



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM ROZPTYLU SVĚTLA NA TENKÝCH VRSTVÁCH

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

ING. ŠTĚPÁN ŠUSTEK

ŠKOLITEL

PROF. RNDR. JIŘÍ PETRÁČEK, DR.

OPONENTI

DATUM OBHAJOBY

BRNO 2024

KLÍČOVÁ SLOVA:

Skaterometr, rozptyl záření na površích pevných látek, optická charakterizace, tenké vrstvy.

KEYWORDS:

Scatterometer, radiation scattering on the surfaces of solid substances, optical characterization, thin films.

MÍSTO ULOŽENÍ RUKOPISU DIZERTAČNÍ PRÁCE:

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na sekretariátu Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

© Štěpán Šustek, 2024
ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

1. Úvod	1
2. Současný stav poznání	2
2.1. Popis náhodně drsného povrchu	2
3. Měření ARS	5
3.1. Požadavky na kvalitní skaterometry při měření ARS	5
3.2. Analýza neurčitosti měření ARS	5
3.3. Přístrojové vybavení	6
4. Konstrukční úpravy	6
4.1. Optická část	6
4.2. Úprava goniometru a elektroniky	8
4.3. Demonstrace výsledků dosažených pomocí SMII	10
5. Úprava pro měření ARS tenkých vrstev	13
5.1. Možné příčiny nepřesností	14
6. Návrh nového přístroje SM III	16
6.1. Základní postup návrhu přístroje:	16
7. Detektor	16
8. Komora pro přípravu laserového svazku	17
9. Časová stálost přístroje SM III	20
9.1. Fluktuace ve výkonu laseru	22
9.2. Citlivost elektroniky	24
9.3. Druhý kanál	25
9.4. Zhodnocení časové stability	25
9.5. Kalibrační měření	27
10. Výsledky měření přístroje	28
10.1. Porovnávací měření	28
11. Závěr	32
12. Literatura	33
Životopis Autora	34
Abstrakt	35

1. ÚVOD

Rozptyl světla z objektů okolního světa hraje v našem životě velmi významnou úlohu. Umožňuje nám získávat informace o pro nás důležitých vlastnostech těchto objektů, a tak zajišťovat naši existenci v tomto světě. Zmíněný rozptyl je silně ovlivňován mikrotopografií rozptylujících povrchů, kterou nazýváme drsností povrchu. Tato drsnost může mít náhodný či kvazináhodný charakter, může také vykazovat určitou nenáhodnou texturu. V každém případě se s drsnými povrchy setkáváme jak v základním či aplikovaném výzkumu tak i v průmyslových aplikacích, kde jejich drsnost výrazně ovlivňuje vlastnosti těchto povrchů. Metody a techniky pro určení drsnosti povrchů, jsou tedy velmi důležité. Technikou budeme v dalším chápat způsob, kterým získáváme experimentální data potřebná k určení charakteristik drsnosti povrchu, metodou potom způsob, kterým určujeme tyto charakteristiky z experimentálních dat. Z našeho pohledu je můžeme rozdělit na metody a techniky optické a neoptické. Nás budou v dalším zajímat metody a techniky optické s důrazem na metody a techniky založené na rozptylu světla ze studovaných povrchů. Vzhledem k cílům disertační práce a skutečnosti, že v naší laboratoři konstruujeme skaterometry goniometrického typu, je v dalším výkladu kladen důraz na experimentální stránku zmíněných technik, a to zejména na měření tzv. rozptylové distribuční funkce *ARS* (scattering distribution function or angle-resolved light scattering), kterou zmíněné skaterometry mohou měřit. Práce se také soustředí jen na náhodně drsné povrchy pevných těles, o nichž budeme předpokládat, že je lze považovat za ergodické (tj. jsou stacionární a jejich střední hodnota podle souboru se rovná střední hodnotě zjištěné z jedné reprezentativní realizace).

2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1. Popis náhodně drsného povrchu

Statistický popis náhodně drsného povrchu vychází z jednorozměrného rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností $w(z)$, kde z představuje hodnoty náhodné funkce $\xi(x, y)$ popisující topografii náhodně drsného povrchu (tj. z představuje výšky nerovností nad střední rovinou povrchu). Podrobnější popis a odvození potřebných vztahů je uvedeno v dizertační práci v kapitolách 2.1 a 2.2. Číslování vztahů je zachováno stejné jako v dizertační práci pro jednoduché dohledání. Pro studium rozptylu na tenkých vrstvách jsou stěžejní veličiny $PDS(f)$ - výkonová spektrální hustota, $ARS(\theta_s, \phi_s)$ - rozptylová distribuční funkce, σ - Rms (root-mean-square) drsnost a vztah mezi nimi.

Pokud drsnost povrchu je isotropní, je PSD kruhově symetrická a předchozí vztah lze zapsat ve tvaru

$$PDS(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} PSD(f, \psi) d\psi \quad (2.5)$$

s použitím transformace:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (2.6)$$

a

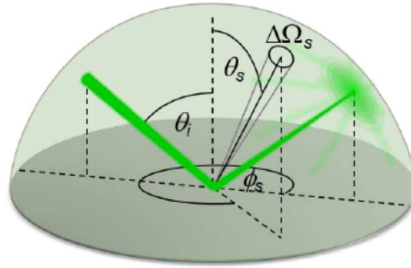
$$\psi = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right). \quad (2.7)$$

Aplikací předchozího vztahu provádíme zprůměrování lokálních odchylek od reprezentativního charakteru povrchu a potlačujeme odchylky měření, které jsou způsobeny vadami měřicího procesu.

Dalí důležitou charakteristikou je rozptylová distribuční funkce ARS (scattering distribution function, angle-resolved light scattering) definovaná takto:

$$ARS(\theta_s, \phi_s) = \frac{\Delta P_s(\theta_s, \phi_s)}{\Delta \Omega_s P_i}, \quad (2.15)$$

kde význam symbolů je následující (viz obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Význam parametrů při měření $ARS(\theta_s, \phi_s)$. Převzato z prezentace k SDZ Ing. Pavla Nádaského, ÚFI FSI VUT v Brně, říjen 2015).

$\Delta P_s(\theta_s, \phi_s)$ je výkon rozptýlený ve směru úhlů θ_s, ϕ_s do prostorového úhlu $\Delta\Omega_s$ (přijímací úhel detektoru), P_i výkon dopadajícího světelného svazku.

$ARS(\theta_s, \phi_s)$ popisuje, jak rozptýlený výkon závisí na úhlech rozptylu. Pro měření $ARS(\theta_s, \phi_s)$ se v současnosti připravuje ISO norma.

Pro isotropně rozptylující objekty postačuje in-plane měření (tj. měření v libovolném poledníku hemisféry). Anisotropně rozptylující objekty vyžadují 3D měření (tj. měření po celé hemisféře, u částečně propustných objektů ideálně po celé sféře). Zde je třeba poznamenat, že mnoho objektů (některé optické komponenty, leštěné povrchy, tenké vrstvy, ...) rozptyluje anisotropně, i když se nesprávně považují za isotropně rozptylující.

Pro velmi málo drsné povrchy, které splňují podmínku $\frac{\sigma}{\lambda} \ll 1$ [1], plyne z Rayleighovy-Riceovy (RR) teorie pro isotropně rozptylující povrchy následující vztah mezi $ARS(\theta_s)$ a $PSD(f)$ měřeného povrchu [2]:

$$ASR(\theta_s)_{RR} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} (\cos \theta_i)(\cos \theta_s)^2 \theta_s PSD(f) \cdot Q_{RR}. \quad (2.16)$$

Kde

$$Q_{RR} = \left| \frac{(\varepsilon - 1)}{(\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i} + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i})(\sqrt{1 - \sin^2 \theta_s} + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s})} \right|^2 \quad (2.17)$$

ε je dielektrická funkce prostředí pod povrchem.

Pozn.: Pro malé úhly dopadu je Q_{RR} rovno odrazivosti povrchu.

Vztah (2.16) ukazuje, že relace mezi $ASR(\theta_s)_{RR}$ a $PSD(f)$ je jednoduchá. Tedy z naměřené $ASR(\theta_s)_{RR}$ lze snadno určit $PSD(f)$ a posléze z ní i rms drsnost podle vztahu [3]

$$\sigma^2 = 2\pi \int_{f_{min}}^{f_{max}} PSD(f) f df \quad . \quad (2.19)$$

Zde f_{max} a f_{min} určují interval prostorových frekvencí, ve kterém lze $PSD(f)$ podle vztahu (2.16) ze změřené $ASR(\theta_s)_{RR}$ určit (tyto meze jsou u každého reálného měření dány např. velikostí měřené plochy povrchu a přístrojovým rozlišením).

Právě $ARS(\theta_s, \phi_s)$ je z hlediska cílů zadané disertační práce pro nás nejzajímavější, neboť v Laboratoři koherenční optiky ÚFI FSI VUT v Brně (LCO) konstruuje 3D skaterometry goniometrického typu, které umožňují měření této veličiny. Z těchto experimentálních dat lze určit v případě málo drsných povrchů, jakými jsou i rozhraní tenkých vrstev, PSD a z ní následně rms drsnost σ .

2.2. Cíle práce

Cílem práce je získat možnost měřit parametry topografie náhodně drsných povrchů s velikostí rms drsnosti řádu řádu $10^0 - 10^{-1}$ nm a získat tak možnost jejich statistického popisu. Zmíněnou rms drsnost vykazují povrchy tenkých vrstev či jejich rozhraní, pro které se tato měření hlavně zamýšlejí. K dosažení tohoto cíle bude postaven skaterometr další generace – skaterometr SM III.

Při stavbě tohoto přístroje bude použito poznání a zkušenosti ze stavby a úprav předchozí verze přístroje skaterometr SM I a skaterometr SM II.

3. MĚŘENÍ ARS

Následující kapitola se bude zabývat měřením ARS pomocí skaterometrů, konstrukčními požadavky těchto přístrojů a dosavadním vybavením Laboratoře koherentní optiky Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství.

3.1. Požadavky na kvalitní skaterometry při měření ARS

Při měření rozptylu např. z kvalitních optických elementů jsou pro skaterometry požadovány následující parametry [1]:

- Velký dynamický rozsah. Alespoň 11 řádů pro optiku používanou ve viditelném spektru (dále jen VIS optika).
- Linearita přes celý dynamický rozsah.
- Vysoká citlivost a nízký šum (pro VIS optiku hladina šumu $\leq 10^{-6}$ sr⁻¹).
- Malá spektrální pološířka světla.
- Pro anisotropní rozptyl možnost měřit na celé sféře rozptylu.
- V případě měření optiky mít možnost eliminovat defokusaci jí vyvolanou.
- V některých aplikacích možnost měřit velké vzorky.
- Čistá laboratoř (možnost měřit ve vakuu, plynové atmosféře, měřit koncentraci prašných částic ...).

3.2. Analýza neurčitosti měření ARS

Hlavními zdroji neurčitosti měření $ARS(\theta_s, \phi_s)$ jsou [1]:

- Fluktuace světelného zdroje.
- Šum detektoru, který závisí na způsobu detekce. Obecně je vyšší pro malé signály.
- Kalibrační chyby.
- Zbytková nelinearita detekčního systému.
- Nedokonalá justace přístroje. Tato nejistota ARS není konstantní v celém rozsahu rozptylového úhlu (největší je pro velké úhly a blízko zrcadlového směru).
- Mechanická nepřesnost goniometru, která způsobuje typicky nejistoty v nastavení polohy až 0.01°. Vliv může mít i gravitací způsobená deformace měřicích ramen.

Relativní neurčitost se pohybuje v rozsahu 10% až (za splnění některých podmínek) 5%.

Je vhodné poznamenat, že pro měření $ARS(\theta_s)$ je výše popsán postup měření postupem doporučeným. Jeho dodržování má zajistit jednoznačné výsledky, které bude možné srovnávat mezi různými pracovišti. Za tímto účelem se ISO norma pro měření $ARS(\theta_s)$ teprve připravuje.

3.3. Přístrojové vybavení

Laboratoři koherenční optiky LKO na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně se skupina pod vedením profesora Miloslava Ohlídala zabývá studiem rozptylu elektromagnetického záření okolo 20 let. Mino jiné se v této oblasti zabývá také konstrukcí optických přístrojů. V dizertační práci jsou podrobněji popsány předchozí konstrukce přístrojů, přístrojů SM a SMII, které byly původně navrženy na měření rozptylu z leptaných povrchů solárních článků. Tenké vrstvy, na které se dizertační práce zaměřuje, mají drsnost povrchů o 3 až 4 řády nižší než leptané povrchy původně zkoumaných solárních článků. Na měření takto velmi málo drsných povrchů nebyly přístroje SM a SMII při své konstrukci zamýšleny a velmi nízký výkon rozptýlený těmito tenkými vrstvami leží za hranou citlivosti těchto přístrojů. Pro měření ARS z povrchů tenkých vrstev bude potřeba konstrukčních úprav pro zvýšení citlivosti i dynamického rozsahu.

4. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY

V rámci zadané disertační práce jsme upravili skaterometr SMII (skaterometr druhé generace, která navazuje na předchozí v LKO zkonstruovaný skaterometr SMI). Jde o 3D skaterometr goniometrického typu. Během doktorského studia jsme skaterometr SMII zdokonalili a současně upravili na stolní verzi tohoto přístroje.

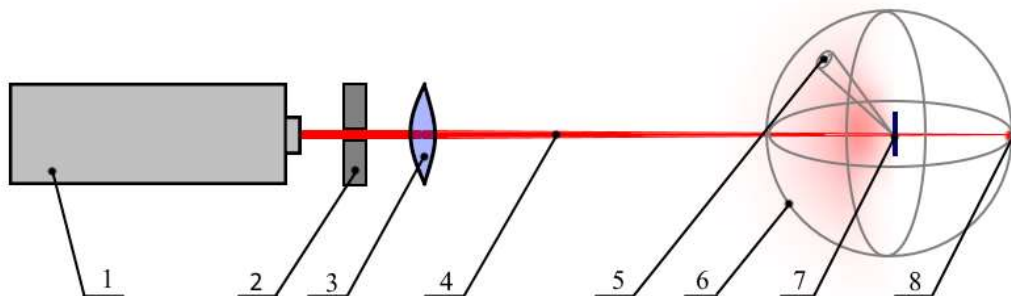
Úpravy

1. optika k přípravě laserového svazku
2. úprava goniometru
3. úprava elektroniky pro snížení šumu

V následujících kapitolách bude krátce nastíněna každý s těchto úprav.

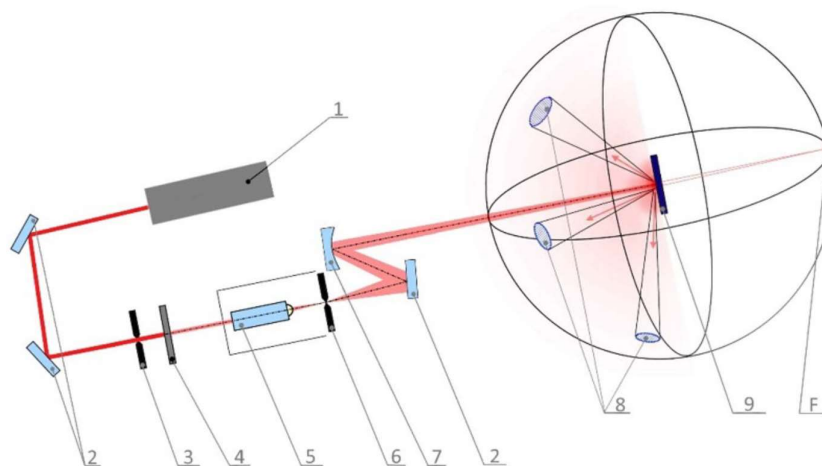
4.1. Optická část

Původní verze přístroje scattermeter SM2 využívala jako zdroj laserového svazku helium neonový laser. Ten byl fokusován čočkou tak, aby ohnisko leželo na zadní části povrchu sféry, po které se pohyboval detektor v goniometru (znázorněno na obrázku 4.1). V této sestavě byla začleněna clona pro odstranění parazitních světelných jevů vycházejících z laseru. Pro měření solárních článků byla tato sestava dostačující, jak je vidět z výsledků dosažených [4]. Pro větší citlivost přístroje potřebnou pro měření drsnosti povrchů, která je plánovaná, toto řešení není dostačující.



Obrázek 4.1: Schéma původního skaterometru SMII: 1 He-Ne laser, 2 apertura eliminující parazitní světlo kolem laserového svazku, 3 fokusační čočka, 4 laserový svazek, 5 vybraná možná pozice detektoru (fotodiody), 6 sféra po které se pohybuje detektor, 7 měřený vzorek, 8 bod F do kterého čočka fokusuje laserový svazek v případě, kdy vzorek není přítomen,

Po propočtu vhodné kombinace objektivu a modové clony byl navržen prostorový filtr a za něj dvě zrcadla. Jedno justovací a druhé fokusační, které fokusuje laserová svazek na povrch sféry po které se pohybuje detektor jak je znázorněno na obrázku 4.2

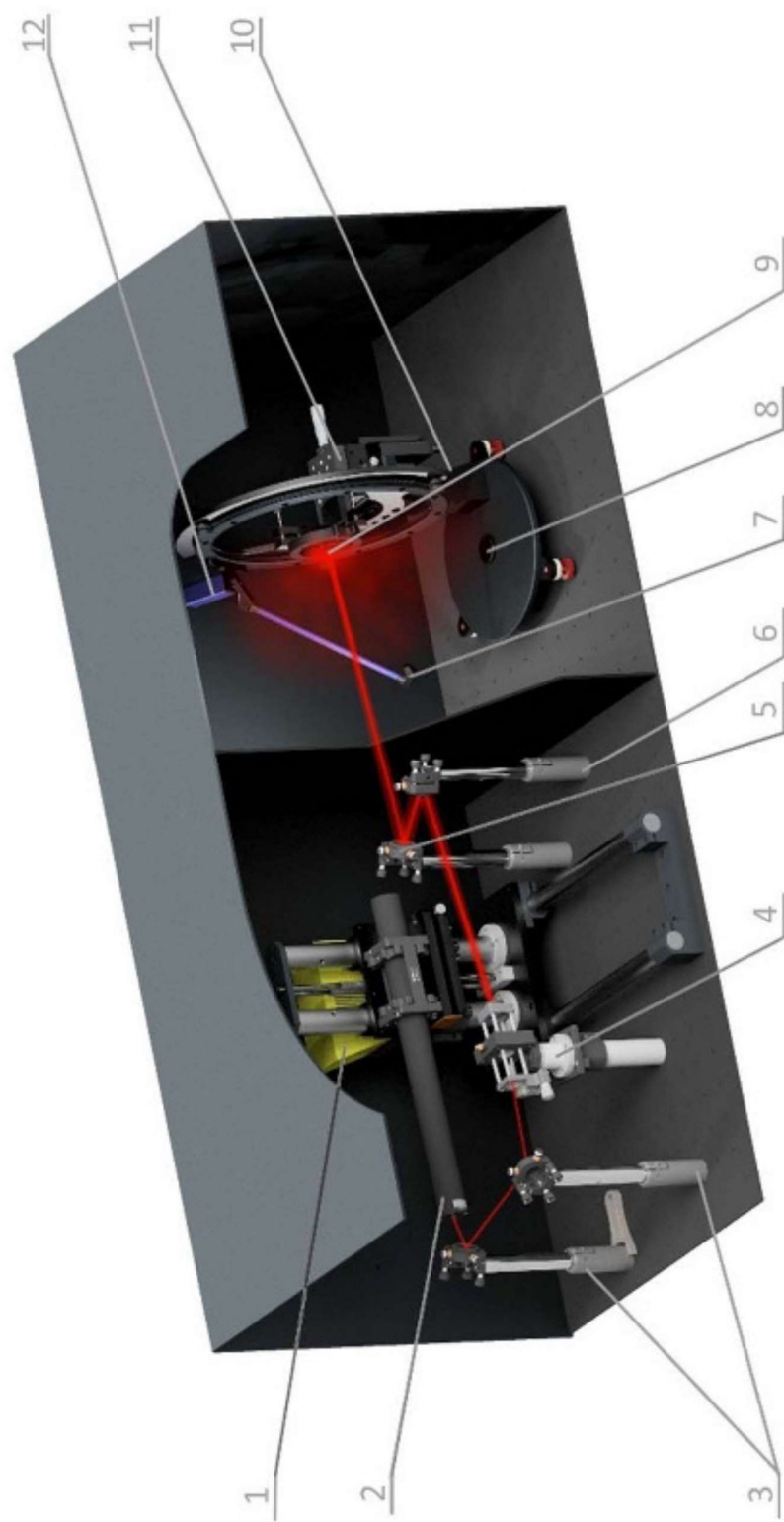


Obrázek 4.2: Schéma skaterometru SMII: 1 He-Ne laser, 2 justovací zrcadla současně zajišťující kompaktnost přístroje, 3 apertura eliminující parazitní světlo kolem laserového svazku, 4 šedý filtr (atenuátor svazku), 5 mikroskopový objektiv, 6 módová clonka, 7 sférické zrcadlo fokusující laserový svazek do bodu F v případě, kdy vzorek není přítomen, 8 vybrané možné pozice detektoru (fotodiody), 9 měřený vzorek (převzato z [5])

4.2. Úprava goniometru a elektroniky

U goniometru byla upravena celá nosná konstrukce, použit silnější elektromotor a přidáno aktivní chlazení. Dále byl upraven držák vzorků, tak aby bylo možné vzorek lépe polohovat ve všech osách a justovat natočení kolem dvou os kolmých na dopadající laserový svazek. Dále byla sestaven nový mikrokontroler k ovládání goniometru a detektoru.

Podrobný popis úprav a jejich fotodokumentace je v dizertační práci v kapitole 5. Počítačem vytvořené zobrazení SMII po úpravách je na obrázku 4.3



Obrázek 4.3: počítačem vytvořené zobrazení SMII: 1 napájecí zdroj, 2 He-Ne laser, 3 justovací zrcadla, 4 prostorový filtr, 5 fokusační zrcadlo, 6 justovací zrcadlo, 7 detektor, 8 otočná podstava goniometru, 9 vzorek, 10 motor pro azimutální rotaci, 11 nastavitelný držák vzorku, 12 motor pro elevační rotaci (převzato z [30])

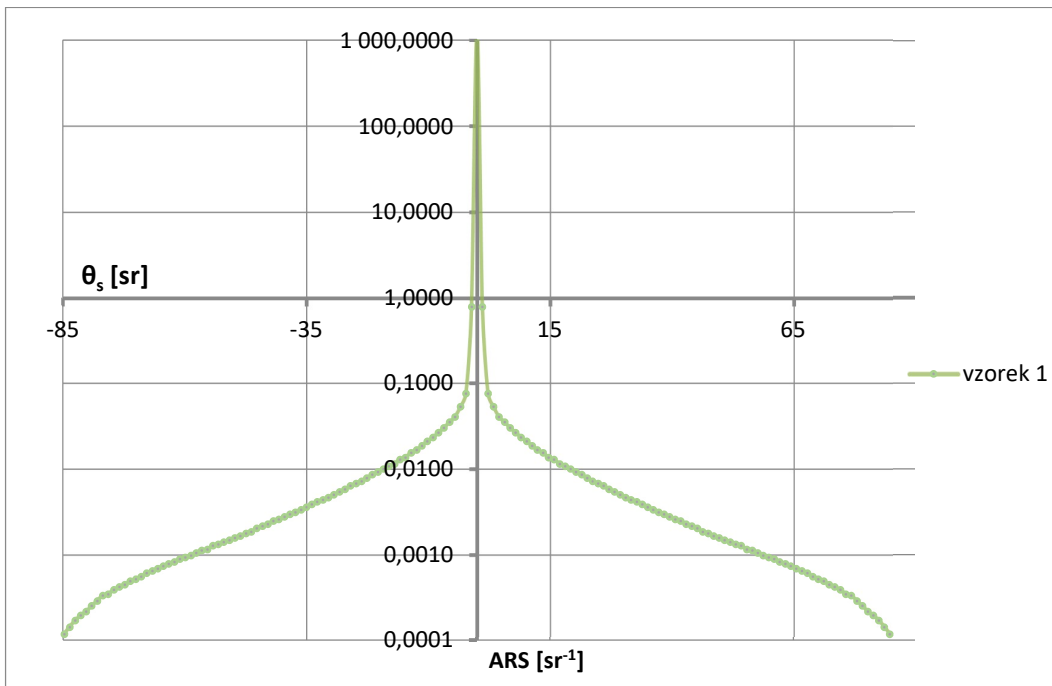
4.3. Demonstrace výsledků dosažených pomocí SMII

Jako demonstrační příklad uvedeme konkrétní měření 3 vzorků křemíkových desek připravených anodickou oxidací při konstantním přiloženém napětí a následným odstraněním na povrchu vzorků vzniklé tenké oxidové vrstvy ve směsi vody a kyseliny fluorovodíkové. Volbou různých napětí použitých při anodické oxidaci při přípravě vzorků bylo dosaženo náhodně drsných isotropních relativně homogenních povrchů s různými statistickými parametry. Vzorky byly připraveny v Českém metrologickém institutu, Oddělení primární metrologie a technické délky.

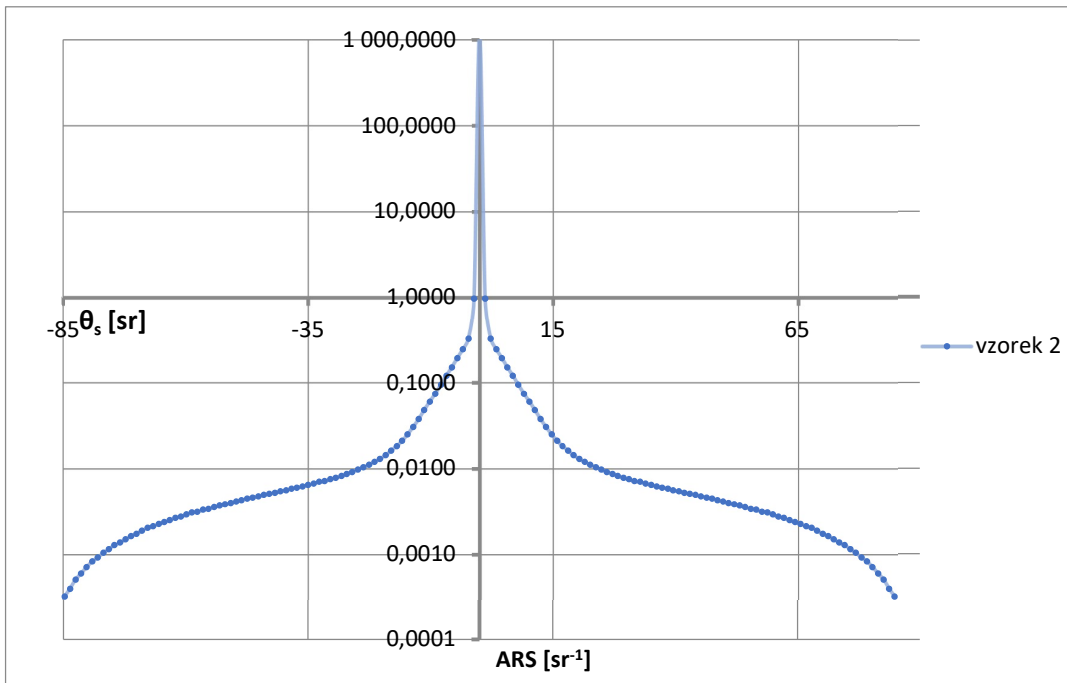
Samotné měření *ARS* popsaných vzorků probíhalo následovně:

- Skaterometr byl nejdříve pečlivě zjustován.
- Poté byl výkon laserového svazku zeslaben vhodným šedým filtrem tak, aby fotodioda pokryla potřebný dynamický rozsah velikosti *ARS*.
- Následně bylo měřeno pozadí bez vzorku (instrument signature) k opravě experimentálních dat.
- Dalším krokem bylo proměření difúzně rozptylujícího etalonu Spectralon® Diffuse Reflectance Standards firmy Labsphere, u něhož známe závislost absolutních hodnot rozptýleného světelného výkonu na úhlu rozptylu θ_s (laskavě poskytl Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Jena). V důsledku dostatečné stability SMII není nezbytné toto měření provádět pro každý vzorek z proměřované série.
- Následovalo vlastní měření $ARS(\theta_s)$ vzorku s krokem 1° . Měření se provedlo postupně ve 12 azimutálních úhlech $\phi_s = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$. Celý měřicí cyklus se opakoval 5x, tj. každá hodnota $ARS(\theta_s)$ v příslušných úhlech θ_s, ϕ_s byla změřena 5x. Souhlas hodnot odpovídajících hodnot $ARS(\theta_s)$ potvrdil předpoklad, že studované vzorky rozptylovaly isotropně.
- Výsledná hodnota $ARS(\theta_s)$ odpovídající dané hodnotě θ_s byla vypočtena z 5x12 hodnot (12 úhlů ϕ a 5 opakování)

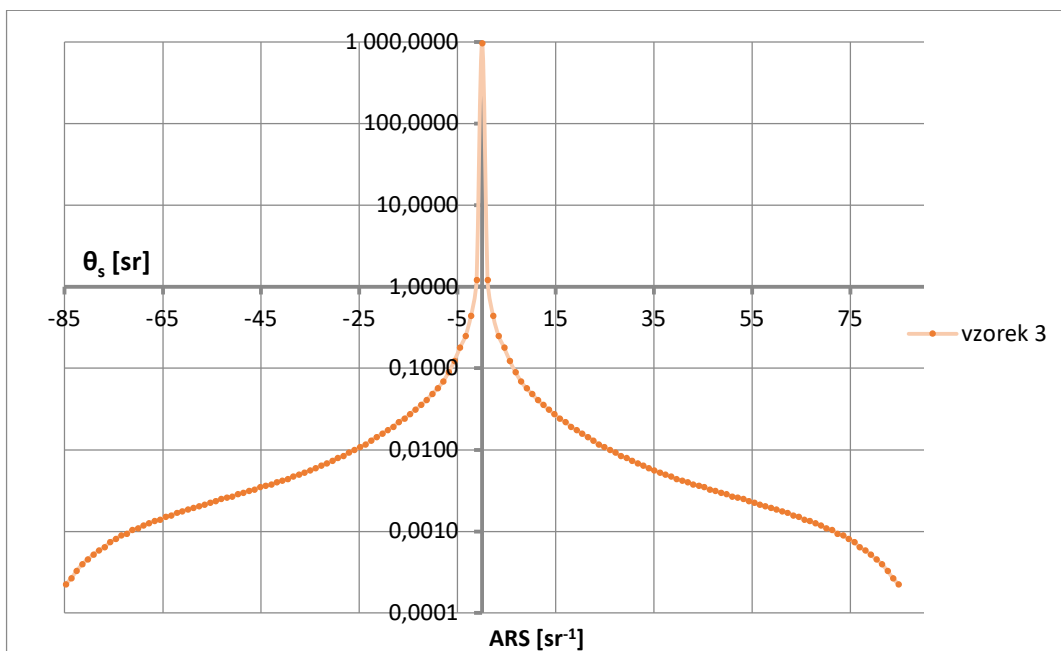
Takto získané závislosti $ARS(\theta_s)$ [sr^{-1}] jsou vyneseny v obr 4.1 – 4.3



Obrázek 4.1: vzorek 1, závislost ARS na úhlu θ_s v rovině $\phi_s = 0$



Obrázek 4.2: vzorek 2, závislost ARS na úhlu θ_s v rovině $\phi_s = 0$



Obrázek 4.3: vzorek 3, závislost ARS na úhlu θ_s v rovině $\phi_s = 0$

Z uvedených závislostí $ARS(\theta_s)$ byly pomocí vztahů (2.4) a (2.16) určeny příslušné PSD jednotlivých vzorků a podle vztahu (2.19) potom rms drsnost σ .

Studované vzorky byly rovněž proměřeny pomocí mikroskopu atomové síly (AFM) Dimension Icon firmy Bruker. Toto měření byl provedeno za účelem kontroly správnosti výsledků získaných pomocí SMII. Byly použity sondy RTESPA v tapping módu. Topografie (výšky) povrchu vzorků byly proměřeny v oblasti $50 \times 50 \mu\text{m}$ s rozlišením 1024×1024 bodů. Měření i jeho vyhodnocení byly provedeny v Českém metrologickém institutu, Oddělení primární nanometrologie a technické dílny. Zde byly z odpovídajících experimentálních dat rovněž určeny PSD jednotlivých vzorků a následně hodnoty rms drsnosti jednotlivých vzorků.

Srovnání σ získaných pomocí SMII a z AFM měření je uvedeno v tab. 1.

Tabulka 5.1: Srovnání hodnot rms drsnosti σ získaných pomocí SMII a z AFM měření

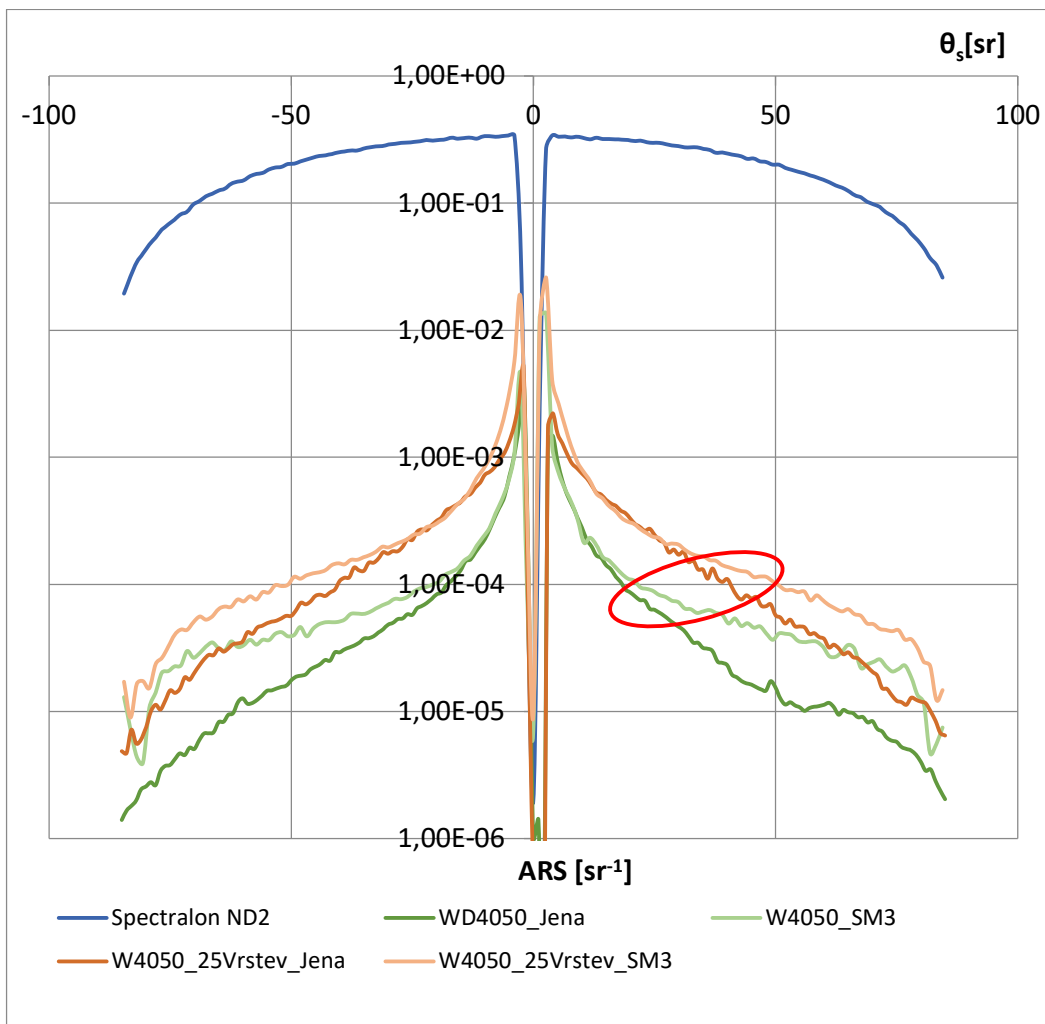
Vzorek	σ_{ARS} (nm)	σ_{AFM} (nm)
1	10,7	10,8
2	14,6	14,2
3	15,8	16,8

Lze konstatovat dobrý souhlas mezi výslednými hodnotami rms drsnosti získanými pomocí SMII a AFM.

5. ÚPRAVA PRO MĚŘENÍ ARS TENKÝCH VRSTEV

Skaterometr SMII po našich úpravách měří ARS spolehlivě. Výsledky uvedené v závěru předchozí kapitoly ukazují že jeho dynamický rozsah je nedostatečný pro měření drsných povrchů s velikostí rms drsnosti řádu $10^0 - 10^{-1}$ nm (např. povrchy rozhraní tenkých vrstev). Povrchy těchto vrstev rozptylují o 1 až 3 řády méně než povrchy vzorků, které jsou měřeny na obrázcích 5.11 až 5.13. U hodnot ARS 10^{-4} a menších se začíná projevovat nedostatečná citlivost přístroje. Na obrázku 5.1 je analyzováno chování přístroje při měření multivrstevného systému 25 tenkých vrstev naneseného na podložce z optického skla N-BK7. Tento vzorek byl zároveň pro porovnání změřen na Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering v Jeně na přístroji Albatros TT.

Je vidět že kolem hodnoty ARS 10^{-4} se výsledky z přístroje Albtaros TT a SMII začínají rozcházet. Také jde vidět trend že čím do menších hodnot ARS se v měření dostáváme tím k větší neshodě dochází. Přístroj SMII vyčítá větší hodnotu, než by měl a vykazuje tendenci větší relativní chyby v závislosti na snižujících se hodnotách ARS i na snižujících se hodnotách elektromagnetického záření dopadajícího na detektor.



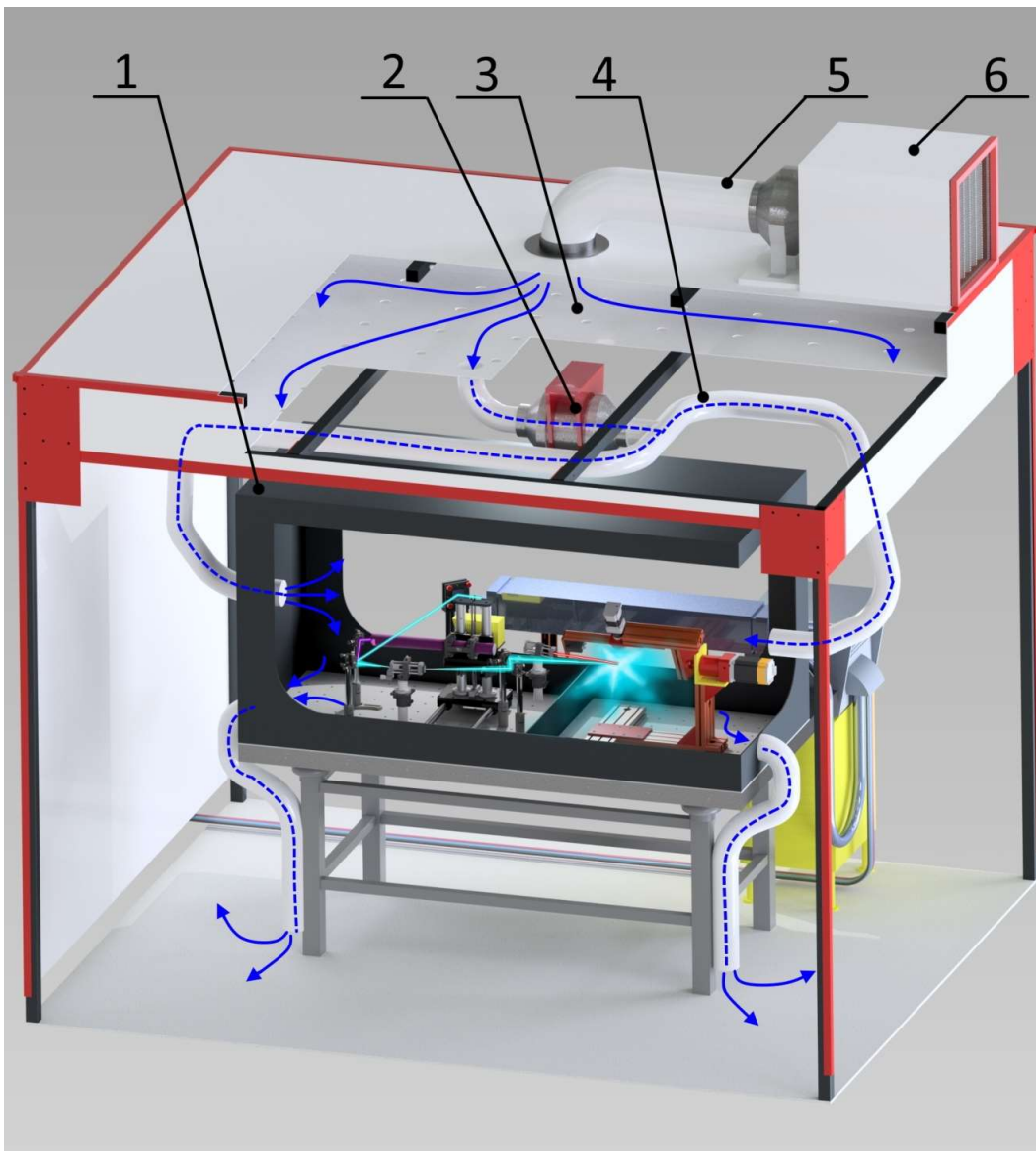
Obrázek 5.1: Srovnávací měření SMII s přístrojem Albatros TT multivrstevného systému na podložce N-BK7. Závislost ARS na úhlu θ_s v rovině $\phi_s = 0$

5.1. Možné příčiny nepřesností

Po delší rozvaze byly identifikovány následující potenciální příčiny:

- Prašnost ve vzduchu
- rozptyl na optických komponentech
- nedostatečná citlivost detektoru
- šum v elektronice používané pro vyčítání detektoru

Prašnost vzduchu je vlastnost prostředí a je možné ji vyřešit nezávisle na přístroji jako takovém. Kompletní postup řešení je popsán v dizertační práci v kapitole 6.2, realizované řešení je znázorněno na obrázku 5.2. Zbylé tři příčiny jsou už vlastnost přístroje a pro odstranění jejich vlivu na výsledky měření je potřeba nového přístroje, který bude navrhován přímo za účelem měření rozptylu z povrchů tenkých vrstev a tím s dostatečnou citlivostí, přesností i dynamickým rozsahem.



Obrázek 5.2: Počítačem vytvořené zobrazení bezprašné buňky kolem celého přístroje: 1 box s přístrojem, 2 ventilátor vhánějící čistý vzduch do boxu přístroje, 3 dvojitý strop buňky s otvory pro proudění vzduchu, 4 přívod čistého vzduchu do SMIII, 5 hlavní ventilátor a přívod čistého vzduchu do celé buňky, 6 hepafiltry, modré šipky znázorňují proudění vzduchu buňkou a přístrojem (čárkovaná znázorňuje proudění v potrubí)

6. NÁVRH NOVÉHO PŘÍSTROJE SM III

Pro zajištění měření pouze rozptýleného světla z měřených povrchů je třeba odstínit veškeré jiné elektromagnetické záření, které by mohlo na detektor dopadat. Jedná se nejen o okolní osvětlení laboratoře, ale i násobné odrazy které mohou vznikat od optických komponent nebo i konstrukčních prvků přístroje. Je tedy nutné, aby přístroj byl uložen ve stíněném boxu a zároveň, aby tento box byl rozdělen na dvě komory. Jedna, kde bude docházet k úpravě laserového svazku, druhá kde bude uložen vzorek a kde zároveň bude probíhat jeho měření.

6.1. Základní postup návrhu přístroje:

1. Výběr detektoru s dostatečnou citlivostí.
2. Návrh optické sestavy pro přípravu laserového svazku.
3. Konstrukční návrh celého přístroje.
4. Sestavení SM III v Laboratoři koherenční optiky ÚFI.
5. Prověření funkčnosti SM III pomocí etalonů (Spektralon) a známých vzorků (tj. proměřených jinými spolehlivými technikami kompatibilními s měřením ASR).
6. Stanovení nepřesností měření pomocí SM III.

Jako hlavní zdroj elektromagnetického záření je vhodný laser s vysokým výkonem a v ideálním případě schopný vyzařovat i více vlnových délek, avšak každou jednotlivě. Důležité je, aby zdroj vyzařoval polarizované elektromagnetické záření. Tyto základní požadavky splňuje laser, který je současné době ve vybavení laboratoře koherentní optiky na ÚFI FSI VUT.

Jako zdroj tedy bude použit laser Coherent INNOVA 70C. Následující tabulka Tabulka 6.1 poskytuje přehled vlnových délek a příslušných výkonů.

7. DETEKTOR

Při výběru vhodného detekčního prvku pro přístroj mohou být vhodné dva základní typy detektorů: lavinové diody (APD) a fotonásobiče (PMT).

Pro přístroj byl zvolen detektor od výrobce Thorlabs s označením APD410A2/M (obrázek 7.1). Je teplotně kompenzovaný a kombinuje vysokou citlivost lavinové fotodiody se speciálně navrženým

ultra-nízkošumovým tranzistorovým zesilovačem. Rychlost detekce optických signálů je až do frekvence 10 MHz. Hranice poškození příliš velkou intenzitou světla je 1 mW, pro plánované využití víc než dostačující. Spektrální rozsah detektoru 200 - 1000 nm je ideální i pro potenciální rozšíření přístroje v oblasti UV vlnových délek.



Obrázek 7.1: Detektor s lavinovou diodou [6]

Konstrukce přístroje scatterometr SM3 lze rozdělit na dvě hlavní části.

1. Komora pro přípravu a přesné vydefinování laserového svazku.
2. Komora s detektorem pro měření rozptylu povrchu vzorků.

Při přípravě laserového svazku je potřeba použít různých optických komponent. Každý z těchto optických prvků vytváří rozptyl světla na svém povrchu a u transmisních prvků i ve svém objemu. Tenké vrstvy, na jejichž měření je přístroj navrhován, se často používají v optickém průmyslu, a jejich kvalita a rozptyl na površích tedy odpovídá optickým komponentům. Rozptyl na optických komponentech přístroje může snížit přesnost, případně až zcela zastínit měření vzorku. Tyto dvě komory by měli být odděleny a umožňovat průchod pouze vydefinovaného připraveného laserového svazku směřovaného na povrch vzorku a odstínit všechno parazitně vzniklé rozptýlené světlo.

8. KOMORA PRO PŘÍPRAVU LASEROVÉHO SVAZKU

Cílem je připravit konvergentní laserový svazek s ohniskem ležícím na sférické ploše, po které obíhá detektor. Střed sférické plochy je místem, kde je uložen vzorek. Laserový svazek má mít gausovské

rozložení intenzity v průřezu. Povrchy tenkých vrstev mají velmi nízkou drsnost. S tím souvisí i velmi nízký výkon, který je těmito povrchy rozptýlen. Při návrhu optické sestavy pro přípravu laserového svazku je důležité, aby samotné optické prvky co nejméně snižovaly výkon laserového svazku při jeho úpravě, tedy aby co největší výkon dopadal na vzorek. Jakákoliv ztráta výkonu laserového svazku bude zároveň úbytkem v rozptýleném výkonu. Snadno se může stát že při snížení výkonu laserového svazku vyšším počtem optických komponent (žádný optický prvek nemá 100% účinnost a při své interakci s laserovým svazkem sníží výkon laserového svazku) bude rozptýlený výkon tak malý, že již nebude měřitelný. Neoptimálnější řešení je takové, které obsahuje co nejmenší počet optických prvků (případně ploch, které interagují s laserovým svazkem).

Metodika postupu konstrukčního řešení:

1. Volba druhu optických prvků, transmisní nebo reflektivní způsob.
2. Geometrické trasování a rozložení optických prvků.
3. Konstrukční uložení.

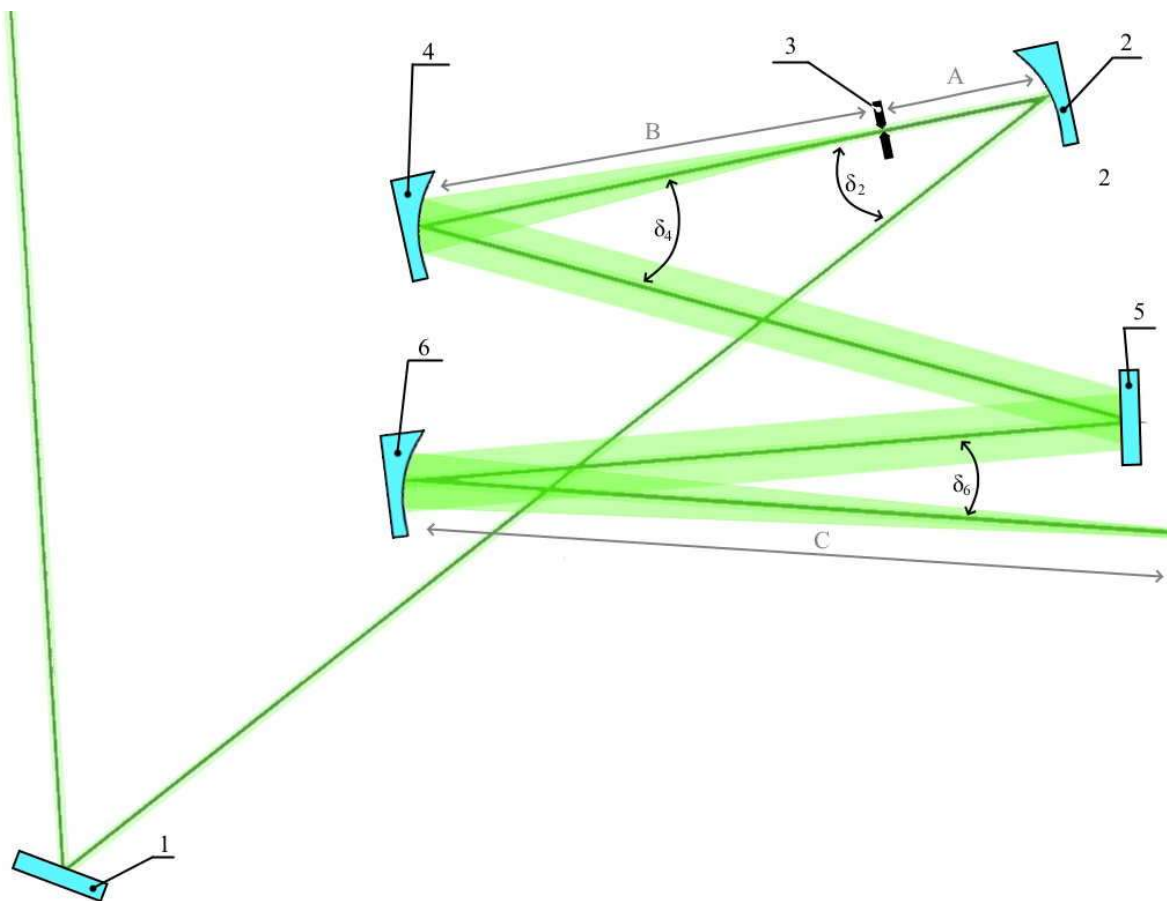
Kompletní postup s diskusí jednotlivých možností je popsán v dizertační práci v kapitole 9.

Jako optické komponenty byly vybrány zrcadla od výrobce Edmund Optics která jsou detailněji popsány v Tabulka 8.1.

Tabulka 8.1: Popis zrcadel

pozice	Typ zrcadla	úhel	Ohnisková vzdálenost [mm]	Průměr [mm]
1 a 5	Rovinné	-	-	25,4
2	Mimoosé parabolické	30°	54.4	25,4
4	Mimoosé parabolické	15°	387.6	25,4
6	Mimoosé parabolické	15°	646	25,4

Následné navržené uspořádání optických komponent je schématicky znázorněno na obrázku 8.1.

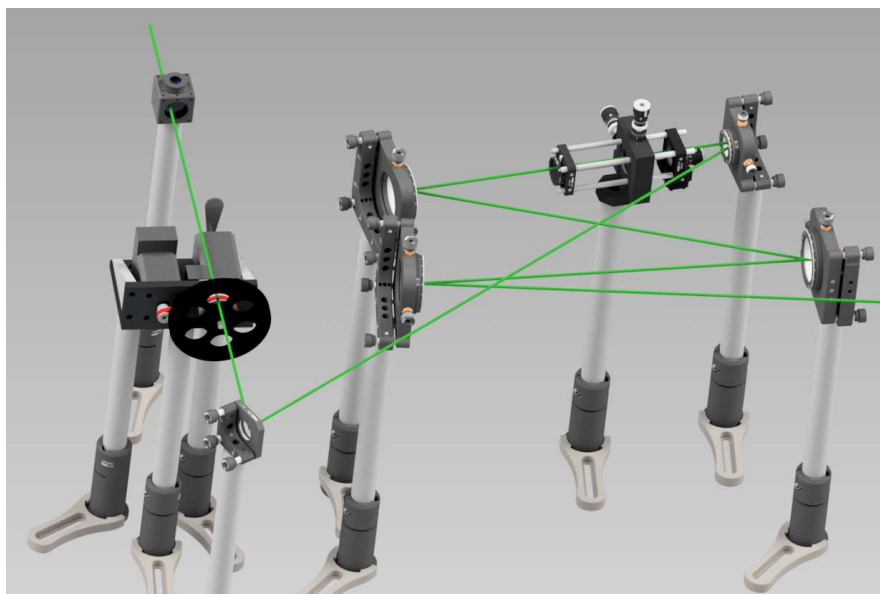


Obrázek 8.1: Schématické uspořádání optických komponent pro přípravu laserového svazku. 1 kolimační zrcadlo, 2 parabolické mimoosé zrcadlo, 3 módová clona, 4 parabolické mimoosé zrcadlo, 5 kolimační zrcadlo, 6 parabolické mimoosé zrcadlo. Úhel δ_2 je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 2 a je roven 15° . Úhel δ_4 je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 4 a je roven 30° . Úhel δ_6 je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 6 a je roven 15° . Vzdálenost A je vzdálenost modové clony od zrcadla a je rovna 54,4 mm. Vzdálenost B je vzdálenost mezi modovou clonou a zrcadlem 4 a je rovna 387,6 mm. Vzdálenost C je vzdálenost mezi zrcadlem 6 a povrchem sféry po které se pohybuje detektor a je rovna 646 mm.

Poměr vzdáleností A a B udává průměr laserového svazku dopadajícího na zrcadlo 6. Poměr ohniskové vzdálenosti zrcadla 6 a průměru sféry, po které se pohybuje detektor, pak udává o kolik se zmenší tento průměr v rovině dopadu na vzorek.

Využitý laser Innova spectum 70C má podle katalogu výrobce v 1/e průměr laserového svazku 1,5 mm. Po propočtu poměrů vzdáleností vyjde v 1/e průměr osvětlené plochy na vzorku 2,7 mm. To je

plocha splňující všechny předem stanovené požadavky. Návrh konstrukčního uložení optiky je znázorněno na obrázku 8.2.



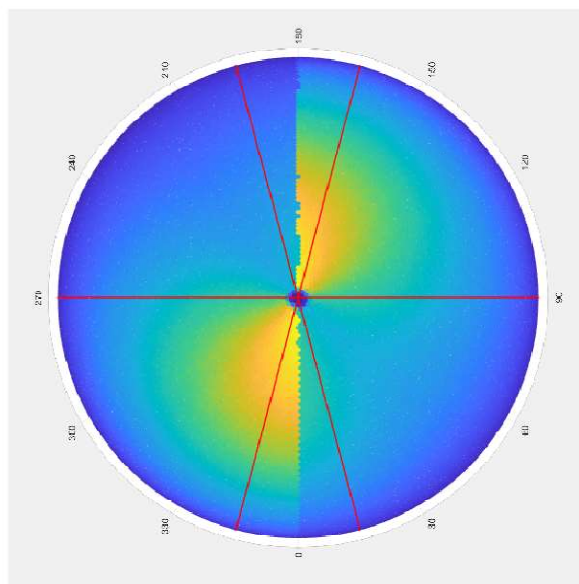
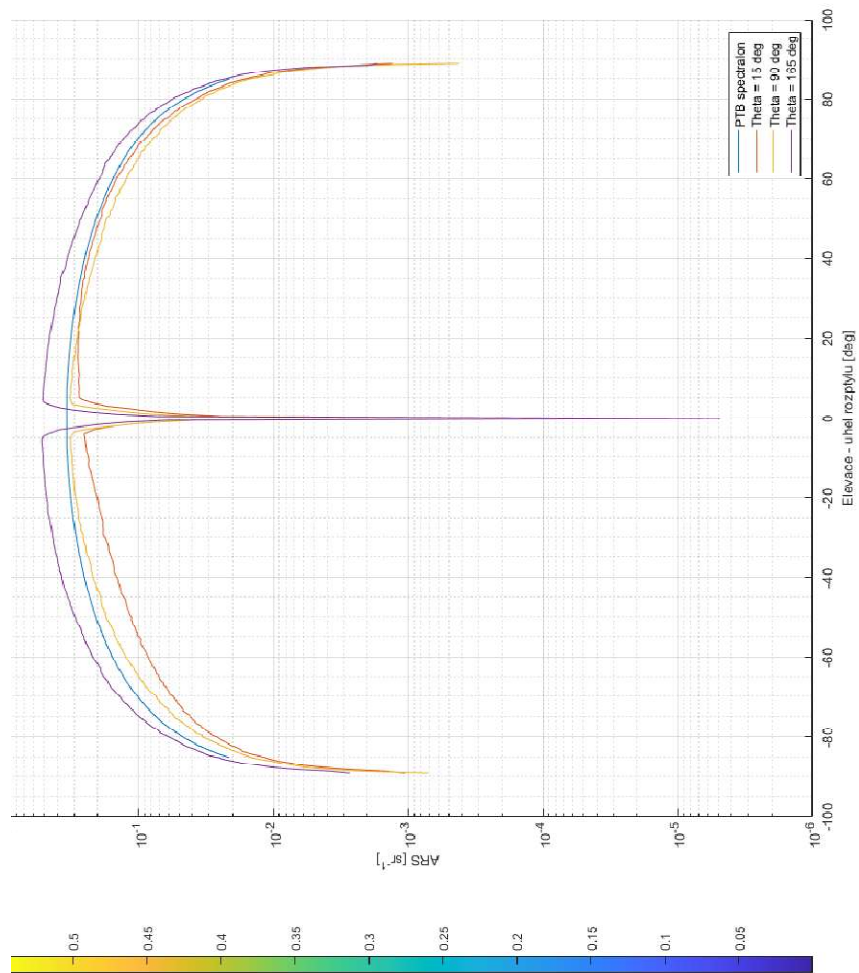
Obrázek 8.2: Konstrukční uložení optiky

9. ČASOVÁ STÁLOST PŘÍSTROJE SM III

Pro opakovatelnost měření a možnost prohlásit přístroj za spolehlivě měřící je potřeba, aby po spuštění a první kalibraci byly výsledky měření shodné jak na počátku, tak po několika hodinách. Měření celé hemisféry trvá zhruba 20 hodin. Na obrázku 9.1 je graficky znázorněna intenzita rozptýleného světla na měřené hemisféře. Je patrná ostrá linie, tedy významný rozdíl v intenzitě dvou sousedních směrů rozptylu. Vzhledem typologii povrchu vzorku by rozptyl neměl být závislí na úhlu θ_s .

Zároveň je tato ostrá změna v místě, kdy končilo měření. Tedy je patrný významný rozdíl mezi hodnotami měření na začátku měření a hodnotami naměřenými o zhruba 20 hodin později ke konci měření. V průběhu měření žádný ostrý viditelný rozdíl mezi dvěma sousedními směry θ_s není. Naopak je patrný pozvolný nárůst hodnot v jednotlivých po sobě s časem jsoucích měření ve směrech θ_s .

Výrazná změna je způsobena časovou nestabilitou ve výkonu laseru, případně časovou nestálostí v citlivosti detektoru, případně kombinací těchto dvou aspektů. Při testování byly odhaleny příčiny, které jsou popsány v následující kapitole. Přístroj byl postupně upravován tak, aby se všechny příčiny odstranily a získal tak dostatečnou časovou stabilitu i pro časově dlouhé měření.

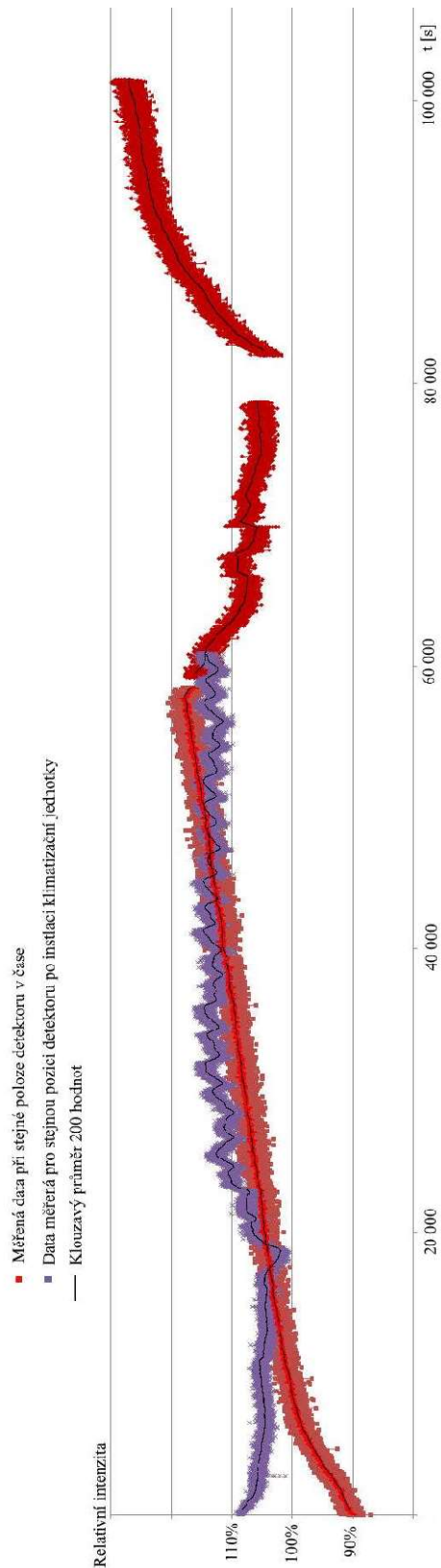


Obrázek 9.1: Měření ARS na hemisféře nad vzorkem Spectralon. V levé části mapa hemisféry s barevnou škálou hodnot ARS. V pravé části jsou řezy v různých úhlech poledníků ϑ_s . Očekávané ARS vzorku Spectralon je izotropní ve směru úhlu ϑ_s .

9.1. Fluktuace ve výkonu laseru

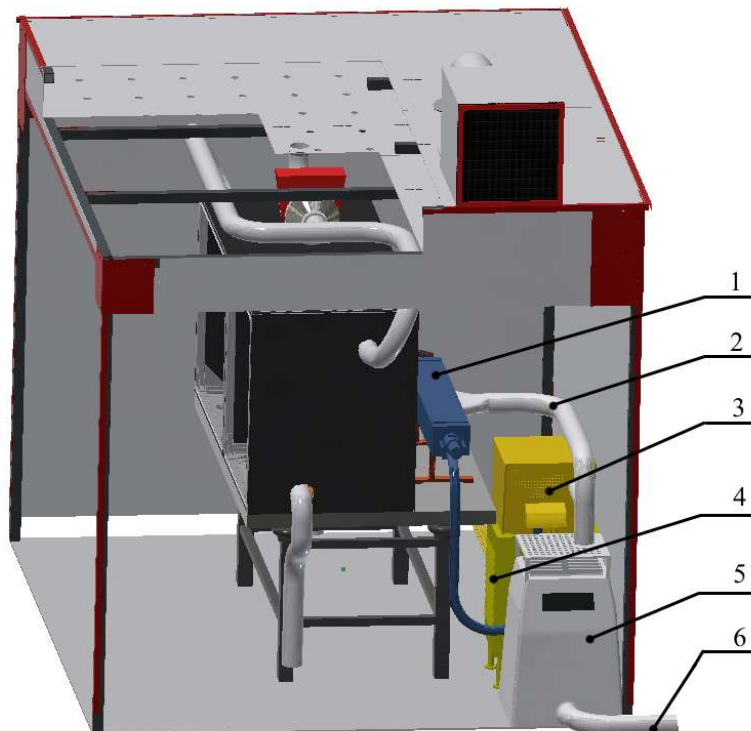
Použitý laser INNOVA je chlazen vodou, požadovaný průtok přívodu vody je 8 ls^{-1} . Průtok v přívodu byl změřen na 10 ls^{-1} . Přívod chlazení byl napojen na potrubí v budově fakulty. V této části rozvodu vlivem zvýšeného odběru vody, zejména v dopoledních hodinách, docházelo během měření k poklesu tlaku natolik, že některých časových úsecích průtok klesl i na hranici 8 ls^{-1} . Pod touto hranicí bezpečnostní systém laseru laser automaticky vypne. Lehce nad hranicí 8 ls^{-1} laser zůstává v provozu, chladicí schopnosti jsou ale sníženy. S tím se laser zahřívá a dochází k fluktuacím výkonu. Problém byl odstraněn přepojením na dostatečně stabilní část rozvodu a přebudováním potrubí k laseru tak, aby mělo co nejmenší tlakové ztráty.

Další fluktuace výkonu byly způsobeny zdrojem. Součástí laseru INNOVA je i velká řídicí jednotka a transformátor vysokého napětí. Řídicí jednotka měla své vlastní chlazení, pouze vzduchem. Celá tato sestava generuje tolik tepla, že po pár hodinách provozu zvedla teplotu v bezprašné buňce i celé laboratoři o několik stupňů. V prostředí se zvýšenou teplotou nebylo chlazení vzduchem dostačující. Zahřátí řídicí jednotky se projevilo na změně výkonu laseru, znázorněno na grafu na obrázku 9.2.



Obrázek 9.2: Měření změny výkonu laseru v závislosti na čase. Měření probíhalo ve stejném prostorovém úhlu při rozptylu ze spectralonu. Červená znázorňuje měření před instalací vzduchové chladicí jednotky. Fialová znázorňuje měření po instalaci vzduchové chladicí jednotky s termostatem. Oscilace kolem hodnoty 100% jsou způsobené vypínáním a zapínáním chlazení. Výpadek době kolem 8 000 sekund byl způsoben vypnutím laseru z důvodu snížení průtoku ve vodním chlazení.

Nestabilita byla vyřešena přidáním vzduchové chladicí jednotky, která byla připojena na vzduchové chlazení řídicí jednotky tak, aby přiváděla vzduch o teplotě 18°C přímo do sání vzduchu. Uložení je znázorněno na obrázku 9.3. Díky tom byla řídicí jednotka chlazena vzduchem o stále teplotě a tedy i pracovala za stejné teploty, nehledě na teplotní výkyvy v laboratoři. Pro zamezení srážení vody na površích chladnějších, než je teplota okolního vzduchu, byla vybrána chladicí jednotka s funkcí vysoušení vzduchu.



Obrázek 9.3: Zobrazení přístroje z boku s detailem na chladicí jednotku. 1 laser, 2 přívod studeného vzduchu k laseru a jeho řídicí jednotce, 3 řídicí jednotka laseru Innova, 4 transformátor vysokého napětí, 5 chladicí jednotka, 6 odvod teplého vzduchu pryč z laboratoře

9.2. Citlivost elektroniky

Použitý detektor od firmy Thorlabs je podle výrobce konstruován tak, aby dokázal sám kompenzovat vliv teploty v rozmezí 18°C – 28°C na jeho měření.

Jedna chladicí jednotka nemůže kompenzovat teplotu řídicí jednotky laseru a zároveň teplotu detektoru uvnitř přístroje. Pokud by termostat byl nastaven na sepínání a vypínání podle teploty u detektoru, zároveň by se vypínalo a zapínalo chlazení zdroje laseru. Na obrázku 11.2 lze vidět, že závislost výkonu laseru na teplotě řídicí jednotky je velmi citlivá. Zároveň klimatizační jednotka

sama o sobě nemá hepa filtr a tedy není zaručena dostatečná čistota studeného vzduchu. Pro připojení hepa filtru nemá ventilátor klimatizační jednotky dostatečný tlak. K detektoru je přivádět vzduch přes sadu hepa filtrů a ventilátorem uloženým na střeše buňky. Tedy přímo k detektoru je přivádět vzduch o teplotě vzduchu v laboratoři. Pokud se teplota laboratoře nesníží pod 18°C nebo nezvýší nad 28°C detektor dokáže tepelné výkyvy sám kompenzovat. Po přidání klimatizační jednotky, která teplo generované laserem a jeho řídicí jednotkou odvádí ven z laboratoře se teplota v laboratoři stabilně drží okolo 22°C s odchylkou kolem 1°C. Při případné instalaci přístroje v nové místnosti je však doporučeno ověřit teplotní stabilitu prostředí.

9.3. Druhý kanál

Laser Innova 70C, který je použit jako zdroj, je kontinuální argon kryptonový laser. Jeho hlavní kvality jsou v širším spektru vlnových délek a dostatečném výkonu pro potřeby měření rozptylu na površích tenkých vrstev. Výrobce u laseru garantuje stabilitu výkonu na 30minutového intervalu, kdy by se výkon neměl změnit o více než:

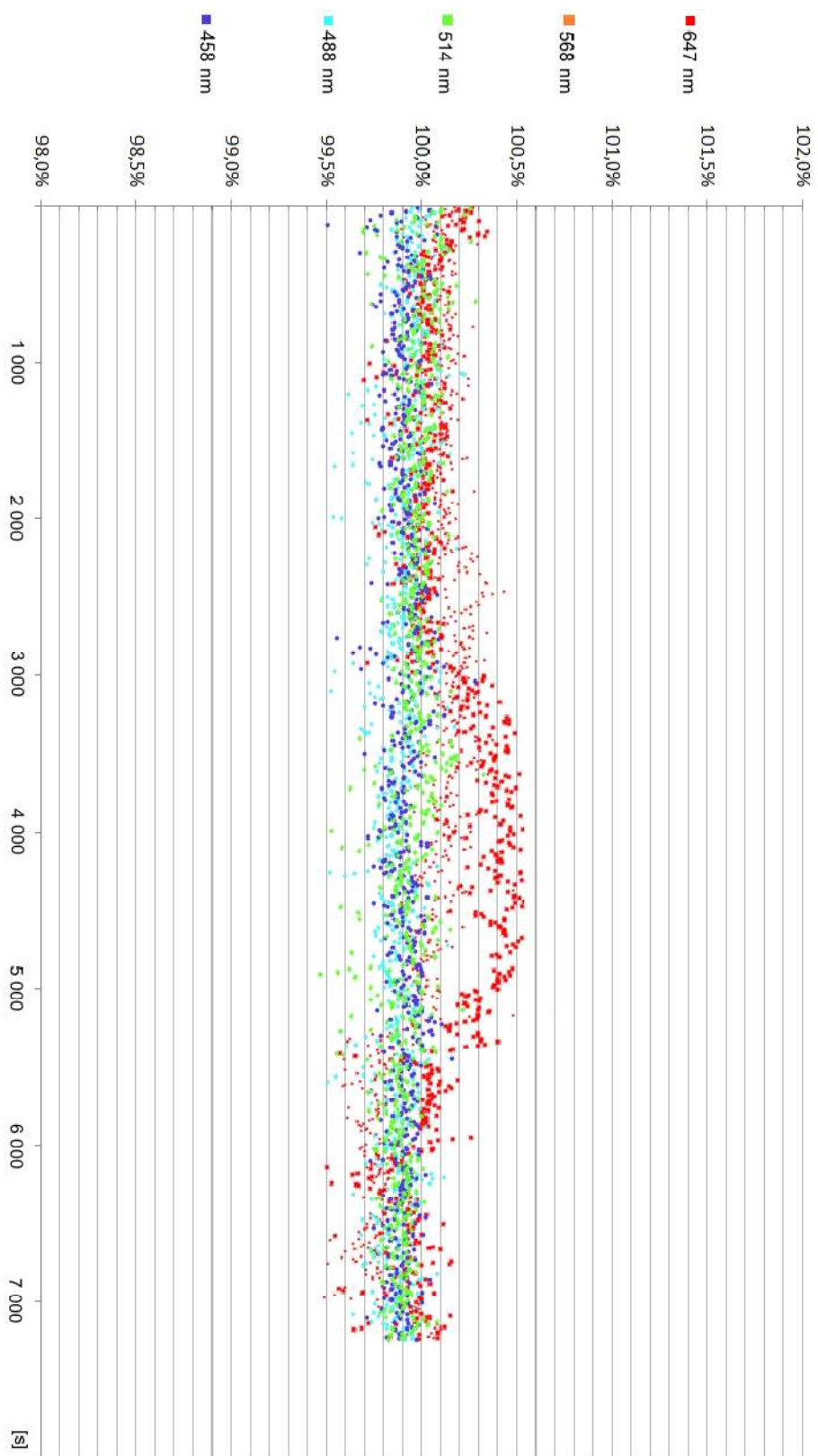
- 0,5 % pokud je laser v módu regulace světelného výkonu
- 3 % pokud je laser v módu maximálního výkonu.

O změně výkonu na delších časových intervalech neuvádí žádné informace.

Měření na celé hemisféře bude určitě přesahovat časový interval 30 minut. Je potřeba tedy konstrukčně aplikovat řešení pro měření výkonu laseru, které bude opravovat naměřené hodnoty v daném čase o relativní změnu ve výkonu laseru. Do komory pro přípravu laserového svazku bude vložen druhý měřicí kanál, který bude sloužit jako referenční pro výkon laseru. Podrobný popis je uveden v dizertační práci v kapitole 11.3

9.4. Zhodnocení časové stability

Po aplikaci konstrukčních řešení z bodů 11.2 a 11.3 se snížil efekt výkyvu výkonu laseru v čase během měření na méně než 0,5 % jak lze vidět na grafu na obrázku 9.5 kde je měřena hodnota z detektoru v druhém kanále, tedy hodnota \overline{HD}_S po dobu 7 200 sekund (dvojnásobná doba nejdelšího měření).



Obrázek 9.5: Relativní změna intenzity laserového svazku v čas

9.5. Kalibrační měření

Data ARS (úhlově rozlyšený rozptyl) vycházejí z poměru rozptýleného výkonu vůči výkonu dopadajícímu na vzorek. Aby bylo měření opakovatelné, musíme zajistit pokaždé stejné podmínky. To u dopadajícího výkonu dostatečně zajistit nelze. Proto je před prvním měřením vzorku po spuštění přístroje rutinou měření etalonu zvaného Spectralon (znázorněn na obrázku 9.6)



Obrázek 9.6: Etalon používaný pro kalibraci přístroje před měřením [7]

Spectralon je difúzní odrazivý standart s odrazivostí $> 99\%$ v spektrální oblasti 250-2500 nm a charakteristikou vysoce difúzního povrchu, která se blíží lambertovskému rozptylujícímu povrchu [94]. Přesné hodnoty ARS tohoto etalonu byly změřeny na certifikované metrologické laboratoři.

Hodnoty ARS získané měřením Spectralonu pomocí SM3 se porovnají s hodnotami naměřenými certifikovanou laboratoří. Z tohoto porovnání je dopočítán koeficient K_{cal} tak aby si naměřená data co nejvíce odpovídala.

$$ARS_{PTB}(\theta_i = 0, \theta_s) = K_{cal} ARS_{spectralon}(\theta_i = 0, \theta_s) \quad (13.1)$$

Každé následující měření je pak násobeno tímto koeficientem K_{cal} . Tím je dosaženo konzistence v opakovaných měřeních.

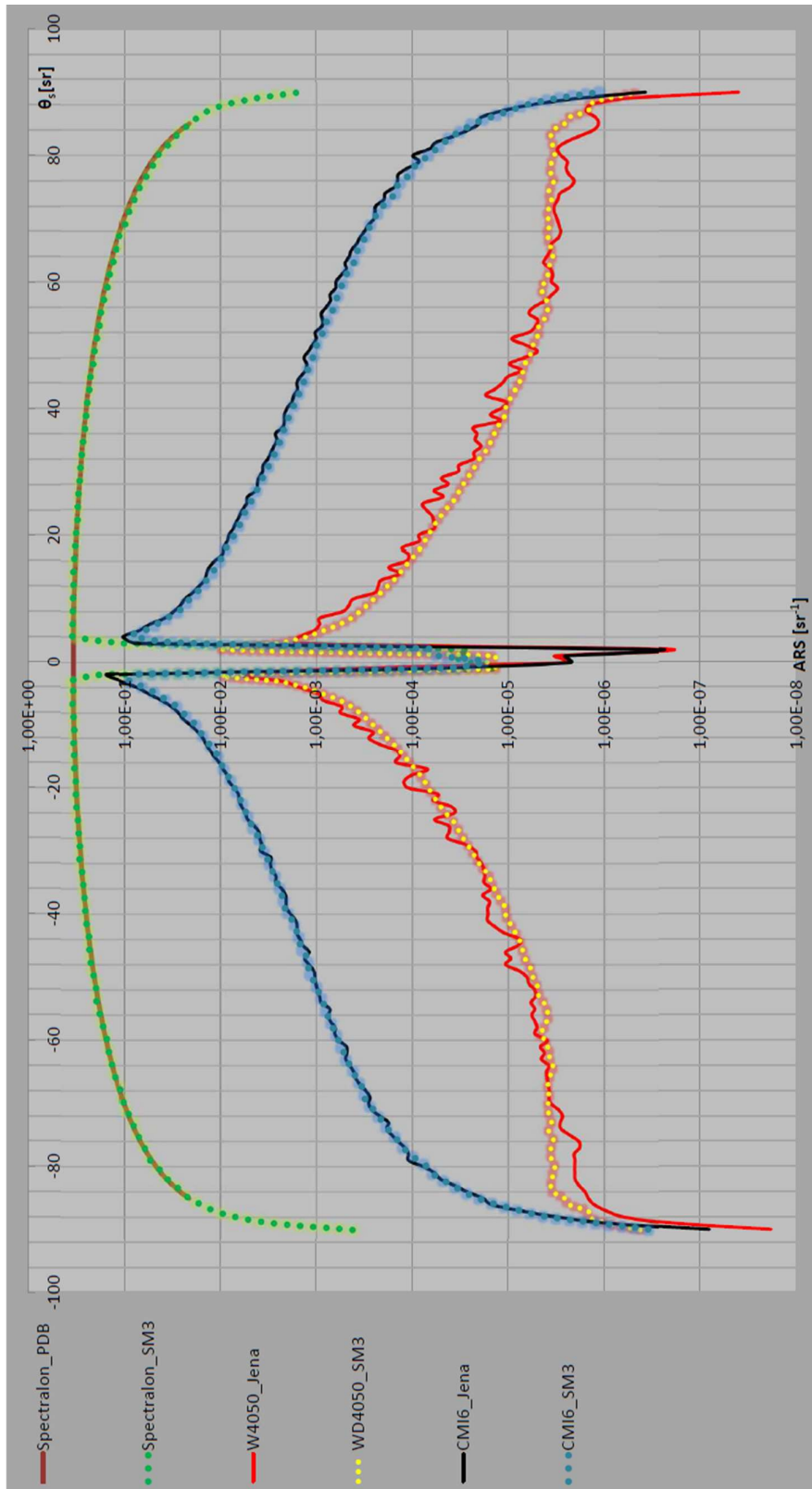
10. VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘÍSTROJE

10.1. Porovnávací měření

Následně po sestavení celého přístroje a jeho kalibraci bylo provedeno porovnávací měření. Jako porovnávací vzorky pro měření sloužily tři následující vzorky shrnuté v tabulce

Označení	Typ
Spectralon	Etalon
ČMI 6	Leptaný křemík
WD4050	Multivrstevný systém

Výsledky porovnávacích měření jsou shrnuty na následujícím grafu na obrázku 10.1.



Obrázek 10.1: Srovnání naměřených dat na SM3 a v Jeně

Zároveň bylo provedeno měření pozadí a šumu v přístroji. Měření bylo provedeno způsobem, že byl nejdříve změřen spectralon s největší možným nastavením GAIN na detektoru (nastavení detektoru, které udává k jak velkému zesílení signálu dojde) a následně proběhlo měření poledníku bez uloženého vzorku a se zacloněným laserovým svazkem. Měření nebo pořízení snímku při zacloněném zdroji se běžně v praxi používá pro určení šumu nejen u kamer, ale také u přístrojů. Výsledný snímek nebo měření se nazývá Dark frame.

Ideální měření tzv. instrument signature by proběhlo bez zacloněného laserového svazku. Nicméně v této konfiguraci by stejně nebyl změřen instrument signature. Laserový svazek by dopadal na rameno goniometru a od něj se rozptyloval. Byl by tak měřen rozptyl ramena goniometru nikoliv instrument signature.

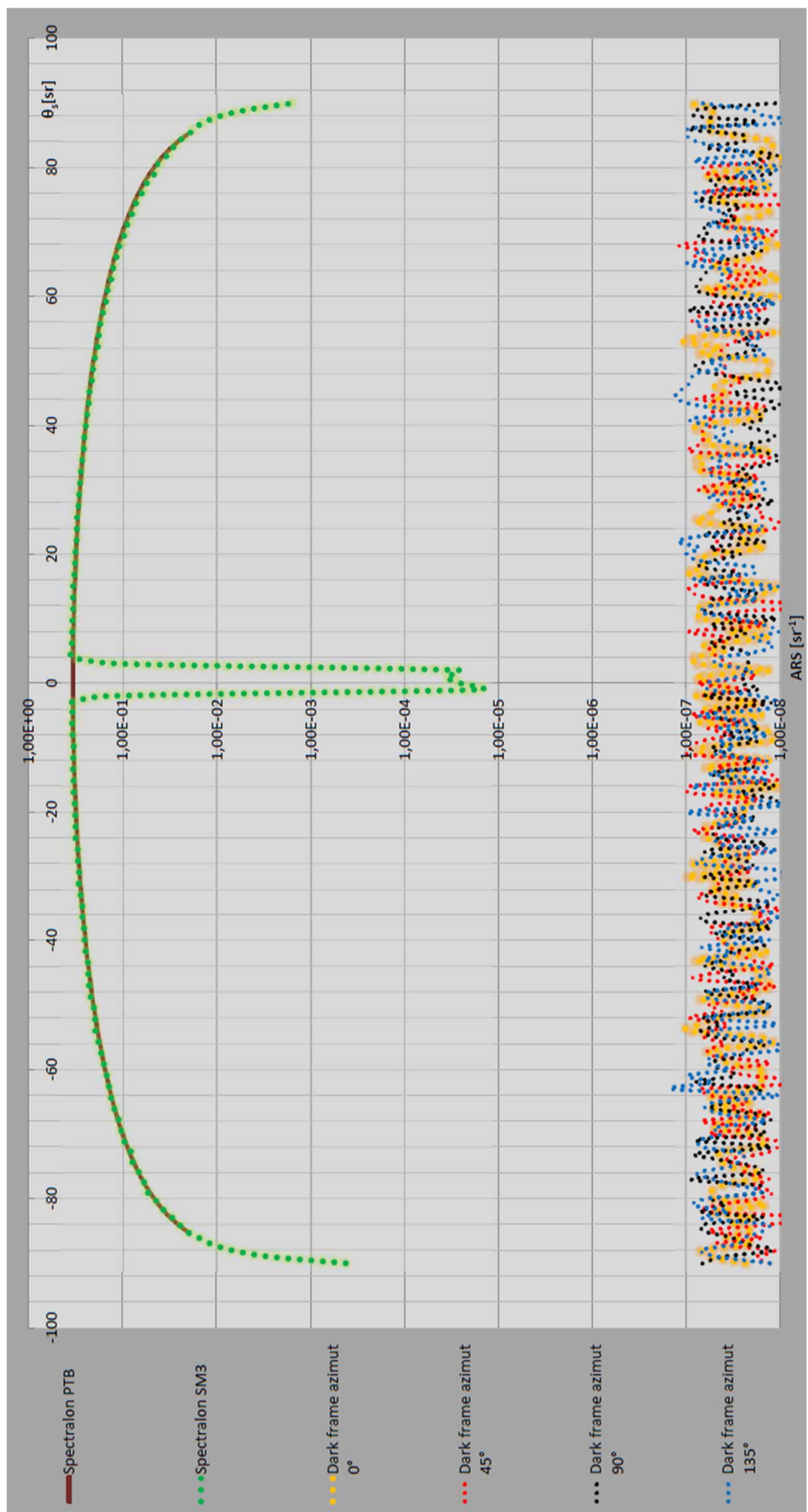
Řešením by bylo před rameno goniometru uložit beam dumper který by efektivně pohltil dopadající laserový svazek. V konstrukci goniometru není prostor pro takové uložení beam dumperu. Jedinou variantou by bylo vyfrézovat otvor v rameni goniometru, beam dumper uložit do vzniklého otvoru a následně rameno vyztužit, aby nepřišlo o potřebnou tuhost a pevnost. Tak velký zásah do konstrukce přístroje by byl realizován pouze pokud by bylo nezbytné instrument signature precizně změřit.

Taková potřeba by mohla vzniknout, pokud by v porovnání dat vznikaly nějaké nesrovnalosti nebo pokud by v měření rozptylu vzorků docházelo k měření hodnot blízkých hodnot šumu.

Pokud do budoucna vznikne potřeba takového měření konstrukce bude upravena. Do té doby postačuje změření šumu, které ukazuje že šum v detektoru a elektronice je minimálně o řád níže, než data, která jsou měřena jako rozptyl na povrchu tenkých vrstev.

Na následujícím grafu na obrázku 10.2 je vykreslen výsledek právě takového měření. Zelenou barvou je označeno kalibrační měření spectralonu a srovnáno s tmavě červenou ideální křivkou spectralonu. Ostatní barvy označují měření dark frame u různých poledníků.

Jak je vidět hodnoty šumu se pohybují v rozmezí 10^{-8} až 10^{-7} se střední hodnotou 5×10^{-8} . Tedy hodnoty šumu se pohybují v rozmezí o dva řády níže, než hodnoty rozptylu na tenkých vrstvách pro jejichž měření byl přístroj primárně navržen.



Obrázek 10.2: Graf šumu

11. ZÁVĚR

Hlavním předmětem dizertační práce je studium rozptylu elektromagnetického záření z povrchů s velmi nízkou drsností v řádu nanometrů, speciálně pak tenkých vrstev. Tematicky práce navazuje na předchozí výzkum povrchové drsnosti. V rámci tohoto výzkumu se autor této práce podílel na charakterizaci defektů tenkých vrstev [8], stanovení jejich nehomogenity v tloušťce [9] a také na elipsometrické charakterizaci nehomogenních tenkých vrstev [10]. Z výzkumu vyplynula myšlenka využít a případně rozšířit metodu ARS i na měření drsnosti povrchů tenkých vrstev. Tomu odpovídá i cíl předkládané práce: konstrukce a realizace přístroje, který takové měření umožní.

V první části práce se věnujeme statistickému popisu topografie drsných povrchů. Nejprve jsou stručně popsány parametry sloužící k popisu povrchové drsnosti, a to s ohledem na využití optických metod. Následně jsou připomenuty nejvýznamnější optické techniky pro určení parametrů povrchu jako jsou interferometrická mikroskopie, spektroskopická interferometrie nebo techniky založené na celkovém integrovaném rozptylu (TIS). Důraz je kladen na metodu rozptylové distribuční funkce (ARS), která je dlouhodobě v naší laboratoři úspěšně využívána při charakterizaci povrchů pevných těles.

Dále jsou popsány různé způsoby experimentálních uspořádání a přístrojových instrumentací, které byly využity v minulosti. Jsou diskutovány výhody a omezení jednotlivých zvolených konstrukčních řešení. Je ukázáno, že předchozí konstrukce nemůže být využita k měření rozptylu z povrchů tenkých vrstev.

Proto jsou dále navrženy a aplikovány konstrukční úpravy přístroje skaterometr SM2, které zvyšují jeho dynamický rozsah a citlivost v měření velmi nízkého rozptýleného výkonu. Přístroj byl po úpravách úspěšně otestován a výsledky publikovány [5]. Z výsledků však vyplynulo, že pro měření tenkých vrstev je zapotřebí většího dynamického rozsahu, než mohl přístroj dosáhnout.

Těžištěm práce je návrh nového skaterometru goniometrického typu s označením SM3. Postupně byly analyzovány relevantní jevy, které mohou mít vliv při přesnosti a stabilitě měření, zejména na šum přístroje, a diskutovány možnosti jejich odstranění. Pro omezení každého nežádoucího jevu bylo vybráno vhodné řešení. Následně byl vytvořen návrh celého přístroje a jeho 3D model v programu Inventor. Konečně byly vyrobeny potřebné části a přístroj sestaven.

Dále se tato práce věnuje testování přístroje pomocí srovnání jeho výsledků s nezávislým měřením. Uvedená měření prokazují funkčnost a dostatečnou přesnost přístroje SM3 i pro měření rozptylu na povrchích tenkých vrstev.

12. LITERATURA

- [1] SCHRÖDER, Sven, Alexander VON FINCK a Angela DUPARRÉ. Standardization of light scattering measurements. *Advanced Optical Technologies* [online]. 2015, 4(5-6) [cit. 2021-11-10]. ISSN 2192-8584. Dostupné z: doi:10.1515/aot-2015-0041
- [2] STOVER, John C. Optical scattering: measurement and analysis. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, c2012, xxiv, 307 p. ISBN 978-0-8194-9251-7
- [3] DUPARRÉ, Angela, Josep FERRE-BORRULL, Stefan GLIECH, Gunther NOTNI, Jörg STEINERT a Jean M. BENNETT. Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components. *Applied Optics* [online]. 2002, 41(1) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.41.000154
- [4] Nádaský, P., Klus, J., Vodák, J., Šustek, S. a Ohlídál, M. Scattermeter for measurement of solar cells. *Conference: OPTICAL SYSTEMS DESIGN 2015: OPTICAL FABRICATION, TESTING, AND METROLOGY V*. Jena Germany: Proceedings of SPIE. 2015, sv. 9628. DOI: 10.1117/12.2190779.
- [5] ŠUSTEK, Štěpán, Jiří VOHÁNKA, Ivan OHLÍDAL, Miloslav OHLÍDAL, Václav ŠULC, Petr K LAPETEK a Nupinder JEET KAUR. Characterization of randomly rough surfaces using angle-resolved scattering of light and atomic force microscopy. *Journal of Optics* [online]. 2021, 23(10) [cit. 2021-11-10]. ISSN 2040-8978. Dostupné z: doi:10.1088/2040-8986/ac1f35
- [6] THORLABS. Si Avalanche Photodetectors. Online. THORLABS. Thorlabs.com. 2015. [cit. 2024-04-10] Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6686.
- [7] Labsphere, Inc. - Spectralon Diffuse Reflectance Standards. [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.labsphere.com/product/spectralon-diffuse-reflectance-standards/>.
- [8] Vohánka, J., Ohlídál, I., Ohlídál, M., Šustek, S., Čermák, M., Šulc, V., Vašina, P., Ženíšek, J., Franta, D., Optical characterization of non-stoichiometric silicon nitride films exhibiting combined defects. *Coatings*, 2019, 9(7), 416, ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi: 10.3390/coatings9070416
- [9] Vohánka, J., Šustek, Buršíková, V., Šklíbová, V., Šulc, V., Homola, V., Franta, D., Čermák, M., Ohlídál, M., Ohlídál, I., Determining shape of thickness non-uniformity using variable-angle spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*, 2020, 534 (SI: SURFINT-SREN VI), 147625. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147625
- [10] Ohlídál, I., Vohánka, J., Buršíková, V., Šulc, V., Šustek, Š., Ohlídál, M., Ellipsometric characterization of inhomogeneous thin films with complicated thickness non-uniformity: application to inhomogeneous polymer-like thin films. *Optics Express*, 2020, 28(24), s. 36796-36811. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/oe.412043

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Štěpán Šustek

Laboratoř koherenční optiky

Technická 2896/2 Brno 616 69

Odbor optiky a přesné mechaniky

Budova A2, kancelář 207

Ústav fyzikálního inženýrství (ÚFI)

Stepan.Sustek@vut.cz

Fakulta strojního inženýrství (FSI) Mobil:

(+420) 732 962 635

Vysoké učení technické v Brně Kancelář:

(+420) 54114 2765

Vzdělání

- 2016 - **Doktorské studium** - Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství
Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚFI
Téma: Experimentální studium rozptylu světla na tenkých vrstvách
- 2014 - 2016 **Magisterské studium** - Obor: Přesná mechanika a optika
Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚFI
Téma: Návrh a sestavení laboratorního vzoru laserového deflektometru pro měření mechanického napětí v tenkých vrstvách
- 2010 - 2014 **Bakalářské studium** - Obor: Strojní inženýrství
Vysoké učení technické v Brně, FSI, ÚFI
Téma: Návrh rozšíření spektrometru pro měření absolutní odrazivosti
- 2006 - 2010 **Středoškolské studium** - Obor: Strojírenství
Střední škola a Vyšší odborná škola, Kopřivnice,

Zaměstnání

- 2014 - 2023 **Vědecký pracovník** - VUT v Brně, ÚFI-odbor optiky a přesné mechaniky

Zahraniční stáže

- 9/2015 - 3/2016 **Fraunhoferův institut, Jena, Německo** - Internship – In situ měření mechanického napětí v tenkých vrstvách při procesu depozice

Projektová činnost

- 2023 Vývoj a aplikace pokročilých optických metod IV
- 2020 - 2023 Vývoj a aplikace pokročilých optických metod III
- 2019 - 2022 MPO-TRIO: Meopta optika, s.r.o. - FV40328 -
Realizace vrstevnatých systémů s požadovanými spektrálními závislostmi odrazivosti a propustnosti ve střední ultrafialové oblasti spektra
- 2017 - 2020 Vývoj a aplikace pokročilých optických metod II

ABSTRAKT:

Elektromagnetické záření dopadající na povrch pevného tělesa je z části zrcadlově odraženo podle principů geometrické optiky a z části rozptýleno do jiných směrů (tzv. difúzní složka) vlivem drsností povrchu. Z charakteristiky rozptýlené části lze následně určit topografie povrchu na kterém k difúzi dochází. Pro velmi málo drsné povrchy v řádu nanometrů, jaké jsou očekávány u tenkých vrstev, je zapotřebí velmi citlivé a přesné měření difúzní složky. Měřicí systém by měl vykazovat vysoký dynamický rozsah a dostatečné úhlové rozlišení. K tomuto účelu byl navržen, realizován a také upravován skaterometr goniometrického typu. Přístroj byl následně testován a výsledky byly porovnány s nezávislým měřením na jiném pracovišti. Diskutována je také možnost rozšířeného využití přístroje a případné úpravy.

ABSTRACT:

Electromagnetic radiation incident on the surface of a solid body is partly reflected specularly according to the principles of geometrical optics and partly scattered into other directions (the so-called diffuse component) due to surface roughness. From the characteristics of the scattered part, the topography of the surface where diffusion occurs can be determined. For surfaces with very low roughness on the order of nanometers, as expected in thin films, highly sensitive and precise measurement of the diffuse component is required. The measuring system should exhibit a high dynamic range and sufficient angular resolution. For this purpose, a goniometric-type scatterometer was designed, implemented, and also modified. The instrument was subsequently tested, and the results were compared with independent measurements conducted at another facility. The possibility of extended use of the instrument and potential modifications are also discussed.