



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ TENKÝCH VRSTEV OXIDU GRAFENU

STUDY OF THE OPTICAL PROPERTIES OF GRAPHENE OXIDE THIN FILMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Denisa Smolková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Veronika Schmiedová, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1362/2018 Akademický rok: 2018/19
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Denisa Smolková**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **Ing. Veronika Schmiedová, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Studium optických vlastností tenkých vrstev oxidu grafenu

Zadání bakalářské práce:

1. Pojednejte o přípravě tenkých vrstev materiálů pro fotovoltaické aplikace (rotační nanášení, materiálův tisk) a o studiu jejich optických parametrů (profilometrie, elipsometrie, UV VIS spektroskopie). Seznamte se s měřením optických parametrů a metodami stanovení jejich parametrů.
2. Připravte tenké vrstvy vybraných materiálů a proměřte jejich elipsometrická spektra. Seznamte se s programovým vybavením pro jejich vyhodnocení, pokuste se vytvořit elipsometrický model měřené struktury.
3. Interpretujte naměřené výsledky, především se zaměřte na stanovení tloušťek měřených vrstev.
4. Výsledky zpracujte do bakalářské práce.

Termín odevzdání bakalářské práce: 24.5.2019:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Denisa Smolková
student(ka)

Ing. Veronika Schmiedová, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2019

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá prípravou tenkých vrstiev a stanovením ich optických vlastností so zameraním sa na grafén oxid. V teoretickej časti tejto práce sú zhrnuté základné informácie o tenkých vrstvách a ich príprave. Nasleduje popis jednotlivých metód skúmania ich optických vlastností, spoločne s popisom vlastností svetla.

Experimentálna a výsledková časť práce sa zaoberá prípravou tenkých vrstiev pomocou rotačného nanášania a zhodnotením nameraných výsledkov získaných využitím optickej mikroskopie, profilometrie, spektroskopie elipsometrie a UV VIS spektroskopie. V závere práce sú zhrnuté výsledky jednotlivých metód.

Abstract

This thesis examines the preparation of thin layers and determining their optical properties. It is focused on graphene oxide. In the theoretical part, basic information about the thin layers and their preparation is supplied. That is followed by a description of various methods of determining their optical properties and properties of light.

Experimental part and results are focused on the preparation of thin layers by spin-coating and evaluation of measured values using optical microscopy, profilometry, spectroscopic ellipsometry and UV VIS spectroscopy. The conclusion summarizes the results of these methods.

Kľúčové slova

Tenké vrstvy, grafén oxid, rotačné nanášanie, optické vlastnosti, optická mikroskopia, UV VIS spektroskopia, spektroskopická elipsometria, profilometria

Keywords

Thin films, graphene oxide, spin-coating, optical properties, optical microscopy, UV VIS spectroscopy, spectroscopic ellipsometry, profilometry

SMOLKOVÁ, Denisa. *Studium optických vlastností tenkých vrstev oxidu grafenu*. Brno, 2019. 35 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Ing. Veronika Schmiedová, PhD.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracovala samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citovala. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FCHVUT.

.....

podpis študenta

POĎAKOVANIE

Rada by som sa poďakovala mojej skvelej vedúcej práce Ing. Veronike Schmiedovej, PhD za ochotu, pomoc, podporu, čas, uľudňujúce rady a cenné pripomienky pri vypracovaní mojej bakalárskej práce. Zároveň by som rada poďakovala jej maličkkej Andrejke, ktorá nám spravila chvíle v laboratóriu nevšednými. A nakoniec by som chcela poďakovať mojej najlepšej kolegyni Anne Patrícii Rackovskej za vzájomnú podporu, zábavne strávené chvíle pri práci a možnosť kedykoľvek prediskutovať problémy a nejasnosti.

Obsah

1	Úvod	7
2	Teoretická časť	8
2.1	Tenké vrstvy	8
2.1.1	Tenké vrstvy grafén oxidu.....	8
2.2	Príprava tenkých vrstiev	8
2.2.1	Chemické procesy	9
2.2.2	Fyzikálne procesy.....	10
2.3	Optické vlastnosti	11
2.3.1	Index lomu.....	11
2.3.2	Absorpcia	11
2.3.3	Hrúbka vrstiev	12
2.3.4	Homogenita	12
2.4	Metódy štúdia optických vlastností tenkých vrstiev.....	12
2.4.1	Optická mikroskopia	12
2.4.2	UV VIS Spektroskopia.....	13
2.4.3	Profilometria.....	13
2.4.4	Spektroskopická elipsometria	13
2.5	Svetlo	15
2.5.1	Svetlo ako elektromagnetické vlnenie.....	16
2.5.2	Polarizácia svetla.....	17
3	Experimentálna časť	20
3.1	Použitý materiál.....	20
3.1.1	Grafén oxid.....	20
3.1.2	Štruktúra pripravovanej vzorky.....	20
3.2	Príprava vzorky.....	20
3.2.1	Rotačné nanášanie	20
3.3	Meranie vzorky.....	21
3.3.1	Optická mikroskopia	21
3.3.2	UV VIS Spektroskopia.....	22
3.3.3	Profilometria.....	23

	3.3.4 Spektroskopická elipsometria	25
4	Výsledky a diskusia.....	28
5	Záver.....	32
6	Použitá literatúra a zdroje.....	33

1 ÚVOD

V dnešnom svete sme obklopení elektrickými prístrojmi, ktoré obsahujú množstvo mikroelektronických častí. Vďaka týmto mikroelektronickým časticiam sú ich rozmery menšie, manipulácia s nimi je jednoduchšia a možnosti väčšie. Kľúčovými komponentmi modernej mikroelektroniky sú rôzne typy tenkých vrstiev. Práve tieto tenké vrstvy značne ovplyvňujú výkon prístrojov. Veľmi perspektívnym materiálom v tejto oblasti je grafén oxid, ktorý spája výborné vlastnosti grafénu s jednoduchou manipuláciou zoxidovaného materiálu. Je však potrebné, tento grafén oxid čiastočne redukovať, aby sa znížil jeho odpor a mohol byť vodičom. Táto práca sa bude venovať práve tomuto materiálu, pretože je zatiaľ najvhodnejším materiálom, ktorý je možné použiť ako náhradu za ITO. Vďaka jeho nízkej absorpcii svetla je jeho perspektívne využitie predovšetkým v oblasti fotovoltaiiky.

Je nevyhnutné, či už v priemysle alebo vo výskume tenké vrstvy charakterizovať. Je potrebné zisťovať hlavne hrúbku vrstiev, drsnosť ich povrchu, prípadne jeho homogenitu a mnohé ďalšie vlastnosti. Možností charakterizácie tenkých vrstiev je dnes veľa. Táto práca sa zaoberá práve popisom tenkých vrstiev na základe ich optických vlastností.

Použitými metódami boli optická mikroskopia, UV VIS spektroskopia, spektroskopická elipsometria a profilometria. Optickou mikroskopiou sme posúdili homogenitu a kvalitu pripravenej vzorky. Pomocou UV VIS spektroskopie bolo namerané absorpčné spektrum materiálu, ktoré nám udáva absorpciu žiarenia o rôznych vlnových dĺžkach prechádzajúceho vzorkou. Ďalšou metódou bola profilometria, ktorou dokážeme určiť hlavne hrúbku tenkej vrstvy, drsnosť povrchu, prípadne celkový 3D náhľad povrchu. A nakoniec spektroskopická elipsometria, ktorá má široké využitie a veľký potenciál v budúcnosti. Je to veľmi komplexná metóda. Stanovuje sa ňou hlavne extinkčný koeficient a index lomu, z ktorých sa dajú určiť ďalšie vlastnosti vrstvy.

2 TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Tenké vrstvy

Tenká vrstva je vrstva materiálu s hrúbkou v rozmedzí nanometrov až niekoľkých mikrometrov aplikovaná na substráte. Tenké vrstvy vykazujú jedinečné vlastnosti, ktoré sa nedajú pozorovať u objemnejších materiálov. Tieto vrstvy umožnili v mnohých priemyselných oblastiach množstvo objavov a vylepšení. Sú používané k ochrane povrchov proti opotrebovaniu, poskytujú bariéru proti prieniku rôznych plynov, zlepšujú odolnosť povrchov proti korózii a proti chemikáliám. V mnohých prípadoch tenké vrstvy síce neovplyvňujú objemové vlastnosti substrátu, môžu však úplne zmeniť optické, elektrické a tepelné vlastnosti povrchu alebo substrátu, na ktorom sú aplikované [1]. Dnes sa využívajú napríklad pri výrobe optiky ako reflexné a antireflexné povlaky alebo samočistiace sklá, vo farmácii ako tenkovrstvé obaly liekov, ktoré zlepšujú ich absorpciu, na generovanie a uskladňovanie energie ako tenkovrstvé solárne články a tenkovrstvé batérie, v baliarenskom priemysle ako ochranné filmy potravín a vo vyššie spomínanej elektronike ako polovodiče, izolačné vrstvy, atď [2].

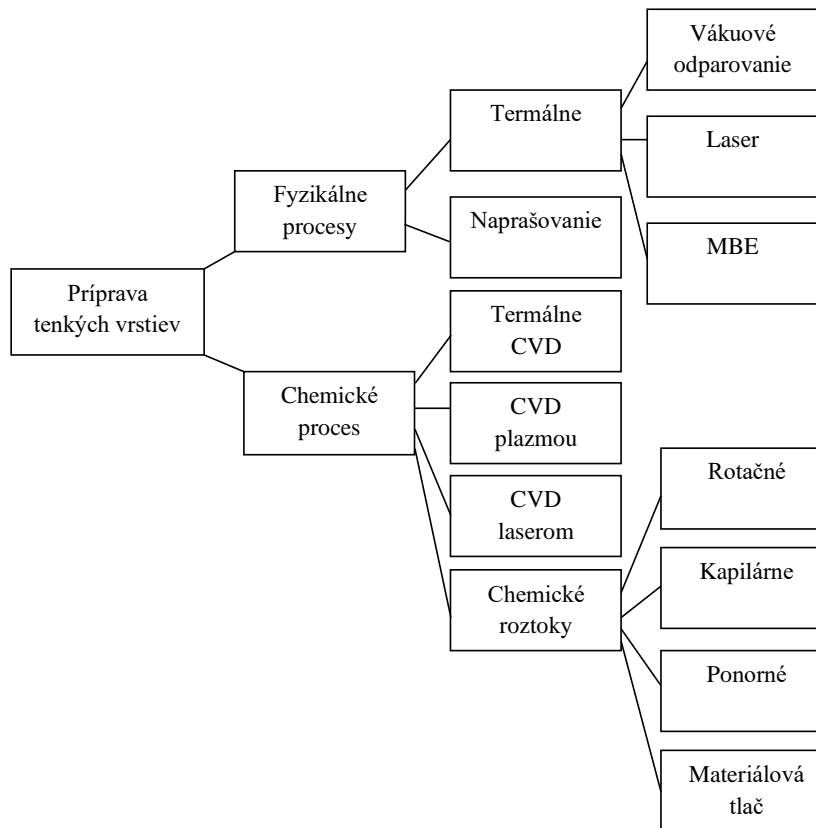
2.1.1 Tenké vrstvy grafén oxidu

Grafén je najtenší známy materiál, list uhlíkových atómov usporiadaných do hexagonálneho tvaru má hrúbku jedného atómu, a predsa je pevnejší ako diamant [3]. Je to dvojdimenzionálny materiál na báze uhlíka, ktorý má špecifickú elektronickú štruktúru, vďaka ktorej má neobvyklé elektronické vlastnosti ako vysokú mobilitu pri relatívne vysokých koncentráciách náboja. Zároveň má aj mimoriadne optické vlastnosti. Avšak jeho praktické využitie je obmedzené kvôli jeho nerozpustnosti a neschopnosti sa roztaviť. Riešením je oxidácia grafénu, ktorou vzniká grafén oxid, ktorý môže byť následne redukovaný na redukovaný grafén oxid. Prítomnosť kyslíkatých funkčných skupín zabezpečuje jeho rozpustnosť vo vode a ďalších organických látkach. Vzhľadom na veľmi nízku absorpciu svetla a zároveň vysokú mobilitu elektrónov grafénu sa tento materiál môže použiť ako alternatíva k ITO vo fotovoltaiických článkoch. Rozdiel medzi vlastnosťami a štruktúrou GO a rGO môže byť charakterizovaný na základe stupňa oxidácie. Túto charakterizáciu dokážeme vyhodnotiť z uhlíkovej frakcie sp^2 , pretože optické a elektrické vlastnosti sú vo väčšine prípadov riadené pomocou π -elektrónov z sp^2 atómov uhlíka. Techniky na redukciu GO sú napríklad: tepelné žihanie vo vákuu alebo inertnom plyne, elektrická redukcia, chemická redukcia alebo redukcia pomocou UV žiarenia [4].

2.2 Príprava tenkých vrstiev

Aplikovanie tenkých vrstiev na povrch sa nazýva depozícia tenkých vrstiev. Je to akákoľvek technika na nanášanie tenkých vrstiev určitého materiálu na substrát alebo na predošlú vrstvu. Tento proces môžeme rozdeliť, ako to vidíme na Obr. 1, do dvoch hlavných kategórií

na základe toho, či je tento proces primárne fyzikálny alebo chemický. Chemický proces pozostáva z chemickej depozície z plynnej fázy a z nanášania tenkých vrstiev z roztoku. Fyzikálny proces pozostáva z fyzikálnej depozície z plynnej fázy [2].



Obr. 1: Prehľad možností príprav tenkých vrstiev [5]

2.2.1 Chemické procesy

Prchavé látky sú nanášané na substrát vyparovaním. To znamená, že sú termálne rozložené na atómy a molekuly, alebo reagujú s inými plynmi, parami, aby sa získala stabilná vrstva, vhodná na nanášanie na substrát. Tento proces sa nazýva termálna chemická depozícia z plynnej fázy CVD (*Chemical Vapor Deposition*). Tento proces obvykle prebieha v rozsahu niekoľkých torrů nad atmosférickým tlakom a vyžaduje vysokú teplotu (okolo 1 000 °C) [5].

Chemická depozícia z plynnej fázy pomocou plazmy PECVD (*Plasma Enhanced CVD*) je modifikáciou klasického procesu CVD. Plazma je generovaná buď pomocou indukčnej cievky z vonkajšej strany komory, alebo priamo pomocou diódových žhaviacich elektród. Na rozdiel od termálneho procesu CVD, týmto procesom sú látky rozložené elektrickým výbojom. Výhodou tejto metódy je, že vrstvy sa môžu nanášať pri nižšej teplote. Tento proces prebieha v rozsahu od 10 do 100 Pa. Pri chemickej depozícii z plynnej fázy pomocou laseru LECVD (*Laser Excited CVD*) je namiesto plazmy použitý laser na rozklad látok [5].

Medzi metódy nanášania tenkých vrstiev z roztoku patrí rotačné nanášanie (*spin-coating*), ponorné nanášanie (*dip-coating*) alebo kapilárne nanášanie (*capillary coating*).

Ponorným nanášaním je označovaný proces depozície tenkej vrstvy vyťahovaním substrátu z roztoku. Tento proces začína ponorením substrátu do roztoku a jeho následným vyťahovaním, kedy je súvislá vrstva roztoku zachytená na povrchu substrátu. Táto vrstva sa konsoliduje sušením a sprievodnými chemickými reakciami. Tento proces je rozšírený v priemysle, ale aj v laboratórnej praxi, pretože je lacný, jednoduchý a vytvára pomerne kvalitné vrstvy [6].

Rotačné nanášanie je jednoduchý proces pre rýchlu depozíciu tenkej vrstvy na plochý povrch. Substrát musí byť umiestnený na nejakom rotačnom zariadení a následne je roztok liaty na jeho povrch. Rotovanie spôsobí, že sa roztok rozleje a vytvorí jednotnú vrstvu na povrchu substrátu. Výsledná hrúbka nezávisí len od viskozity a prchavosti roztoku, ale aj od rotačnej rýchlosti. Obvyklá hrúbka vrstiev pripravených touto metódou je pod 1 μm . Výhodou tejto metódy je opäť jednoduchosť. Medzi nedostatky rotačného nanášania môže patriť vytvorenie nerovnomerne hrubého povrchu, čo môže byť spôsobené smerom prúdenia kvapaliny počas procesu [7].

Pri kapilárnom procese je roztok nanášaný zdola na spodnú stranu substrátu v horizontálnom smere. Je pumpovaný nanášajúcou trubicou, laminárne vyteká na povrch a vytvára kontinuálnu a homogénnu vrstvu na substráte. Medzi substrátom a trubicou, z ktorej prúdi nanášaný roztok, vzniká meniskus. Prebytočný roztok odteká do zberného koryta a vracia sa späť do nádoby na prefiltrovanie a opätovné použitie. Pri tejto technike je hrúbka vrstvy daná hydrodynamikou kvapalín. Problémom tejto metódy môže byť čiastočná kontaminácia a hrbolčeky, ktoré sa tvoria na okrajoch substrátu, kde dochádza k odtrhnutiu menisku [8].

Najznámejším príkladom materiálovej tlače je atramentová tlač (*Inkjet Printing*), táto technológia je založená na princípe klasických tlačiarňí. Pri materiálovej tlači sa, na rozdiel od klasickej, ako atramenty používajú materiály s magnetickými, vodivými, polovodivými alebo dielektrickými vlastnosťami. Ďalšími metódami sú napríklad sieťotlač alebo hĺbkotlač [9].

2.2.2 Fyzikálne procesy

Obece fyzikálna depozícia z plynnej fázy (*Physical Vapor Deposition*) je fyzikálny spôsob odstraňovania jednotlivých atómov alebo malých zhlukov atómov z pevného, alebo kvapalného zdroja, ktoré následne dopadajú na substrát a vytvárajú tenkú vrstvu. Veľké množstvo anorganických látok ako kovy, zliatiny a rôzne zlúčeniny kovov, ale aj organické látky môžu byť nanášané týmto spôsobom. Proces PVD môžeme rozdeliť do dvoch hlavných kategórií: naprašovanie a odparovanie [5].

Termálne odparovanie je proces zahŕňajúci odparovanie zdrojového materiálu vo vákuovej komore a jeho následnú kondenzáciu na substrát. Zdrojový materiál je odparovaný z vyhrievaného vlákna, obyčajne vyrobeného z odolných kovov ako je wolfrám, molybdén alebo tantal. Žiaruvzdorné kovy sa nanášajú pomocou metódy EBPVD (*Electron Beam PVD*), pri ktorej je materiál bombardovaný lúčom elektrónov. PLD (*Pulse Laser Deposition*)

je vylepšený, termálny proces využívaný pri depozícii zliatin alebo zlúčenín s kontrolovaným chemickým zložením. V tomto procese je laserom ožarovaný zdrojový materiál cez kremenné sklo. Kremenná šošovka sa používa na zvýšenie účinnosti laseru. MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) je najviac spoľahlivý proces termálneho vyparovania. Rýchlosť vyparovania materiálu je kontrolovaná pomocou počítačovej riadiacej jednotky. Tento spôsob depozície sa v súčasnosti široko používa na riadené nanášanie zliatin a zlúčenín. Systém sa vo všeobecnosti skladá z komory, kde sú nanášané vzorky, analytickej komory a komory, kde sú ukladané vzorky [5].

Naprašovanie (*Sputtering*) je vypudzovanie atómov z povrchu energetickými časticami, môžu to byť kladné ióny, neutrálne atómy, neutróny, elektróny alebo fotóny. Ióny z plazmy sa pohybujú smerom ku katóde, zrýchľujú svoj pohyb v katódovom plášti, čo spôsobí rozprašovanie a emitovanie neutrálnych atómov z povrchu katódy. Takto emitované častice s dostatočnou energiou sú nanášané na anódu [10].

2.3 Optické vlastnosti

Optika je časť fyziky zaoberajúca sa správaním a vlastnosťami svetla, vrátane jeho interakcií s hmotou a zostavovaním prístrojov na detekciu svetla a jeho správania. Táto vedná disciplína sa obvykle zaoberá viditeľným, ale aj ultrafialovým a infračerveným žiarením [11].

U tenkých vrstiev, ktoré sa dnes využívajú čoraz viac v elektronike, okrem optických vlastností hodnotíme aj elektrické. Najdôležitejšími parametrami sú vodivosť a ich dielektrické vlastnosti.

2.3.1 Index lomu

Na rozhraní látok s rôznym indexom lomu dochádza k zmene rýchlosti šírenia svetla, čím dochádza k zmene jeho smeru. Tým dochádza k odrazeniu alebo prepusteniu svetelného lúča. Existuje určitý kritický uhol, pri ktorom svetlo neopustí dané prostredie a pokračuje ďalej po rozhraní prostredí. Snellov zákon vyjadruje vzťah medzi indexmi lomu jednotlivých prostredí, uhlom, pod ktorým svetlo dopadá a uhlom odrazu lúča [12]

$$n \cdot \sin \theta = n' \cdot \sin \theta' . \quad (1)$$

Ako sa bude lúč chovať, závisí okrem vlastností jednotlivých prostredí a uhle pod akým dopadá aj na jeho vlnovej dĺžke. Vďaka tomuto javu dokážeme pomocou hranola rozdeliť svetlo na jednotlivé vlnové dĺžky, pretože modré svetlo sa láme viac ako červené [12].

2.3.2 Absorpcia

Absorpciu žiarenia popisuje napríklad Bouguer-Lambert-Beerov zákon, ktorý je vyjadrený rovnicou (2). Vyplýva z neho, že absorpcia A je priamo úmerná optickej dráhe l , koncentrácii c a molárnemu absorpčnému koeficientu ε_λ [13]

$$A = l \cdot c \cdot \varepsilon_\lambda . \quad (2)$$

Určenie absorpčnej hrany a absorpčného maxima je dôležitým parametrom pri využití tenkých vrstiev vo fotolytických alebo fotokatalytických procesoch. Je to potrebné preto, aby sme určili aké žiarenie, o akých vlnových dĺžkach potrebujeme, aby bol celý proces účinný.

2.3.3 Hrúbka vrstiev

Hrúbka vrstvy ovplyvňuje jej optické vlastnosti, pri odraze svetla dochádza na tenkých vrstvách, ktorých hrúbka je menšia alebo rovná vlnovým dĺžkam viditeľného svetla, k interferenciám svetla. Voľba vhodnej hrúbky tenkej vrstvy sa dá využiť na zníženie alebo zvýšenie odrazivosti šošovky [14].

2.3.4 Homogenita

Vlastnosť, ktorá charakterizuje povrch tenkých vrstiev. Homogénna vrstva je taká, ktorá má na rôznych miestach rovnakú hrúbku, drsnosť, množstvo nečistôt a jej index lomu je v celej vrstve rovnaký [15]. Nehomogenita môže byť spôsobená nevhodným spôsobom nanášania vrstvy, tvorbou kryštálov a obsahom nečistôt. Ak je povrch, na ktorý svetlo dopadá príliš drsný nedochádza k odrazu svetla, ale jeho rozptylu [12].

2.4 Metódy štúdia optických vlastností tenkých vrstiev

Poznáme množstvo metód štúdia tenkých vrstiev, ktorých voľba závisí na sledovaných vlastnostiach tenkých vrstiev. Pri sledovaní optických vlastností sú najrozšírenejšími metódami: optická mikroskopia, UV VIS spektroskopia, profilometria a spektroskopická elipsometria.

2.4.1 Optická mikroskopia

Optická mikroskopia je zobrazovacia metóda, ktorá je veľmi rozšírená vďaka svojmu jednoduchému ovládaniu. Využíva sa na zobrazenia a hlavne zväčšenia rôznych materiálov od rastlinných buniek, hornín, vlákien, polymérov až po stavebný materiál. Svoje využitie nachádza v oblasti biológie, chémie, mineralógie, metalurgie, ale aj v kriminalistike a reštaurovaní umeleckých diel [16]. Ako metóda štúdia tenkých vrstiev, je optická mikroskopia vhodná, na posúdenie homogenity a kvality nanesej tenkej vrstvy.

Optický mikroskop pozostáva z troch hlavných častí: osvetľovacej, mechanickej a optickej. Osvetľovacia časť pozostáva zo zdroja svetla, kondenzora a v niektorých prípadoch aj clony. Mechanickú časť tvorí podstavec, stojan a stolík s krížovým posunom. Optická časť má objektív, ktorý je zodpovedný za vytvorenie prevráteného obrazu a okuláru, vďaka ktorému tento obraz vidíme zväčšený. Optický mikroskop je charakterizovaný svojou rozlišovacou schopnosťou. Rozlišovacia schopnosť mikroskopu je vzdialenosť dvoch bodov, ktoré je mikroskop schopný zobrazit' ako dva samostatné body. Túto vlastnosť ovplyvňuje žiarenie, ktoré objekt osvetľuje, ale aj vlastnosti samotného objektívu [16].

2.4.2 UV VIS Spektroskopia

Spektroskopia je fyzikálna metóda, ktorej princípom je interakcia elektromagnetického žiarenia so vzorkou. Pri UV VIS spektroskopii dochádza k meraniu absorpčného alebo emisného spektra svetla vo viditeľnej a ultrafialovej oblasti. Po ožiarení vzoriek, molekuly pohlcujú fotóny, vďaka čomu sa dostávajú do excitovaného stavu s vyššou energiou. Následne sa môžu tieto molekuly žiarivými alebo nežiarivými prechodmi vracieť do základného stavu [13].

2.4.3 Profilometria

Je to metóda merania výškového profilu povrchu k stanoveniu drsnosti povrchu a iných vlastností ako je napríklad hrúbka vrstvy. Môžeme skenovať jeden bod, čiaru alebo vytvoriť trojdimenzionálny obraz povrchu. Všetky profilometre pozostávajú z minimálne dvoch častí: detektora a podložky pre vzorku. Buď sa počas merania posúva detektor alebo podložka nesúca vzorku alebo obe časti. Dnešné profilometre dosahujú rozlíšenie na úrovni nanometrov. Rozdeľujeme ich na dve hlavné kategórie: kontaktné a optické (bezkontaktné) [17].

Kontaktné alebo mechanické profilometre fungujú na princípe monitorovania povrchu pomocou ostrej ihly. Táto ihla prechádza po vzorke pod určitým tlakom s cieľom merať výšku povrchu. Meranie prebieha mechanicky, pričom sa monitoruje sila, ktorou tlačí ihla na povrch. Takýmto spôsobom môžu byť merané iba pevné, rovinné vzorky. Táto metóda patrí medzi najrozšírenejšie metódy na analýzu drsnosti a hrúbky povrchu, pretože je jednoduchá, široko dostupná a veľmi citlivá. Nevýhodou tejto metódy je, že môže dôjsť k poškodeniu vzorky ihlou a to, že je pomalšia ako nekontaktné metódy. Zároveň meranie ovplyvňuje veľkosť a tvar sondovacej ihly [18].

Optická profilometria je nekontaktná metóda, ktorá poskytuje rovnaké množstvo informácií ako kontaktná profilometria. Táto metóda využíva svetlo namiesto fyzickej ihly. Môže byť realizovaná viacerými spôsobmi, podstatné je namierenie svetla tak, aby mohlo monitorovať povrch. Príkladom je fázová interferometria, konfokálna mikroskopia a digitálna holografia. Najväčšou výhodou tejto metódy je rýchlosť a to, že nedochádza k poškodzovaniu vzorky, pretože meraný povrch nie je priamo v kontakte s mechanickou sondou [18].

2.4.4 Spektroskopická elipsometria

Elipsometria je nedeštruktívna, optická metóda, ktorá meria zmenu polarizovaného svetla odrazeného od vzorky. Umožňuje monitorovanie a charakterizovanie vzorky v priebehu výroby (*in-situ*) alebo meranie *ex-situ*, to znamená po skončení výroby vzorky. Obecné meranie prebieha v ultrafialovej a viditeľnej oblasti, ale je možné aj v infračervenej [19].

V elipsometrii sú merané dve základné hodnoty, pomer amplitúd ψ a fázový rozdiel Δ medzi p- a s-polarizovanými, svetelnými vlnami. Pomocou týchto parametrov vyjadruje základná rovnica elipsometrie komplexnú odrazivosť ρ

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\psi e^{i\Delta}, \quad (3)$$

kde r_s a r_p sú Fresnelové koeficienty. Platí, že r_s vyjadruje odrazivosť svetla polarizovaného kolmo na rovinu dopadu a naopak r_p vyjadruje odrazivosť svetla polarizovaného paralelne na rovinu dopadu [19]. Tieto koeficienty sú vypočítané z Fresnelových rovníc, zo vzorcov pre reflexný a transmisný koeficient

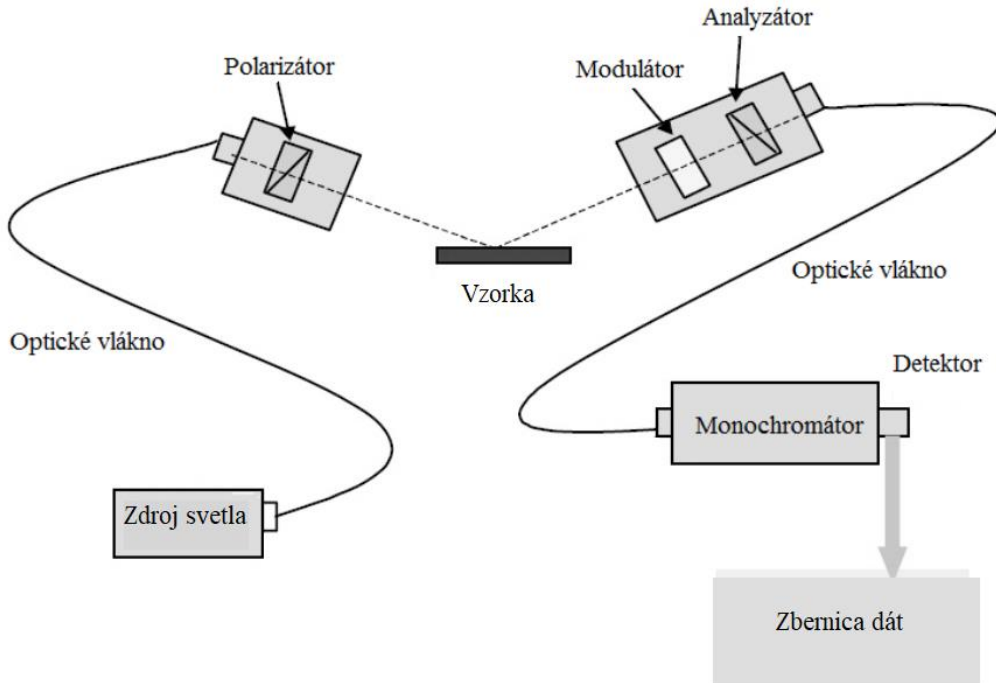
$$r_s = \frac{n_i \cos\theta_i - n_t \cos\theta_t}{n_i \cos\theta_i + n_t \cos\theta_t}, t_s = \frac{2n_i \cos\theta_i}{n_i \cos\theta_i + n_t \cos\theta_t}, \quad (4)$$

$$r_p = \frac{n_t \cos\theta_i - n_i \cos\theta_t}{n_t \cos\theta_i + n_i \cos\theta_t}, t_p = \frac{2n_i \cos\theta_i}{n_t \cos\theta_i + n_i \cos\theta_t}, \quad (5)$$

kde θ_i je uhol dopadu svetla na rozhranie, θ_t je uhol lomu, n_i a n_t sú indexy lomu okolia a meranej vzorky [20].

Na analýzu výsledkov sa používajú určité optické modely, pretože interpretácia nameraných výsledkov z hodnôt ψ a Δ je náročná. Analýzou získame hodnoty hrúbky tenkej vrstvy, ale aj jej optických konštánt, hlavne refrakčného indexu n a extinkčného koeficientu k . Z hodnôt hrúbky vrstvy a optických konštánt dokážeme vypočítať reflektanciu a transmitáciu vrstvy. Pri meraní *in-situ* dokážeme sledovať proces tvorby vrstvy už od začiatku, čiže vieme, akým spôsobom sa začala vrstva tvoriť, máme detailné informácie o štruktúre jednotlivých rozhraní a vieme určiť reakčnú rýchlosť procesu. Táto metóda sa môže využívať ako spätná kontrola pri výrobnom procese [20].

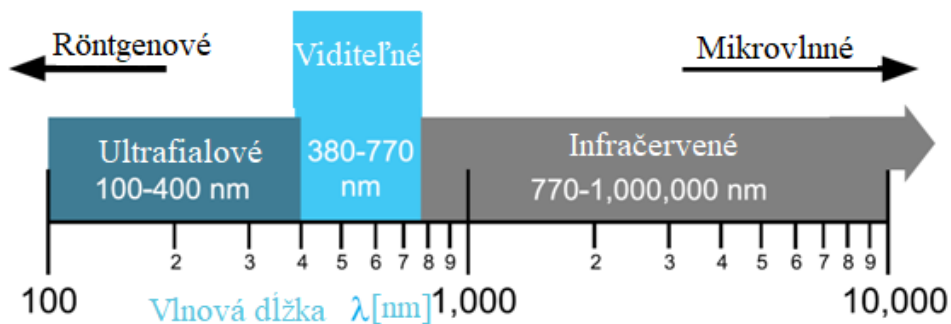
Ako môžeme vidieť na Obr. 2, elipsometer pozostáva zo zdroja svetla, ktoré je optickým vláknom prenášané do polarizátora, z ktorého dopadá na vzorku. Svetlo odrazené od vzorky sa najprv spracováva modulátorom, následne prechádza cez analyzátor optickým vláknom do monochromátora, ktorý separuje svetlo na jednotlivé vlnové dĺžky pred vstupom do detektora [20].



Obr. 2: Schéma usporiadania spektroskopického elipsometra [20]

2.5 Svetlo

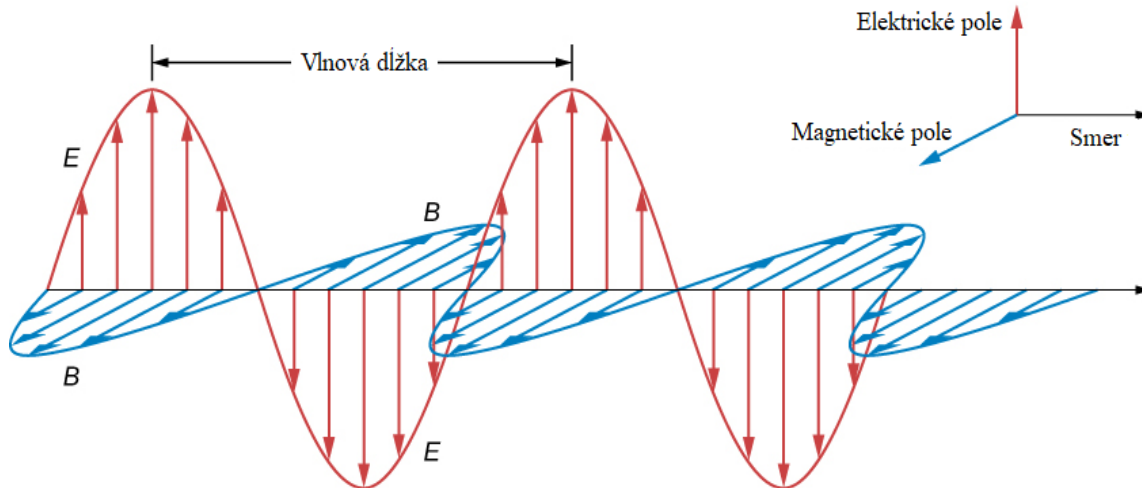
Svetlo je elektromagnetické vlnenie, ktoré má veľmi široký rozsah od rádiových vln s vlnovou dĺžkou niekoľkých metrov až po röntgenové žiarenie s vlnovou dĺžkou niekoľkých nanometrov až pikometrov ako je možné vidieť na Obr. 3 [12].



Obr. 3: Elektromagnetické spektrum svetla [12]

2.5.1 Svetlo ako elektromagnetické vlnenie

Elektromagnetické vlnenie pozostáva z magnetického a elektrického vlnenia. Veľkosť oboch vektorov je funkciou času a pozície. Tieto vektory sú na seba navzájom kolmé a zároveň sú oba kolmé na smer šírenia vlnenia vid' Obr. 4. Pre popis vlnenia svetla je dôležitejší vektor elektrického poľa. Vektor magnetického poľa nie je tak dôležitý, pretože indukované magnetické pole v materiáli, môže byť zanedbané, pokiaľ je pohyb magnetického momentu elektrónov a jadra veľmi pomalý na to, aby nasledoval rýchle, optické kmitanie [20].



Obr. 4: Znázornenie smeru šírenia elektromagnetického vlnenia [21]

Elektromagnetické pole je vo vákuu, kde neprechádza elektrický prúd, popísané Maxvellovými rovnicami

$$\nabla \mathbf{E} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{\mu \varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0, \quad (9)$$

kde \mathbf{E} a \mathbf{B} popisujú elektrické a magnetické pole, c je rýchlosť svetla, μ je permeabilita a ε je permitivita. Kombinácia týchto rovníc vedie k rovnici vlnenia elektrického poľa

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (10)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu \varepsilon}}. \quad (11)$$

Elektromagnetická rovinná vlna je výsledkom rovnice vlnenia elektrického poľa

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp\left(\frac{i2\pi \cdot \tilde{n}}{\lambda} \mathbf{q} \cdot \mathbf{r}\right) \exp(-i\omega \cdot t), \quad (12)$$

kde \mathbf{r} je vektor pozície pozdĺž smeru šírenia vlny, t je čas, \mathbf{q} je jednotkový vektor šírenia vlny a \tilde{n} je komplexný refrakčný index.

2.5.2 Polarizácia svetla

Prirodzené svetlo, to znamená svetlo vyžarované napríklad z plameňa alebo Slnka, je nepolarizované. Je superpozíciou veľkého počtu kvánt vlnení, pričom každé vlnenie má inú frekvenciu, amplitúdu a smer. Výsledkom toho je vlnenie, ktorého vektor má náhodnú veľkosť a s rovnakou pravdepodobnosťou akýkoľvek smer kolmý na smer šírenia sa vlny [15].

Ak obmedzíme smer kmitania elektrického alebo magnetického vektora alebo jeho veľkosť, vytvoríme tým polarizované svetlo. Polarizácia svetla je charakteristikou elektromagnetického vlnenia. K polarizácii vlnenia dochádza najbežnejšie odrazom, lomom alebo prechodom svetla anizotropným prostredím. Rozlišujeme tri druhy polarizovaného svetla: lineárne, kruhovo a elipticky [22].

Pre priblíženie si jednotlivých druhov polarizácie pri zvolení pravouhlej súradnicovej sústavy xyz , uvažujúc o dvoch vlneniach ε_1 a ε_2 , ktoré sa šíria v smere osy z s rovnakou frekvenciou a ich elektrické vektory kmitajú v navzájom kolmých rovinách, ich môžeme vyjadriť v tvare

$$\varepsilon_{1x}(z, t) = E_{10} \cos(\omega t - kz), \quad \varepsilon_{1y} = \varepsilon_{1z} = 0, \quad (13)$$

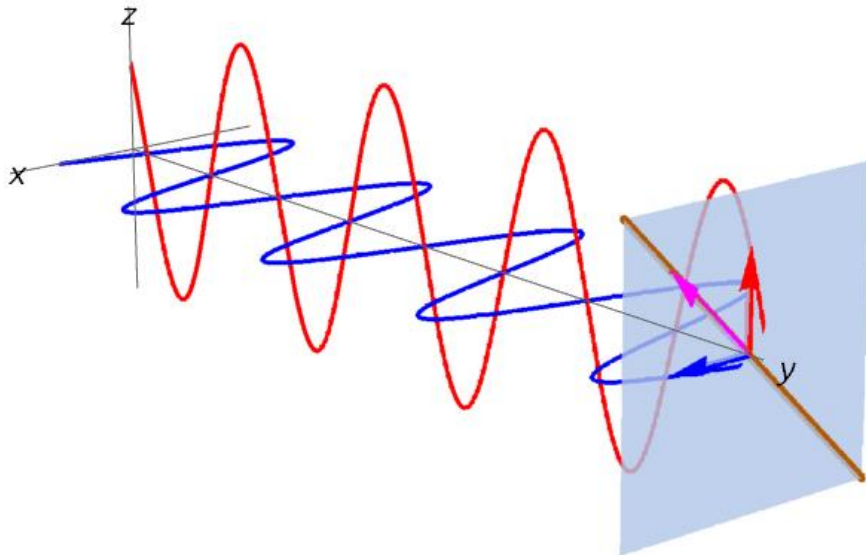
$$\varepsilon_{2y}(z, t) = E_{20} \cos(\omega t - kz + \varphi), \quad \varepsilon_{2x} = \varepsilon_{2z} = 0, \quad (14)$$

kde φ je fázový rozdiel, E_{10} a E_{20} sú konštantné amplitúdy [15]. Výsledná intenzita elektrického poľa je určená na základe princípu superpozície vzťahom

$$\varepsilon = \varepsilon_1(z, t) + \varepsilon_2(z, t). \quad (15)$$

Úpravou týchto rovníc získavame rovnice pre popis jednotlivých druhov polarizácie svetla. Na Obr. 5 je zobrazené lineárne polarizované svetlo. O lineárne polarizované vlnenie ide v prípade, že je fázový posun nulový, čiže $\varphi = \pm m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), z čoho vyplýva že, $\cos \varphi = \pm 1$ a $\sin \varphi = 0$ [15]. V tomto prípade získavame rovnice pre popis dvoch priamok

$$\frac{\varepsilon_{1x}}{E_{10}} + \frac{\varepsilon_{2y}}{E_{20}} = 0, \quad \frac{\varepsilon_{1x}}{E_{10}} - \frac{\varepsilon_{2y}}{E_{20}} = 0. \quad (16)$$

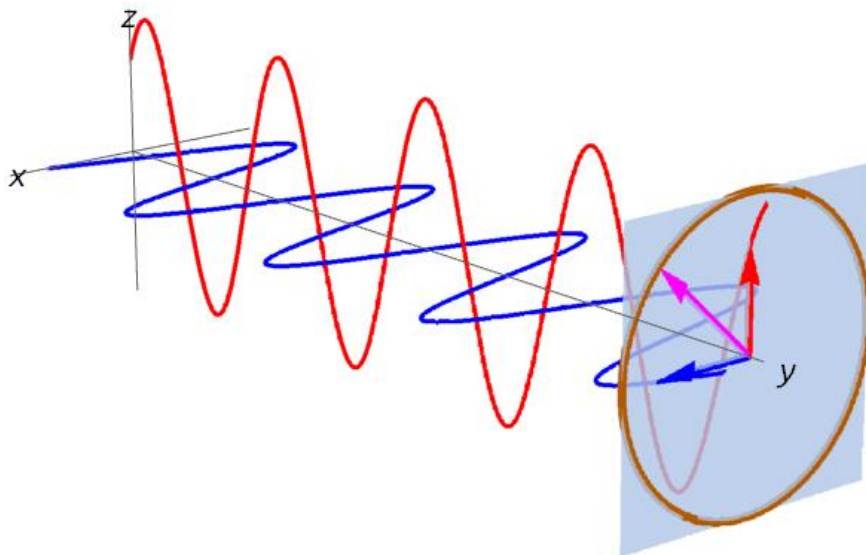


Obr. 5: Lineárne polarizované svetlo [23]

Kruhovú polarizáciu svetla nastáva ak $E_{10} = E_{20} = E_0$ a $\cos\varphi = 0$, čo znamená, že $\varphi = \pm\pi/2 + m\pi$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) [15]. To znamená, že rovnica (13) sa zmení na rovnicu kružnice

$$\varepsilon_{1x}^2 + \varepsilon_{2y}^2 = E_0^2. \quad (17)$$

Obr. 6 znázorňuje svetlo, ktoré je polarizované kruhovo, kedy sa mení smer šírenia, ale veľkosť vektorov je konštantná.



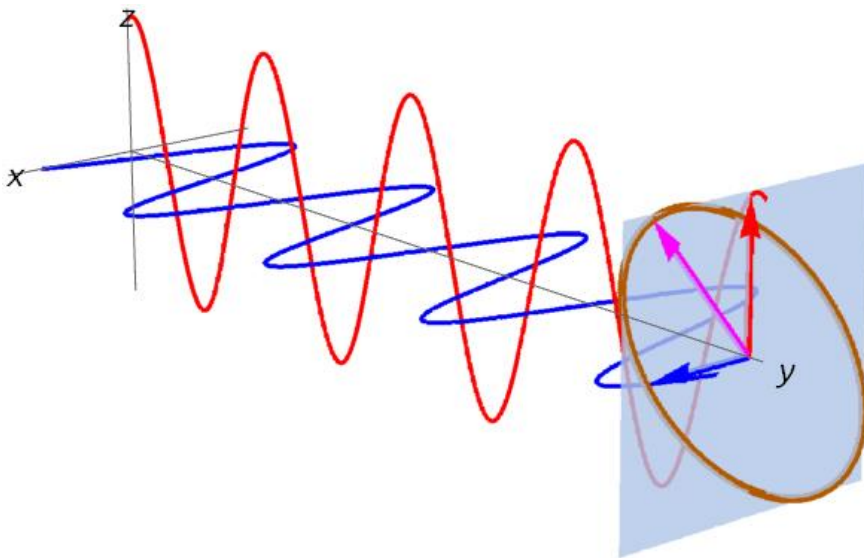
Obr. 6: Kruhovo polarizované svetlo [23]

Svetlo je polarizované elipticky, pokiaľ sú amplitúdy E_{10} a E_{20} rôzne, ale $\varphi = \pm\pi/2 + m\pi$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Svetlo je ale elipticky polarizované aj v prípade,

že $E_{10} = E_{20}$, ale $\cos \varphi \neq 0$. Rovnica elipsy je v podstate všeobecnou rovnicou polarizácie a má tvar

$$\left(\frac{\varepsilon_{1x}}{E_{10}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{2y}}{E_{20}}\right)^2 - 2\left(\frac{\varepsilon_{1x}}{E_{10}}\right)\left(\frac{\varepsilon_{2y}}{E_{20}}\right)\cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (18)$$

Je vidieť na Obr. 7, že priemer krivky, ktorá opisuje koniec svetelného vektora do roviny kolmej na smer šírenia, je elipsa. Tvar krivky závisí od veľkosti amplitúd a fázového rozdielu [15].



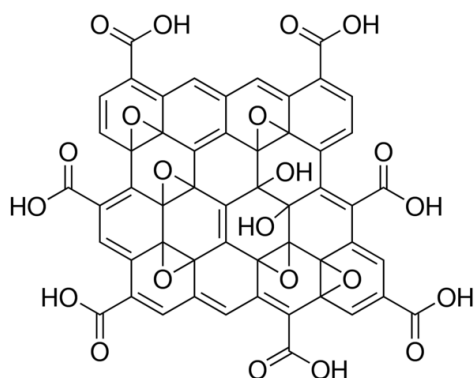
Obr. 7: Eliptická polarizácia svetla [23]

3 EXPERIMENTÁLNA ČÁST

3.1 Použitý materiál

3.1.1 Grafén oxid

Grafén oxid, je uhlíková nanoštruktúra s funkčnými skupinami obsahujúcimi kyslík ako je to zobrazené na Obr. 8. Jeho funkčné skupiny sú karboxylové, karbonylové a hydroxy skupiny [4]. Grafén oxid bol pripravovaný z grafénových vločiek firmy Danubia Nanotech, vo forme disperzie s vodou. Koncentrácia tejto disperzie bola 4 mg/ml.



Obr. 8: Vzorec grafén oxidu

3.1.2 Štruktúra pripravovanej vzorky

Obr. 9 zobrazuje schematické znázornenie štruktúry meranej vzorky. Základnou časťou je krycie sklo, na ktorom je nanosená tenká vrstva grafén oxidu.



Obr. 9: Kompozícia vzorky pre meranie

3.2 Príprava vzorky

Dôležitým krokom je vhodne zvolená príprava vrstvy, pretože výsledná kvalita, homogenita a hrúbka vrstvy závisí na spôsobe prípravy vzorky.

3.2.1 Rotačné nanášanie

Tento proces bol použitý, pretože je to veľmi jednoduchý a pomerne kvalitný spôsob nanášania tenkých vrstiev. Jeho obmedzením je depozícia vrstiev výhradne na plochý povrch. Pri príprave bol používaný spin-coater Chemat technology KW-4A ako môžete vidieť na Obr. 10.



Obr. 10: Použitý spin-coater [24]

Príprava začala vyčistením skla, na ktoré sa vzorka nanášala pomocou isopropyl alkoholu. Následne bolo toto sklo pevne umiestnené na spin-coater a bolo na neho nanosených 50 μ l roztoku. Rýchlosť otáčok bola nastavená na 3 000 otáčok za minútu po dobu 30 sekúnd.

3.3 Meranie vzorky

Boli použité rôzne metódy, ktorými bola vzorka charakterizovaná. Jednotlivé metódy sú popísané v nasledujúcich podkapitolách a majú rozdielnu presnosť a zameranie. Najkomplexnejšou z metód je spektroskopická elipsometria.

3.3.1 Optická mikroskopia

Na posúdenie kvality a homogenity nanesej tenkej vrstvy bol používaný optický mikroskop Elipse 200 od značky Nikon, ktorý sa nachádza na Obr. 11. Tento mikroskop má v sebe zabudovaný fotoaparát, vďaka čomu na ňom boli zhotovené snímky povrchu jednotlivých vzoriek. Meranie prebiehalo pri desaťnásobnom zväčšení a bolo použité spodné osvetlenie vzorky.

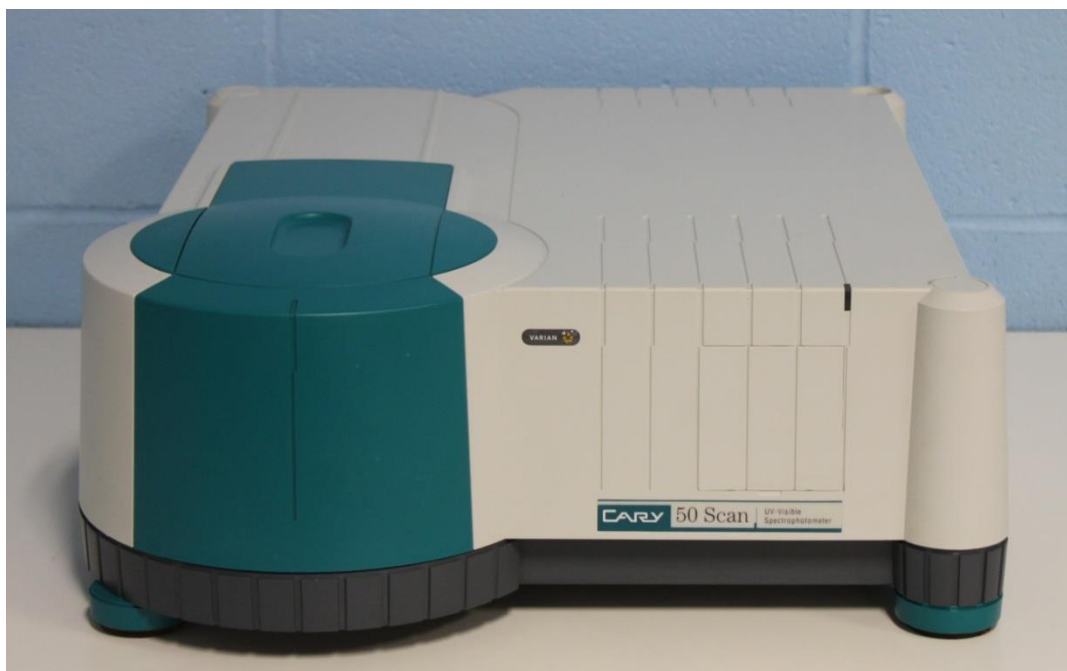


Obr. 11: Použitý optický mikroskop [25]

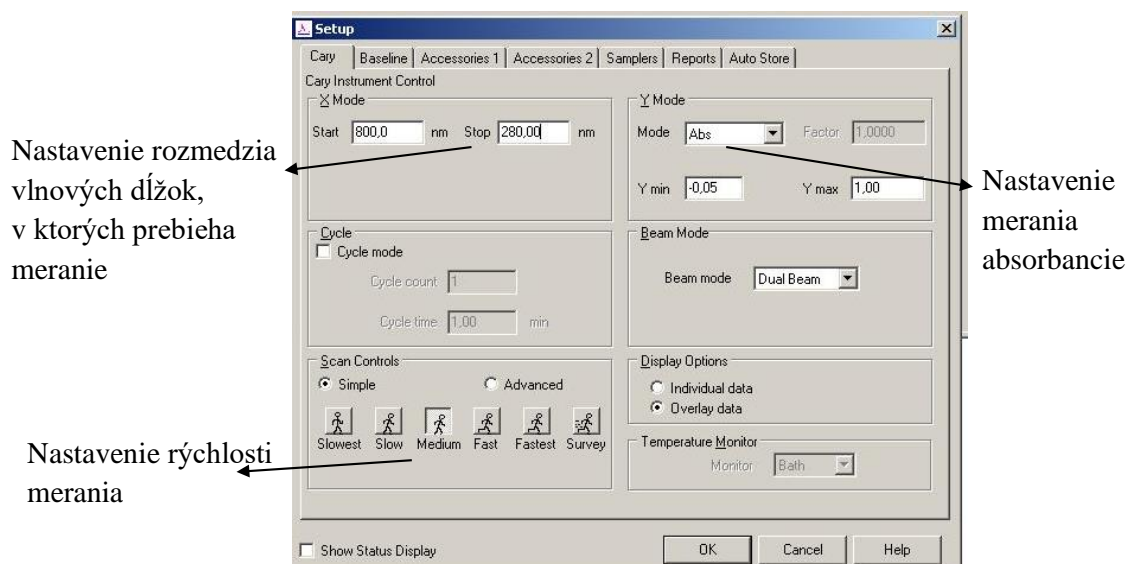
3.3.2 UV VIS Spektroskopia

Pre meranie absorpčného spektra vzorky bol používaný spektrometer Varian Cary Probe 50 od firmy Agilent Technology. Tento spektrometer je vidieť na Obr. 12 a pozostáva z xenónovej lampy, mriežky, Czerny-Turner monochromátora a detektora. Mriežka rozkladá svetlo na spektrum, monochromátor umožňuje prechod len určitej časti spektra a detektor meria energiu žiarenia po prechode vzorkou. Tento spektrometer umožňuje merať spektrum v rozmedzí 190–1 100 nm.

Nastavenie merania je vidieť na Obr. 13. Meranou veličinou bola absorpcia v závislosti na vlnovej dĺžke. Meranie prebiehalo v oblasti od 280–800 nm. To znamená, že meranie prebiehalo iba vo viditeľnej oblasti spektra, pretože vzorky boli nanosené na sklenenom substráte. Sklenený substrát na rozdiel od kremenného neprepúšťa UV žiarenie.



Obr. 12: Spektrometer Varian Cary Probe 50 [26]



Obr. 13: Nastavenie spektroskopického meranie

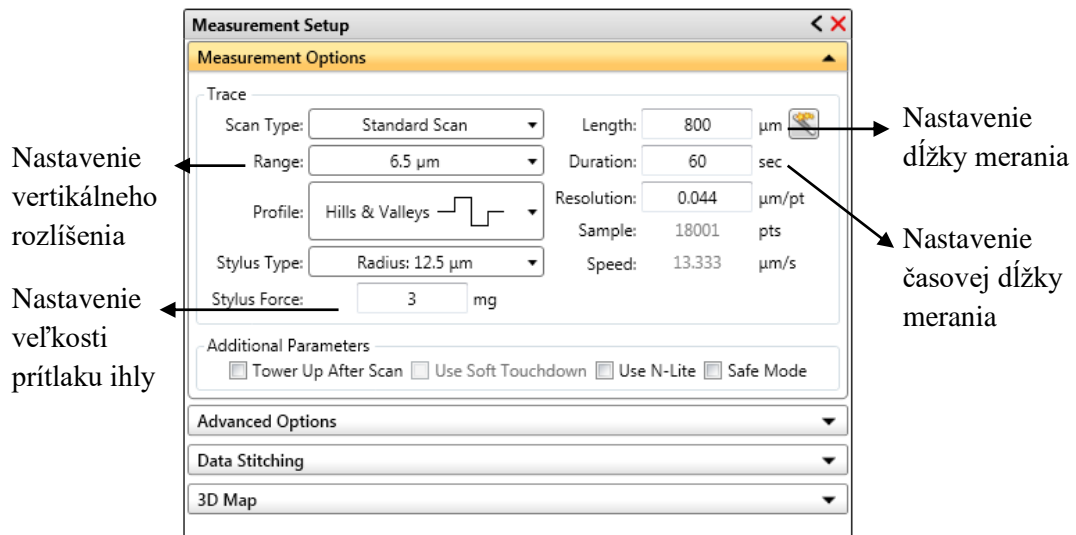
3.3.3 Profilometria

Na Obr. 14 sa nachádza mechanický profilometer Dektak XT od firmy Bruker, ktorý bol používaný na meranie hrúbky vrstvy. Profilometrom meriame hrúbku, ale aj nerovnosti vrstvy. Na Obr. 15 sú nastavené základné parametre pre správne meranie profilometrom. Je dôležité nastaviť správny prítlak, aby nebol príliš veľký a nedošlo

k poškodeniu vzorky, ale ani príliš slabý, lebo nezískame správnu hodnotu hrúbky vrstvy. V našom prípade sme zvolili hodnotu prítlaku na 3 mg.

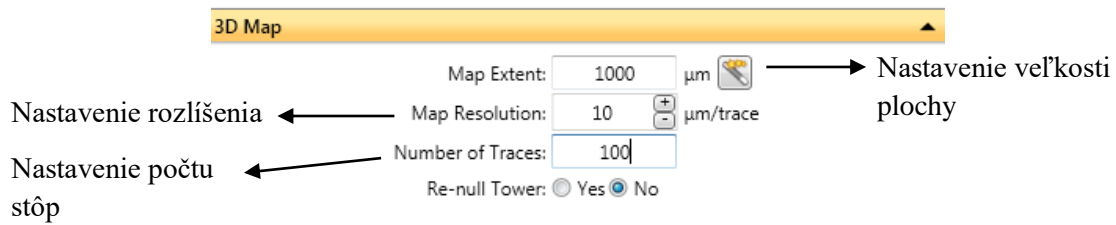


Obr. 14: Profilometer Dektak XT [27]



Obr. 15: Základné nastavenie profilometra

Pomocou profilometra dokážeme vytvoriť aj 3D mapy povrchu vzorky. Pri vytváraní 3D máp je dôležité nastaviť akú veľkú plochu vzorky bude mapa zahŕňať a aké veľké chceme rozlíšenie mapy. Prehľad nastavenie je možné vidieť na Obr. 16.



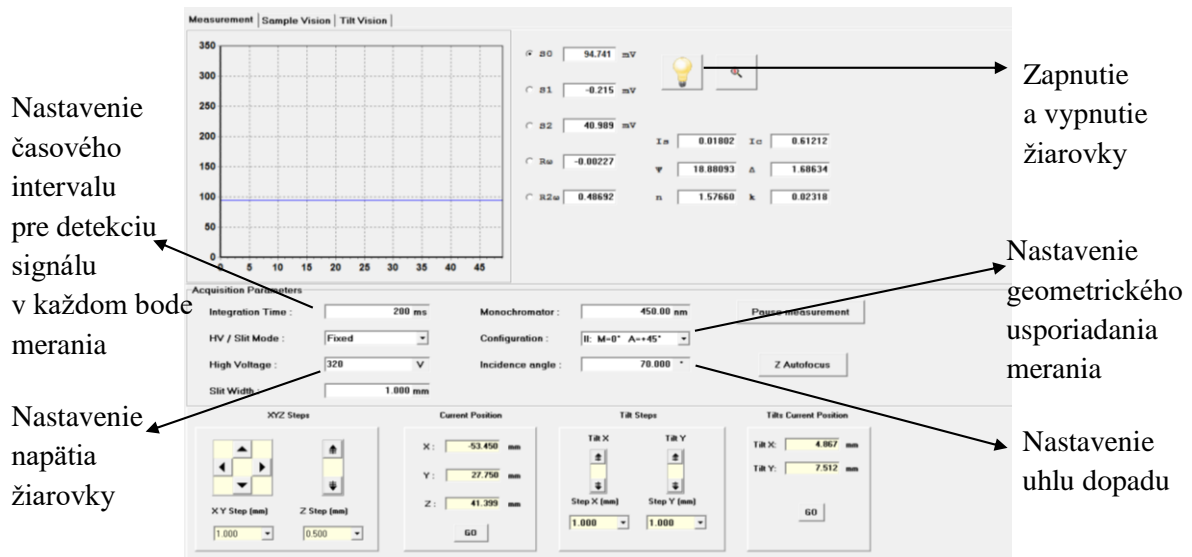
Obr. 16: Nastavenie 3D mapy pre profilometer

3.3.4 Spektroskopická elipsometria

Pre túto metódu bol použitý elipsometer typu UVISEL 2 od firmy HORIBA Scientific's vid' Obr. 17. Pre správne meranie je nevyhnutné si nastaviť správne rozmedzie hodnôt. Obr. 18 zobrazuje nastavenie parametrov. Meranie prebiehalo v oblasti od 200–850 nm. Privádzané napätie bolo nastavené na hodnotu 320 V. Bol zvolený vhodný uhol dopadu svetla na vzorku 70°.

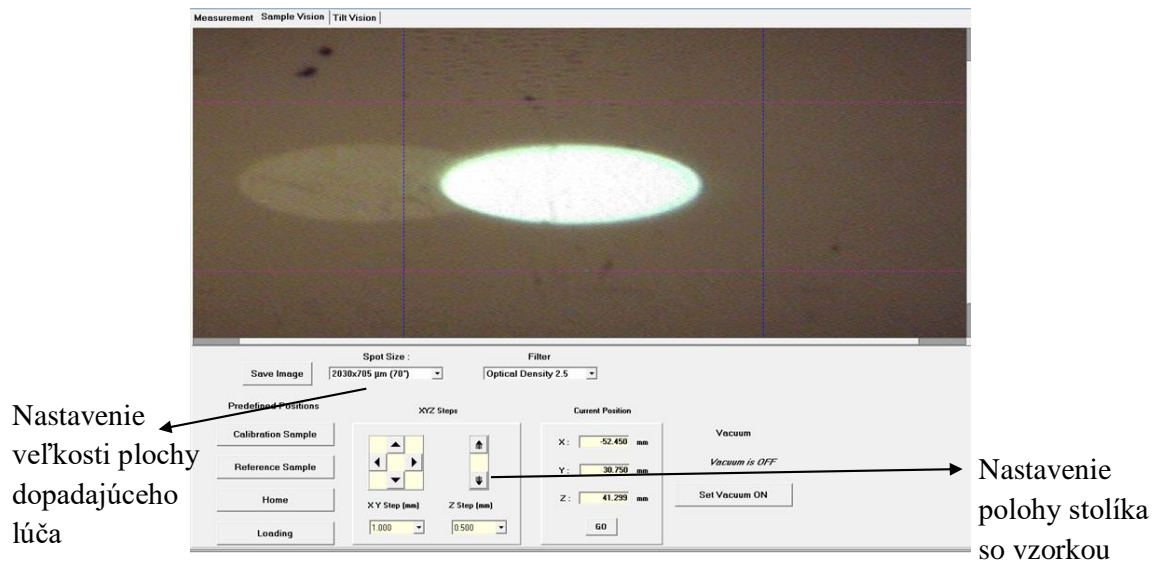


Obr. 17: Spektroskopický elipsometer UVISEL 2 [20]

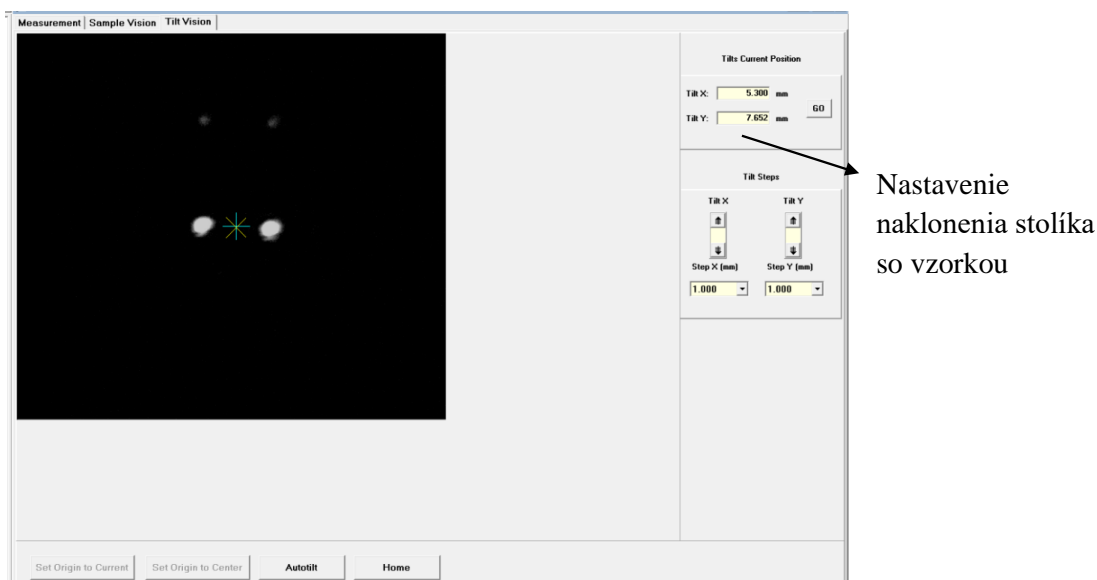


Obr. 18: Nastavenie základných parametrov merania

Po nastavení základných parametrov bolo potrebné zvoliť veľkosť plochy dopadajúceho lúča a nastavenie optimálnej polohy stolíka so vzorkou. So stolíkom sa dá ako vidieť na Obr. 19 pohybovať v smere osy x, y, z , ale aj ako vidieť na Obr. 20 jeho naklonenie, pohyb smerom hore a dole.



Obr. 19: Nastavenie polohy stolíka so vzorkou



Obr. 20: Nastavenie naklonenia stolíka so vzorkou

Namerané hodnoty bolo potrebné vyhodnotiť v programe DeltaPsi2. V prvom kroku vyhodnocovania je potrebné vytvoriť model vzorky. Na Obr. 21 je náš vytvorený model vzorky pozostávajúci z GO ako základnej vrstvy a skla ako substrátu. Po vytvorení modelu boli namerané dáta fitované a zistené základné parametre ako index lomu, extinkčný koeficient, hrúbka vrstvy, permitivita atď. Je dôležité, aby bola čo najmenšia hodnota odchýlky χ^2 , pretože prezentuje rozdiel medzi nameranými a modelovými dátami.

GO (n_1, k_1)
Substrát: sklo (n_0, k_0)
Vzduch

Obr. 21: Model pre grafén oxid

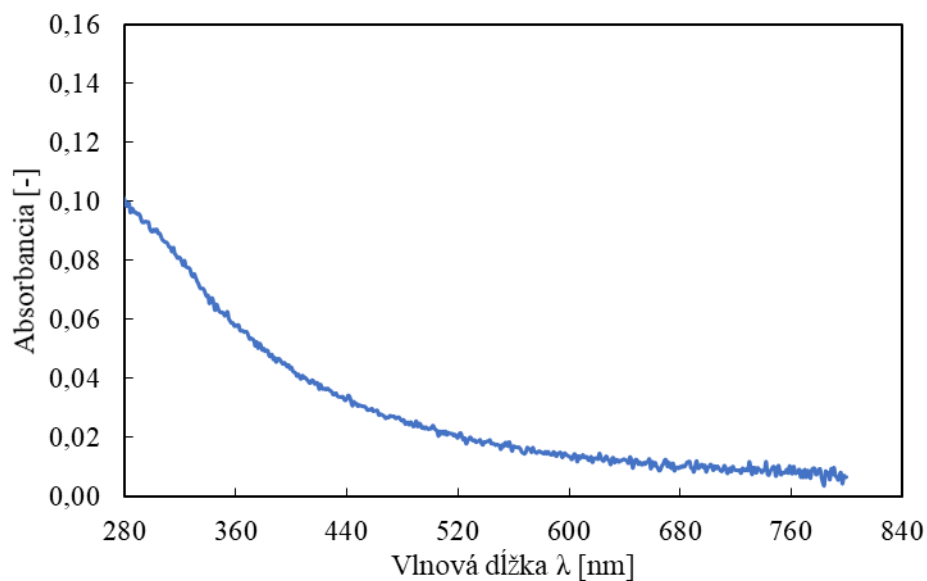
4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Po príprave vzorky bola najskôr overená kvalita a homogenita povrchu vzorky na optickom mikroskope. Overenie homogenity vzorky je potrebné pre presnosť nasledujúcich meraní. Na Obr. 22 je vidieť fotografiu povrchu vzorky nasnímanú optickým mikroskopom. Z tejto fotografie vyplýva, že vzorka je pomerne homogénna, až na občasné malé hrbolčeky.



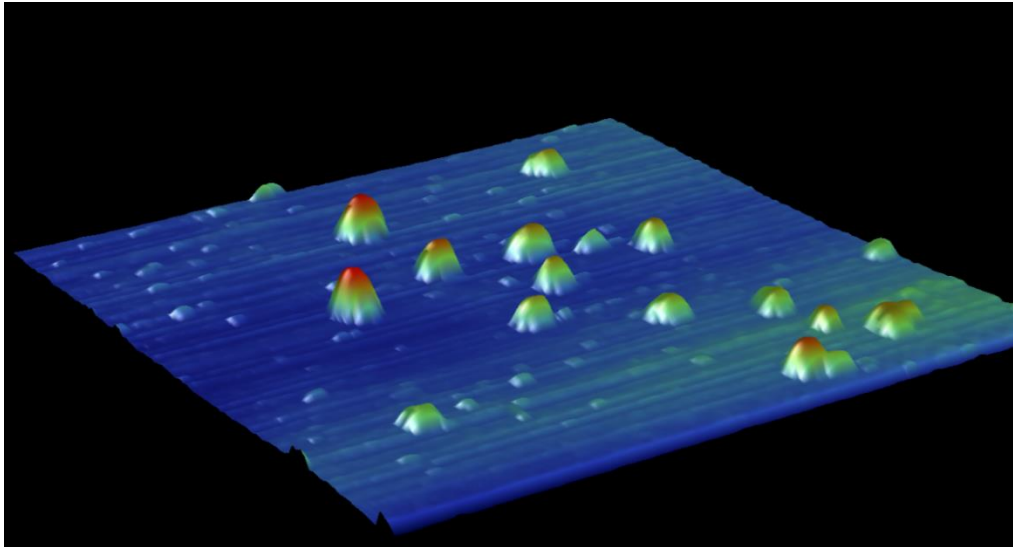
Obr. 22: Fotografia vzorky optickým mikroskopom

Obr. 23 znázorňuje absorpčné spektrum namerané na spektrometri. Vyplýva z neho, že absorbanca grafén oxidu stúpa smerom do UV oblasti a svoje absorpčné maximum dosahuje práve v tejto oblasti. Meranie, ale neprebiehало v UV oblasti, pretože vzorka nebola pripravená na kremennom substráte, čiže dochádzalo k absorpcii svetla substrátom.

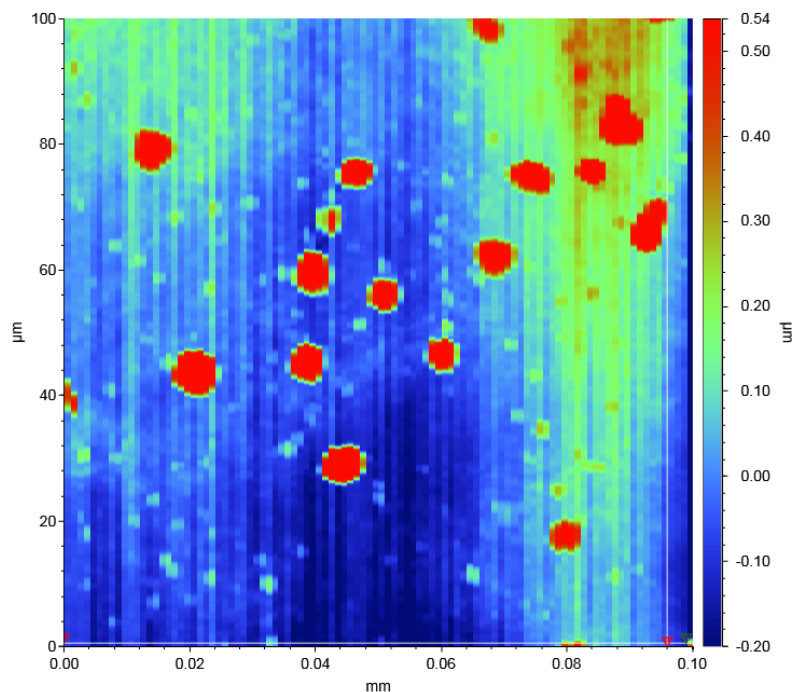


Obr. 23: Grafické znázornenie závislosti absorbanacie na vlnovej dĺžke

Homogenita povrchu bola presnejšie overená pomocou profilometrie. Obr. 24 znázorňuje 3D mapu povrchu vzorky, na ktorej je rovnako ako na fotografii z optického mikroskopu vidieť hrbolčeky rôznych veľkostí. Výška hrbolčekov, ako je to vidieť na Obr. 25, dosahuje maximum až 50 nm.



Obr. 24: 3D mapa povrchu vzorky



Obr. 25: Grafické znázornenie povrchu vzorky

Táto práca bola predovšetkým zameraná na stanovenie hrúbky vrstiev, ktoré boli namerané na spektroskopickom elipsometri a overené na profilometri. Výsledky nameraných hodnôt pomocou profilometrie sú zobrazené v Tabuľke 1. Bolo prevedených 5 meraní na rôznych miestach vzorky a následne bola stanovená priemerná hodnota a smerodajná odchýlka

merania. Odlišnosti nameraných hrúbok sú pravdepodobne spôsobené hrbolčekmi, ktoré sa na vrstve nachádzali.

Tabuľka 1: Namerané výsledky hrúbky pomocou profilometrie

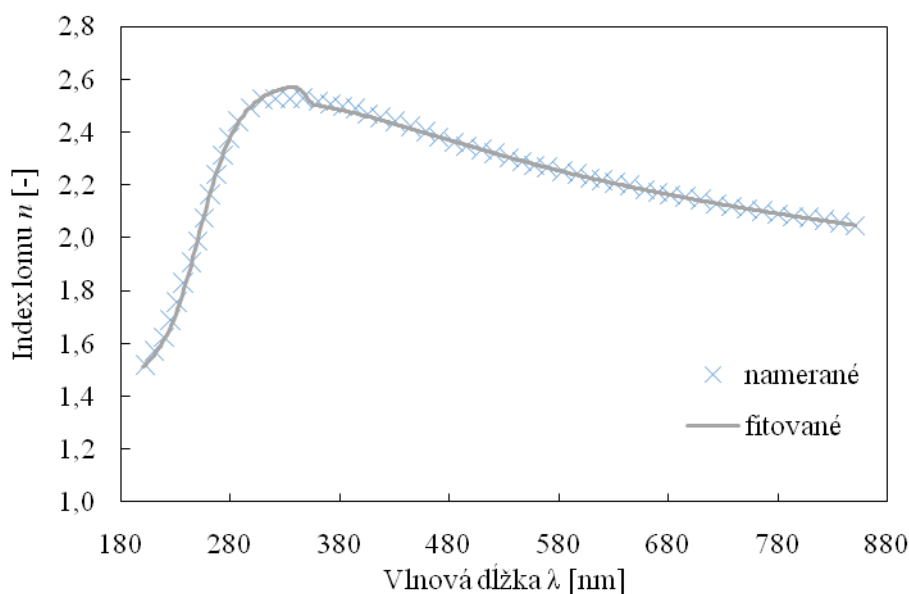
Číslo merania	Hrúbka vrstvy [nm]					Priemerná hodnota
	1.	2.	3.	4.	5.	
	35,0	29,0	23,0	20,0	34,0	28,3 ± 5,7

Výsledky nameraných hodnôt sú prehľadne zobrazené v Tabuľke 2. Hodnoty namerané na profilometri sa takmer vôbec nelíšili od hodnôt nameraných spektroskopickým elipsometrom. Malé nepresnosti mohli byť spôsobené vyššie spomenutými dôvodmi, určitej nehomogenity meranej vzorky.

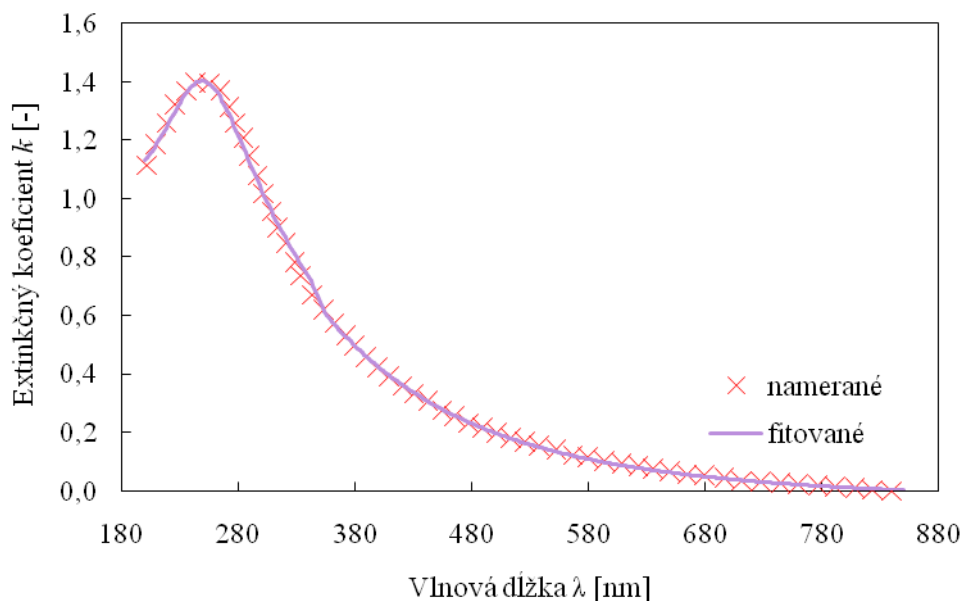
Tabuľka 2: Porovnanie nameraných výsledkov hrúbky vrstvy

Hrúbka vrstvy [nm]	
Profilometria	Spektroskopická elipsometria
28,3 ± 5,7	28,6 ± 1,4

Obr. 26 a Obr. 27 znázorňujú výsledky merania spektroskopickým elipsometrom a výsledky fitovania nameraných hodnôt. Sú vyjadrené ako závislosti indexu lomu a extinkčného koeficientu na vlnovej dĺžke. Rozdiel medzi nameranými a nafitovanými hodnotami je vyjadrený odchýlkou χ^2 , ktorá v našom prípade dosahovala hodnotu 0,22.

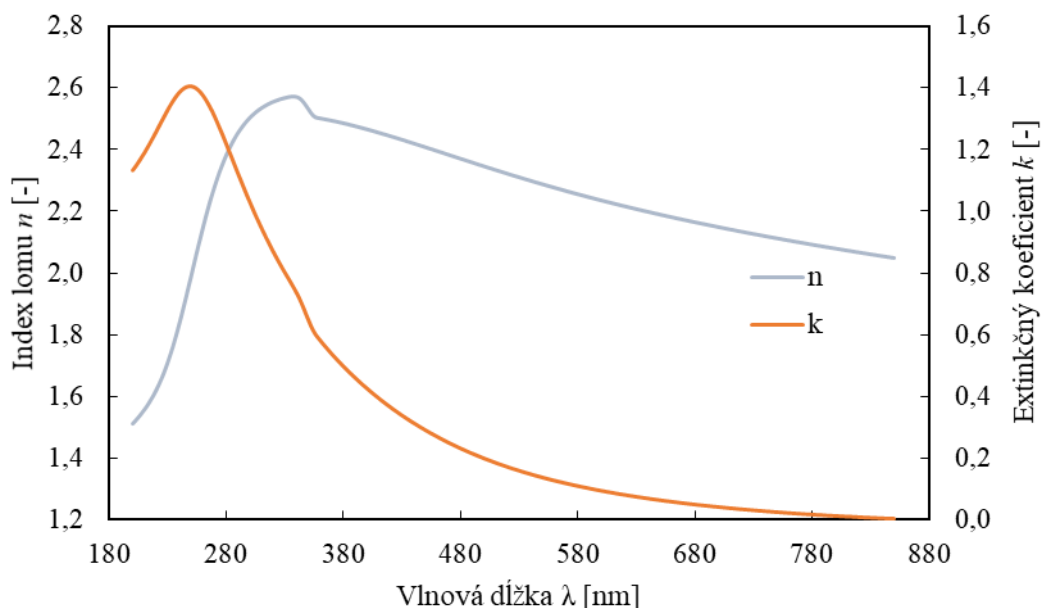


Obr. 26: Grafické znázornenie nameranej a nafitovanej závislosti indexu lomu na vlnovej dĺžke



Obr. 27: Grafické znázornenie nameranej a nafitovanej závislosti extinkčného koeficientu na vlnovej dĺžke

Obr. 28 znázorňuje výslednú závislosť indexu lomu a extinkčného koeficientu na vlnovej dĺžke. Z grafu je vidieť, že extinkčný koeficient dosahuje svoje prvé maximum približne 1,4 pri 250 nm a svoje druhé maximum približne 0,7 pri 340 nm. Vyplýva z toho, že k absorpcii svetla dochádza hlavne v UV oblasti, preto pri jeho potenciálnom využití vo fotolytických procesoch by bolo potrebné UV žiarenie. Index lomu dosahuje svoje prvé maximum okolo 2,6 pri vlnovej dĺžke 340 nm a svoje druhé maximum približne 2,5 pri 390 nm. V grafe vidíme, že pre grafén oxid sú charakteristické 2 lokálne maximá. Po jeho redukcii druhé lokálne maximum zaniká.



Obr. 28: Grafické znázornenie výsledne spracovanej závislosti indexu lomu (vľavo) a extinkčného koeficientu (vpravo) na vlnovej dĺžke

5 ZÁVER

Cieľ práce, oboznámiť sa s metódami stanovenia optických vlastností tenkých vrstiev grafén oxidu, bol splnený. V prvej časti práce sa práca zaoberá popisom jednotlivých príprav tenkých vrstiev, ich optickými vlastnosťami a nakoniec popisom jednotlivých metód vhodných na stanovenie optických vlastností tenkých vrstiev. V časti výsledky a diskusia sú zhrnuté namerané výsledky.

Práca bola zameraná na stanovenie hrúbok tenkých vrstiev, preto boli porovnané namerané výsledky hrúbok z odlišných metód stanovenia. Hodnoty namerané profilometrom sa s malou odchýlkou zhodovali s hodnotami nameranými spektroskopickým elipsometrom, preto sa môžeme domnievať, že nameraná hrúbka vrstvy približne 28 nm je správna. Spektroskopickým elipsometrom boli stanovené závislosti indexu lomu a extinkčného koeficientu na vlnovej dĺžke. Pri vlnovej dĺžke 634 nm index lomu dosahuje hodnotu 2,2 a extinkčný koeficient 0,1. Tieto hodnoty sa minimálne líšia od nájdených publikovaných hodnôt indexu lomu 2,0 a extinkčného koeficientu 0,1 pri 634 nm [4], z čoho môžeme predpokladať správnosť merania. Nepresnosti merania mohli byť spôsobené určitou nehomogenitou vzorky.

V budúcnosti bude pravdepodobne táto problematika bližšie rozvinutá v diplomovej práci so zameraním na tvorbu spektroskopicko elipsometrických modelov perovskitových materiálov, ktoré sa využívajú k výrobe solárnych článkov a celkovým stanovením ich dielektrických vlastností spektroskopickým elipsometrom.

6 POUŽITÁ LITERATÚRA A ZDROJE

- [1] Thin Film Deposition Technologies: Introduction to Thin Films and Processes. *Vacuum Technology&Coating Weblog* [online]. United States of America: Vacuum Technology&Coating Magazine, 2018 [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: <https://www.vtcmagblog.com/thin-film-deposition-technologies-introduction-to-thin-films-and-processes/>
- [2] JOHANSSON, K. S. Surface Modification of Plastics. *Plastics Design Library*. Vyd. 2. William Andrew Publishing, 2017, s. 443-487. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00020-1>. ISBN 978-0-323-39040-8. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323390408000201>
- [3] KATSNELSON, M. I. Graphene: Carbon in Two Dimensions. *Cambridge University Press*, 2012 . DOI: 10.1017/CBO9781139031080. ISBN 9781139031080.
- [4] SCHMIEDOVA, V., J. POSPISIL, A. KOVALENKO et al. Physical Properties Investigation of Reduced Graphene Oxide Thin Films Prepared by Material Inkjet Printing. *Journal of Nanomaterials* [online]. Hindawi, 2017 [cit. 2018-11-09]. DOI: 10.1155/2017/3501903. ISSN 1687-4110. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2017/3501903/>
- [5] WASA, K., M. KITABATAKE a H. ADACHI. Thin film deposition process. *Thin film materials technology: sputtering of compound materials*. Heidelberg: William Andrew Publishing/Noyes, 2004, s. 33-59. ISBN 978-0-8155-1483-1. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003HVP21/thin-film-materials-technology/pvd-processes>
- [6] PUETZ, J. a M. A. AEGERTER. Dip Coating Technique. *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users* [online]. Boston, MA: Springer US, 2004, s. 37-48. [cit. 2018-12-04]. DOI: 10.1007/978-0-387-88953-5_3. ISBN 978-0-387-88953-5. Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-88953-5_3
- [7] BIRNIE, D. P. Spin Coating Technique. *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users* [online]. Boston, MA: Springer US, 2004, s. 49-55. [cit. 2018-12-04]. DOI: 10.1007/978-0-387-88953-5_4. ISBN 978-0-387-88953-5. Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-88953-5_4
- [8] FLOCH, H. G. a P. F. BELLEVILLE. Capillary Coating Technique. *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users* [online]. Boston, MA: Springer US, 2004, s. 57-61. [cit. 2018-12-04]. DOI: 10.1007/978-0-387-88953-5_5. ISBN 978-0-387-88953-5. Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-88953-5_5

- [9] CHENG, X. L., H. ZHAO, L. H. HUO, S. GAO a J. G. ZHAO. ZnO nanoparticulate thin film: preparation, characterization and gas-sensing property: preparation, characterization and gas-sensing property. *Sensors and Actuators B: chemical* [online]. Elsevier, 2004 [cit. 2018-01-14]. ISSN 0925-4005. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400504001911>
- [10] SARKAR, J. a P. S. GILMAN. *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*. Norwich: William Andrew, 2010. ISBN 9780815515937.
- [11] MCGRAW, H. *Encyclopedia of science&technology*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1992. ISBN 0-07-909206-3.
- [12] RYER, A. *Light Measurement Handbook*. 2. United States of America: Technical Publications Dept., 1997. ISBN 0-9658356-9-3.
- [13] SOMMER, L. *Teoretické základy analytické chemie III*. 1. vyd. Brno: Fakulta chemická VUT, 1995. ISBN 80-214-0660-7.
- [14] HALLIDAY, D., J. WALKER a R. RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 4, Elektromagnetické vlny-Optika-Relativita*. V Brně: Praha: VUTIUM; Prometheus, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [15] ŠTRBA, A., V. MESÁROŠ a D. SENDERÁKOVÁ. *Svetlo: vlny, lúče, fotóny*. Nitra: Enigma, 2011. ISBN 978-80-89132-83-6.
- [16] PLÁŠEK, J. *Nové metody optické mikroskopie. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Jednota českých matematiků a fyziků Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1996, s. 1-24. ISSN: 0032-2423
- [17] *Optical Profilometry. Nanoscience Instruments* [online]. Phoenix: Nanoscience Instruments, 2018 [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/>
- [18] TILLI, M., V. AIRAKSINEN, V. LINDROOS et al. *Silicon Wafer and Thin Film Measurements. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. 2nd Edition. Elsevier, 2015. ISBN 9780323299657. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpHSBMEM04/id:kt00UQU0CI/handbook-silicon-based/silicon-wafer-thin-film?kpromoter=Summon>
- [19] FUJIWARA, H. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. Chichester: John Wiley&Sons, 2007. ISBN 978-0-470-01608-4.
- [20] HORIBA, J.Y. *Spectroscopic Ellipsometry: User Guide*. France, 2008. ISBN P/N 31 087 134.
- [21] *Plane Electromagnetic Waves. Physics Libre Texts Library* [online]. 2018 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/TextBooks_and_TextMaps/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_\(OpenStax\)/16%3A_Electromagnetic_Waves/16.2%3A_Plane_Electromagnetic_Waves](https://phys.libretexts.org/TextBooks_and_TextMaps/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics%2C_Electricity%2C_and_Magnetism_(OpenStax)/16%3A_Electromagnetic_Waves/16.2%3A_Plane_Electromagnetic_Waves)

- [22] Polarizace světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla?fbclid=IwAR2vW3zUzDxFdbXHubokp4YzTXH5R0G3k8PGYjjkROXT77Pz8yZLqDbcfk>
- [23] Kruhově polarizované světlo. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1672-kruhove-polarizovane-svetlo>
- [24] Chemat Technology KW-4A-1 SpinCoater. *PicClick* [online]. 2018 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://picclick.com/Chemat-Technology-KW-4A-1-Spin-Coater-332818250973.html>
- [25] Eclipse E200 Educational Microscope. *Nikon* [online]. Nikon Instruments, 2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.microscope.healthcare.nikon.com/products/upright-microscopes/eclipse-e200>
- [26] Varian Cary 50 Scan UV Visible Spectrophotometer. *American Laboratory Trading* [online]. 2018 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: https://americanlaboratorytrading.com/lab-equipment-products/varian-cary-50-scan-uv-visible-spectrophotometer_10307
- [27] Dektak XT. *Bruker* [online]. 2018 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/stylus-profilometers/dektak-xt/overview.html>