

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV FYZIKY

Mgr. Jindřich Oulehla

NÁVRH, TECHNOLOGIE DEPOZICE A CHARAKTERIZACE OPTICKÝCH TENKÝCH VRSTEV PRO SPECIÁLNÍ APLIKACE

**DESIGN, DEPOSITON TECHNOLOGY AND CHARACTERIZATION OF THIN OPTICAL
COATINGS FOR SPECIAL APPLICATIONS**

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Obor: Mikroelektronika a technologie

Školitel: doc. Mgr. Dinara Sobola, Ph.D

Školitel specialista: prof. Ing. Josef Lazar, Dr.

Klíčová slova:

optika tenkých vrstev, napařování elektronovým svazkem, napařování za asistence iontů, práh poškození způsobeného laserem

Keywords:

thin film optics, vacuum evaporation, plasma ion assisted deposition, laser induced damage threshold

OBSAH

Obsah	3
1. Struktura práce	5
1.1. Úvod do problematiky disertační práce	5
1.2. Cíle a struktura práce	5
2. Optika tenkých vrstev	6
2.1. Základy optiky tenkých vrstev	6
2.1.1. Definice pojmů	6
2.2. Technologie depozice optických tenkých vrstev	6
2.3. Přístrojové vybavení na ÚPT AV ČR	7
3. Výzkumná část	9
3.1. Práh poškození způsobeného laserem	9
3.1.1. Úvod do problematiky	9
3.1.2. Základy LIDT	9
3.1.3. Experimentální sestava	10
3.1.4. Výsledky ověřovacího experimentu	11
4. Technologicky změřený aplikovaný výzkum	12
4.1. Transparentní fotodetektor	12
4.1.1. Úvod do problematiky	12
Výsledky měření	14
4.2. Optický kalibrační snímač se sférickým retroreflektorem	15
4.2.1. Úvod do problematiky	15
4.2.2. Princip optického kalibračního snímače	15
4.2.3. Nepolarizující dělicí hranol	16
4.2.4. Sférický odražeč	16
4.2.5. Výsledky	16
4.3. Technologie absorpčních kyvet	17
4.3.1. Úvod do problematiky	17
4.3.2. Experimentální postup	19
4.3.3. Výsledky	20
5. Závěr	28
Reference	30
Profesní životopis	32
Abstrakt	33
Abstract	34

1. STRUKTURA PRÁCE

1.1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Při realizaci optických sestav sloužících jak pro výzkumné, tak průmyslové aplikace je využívána celá řada optických elementů různého druhu. Typicky se jedná o čočky, různé děliče světla, polarizátory, optická vlákna, či různé optické filtry. Při návrhu optické sestavy je třeba mít dobré informace o optických vlastnostech těchto elementů, aby při práci s takovou sestavou nedocházelo k nežádoucím jevům, jako jsou např. optické ztráty odrazem na rozhraních mezi materiálem optických prvků a okolním prostředím a aby světelný svazek dopravovaný ze svého zdroje na měřicí pozici měl požadované parametry. Z tohoto důvodu jsou optické prvky v takovýchto sestavách často opatřovány optickými tenkými vrstvami, které zajistí požadované vlastnosti. K výrobě optických tenkých vrstev lze použít řadu depozičních technologií. Tato disertační práce se zabývá technologií vakuového napařování elektronovým svazkem a to jak ve své klasické podobě, tak za asistence iontů. Tyto metody jsou popsány dále v textu.

1.2. CÍLE A STRUKTURA PRÁCE

Disertační práce se zaměřuje na technologii depozice optických tenkých vrstev pro speciální aplikace v oddělení Koherenční optiky na Ústavu přístrojové techniky AV ČR (ÚPT). Vzhledem k zaměření oddělení na aplikace laserů od metrologie až po obrábění materiálů, jsou k experimentální činnosti často využívány unikátní optické sestavy vyžadující nestandardní optické prvky. Aby bylo možné takovéto prvky vytvářet, je nutné hledat nové postupy v oblasti depozice optických tenkých vrstev.

Práce je dělena na část výzkumnou a část aplikační. Ve výzkumné části se práce věnuje tématu prahu poškození způsobeného laserem, neboli „laser induced damage threshold“ (LIDT). Zde se jedná o důležité téma na poli optiky tenkých vrstev v souvislosti s výstavbou výkonových laserových infrastruktur. Vrstvy jsou při provozu takových zařízení vystaveny často extrémním podmínkám. Jedná se zejména o zatížení velkou hustotou energie dopadajícího záření, ale i např. vystavení velmi nízkým teplotám. Proto je žádoucí mít dobré informace o schopnostech tenkých vrstev v takovémto prostředí obstát. Tato část práce má metodologický charakter, cílem je návrh a realizace aparatury pro měření efektu LIDT a ověření její funkčnosti.

Aplikační část se pak věnuje vývoji konkrétních optických komponentů, kdy je využíváno technologie depozice napařování tenkých optických vrstev pro speciální aplikace. V této části práce byly vybrány tři příklady takovýchto aplikací využívajících unikátní optické prvky připravené na ÚPT. Na přípravě těchto prvků jsem se ve všech případech podílel návrhem, depozicemi a charakterizací optických vlastností těchto prvků.

Přínos této práce spočívá v rozšíření stávajících depozičních technologií na ÚPT o nové přístupy a v rozšíření možností charakterizace a kvantifikace vlastností optických tenkých vrstev připravených jak na ÚPT, tak na externích pracovištích. Výsledkem snažení je soubor postupů umožňující komplexní přístup k aplikacím optických tenkých vrstev od jejich výroby, až po jejich konečné použití v sestavě.

2. OPTIKA TENKÝCH VRSTEV

2.1. ZÁKLADY OPTIKY TENKÝCH VRSTEV

2.1.1. Definice pojmů

Tenkové vrstvy jsou něčím, co lze v přírodě pozorovat běžně. Ať jsou to např. olejové vrstvy na vodě nebo třeba mýdlové bubliny. V této práci se budu zabývat výhradně optickými tenkými vrstvami, tj. vrstvami navrženými pro použití v optických aplikacích. Pod pojmem optická tenká vrstva tedy budeme rozumět dielektrickou, kovovou (vodivou) nebo polovodičovou vrstvu nanesenou na vhodné podložce, jejíž tloušťka je srovnatelná s vlnovou délkou světla. K typickým vlastnostem takovýchto vrstev patří spektrální závislost reflexe (R) a transmise (T), závislost R a T na úhlu dopadu a závislost R a T na polarizaci při nenulovém úhlu dopadu světla. Nejčastější příklady použití optických tenkých vrstev v praxi jsou [1]:

- Antireflexní vrstvy (AR) – smyslem těchto vrstev je snížit koeficient reflexe pro danou vlnovou délku, či soubor vlnových délek (např. pro minimalizaci ztrát odrazem v optických sestavách)
- Vysoce odrazné vrstvy (HR) – smyslem těchto vrstev je získat vysoký koeficient reflexe v okolí dané vlnové délky nebo pro soubor vlnových délek
- Děliče světla (BS) – filtry vykazující téměř konstantní koeficient reflexe v dané oblasti vlnových délek a umožňují tak dělit dopadající světlo v určitém definovaném poměru
- Dolní, horní a pásmová propust' (LP, HP a BP) – takovéto vrstvy jsou aplikovány např. jako barevné filtry v zobrazovací technice
- Úzkopásmové filtry (NBPF) – filtry propouštějící jen velmi úzkou část spektra, řádově zlomky až jednotky nanometrů (např. při využití ve spektroskopii)
- Polarizující filtry – vrstvy vykazující vysoký koeficient reflexe pro jednu polarizaci a současně nízký pro druhou (MacNeillův polarizátor)

Výše uvedené příklady pokrývají valnou část spektra využití optických tenkých vrstev. Téměř vždy se jedná nikoli o jednu samostatnou vrstvu, nýbrž o soustavu vrstev deponovaných od podložky jedna na druhou. Liché vrstvy využívají materiál s vyšším indexem lomu, sudé vrstvy pak materiál s nižším indexem lomu, případně naopak. Vždy se ale materiály střídají. Výsledný tvar křivky spektrální závislosti R nebo T je potom důsledkem interference světla dopadajícího na takovou soustavu vrstev. Detailní popis způsobu výpočtu vlastností této soustavy lze nalézt v [1] a zejména pak [2], [3], [4]

2.2. TECHNOLOGIE DEPOZICE OPTICKÝCH TENKÝCH VRSTEV

Existují různé způsoby, jak připravit tenkou vrstvu nebo systém tenkých vrstev na podložce. Jako příklady takových technologií a postupů lze uvést [1]:

- Vakuové napařování
- Magnetronové napařování
- Nanášení výbojem v plynu nebo plazmatu

Jednou z nejvýznamnějších metod přípravy tenkých vrstev je vakuové napařování. Touto metodou je připravována valná většina optických tenkých vrstev. Je to zároveň metoda, jejíž využití má na ÚPT AVČR dlouholetou tradici. V dalším textu se budeme zabývat pouze touto metodou. Jejím principem je tavení materiálu umístěného ve vakuové komoře, v níž je dostatečně nízký tlak na to, aby střední volná dráha molekul odpařovaného materiálu byla větší, než vzdálenost materiálu od podložky, na které má docházet ke kondenzaci.

2.3. PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ NA ÚPT AV ČR

Ústav přístrojové techniky v současné době disponuje dvěma aparaturami pro přípravu tenkých vrstev metodou vakuového napařování elektronovým svazkem. První, starší stroj je BAK550 výrobce Balzers, druhý stroj je SYRUSpro 710 firmy Leybold Optics (nyní Bühler). V následujícím textu aparatury stručně popíšeme a uvedeme rozdíly mezi nimi.

Balzers BAK550

Tato aparatura byla instalována v roce 1980 a od té doby je využívána pro depozice jak pro potřeby Ústavu přístrojové techniky, tak pro vývoj speciálních vrstev pro spolupracující externí subjekty. V roce 2017 prošla celkovou repasí a modernizací. Uvedme nyní její základní charakteristiky:

- a) Vakuová komora – kubická o hraně 550mm
- b) Odpařovače – 2ks elektronového děla
- c) Zdroj napařovacích materiálů – dva kelímky, z nichž jeden je čtyřpozicový a druhý rotující jednopozicový
- d) Monitoring – oscilující křemenný krystal o frekvenci 5MHz
- e) Čerpací systém – dvoustupňový, rotační vývěva kombinovaná s difúzní vývěvou

SYRUSpro 710

Vzhledem k tomu, že v nedávné době v souvislosti s rozvojem ústavu vznikla potřeba modernizovat a rozšířit aplikační možnosti, byla v roce 2012 instalována zcela nová napařovací aparatura, která byla v roce následujícím nasazena do ostrého provozu. Stejně jako v předchozím případě uvedme její základní vlastnosti:

- a) Vakuová komora – kubická o hraně 710mm
- b) Odpařovače – 2ks elektronového děla
- c) Zdroj napařovacích materiálů – dva kelímky, z nichž jeden je osmipozicový a druhý rotující jednopozicový
- d) Monitoring – oscilující křemenný krystal o frekvenci 6MHz pro kontrolu depoziční rychlosti a tloušťek vrstev kombinovaný s optickým monitorem kontrolujícím tloušťky pomocí měření propustnosti, případně odrazivosti vzorku
- e) Podpora napařovacího procesu – zdroj argonových iontů
- f) Čerpací systém – dvoustupňový, rotační vývěva kombinovaná s turbomolekulární vývěvou. Komoara je navíc vybavena tzv. Meissnerovou pastí ochlazovanou na cca -130°C pro zlepšení kvality vakua.

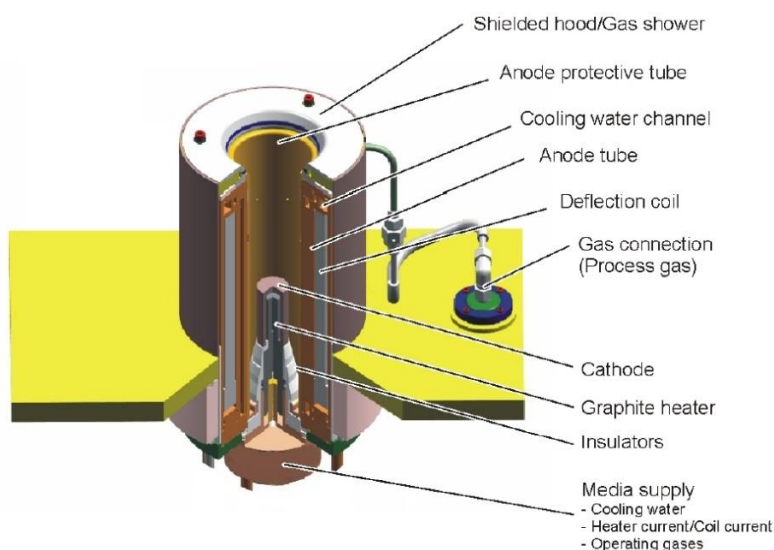


Obrázek 2-1: Vlevo komora SYRUSpro 710, vpravo Balzers BAK550

Obě aparatury jsou si konstrukčně v mnohém podobné, nicméně rozdíly mezi nimi existují. Ty drobné, spočívající např. v různé velikosti odpařovačů, způsobu přehřevu substrátů (zdola vs. shora), či odlišném vakuovém čerpacím systému nejsou pro tuto práci podstatné. Popíše tedy pouze dva nejzásadnější. Těmi jsou přítomnost zdroje argonových iontů a možnost optického monitoringu u aparatury SYRUSpro.

Depozice za asistence iontů (Plasma ion assisted deposition - PIAD):

Jedná se o podpůrnou technologii, která rozšiřuje a zkvalitňuje depoziční možnosti aparatury. Princip činnosti zdroje pojmenovaného výrobcem APSpro ukazuje Obrázek 2-2 převzatý z manuálu SYRUSpro.



Obrázek 2-2: Schéma APSpro. Media supply: přívod Ar a chladicí vody, Graphite heater: žhává LaB_6 katodu (Cathode), Anode protective tube: Anodová trubice. Pracovní plyn je připouštěn mezi katodu a anodu, je ionizován a elektromagnetickým polem urychlován směrem k substrátům

Hlavním přínosem zdroje APSpro je významné zvýšení maximální celkové hodnoty tloušťky deponovaného systému vrstev. Zatímco v případě aparatury BAK550 jsme omezeni hodnotou cca 4 μ m, při jejímž překročení hrozí odpadnutí napařeného materiálu z měřicího krystalu a tím pádem k nevratné ztrátě kontroly nad procesem, u technologie PIAD tento problém odpadá díky větší kompaktnosti vrstev a jejich lepší přilnavosti k podložce.

Optický monitoring

Optický měřicí systém OMS5000 může pracovat ve dvou různých režimech. Buď lze měřit odrazivost vrstvy na kontrolním sklíčku umístěném ve středu komory (viz obrázek), nebo lze měřit propustnost vrstvy přímo na vzorku.

Hlavní výhodou optického monitoringu je to, že systém je schopen reagovat na různé nedokonalosti v procesu, které mají vliv na index lomu jednotlivých vrstev. Na rozdíl od situace, kdy je proces kontrolován krystalem, zde geometrická tloušťka nerozhoduje a pro řízení procesu slouží právě hodnota propustnosti, či odrazivosti. Krystal je tak využíván pouze pro kontrolu napařovací rychlosti. Podrobné informace o principu a fungování tohoto systému lze nalézt v [5], [6].

Obě aparatury jsou využívány pro běžné depozice, které jsou rutinní záležitostí, a technologie jejich výroby je dobře zvládnutá. V disertační práci se budeme věnovat několika speciálním aplikacím, které vyžadovaly nestandardní technologické postupy. Pro tyto speciální aplikace je využívána aparatura SYRUSpro 710, která má díky výše zmíněnému vybavení (OMS5000 a APSpro) pro tuto práci lepší předpoklady.

3. VÝZKUMNÁ ČÁST

3.1. PRÁH POŠKOZENÍ ZPŮSOBENÉHO LASEREM

3.1.1. Úvod do problematiky

LIDT je důležitý parametr, který hraje klíčovou roli při návrhu laserových systémů pracujících s energiemi, které jsou dostatečně vysoké na to, aby způsobily poškození optických prvků. Takové systémy se objevily již v sedmdesátých letech minulého století [7]. Příkladem z poslední doby je pak laserový systém instalovaný v laboratořích projektu HiLASE o průměrném výkonu 1 kW s energií v pulsu 100 J [8].

Jednou z důležitých vlastností naší testovací stanice, kterou se liší od podobných zařízení je schopnost testovat vzorky zchlazené na teplotu kapalného dusíku. Důvod je ten, že optické prvky ve výkonových laserových zařízeních je často nutné chladit prostřednictvím plynů o kryogenních teplotách, aby se zajistil náležitý odvod tepla mezi jednotlivými pulsy a tak předešlo poškození při provozu zařízení. Optické vlastnosti substrátů i vrstev se v takovém případě liší od vlastností, které mají za pokojové teploty [9].

3.1.2. Základy LIDT

Poškození transparentních materiálů laserovým zářením bylo pozorováno už od počátku vývoje výkonných laserů a je dlouhodobě studováno [10], [11]. Mechanismy poškození v materiálech lze, obecně vzato, rozdělit do dvou skupin: vnější mechanismy, které souvisí s absorbujícími centry typu nečistot a různých inkluzí v materiálu a vnitřní mechanismy související s vlastnostmi materiálu jako takového bez přítomnosti jakýchkoli defektů [11]. Vznik poškození ovlivňují různé faktory. Jedním z nich je samozřejmě intenzita dopadajícího laserového záření, ale dále je to zejména vlnová délka

tohoto záření [12] a délka pulsu v případě pulsních laserů [10], [13]. Podrobné rozbory základních charakteristik mechanismů poškození jsou dostupné jak v zde citovaných, tak v mnoha dalších publikacích.

3.1.3. Experimentální sestava

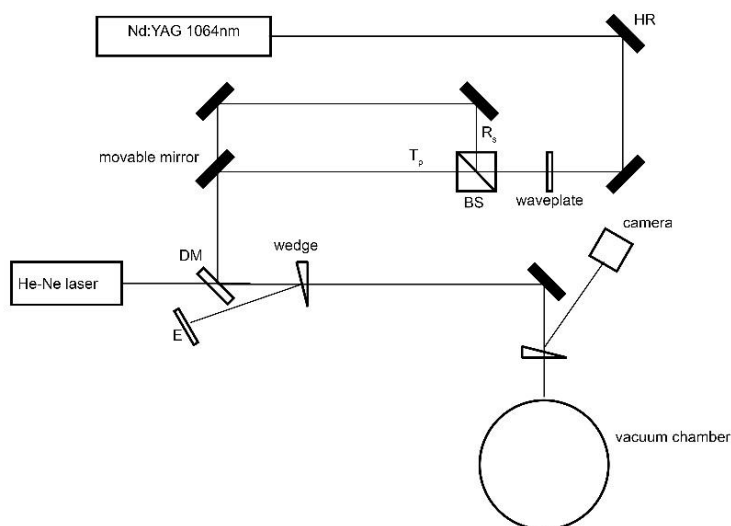
Cílem mého snažení při studiu efektů LIDT byl návrh a realizace aparatury pro evaluaci vrstev. Jedná se o výzkum metodologického typu, kde je realizováno prostředí a podmínky blízké reálnému provozu v pulzním laseru. Klíčovou součástí experimentální sestavy je v případě LIDT testů za kryogenních teplot vakuová komora. Nízký tlak v komoře ochrání povrch testovaných vzorků před nežádoucí kondenzací vodních par na jejich ochlazeném povrchu. Její parametry jsem zvolil následující:

- Vakuová komora o průměru 260 mm umožňující chlazení vzorků
- Pracovní tlak v komoře: řádově 10^{-6} mbar
- Maximální průměr měřených vzorků: 2“
- Rozsah možných úhlů dopadu: $0^\circ - 45^\circ$
- Možnost měření v obou polarizacích světla

K vyčerpání komory na pracovní tlak je použita turbomolekulární vývěva podčerpávaná membránovou vývěvou.

Jako zdroj laserových pulsů je použit pulsní laser Brilliant b od firmy Quantel, který je schopen na základní vlnové délce 1064 nm generovat pulsy o délce 6 ns s repetiční frekvencí 10 Hz. Energie v pulsu je dle výrobce až 850 mJ, což je pro naše účely více než dostatečné.

Experimentální uspořádání je zobrazeno na následujícím schématu:



Obrázek 3-1 – Experimentální sestava: HR – zrcadlo, T_p , R_s – polarizace prošlého resp. odraženého světla, BS – polarizační dělič, DM – dichroické zrcadlo, E – měřič energie

Laserový puls prochází teleskopem, čímž je jeho průměr zvětšen z cca 8 mm na cca 20 mm. Toto provádím proto, aby při dané energii v pulsu klesla plošná hustota energie a minimalizovala se tak možnost náhodného poškození optických prvků po trase pulsu. Puls následně prochází atenuátorem, který sestává z půlvlnné desky a polarizačního děliče. Změnou úhlu natočení půlvlnné desky lze měnit množství energie v odraženém a prošlém pulsu. Pohyblivé zrcadlo umožňuje volit, zda bude použit s-polarizovaný, či p-polarizovaný puls bez nutnosti zásahu do sestavy. Pomocí křemenných klínů je část energie pulsu směřována na detektor měřící množství energie v pulsu a na kameru sledující prostorový profil pulsu. Následně je puls fokusován tak, aby při dopadu na plochu testovaného vzorku měl průměr cca 0,5 mm.

LIDT stanice je provozována v tzv. režimu 1-on-1 nebo S-on-1, kdy je plocha testovaného vzorku rozdělena na dílčí testovací pozice, které jsou od sebe vzdáleny 1 mm, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování. Tato pozice je následně ozářena testovacím pulsem a to buď právě jednou (1-on-1) nebo opakovaně (S-on-1). Na vzorku je takto ozářeno alespoň deset pozic pro každou hodnotu energie v pulsu a je zaznamenán počet pozic vykazujících poškození. Hodnota LIDT je poté určena z pravděpodobnosti poškození. Podrobný popis metod měření LIDT udává norma [14].

Tato experimentální sestava slouží jako doplněk našich diagnostických metod používaných při návrhu a depozici optických tenkých vrstev.

3.1.4. Výsledky ověřovacího experimentu

S použitím aparatury jsem provedl pilotní měření na AR vrstvách připravených externími dodavateli na substrátech z taveného křemene a safíru. AR vrstvy byly voleny proto, že jsou jimi ve velké míře opatřeny optické komponenty v laserových sestavách, kde zamezují optickým ztrátám nežádoucími odrazy a také snižují případné riziko poškození nějaké části sestavy náhodným odrazem. Nastavení experimentu ukazuje následující tabulka.

Poloměr svazku [mm]	0,21
Vlnová délka [nm]	1064
Opakovací frekvence [Hz]	10
Délka pulsu [ns]	6
Teplota vzorku [K]	300/120
Tlak v komoře [mbar]	1e3/3e-6
Počet pulsů	1000

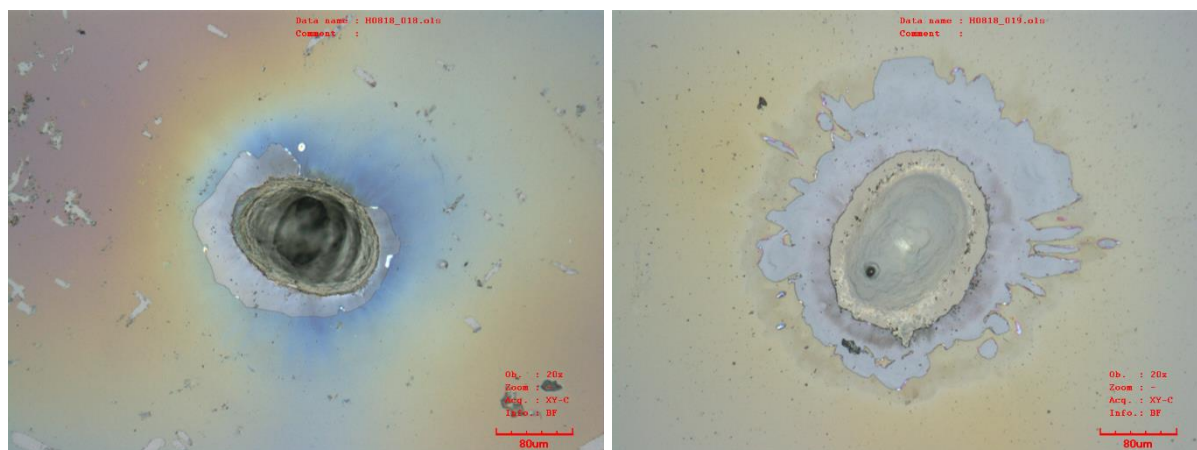
Tabulka 3-1- parametry měření LIDT

Následující tabulka obsahuje naměřené hodnoty LIDT na jednotlivých vzorcích. Při hodnotách F v tabulce označených jako *PASS* nevykazoval povrch vzorku žádné poškození. Při hodnotě F označené jako *FAIL* došlo k destrukci vrstvy.

Vzorek	Úhel dopadu [°]	F [J/cm ²]		Teplota [K]
H0818	0	13,7	PASS	300
		16,2	FAIL	300
		13,5	PASS	120
		16,2	FAIL	120
H0331	0	5,5	PASS	300
		7,4	FAIL	300
		7,4	PASS	120
		8,4	FAIL	120

Tabulka 3-2 - výsledky měření LIDT na AR vrstvách

Z naměřených hodnot je patrné, že u vzorku označeného H0331 došlo při jeho ochlazení k nárůstu hodnoty LIDT, což je v souladu s výsledky publikovanými např. v [15]. U vzorku označeného H0818 zůstala hodnota LIDT prakticky stejná. Důvodem může být kontaminace povrchu vzorku kondenzací vodních par při jeho zchlazení, případně fluktuace hodnoty energie v testovacím laserovém svazku. V rámci pilotního experimentu, jehož cílem bylo ověřit použitelnost a funkčnost experimentální sestavy je tento výsledek uspokojivý, nicméně ukazuje na potřebu další optimalizace sestavy, která bude předmětem další práce. Následující obrázky pořízené konfokálním mikroskopem ukazují místa, kde došlo k destrukci AR vrstvy. Destrukce vrstvy se projevila vznikem kráterů zasahujících až do substrátu a delaminací optických tenkých vrstev v jejich bezprostředním okolí. Obrázky jsou dobrým příkladem morfologie poškozených míst při použití laserových pulsů v nanosekundové oblasti.



Obrázek 3-2 - detail poškození povrchu vzorku

Na tuto doposud provedenou práci budou navazovat další experimenty, kdy bude rozšířena škála testovaných typů tenkých vrstev na další typy běžně používané v laserových sestavách, jako jsou zrcadla, různé děliče, polarizační filtry apod.

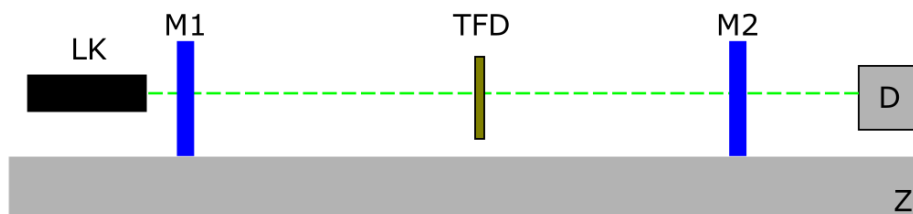
4. TECHNOLOGICKY ZMĚŘENÝ APLIKOVANÝ VÝZKUM

4.1. TRANSPARENTNÍ FOTODETEKTOR

4.1.1. Úvod do problematiky

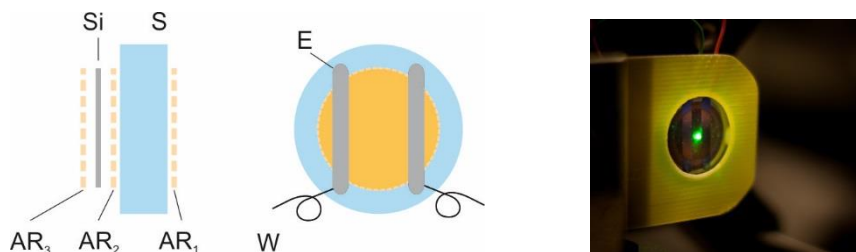
Jedním z témat řešených na ÚPT je problematika fluktuací indexu lomu prostředí a její vliv na interferometrické odměřování. V rámci řešení byl předložen koncept interferometru se stojatou vlnou, který využívá principu stabilizace vlnové délky zdroje záření na přesnou mechanickou

referenci [16]. Princip tohoto konceptu spočívá v tom, že v předem zadaném měřicím rozsahu (délka rezonátoru) je stabilizována vlnová délka laseru ve vzduchu. Odměřování uvnitř pasivního Fabryova – Perotova rezonátoru je prováděno pomocí transparentního fotodetektoru, který je schopen detekovat minima a maxima stojaté vlny.



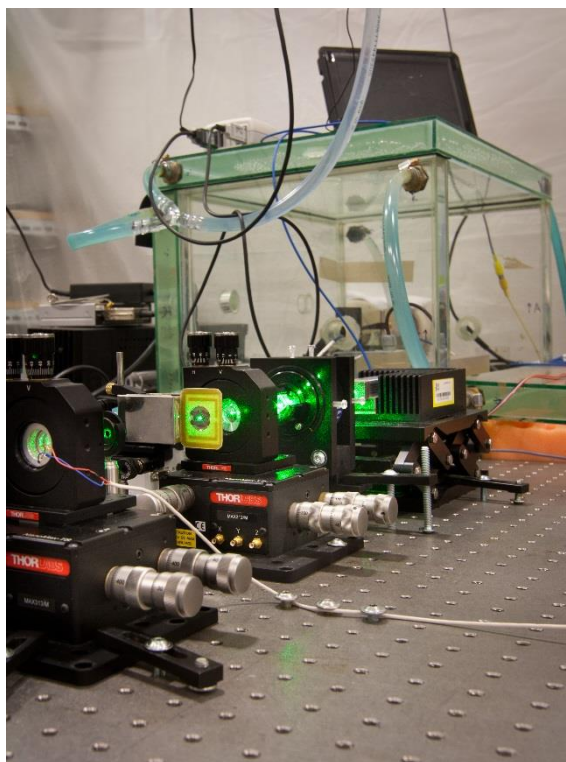
Obrázek 4-1 - Schéma pasivního Fabryova-Perotova rezonátoru s transparentním fotodetektorem (TFD). Zrcadla M1, M2 pevně umístěná na základně Z sloužící jako mechanická reference. LK: laserový kolimátor, D: detektor

Fotodetektor sestává ze substrátu z křemenného skla (FUSI) o průměru 20 mm a tloušťce 0,4 mm s optickými plochami leštěnými na rovinnost $\lambda/20$. Na tomto substrátu je nanášena tenká fotorezistivní vrstva křemíku, na níž jsou po okrajích vytvořeny vodivé elektrody. Při vývoji fotodetektoru, který má pracovat uvnitř rezonátoru, je nutné najít kompromis mezi ztrátami způsobenými absorpcí na fotorezistivní vrstvě detektoru a jeho citlivostí a také maximálně potlačit nežádoucí odrazy, které nutně vznikají na každém rozhraní. Pro potlačení nežádoucích odrazů bylo každé rozhraní, tj. zleva doprava (viz schéma) vzduch-Si, Si-FUSI, FUSI-vzduch opatřeno antireflexní vrstvou.



Obrázek 4-2: Schéma transparentního fotodetektoru. Vpravo fotografie transparentního fotodetektoru. AR: antireflexní vrstvy, Si: křemíková vrstva, S: substrát z křemenného skla, E: titanové elektrody, W: elektrické kontakty – převzato z [16]

Depozice tenkých křemíkových vrstev byla realizována na Fyzikálním ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i. (FZÚ), v oddělení Tenkých vrstev a nanostruktur (skupina RNDr. Antonína Fejfara). Antireflexní vrstvy byly vytvořeny v našem oddělení na aparatuře Balzers BAK550. Výsledná propustnost detektoru se pro vlnovou délku 532 nm pohybuje okolo hodnoty 65 %. Celá sestava je zobrazena na následujícím obrázku.

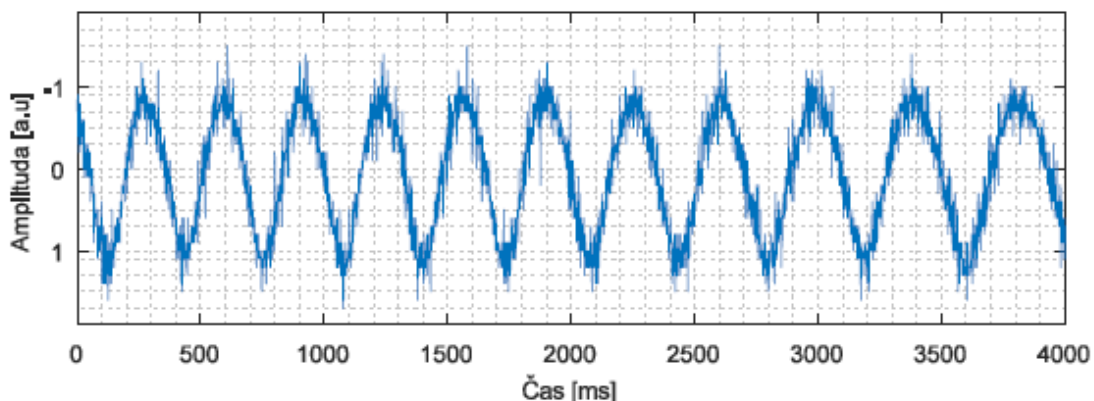


Obrázek 4-3: Fotografie experimentálního uspořádání pasivního F-P rezonátoru s vloženým transparentním fotodetektořem (žlutý obdélník) – převzato z [16]

Na následující straně jsou uvedeny výsledky měření s vyrobeným detektorem, jehož smyslem bylo ověřit funkčnost detektoru a také případný vliv detektoru na stabilizaci optické frekvence laserového zdroje.

Výsledky měření

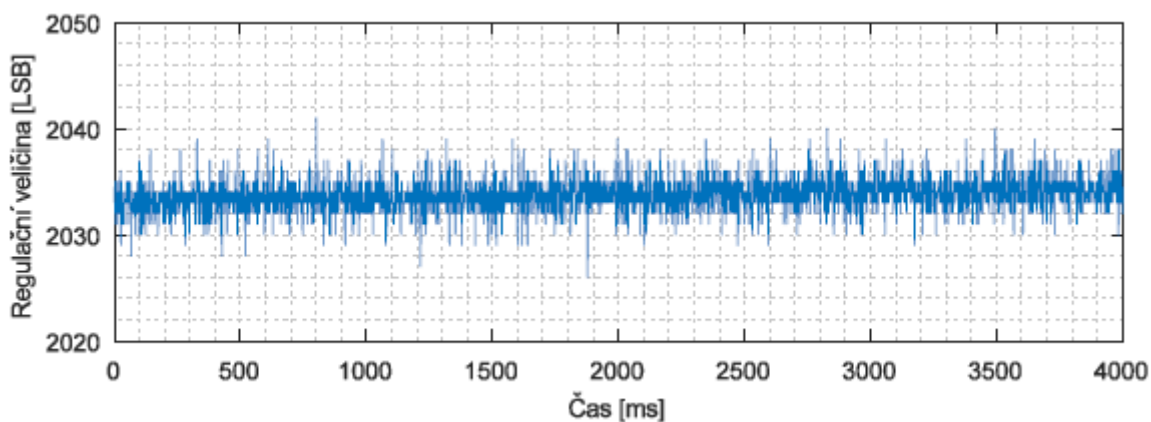
Následující obrázek ukazuje časový záznam detekce maxim a minim stojaté vlny uvnitř dutiny rezonátoru.



Obrázek 4-4 - Časový záznam stojaté vlny detekované transparentním fotodetektořem – převzato z [16]

Vložený detektor nezpůsobil při pohybu uvnitř dutiny rezonátoru žádné odchylky, které by přinášely problémy při stabilizaci optické frekvence laserového zdroje, což je přímým důsledkem dobře fungujících AR vrstev. V případě, že by AR vrstvy nebyly přítomny nebo nefungovaly správně, došlo by ke vzniku tzv. vázaných rezonátorů mezi koncem dutiny rezonátoru a příslušnou

plochou TFD a v záznamu by bylo viditelných více stojatých vln. Záznam uvedený na následujícím obrázku nenaznačuje žádné ovlivnění stabilizace optické frekvence laseru. Podrobné informace o tomto měření lze nalézt v [16], odkud pochází i tyto záznamy měření a v této kapitole uvedené obrázky experimentální sestavy.



Obrázek 4-5 - Časový záznam regulační veličiny laserového zdroje, který nevykazuje žádné ovlivnění pohybem transparentního fotodetektoru uvnitř dutiny rezonátoru – převzato z [16]

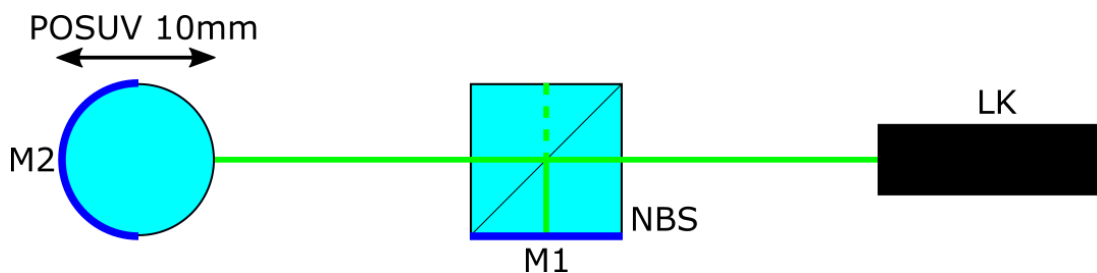
4.2. OPTICKÝ KALIBRAČNÍ SNÍMAČ SE SFÉRICKÝM RETROREFLEKTOREM

4.2.1. Úvod do problematiky

Dalším z řešených témat má název „Bezkontaktní optické měřicí metody a systémy pro přesné strojírenství“. Na tomto projektu spolupracovalo oddělení Koherenční optiky ÚPT s Ústavem radioelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně a průmyslovým partnerem firmou Mesing, spol. s r.o. [17]. Náplní tohoto projektu byl výzkum optických bezkontaktních metod, které využívají interference koherentního světla pro měření vzdálenosti, polohy a geometrických rozměrů. Na tomto projektu jsem se podílel prostřednictvím návrhu a depozice optických tenkých vrstev pro speciální optické prvky.

4.2.2. Princip optického kalibračního snímače

Jak již bylo řečeno, snímač pracuje na principu interference laserového záření. Základem optického snímače je Michelsonův laserový interferometr, který využívá nepolarizující optické prvky. Ve snímači jsou dva prvky, které bylo třeba opatřit optickými tenkými vrstvami. Prvním z nich je nepolarizující dělicí hranol (NBS) a druhým z nich je sférický odražeč (SO), jehož použití je unikátním řešením. Pracovní vlnová délka je 1530 nm. Následující obrázek ukazuje schéma snímače. Obrázek znázorňuje pouze optickou část celé experimentální sestavy. Řešením zbývajících částí jsem se nezabýval a jejich detailní popis lze nalézt v [16].



Obrázek 4-6: Schéma optického kalibračního snímače. Laserové záření vstupuje do této části sestavy přes kolimátor (LK), prochází nepolarizujícím dělicím hranolem (NBS), kde se rozdělí na referenční a měřicí větve. Referenční větev se odráží od zrcadla M1, měřicí větev prochází do sférického odražeče opatřeného na vstupní straně AR vrstvou a odráží se od zrcadla M2. Obě větve se rekombinují na NBS a procházejí přes LK zpět

4.2.3. Nepolarizující dělicí hranol

Zde bylo třeba nanést vysoce odraznou (HR) vrstvu na jednu stěnu hranolu tak, aby nebylo potřeba pro zpětný odraz paprsku použít žádné další zrcadlo. Z komerčních zdrojů byl zakoupen již hotový NBS a na jeho jednu stranu byla nanášena odrazná vrstva. Hranol již z výroby obsahoval antireflexní vrstvy na všech vnějších funkčních plochách. HR vrstva tak byla deponována přes tuto již existující vrstvu. Z pohledu funkčnosti tento postup není nijak problematický a je výhodný kvůli časové úspoře. V průběhu této depozice je třeba však kontrolovat teplotu v komoře, protože tmel použitý pro spojení obou polovin NBS by mohl degradovat a mohlo by dojít ke zhoršení optické (rovnoběžnost optických ploch) nebo mechanické (pevnost spoje) kvality spoje. Takto připravený NBS fungoval správně a byl použit pro výrobu senzoru.

4.2.4. Sfěrický odražeč

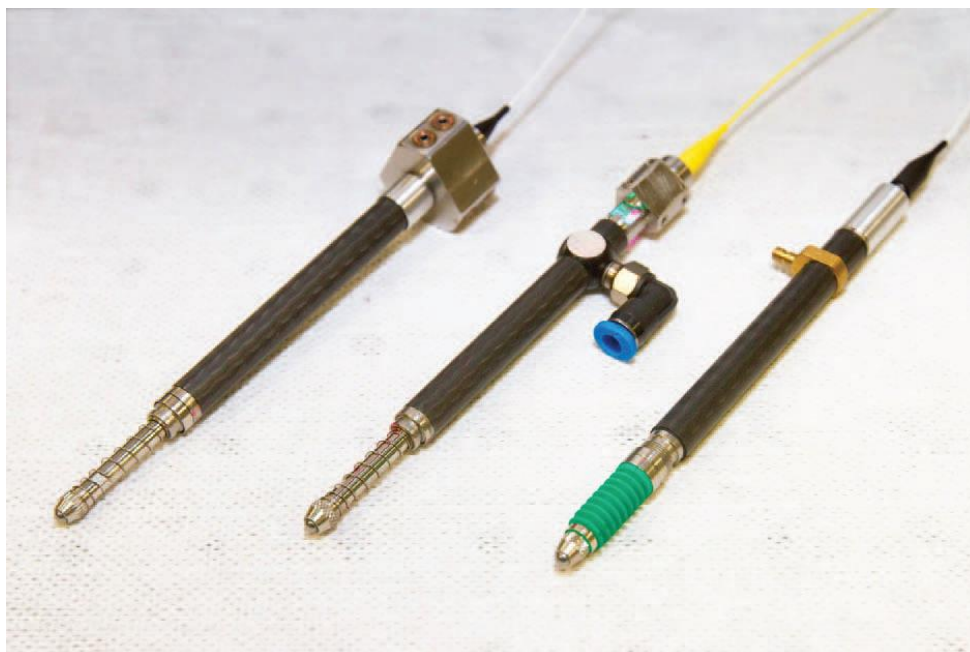
Sférický odražeč je zajímavou aplikací technologie depozice optických tenkých vrstev pro svůj kulový tvar a nestandardní index lomu. Jedná se vlastně o kulovou čočku o průměru 6 mm vyrobenou z optického skla S-LAH 79 od firmy Ohara. Díky svému vysokému indexu lomu (2,0033) funguje jako tzv. „cat-eye“ reflektor. Tato kulová čočka byla doplněna HR vrstvou na zadní straně a AR vrstvou na straně vstupní.

Při depozici soustavy vrstev na tento substrát bylo třeba dbát na to, aby obě vrstvy byly na kulový povrch čočky deponovány co nejlépe naproti sobě. Toho bylo dosaženo výrobou speciálního držáku s válcovým otvorem pro čočku, ve kterém byla čočka upevněna. Při otáčení čočky pro mezi oběma depozicemi tak bylo zajištěno, že je oproti první depozici otočena o 180°.

Samotná depozice pak vyžaduje kombinaci optického a krystalového monitoringu. Důvod je ten, že vysoký index lomu kulové čočky vyžaduje inverzní design soustavy vrstev oproti běžným sklům. Pro první vrstvu je tedy použit materiál SiO₂. Vzhledem k tomu, že optický monitoring nelze provádět na čočce samotné, je třeba měřit na referenčním skle s indexem lomu 1,52. První vrstva je tedy deponována na materiál s téměř identickým indexem lomu a změna propustnosti v závislosti na tloušťce vrstvy je natolik malá, že by docházelo k nepřesnostem při depozici. Proto byla depozice první vrstvy kontrolována krystalem a optický monitoring byl využit pro zbytek procesu.

4.2.5. Výsledky

Následující obrázek ukazuje vyrobené prototypy optického kalibračního délkového snímače, které byly vyrobeny ve spolupráci s firmou Mesing.



Obrázek 4-7 - Prototypy optického snímače – převzato z [16]

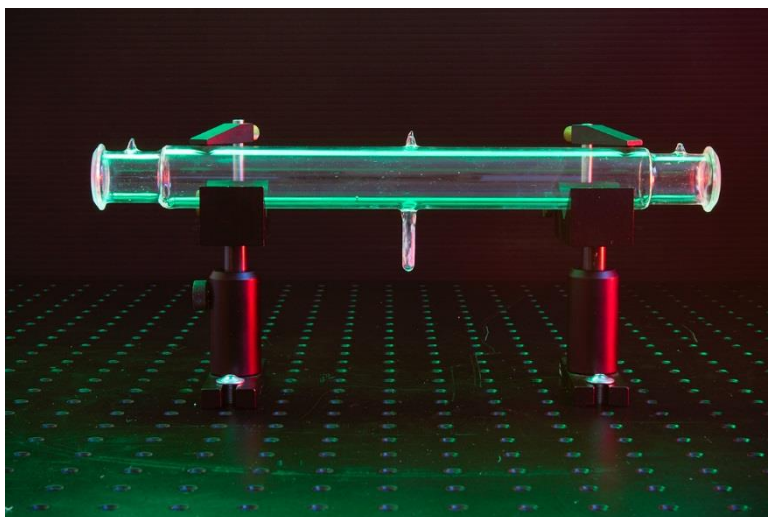
Experimentální ověření funkčnosti snímače bylo publikováno v článku, který je přílohou disertační práce. Dalším výsledkem je přihlášený užitečný vzor, který je též příložen.

4.3. TECHNOLOGIE ABSORPČNÍCH KYVET

Technologie absorpčních kyvet je další z oblastí, které jsou na ÚPT dlouhodobě dobře zavedeny. Absorpční kyvety jsou standardně využívaným nástrojem pro stabilizaci laserů např. v metrologii délek. Naše pracoviště je v současné době významným dodavatelem těchto kyvet pro metrologickou obec nejen v České republice nebo v Evropě, ale i ve zbytku světa.

4.3.1. Úvod do problematiky

Kyvety sestávají ze dvou základních částí a to samotného těla kyvety, které je nejčastěji válcového tvaru (ale existují i jiné varianty) a okének, která jsou přivařena ke koncům těla kyvety. Tělo i okénka jsou vyrobeny nejčastěji z křemenného skla. Takto připravená kyveta je následně plněna různými plyny dle požadavků na pracovní vlnovou délku. Laserový svazek vycházející ze zdroje, který má být stabilizován prochází celou délkou kyvety (někdy i vícenásobně) a jeho frekvence je v regulační smyčce řízena tak, aby došlo k co nejlepší shodě s hodnotou optické frekvence vybrané absorpční čáry v použitém plynu. Více o funkci absorpčních kyvet lze nalézt např. v [18].



Obrázek 4-8: Příklad absorpční kyvety. Na koncích jsou vidět navařená okénka, uprostřed pak již zatavená trubička pro plnění kyvety plynem

Vzhledem k tomu, že laserový svazek prochází oběma okénky, tj. prochází postupně čtyřmi rozhraními, dochází kvůli přirozené odrazivosti křemenného skla k poměrně velkým ztrátám. Jedná se řádově o jednotky procent na každém rozhraní. Z tohoto důvodu je nezbytné použití AR vrstev na všech rozhraních. V případě vnějších stran okének se jedná o rozhraní AR vrstva – vzduch, kde k žádným technologickým problémům nedochází. Složitější je situace u vnitřních stran okének, kde je nutno řešit dva technologické problémy.

Prvním z nich je tepelná zátěž při navařování okének na tělo kyvety. Okénka v této fázi již obsahují AR vrstvu na své vnitřní straně a vzhledem k nutnosti ohřát křemenné sklo až do bodu tavení, což při dané tloušťce okrajů okénka představuje teplotu min. 800 °C, dochází v některých případech k jejímu tepelnému ovlivnění. To má za následek změnu spektrálních vlastností AR vrstev a nežádoucí nárůst ztrát odrazem.

Druhým problémem je fakt, že uvnitř kyvety přichází AR vrstva do kontaktu s pracovním plynem. Přestože dielektrické materiály použité pro přípravu AR vrstev jsou chemicky stabilní, dochází v některých případech kvůli jisté poréznosti vrstev k pronikání molekul plynu do struktury AR vrstev. Zejména v případě, kdy jsou jako pracovní plyn použity páry jódu, bylo pozorováno žloutnutí vrstev v části vnitřní plochy okének. Tento problém byl podrobně studován a výsledky publikovány v článku [19]. Na tuto práci nyní navazují dalším studiem vlastností AR vrstev.

Ve spolupráci s pracovištěm Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V (DLR) jsem provedl spolu s kolegy z ÚPT experimenty, jejichž cílem bylo ověřit odolnost AR vrstev vůči elektronovému a protonovému záření. Tato potřeba vyvstala z požadavku DLR na výrobu jódem plněné absorpční kyvety, která bude v ostrém provozu nasazena na oběžné dráze na modulu Bartolomeo, který je součástí mezinárodní vesmírné stanice ISS, kde bude tomuto záření vystavena po dobu několika let. Kyveta zde bude nasazena v rámci projektu Compasso, jehož cílem je hledat stabilní zdroje optické frekvence pro satelity.

4.3.2. Experimentální postup

Bylo vytvořeno celkem osm sad vzorků opatřených AR vrstvou na obou plochách za použití následujících kombinací metod, napařovacích materiálů a designů:

Vzorky

Materiál	Fused Silica
Rozměry [mm]	15 x 15 x 3
Kvalita povrchů	Leštěné

K depozici AR vrstev byly použity obě metody dostupné na našem pracovišti, tj. e-beam a PIAD. Následující tabulky obsahují informace o použitých napařovacích materiálech a designy AR vrstev.

Název	Index lomu @ 500 nm PIAD	Index lomu @ 500 nm E-BEAM
TiO₂	2.38	2.32
Ta₂O₅	2.14	2.13
SiO₂	1.48	1.48

Tabulka 4-1 - použité napařovací materiály

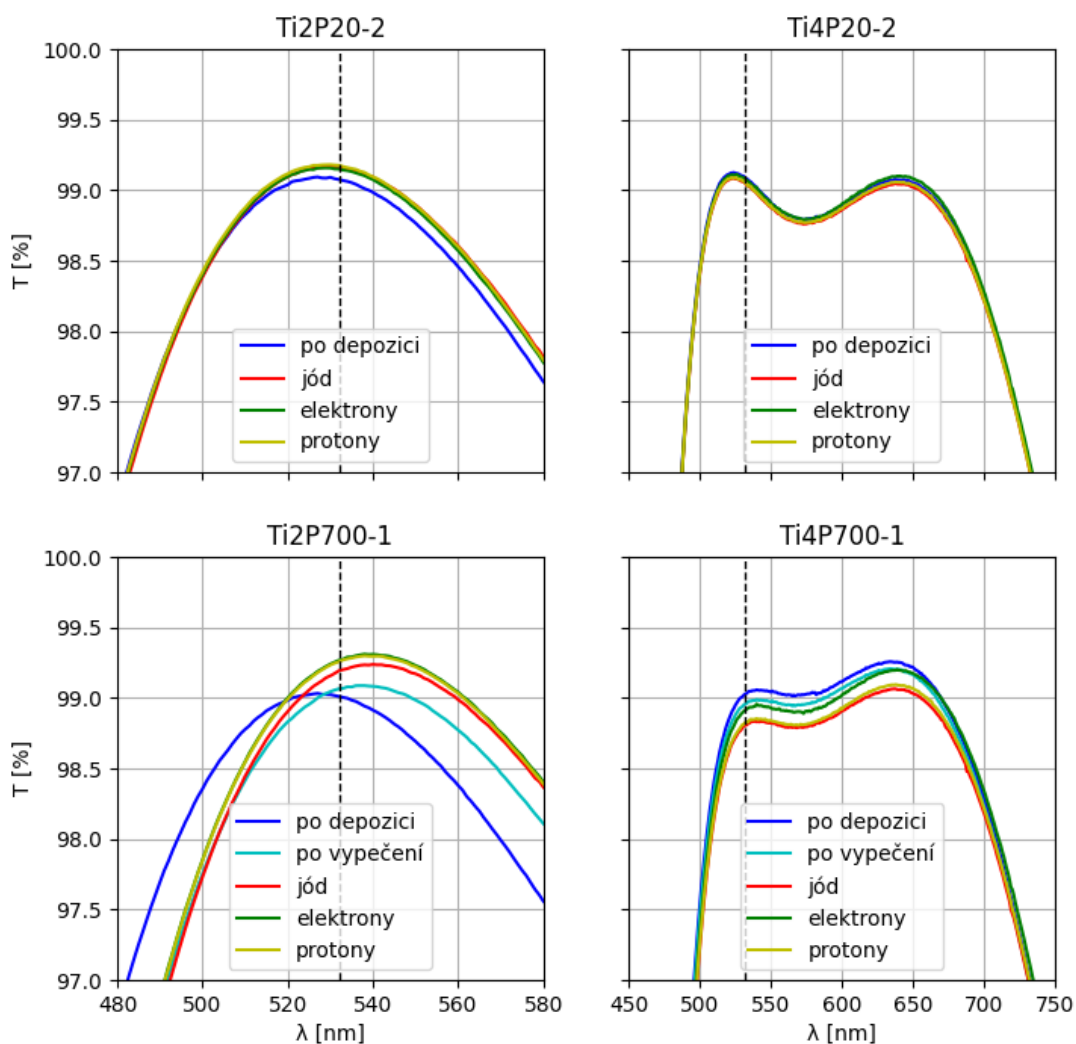
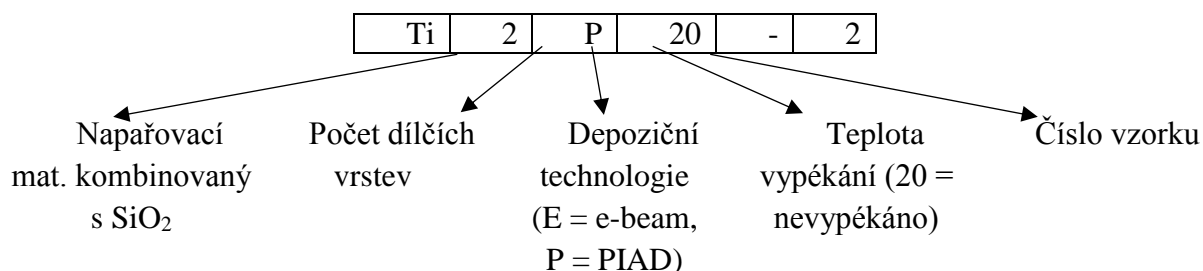
Metoda	Napařovací mat.	Počet vrstev	Design *
PIAD	H = TiO ₂ , L = SiO ₂	2	14.7H 122.4L
PIAD	H = TiO ₂ , L = SiO ₂	4	22.3H 42.3L 43.4H 111.4L
PIAD	H = Ta ₂ O ₅ , L = SiO ₂	2	22.2H 120,4L
PIAD	H = Ta ₂ O ₅ , L = SiO ₂	4	27.2H 28.2L 77.3H 98.6L
E-BEAM	H = TiO ₂ , L = SiO ₂	2	13.9H 123.4L
E-BEAM	H = TiO ₂ , L = SiO ₂	4	21.3H 43.6L 41.3H 111.8L
E-BEAM	H = Ta ₂ O ₅ , L = SiO ₂	2	21.7H 119.4L
E-BEAM	H = Ta ₂ O ₅ , L = SiO ₂	4	25.3H 30.5L 76.8H 99.9L

Tabulka 4-2 - Čísla ve sloupci Design udávají tloušťky jednotlivých vrstev v nm směrem od substrátu

Bylo realizováno deset kusů vzorků pro každou variantu (viz Tabulka 4-2). Celkem tedy bylo vyrobeno osmdesát kusů vzorků. Po depozici byla změřena odrazivost a propustnost každého vzorku na spektrofotometru Cary 7000. Následně bylo z každé sady deseti vzorků vybráno pět a tyto byly vypečeny na teplotu 600 °C v případě vzorků připravených metodou e-beam a 700 °C v případě vzorků připravených metodou PIAD. Volba teplot vyplývá z přechozí práce [19]. Při těchto teplotách AR vrstvy odolávají pronikání jódu do struktury vrstvy a zároveň jsou poměrně dobře zachovány jejich spektrální vlastnosti. Po vypečení byly vzorky vystaveny parám jódu. Následně byly na základě spektrálních vlastností vybrány z každé sady čtyři nejlepší vzorky a tyto byly odeslány do DLR, kde byly vystaveny nejprve elektronovému a následně protonovému záření.

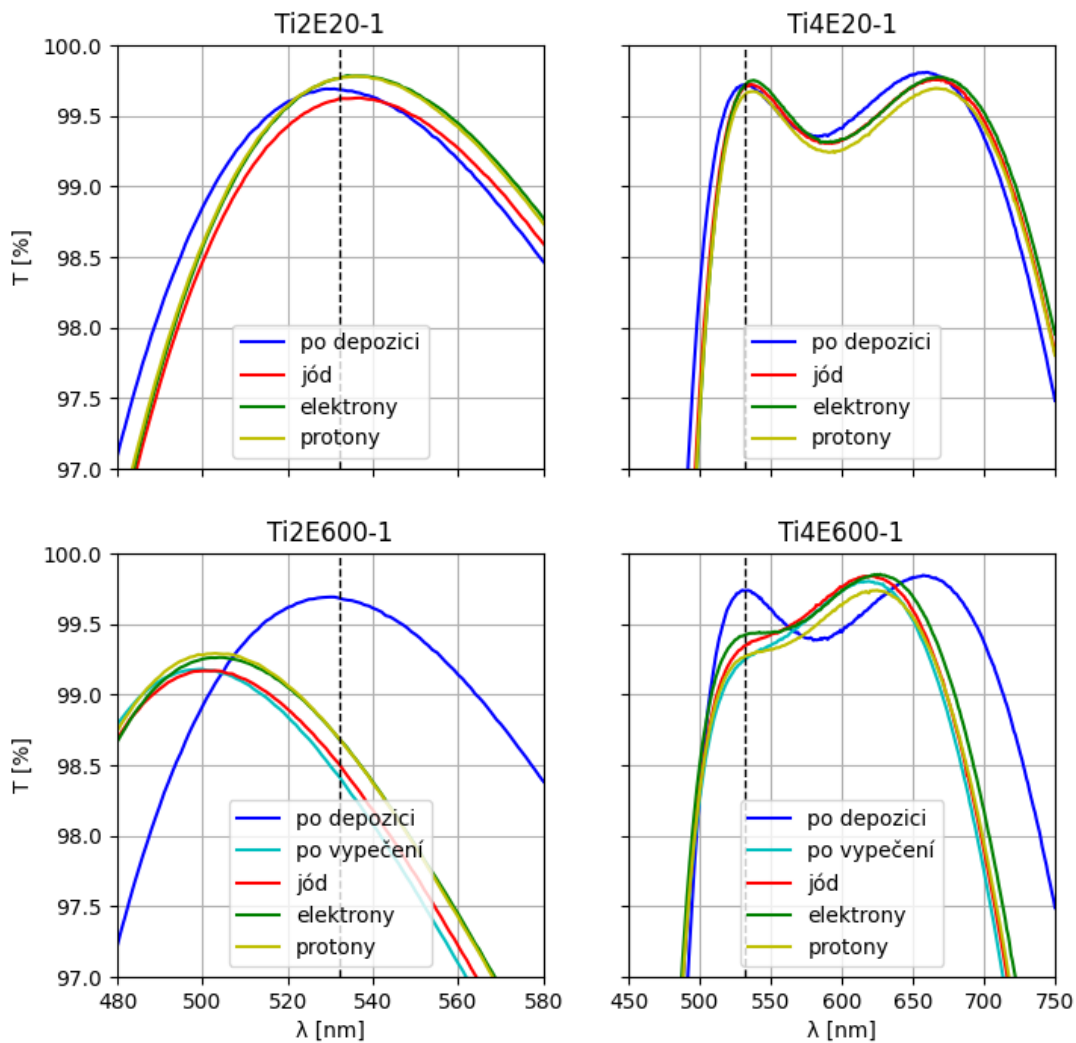
4.3.3. Výsledky

Následující záznamy ukazují spektrální vlastnosti vzorků po každém experimentálním kroku. Spektra byla získána pomocí UV-VIS-NIR spektrofotometru Agilent Cary 7000. Vzorky jsou ve všech případech označeny následujícím způsobem:



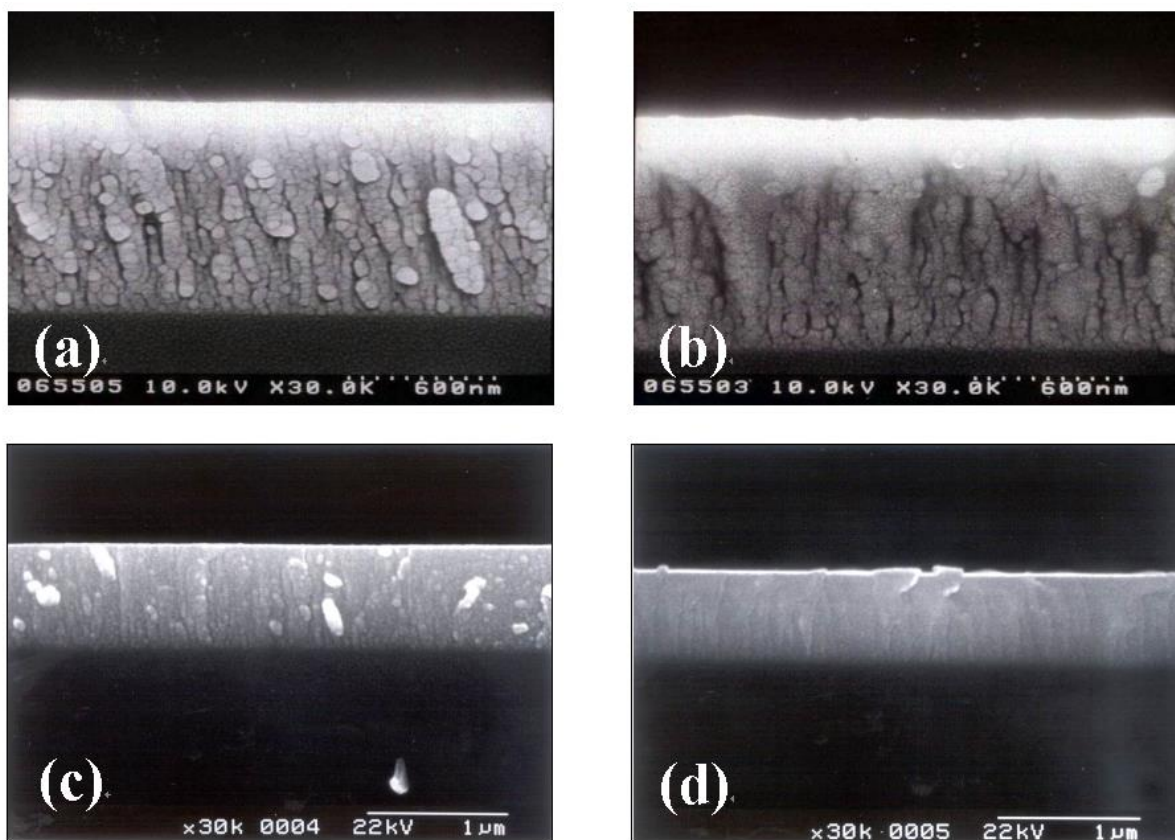
Obrázek 4-9 – Vliv jednotlivých experimentálních kroků na spektrální vlastnosti AR vrstev na bázi TiO₂ připravených metodou PIAD.

Z grafů viz Obrázek 4-9 je patrné, že vystavení vzorků parám jódu a následně elektronovému a protonovému záření nemělo žádný vliv na spektrální vlastnosti AR vrstev. U vzorků vypečených na 700 °C došlo k mírnému posunu křivky propustnosti směrem k delším vlnovým délkám, nicméně funkčnost AR vrstvy na pracovní vlnové délce 532 nm, která je v grafech vždy vyznačena přerušovanou čarou, je velmi dobře zachována. Obrázek 4-10 ukazuje situaci v případě vzorků připravených metodou e-beam. Vystavení parám jódu a elektronovému a protonovému záření opět nezpůsobilo žádné změny spektrálních vlastností, nicméně zejména u dvojrstvé AR je patrný významný posun spektrálních charakteristik po vypečení na 600 °C, který má za následek omezení její funkčnosti a nárůst optických ztrát o více než 1 %, což není zanedbatelné.



Obrázek 4-10 - Vliv jednotlivých experimentálních kroků na spektrální vlastnosti AR vrstev na bázi TiO_2 připravených metodou e-beam.

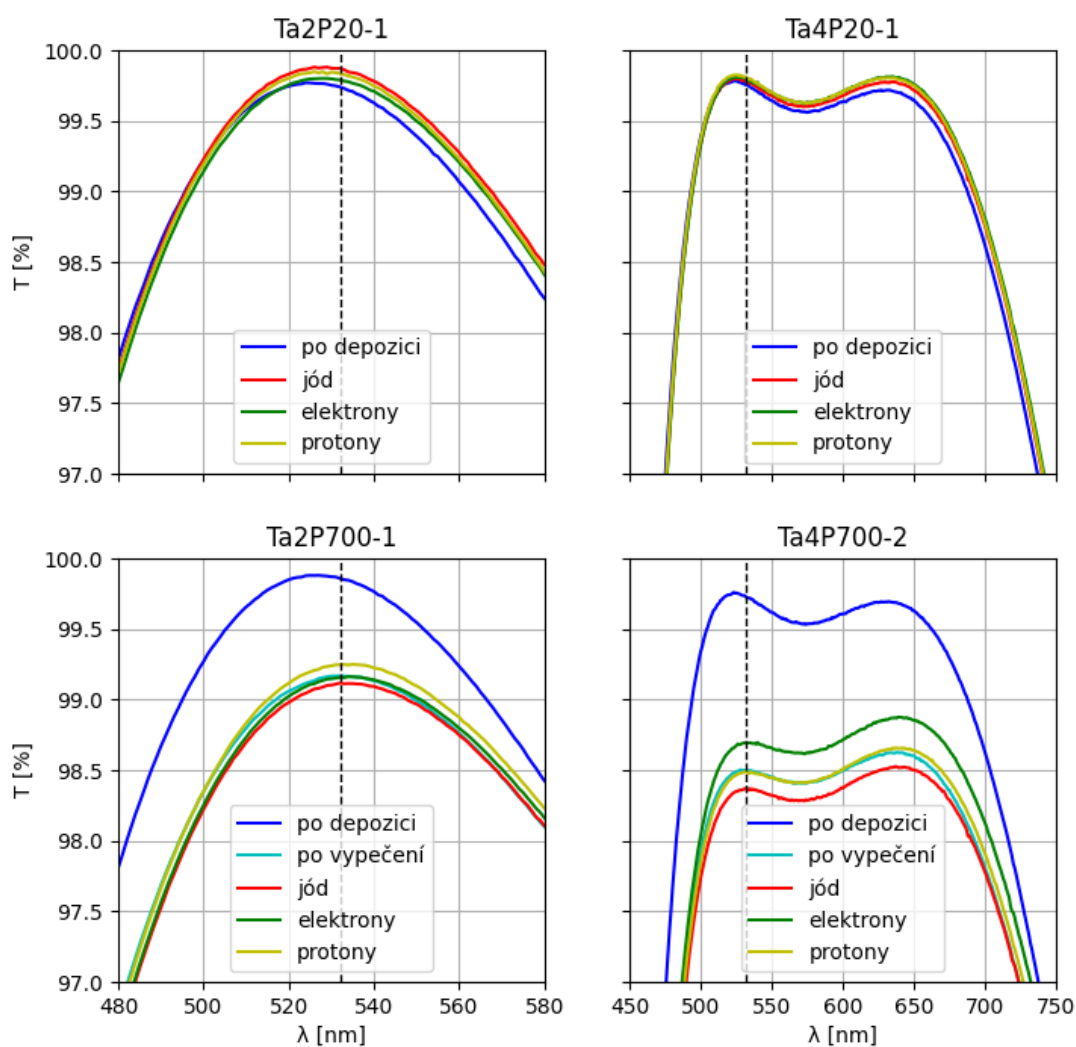
Pozorované změny jsou důsledkem dvou jevů. První z nich souvisí se strukturálními změnami v materiálu TiO_2 vlivem teploty. Vrstvy připravované metodou e-beam tvoří v průběhu depozice sloupcovou strukturu, která je značně porézní, jak ukazuje následující obrázek převzatý z [20].



Obrázek 4-11 - srovnání struktury vzorků připravených metodou e-beam (a, b) a PIAD (c, d)

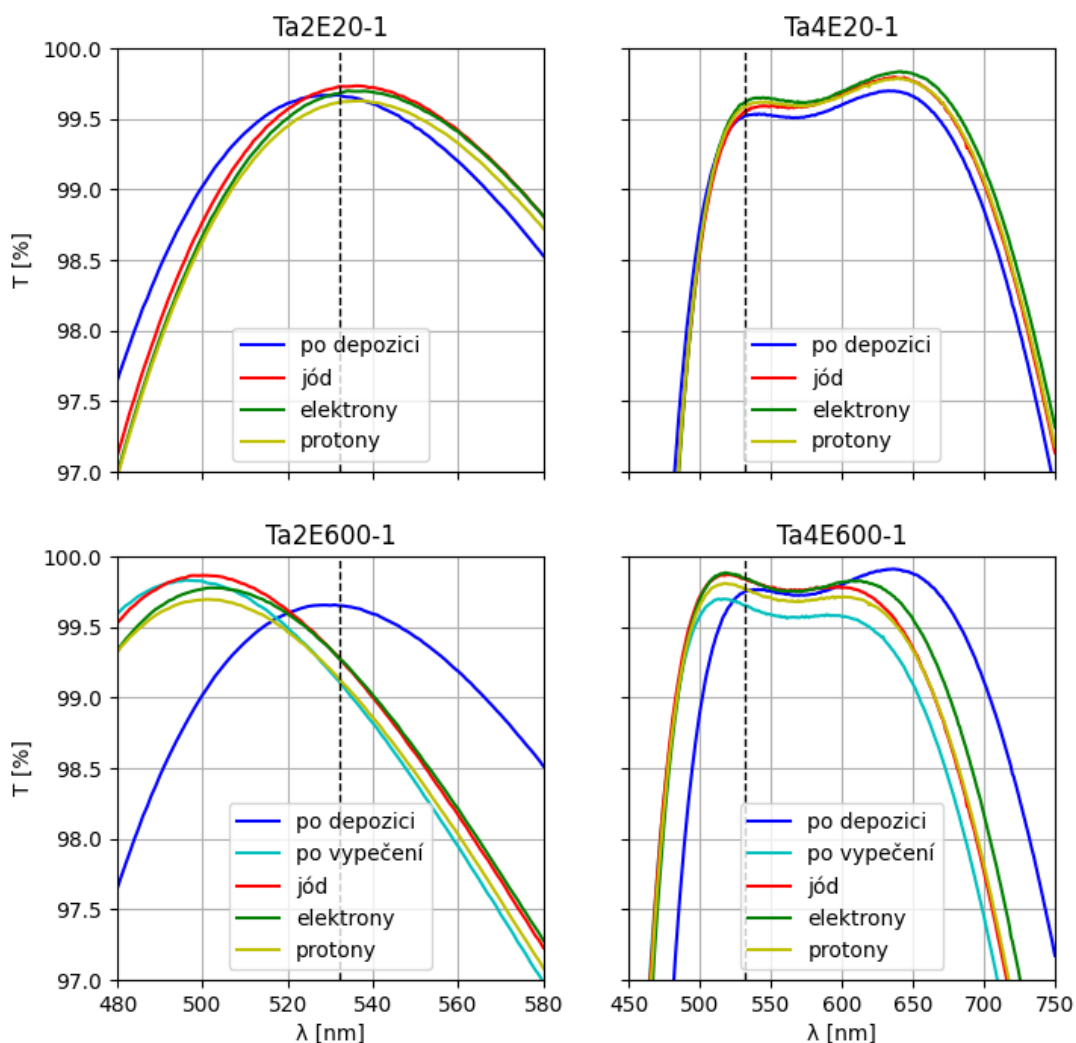
Při nárůstu teploty dochází u takto porézních vrstev k výraznému zmenšení jejich tloušťky [21], což má za následek posun křivek směrem ke kratším vlnovým délkám. Druhým jevem je zvýšení hodnoty indexu lomu vlivem teploty [22], což má za následek zvýšení odrazivosti vrstvy. Kombinace těchto dvou jevů způsobuje pozorované změny ve změřených spektrálních vlastnostech AR vrstev.

Obrázek 4-12 ukazuje výsledky v případě AR vrstev na bázi Ta_2O_5 připravených metodou PIAD. Na první pohled je patrný výrazný pokles propustnosti po vypečení vzorků na teplotu $700\text{ }^\circ\text{C}$. Toto je způsobeno faktem, že metoda PIAD produkuje vrstvy s amorfni strukturou, ve kterých při vypečení na dostatečně vysokou teplotu dojde k tvorbě polykrystalické struktury [23], což v konečném důsledku vede k nárůstu optických ztrát rozptylem pozorovaných v uvedených spektrech.



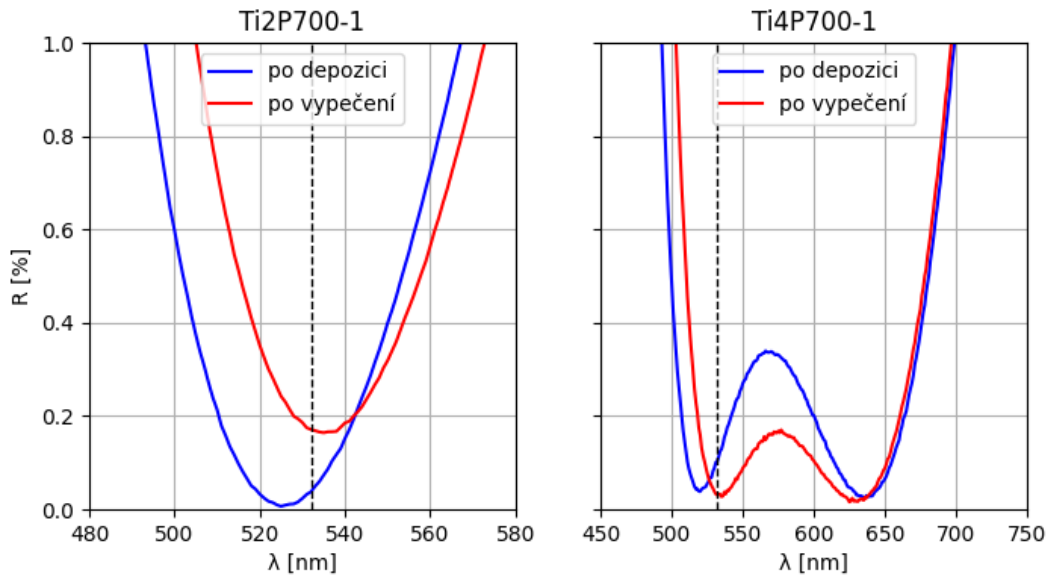
Obrázek 4-12 - Vliv jednotlivých experimentálních kroků na spektrální vlastnosti AR vrstev na bázi Ta_2O_5 připravených metodou PIAD.

Obrázek 4-13 ukazuje výsledky pro AR vrstvy na bázi Ta_2O_5 připravené metodou e-beam. Zde je opět patrný posun křivek směrem ke kratším vlnovým délkám vlivem vysoké teploty. Vysvětlení tohoto jevu je stejné, jako v předcházejících případech,

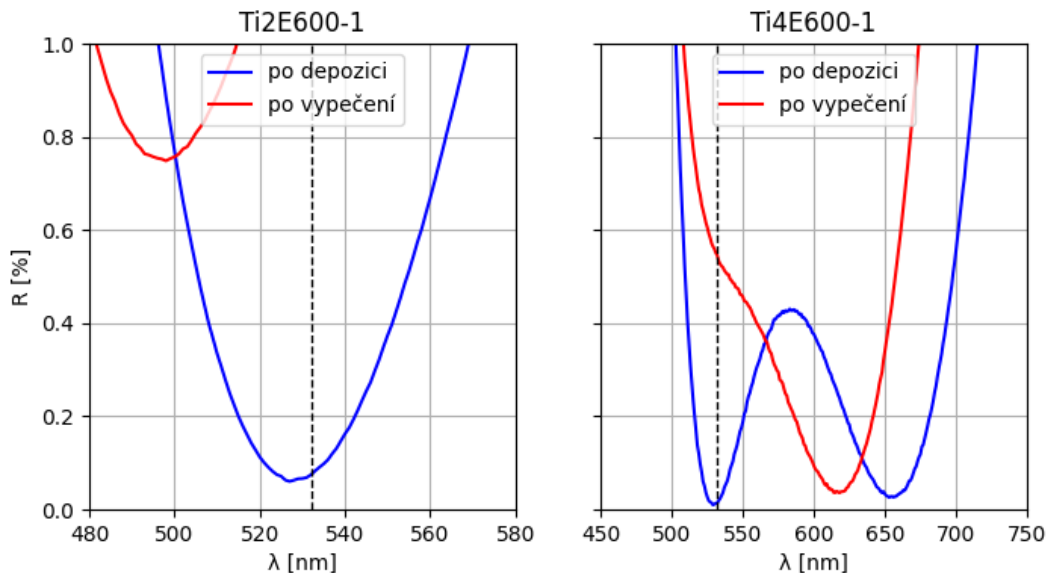


Obrázek 4-13 - Vliv jednotlivých experimentálních kroků na spektrální vlastnosti AR vrstev na bázi Ta₂O₅ připravených metodou e-beam.

Následující grafy ukazují výsledky měření odrazivosti vzorků. Odrazivost byla měřena pouze po depozici a po vypečení. Ostatní experimentální kroky mají za následek zvýšení absorpce ve vrstvách, což je nejlépe pozorovatelné na změnách ve spektrální propustnosti a měření odrazivosti, které je časově náročnější, po těchto krocích nepřináší užitečné výsledky. Toto měření je naopak velmi přínosné bezprostředně po depozici a po vypečení vzorků, protože umožňuje kvantifikovat vliv teploty na optické vlastnosti AR bez dalších vlivů.

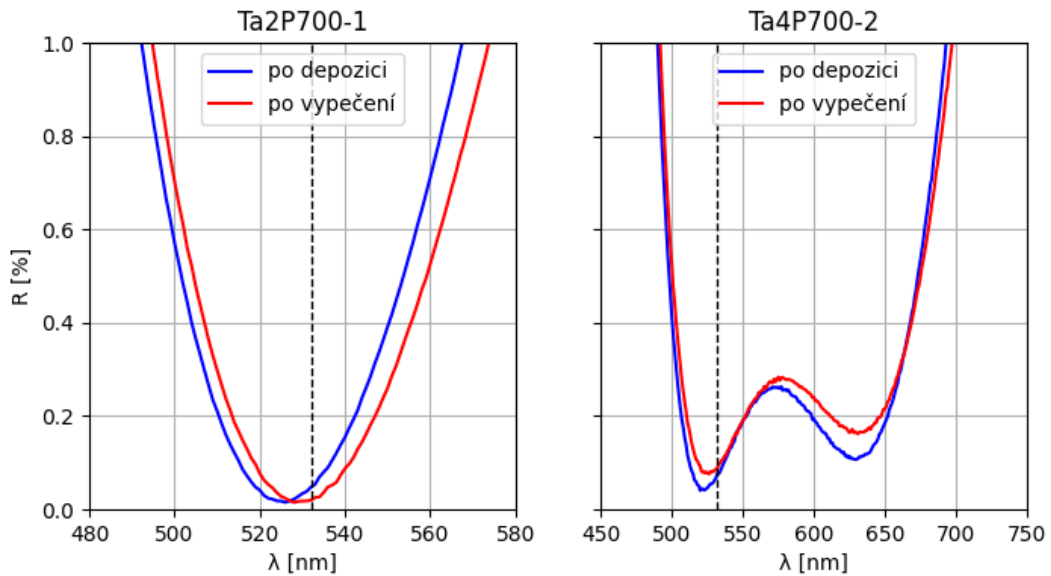


Obrázek 4-14 - Vliv teploty na spektrální odrazivost vzorků na bázi TiO_2 připravených metodou PIAD

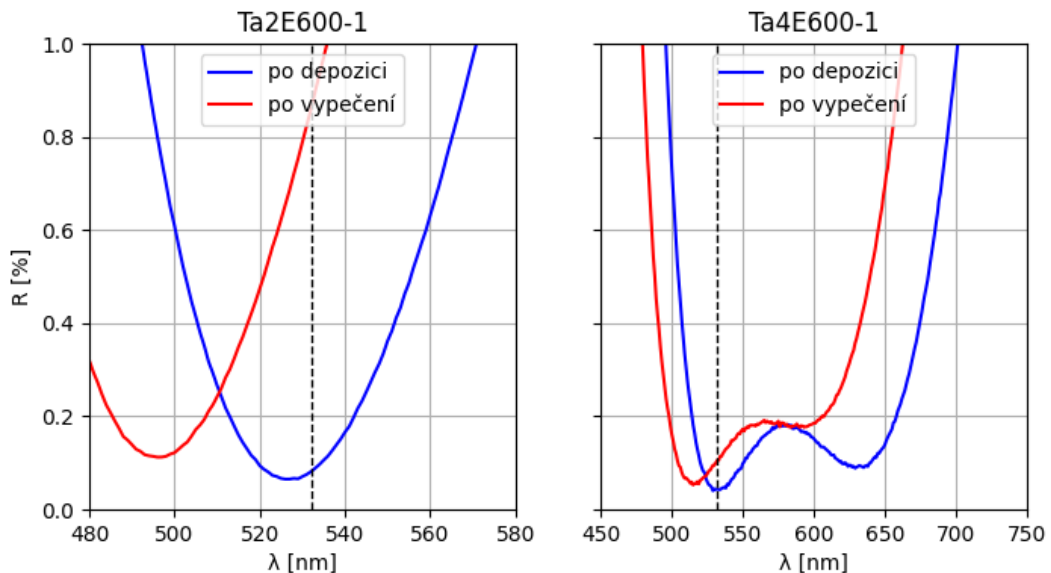


Obrázek 4-15 - Vliv teploty na spektrální odrazivost vzorků na bázi TiO_2 připravených metodou e-beam

Uvedené grafy spektrální odrazivosti ukazují dobrou odolnost vrstev připravených metodou PIAD vůči vysoké teplotě. Pozorovaný je jen malý posun ve spektru a mírný nárůst odrazivosti. Ta se ale stále drží pod hodnotou 0,2 %, což z pohledu funkčnosti AR vrstvy lze považovat za dobré. Naproti tomu u vrstev připravených metodou e-beam je patrný výrazný posun křivek směrem ke kratším vlnovým délkám vlivem zhutnění vrstev a také výrazný nárůst odrazivosti. Obrázky na následující straně ukazují výsledky pro AR vrstvy na bázi Ta_2O_5 , kde je situace velmi podobná, ačkoli nedochází k výraznému nárůstu odrazivosti, pravděpodobně proto, že teplota vypékání nemá tak výrazný vliv na hodnotu indexu lomu Ta_2O_5 . Fakt, že u vzorku Ta4P700-2 nedošlo po vypečení téměř k žádnému zvýšení odrazivosti, ale zároveň došlo k výraznému poklesu propustnosti (viz Obrázek 4-12) je ve shodě s nárůstem absorpce vlivem krystalizace v původně amorfním materiálu.

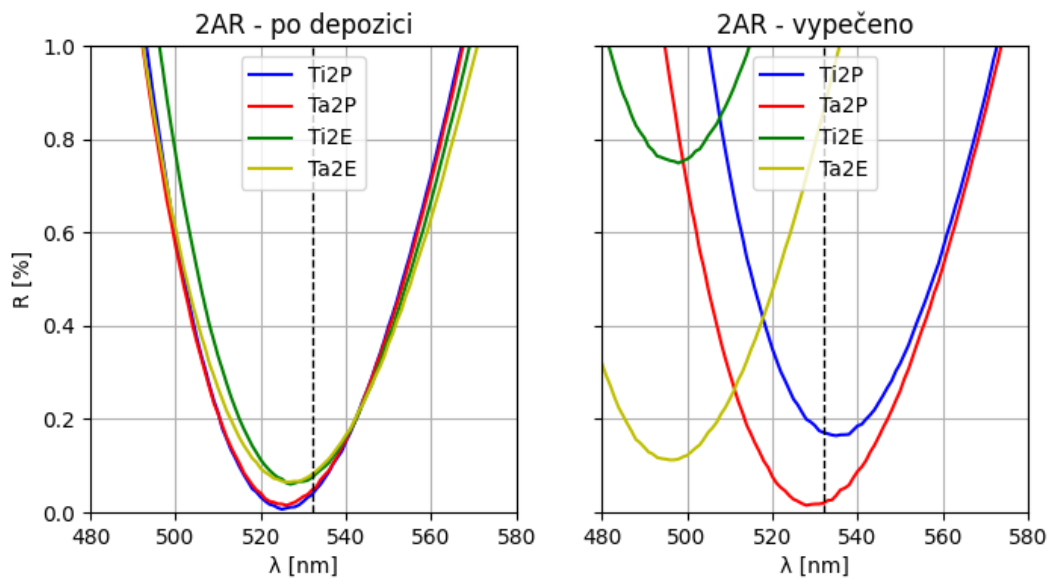


Obrázek 4-16 - Vliv teploty na spektrální odrazivost vzorků na bázi Ta_2O_5 připravených metodou PIAD

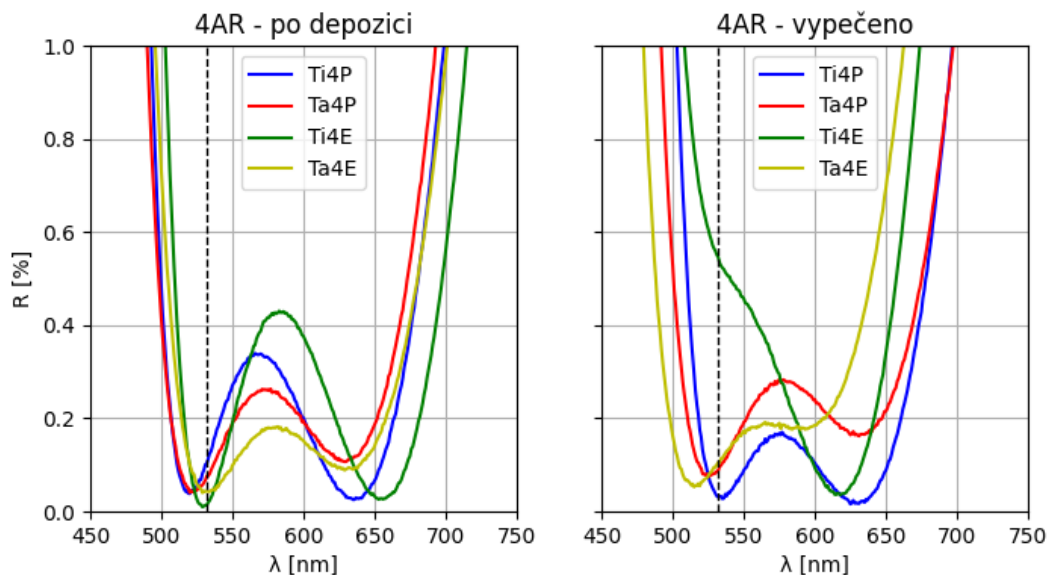


Obrázek 4-17 - Vliv teploty na spektrální odrazivost vzorků na bázi Ta_2O_5 připravených metodou e-beam

Obrázek 4-18 a 4-19 na následující straně srovnávají chování AR vrstev podle použité technologie. Na základě tohoto srovnání lze říci, že technologie PIAD výrazně lépe odolává vypékání a netrpí výraznými posuny ve spektru nebo nárůstem odrazivosti. AR vrstvy sestávající ze čtyř dílčích vrstev jsou pak odolnější vůči těmto posunům, protože mají širší oblast potlačení odrazivosti a případný posun ve spektru pak nemá tak velký vliv, jako v případě dvouvrstvých designů.



Obrázek 4-18 - Srovnání jednotlivých variant AR vrstev



Obrázek 4-19 - Srovnání jednotlivých variant AR vrstev

Shrneme-li tedy získané výsledky, můžeme říci následující:

- AR vrstvy připravované metodou PIAD dobře odolávají tepelným vlivům a jsou dobře použitelné i po vypečení na 700 °C. AR vrstvy připravované metodou e-beam jsou na teplotu náchylnější a zejména v případě dvojvrstevných systémů dochází k nezanedbatelnému omezení funkčnosti.
- U žádné testované kombinace nebyly pozorovány změny ve spektrálních vlastnostech AR vrstev vlivem elektronového nebo protonového záření.

Na vzorcích použitých pro tyto experimenty také nebyl pozorován vliv přítomnosti par jódu, jak bylo pozorováno v [19]. Za tímto stojí s největší pravděpodobností fakt, že v citovaném případě byly měřeny spektrální vlastnosti na celých kyvetách, které byly plněny jódem po jejich vyčerpání na tlak $< 10^{-7}$ mbar. Čerpání na takto nízký tlak způsobí, že vzduch nahromaděný v pórech vrstev je odčerpán a ve vrstvách jej nahradí molekuly jódu, které poté působí jako absorpční medium. Ve zde uvedeném případě nebylo možné vyrobit celou kyvetu pro každou kombinaci materiálu a depoziční technologie z důvodu velké náročnosti výrobního procesu kyvety. Vzorky tak byly vystaveny parám jódu v exsikatoru, kde je i po vyčerpání tlak o cca 2 - 3 řády vyšší a jód se tedy drží pouze na povrchu vzorku, kde je při jeho čištění odstraněn a k absorpci tak nepřispívá. Tato teorie je předmětem navazující práce s cílem jejího ověření a potvrzení.

Výsledky zde uvedených experimentů budou sloužit k výběru vhodného technologického postupu a kombinace napařovacích materiálů, které budou následně použity pro výrobu absorpčních kyvet pro nejnáročnější metrologické aplikace.

5. ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce je souborem výsledků, které byly dosaženy v oblasti technologie optických tenkých vrstev, jejíž principy a stručný teoretický úvod obsahují první dvě kapitoly. Úsilí v této oblasti je vedeno dvěma směry.

V jednom z nich jde o metodologický výzkum v oblasti vlastností optických tenkých vrstev za nestandardních podmínek, konkrétně odolnost optických tenkých vrstev vůči dopadajícímu laserovému záření o vysokých výkonech za kryogenních podmínek. Výsledkem mého snažení je sestava, která umožňuje provádět LIDT testy na vzorcích a kvantifikovat jejich odolnost. Smyslem této sestavy je poskytnout doplňující informace o vlastnostech optických tenkých vrstev připravovaných na našem pracovišti a umožnit další technologický rozvoj v této oblasti. Funkčnost aparatury je testována pilotním experimentem na souboru vzorků.

Druhým směrem, kterým se práce odvíjí, je technologicky zaměřený aplikovaný výzkum. Zde se jedná o výběr technologicky zajímavých a unikátních optických prvků, které byly připraveny na našem pracovišti. Tyto prvky, které jsem opatřil optickými tenkými vrstvami, byly následně použity v experimentálních sestavách. Zde se tedy jedná o využití technologie depozice tenkých optických vrstev pro aplikace ve výzkumu. Mezi těmito výsledky zdůrazňuji práci na vlastnostech optických tenkých vrstev na absorpčních kyvetách, která bude pokračovat i nadále a která je velmi důležitá pro další rozvoj technologie výroby těchto kyvet. Poptávka po těchto kyvetách je v posledních letech významná a objevují se zcela nové aplikace vyžadující nové postupy. Takovou aplikací je v této práci uvedená spolupráce s německým centrem pro letectví a vesmír, jejímž výsledkem bude kyveta umístěná na Mezinárodní vesmírné stanici. Výsledky experimentů provedených na sestavách obsahujících tyto speciální optické komponenty byly prezentovány na mezinárodních konferencích a publikovány v odborných časopisech. Tato témata jsou obsahem páté kapitoly.

Přiloženy k této disertační práci jsou vybrané články publikované v odborných časopisech. Na vědecké práci popisované v těchto článcích jsem se podílel přípravou optických tenkých vrstev na komponentech, které jsou klíčové pro funkčnost použitých experimentálních sestav a konzultacemi v této oblasti. Výsledkem jsou unikátní sestavy pro výzkum v oblasti interferometrie a přesného měření délek.

Přínosem této práce je rozšíření a zkvalitnění depozičních možností na Ústavu přístrojové techniky a také rozšíření vědomostí o chování optických tenkých vrstev za různých podmínek vyplývajících z rozvoje v oblastech tyto vrstvy využívajících.

REFERENCE

- [1] KŘEPELKA, J. *Optika tenkých vrstev*. 1. vyd. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 1993. ISBN 80-706-7319-2.
- [2] WILLEY, R.R. *Practical Design and Production of Optical Thin Films*. New York: Marcer Dekker, Inc., 2002.
- [3] BAUMEISTER, P. *Optical Coating Technology*. Bellingham: SPIE-The Inetrnational Society for Optical Engineering, 2004.
- [4] MACLEOD, H. *Thin-film optical filters*. 3rd ed. Philadelphia: Institute of Physics Pub., 2001. ISBN 07-503-0688-2.
- [5] ZOELLER, A., M. BOOSL, H. HAGEDORN, W. KLUG a Ch. SCHMITT. High accurate in-situ optical thickness monitoring. *Optical Interference Coatings*. Optical Society of America, 2004. DOI: 10.1364/OIC.2004.TuE10.
- [6] ZOELLER, A., M. BOOS a B. H. HAGEDORN. Computer simulation of coating processes with monochromatic. *Advances in Optical Thin Films III*. 2008, **7101**. DOI: 10.1117/12.797612.
- [7] RAINER, Frank, Frank DE MARCO, Staggs MICHAEL, Mark KOZLOWSKI, L. ATHERTON a Lynn SHEEHAN. Historical perspective on fifteen years of laser damage thresholds at LLNL. *Proc. SPIE 2114, Laser-Induced Damage in Optical Materials*. SPIE, 1994, **2114**.
- [8] MASON, P., M. DIVOKÝ, K. ERTEL et al. Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser. *Optica*. 2017, **4**(4), 438-439.
- [9] MIKAMI, K, S MOTOKOSHI, M FUJITA, T JITSUNO, J KAWANAKA a R YASUHARA. *Temperature dependence of laser-induced damage threshold in silica glass*. b.r. DOI: 10.1088/1742-6596/244/3/032023. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/244/i=3/a=032023?key=crossref.2dc236759e2c489725a09b445492627a>
- [10] STUART, B., M. FEIT, A. RUBENCHIK, B. SHORE a M.D. PERRY. Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses. *Physical Review Letters*. 1995, **74**(12).
- [11] MANENKOV, A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: today's state of understanding and problems. *Optical Engineering*. 2014, **53**(1).
- [12] CARR, C., H. RADOUSKY a S. DEMOS. Wavelength Dependence of Laser-Induced Damage: Determining the Damage Initiation Mechanisms. *Physical Review Letters*. 2003, **91**(12).
- [13] WANG, X., Z. SHEN, J. LU a X. NI. Laser-induced damage threshold of silicon in millisecond, nanosecond, and picosecond regimes. *Journal of Applied Physics*. 2010, **108**.

- [14] ISO 11254-1:2000. *Lasers and laser-related equipment – Determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces – Part 1: 1 on 1 test*. b.r.
- [15] MIKAMI, Katsuhiko, Shinji MOTOKOSHI, Toshihiro SOMEKAWA, Takahisa JITSUNO, Masayuki FUJITA a Kazuo TANAKA. Temperature dependence of laser-induced damage threshold of optical coatings at different pulse widths. *Optics Express*. 2013, **21**(23), 28719-28728. DOI: 10.1364/OE.21.028719.
- [16] HOLÁ, M. *Pokročilé interferometrické metody pro souřadnicové odměřování*. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. FR-TI2/705 – *Bezkontaktní optické měřicí metody a systémy pro přesné strojírenství (2010-2014, MPO/FR)*. b.r. Dostupné také z: <https://www.rvvi.cz/cep?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FR-TI2%2F705>.
- [18] HRABINA, J., M. ZUCCO, Ch. PHILIPPE, T. PHAM, M. HOLÁ, O. ACEF, J. LAZAR a O. ČÍP. Iodine Absorption Cells Purity Testing. *Sensors*. 2017, **17**(12), 102-. DOI: 10.3390/s17010102. ISSN 1424-8220.
- [19] OULEHLA, J., P. POKORNÝ, J. HRABINA, M. HOLÁ, O. ČÍP a J. LAZAR. Influence of coating technology and thermal annealing on the optical performance of AR coatings in iodine-filled absorption cells. *Opt. Express*. 2019, **27**, 9361-9371.
- [20] WOO, S.-H. a Ch. HWANGBO. Optical Properties of Ta₂O₅ Thin Films Deposited by Plasma Ion-Assisted Deposition. *Journal of the Korean Physical Society*. 2005, **46**, 187-191.
- [21] WOO, S.-H a Ch. HWANGBO. Effects of annealing on the optical, structural, and chemical properties of TiO₂ and MgF₂ thin films prepared by plasma ion-assisted deposition. *Applied Optics*. 2006, **45**(7), 1447-1455. DOI: 10.1364/AO.45.001447.
- [22] MARTIN, N., Ch. ROUSSELOT, D. RONDOT, F. PALMINO a R. MERCIER. Microstructure modification of amorphous titanium oxide thin films during annealing treatment. *Thin Solid Films*. 1197, (300), 113-121.
- [23] DIMITROVA, T., K. ARSHAK a E. ATANASOVA. Crystallization effects in oxygen annealed Ta O thin films on Si. *Thin Solid Films*. 2001, **381**, 31-38.

PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

Mgr. Jindřich Oulehla

15.10.1981 Brno, Česká Republika

Vzdělání:

2001 – 2008 Vysokoškolské vzdělání v oboru odborná fyzika

Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita

Téma diplomové práce: Modulační elipsometrie

2009 – 2016 Doktorské studium

Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci

nedokončeno

2016 – 2021 Doktorské studium

Fakulta elektroniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně

Téma doktorské práce: Návrh, technologie depozice a charakterizace optických tenkých vrstev pro speciální aplikace

Pracovní zkušenosti:

2009 dosud

Ústav přístrojové techniky AVČR v.v.i.

Specializace:

- Návrhy systémů optických tenkých vrstev
- Depozice systémů optických tenkých vrstev
- Ověřování vlastností optických tenkých vrstev
- Spektrofotometrie

Jazykové znalosti:

Čeština: rodný jazyk

Angličtina: plyná

Stáže a podíl na řešení projektů:

Členem řešitelského týmu projektů:

1. GA15-18430S: Metody laserové spektroskopie s využitím fotonických vláken plněných molekulárním jodem; 2015 – 2019
2. GPP102/11/P819: Metody detekce slabých záznejů u syntezeátorů optických frekvencí; 2011 – 2013
3. TA02010711: Pokročilé interferometrické systémy pro měření v nanotechnologiích; 2012 – 2016
4. TH01011254: Set of elements for photonics communication; 2015 – 2018
5. TE01020233: Platforma pokročilých mikroskopických a spektroskopických technik pro nano a mikrotechnologie; 2012 – 2019.

Stáž:

Central Laser Facility – tříměsíční pobyt (2013) za účelem sběru zkušeností s návrhem a stavbou výkonných laserových systémů.

ABSTRAKT

Fyzikální jevy vyplývající z optiky tenkých vrstev jsou známé již několik století. To nejstarší, co lze považovat za moderní optiku tenkých vrstev, byl objev jevu, kterému dnes říkáme Newtonovy kroužky. Vysvětlení tohoto jevu je dnes považováno za velmi prosté, totiž že jde o interferenci světla na tenké vrstvě o proměnné tloušťce. Ovšem ve své době se jednalo o jev, jehož vysvětlení (spolu s dalšími pozorováními Isaaca Newtona) nebylo vzhledem k úrovni rozvoje optiky možné po dalších 150 let.

Pro odvětví optiky tenkých vrstev byla významná především práce Augustina Jeana Fresnela, který zkombinoval výsledky Youngova experimentu s dvojitou štěrbinou a Huygensovy představy o šíření světla do jedné teorie difrakce. Fresnelovy zákony, kterými se řídí amplituda a fáze světla odraženého nebo prošlého přes rozhraní jsou zásadní. Tyto znalosti spolu s objevy jeho současníků (např. Siméon Denis Poisson) a následovníků (zejména James Clerk Maxwell) tvoří základní teorii optiky tenkých vrstev.

Technologie tenkých optických vrstev zaznamenala velký rozvoj ve třicátých letech minulého století. Ačkoli principy napařování pocházejí již z poloviny devatenáctého století a principy vakuového napařování přibližně z přelomu století devatenáctého a dvacátého, nebyly tyto techniky považovány za užitečné výrobní postupy zejména kvůli nedostatku vhodných čerpacích systémů. Byl to až výzkum v oblasti difuzních vývěv (olejů) na začátku třicátých let, který tyto techniky učinil užitečnými. Od té doby došlo k významnému technologickému rozvoji těchto technik, zejména ke konci minulého století.

Ve stejné době se začaly objevovat nové požadavky na vlastnosti optických tenkých vrstev. Bylo žádoucí, aby splňovaly nejen požadavky na propustnost, odrazivost a nízkou absorpci, ale také například na odolnost vůči laserovému záření o velkých intenzitách.

V oblasti technologie optiky tenkých vrstev je tak stále prostor pro další vývoj nejen v hledání nových materiálů nebo technologických postupů, ale také ve speciálních aplikacích postupů již zavedených.

ABSTRACT

The physical phenomena resulting from thin film optics have been known for several centuries. The oldest discovery which can be considered as modern day thin film optics is what is now called the Newton rings. The explanation of this phenomenon is quite simple, it is the interference of light on a thin film. However in the time of its discovery, due to the level of knowledge of optics, its explanation wasn't possible for the next hundred and fifty years.

The works of Augustin Jean Fresnel have been particularly important for the field of optics. He combined the results Young's double slit experiment with Huygens' ideas of light propagation into one theory – the theory of diffraction. The Fresnel's laws which govern the propagation of amplitude and phase of light reflected or transmitted over a boundary are essential. These laws along with the discoveries of his contemporaries (i.e. Siméon Denis Poisson) and followers (especially James Clerk Maxwell) are the foundations of thin film optics.

Optical thin film technology went through rapid development in the 1930's. Even though the principles of sputtering come from approx. half of the nineteenth century and the principles of vacuum evaporation come from the turn of the nineteenth century, these techniques were not considered useful production techniques especially because of the lack of usable pumping systems. It was the research in the area of diffusion pumps (and oils) in the 1930's which made these techniques useful. Since then there has been a great technological development of these techniques, particularly towards the end of the last century.

During the same period new requirements for the optical thin film properties have appeared. Not only were they required to perform well in the area of reflectance and transmittance but also to be able to withstand high intensity laser radiation.

There is still a wide range of scientific and technological opportunities in the field of optical thin film production not only in the form of finding new materials or novel coating techniques but also in the usage of standardized technology for special and unique applications.