

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA

Příprava 1D fotonického krystalu magnetronovým naprašováním

Jiří Horníček

Diplomová práce

Fakulta materiálově technická
Studijní program - Nanotechnologie

Duben 2023

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Horníček**

Studijní program: N0719A270002 Nanotechnologie

Téma: Příprava 1D fotonického krystalu magnetronovým napařováním
Development of 1D photonic crystal using magnetron sputtering

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Jednodimenzionální fotonický krystal je tvořen opakujícími se dvojicemi vrstev. Vrstvy jsou tvořeny materiálem o vysokém a nízkém indexu lomu, například SiO₂ a Ta₂O₅. Pro zvolenou konfiguraci centrální vlnové délky a úhlu dopadu je možné strukturu optimalizovat tak, aby její odrazivost byla vyšší než odrazivost zrcadla tvořeného kovovou vrstvou. Pro návrh fotonického krystalu je důležité, aby materiály vrstev byly neabsorbující, dielektrické. Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj materiálů pro přípravu 1D fotonického krystalu, jeho charakterizaci a optimalizaci procesu depozice jednotlivých vrstev.

V práci jsou řešeny následující podúlohy:

- Příprava referenčních vrstev s nízkým a vysokým indexem lomu metodou reaktivního napařování, optimalizace depozičních podmínek pro přípravu vrstev transparentního materiálu s nízkou povrchovou drsností.
- Modelování a fitování elipsometrických dat změřených na připravených vrstevách, určení optických funkcí, povrchové drsnosti a depoziční rychlosti.
- Návrh a příprava struktury 1D fotonického krystalu přípravou metodou magnetronového napařování, elipsometrická charakterizace celkové struktury.
- Analýza vlivu chyby tloušťky ve struktuře 1D fotonického krystalu a její kompenzace.

Seznam doporučené odborné literatury:

- AZZAM R.M.A., BASHARA, N.M., Ellipsometry and polarized light., Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1987.
- NEE, A. YC (ed.). Handbook of manufacturing engineering and technology. Springer reference, 2015.
- WASA, K.; HAYAKAWA, S., Handbook of sputter deposition technology. Noyes Publications, United States, 1992.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Halagačka, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2022

Datum odevzdání: 28.04.2023

Garant studijního programu: prof. Ing. Jana Seidlerová, CSc.

V IS EDISON zadáno: 30.11.2022 15:19:20

Autorské prohlášení

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

Podepsán:

Datum:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Dr. Halagačkovi za neocenitelné rady, trpělivou podporu a vedení během mé diplomové práce. Taktéž bych rád poděkoval docentu Postavovi za konzultace k mé práci.

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Abstrakt

Fakulta materiálově technická
Studijní program - Nanotechnologie

Diplomová práce

napsal Jiří Horníček

Tato diplomová práce je zaměřena na přípravu optických fotonických krystalů na bázi tenkovrstevnatých systémů z Ta_2O_5 a SiO_2 materiálu pomocí magnetronového reaktivního naprašování. V první fázi byly optimalizovány depoziční podmínky, zejména množství přiváděného argonu a kyslíku do komory, tak aby byla dosažena vysoká optická kvalita vrstev a zároveň dostatečná depoziční rychlost. Metodou kombinující spektroskopickou elipsometrii a transmittance byly určeny optické funkce deponovaných materiálů s využitím modelových dielektrických funkcí. Dále byly určeny tloušťky vrstev a depoziční rychlosti. Byla navržena struktura 1D fotonického krystalu sloužící jako vysoce odrazné dielektrické zrcadlo pro svazky pod úhlem dopadu 45° a centrální vlnovou délkou 800 nm, jehož cílem je odrazet laserové svazky vysokých výkonů. Dielektrické zrcadlo bylo vyrobeno a opticky charakterizováno. V další části práce jsou navrženy možnosti kompenzování neideální depozice tlouštěk vrstev. V této práci je představen potřebný matematický maticový aparát pro modelování a charakterizaci tenkovrstevnatých systémů.

Obsah

Prohlášení	iv
Abstrakt	vi
Použité zkratky	ix
Použité symboly	x
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Současný stav poznání	1
1.3 Organizace a přínos práce	2
2 Teorie optického modelování	3
2.1 Řešení Maxwellových rovnic pro rovinou monochromatickou vlnu	3
2.2 Příprava tenkých vrstev	4
2.3 Maticový popis šíření elektromagnetického pole v systému tenkých vrstev	5
2.4 Fotonické krystaly	8
2.4.1 Využití fotonických krystalů	9
3 Použité experimentální metody	11
3.1 Magnetronové naprašování	11
3.1.1 DC a FR naprašování	14
3.1.2 Využitý naprašovací systém	15
3.2 Elipsometrie	16
3.2.1 Aplikace spektroskopické elipsometrie	17
3.2.2 Použitý elipsometr - Woolam RC2-DI	17
3.3 Modelování a optimalizace spektroskopického modelu	18
4 Vývoj materiálů pro přípravu fotonického krystalu a jejich optická charakterizace	20
4.1 Rešerše předpokládaných depozičních podmínek	20
4.2 Příprava Ta ₂ O ₅ materiálu a určení jeho optických funkcí	21
4.3 Příprava SiO ₂ materiálu a určení jeho optických funkcí	29
4.4 Přehled optimálních depozičních podmínek	32

5 Příprava fotonického krystalu	34
5.1 Návrh fotonického krystalu	34
5.2 Příprava a charakterizace fotonického krystalu	35
5.3 Modelování metody kompenzace	37
5.4 Depozice finálního krystalu	39
6 Závěr a diskuze	42
A	43
Reference	50
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	52

Použité zkratky

1D	1-dimenzionální
CG-glass	Corning glass subtsrát, bez cínové vrstvy
CVD	Depozice z chemických par
DC magnetron	Magnetron operující v režimu stejnosměrného proudu
PVD	Depozice z fyzikální par
RF magnetron	magnetron operující v rádiovém frekvenčním spektru
SiO ₂	Oxid křemičitý
Ta ₂ O ₅	Oxid tantaličný
TL	Tauc-Lorentzův model oscilátoru

Použité symboly

A	Absorbance	%
\vec{B}	Magnetické indukce	T
B	Amplituda Sellmeirova členu	
C	$C=\sin(2\psi)\cos(\Delta)$	
\vec{D}	Elektrické indukce	T
\vec{E}	Intenzita elektrického pole	V/m
E	Energie vlny	eV
\vec{H}	Intenzita magnetického pole	A/m
N	$N=\cos(2\psi)$	
R	Reflektivita	%
R_s	Reflektivita pro s -polarizaci	%
R_p	Reflektivita pro p -polarizaci	%
S	$S=\sin(2\psi)\sin(\Delta)$	
T	Transmitance	%
\vec{j}	Objemová hustota elektrického proudu	C/m ³
\vec{k}	Vlnový vektor	
\vec{v}	Rychlost	m/s
n	Index lomu	
t	Čas	s
Γ	Faktor tlumení oscilátoru	
Δ	Elipsometrický úhel Δ	
ϵ_1	Dielektrická konstanta - reálná část	
ϵ_2	Dielektrická konstanta - imaginární část	
$\hat{\epsilon}$	Komplexní tenzor permitivity	F/m
ϵ_0	Permitivita vakua	F/m

$\hat{\epsilon}'$	Reálná permitivita	F/m
λ	Vlnová délka	m
μ	Permeabilita	H/m
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
ρ	Objemová hustota volného náboje	C/m ³
$\hat{\sigma}$	Tenzor vodivosti	S/m ³
ψ	Elipsometrický úhel ψ	
ω	Úhlová rychlost	rad/s
∇	Operátor nabla	

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Motivací této práce je získání znalostí pro přípravu 1D fotonických krystalů pomocí magnetronového naprašování pro účely optického filtru. Tyto optické tenkovrstevanté filtry naleznou uplatnění v mnoha přístrojích, jako jsou děliče paprsků (beamsplitters), antireflexní vrstvy, polarizační filtry, optické (spektrální) filtry zakázaných pásů, dielektrická zrcadla nebo struktury lokálně zesilující optická pole. [1] Fotonický krystal funguje na bázi periodického střídání vrstev materiálů s nízkým a vysokým indexem lomu. Fotonické krystaly jsou charakteristické svým zakázaným pásem frekvencí, ve kterém se světlo ve struktuře nemůže šířit. Tato diplomová práce je zaměřena na studium vytvoření 1D fotonického krystalu pomocí metody magnetronového naprašování. Tato metoda se standardně využívá pro účely přípravy tenkých vrstev. Mezi hlavní cíle této práce patří: nalezení vhodných nanášecích podmínek pro přípravu tenkých vrstev SiO_2 a Ta_2O_5 , určení optických funkcí těchto materiálů s cílem na co nejnižší absorpci materiálu pro energii fotonu menší než je šířka zakázaného pásu, návrh ideálního fotonického krystalu s maximální reflektivitou pro vlnovou délku 800nm, kompenzace chyb během přípravy fotonického krystalu a jeho samotná příprava.

1.2 Současný stav poznání

Příprava dielektrických zrcadel z materiálů s velmi nízkým a velmi vysokým indexem lomu je v dnešní době již dobře prozkoumána. [1] Taktéž je již dobře zdokumentována příprava tenkých vrstev z materiálu SiO_2 a Ta_2O_5 . Naším cílem bylo tyto studie aplikovat pro náš systém naprašování.

K správnému modelování fotonického krystalu (tlouštěk samostatných vrstev) je využíván výpočet optických parametrů pomocí elektromagnetické teorie šíření světla v systémech tenkovrstevnatých fotonických krystalech. Přímou pro výpočet je využito maticového formalismu popisující zachování hraničních podmínek na rozhraních vrstev [2, 3]

Pro správné určení nanášecích podmínek využívá křemenný oscilátor, jenž pomocí změny frekvence vlastních kmitů můžeme určit rychlost s kterou se nanáší dané vrstvy. Tuto metodu jsme využili pro hrubý odhad nanášecí rychlosti. Pro co nejpřesnější určení depoziční rychlosti se využívá měření během procesu nanášení pomocí elipsometru, tzv. in-situ měření. Měření během depozice se však kvůli nárokům pro vybavení naprašovací komory elipsometrem využívá jen pro nejnáročnější technologické aplikace. [4] V našem případě taktéž nebylo možné vybavit naprašovací komoru elipsometrem, proto pro určení přesné nanášecí rychlosti jsme museli vzorek vytáhnout a určit jeho tloušťku pomocí měření na elipsometru (ex-situ měření).

1.3 Organizace a přínos práce

Na začátku této práce v Kapitole 2 představím teoretický základ potřebný pro modelování multivrstevných systémů pomocí maticového formalismu. Následuje obecný popis fotonických krystalů a jejich využití. V další Kapitole 3 jsou shrnuty metody přípravy a měření využívané při přípravě a analýze studovaných vzorků a dále jsou vysvětleny použité spektroskopické modely. V Kapitole 4 je prezentována rešerše depozičních parametrů pro magnetronové naprašování použitých materiálů, určení nejlepších depozičních podmínek pro dané materiály, příprava samostatného fotonického krystalů z daných materiálů. V Kapitole 5 je popsán návrh a příprava finálního optického filtru s 1D fotonickým krystalem, jsou objevena úskalí nestability depoziční rychlosti a následná kompenzace vzniklých chyb, jakožto i návrh ideálního postupu. V závěru práce jsou shrnuty výsledky a představeno možné další pokračování práce.

Kapitola 2

Teorie optického modelování

V této kapitole je představeno řešení Maxwellových rovnic pro monochromatickou rovinnou vlnu. Pomocí tohoto řešení jsme schopni popsat interakci světla s látkou v multivrstevném prostředí pomocí maticového formalismu a reflexních/transmisních koeficientů. Na konci této kapitoly jsou shrnuty základní poznatky o fotonických krystalech.

2.1 Řešení Maxwellových rovnic pro rovinnou monochromatickou vlnu

Obecná forma Maxwellových rovnic pro elektromagnetickou vlnu je znázorněna jako

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= \rho, & \nabla \cdot \vec{B} &= 0, \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0, & \nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j}, \end{aligned} \tag{2.1}$$

kde jsou \vec{H} intenzita elektrického pole, \vec{E} intenzita elektrického pole, \vec{B} magnetická indukce, \vec{D} elektrická indukce, ρ hustota volného náboje a \vec{j} hustota elektrického proudu.

Dále pro aplikaci v optice definujeme materiálové vztahy ve tvaru

$$\vec{j} = \hat{\sigma} \vec{E}, \quad \vec{D} = \hat{\epsilon}' \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \tag{2.2}$$

kde $\hat{\sigma}$ je tenzor vodivosti, $\hat{\epsilon}'$ je tenzor permitivity prostředí a μ_0 permeabilita prostředí. Předpokládáme, že se jedná o monochromatickou vlnu, jenž zadefinujeme ve tvaru

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_\omega e^{i\omega t}, \\ \vec{H} &= \vec{H}_\omega e^{i\omega t},\end{aligned}\tag{2.3}$$

kde t je čas a ω je úhlová frekvence dané vlny a \vec{E}_ω a \vec{H}_ω jsou komplexní amplitudy polí. Maxwellovy rovnice následně přejdou do tvaru

$$\nabla \cdot [\hat{\epsilon} \vec{E}_\omega] = 0,\tag{2.4a}$$

$$\nabla \cdot \vec{H}_\omega = 0,\tag{2.4b}$$

$$\nabla \times \vec{E}_\omega = -i\omega\mu_0 \vec{H}_\omega,\tag{2.4c}$$

$$\nabla \times \vec{H}_\omega = i\omega \hat{\epsilon} \vec{E}_\omega,\tag{2.4d}$$

kde $\hat{\epsilon}$ je tenzor komplexní permitivity, pro který platí

$$\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}' - i\hat{\sigma}/\omega.\tag{2.5}$$

Řešení pro monochromatické vlny ve tvaru rovinných vln

$$\vec{E}_\omega(r) = \vec{E}_0 e^{i(k_x x + k_y y + k_z z)} = \vec{E}_0 e^{i\vec{k}r}\tag{2.6}$$

a magnetickou intenzitu můžeme vyjádřit pomocí elektrické intenzity jako

$$-\vec{H} = \frac{1}{\omega\mu_0} \vec{k} \times \vec{E}_0,\tag{2.7}$$

jenž je tedy upraveným tvarem Maxwellových rovnic pro vlnovou rovnici rovinné vlny, kde \vec{k} je vlnový vektor.

2.2 Příprava tenkých vrstev

Tenké vrstvy jsou materiály jejichž tloušťka má zpravidla tloušťku srovnatelnou s vlnovou délkou. Díky těmto malým tloušťkám získávají jedinečné vlastnosti jako například: vysoká texturace, vysoká reaktivita a tzv. efekt kvantového omezení. [5] Tyto vlastnosti činí z tenkých vrstev materiály vhodné pro využití v elektronice, optice, elektrooptice, sensorice a povrchové ošetření materiálů. [5]

Pro nanesení tenkých vrstev využíváme následující metody: depozice z chemických par (CVD), depozice z fyzikálních par (PVD), nebo rotační nanášení (spin coating). Chemická depozice par je metoda jež zahrnuje využití chemických reakcí plynných prekurzorů k vytvoření pevného materiálu na povrchu substrátu. Evaporace je proces, při kterém dochází k evaporaci pevného materiálu do oblasti vysokého vakua. Vypařovaný materiál následně kondenzuje na substrát a tvoří tenkou vrstvu. Mezi tyto metody patří i metody napařování a napařování. Napařování je metoda během které dochází k vyražení atomů z pevného zdrojového materiálu, terče pomocí bombardování vysoko energetickými částicemi (Ar-ionty/atomy). Tyto vyražené atomy následně kondenzují na substrátu, kde tvoří tenkou vrstvu. [5]

Vlastnosti tenkých vrstev se různí v závislosti na použitých materiálech, metodách přípravy a následné aplikaci připravených struktur. Při aplikaci v elektronice se tenké vrstvy využívají při výrobě mikroelektroniky jako jsou tranzistory a integrované obvody. V optice jsou tenké vrstvy využity jako optické povrchy. Například jako antireflexivní povrchy, optické a polarizační filtry a děliče svazku. Pro tyto účely jsou využity materiály jako oxid titaničitý, oxid křemičitý a fluorid hořečnatý. V senzorce jsou tenké vrstvy využity při výrobě chemických a biologických sensorů. Pro tyto aplikace se nejčastěji využívají tenké vrstvy ze zlata a stříbra pro aplikace v plasmonických senzorech. [5] [6]

2.3 Maticový popis šíření elektromagnetického pole v systému tenkých vrstev

Pro popis vrstevnatých systému zvolíme báze řešení pro p -polarizaci a pro s -polarizaci. S -polarizace definujeme jako magnetickou intenzitu v n -té vrstvě (horní index) ve směru osy y jako

$$H_y^{(n)} = \frac{1}{\omega\mu} |\mathbf{k}^{(n)} \times \mathbf{E}^{(n)}|_y = \frac{N_z^{(n)} E_x^{(n)}}{\eta_0} = Y_s^{(n)} E^{(n)}, \quad (2.8)$$

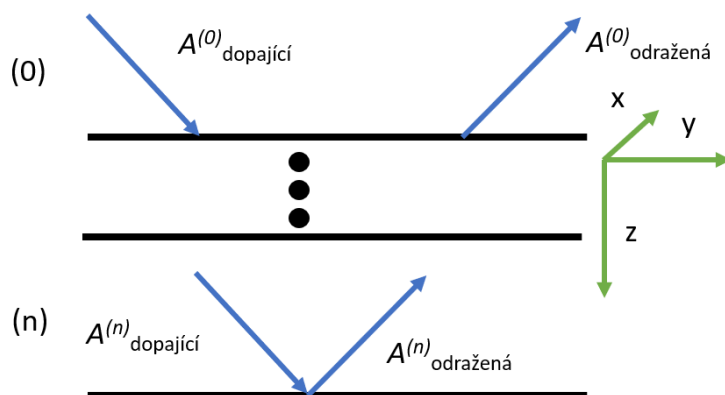
kde $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ je impedance ve vakuu a

$$Y_s^{(n)} = \frac{n^{(n)} \cos \alpha_n}{\eta_0} = \frac{1}{\eta_0} \sqrt{n^{(n)2} - n^{(0)2} \sin^2 \alpha_n}, \quad (2.9)$$

kde α_n označuje úhel dopadu.

Tečné složky pole tedy můžeme, dle Obrázku 2.1 zapsat jako

$$\begin{aligned} E_{0x}^{(n)} &= A_{\text{dopadající}}^{(n)} + A_{\text{odražená}}^{(n)}, \\ H_{0y}^{(n)} &= Y_s^{(n)} A_{\text{dopadající}}^{(n)} - Y_s^{(n)} A_{\text{odražená}}^{(n)}, \end{aligned} \quad (2.10)$$



OBRÁZEK 2.1: Schéma interakce mnohvrstevnatého prostředí s dopadající vlnou pro popis pomocí maticového formalismu

Kde $A^{(n)}$ jsou intenzity dopadajících/odražených vln na/od povrchu n -té vrstvy. Tento přepis můžeme zapsat do matice popisující s -polarizaci v n -té vrstvě

$$\begin{bmatrix} E_{0x}^{(n)} \\ H_{0y}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ Y_s^{(n)} & -Y_s^{(n)} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A_{dopadající}^{(n)} \\ A_{odražená}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

Pro p -polarizaci je proces podobný. Opět využijeme Rovnice (2.8). Následně určíme $Y_p^{(n)}$ a tečné složky pole

$$Y_p^{(n)} = -\frac{n^{(n)}}{\eta_0 \cos \alpha_n} = -\frac{n^{(n)2}}{\eta_0 \sqrt{n^{(n)2} - n^{(0)2} \cos^2 \alpha_n}}, \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} E_{0y}^{(n)} &= A_{dopadající}^{(n)} \cos \alpha_n + A_{odražená}^{(n)} \cos \alpha_n, \\ H_{0x}^{(n)} &= -\frac{n^{(n)}}{\eta_0} A_{dopadající}^{(n)} + \frac{n^{(n)}}{\eta_0} A_{odražená}^{(n)}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

a zapíšeme maticový popis pro p -polarizaci

$$\begin{bmatrix} E_{0y}^{(n)} \\ H_{0x}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ Y_p^{(n)} & -Y_p^{(n)} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A_{dopadající}^{(n)} \\ A_{odražená}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

Pro obě polarizace můžeme tedy zapsat jako

$$\begin{bmatrix} E_t^{(n)}(z_{n-1}) \\ H_t^{(n)}(z_{n-1}) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ Y_{s,p}^{(n)} & -Y_{s,p}^{(n)} \end{pmatrix}}_{\vec{D}^{(n)}} \begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(n)}(z_{n-1}) \\ A_{\text{odražená}}^{(n)}(z_{n-1}) \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

kde zavádíme admitanční matici $\vec{D}^{(n)}$, v n -té vrstvě a index z_{n-1} nám slouží pro popis chování normálové složky elektromagnetického záření v vrstvě nad n -tou vrstvou. Šíření záření n -tou vrstvou můžeme popsat pomocí propagační matice $\vec{P}^{(n)}$

$$\begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(n)}(z_{n-1}) \\ A_{\text{odražená}}^{(n)}(z_{n-1}) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} e^{ik_z^{(n)}d_n} & 1 \\ 1 & e^{-ik_z^{(n)}d_n} \end{pmatrix}}_{\vec{P}^{(n)}} \begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(n)}(z_n) \\ A_{\text{odražená}}^{(n)}(z_n) \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

kde d_n tloušťku n -té vrstvy. Chování záření na spodním rozhraní n -té vrstvy popíšeme pomocí impedanční matice, jež je inverzní k admitanční

$$\begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(n)}(z_n) \\ A_{\text{odražená}}^{(n)}(z_n) \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1/Y_{s,p}^{(n)} \\ 1 & -1/Y_{s,p}^{(n)} \end{pmatrix}}_{[\vec{D}^{(n)}]^{-1}} \begin{bmatrix} E_t^{(n)}(z_n) \\ H_t^{(n)}(z_n) \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

Celkovou charakteristickou matici $\vec{T}^{(n)}$ vrstvy popíšeme jako

$$\begin{bmatrix} E_t^{(n)}(z_{n-1}) \\ H_t^{(n)}(z_{n-1}) \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{(n)} \begin{bmatrix} E_t^{(n)}(z_n) \\ H_t^{(n)}(z_n) \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$\mathbf{T}^{(n)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ Y_{s,p}^{(n)} & -Y_{s,p}^{(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_z^{(n)}d_n} & 1 \\ 1 & e^{-ik_z^{(n)}d_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1/Y_{s,p}^{(n)} \\ 1 & -1/Y_{s,p}^{(n)} \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{T}^{(n)} = \begin{pmatrix} \cos k_z^{(n)}d_n & \frac{i}{Y_{s,p}^{(n)}} \sin k_z^{(n)}d_n \\ iY_{s,p}^{(n)} \sin k_z^{(n)}d_n & \cos k_z^{(n)}d_n \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Následně celkovou transformační matici M získáme jako

$$\begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(0)}(z_0) \\ A_{\text{odražená}}^{(0)}(z_0) \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} A_{\text{dopadající}}^{(N)}(z_{N+1}) \\ A_{\text{odražená}}^{(N)}(z_{N+1}) \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1/Y_{s,p}^{(0)} \\ 1 & -1/Y_{s,p}^{(0)} \end{pmatrix} T^{(1)}T^{(2)}T^{(3)} \dots T^{(N)} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ Y_{s,p}^{(N+1)} & -Y_{s,p}^{(N+1)} \end{pmatrix}, \quad (2.22)$$

kde N označuje celkový počet vrstev a tedy $n=0$ je vzduch (prostředí ze kterého vlna postupuje do krystalu) a $n = N + 1$ je substrát. Z této matice jsme schopni vyjádřit reflexní a transmisní koeficienty, jež jsou definovány jako

$$r = \frac{A_{\text{odražená}}^{(0)}}{A_{\text{dopadající}}^{(0)}} = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (2.23)$$

,

$$t = \frac{A_{\text{dopadající}}^{(0N+1)}}{A_{\text{dopadající}}^{(0)}} = \frac{1}{M_{11}} \quad (2.24)$$

,

kde r je reflexní koeficient, t je transmisní koeficient a M_{11} a M_{21} jsou prvky matice M . Z těchto reflexních a transmisních koeficientů, jsme schopni spočítat celkovou reflexi a transmisi. Následně jsme schopni sestavit Jonesovu reflexní matici

$$J = \begin{pmatrix} r_{ss} & 0 \\ 0 & r_{pp} \end{pmatrix}, \quad (2.25)$$

a z koeficientů r_{ss} a r_{pp} můžeme určit elipsometrické úhly

$$\frac{r_{ss}}{r_{pp}} = \tan \psi e^{i\Delta}, \quad (2.26)$$

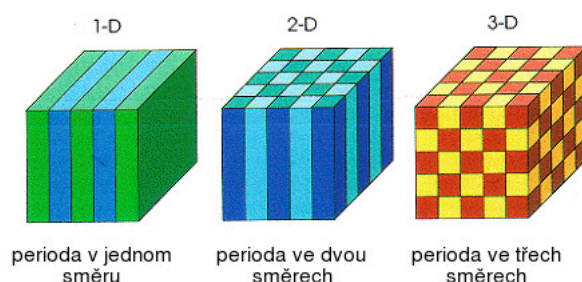
kde ψ nám slouží pro popis poměru s a p amplitud odražené vlny a Δ popisuje změnu fází.

2.4 Fotonické krystaly

Fotonické krystaly jsou umělé materiály s periodicky se měnící dielektrickou konstantou. V závislosti na počtu dimenzí šíření periodicity fotonického krystalu, rozlišujeme 1D, 2D a 3D fotonické krystaly. Na Obrázku 2.2 můžeme vidět toto rozdělení. Tyto periodické změny způsobují, že fotonický krystal vykazuje efekt fotonického zakázaného pásu, jež je oblast frekvencí elektromagnetického spektra ve kterých je nemožné, aby docházelo k šíření elektromagnetického vlnění v důsledku destruktivní interference. Optická analogie pro tyto optické jevy ve fotonickém krystalu je myšlenkovým nahrazením uspořádání atomů nebo molekul do krystalů: tedy nahrazení jednotlivých atomů makroskopickými

materiály fotonického krystalu s různými dialektickými konstantami a nahrazení periodického potenciálu periodickou dielektrickou funkcí. Pro fotonické krystalu používáme takové materiály, jež mají dostatečně rozdílné indexy lomu a jsou neabsorbující v používané části spektra. Pokud jsou dané materiály dostatečně odlišné, tak odrazy od jednotlivých rozhraní mohou vzájemně interferovat. [7]

Vlastnosti takového fotonického krystalu se mění na základě jeho periodické struktury. Pomocí úpravy zakázaného pásu lze měnit frekvence dovolující propagaci světla, respektive znemožňující propagaci elektromagnetického záření. Možnost těchto úprav zajišťují fotonickým krystalům nemalé využití v oblastech optické komunikace, sensoriky a zobrazovacích metodách.

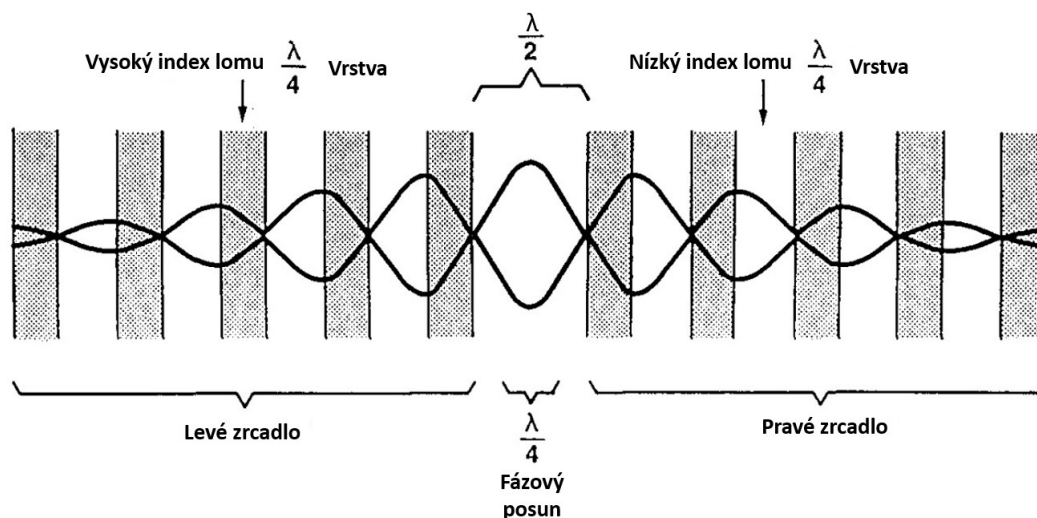


OBRÁZEK 2.2: Schéma 1D, 2D a 3D fotonického krystalu[7]

2.4.1 Využití fotonických krystalů

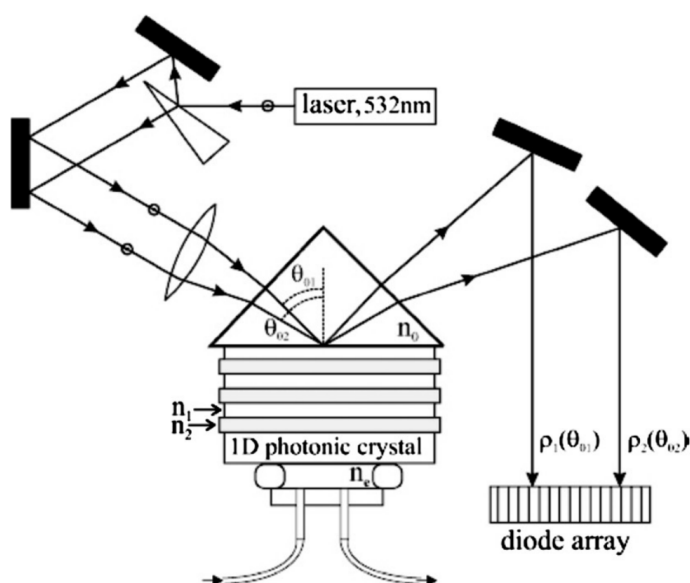
Fotonické krystalu mají širokou oblast uplatnění. V optické komunikaci jsou využívány jako vlnovody, filtry a spojky. Tyto zařízení zajišťují kontrolu šíření elektromagnetického záření a vylepšují efektivitu optických telekomunikačních systémů. V sensorice jsou fotonické krystalu využity jako chemické senzory a bio-senzory. Tyto senzory lze upravit na míru pro interakci se specifickými analyty a tím zajišťující vysokou citlivost. Fotonické krystalu také mohou být využity pro vytvoření sub-vlnových zobrazovacích zařízení jako jsou superčočky a hyperčočky. Tyto zařízení dokážou překonat limity způsobené difrací a umožňují zobrazení struktur, jež jsou menší než vlnová délka viditelného světla s vysokým rozlišením.

Díky vysoké odrazivosti můžeme fotonické krystalu využít jako dielektrická zrcadla, jež dokážou odrážet pouze vybrané spektrum elektromagnetického záření. Takovým dielektrickým zrcadlem může být například čtvrtvlnová destička. Celkový odraz je způsoben částečným odrazem na jednotlivých rozhraních fotonického krystalu. Nastává destruktivní interference jež eliminuje dopředně-propagovanou vlnu. Podobného efektu využívá i Fabry-Perotův filtr.[7]



OBRÁZEK 2.3: Schéma čtvrtvlnové destičky[8]

Biosenzory slouží jako detektory nemocí během klinických testů. Biosenzory jsou, ve srovnání s konvenčními a elektrochemickými detektory, spolehlivé, rychlé, kompaktní a uživatelsky přívětivé. Mezi různé detekční technologie patří například rezonance povrchového plasmonu, elektrochemické biosenzory a nedávno využitá inverzní opálové fotonické krystaly.[9] Tyto technologie se hlavní používají pro detekci biomarkerů (měřitelný indikátor určitého biologického stavu nebo podmínek). Samotné biofotonické krystaly byly využity pro selektivní a senzitivní detekci různých biologických analytů jako je DNA, buňky, patogeny a proteiny. Detekce a přesnost je navíc zvýšená díky současné znalosti velikosti a uspořádání daných biologických struktur.[10] Typický biofotonický krystal můžeme vidět na Obrázku 2.4.[10]



OBRÁZEK 2.4: Schéma biofotonického krystalu[10]

Kapitola 3

Použité experimentální metody

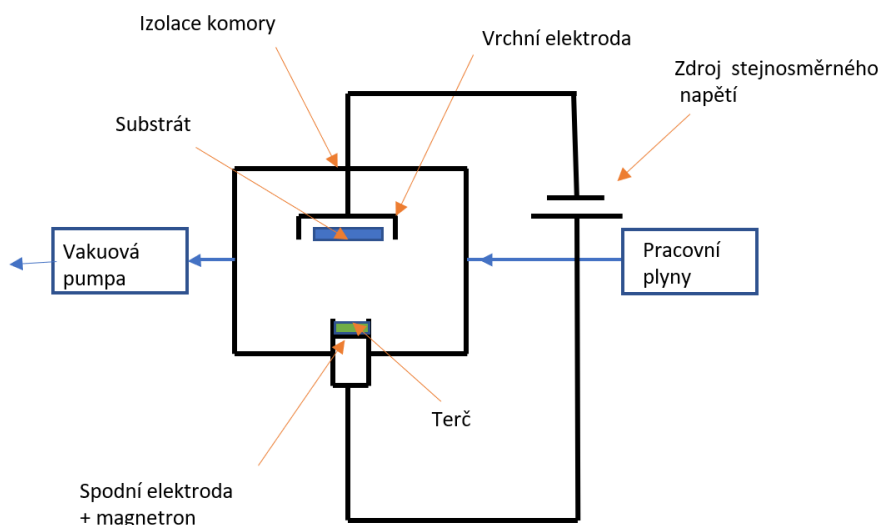
V této kapitole jsou shrnuty experimentální metody, použité při přípravě studovaných materiálů, struktur fotonických krystalů a jejich následnou optickou charakterizaci. V první části je představen použitý systém pro přípravu tenkých vrstev pomocí magnetronového naprašování. Druhá část kapitoly je zaměřena na spektroskopickou elipsometrii, která byla využita při studiu optických vlastností zkoumaných materiálů a deponovaných fotonických krystalů. Na konci této kapitoly je popsán postup spektroskopického modelování a použité spektroskopické modely.

3.1 Magnetronové naprašování

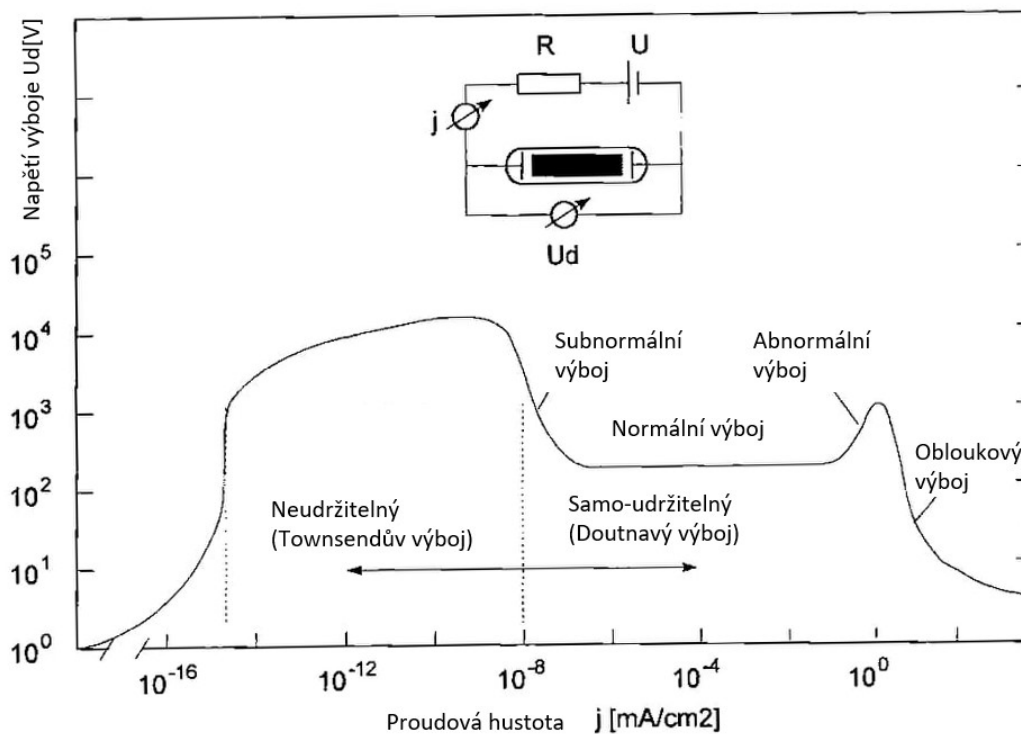
V dnešní době jsou tenkovrstevnaté struktury nejčastěji průmyslově vyráběny pomocí PVD technik. Přesto je depozice pomocí naprašování vhodnou alternativou například pro přípravu prototypů. Vrstvy nanesené pomocí evaporace totiž mohou trpět nedokonalostmi jako je nízká hustota, nízká tvrdost a nízká odolnost vůči environmentálním jevům. Díky naprašování můžeme tyto nedokonalosti minimalizovat a celkově můžeme získat lepší vlastnosti daných vrstev. Naprašování jako takové označuje depoziční metodu kdy dochází k vyražení atomů z pevné materiálu, označovaném jako „target/terč“, pomocí částic o vysoké energii.[11] Na Obrázku 3.1 je znázorněno schematické sestavení pro naprašování. [12]

Pokud do sestavy v Obrázku 3.1 budeme přivádět zvyšující se napětí, budeme moci sledovat změnu proudu na zvyšujícím se napětí. Průběh této funkce můžeme sledovat na Obrázku 3.2.

Jak můžeme z Obrázku 3.2 vidět, můžeme při určitých napětích pozorovat různé operační režimy, jenž se liší různými procesy depozice tenkých vrstev a také vizuálním jevem.



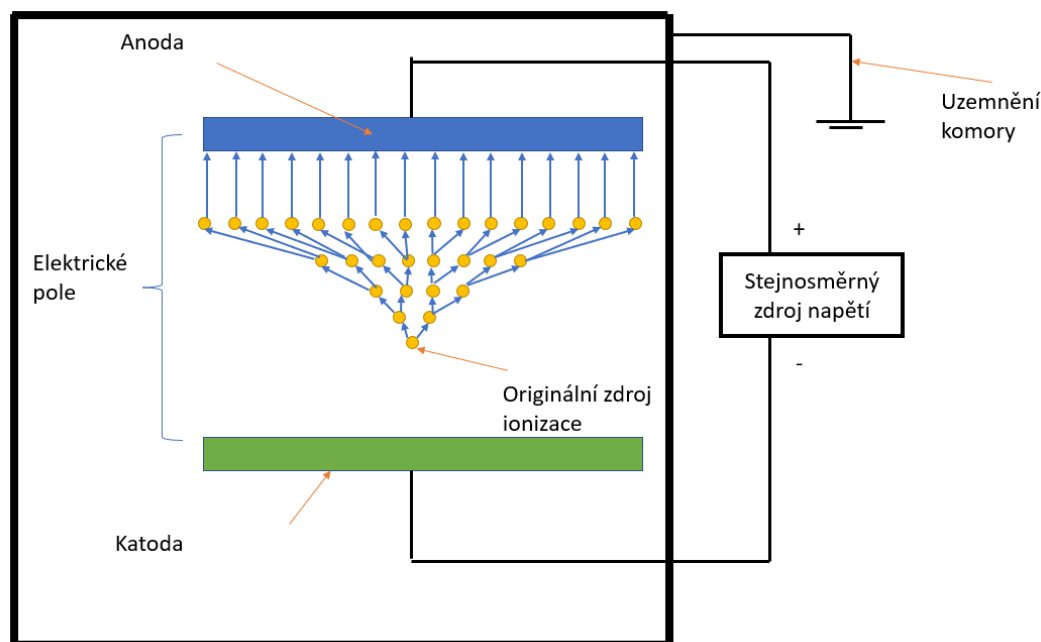
OBRÁZEK 3.1: Vakuová komora použitého systému



OBRÁZEK 3.2: Průběh výboje v plynu [11]

Naprašování může být prováděno pouze v oblasti doutnavého výboje, neboť právě zde je proces naprašování samostatně udržitelný. Není tedy potřeba žádného dalšího způsobu vytvoření nabitých částic. Takový to udržitelný výboj je naznačen na Obrázku 3.3. [11]

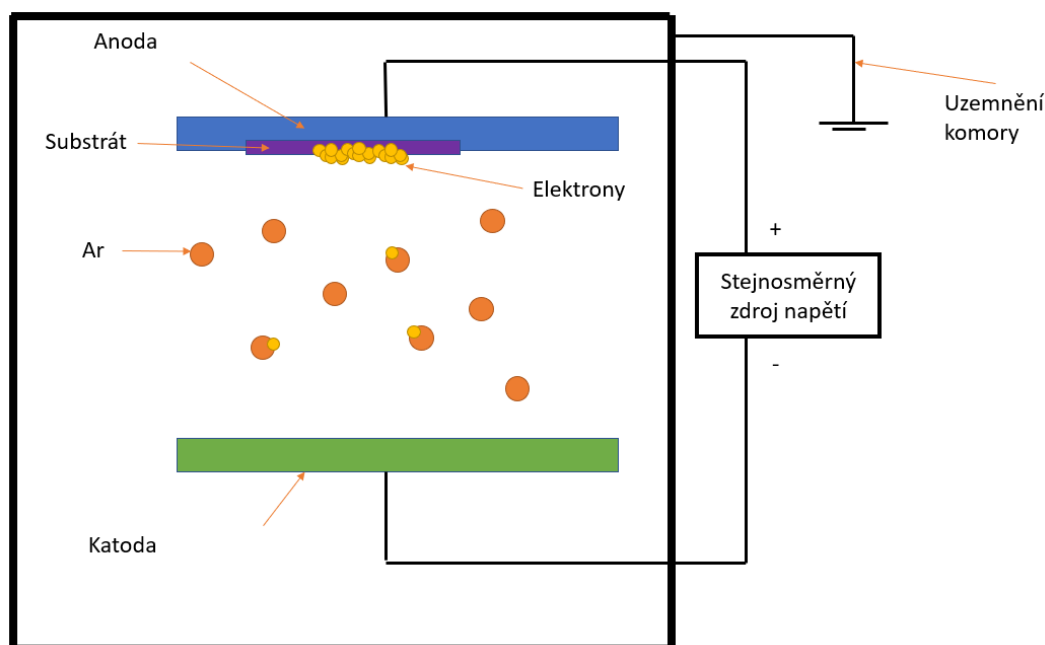
V této oblasti abnormální záře je výboj udržován hlavně pomocí generování sekundárních elektronů na katodě. Ty jsou generovány pomocí dopadání iontů a ionizační lavinou v



OBRÁZEK 3.3: Schéma průrazu plynu a vzniku zářivého výboje

plynu pomocí urychlených elektronů. Tyto procesy jsou natolik intenzivní že dokážou kompenzovat ztráty nabitých částic během rekombinací. V oblasti abnormální záře je celá oblast katody pokryta výbojovým proudem s konstantní proudovou hustotou v oblasti okolo celé katody. Celkový proud může být zvýšen pomocí zvýšení napětí mezi elektrodami. Oproti tomu je proud v oblasti normální záře omezen pouze na určité oblasti poblíž okrajů katody a poblíž povrchu s nerovnalostmi. Při zvyšování proudu dochází na okrajích katody a poblíž povrchu s nerovnalostmi ke vzniku oblastí abnormální záře, zatímco proudová hustota a napětí zůstává konstantní. Je typické, že proudová hustota v oblasti abnormální záře je v řádech mA/cm^2 . Pokud je proudová hustota více zvyšována, může dojít k vytvoření „hot spotů“ na povrchu katody, z důvodu vysoko energetických výbojů. Z těchto „hot spotů“ může dojít k termoemisi elektronů, a tedy k následnému zkratovému proudu. [11]

Anionty, generované v DC (zdroje stejnosměrného proudu) nebo v RF (zdroj generující signál o rádiové frekvenci) doutnavém výboji mezi dvěma elektrodami, bombardují negativně nabitou elektrodu (katodu). Po dopadu vystřelují atomy z terčíku (katody) a kondenzují na substrátu umístěného do blízkosti katody. Před začátkem celého procesu naprašování je potřeba vysokého vakua, zpravidla vyššího než 10^{-6} mbar. Vyšší vakuum omezuje kontaminaci vzorku nečistotami (prachem, biologické nečistoty,...) a zvyšuje střední volnou dráhou atomů vystřelených z terče. Následně je do depoziční komory vpouštěn pracovní plyn a to v takovém množství, aby zajistil průběh doutnavého výboje a zároveň neomezil střední volnou dráhu atomů letících od terčíku k

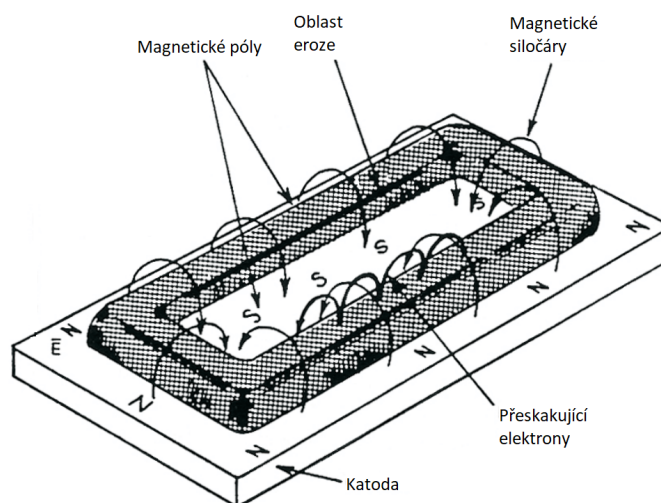


OBRÁZEK 3.4: Schéma putování elektronů a aniontu mezi elektrodami

substrátu. Jinými slovy: příliš pracovního plynu zpomaluje proces a málo pracovního plynu způsobuje nestabilní výboj při naprašování. Pro zajištění konstantní úrovně vakua, je vpuštěný plyn stále odsávám z komory pomocí vakuových pump. Pro tyto účely se nejčastěji využívá argon. V případě že je připravovaný materiál připravován prostřednictvím chemické reakce, je využito příměsi reaktivního plynu, jenž může být kyslík, dusík nebo například metan. Pomocí kyslíku připravujeme oxidy, pomocí dusíku nitridy a pomocí metanu lze připravovat karbidy. Následný pracovní tlak v komoře je přibližně 10^{-3} až 10^{-1} mbar. Lepší ionizační vlastnosti, můžeme získat zvýšením délky dráhy letu elektronů pomocí magnetického pole, tedy pomocí přidání magnetronu do systému. Následný proces tedy nazýváme magnetronové naprašování (zobrazeno na Obrázku 3.5). Při této sestavě je magnetické pole vytvořeno v popředí katody a zachycuje vyražené elektrony vyražené. Zachycené elektrony se následně spirálovitě točí podél magnetických siločar a v oblasti, kde jsou elektrické a magnetické pole navzájem kolmé, budou "skákat" po povrchu terče. [11]

3.1.1 DC a FR naprašování

Depozice pomocí DC doutnavého výboje je vhodná pro naprašování vodivých materiálů, ale pro izolátory/nevodivé materiály je lepší depozice pomocí RF-výboje. Jsou využívány vysoko frekvenční výboje, jež jsou vyšší než 100 kHz a dosahují maximálně gigahertzových řádů. Nejčastěji využívána frekvence je 13,56 MHz, jež je mezinárodně povolena pro technické potřeby.[11]



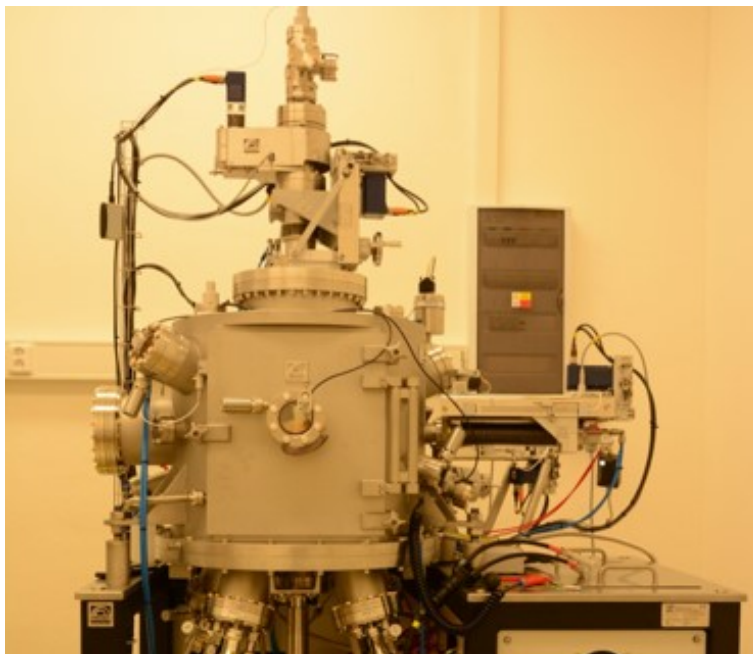
OBRÁZEK 3.5: Magnetické pole nad povrchem terče pro lokalizaci elektronů [13]

Jakmile je RF výboj zažehnut, dojde k negativnímu nabití obou elektrod, střídavě podle elektronů, které jsou schopné putovat po rychle se střídajícím elektrickém poli. Vzhledem k tomu že ionty z výboje jsou příliš pomalé pro kompenzaci negativního náboje během druhé části cyklu proměnlivého pole, je potřeba aby na obou elektrodách byl konstantní negativní náboj, který vede k negativnímu potenciálu v okolí tvorby plazmy. Velikost toho potenciálu závisí na poměru oblastí obou elektrod. Platí totiž že menší elektrody se více negativně nabíjejí. [11]

3.1.2 Využitý naprašovací systém

Pro depozici byl využit depoziční systém z polské firmy PREVAC sp. z o.o. Tento depoziční systém je sestaven ze 4 magnetronů, s dvěma DC a dvěma RF zdroji. Taktéž umožňuje depozici v reaktivní kyslíkové atmosféře, případně dusíkové. Na Obrázku 3.6 můžeme vidět tento depoziční systém.

Daný systém využívá dvou vakuových pump (z toho jedné turbomolekulární) pro dosažení vakua 10^{-6} mbar. Systém umožňuje kontrolu rychlosti depozice při daných depozičních podmínkách pomocí křemenného oscilátoru. Do systému jsou přiváděny pracovní plyny a to buď přímo do používaných magnetronů, nebo do směsné komory. Systém umožňuje použití argonu, kyslíku, dusíku a jejich kombinace jako pracovního plynu. Ten kmitá na vlastní frekvenci a depozicí materiálu na quartz dochází ke změně frekvence jeho vibrací, z nichž lze odvodit deponovanou tloušťku a depoziční rychlost deponovaného materiálu. Pro zajištění homogenity tlouštěk deponovaných materiálů, lze nastavit vzdálenost substrátu od terčů a také zajištění rotace vzorku. Depozici lze provádět až na čtyřech magnetronech: 2 pro DC naprašování a 2 pro RF naprašování. Všechny magnetrony



OBRÁZEK 3.6: Vakuová komora depozičního systému Prevac

lze uzavřít pomocí klapek, jenž zruší depozici do vakuové komory a na vzorek. Vzorek jako takový je opatřen vlastní klapkou. Systém umožňuje iontové čištění vzorků. Celý systém lze je napojen na ovládací rack a počítač odkud lze celou aparaturu ovládat.

3.2 Elipsometrie

Elipsometrie, jakožto nedestruktivní optická metoda, je široce užívaná pro optickou charakterizaci materiálů. Tato metoda je založena na měření změny polarizačního stavu světla, které je odraženo (nebo propuštěno) studovaným vzorkem. Elipsometrie má široké spektrum využití: je běžně užívaná pro optickou analýzu vzorků a monitorování tenkých vrstev v reálném čase. Výhody elipsometrie jsou ve vysoké přesnosti měření a velké citlivosti na tloušťku ve srovnání s ostatními standardními metodami založenými na intenzitních měřeních. Jakožto nepřímá metoda, je potřeba pro určení požadovaných parametrů vytvořit optický model a ten následně nařítovat. Pro zkoumaný vzorek musíme znát alespoň přibližné optické konstanty a strukturou vzorku. [14] Velikost dopadového místa světelného paprsku je další faktor, který může ovlivnit měřená data. [14][15]

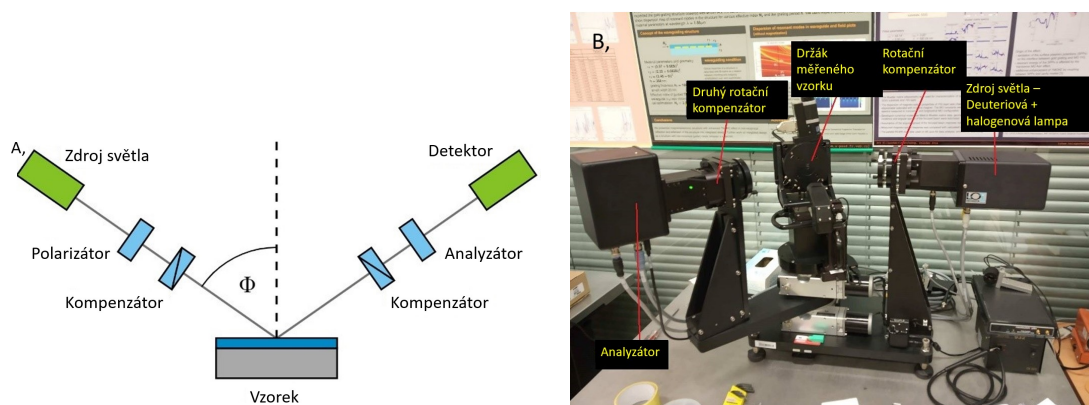
3.2.1 Aplikace spektroskopické elipsometrie

Spektroskopická elipsometrie byla vyvinuta pro vyhodnocení optických funkcí a tloušťek vzorků tenkých vrstev. Mnoho z uvedených měření se provádí pomocí ex-situ konfigurace. Ex-situ měření vzorku znamená, že měření se většinou provádí na hotovém vzorku/strukturách. In-situ, znamená, že vzorek je měřen během výroby, tj. během procesu nanášení tenkých vrstev.[14]

Spektroskopická elipsometrie měří Mullerovy matice a z nich následně počítá elipsometrické úhly Δ a ψ v závislosti na energii fotonů nebo vlnových délek λ . Pro dobrou analýzu dat je tedy potřebný optický parametrický model. Z optického modelu můžeme určit optické vlastnosti, jako jsou tloušťky vrstev nebo optické konstanty studovaných materiálů.[14]

3.2.2 Použitý elipsometr - Woolam RC2-DI

Elipsometr používaný pro tuto práci (Woollam RC2-DI) měří v rozsahu od blízkého infračerveného spektra do blízkého ultrafialové spektra v spektrální oblasti (193 - 1700 nm). Obrázek 3.7 ukazuje konfiguraci optických částí. [16]



OBRÁZEK 3.7: A, schéma elipsometru B, použitá konfigurace na elipsometru Woolam RC2-DI [16]

V elipsometru je nepolarizované světlo polarizátorem polarizováno na lineárně polarizované světlo. Poté světlo projde prvním rotujícím kompenzátoem kde je polarizační stav světla periodicky modulován v závislosti na otočení kompenzátoem. V dalším kroku světlo dopadne na vzorek a následně je analyzováno pomocí druhého kompenzátoem, kdy analyzované světlo projde polarizátorem a difrakční mřížkou. Následně se výsledný signál měří CCD kamerou, jež je pomocí softwaru CompleteEASE s využitím kalibračních dat převeden na spektroskopická elipsometrická data.

3.3 Modelování a optimalizace spektroskopického modelu

Ke kvantifikaci, zda optický model vyhovuje naměřeným datům, se pro spektroskopické měření používá MSE (střední kvadratická chyba) k určení chyby. MSE je definována pomocí

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{3n - M} \sum_{i=1}^n \frac{[(N_{E_i} - N_{G_i})^2 + (C_{E_i} - C_{G_i})^2 + (S_{E_i} - S_{G_i})^2]}{|\sigma_i|^2}}, \quad (3.1)$$

kde M je počet fitovaných parametrů a σ_i je chyba experimentálních dat. Funkce MSE spočívá v tom, že na všech měřených vlnových délkách sčítá čtverce rozdílů mezi měřenými daty (parametry popsané jako E) a data generovaná modelem (parametry popsané jako G). Čím nižší je MSE, tím lépe jsou fitována data a přesnější je i model. V softwaru CompleteEASE je rozdíl mezi naměřenými daty a modelem generovanými daty vyjádřenými pomocí N , C , a S parametry (Rovnice 3.2), jež jsou následněm vztahu s elipsometrickými úhly ψ a Δ definováno jako

$$N = \cos(2\psi), \quad (3.2a)$$

$$C = \sin(2\psi) \cos(\Delta), \quad (3.2b)$$

$$S = \sin(2\psi) \sin(\Delta), \quad (3.2c)$$

Pro popis použitých materiálů používáme následující optické modely. Sellmaierův model využíváme pro popis dielektrik u kterých předpokládáme nulové absorpce. Permittivita ϵ pro Sellmeierův model je definováno jako

$$\epsilon = n^2 = \epsilon_\infty + \sum_j \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}. \quad (3.3)$$

V této rovnici vyjadřují konstanty ϵ_∞ příspěvek absorpcí pro vyšší energie, B_j je amplituda j -té vrstvy a λ_0 centrální vlnová délka.

Pro popis amorfních polovodičů je také možné využít Tauc-Lorentzův model. Tento model využívá Lorentzův tlumený harmonický oscilátor

$$\epsilon_{DHO} = \frac{A_0}{E_0^2 - E^2 + i\Gamma_0 E}, \quad (3.4)$$

a Taucovu absorpční hranu E_g

$$\epsilon_{TL} = A_1 \frac{(E - E_g)^2}{E^2}, \quad (3.5)$$

Imaginární část dielektrické funkce tedy následně můžeme popsat jako

$$\epsilon_2(E) = \begin{cases} \frac{AE_0C(E-E_g)^2}{(E^2-E_0^2)^2+C^2E^2} \frac{1}{E}; & E > E_g \\ 0; & E_g \leq E. \end{cases} \quad (3.6)$$

Reálnou část dielektrické funkce získáme z Kramers-Kronigových vztahů pomocí následné funkce

$$\epsilon_1 = \epsilon_{1\infty} + \frac{2}{\pi} V.P. \int_{E_g}^{\infty} \frac{E' \epsilon_2(E')}{E'^2 - E^2} dE'. \quad (3.7)$$

Model Cody-Lorentz je odvozený z modelu Tauc-Lorentz (TL). Tento model můžeme pro $E < E_g$ popsat jako

$$\epsilon_{nC-L} = \epsilon_{n1} + i\epsilon_{n2}, \quad (3.8)$$

kde

$$\epsilon_{n2}(E) = \begin{cases} \frac{E_1}{E} \exp\left(\frac{(E-E_{gn}-E_{tn})}{E_{un}}\right); & 0 < E < E_{(gn)} + E_{tn} \\ G(E)L(E) = \frac{(E-E_{gn})^2}{(E-E_{gn})^2+E_{pn}^2} \cdot \frac{A_n E_0 n \Gamma_n E}{[(E^2-E_0^2)^2+\Gamma_n^2 E^2]}; & E > (E_{gn} + E_{tn}) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$E_1 = (E_{gn} + E_{tn})G(E_{gn} + E_{tn})L(E_{gn} + E_{tn}) \quad (3.10)$$

kde $G(E)$ je funkce poblíž band gapu, energie zakázaného pásu E_g , Lorenzova absorpční hrana (Parametry A_n , E_0 a B_r), energie přenosu (E_p , E_t) a $L(E)$ je Lorentzův oscilátor

$$\epsilon_{n1} = \frac{2}{\pi} P \int_0^{(\text{inf})} \frac{\xi \epsilon_{n2}(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi. \quad (3.11)$$

Kapitola 4

Vývoj materiálů pro přípravu fotonického krystalu a jejich optická charakterizace

Na začátku této kapitoly byla provedena rešerše materiálů pro přípravu SiO_2 a Ta_2O_5 , z nichž byly vyvozeny počáteční depoziční podmínky pro tyto materiály. Následně byly provedeny experimenty depozičních podmínek těchto materiálů. Výsledky těchto experimentů: optické funkce, depoziční parametry jakožto i depoziční rychlosti. Jednotky uváděné jako sccm jsou definované jako standardní centimetr krychlový za minutu, neboli cm^3/min .

4.1 Rešerše předpokládaných depozičních podmínek

Před přípravou samotných vzorků a jejich charakterizací byla provedena rešerše dosavadních vědeckých výsledků v oblasti přípravy SiO_2 a Ta_2O_5 pomocí magnetronového naprašování. Byly hlavně porovnávány poměry plynů a jejich parciální tlaky v komoře.

Zdroj:	Proud Ar [cm ³ /min]	Proud O ₂ [cm ³ /min]	Počáteční tlak [mbar]	Tlak s argonem [mbar]	Tlak s kyslíkem [mbar]	Celkový tlak [mbar]	Reaktivní/Nereaktivní
Článek [17]	80	35	2,67E-07	-	-	6,67E-03	Reaktivní
Článek [18]	50	15-30	1,07E-06	-	-	1,33E-02	Reaktivní
Článek [19]	60	%10-90	1,33E-06	-	-	-	Reaktivní
Článek [20]	60	20	1,33E-06	-	-	4,00E-03	Reaktivní
Článek [21]	4	1	-	-	-	3,00E-03	Nereaktivní
Článek [22]	-	-	2,67E-06	1,00E-02	-	1,00E-02	Nereaktivní
Článek [23]	-	-	2,00E-06	-	1,00E-04	1,00E-03	Reaktivní
Článek [24]	-	-	2,00E-06	-	1,00E-04	1,00E-03	Reaktivní
Článek [25]	100	36	-	-	-	6,80E-03	Nereaktivní
Článek [26]	5	30	9,3310 ⁻³	-	-	-	Reaktivní

TABULKA 4.1: Depoziční parametry pro Ta_2O_5 nalezené v příložených studích.

Zdroj:	Proud Ar [cm ³ /min]	Proud O ₂ [cm ³ /min]	Počáteční tlak [mbar]	Tlak s argonem [mbar]	Tlak s kyslíkem [mbar]	Celkový tlak [mbar]	Reaktivní/ Nereaktivní
Článek [27]	70	70	-	-	-	4,00E-03	Reaktivní
Článek [28]	70-100%	0-30% celkové směsi	-	-	-	7,00E-03	Nereaktivní
Článek [29]	40	0-20	0,02	-	-	0,02-0,035	Nereaktivní
Článek [30]	60	1,2	2E-07	-	-	0,01	Reaktivní
	96	1,2	2E-07	-	-	0,03	Reaktivní
Článek [21]	4,8	0,2	-	-	-	0,008	Nereaktivní

 TABULKA 4.2: Depoziční parametry pro SiO₂ nalezené v příložených studiích.

Z těchto studií jsme následně určili startovací podmínky pro naši studii těchto materiálů. Pro Ta₂O₅ jsme určili jako výchozí průtoky Ar=50 sccm a pro O₂=10 sccm parciální tlak $p=4,5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon jsme určili jako $P=75W$. Pro SiO₂ Ar=20 sccm, pro O₂=5 sccm $p=4,5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon jsme určili jako $P=65W$.

4.2 Příprava Ta₂O₅ materiálu a určení jeho optických funkcí

Cílem následující studie bylo určení nejvíce optimální depoziční podmínky a zjištění optických funkcí materiálů takto připravených. Velký důraz byl kladen na co nejnižší absorpce, aby materiál zůstal maximálně transparentní v oblasti zakázaného pásu. Depoziční podmínky se měnily tak, aby při jedné studii zůstal konstantní tlak a při druhé konstantní poměr průtoku vpouštěných plynů. Sledujeme tedy parametry Ar [sccm] proud argonu, poměr argonu ke kyslíku Ar/O₂ a parciální tlaky p v závislosti na Ar, nebo O₂. Všechny vzorky byly připraveny metodou magnetronového naprašování s konstantním výkonem $P = 75W$ na substrát CG-glass. Tento substrát o rozměrech 25x25 mm a tloušťce 1,1 mm byl využit jako standart pro všechny depozice. Depoziční podmínky vzorků jsou shrnuty v tabulce 4.3 a 4.4.

Název vzorku	Ar (sccm)	$p(\text{Ar})$ (mbar)	$p(\text{O}_2+\text{Ar})$ (mbar)	Depoziční čas (s)	Tloušťka vrstvy (nm)	Depoziční rychlost [nm/min]
TaR1	75	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	7200	550,55	4,588
TaR2	62,5	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	7200	577,92	4,816
TaR/P3	50	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	27755	2374,83	5,134
TaR4	25	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	7200	660,91	5,508

TABULKA 4.3: Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním poměru průtoků pracovních plynů. Průtok kyslíku byl udržován na 20% průtoku argonu

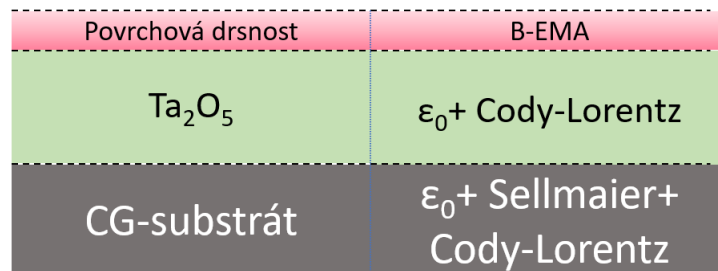
Připravené vzorky tenkých vrstev referenčních materiálů byly charakterizovány a modelovány s využitím dat ze spektroskopické elipsometrie a transmitance při kolmém dopadu. Vzorky byly elipsometricky změřeny pro úhly dopadu v rozmezí od 35° do 85°. K těmto elipsometrickým datům byla ještě přidána data z transmise vzorku na stejném místě. Naměřená elipsometrická data všech vzorků uvedených v tabulkách 4.4 a 4.3 pro úhel 65°

Název vzorku	Ar/O ₂ (sccm)	p(Ar) (mbar)	p(O ₂ +Ar) (mbar)	Depoziční čas (s)	Tloušťka vrstvy (nm)	Depoziční rychlost [nm/min]
TaP1	11	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	7200	812,44	6,770
TaP2	7	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	7200	713,14	5,943
TaR/P3	5	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	27755	2374,83	5,134
TaP4	3,8	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	7200	552,45	4,604
TaP5	3	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	7200	472,68	3,939

TABULKA 4.4: Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním nepozičním tlaku a proudu pracovních plynů 60 sccm

a jejich porovnání s modelem daných materiálů jsou zobrazena v Obrázku 4.2 pro srovnávací vzorek TaP1 a pak následně v příloze Obrázky A.1 až A.4. Naměřená data byla v programu CompleteEASE fitována optickými modely popisující spektrální průběh optických konstant a strukturu schematicky znázorněnou na Obrázku 4.1. Vzhledem k tomu, že Ta₂O₅ je amorfni materiál, u kterého se předpokládá, že šířka zakázaného pásu bude spadat do studované oblasti (přibližně 800nm), byl pro modelování nejdříve využit Tauc-Lorentzův model a Cody-Lorentzův model, přičemž Cody-Lorentzův model dokázal lépe popsat chování materiálu Ta₂O₅. Můžeme vidět, že použité modely věrohodně popisují naměřená data a tedy modely lze považovat za použitelné/vhodné.

Fitované parametry modelu jsou uvedeny v Tabulkách 4.5 a 4.6. Zde se krom Cody-Lorentzova modelu vyskytuje i pól infračerveného spektra a pól ultrafialového spektra. Pól infračerveného spektra představuje zjednodušený Drudeho člen a zahrnuje optické absorpce v infračerveném spektru. Ultrafialový pól představuje tlumená harmonický oscilátor mimo měřené spektrum a fituje se jeho amplituda. Výsledné optické funkce jsou na Obrázcích 4.3 až 4.4. Pro strukturní popis zkoumaných vzorků můžeme použít schematicky popis v Obrázku 4.1 a rovnici 4.1 popisující permitivitu Ta₂O₅ vrstvy



OBRÁZEK 4.1: Schematicky model měřených vzorků

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_{CL} + \epsilon_{IR} + \epsilon_{UV} \quad (4.1)$$

Z daných dat můžeme usoudit, že zvolené depoziční podmínky mají podobné optické konstanty, všechny s téměř nulovou absorpcí do cca 3,5 eV. Taktéž je jasně vidět, že

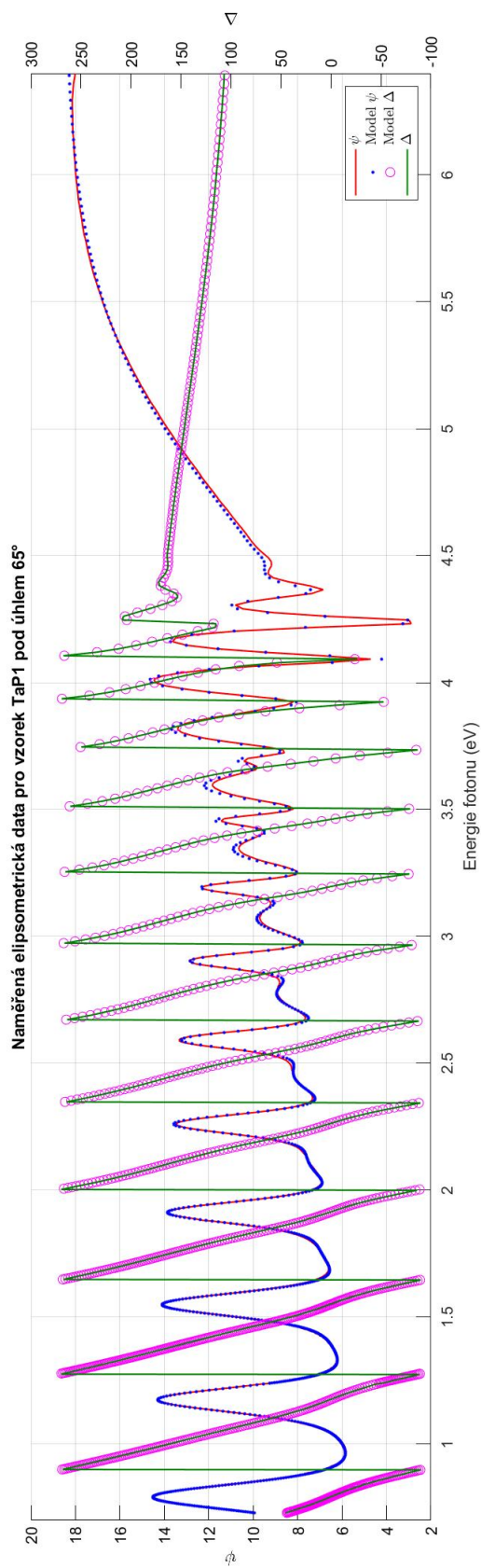
depoziční rychlost s klesajícím tlakem v komoře stoupá a tantal je natolik nasycen, že již nepotřebuje další kyslík pro stechiometrickou depozici Ta_2O_5 , naopak depozici prospívá zvýšení koncentrace nosného plynu. Byly sestrojeny Obrázky 4.5 a 4.6 sledující závislost rychlosti depozice na zkoumaných podmínkách. Pro depozici je tedy nejvhodnější zvolit depoziční podmínky s nejvyšším depoziční rychlostí: to jsou 5 sccm O_2 a 55 sccm Ar (vzorek TaP1). Je možné že výsledek by byl ještě lepší pokud by došlo ke snížení proudu kyslíku a zvýšení proudu argonu. Experimentálně však nebylo dosaženo konstantního výboje.

Ta ₂ O ₅													
Cody Lorentz													
Drsnost	Tloušťka	Einf	UV Pole Amp.	UV Pole En.	IR Pole Amp	A _n	Γ _n	E _{0n}	E _{gn}	E _{pn}	E _{tn}	E _{un}	Depoziční rychlost
(nm)	(nm)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm/min)
TaR1	550,55	0,95	149,63	12	0,04	389,15	1,71	5,07	3,93	8,29	0,55	0,12	4,59
TaR2	577,92	0,87	146,87	12	0,05	544,43	1,71	5,10	3,89	10,10	0,61	0,12	4,82
TaR/P3	2374,83	0,88	148,96	12	0,03	343,81	1,74	5,10	3,98	7,34	0,28	0,10	5,13
TaR4	660,91	0,86	153,32	12	0,04	421,48	1,66	5,09	3,98	8,30	0,47	0,12	5,51

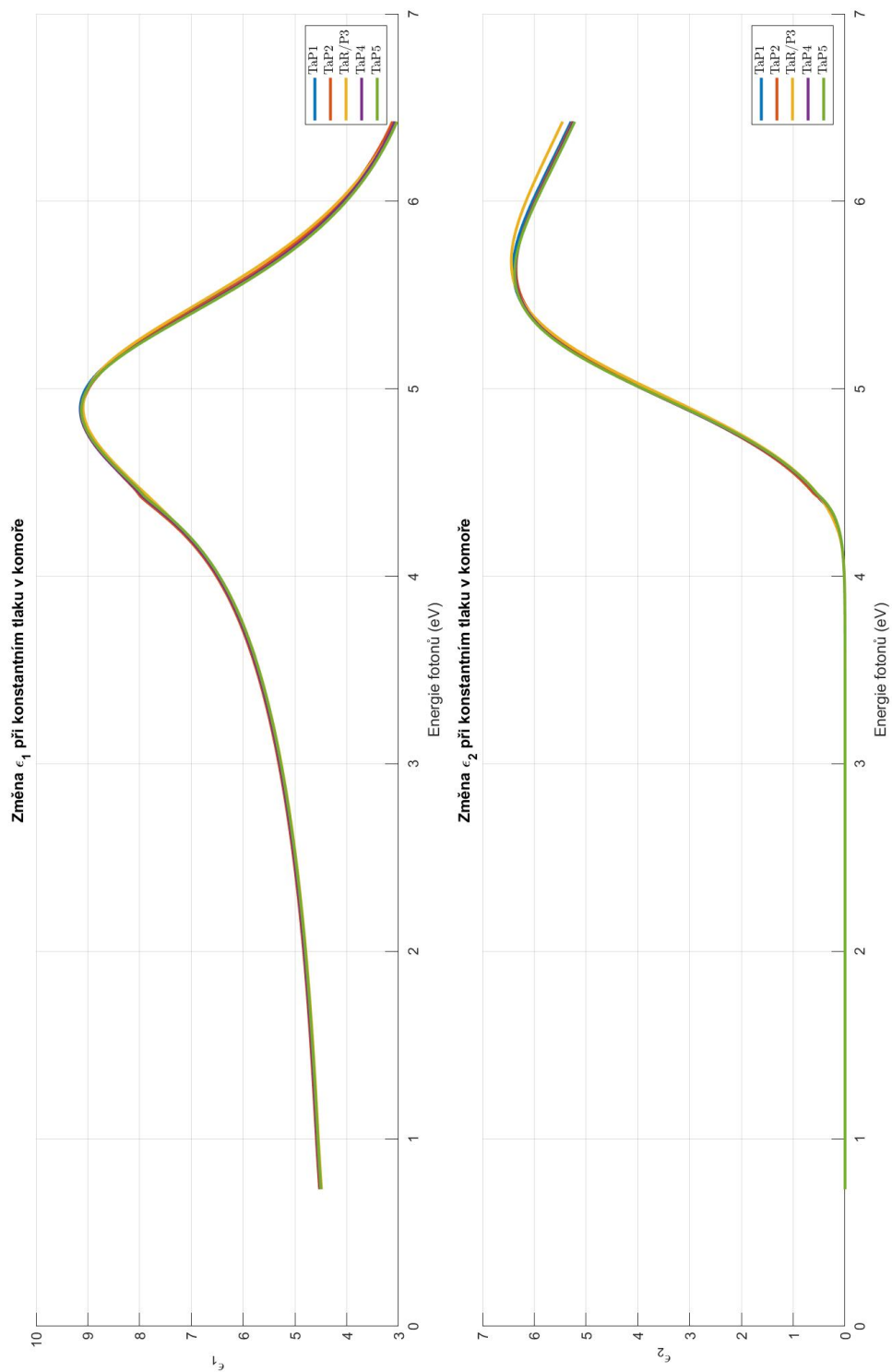
 TABULKA 4.5: Fitované parametry (tučně) studie deponování Ta₂O₅ vrstvy při konstantním poměru proudů depozičních plynů

Ta ₂ O ₅													
Cody Lorentz													
Drsnost	Tloušťka	Einf	UV Pole Amp.	UV Pole En.	IR Pole Amp	A _n	Γ _n	E _{0n}	E _{gn}	E _{pn}	E _{tn}	E _{un}	Depoziční rychlost
(nm)	(nm)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(eV)	(nm/min)
TaP1	812,44	0,79	160,38	12	0,03	454,15	1,67	5,10	3,95	8,75	0,46	0,11	6,77
TaP2	713,14	0,78	162,29	12	0,04	467,47	1,69	5,10	3,93	9,03	0,51	0,12	5,94
TaR/P3	2374,83	0,88	148,96	12	0,03	343,81	1,74	5,10	3,98	7,34	0,28	0,10	5,13
TaP4	552,45	0,85	157,18	12	0,04	426,61	1,66	5,08	3,97	8,33	0,47	0,12	4,60
TaP5	472,68	0,86	145,59	12	0,03	505,89	1,63	5,09	3,97	9,17	0,47	0,12	3,94

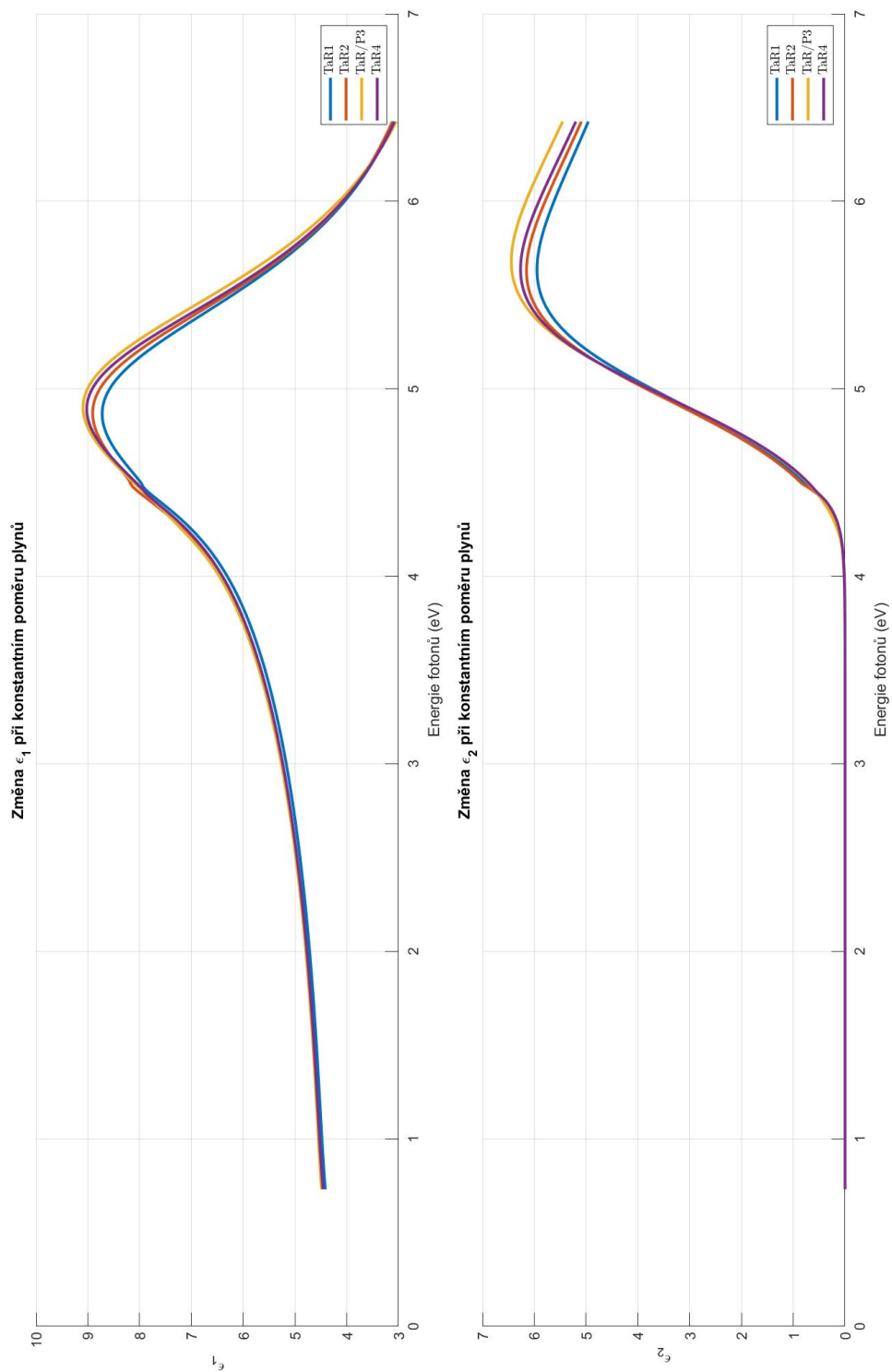
 TABULKA 4.6: Fitované parametry (tučně) studie deponování Ta₂O₅ vrstvy při konstantním tlaku



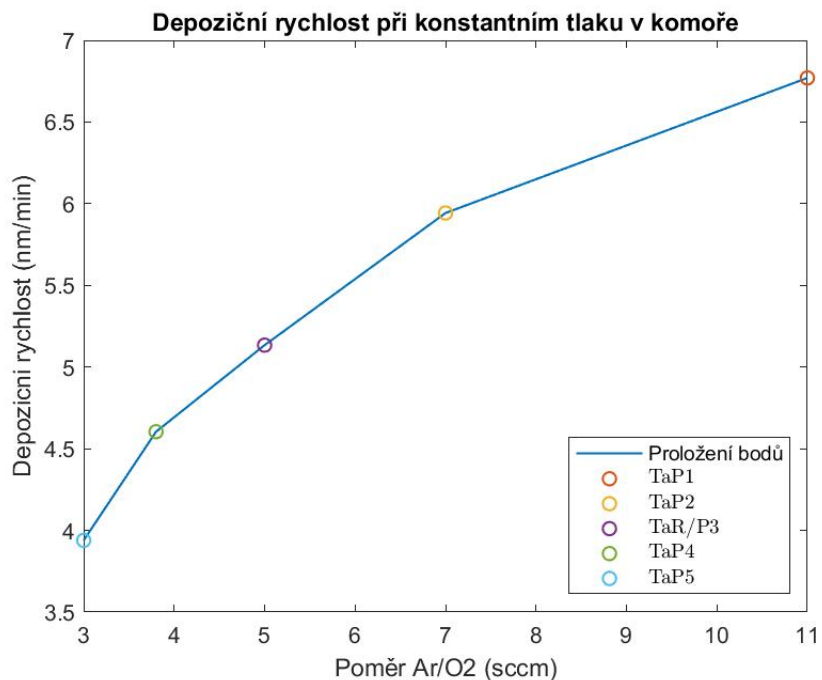
OBRÁZEK 4.2: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorek TaR1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální ellipsometrická data. Vzorek TaR1 byl použit pro přípravu fotonického krystalu, neboť jeho depoziční rychlost byla nejvyšší



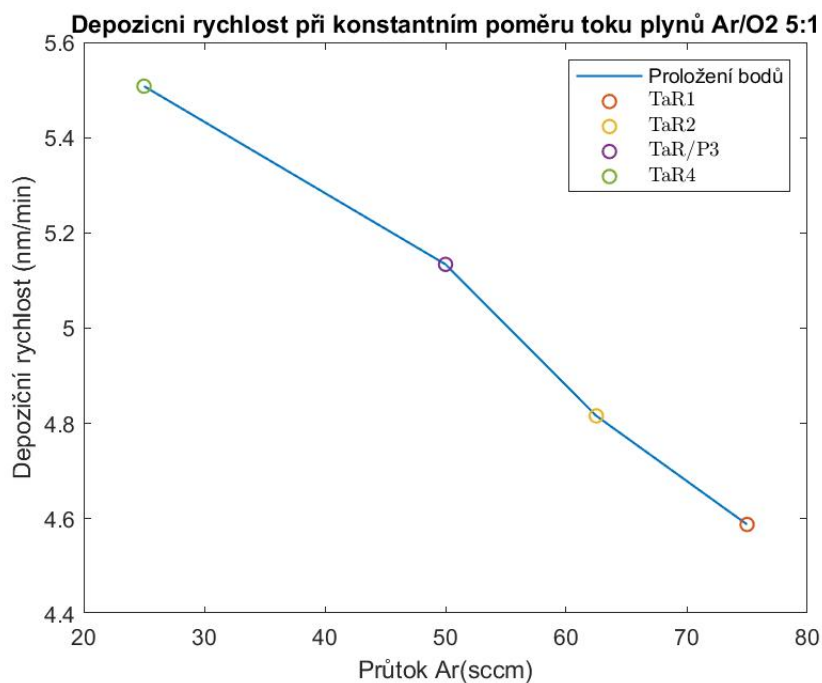
OBRÁZEK 4.3: Optické konstanty pro studii s konstantním tlakem v komoře. Z dat vidíme že materiály zůstávají přibližně stejné při námi zvolených deponičních podmínkách a v oblasti zakázaného pásu jsou neabsorbující. ϵ_1 zde vyjadřuje reálnou část dielektrické funkce a ϵ_2 zde vyjadřuje imaginární část dielektrické funkce.



OBRÁZEK 4.4: Optické konstanty pro studii s konstantním poměrem proudů depozičních plynů. Z dat vidíme, že materiály zůstávají přibližně stejné při námi zvolených depozičních podmínkách a v oblasti zakázaného pásu jsou neabsorbující. ϵ_1 zde vyjadřuje reálnou část dielektrické funkce a ϵ_2 zde vyjadřuje imaginární část dielektrické funkce.



OBRÁZEK 4.5: Depoziční rychlost při konstantním tlaku v komoře a celkovému průtoku plynů 60 sccm



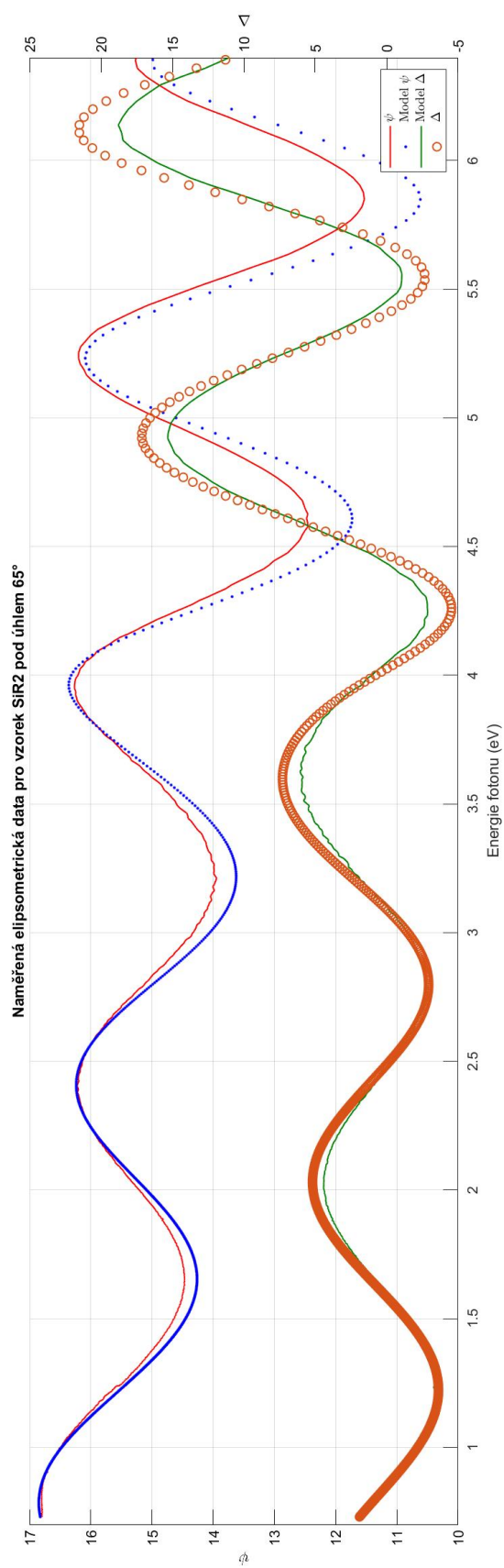
OBRÁZEK 4.6: Depoziční rychlost při konstantním poměru toku plynů Ar/O₂ 5:1

4.3 Příprava SiO₂ materiálu a určení jeho optických funkcí

Podobně jako v minulé kapitole, tak i pro SiO₂ jsme hledali ideální depoziční podmínky a sledovali změnu optických funkcí. Depoziční podmínky se měnily tak aby byl zachován poměr pracovních plynů Ar a O₂. Opět byl kladen důraz na transparentnost SiO₂ vrstvy. Všechny vzorky byly připraveny na Cg-substrát pomocí magnetronového naprašování. Depoziční podmínky jsou v tabulce 4.7. Deponované vzorky byly změřeny pomocí Mullerových matic pro úhly 65°-70° s krokem 5°. Naměřená data pro úhel 65° jsou zobrazena níže. Pro modelování SiO₂ byl využit Sellmairův model jakožto model pro amorfni transparentní materiál. Předtím se testoval i Tauc-Lorentzův model, ale Sellmairův model dokázal lépe popsat spektroskopickou odezvu připravených vzorků. Fitoované parametry jsou v tabulce 4.8. Na Obrázku 4.8 jsou zobrazena naměřená a modelová elipsometrická data pro vzorek s nejvyšší nanášecí rychlostí. Na Obrázku 4.7 je pak zobrazeno srovnání dielektrických konstant ϵ_1 pro zkoumané SiO₂ vzorky. Další vzorky jsou uvedeny v přílohách v obrázcích A.5 a A.6.

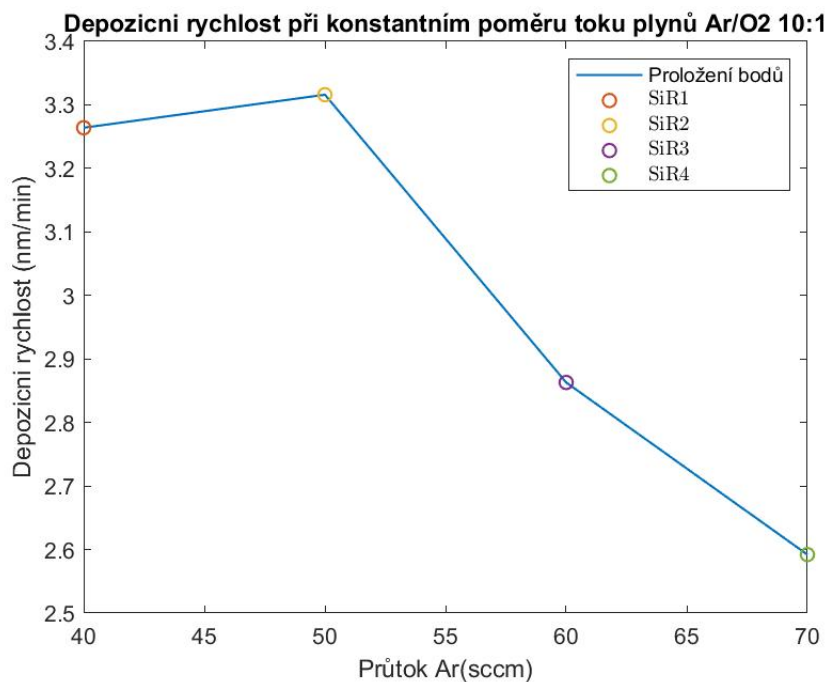
Název vzorku	Ar (sccm)	p(Ar) (mbar)	p(O ₂ +Ar) (mbar)	Depoziční čas (s)	Tlušťka vrstvy (nm)	Depoziční rychlost [nm/min]
SiR1	40	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	7200	391,69	3,264
SiR2	50	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	36000	1989,32	3,316
SiR3	60	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	7200	343,5	2,863
SiR4	70	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	7200	311	2,592

TABULKA 4.7: Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním poměru proudu plynů. Průtok kyslíku byl vždy průtokem argonu. Vzorky byly připraveny pod konstantním výkonem 75W



OBRÁZEK 4.8: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorek SiR2, jenž vyšel jako nejoptimálnější pro depozici

Z daných dat můžeme usoudit, že zvolené depoziční podmínky mají odlišné optické konstanty, všechny však s nulovou absorpcí. Z dat lze předpokládat, že nejlepší by měl být vzorek SiR2. Nejlepší depoziční podmínky tedy jsou 5 sccm O₂ a 50 sccm Ar.



OBRÁZEK 4.9: Optické konstanty pro studii s konstantním poměrem proudů depozičních plynů. $\epsilon_2 = 0$

4.4 Přehled optimálních depozičních podmínek

Díky předchozím studiím byly tedy určeny optimální depoziční podmínky a optické funkce takto připravovaných materiálů. Depoziční podmínky jsou v tabulce 4.9 a spektroskopické modely jsou v tabulce 4.10

Název	vzorku	TaP1	SiR2
Materiál		Ta ₂ O ₅	SiO ₂
Terčik		Ta	Si
Zdroj		RF	RF
Ar	(sccm)	55	50
p(Ar)	(mbar)	4,2·10 ⁻³	3,8·10 ⁻³
O ₂	(sccm)	5	5
p(Ar+O ₂)	(mbar)	4,6·10 ⁻³	4,2·10 ⁻³
P	(W)	75	75
Depoziční čas	(s)	7200	36000
Tloušťka vrstvy	(nm)	812,44	1989,32
Depoziční rychlost	[nm/min]	6,770	3,316

TABULKA 4.9: Depoziční parametry optimálních materiálů pro přípravu požadovaného fotonického krystalu

			SiR4	TaP1
	Drsnost	(nm)	7,36	1,61
	Tloušťka	(nm)	311,85	812,44
	Einf	(eV)	0,00	0,79
	UV Pole Amp.	(eV)	0,00	160,38
	UV Pole En.	(eV)	11	12
	IR Pole Amp	(eV)	0,02	0,03
Sellmeier	A	(eV)	510,54	-
	E	(eV)	16,00	-
Cody Lorentz	Amp	(eV)	-	454,15
	Br	(eV)	-	1,67
	E0	(eV)	-	5,10
	Eg	(eV)	-	3,95
	Ep	(eV)	-	8,75
	Et	(eV)	-	0,46
	Eu	(eV)	-	0,11

TABULKA 4.10: Parametry spektroskopického modelu optimálních materiálů pro přípravu požadovaného fotonického krystalu. Fitované parametry jsou zvýrazněny tučně

Kapitola 5

Příprava fotonického krystalu

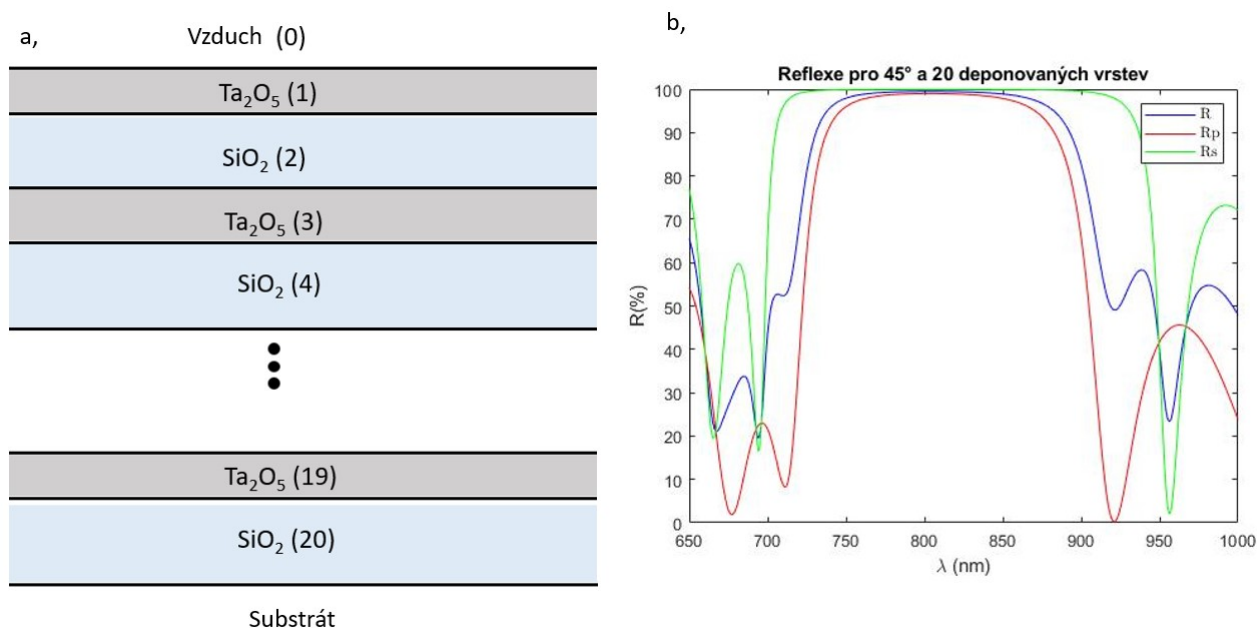
V této kapitole je na začátku prezentován způsob návrhu fotonického krystalu a jeho následná depozice. Odhalení vzniklých problémů a na následná kompenzace nepřesně depozice tloušťek.

5.1 Návrh fotonického krystalu

Aby interferenční jev byl maximální pro fotonický krystal pro vlnovou délku 800nm, musí tloušťky vrstev splňovat následující rovnici:

$$d = \frac{\lambda}{4n} \cos \alpha \quad (5.1)$$

kde d je tloušťka daného materiálu, λ je vlnová délka na niž požadujeme maximální reflexi, n je index lomu daného materiálu a α je úhel dopadu. Přičemž díky studiím námi připravených materiálů víme, že index lomu (pro vlnovou délku 800 nm) SiO_2 a Ta_2O_5 je $n_{\text{SiO}_2}=1,46$ a $n_{\text{Ta}_2\text{O}_5}=2,17$. Díky tomu jsme určili, že potřebná nanášená tloušťka vrstvy SiO_2 by ideálně měla být 150,08 nm a tloušťka Ta_2O_5 by měla být 103,14 nm. Dle ideálních podmínek uvedených na konci předchozích Kapitol 4.2 a 4.3, jsme pro depozici Ta_2O_5 využili podmínky vpouštění plynů: 5 sccm O_2 a 55 sccm Ar (vzorek TaP1) a pro SiO_2 SiR4 (viz tabulka 4.9). Tyto podmínky zajistily maximální depoziční rychlost 6,770 nm/min, pro Ta_2O_5 , a vrstva by se ideálně měla deponovat 914 vteřin. Pro SiO_2 by byla maximální depoziční rychlost 2,592 nm/min a vrstva by se ideálně měla deponovat 3474 vteřin. Pokud bychom nanесли 20 takových ideálních tloušťek (10 vrstev SiO_2 a 10 vrstev Ta_2O_5) na CG-substrát dle schéma na Obrázku 5.1a, tak bychom dostali výslednou reflexi 99,39% dle Obrázku 5.1b,.

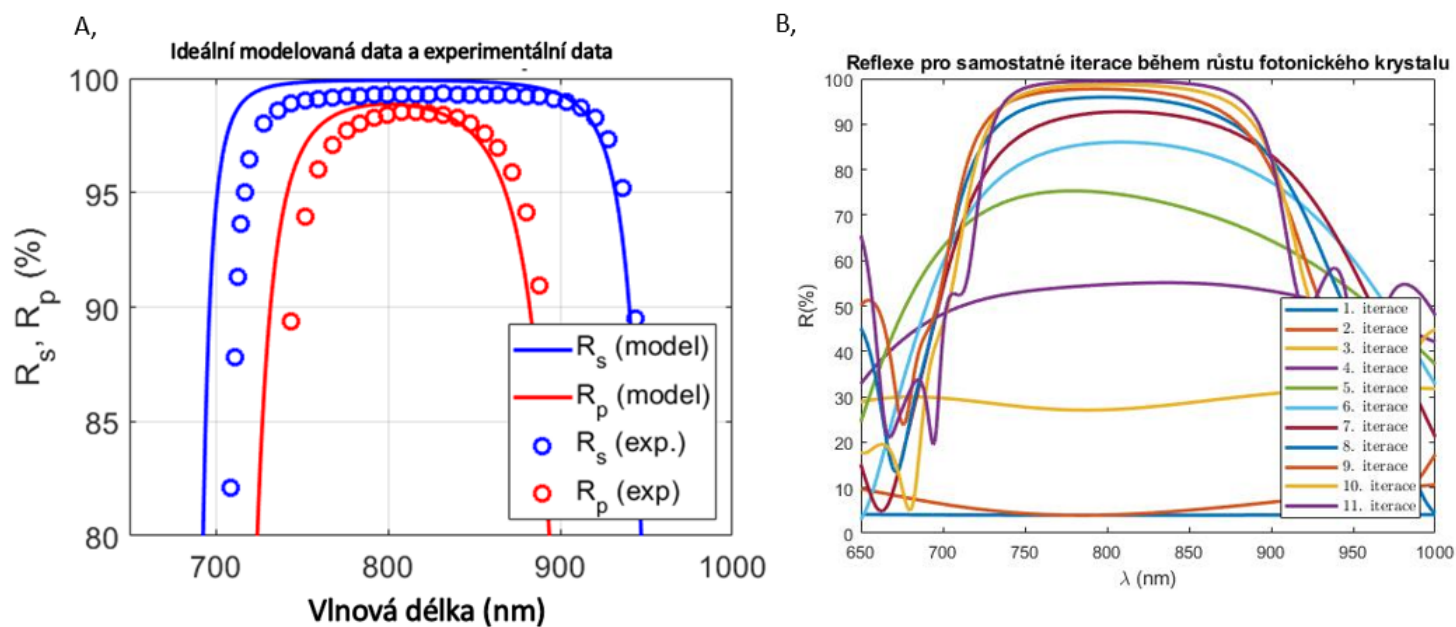


OBRÁZEK 5.1: a, Schéma depozice jednotlivých vrstev b, Modelová reflektivita fotonického krystalu s 20 vrstvami Ta₂O₅/SiO₂, kde R je reflektivita

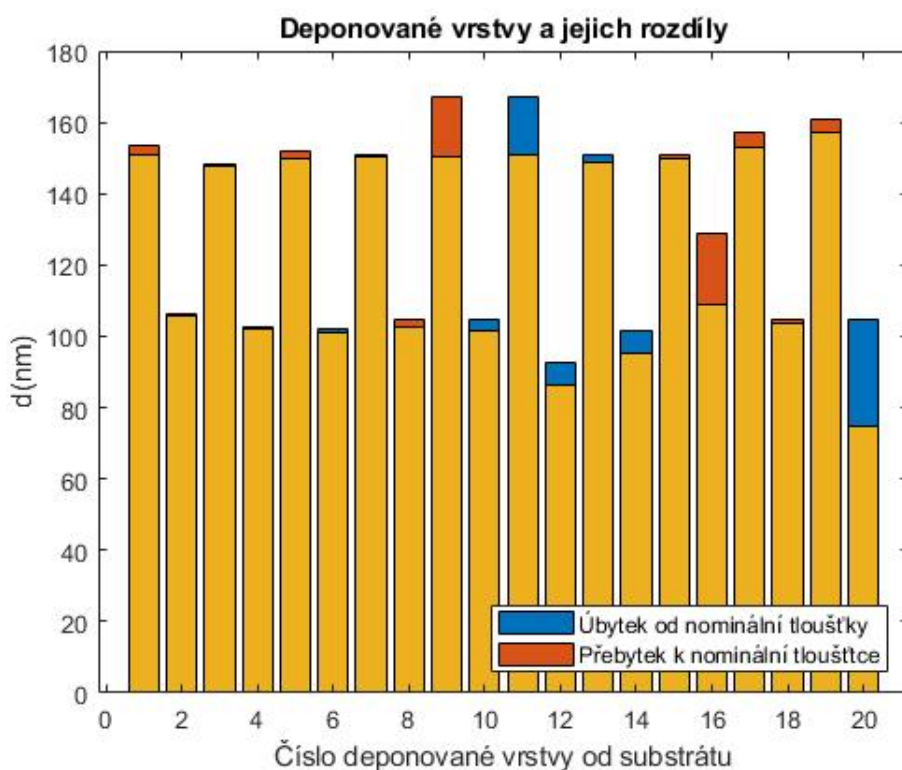
,

5.2 Příprava a charakterizace fotonického krystalu

V rámci ověření možnosti depozice byl proveden test depozice fotonického krystalu. Pro tuto testovací depozici byly využity depoziční podmínky získané pomocí testů na křemenném oscilátoru a průtoky plynů určené z rešerše: tedy pro depozici Ta₂O₅ jsme určili proudy Ar=50 sccm, pro O₂=10 sccm a parciální tlak $p=4,5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon jsme určili jako P=75 W. Pro SiO₂ Ar=20 sccm, pro O₂=5 sccm. Následné parciální tlaky byly $p_{Ar}=1,44 \cdot 10^{-3}$ mbar a $p_{O_2}=1,44 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon jsme určili jako P=65 W. Během depozice předchozích vrstev bylo zjištěno, že deponovaná vrstva může mít odchylky od nominální tloušťky. V rámci přípravy tohoto fotonického krystalu jsme po nanesení periody, celkovou nanesenou strukturu zkontrolovali pomocí elipsometrie. Následně jsme chybné tloušťky kompenzovali pomocí úpravy modelu, tedy úpravy tloušťky následné vrstvy a deponovaného času. Na Obrázku 5.2 jsou zobrazeny spektroskopická data během růstu krystalu a srovnání finálního fotonického krystalu s ideálním modelem. V tabulce 5.1 můžeme vidět reálné tloušťky jednotlivých vrstev, změřených pomocí elipsometrie, její nominální tloušťku s kterou se vrstvy měly deponovat a chyba depozice - rozdíl tlouštěk. Na Obrázku 5.3 můžeme vidět grafické znázornění tabulky 5.1.



OBRÁZEK 5.2: A, Celková reflexe ideálního krystalu ve srovnání s připraveným fotonickým krystalem B, Průměrná reflexe pro s - a p - polarizaci během deponování. Každou iteraci se deponovali dvě vrstvy (perioda), krom první a poslední iterace



OBRÁZEK 5.3: Přehled úbytků a přebytků během depozice krystalu z Tabulky 5.1

Pořadí vrstvy	Materiál	Ideální tloušťka	Kompenzovaná tloušťka	Reálná tloušťka	Rozdíl tlouštěk o
		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]
20	Ta ₂ O ₅	103,14	104,94	75,02	-29,92
19	SiO ₂	150,08	157,29	160,99	3,70
18	Ta ₂ O ₅	103,14	103,83	104,94	1,11
17	SiO ₂	150,08	153,15	157,29	4,14
16	Ta ₂ O ₅	103,14	109,00	128,99	19,99
15	SiO ₂	150,08	150,08	150,9	0,82
14	Ta ₂ O ₅	103,14	101,79	95,25	-6,54
13	SiO ₂	150,08	150,86	148,57	-2,29
12	Ta ₂ O ₅	103,14	92,56	86,24	-6,32
11	SiO ₂	150,08	167,11	150,86	-16,25
10	Ta ₂ O ₅	103,14	104,70	101,51	-3,19
9	SiO ₂	150,08	150,50	167,11	16,61
8	Ta ₂ O ₅	103,14	102,77	104,7	1,93
7	SiO ₂	150,08	150,70	150,2	-0,50
6	Ta ₂ O ₅	103,14	102,00	101,01	-0,99
5	SiO ₂	150,08	150,04	151,79	1,75
4	Ta ₂ O ₅	103,14	102,16	102,56	0,40
3	SiO ₂	150,08	148,02	147,98	-0,04
2	Ta ₂ O ₅	103,14	106,02	105,91	-0,11
1	SiO ₂	150,08	150,08	153,33	2,53

TABULKA 5.1: Přehled tlouštěk vrstev připraveného fotonického krystalu. Kompenzovaná tloušťka nám popisuje tloušťku ke které jsme v dané iteraci se pokoušeli nanést, reálně se však nanasla tloušťka s chybou, jenž je označena jako Reálná tloušťka. Rozdíl těchto tlouštěk pro určení chyby deponace je uveden v posledním sloupci

5.3 Modelování metody kompenzace

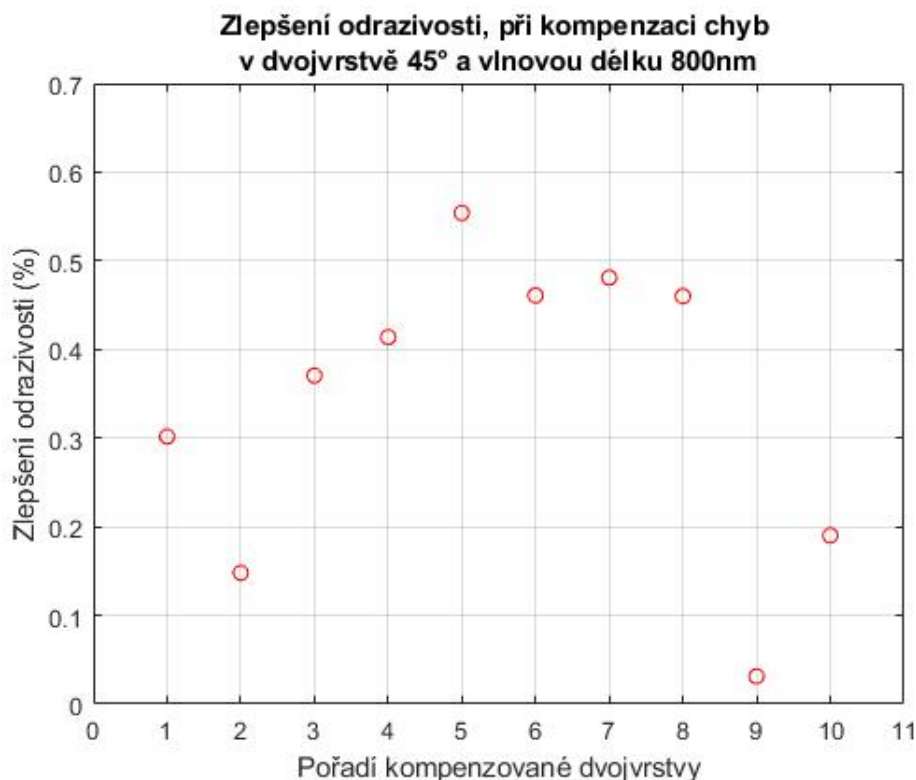
Během procesu dochází k fluktuaci depoziční rychlosti a tedy i změně celkově nanesené tloušťky cca 2-5%. Tyto nedostatky lze samozřejmě kompenzovat kontrolou připravovaného vzorku na elipsometru a následně změně depozičního času tak, ať kompenzujeme úbytek/přebytek tloušťky. Provedli jsme celkem následující studie, jenž se snaží problém rozklíčovat.

Jako první jsme určili průměrnou chybu deponice způsobenou depoziční aparaturou. Z dat uvedených v tabulce 5.1 jsme určili průměrnou chybu deponice 5% od požadované depoziční tloušťky. Následně jsme sledovali pomocí matlabovského skriptu chování reflektivity fotonického krystalu pokud všechny deponované tloušťky byly zatíženy Gaussovky rozloženou chybou 5%. Tuto změnu reflektivity jsme se pokoušeli kompenzovat pomocí jedné z dvojrstev fotonického krystalu. Při kompenzaci jsme fitovali tloušťky v kompenzační dvojrstevě, tak aby rozdíl reflektivity ideálního krystalu a reflektivity kompenzovaného krystalu byl co nejmenší. Rozdíl reflektivit v určité oblasti spektra můžeme

popsat jako

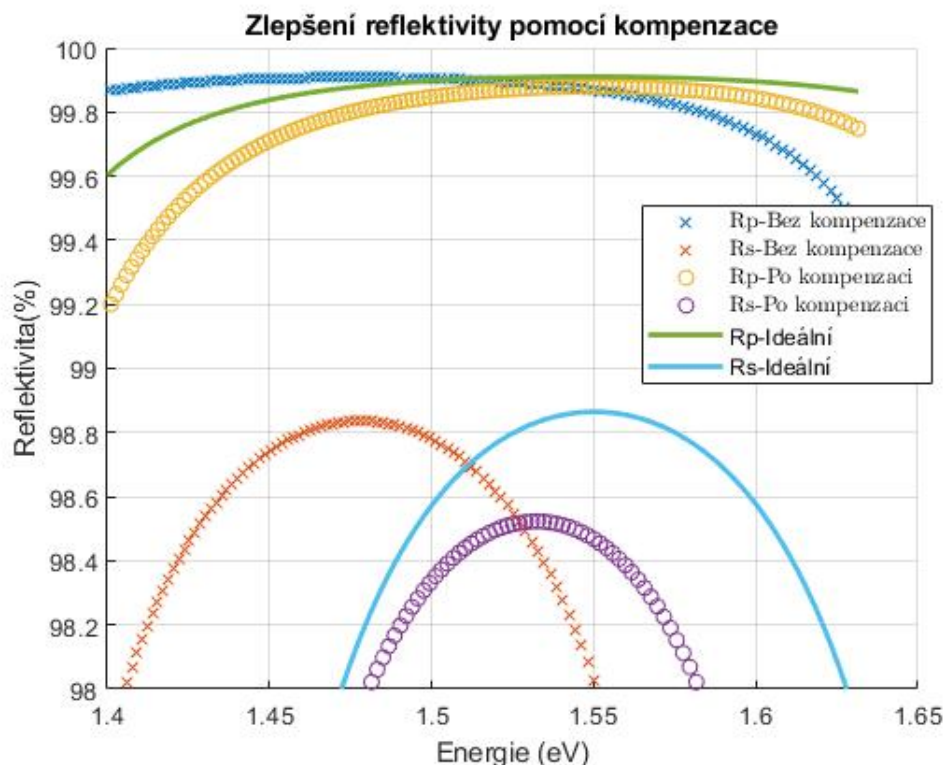
$$\sigma_{\lambda_{\text{Spektrum}}} = |R_{\text{Ideal}} - R_{\text{Kompenzované}}|^2 \quad (5.2)$$

kde σ je chyba reflektivity v daném bodě sledovaného spektra kompenzovaného krystalu a snažíme se pomocí fitování, aby byla v celém fitovaném spektru co nejnižší. Pro fitování bylo standardně vybráno spektrum centrální vlnové délky $\lambda=800$ nm s okolní oblastí zvolenou jako $\lambda_{\text{Spektrum}}=\pm 100$ nm. V této oblasti tedy sledujeme čtvercový rozdíl reflektivity ideálního krystalu R_{Ideal} a reflektivity kompenzovaného krystalu $R_{\text{Kompenzované}}$. Součástí studie bylo i zjištění, která z dvojrstev je nejvhodnější pro prováděnou kompenzaci. Na Obrázku 5.4 můžeme vidět zlepšení reflektivity po kompenzaci v určité dvojrstvě. Na obrázku 5.5 můžeme vidět detail srovnání reflektivity s kompenzací, bez kompenzace a ideální reflektivitou.



OBRÁZEK 5.4: Průměrné zlepšení odrazivosti pokud se pokusíme kompenzovat náhodné chyby ve vrstvách jednou zvolenou dvojrstvou. Pro každou dvojrstvou bylo provedeno 100 iterací s náhodně zvolenými chybami. Z grafu můžeme vidět že pokud kompenzujeme náhodné chyby v 5 a 7 dvojrstvě, je kompenzace chyb nejefektivnější

Díky těmto datům jsme zjistili, že je neoptimálnější provádět opravu chyb tloušťek v 5. a 7. dvojrstvě (viz Obrázek 5.4), kde lze průměrně docílit zvýšení průměrné reflektivity o 0,55% pro kompenzaci v 5. dvojrstvě a 0,48% při kompenzaci v 7. dvojrstvě, obojí pro vlnovou délku $\lambda=800$ nm a úhel odrazu $\alpha=45^\circ$. Při modelovém případě opravy chyb



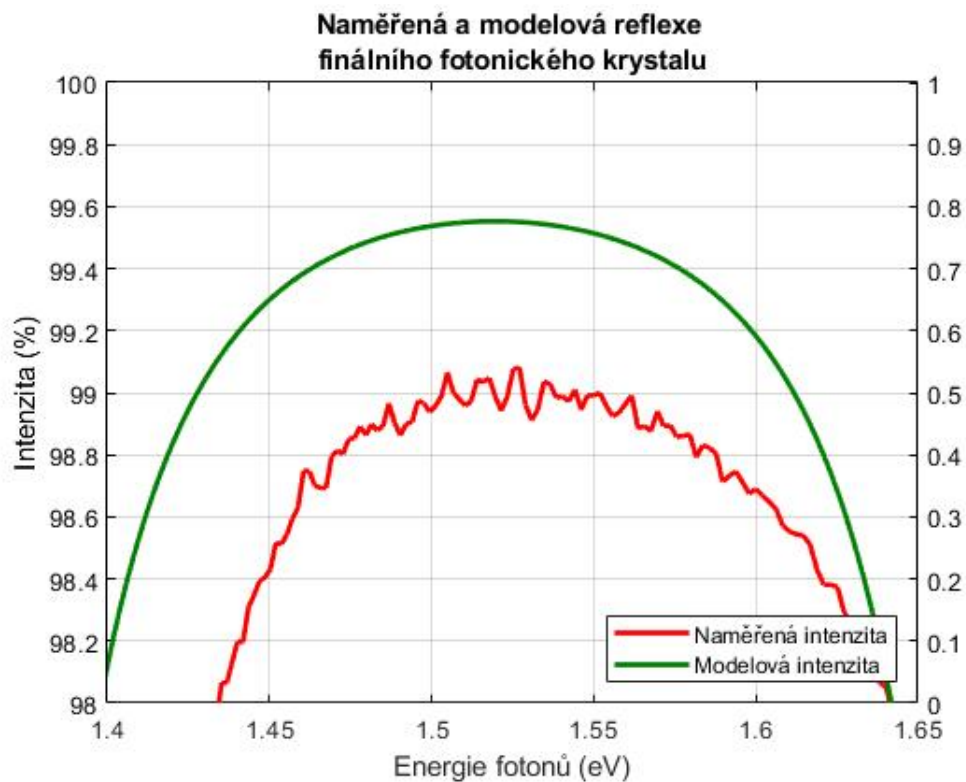
OBRÁZEK 5.5: Zlepšení reflektivity pomocí kompenzace v 5 a 7 dvojrstvích, pro případ kdy všechny vrstvy byly nanášeny s 5% chybou. Jde vidět že chyba se zlepšuje přibližně o 0,5% při *s* polarizaci a o 0,02% při *p* polarizaci

v 5. a 7. dvojrstvích současně (viz Obrázek 5.5), dojde ke zvýšení reflektivity o 0,5% při *s*-polarizaci a o 0,02% při *p*-polarizaci.

5.4 Depozice finálního krystalu

Ze získaných dat jsme tedy navrhli depozici fotonického krystalu tak, abychom prováděli minimum kompenzací a také aby docházelo k minimální kontaminaci vzorku. Byl tedy připraven fotonický krystal s 20 dvojrstvými přičemž jsme použili depoziční podmínky uvedené v tabulce 4.9. Vrstvy Ta_2O_5 byly tedy připraveny s depozičními podmínkami: průtok $\text{Ar}=55$ sccm, průtok $\text{O}_2=5$ sccm a parciální tlaky $p_{\text{Ar}}=4,2 \cdot 10^{-3}$ mbar a $p_{\text{Ar}+\text{O}_2}=4,6 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon byl nastaven na $P=75$ W. Pro SiO_2 byl průtok nastaven na $\text{Ar}=50$ sccm, pro $\text{O}_2=5$ sccm. Následné parciální tlaky byly $p_{\text{Ar}}=3,8 \cdot 10^{-3}$ mbar a $p_{\text{Ar}+\text{O}_2}=4,2 \cdot 10^{-3}$ mbar. Výkon jsme určili jako $P=75$ W. Během depozice proběhla kontrola depozice pomocí elipsometrie po 4. a 6. dvojrstvích a následně byly chyby kompenzovány v 5 a 7 dvojrstvích.

Na Obrázku 5.6 jsou zobrazeny srovnání finálního fotonického krystalu s ideálním modelem. V tabulce 5.2 můžeme vidět reálné tloušťky jednotlivých vrstev, změřených pomocí



OBRÁZEK 5.6: Reflektivita finálního fotonického krystalu - naměřená data a data spočtena z modelu

elipsometrie, její nominální tloušťku s kterou se vrstvy měly deponovat a chyba depozice - rozdíl tloušťek.

Z výsledků můžeme soudit že depozice při které proběhnou pouze dvě korekce v 5 a 7 vrstvě je vhodná, neboť je efektivnější na přípravu a navíc došlo ke zlepšení reflektivity pro 800nm. V prvním fotonickém krystalu jsme se dokázali experimentálně dostat na 98,99% přičemž při finálním fotonickém krystalu měříme reflektivitu 99,02%. Zlepšení může být způsobena nižší kontaminací vzorku.

Pořadí vrstvy	Materiál	Ideální tloušťka [nm]	Reálná tloušťka [nm]	Rozdíl tlouštěk - o kolik více se deponovalo [nm]
20	SiO ₂	150,08	150,11	0,03
19	Ta ₂ O ₅	103,14	99,34	-3,80
18	SiO ₂	150,08	150,08	0
17	Ta ₂ O ₅	103,14	100,77	-2,37
16	SiO ₂	150,08	150,75	0,67
15	Ta ₂ O ₅	103,14	98,73	-4,41
14	SiO ₂	150,08	151,53	1,45
13	Ta ₂ O ₅	103,14	81,68	-21,46
12	SiO ₂	150,08	155,38	5,30
11	Ta ₂ O ₅	103,14	98,88	-4,26
10	SiO ₂	150,08	154,49	4,41
9	Ta ₂ O ₅	103,14	94,65	-8,49
8	SiO ₂	150,08	163,11	13,03
7	Ta ₂ O ₅	103,14	99,20	-3,94
6	SiO ₂	150,08	159,70	9,62
5	Ta ₂ O ₅	103,14	100,86	-2,28
4	SiO ₂	150,08	155 4	4,92
3	Ta ₂ O ₅	103,14	99,93	-3,21
2	SiO ₂	150,08	146,85	-3,23
1	Ta ₂ O ₅	103,14	99,80	-3,34

TABULKA 5.2: Přehled tlouštěk vrstev připraveného fotonického krystalu

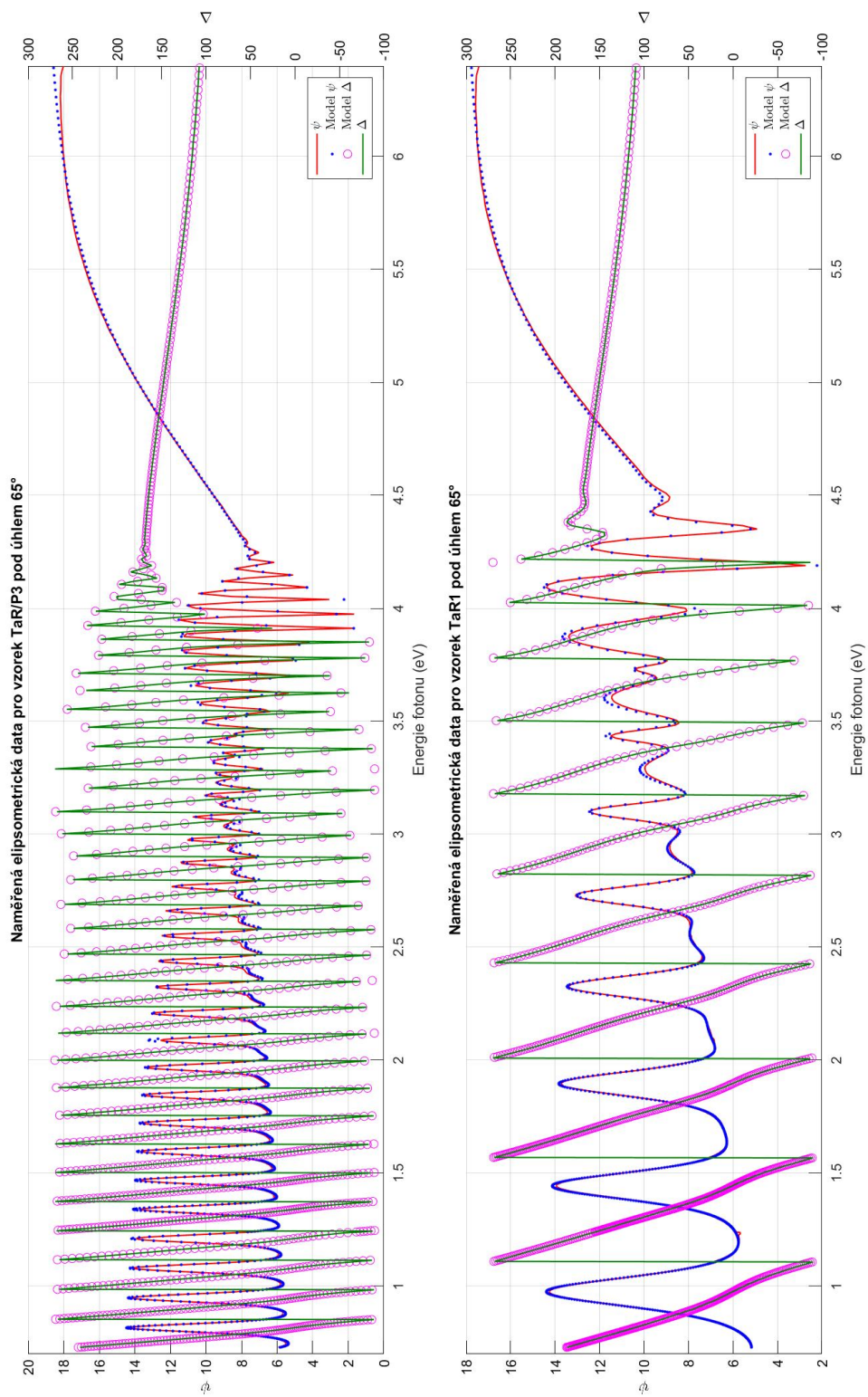
Kapitola 6

Závěr a diskuze

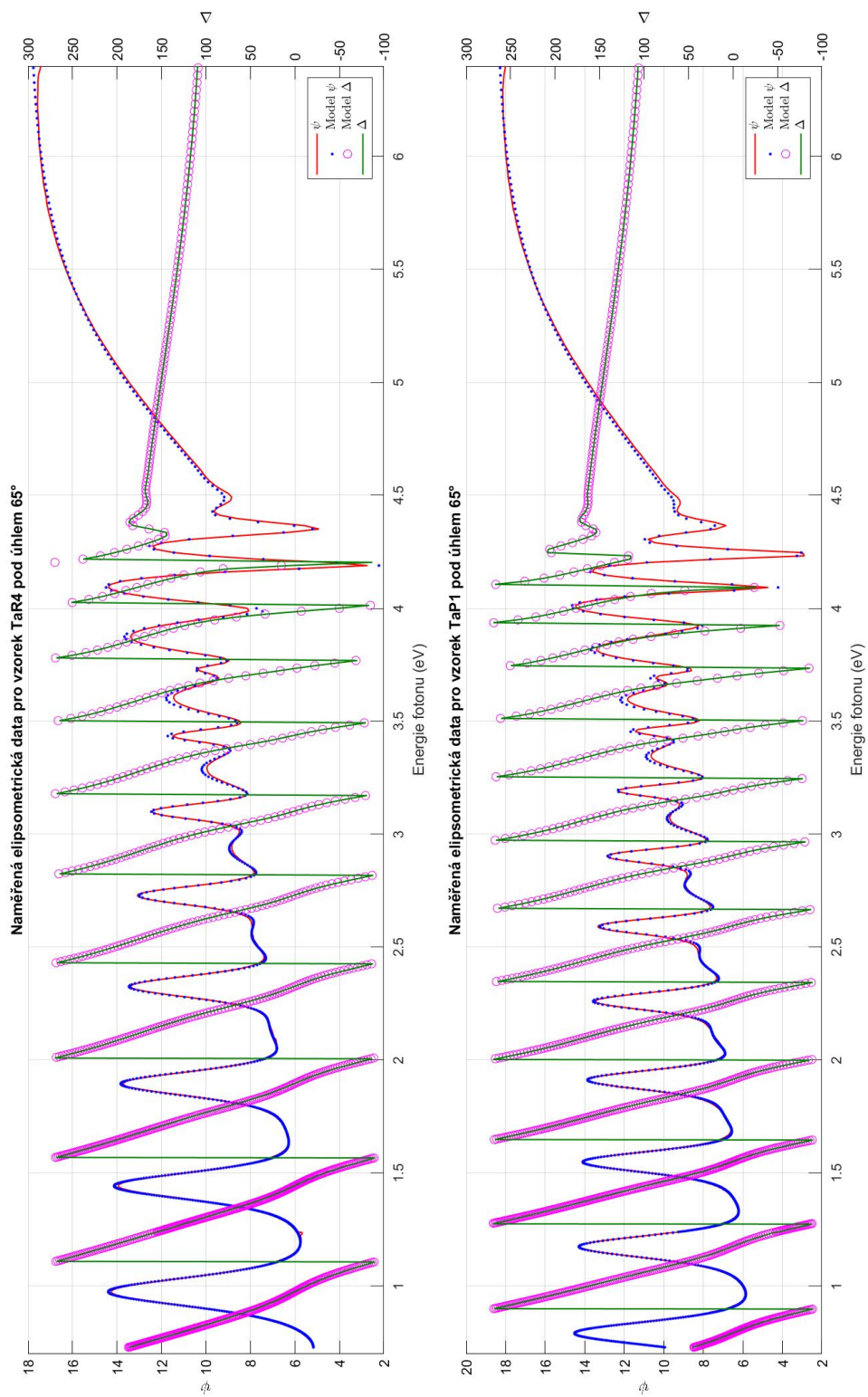
V této diplomové práci jsme se zaměřili na přípravu fotonických krystalů pomocí magnetronového naprašování z materiálu $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ a s cílovým úhlem dopadu 45° . Podařilo se nám najít ideální depoziční podmínky pro magnetronové napařování SiO_2 a Ta_2O_5 . Optické konstanty materiálů jsem určil pomocí fitování dat spektroskopické elipsometrie s využitím modelových dielektrických funkcí. Byl proveden návrh 1D fotonického, který slouží jako vysoce odrazné dielektrické zrcadlo pro úhel dopadu 45° a centrální vlnovou délku 800 nm. Struktura tenkých vrstev byla navržena na základě optického modelu a dielektrické zrcadlo bylo vyrobeno metodou magnetronového naprašování ve vakuu. V rámci depozičního procesu se nám podařilo odhalit a analyzovat chyby vedoucí k nedokonalosti depozice. Zjistili jsme že fotonický krystal je neoptimálnější kompenzovat v 5. a 7. dvojvrstvě. Připravili jsme tedy nový fotonický krystal, jenž vykazoval výslednou reflektivitu 99,02% pro $\lambda=800\text{nm}$.

Tyto výsledky lze dále využít pro přípravu fotonických krystalů pro specifické využití v laboratoři - děliče paprsků (beamsplitters), antireflexní vrstvy, polarizační filtry atd. V budoucnu by se mohlo zvážit připravit fotonické krystalů z jiných vhodných materiálů.

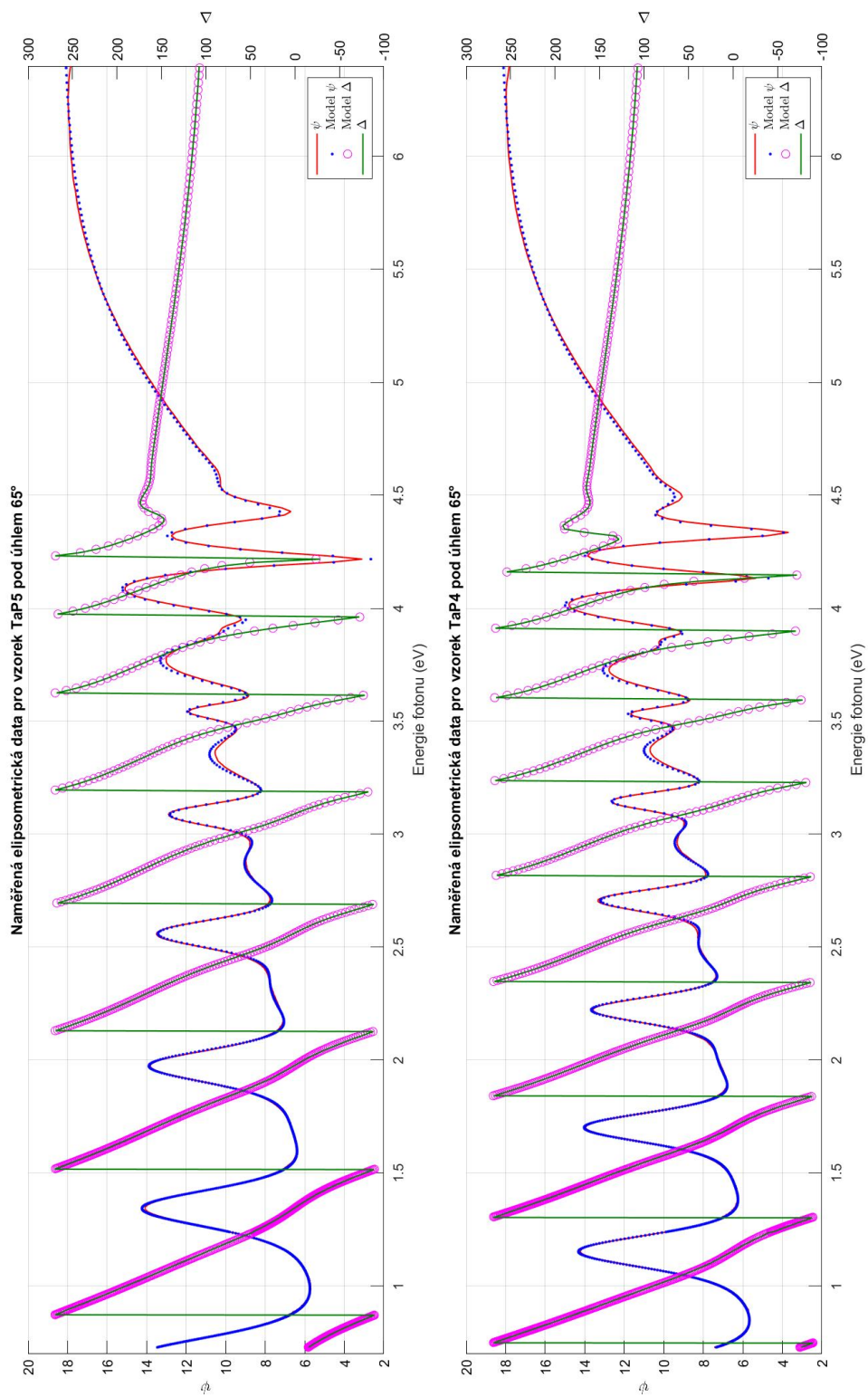
Přílohy A



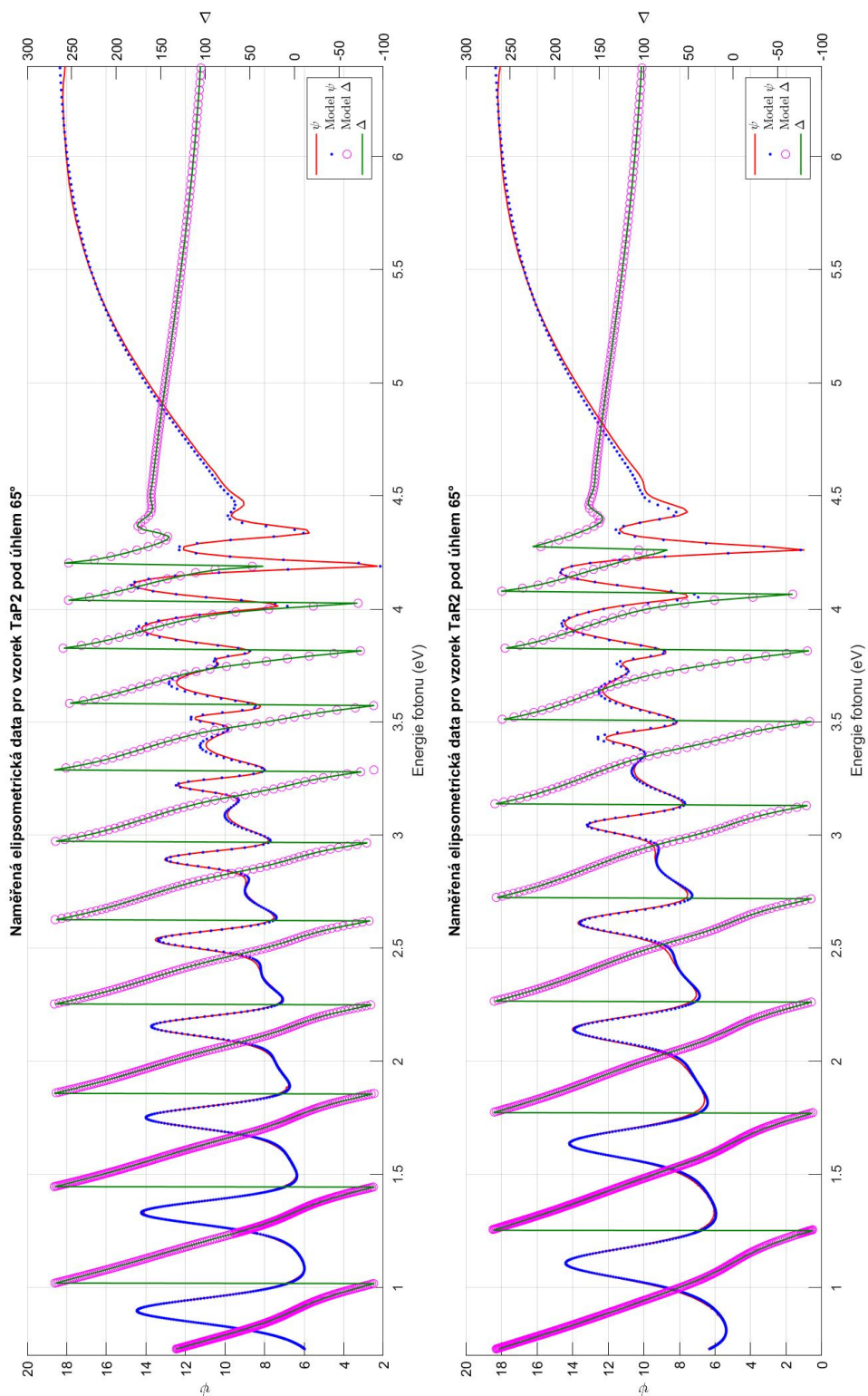
OBRÁZEK A.1: Naměřená a modelová elipsometrická data pod úhlem 65° pro vzorky TaR/P3 a TaR1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data. Vzorek TaR1 byl použit pro přípravu fotonického krystalu, neboť jeho depoziční rychlost byla nejvyšší



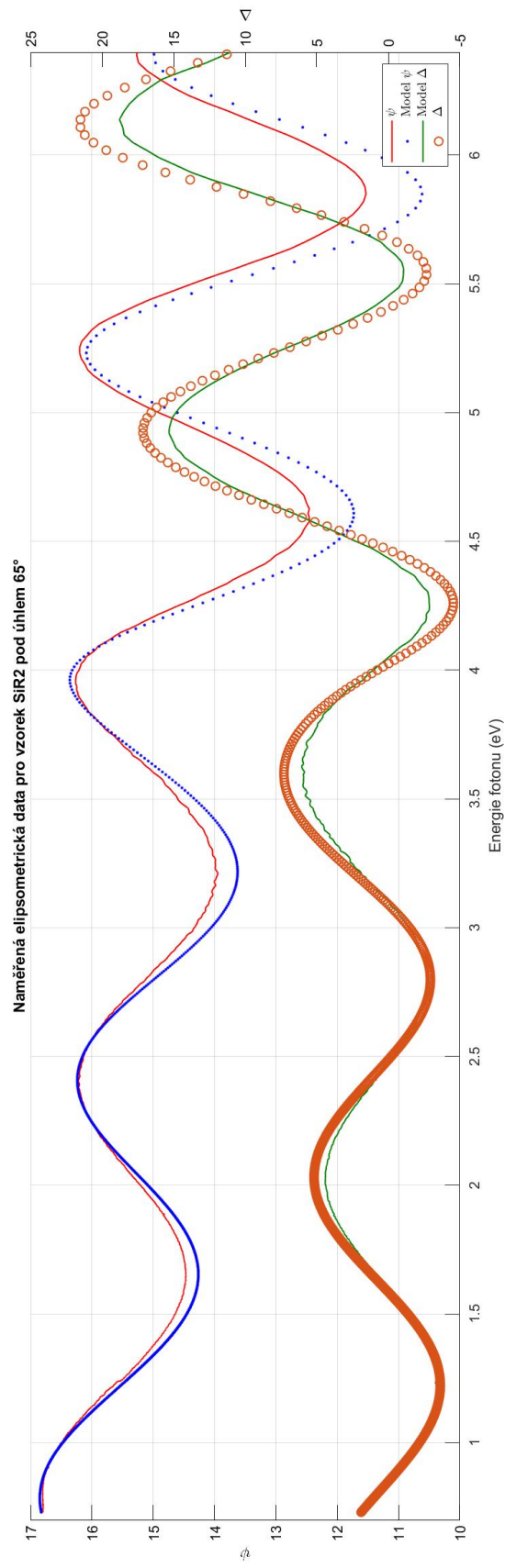
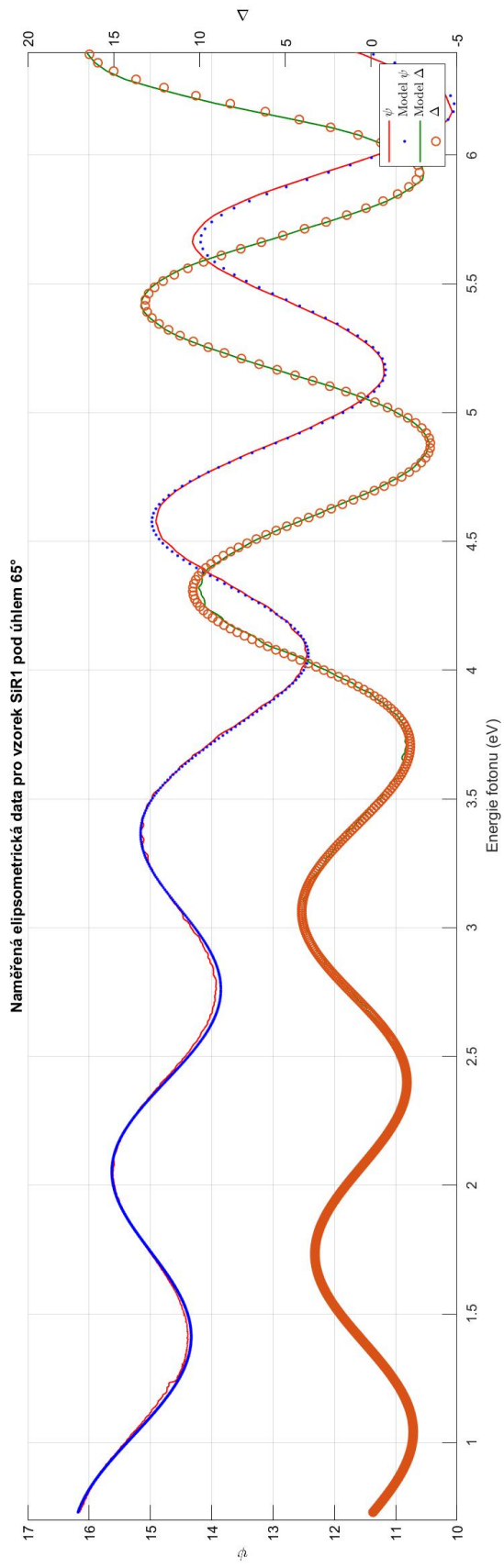
OBRÁZEK A.2: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaR4 a TaP1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.



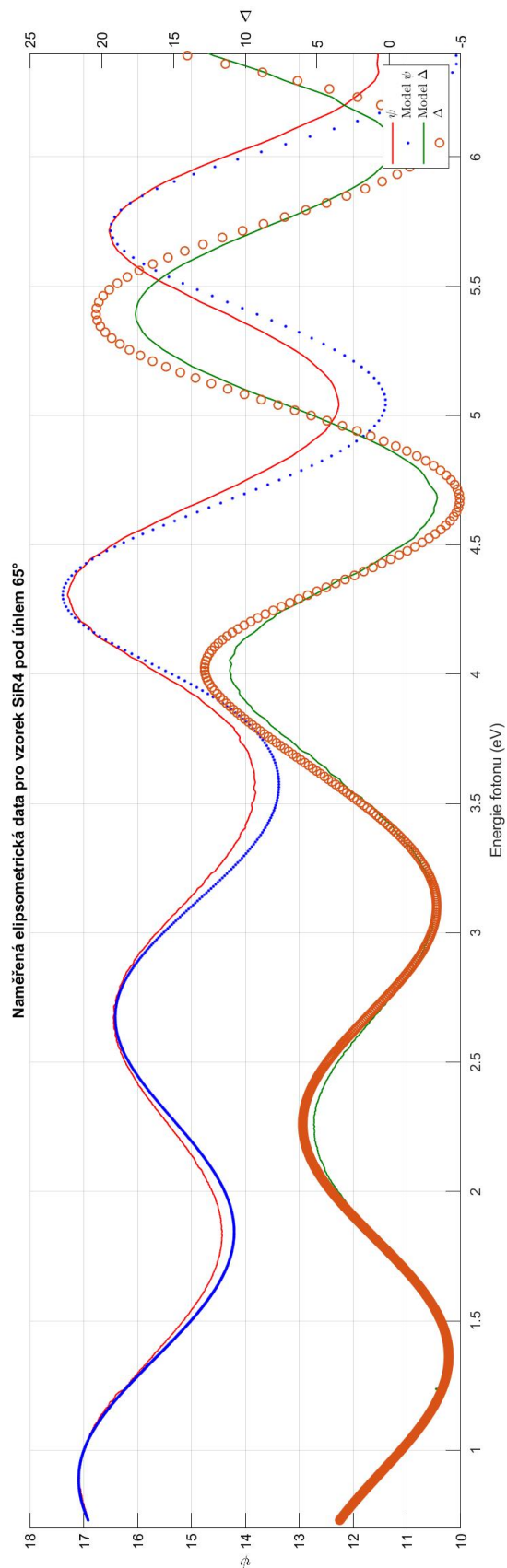
OBRÁZEK A.3: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaP5 a TaP4. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.



OBRÁZEK A.4: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaP2 a TaR2. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.



OBRÁZEK A.5: Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky SiR1 a SiR2. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.



OBRÁZEK A.6: Naměřená a modelová data pod úhlem 65°. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.

Seznam Obrázků

2.1	Schéma interakce mnohvrstevnatého prostředí s dopadající vlnou pro popis pomocí maticového formalismu	6
2.2	Schéma 1D, 2D a 3D fotonického krystalu[7]	9
2.3	Schéma čtvrtvlnové destičky[8]	10
2.4	Schéma biofotonického krystalu[10]	10
3.1	Vakuová komora použitého systému	12
3.2	Průběh výboje v plynu [11]	12
3.3	Schéma průrazu plynu a vzniku zářivého výboje	13
3.4	Schéma putování elektronů a aniontu mezi elektrodami	14
3.5	Magnetické pole nad povrchem terče pro lokalizaci elektronů [13]	15
3.6	Vakuová komora depozičního systému Prevac	16
3.7	A, schéma elipsometru B, použitá konfigurace na elipsometru Woolam RC2-DI [16]	17
4.1	Schematicky model měřených vzorků	22
4.2	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorek TaR1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data. Vzorek TaR1 byl použit pro přípravu fotonického krystalu, neboť jeho depoziční rychlost byla nejvyšší	25
4.3	Optické konstanty pro studii s konstantním tlakem v komoře. Z dat vidíme že materiály zůstávají přibližně stejné při námi zvolených depozičních podmínkách a v oblasti zakázaného pásu jsou neabsorbující. ϵ_1 zde vyjadřuje reálnou část dielektrické funkce a ϵ_2 zde vyjadřuje imaginární část dielektrické funkce.	26
4.4	Optické konstanty pro studii s konstantním poměrem proudů depozičních plynů. Z dat vidíme, že materiály zůstávají přibližně stejné při námi zvolených depozičních podmínkách a v oblasti zakázaného pásu jsou neabsorbující. ϵ_1 zde vyjadřuje reálnou část dielektrické funkce a ϵ_2 zde vyjadřuje imaginární část dielektrické funkce.	27
4.5	Depoziční rychlost při konstantním tlaku v komoře a celkovému průtoku plynů 60 sccm	28
4.6	Depoziční rychlost při konstantním poměru toku plynů Ar/O ₂ 5:1	28
4.7	Optické konstanty pro studii s konstantním poměrem proudů depozičních plynů. Z použitého optického modelu předpokládáme $\epsilon_2 = 0$, proto ϵ_2 není zobrazeno	30
4.8	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorek SiR2, jenž vyšel jako nejoptimálnější pro depoziční	31

4.9	Optické konstanty pro studii s konstantním poměrem proudů depozičních plynů. $\epsilon_2 = 0$	32
5.1	a, Schéma depozice jednotlivých vrstev b, Modelová reflektivita fotonického krystalu s 20 vrstvami $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, kde R je reflektivita	35
5.2	A, Celková reflexe ideálního krystalu ve srovnání s připraveným fotonickým krystalem B, Průměrná reflexe pro s - a p - polarizaci během deponování. Každou iteraci se deponovali dvě vrstvy (perioda), krom první a poslední iterace	36
5.3	Přehled úbytků a přebytků během depozice krystalu z Tabulky 5.1	36
5.4	Průměrné zlepšení odrazivosti pokud se pokusíme kompenzovat náhodné chyby ve vrstvách jednou zvolenou dvojvrstvou. Pro každou dvojvrstvou bylo provedeno 100 iterací s náhodně zvolenými chybami. Z grafu můžeme vidět že pokud kompenzujeme náhodné chyby v 5 a 7 dvojvrstvě, je kompenzace chyby nejefektivnější	38
5.5	Zlepšení reflektivity pomocí kompenzace v 5 a 7 dvojvrstvě, pro případ kdy všechny vrstvy byly nanесeny s 5% chybou. Jde vidět že chyba se zlepší přibližně o 0,5% při s polarizaci a o 0,02% při p polarizaci	39
5.6	Reflektivita finálního fotonického krystalu - naměřená data a data spočtena z modelu	40
A.1	Naměřená a modelová elipsometrická data pod úhlem 65° pro vzorky TaR/P3 a TaR1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data. Vzorek TaR1 byl použit pro přípravu fotonického krystalu, neboť jeho depoziční rychlost byla nejvyšší	44
A.2	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaR4 a TaP1. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.	45
A.3	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaP5 a TaP4. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.	46
A.4	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky TaP2 a TaR2. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.	47
A.5	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° pro vzorky SiR1 a SiR2. Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.	48
A.6	Naměřená a modelová data pod úhlem 65° . Z dat vidíme, že námi sestavený optický model, dobře popisuje experimentální elipsometrická data.	49

Seznam Tabulek

4.1	Depoziční parametry pro Ta_2O_5 nalezené v přiložených studích.	20
4.2	Depoziční parametry pro SiO_2 nalezené v přiložených studích.	21
4.3	Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním poměru průtoků pracovních plynů. Průtok kyslíku byl udržován na 20% průtoku argonu	21
4.4	Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním nepozičním tlaku a proudu pracovních plynů 60 sccm	22
4.5	Fitované parametry (tučně) studie deponování Ta_2O_5 vrstvy při konstantním poměru proudů depozičních plynů	24
4.6	Fitované parametry (tučně) studie deponování Ta_2O_5 vrstvy při konstantním tlaku	24
4.7	Depoziční parametry a výsledné parametry pro připravené vzorky. Studie byla provedena při konstantním poměru proudu plynů. Průtok kyslíku byl vždy průtoku argonu. Vzorky byly připraveny pod konstantním výkonem 75W	29
4.8	Fitované parametry (tučně) studie deponování SiO_2 vrstvy při konstantním tlaku	30
4.9	Depoziční parametry optimálních materiálů pro přípravu požadovaného fotonického krystalu	33
4.10	Parametry spektroskopického modelu optimálních materiálů pro přípravu požadovaného fotonického krystalu. Fitované parametry jsou zvýrazněny tučně	33
5.1	Přehled tloušťek vrstev připraveného fotonického krystalu. Kompenzovaná tloušťka nám popisuje tloušťku ke které jsme v dané iteraci se pokoušeli nanést, reálně se však nanasla tloušťka s chybou, jež je označena jako Reálná tloušťka. Rozdíl těchto tloušťek pro určení chyby deponace je uveden v posledním sloupci	37
5.2	Přehled tloušťek vrstev připraveného fotonického krystalu	41

Reference

- [1] H. A. Macleod. *Thin-film optical filters*. Adam Hilger Ltd, Bristol, 1986.
- [2] Pochi Yeh. Optics of anisotropic layered media: A new 4×4 matrix algebra. *Surf. Sci.*, 96:41–53, 1980.
- [3] O. Stenzel. *The physics of thin-film optical spectra*. Springer, Heidelberg, 2005.
- [4] K. Postava, J. Pištora, Masashi Kojima, Kazuo Kikuchi, Kazuhiro Endo, and Tomuo Yamaguchi. Thickness monitoring of optical filters for dwdm applications. 11 (6):610–616, March 24 2003. ISSN 1094-4087.
- [5] Milton Ohring. *Materials Science of Thin Films: Depositon and Structure*. Elsevier, 2001.
- [6] Andrew Yeh Ching Nee. *Handbook of manufacturing engineering and technology*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
- [7] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. Princeton University Press, USA, 2nd edition, 2008. ISBN 0691124566.
- [8] EJJY Yablonovitch. Photonic band-gap structures. *JOSA B*, 10(2):283–295, 1993.
- [9] Farzaneh Fathi, Mohammad-Reza Rashidi, Parvin Samadi Pakchin, Sohrab Ahmadi-Kandjani, and Arash Nikniazi. Photonic crystal based biosensors: Emerging inverse opals for biomarker detection. *Talanta*, 221:121615, 2021. ISSN 0039-9140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121615>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039914020309061>.
- [10] Rajesh V. Nair and R. Vijaya. Photonic crystal sensors. *Progress in Quantum Electronics*, 34(3):89–134, 2010. ISSN 00796727. doi: 10.1016/j.pquantelec.2010.01.001. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079672710000029>.
- [11] Rolf E. Hummel and Karl H. Guenther. *Hanbook of optical properties*. CRC Press, Boca Raton, 1. vydání edition, 1995. ISBN 0-8493-2484-X.

- [12] Kiyotaka Wasa and Shigeru Hayakawa. Handbook of sputter deposition technology. 1992.
- [13] Petr Vašina. Plasma diagnostics focused on new magnetron sputtering devices for thin film deposition, 2005.
- [14] Hiroyuki Fujiwara. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [15] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam, 2nd edition, 1987.
- [16] Débora Gonçalves and Eugene A Irene. Fundamentals and applications of spectroscopic ellipsometry. *Quimica Nova*, 25(5):794–800, 2002.
- [17] K. Chen, M. Nielsen, G. R. Yang, E. J. Rymaszewski, and T. M. Lu. Study of amorphous ta₂o₅ thin films by dc magnetron reactive sputtering. *Journal of Electronic Materials*, 26(4):397–401, 1997. ISSN 0361-5235. doi: 10.1007/s11664-997-0109-5. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11664-997-0109-5>.
- [18] J. Westlinder, Y. Zhang, F. Engelmark, G. Possnert, H.-O. Blom, J. Olsson, and S. Berg. Simulation and dielectric characterization of reactive dc magnetron cosputtered (Ta₂O₅)_{1-x}(TiO₂)_x thin films. *Journal of Electronic Materials*, 20(3):397–401, 2002. ISSN 0734211X. doi: 10.1116/1.1470508. URL <http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvstb/20/3/10.1116/1.1470508>.
- [19] Sung-Dong Cho and Kyung-Wook Paik. Study on the amorphous ta₂o₅ thin film capacitors deposited by dc magnetron reactive sputtering for multichip module applications. *Materials Science and Engineering: B*, 67(3):108–112, 1999. ISSN 09215107. doi: 10.1016/S0921-5107(99)00330-X. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092151079900330X>.
- [20] Shih jeh Jimmy Wu, Boen Houng, and Bo sen Huang. Effect of growth and annealing temperatures on crystallization of tantalum pentoxide thin film prepared by rf magnetron sputtering method. *Journal of Alloys and Compounds*, 475(1-2):488–493, 2009. ISSN 09258388. doi: 10.1016/j.jallcom.2008.07.126. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092583880801222X>.
- [21] B P Zhang, G Isoya, T Yasuda, Y Ohfuti, C Y Liu, and Y Segawa. Fabrication and characterization of three-dimensional ta₂o₅/sio₂ photonic crystals. *Nanotechnology*, 15(5):698–702, 2004-05-01. ISSN 0957-4484. doi: 10.1088/0957-4484/15/5/050. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/15/5/050>.

- [22] A. K. Chu, M. J. Chuang, K. Y. Hsieh, H. L. Huang, Y. C. Yu, C. W. Wang, and E. K. Lin. Microstructure and corrosion resistance of room-temperature rf sputtered Ta₂O₅ thin films. *Journal of Electronic Materials*, 28(12):1457–1460, 1999. ISSN 0361-5235. doi: 10.1007/s11664-999-0141-8. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11664-999-0141-8>.
- [23] S. V. Jagadeesh Chandra, G. Mohan Rao, and S. Uthanna. Heat treatment induced structural and optical properties of rf magnetron sputtered tantalum oxide films. *Crystal Research and Technology*, 42(3):290–294, 2007. ISSN 02321300. doi: 10.1002/crat.200610815. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/crat.200610815>.
- [24] S.V. Jagadeesh Chandra, Chel-Jong Choi, S. Uthanna, and G. Mohan Rao. Structural and electrical properties of radio frequency magnetron sputtered tantalum oxide films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13(4):245–251, 2010. ISSN 13698001. doi: 10.1016/j.mssp.2010.08.002. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369800110000880>.
- [25] Kazuki Tajima, Yasusei Yamada, Shanhu Bao, Masahisa Okada, and Kazuki Yoshimura. Solid electrolyte of tantalum oxide thin film deposited by reactive DC and RF magnetron sputtering for all-solid-state switchable mirror glass. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(2):120–125, 2008. ISSN 09270248. doi: 10.1016/j.solmat.2007.01.022. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024807003133>.
- [26] Rabi Rabaday and Ivan Avrutsky. Titania, silicon dioxide, and tantalum pentoxide waveguides and optical resonant filters prepared with radio-frequency magnetron sputtering and annealing. *Applied Optics*, 44(3), 2005. ISSN 0003-6935. doi: 10.1364/AO.44.000378. URL <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ao-44-3-378>.
- [27] H. Ohsaki, Y. Tachibana, J. Shimizu, and T. Oyama. High-rate deposition of SiO₂ by modulated dc reactive sputtering in the transition mode without a feedback system. *Thin Solid Films*, 281-282:213–217, 1996. ISSN 00406090. doi: 10.1016/0040-6090(96)08616-6. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0040609096086166>.
- [28] Sang-Hun Jeong, Jae-Keun Kim, Bong-Soo Kim, Seok-Ho Shim, and Byung-Teak Lee. Characterization of SiO₂ and TiO₂ films prepared using rf magnetron sputtering and their application to anti-reflection coating. *Vacuum*, 76(4):507–515, 2004. ISSN 0042207X. doi: 10.1016/j.vacuum.2004.06.003. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X04002763>.

-
- [29] Le-Nian He and Jin Xu. Properties of amorphous SiO_2 films prepared by reactive rf magnetron sputtering method. *Vacuum*, 68(2):197–202, 2002. ISSN 0042207X. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00388-3. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X02003883>.
- [30] Y. He, L. Bi, J.Y. Feng, and Q.L. Wu. Properties of Si-rich SiO_2 films by rf magnetron sputtering. *Journal of Crystal Growth*, 280(3-4):352–356, 2005. ISSN 00220248. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2005.03.081. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022024805004306>.