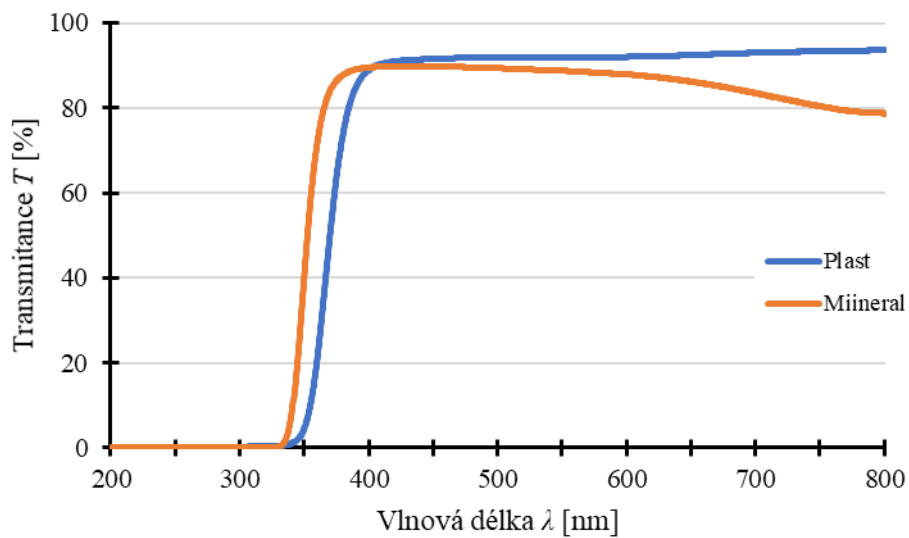
Čočky s indexem lomu 1,50

Na obrázku číslo 27 máme porovnání čoček s indexem lomu 1,5. Materiál čoček je stejný, pouze se liší povrchovou úpravou. Můžeme vidět, že BČ s tvrzením a bez povrchové úpravy mají horší transmittanci než čočky s ostatními úpravami – na čočkách se vytváří odlesky. Nejlépe propustná byla dle očekávání čočka se super antireflexní vrstvou, hned za ní měla nejlepší propustnost brýlová čočka s UV filtrem a jejich transmisivita se pohybovala okolo 100 %.



Obrázek 27: Graf transmisivity čoček s indexem lomu 1,50

V grafu na obrázku 28 je ještě pro porovnání dána i minerální brýlová čočka. Brýlové čočky mají opět stejný index lomu (1,5) a nemají povrchovou úpravu, liší se pouze materiálem. Můžeme vidět, že minerální čočka propouští méně světla než čočka plastová, ale propouští o něco větší světelné spektrum.

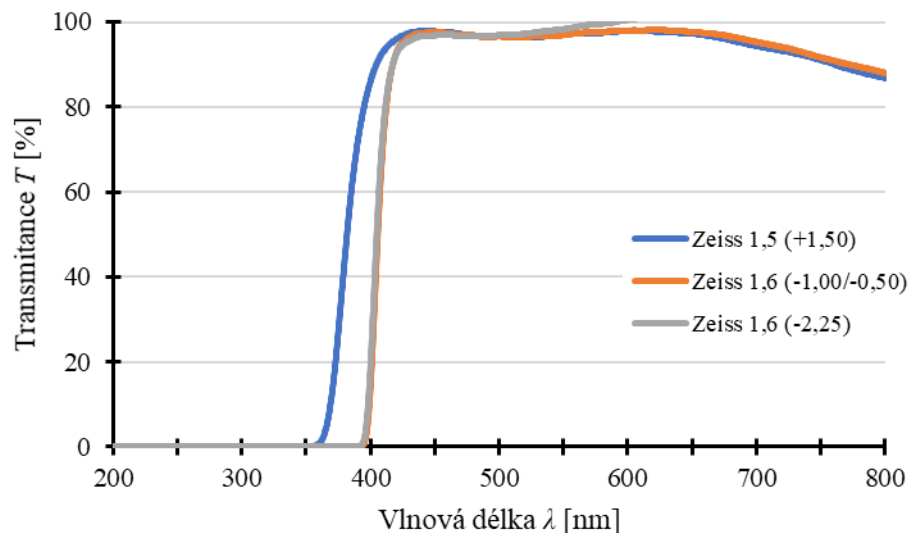


Obrázek 28: Graf transmisivity čoček z plastu a minerálu

LotuTec

ZEISS LotuTec je standardní vrstva obsahující antireflexní vrstvu, CleanCoat, která umožňuje snadné čištění a standardní tvrzení. [45]

V následujícím grafu můžeme vidět, že optická mohutnost na propustnost čoček neměla téměř žádný vliv. Naopak index lomu ano. Čočka s indexem lomu 1,5 měla propustnost i pro nižší vlnové délky než čočky s indexem 1,6. Jejich transmitance se ale pohybovala tak jako tak okolo 100 %.



Obrázek 29: Graf transitivity čoček s úpravou LotuTec

DuraVision

DuraVision je speciální povrchová úprava od firmy Zeiss, která se skládá z tvrzení, AR vrstvy a dalších vrstev, které souvisí s konkrétním typem čočky/úpravy. [46]

DV Platinum je první vrstva, která kromě vynikajících antireflexních vlastností nabízí prvotřídní odolnost pro maximální ochranu čoček. BČ s touto úpravou mají kosmeticky atraktivnější modrou zbytkovou barvu odrazu, která má o 20% nižší světelnou odrazivost než konvenční zelená čočka potažená AR vrstvou. [47]

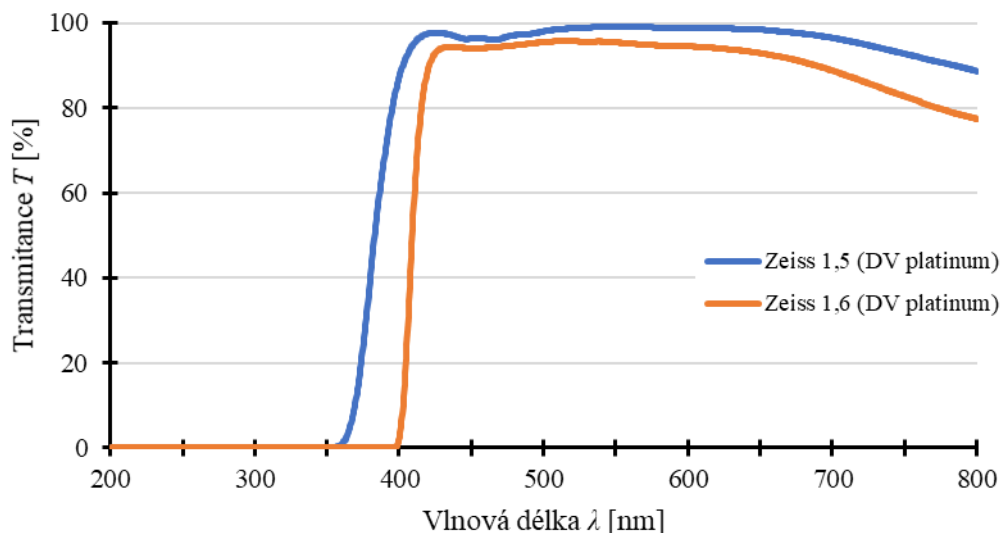
DV Silver pro jasnější vizi a lepší kosmetiku. Vyznačuje se vynikajícími antireflexními vlastnostmi – zvyšuje propustnost čočky až o 20 % a snižuje odraz od zadní plochy čočky. Stejně, jako DV Platinum, má modrý zbytkový odlesk. [48]

DV BlueProtect je povlak speciálně vyvinutý pro ochranu očí před zářením z LED žárovek, televizorů nebo počítačových monitorů. Tato úprava pomáhá s redukcí únavy a nepohodlí. [49]

DV DriveSafe je speciálně navržená úprava pro pacienty, kteří potřebují pomoc s viděním při řízení. Unikátní technologie řeší nejnáročnější vizuální výzvy, kterým dnes řidiči čelí – snižuje oslnění, zlepšuje viditelnost i kontrast objektů. [50]

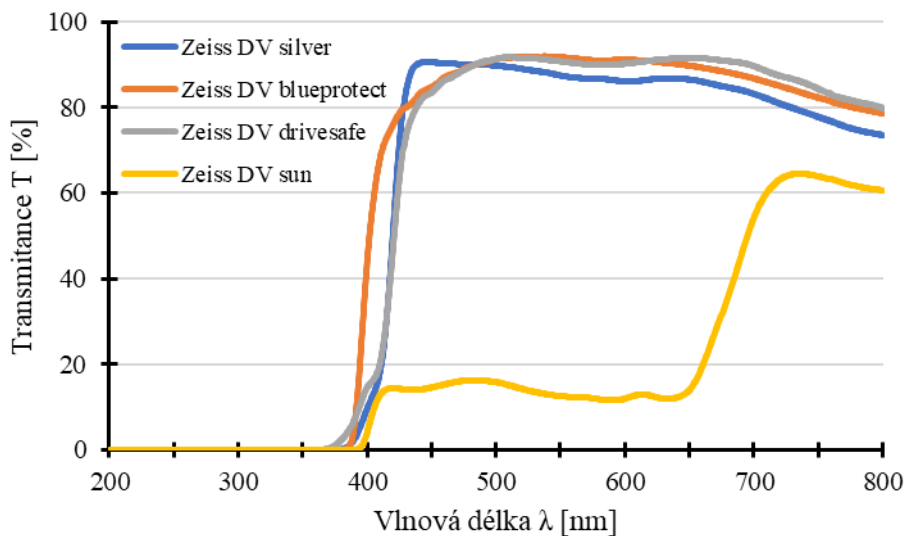
DV Sun je antireflexní vrstva pro sluneční brýle, která se nanáší na zadní stranu čočky. Zajišťuje jasné vidění, odolnost a snadnou péči. Díky přidanému tvrzení a hydrofobní vrstvě na přední straně je čočka plně chráněna. [51]

Na obrázku 30 jsou pro porovnání dvě brýlové čočky Zeiss s úpravou DV Platinum. Pravděpodobně jsou obě z plastu, liší se pouze indexem lomu. Index lomu, jak jsme již zjistili z předchozích grafů, má na propustnost vliv. Čočka s nižším indexem lomu má téměř 100% transmisivitou, čočka s indexem lomu 1,6 má transmisivitou okolo 95 %.



Obrázek 30: Graf transmissivity čoček s úpravou DV Platinum

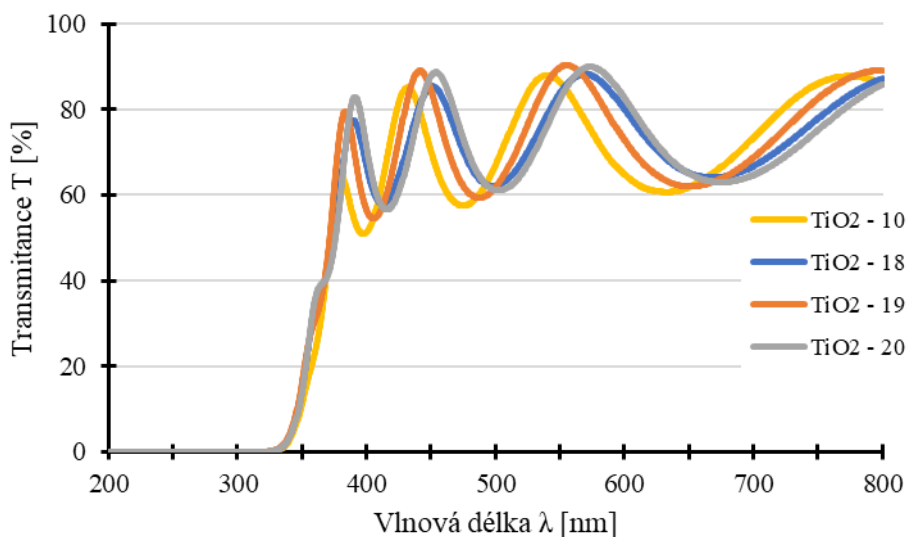
Brýlové čočky v grafu na obrázku 31 jsou všechny od firmy Zeiss, liší se pouze druhem úpravy DuraVision. Největší propustnost měly čočky s úpravou DV BlueProtect a DriveSafe s hodnotami pohybujícími se okolo 91 %. Po nich následuje brýlová čočka s úpravou DV Silver s transmittancí kolem 90 %. Nejmenší propustnost měla ztmavená šedá brýlová čočka s úpravou DV Sun, jejíž hodnoty se pohybovaly kolem 14 %, ale se vzrůstající vlnovou délkou vzrůstala i její propustnost, která se vyšplhala až k 64 %.



Obrázek 31: Graf transmisivity čoček s úpravami DuraVision

TiO₂

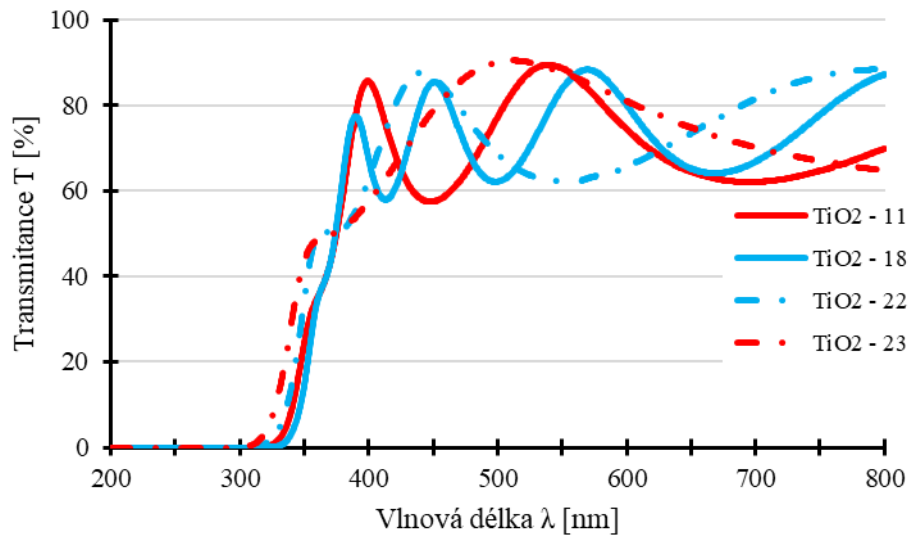
U vrstev TiO₂ docházelo k interferenci, jak je vidět na obrázku 32, 33 a 34. Na obrázku 32 je skupina vrstev TiO₂, které se liší tlakem O₂ při depozici. Tlak O₂ při depozici vzorku číslo 10 měl hodnotu 13 Pa, u vzorku 18 byl tlak 3 Pa, u TiO₂ – 19 byl tlak 2 a u vzorku 20 měl tlak hodnotu 1 Pa. Velikost tlaku ovlivňuje množství TiO₂ v nadeponované vrstvě.



Obrázek 32: Graf transmisivity vrstev TiO₂ rozdílným tlakem O₂ při depozici

Do grafu na obrázku 33 byly vyneseny vzorky lišící se počtem pulzů při depozici. Dvojice vzorků 22 a 23 byla připravena při polovičním počtu pulzů než dvojice vzorků 11 a 18 (4,2).

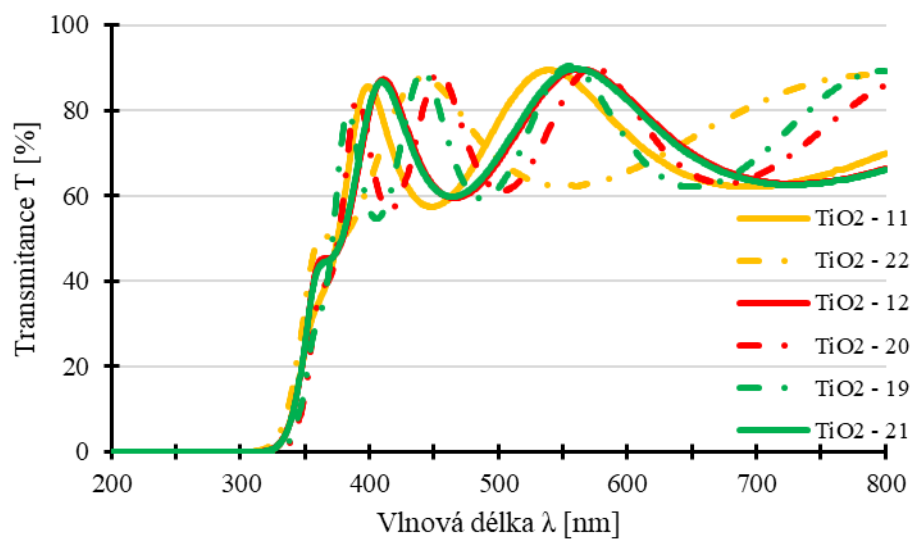
Počet pulzů udává tloušťku vrstvy – čím více pulzů, tím silnější vrstva je a naopak. Vrstvy 22 a 23 by tedy měly být o polovinu tenčí.



Obrázek 33: Graf transmisivity vrstev TiO₂ lišících se počtem pulzů při depozici

V grafu na následujícím obrázku 34 jsou vyneseny vrstvy TiO₂, u kterých se liší hustota energie laseru na terči při depozici. Vzorčky jsou rozděleny do tří dvojic pro porovnání – vzorčky ve dvojici se navzájem vždy liší právě hustotou energie laseru, a to téměř o polovinu.

Vrstvy 11, 12 a 21 byly nadeponovány při hustotě laseru na terči o hodnotě 2 J/cm² a vrstvy 19, 20 a 22 při hodnotě 3,36 J/cm².



Obrázek 34: Graf transmisivity vrstev TiO₂

6.4.2 Smáčivost

Smáčivost byla, stejně jako transmisivita, nejprve měřena u běžně dostupných čoček s různými povrchovými úpravami, indexy lomu i optickými mohutnostmi. U většiny čoček se ukázalo, že mají povrch hydrofobní. Pouze čočky číslo 2 (tvrzení), 6 (tvrzení) a 9 (bez úpravy), jak můžete vidět v tabulce číslo 5, mají povrch hydrofilní (kontaktní úhel pod 90°). To znamená, že se kapka na povrchu čočky roztekla a poměrně rychle se vypařovala.

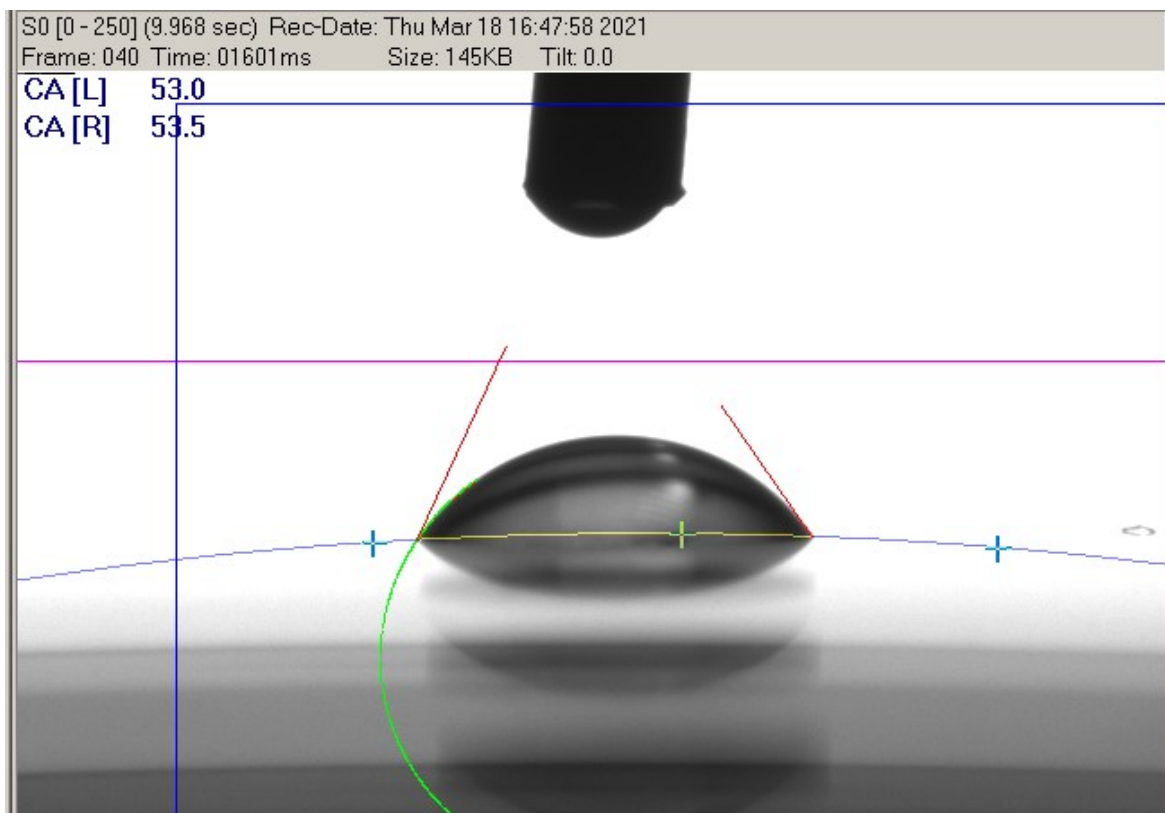
Smáčivost povrchu je ovlivněna hned několika faktory. Velikost kontaktního úhlu závisí hlavně na kvalitě povrchu (drsnosti/rovnosti) a jeho chemické heterogenitě, respektive homogenitě. Závisí také na adsorpci a desorpci na pevném povrchu a na hysterezi. [52]

Z tabulky můžeme vyčíst, že BČ s antireflexní a HMC vrstvou mají nejvíce hydrofobní povrch (kontaktní úhel nad 90°). Kapka se na jejich povrch nepřilne, ale ihned se odkutálí z povrchu čočky pryč. Naopak čočky s tvrzením mají povrch hydrofilní.

Tabulka 5: Testované běžně dostupné čočky

	Výrobce	Index lomu n [-]	Opt. mohutnost φ [D]	Povrchová úprava	Materiál	Průměr [°]
1.	Omega optix	-	+3,75/-0,25	AR	CR-39	105,9±0,66
2.	Omega optix	-	+1/-0,25	HC	CR-39	80,6±0,88
3.	Zeiss	1,60	+2,00	HMC+	-	107±0,68
4.	-	1,6	-1,00	SHMC	plast	108,2±1,34
5.	Omega optix	1,56	0,00	HMC	-	100,9±1,44
6.	Omega optix	1,50	0,00	HC	plast	84,3±1,67
7.	Omega optix	1,67	0,00	super AR	plast	105,4±0,15
8.	Omega optix	1,60	0,00	super AR	plast	106,3±0,5
9.	Omega optix	1,50	0,00	-	plast	36,6±19,2*

*U čočky číslo 9 (bez povrchové úpravy), vyšlo každé měření velmi rozdílně. Pravděpodobně to bylo dáno nehomogenitou povrchu či nějakou nečistotou, jako je například otisk prstu. Pokaždé byl ale povrch hydrofilní a kapka se hodně rozlila, jak můžete vidět na následujícím obrázku 35.



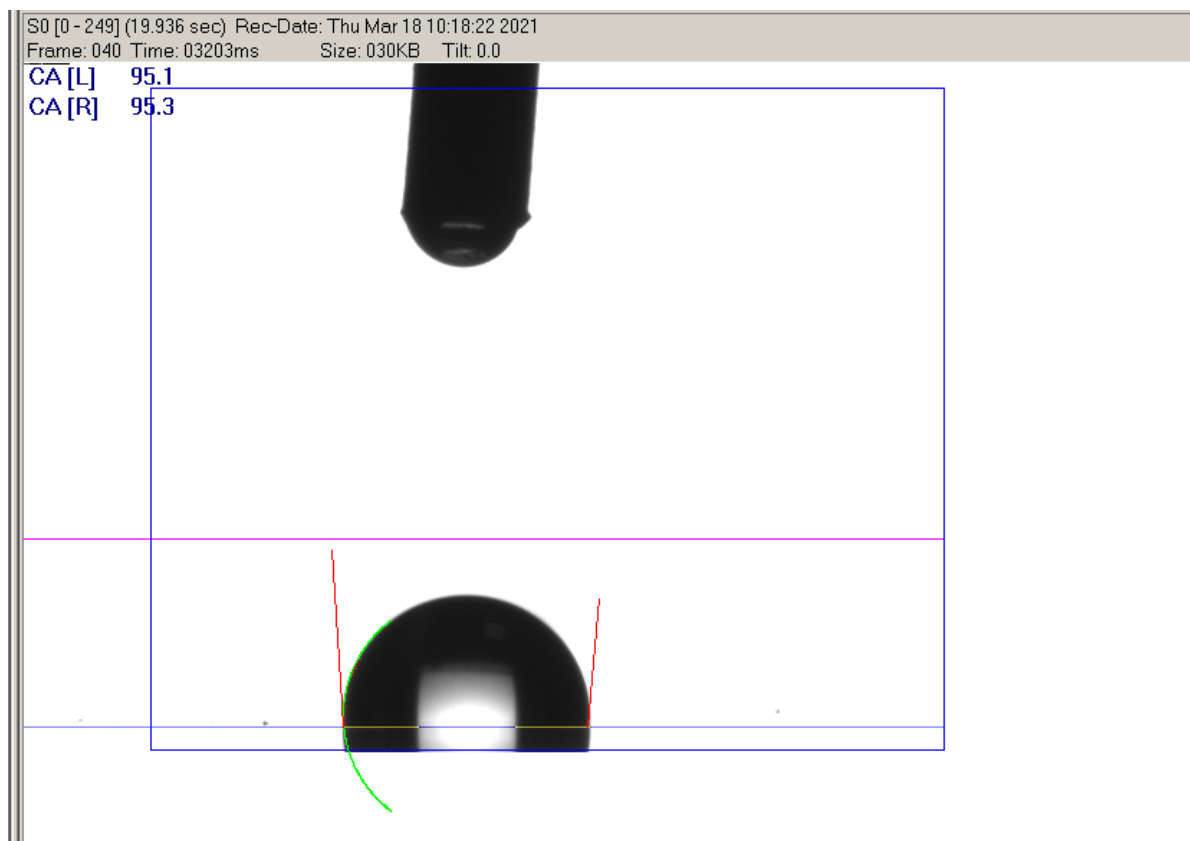
Obrázek 35: Odečítání kontaktního úhlu na čočce č. 9

Po naměření běžně dostupných čoček byla měřena skla s vrstvou TiO_2 . Při přípravě těchto vrstev byla snaha o co největší průhlednost, což se ale bohužel při měření kontaktního úhlu ukázalo v rozporu s jeho nízkými hodnotami. Vrstvy s malým kontaktním úhlem jsou téměř neprůhledné, jako je vidět v literatuře [38]. Kontaktní úhel všech vrstev se pohybuje kolem 90° , tedy na přechodu z hydrofilního úhlu na hydrofobní.

Tabulka 6: Hodnoty naměřených kontaktních úhlů u vrstev TiO₂

	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	průměr
TiO2-10	88,5±0,21	88,8±0,26	89,6±0,22	92±0,61	89,7±1,56
TiO2-11	95,3±0,11	98,2±0,44	96,9±0,09	96,3±0,05	95,9±0,79
TiO2-12	95±0,08	94,6±0,05	94,9±0,09	94,7±0,09	94,8±0,16
TiO2-18	95,4±0,22	96,1±0,16	96,5±0,15	94,6±0,24	95,7±0,82
TiO2-19	94,8±0,1	95±0,06	95±0,09	93,2±0,07	94,5±0,87
TiO2-20	96±0,1	97,2±0,13	96,6±0,09	96±0,18	96,5±0,56
TiO2-21	84,8±0,15	93,7±0,13	91,3±0,3	91,1±0,55	90,2±3,84
TiO2-22	95,7±0,07	95±0,15	96,5±0,11	96,3±0,08	95,9±0,66
TiO2-23	97,2±0,08	95,9±0,12	95,1±0,18	95,3±0,05	95,9±0,97

Na obrázku 36 je znázorněno odečítání kontaktního úhlu kapky na vrstvě TiO₂ – 23. Kapka je na vzorku přisedlá pod úhlem 95,9±0,97 (°), což znamená, že povrch je hydrofobní.

**Obrázek 36:** Odečítání kontaktního úhlu na vzorku TiO₂ - 23

7 Diskuse

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá transmisivitou a smáčivostí brýlových čoček s různými povrchovými úpravami, od tvrzení přes antireflexní až k hydrofobním vrstvám. Touto diskusí budou shrnuty výsledky našeho měření a budou porovnány s teorií z použité literatury.

Index lomu u dnes nejpoužívanějších brýlových čoček se pohybuje od 1,45 do 1,60. Standardní úpravou prakticky už všech dnešních čoček je tvrzení a antireflexní úprava (ať už s klasickým zeleným zbytkovým reflexem či modrým nebo fialovým) a neměly by propouštět světlo do vlnové délky cca 350 nm. Ultrafialové světlo o vlnové délce nižší než 350 nm propouštěla většina běžných brýlových čoček, které měly index lomu 1,50 a neměly speciální povrchovou úpravu. Také všechny vrstvy TiO_2 propouštěly světlo již od vlnové délky cca až 340 nm.

Antireflexní vrstvy by měly zajistit až 100% propustnost brýlových čoček, což se naším měřením potvrdilo. Čočky s AR vrstvou a s úpravou LotuTec (AR + clean coat + HC) měly opravdu 100% transmisivitu ve spektru viditelného světla. Také čočka s úpravou DV platinum a indexem lomu 1,5 měla 100% propustnost, protože úprava DuraVision ještě společně s tvrzením také zahrnuje antireflexní úpravu.

Povrchová úprava HMC, skládající se také z antireflexní a hydrofobní vrstvy, je hned další s největší propustností. I přesto, že se brýlové čočky lišily materiálem (plast, PMMA a trivex), propustnost měly téměř stejnou a pohybovala se okolo 98 %. Jen u polymethylmethakrylátové čočky docházelo k mírné interferenci.

I přesto, že tvrzené čočky neměly AR úpravu, pohybovala se jejich transmisivita vysoko okolo 90 %. Stejně se pohybovala transmisivita čoček s úpravou DV BlueProtect, DriveSafe a Silver. Brýlová čočka DV Sun má šedé zabarvení a jedná se o absorpční čočku, která má za úkol snížit transmisivitu a plně absorbovat UV-C záření ($\lambda=100-280$ nm). To tato brýlová čočka splnila a její propustnost se pohybovala v rozmezí od 14 do 64 % ve VIS spektru.

Porovnáním čoček s indexem lomu 1,50 se dokázalo, že záleží jak na materiálu (plastová čočka měla vyšší transmisivitu než minerální, ale minerální propouštěla světlo ve větším spektru), tak hlavně na povrchové úpravě čoček a potvrdilo se opět, že antireflexní vrstva měla

nejvyšší propustnost. Za ní následovala brýlová čočka s UV filtrem, s úpravou HMC a na konec čočka zcela bez úpravy a čočka s tvrzením.

U vrstev TiO_2 docházelo k velké interferenci a jejich transmisivita se pohybovala v rozmezí od 50 do 90 %. Pokud by ale byla vrstva silnější, interference by byla odstraněna. Smáčivost těchto vrstev se oscilovala na přechodu hydrofilního a hydrofobního povrchu, ale většina vrstev byla spíše hydrofobní. Při přípravě těchto vrstev byla snaha o co největší průhlednost, což se ale bohužel při měření kontaktního úhlu ukázalo v rozporu s jeho nízkými hodnotami.

Oproti tomu smáčivost běžně dostupných čoček se mezi sebou navzájem hodně lišila – díky rozdílným typům povrchové úpravy. Brýlové čočky bez povrchové úpravy nebo pouze s tvrzením měly hydrofilní povrch. To znamená, že jejich kontaktní úhel byl menší než 90° . Čočky s antireflexní a HMC úpravou měly povrch hydrofobní. To znamená, že byl naměřen naopak větší kontaktní úhel, než je 90° .

Zjistilo se, že transmisivita brýlových čoček závisí hodně na typu její povrchové úpravy a na indexu lomu materiálu, naopak se měřením neprokázala závislost na optické mohutnosti čoček. Smáčivost opět závisela na typu povrchové úpravy čočky. Žádný z měřených povrchů nebyl superhydrofilní (kontaktní úhel menší než 10°) ani superhydrofobní (kontaktní úhel větší než 150°).

8 Závěr

V teoretické části své bakalářské práce jsem provedla rešerši historie brýlových čoček a jejich základních vlastností a materiálů, ze kterých se vyráběly či stále vyrábějí. Nejprve jsem shrnula nejdůležitější informace o minerálních materiálech používajících se k výrobě brýlových čoček a poté i o materiálech organických. Zmínila jsem nejdůležitější vlastnosti těchto materiálů a jejich výhody a nevýhody. Dále jsem se speciálně, jak z názvu bakalářské práce vyplývá, zaměřila na jednotlivé povrchové úpravy brýlových čoček, které zlepšují jak jejich mechanické, tak i optické vlastnosti. Konkrétně jsem se zaměřila na tvrzení, antireflexní úpravy, absorpční, reflexní a samočisticí úpravy (hydrofobní, hydrofilní a AntiFog). Na základě této rešerše byl navržen a naměřen experiment.

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá transmisivitou a smáčivostí běžně dostupných brýlových čoček a čoček s vrstvou TiO_2 . Cílem práce bylo zjistit, jak jednotlivé povrchové úpravy ovlivňují propustnost i smáčivost brýlových čoček. Transmisivita čoček byla měřena pomocí spektrometru a kontaktní úhel pomocí goniometru. Po naměření těchto čoček byla získaná data vynesena do tabulek a grafů a porovnána s daty z použité literatury.

Z mého experimentu vyplynulo, že brýlové čočky s vyšším indexem lomu než 1,5, propouštějí světlo od vyšších vlnových délek. To znamená, že tyto čočky mají větší UV ochranu. Podle očekávání nejvyšší transmisivitu měly čočky s antireflexní, popř. super AR úpravou. Jejich propustnost byla až stoprocentní. Naopak brýlové čočky s nejmenší propustností byly ty s tvrzením nebo zcela bez povrchové úpravy. Rozdílná transmisivita se prokázala i u brýlových čoček, které se lišily materiálem. Experimentem se tedy dokázalo, že transmisivita brýlové čočky závisí jak na jejím indexu lomu, tak i na materiálu, ze kterého je vyrobena, což spolu úzce souvisí. Stejně tak závisí i na typu zušlechťující úpravy, kterou je čočka opatřena. Protože se u vrstev TiO_2 vyskytovala interference, bylo rozmezí jejich transmisivity poměrně velké. Transmisivita těchto vrstev se pohybovala v rozmezí přibližně od 50 do 90 %.

Smáčivost čočky závisí také na typu povrchové úpravy a bylo zjištěno, že největší smáčivost mají čočky bez povrchové úpravy nebo pouze s tvrzením. Naopak nejméně smáčivé jsou čočky s antireflexem, u kterých byl naměřen největší kontaktní úhel. V teoretické části práce je zmínka o tom, že na již hydrofilní povrch čočky lze nanést vrstvičku TiO_2 a udělat z něj tak povrch superhydrofilní (kontaktní úhel menší než 15°). Tyto vrstvy jsou bílé a téměř

neprůhledné. Proto je potřeba dále hledat ideální vlastnosti pro přípravu vrstev, aby bylo dosaženo obou vlastností zároveň – jak vysoké transmisivity (průhlednost), tak dokonalé smáčivosti (nízký kontaktní úhel). Zjistilo se, že připravené vrstvy TiO_2 mají spíše hydrofobní povrch. Tyto TiO_2 by sice zajistily zlepšení samočisticích účinků, ale bylo by to na úkor jejich transmisivity, která se zhoršila (docházelo k interferenci a hodnoty transmisivity nebyly tak vysoké). Vrstvy oxidu titaničitého jsou velmi tenké, ale kdyby byly silnější, interference by vymizela a hodnota transmisivity by se pohybovala okolo 80 až 90 %.

Seznam použité literatury

- [1] RUBIN, Melvin L. Spectacles: Past, present, and future. Survey of Ophthalmology [online]. 1986, 30(5), 321-327 [cit. 2020-10-24]. ISSN 00396257. Dostupné z: doi:10.1016/0039-6257(86)90064-0
- [2] RANDULOVÁ, J., Sklo a plasty jako materiály brýlových čoček, povrchové úpravy brýlových čoček, 2010, Brno, Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně
- [3] VOGEL, W.H. a A. BERKE. Brief History of Vision and Ocular Medicine [online]. Kugler Publications, 2009 [cit. 2020-10-30]. ISBN 9789062998463. Dostupné z: ProQuest Ebook Central
- [4] Reading stone (Dome magnifier) on a copy of the Declaration of Independence, and a pencil. In: Houghton Mifflin Harcourt [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: https://hmfyi.com/6-12/fyi_g09_c02_declaration_of_independence_link/
- [5] JANČÍK, Petr. Optické materiály pro výrobu brýlových čoček. Brno, 2006.
- [6] Lens materials. Laramy-K Optical Lab [online]. 2010 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.laramyk.com/resources/education/lens-options-and-materials/lens-materials/>
- [7] ZEISS, Carl. Handbook of Ophthalmic Optics. 2. Německo, 1991.
- [8] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [9] NAYAN, S. a OKE, I. Lens Material Properties. EyeWiki [online]. 2020 [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: https://eyewiki.ao.org/Lens_Material_Properties
- [10] BAŠTECKÝ, Richard. Praktická brýlová optika. Praha: R H Optik, 1997
- [11] BHOOTRA, Ayay Kumar. Ophthalmic lenses. Jaypee Brothers, Medical Publishers Pvt. Limited, 2009. ISBN 8184486049, 9788184486049.
- [12] Optical Properties of Solids [online]. 2. Oxford University Press, Incorporated, Oxford, 2010 [cit. 2020-11-17]. ISBN 9780191576720 0191576727. Dostupné z: ProQuest Ebook Central

- [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. 2020-11-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dispersion-of-light-by-the-glass-prism_fig1_337443690
- [14] GAO, W. a Z. LI. Nanostructured transition metal oxides and their applications in composites. *Physical Properties and Applications of Polymer Nanocomposites*. Woodhead Publishing, 2010, s. 723-742. ISBN 978-1-84569-672-6.
- [15] ALIOFKHAZRAEI, M., *Wetting and Wettability*, ed. 1, InTech, 2015, ISBN 978-953-51-2215-9
- [16] MEISTER, Darryl a James E. SHEEDY. *Introduction to Ophthalmic Optics*. 5. Carl Zeiss Vision, 2004.
- [17] MATTERN, Roland. Struktur von Polyallyldiglycolcarbonat (PADC). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 9.6.2011 [cit. 2020-10-2]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/PADC_neu.svg
- [18] 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
- [19] Chemical structure of Lexan polycarbonate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 5.11.2016 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Lexan.svg>
- [20] Skeletal formula of the polymethyl methacrylate repeating unit (Perspex, (C₅O₂H₈)_n). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 19.8.2008 [cit. 2020-12-28].
- [21] *Manufacturing: Materials selection*. Open Learn [online]. 1999 [cit. 2020-11-9]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/design-innovation/manufacturing/content-section-7.9>
- [22] Essilor. *Ophthalmic optics files*. [online]. Coatings [online]. 2011 [cit. 2020-11-28] Dostupné z: <https://www.essiloracademy.eu/sites/default/files/10.Coatings.pdf>

- [23] A Simple Guide to Eyeglass Lens Coatings: What are eyeglass lens coatings, and do you need them? Vision Source: Signature Eye Care [online]. 2010, 18.6.2015 [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: <https://visionsource.com/blog/eyeglass-lens-coatings/>
- [24] Povrchové úpravy brýlových čoček [online]. 2005 [cit. 2020-11-29]. Dostupný z: Povrchové úpravy brýlových čoček (googleusercontent.com)
- [25] FOWLER, Colin a Keziah Latham PETRE. Spectacle Lenses: Theory and Practice [online]. Butterworth-Heinemann, 2001, 160 s. [cit. 2020-11-29]. ISBN 9780702038051.
- [26] Manufacturing: Anti-reflective coatings. Open Learn [online]. 1999 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/design-innovation/manufacturing/content-section-7.11>
- [27] BROOKS, Clifford W. a Irvin M. BORISH. System for Ophthalmic Dispensing [online]. 3. Butterworth-Heinemann, 2006, 688 s. [cit. 2020-12-30]. ISBN 9780702038914.
- [28] Povrchové úpravy brýlových čoček: antireflexní, tvrdá vrstva, CleanCoat atd.: Zeiss Česká Republika: Seeing beyond [online]. 20.11.2017 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/vision-care/lepsi-videni/zdravi-prevence/povrchove-upravy-brylovych-cocek-antireflexni-tvrda-vrstva-cleancoat-atd.html>
- [29] P. ŠIMOVIČ: Antireflexné úpravy a kontrola kvality. Česká oční optika. 2012, 53(4), 46-49. ISSN 1211–233X
- [30] BÜYÜKYILDIZ, H. Zeki. Coatings and Tints of Spectacle Lenses [online]. 2012, , 11 [cit. 2020-12-5]. Dostupné z: doi:10.4274/tjo.42.52724
- [31] JAVITT, Jonathan C. a Hugh R. TAYLOR. Ocular Protection from Solar Radiation: Absorption of light by ocular structures varies with its wavelength. In: Ento Key: Fastest Otolaryngology & Ophthalmology Insight Engine [online]. 2016 [cit. 2020-12-5]. Dostupné z: <https://entokey.com/ocular-protection-from-solar-radiation/>
- [32] STEPHENS, Gregory L. a Darryl J. MEISTER. Spectacle Lens Tints and Coatings. Ento Key: Fastest Otolaryngology & Ophthalmology Insight Engine [online]. 10.7.2016 [cit. 2020-12-7]. Dostupné z: <https://entokey.com/spectacle-lens-tints-and-coatings/>

- [33] Highly Reflective Coatings. Edmund Optics: Worldwide [online]. [cit. 2020-12-7]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/highly-reflective-coatings/>
- [34] Mirror coatings for lenses. World Optic [online]. [cit. 2020-12-7]. Dostupné z: <https://www.worldoptic.com/sunglasses-eyeglasses-lens-tints-coatings/mirror-coatings.php>
- [35] DAOUD, Walid A. Self-Cleaning Materials and Surfaces: A Nanotechnology Approach [online]. Spojené Království: Chichester : John Wiley, 2013, 368 s. [cit. 2020-12-12]. ISBN 978-1-118-65236-7.
- [36] HEITING, Gary. Lens coatings: Anti-reflective, scratch resistant, anti-fog, UV. All About Vision [online]. 2020, srpen 2017 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.allaboutvision.com/lenses/coatings.htm>
- [37] PARRINO, Francesco a Leonardo PALMISANO. Titanium Dioxide (TiO₂) and Its Applications: A volume in Metal Oxides [online]. Elsevier, 2021 [cit. 2021-4-9]. ISBN 978-0-12-819960-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01050-3>
- [38] REMSA, Jan. Příprava tenkých vrstev TiO₂ pomocí PLD metody. Praha, 2009. Diplomová práce. ČVUT FJFI. Vedoucí práce Miroslav Jelínek.
- [39] CHAN, YJ., Liao, PL., Tsai, CH. et al. Titanium dioxide nanoparticles impair the inner blood-retinal barrier and retinal electrophysiology through rapid ADAM17 activation and claudin-5 degradation. Part Fibre Toxicol 18, [online]. 2021, [cit. 2021-18-4]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00395-7>
- [40] JELÍNEK, Miroslav. Laserová depozice tenkých vrstev pro biomedicínu. Praha, 2008. ČVUT FJFI.
- [41] EASON, R. (Ed.). (2006). Pulsed Laser Deposition of Thin Films [online]. [cit. 2021-4-9] Dostupné z: [doi:10.1002/0470052120](https://doi.org/10.1002/0470052120)
- [42] UV-2600i, UV-2700i: UV-VIS-NIR Spectrophotometer. Shimadzu [online]. 2021 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://www.shimadzu.com/an/products/molecular-spectroscopy/uv-vis/uv-vis-nir-spectroscopy/uv-2600i-uv-2700i/index.html>

- [43] Drop Shape Analyzer DSA100E: The automated premium solution for wetting and adhesion analysis of solids and liquids. Krüss [online]. [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/en/products-services/products/dsa100e>
- [44] ERBIL H. Y.: Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces. Blackwell Publishing, Oxford 2006. ISBN-10: 1-4051-1968-3
- [45] LotuTec standard lens coating: Your basic ZEISS lens coating - the economical choice. ZEISS: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/int/spectacle-lenses-from-zeiss/lotutec-standard-lens-coating.html>
- [46] Povrchové úpravy brýlových čoček.: Vypadají skvěle a ještě lépe přes ně uvidíte. Zeiss Česká Republika: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/vision-care/zeiss-vyroby/premiova-vrstva-duravision.html>
- [47] ZEISS DuraVision Platinum UV: The best of ZEISS Premium coatings. ZEISS: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/us/for-eye-care-professionals/eyeglass-lens-products/coatings/zeiss-duravision-platinum.html>
- [48] ZEISS DuraVision Silver UV: for clearer vision and better looks. ZEISS: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/us/for-eye-care-professionals/eyeglass-lens-products/coatings/duravision-silver.html>
- [49] ZEISS DuraVision BlueProtect UV: The ZEISS Blue-Violet Light Solution. ZEISS: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/us/for-eye-care-professionals/eyeglass-lens-products/coatings/duravision-blueprotect-uv.html>
- [50] New — ZEISS DriveSafe: One pair of glasses for everyday use and safer driving. ZEISS: Seeing beyond [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/us/for-eye-care-professionals/eyeglass-lens-products/eyeglass-lenses/drivesafe-by-zeiss.html>
- [51] DuraVision® Sun [online]. [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/vision-care/us/for-eye-care-professionals/eyeglass-lens-products/coatings/duravision-sun-uv.html>

- [52] KVÍTEK L., PIKAL P., KOVAŘÍKOVÁ L., HRBÁČ J.: The study of the wettability of powder inorganic pigments based on dynamic contact angle measurements using wilhelmy method. [online]. 2002, *Chemica* 41, [cit. 2021-4-9]. Dostupný z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.386.773&rep=rep1&type=pdf>

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
BČ	Brýlová čočka
PC	Polykarbonát
CR-39	Columbia Resin
PMMA	Polymethylmethakrylát
UV záření	Ultraviolet (ultrafialové) záření
PVD	Physic Vapour Deposition (fyzikální depozice vrstev)
LP-CVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition
AR	Antireflexní (vrstva)
IR záření	Infrared (infračervené) záření
HR	High Reflective (vysoce reflexní vrstva)
PLD	Pulsed Lased Deposition (pulsní laserová depozice)
lx	Lux (fotometrická jednotka intenzity osvětlení)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Čtecí kámen [4].....	2
Obrázek 2: Disperze bílého světla [13]	7
Obrázek 3: Kontaktní úhly a) skoro úplná smáčivost ($\theta \approx 0^\circ$) b) dobrá smáčivost ($\theta < 90^\circ$) c) špatná smáčivost ($\theta > 90^\circ$) d) téměř nesmáčivý povrch ($\theta \approx 180^\circ$) [15].....	8
Obrázek 4: Vzorec CR-39 [17].....	11
Obrázek 5: Vzorec polykarbonátu [19]	12
Obrázek 6: Vzorec polymethylmethakrylátu [20].....	12
Obrázek 7: Systém povrchových úprav [22]	15
Obrázek 8: Reflexy vznikající na brýlových čočkách [27]	18
Obrázek 9: Destruktivní interference [27].....	19
Obrázek 10: Míra absorpce záření strukturami oka [31].....	21
Obrázek 11: Pevné vs povrchové barvení a) plusová čočka b) minusová čočka c) plusová nebo minusová čočka barvená povrchově [22]	22
Obrázek 12: Gradientní barvení čočky	24
Obrázek 13: Konstruktivní interference [27].....	25
Obrázek 14: Kontaktní úhel s hydrofobní úpravou [29].....	26
Obrázek 15: Struktura hydrofobní vrstvy [22]	27
Obrázek 16: Technologie optifog [18]	28
Obrázek 17: Depozice na tyčku.....	30
Obrázek 18: Depozice na podložní sklo	30
Obrázek 19: Schéma PLD (1 - laserový svazek, 2 - odražeč, 3 - čočka, 4 - vstupní okno depoziční komory, 5 - karusel, 6 - topný stůlek s podložkou, 7 - vakuový čerpací systém, 8, 9 - vakuové měrky [40].....	32
Obrázek 20: UV-VIS spektrofotometr Shimadzu [42].....	33
Obrázek 21: Goniometr DSA100 s automatikou.....	34
Obrázek 22: Analýza profilu kapky pomocí kružnice [44]	35
Obrázek 23: Schéma měření kontaktního úhlu metodou přisedlé kapky [15]	35
Obrázek 24: Graf transmisivity čoček s AR úpravou.....	39
Obrázek 25: Graf transmisivity čoček s tvrzením	39
Obrázek 26: Graf transmisivity čoček s HMC úpravou	40
Obrázek 27: Graf transmisivity čoček s indexem lomu 1,50	41
Obrázek 28: Graf transmisivity čoček z plastu a minerálu.....	41

Obrázek 29: Graf transmisivity čoček s úpravou LotuTec.....	42
Obrázek 30: Graf transmisivity čoček s úpravou DV Platinum	43
Obrázek 31: Graf transmisivity čoček s úpravami DuraVision.....	44
Obrázek 32: Graf transmisivity vrstev TiO ₂ rozdílným tlakem O ₂ při depozici	44
Obrázek 33: Graf transmisivity vrstev TiO ₂ lišících se počtem pulzů při depozici	45
Obrázek 34: Graf transmisivity vrstev TiO ₂	45
Obrázek 35: Odečítání kontaktního úhlu na čočce č. 9	47
Obrázek 36: Odečítání kontaktního úhlu na vzorku TiO ₂ - 23.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: Depoziční podmínky TiO ₂ vrstev	31
Tabulka 2: Testované běžně dostupné brýlové čočky – transmisivita	36
Tabulka 3: Testované běžně dostupné brýlové čočky – transmisivita	37
Tabulka 4: Testované běžně dostupné čočky – smáčivost	38
Tabulka 5: Testované běžně dostupné čočky	46
Tabulka 6: Hodnoty naměřených kontaktních úhlů u vrstev TiO ₂	48