VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

POVRCHOVÁ MORFOLOGIE A-CSI:H VRSTEV PŘIPRAVENÝCH Z TETRAVINYLSILANU V NÍZKOTEPLOTNÍM PLAZMATU

SURFACE MORPHOLOGY OF A-CSI:H FILMS PREPARED FROM TETRAVINYLSILANE IN LOW-TEMPERATURE PLASMA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Kristýna Křípalová
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA CHEMICKÁ

Zadání bakalářské práce

Číslo práce:	FCH-BAK1335/2018	Akademický rok:	2018/19
Ústav:	Ústav chemie materiálů		
Studentka:	**Kristýna Křípalová**		
Studijní program:	Chemie a chemické technologie		
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů		
Vedoucí práce:	**prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.**		

Název bakalářské práce:

Povrchová morfologie a–CSi:H vrstev připravených z tetravinylsilanu v nízkoteplotním plazmatu

Zadání bakalářské práce:

–Literární rešerše z oblasti plazmochemické depozice z plynné fáze (PECVD) a mikroskopie atomární síly (AFM).
–Praktické zvládnutí AFM, měření povrchové morfologie a využití obrazové analýzy.
–Charakterizace povrchové morfologie a–CSi:H vrstev v závislosti na výkonu pro vybranou tloušťku vrstvy.

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.

Kristýna Křípalová student(ka)	prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D. vedoucí práce	doc. Ing. František Šoukal, Ph.D. vedoucí ústavu
		prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D. děkan

V Brně dne 31.1.2019

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá povrchovou morfologií a-CSi:H vrstev. Tyto vrstvy byly připraveny plazmochemickou depozicí z plynné fáze (PECVD) v pulzním režimu na křemíkových substrátech; jako prekurzor byl použit tetravinylsilan (TVS). Pro charakterizaci povrchu vrstev byla použita série vzorků připravených při různém efektivním výkonu (2-150 W) a tloušťce 0,6 µm. Povrchová morfologie byla měřena pomocí mikroskopie atomárních sil. Získaná data byla použita pro stanovení drsnosti povrchu a posouzení vlivu dynamiky růstu vrstvy na topografii povrchu.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the surface morphology of a-CSi:H films. Films were prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) on silicon wafers using plasma discharge. Tetravinylsilane (TVS) precursor was used for deposition. The set of samples deposited at different effective power (2-150 W) and a thickness of about 0.6 µm was characterized to investigate their surface properties. Atomic force microscopy was used for characterization of surface morphology. Obtained results were used for evaluation of surface roughness and assessment of the effect of the film growth dynamics on the surface topography.

KLÍČOVÁ SLOVA

tenké vrstvy, PECVD, mikroskopie atomárních sil (AFM), povrchová morfologie, drsnost povrchu

KEYWORDS

thin films, PECVD, atomic force microscopy (AFM), surface morphology, surface roughness

KŘÍPALOVÁ, K. *Povrchová morfologie a-CSi:H vrstev připravených z tetravinylsilanu v nízkoteplotním plazmatu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2019. 52 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce panu prof. RNDr. Vladimíru Čechovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a veškerý čas, který mi poskytl při zpracovávání mé bakalářské práce

Práce byla podpořena projektem 16-09161S Grantové agentury České republiky.

OBSAH

1 ÚVOD 6

2 TEORETICKÁ ČÁST 7

2.1 Tenké vrstvy 7

2.2 Plazmochemická depozice z plynné fáze 8

2.2.1 Plazma 8

2.2.2 Mechanismus růstu tenké vrstvy 9

2.2.3 Organosilikátové prekurzory 11

2.3 Mikroskopie atomárních sil (AFM) 12

2.3.1 Základní princip 12

2.3.2 Režimy měření 13

2.3.3 Konstrukční prvky mikroskopu 15

2.3.4 Artefakty 17

2.3.5 Povrchová morfologie 20

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 21

3.1 Použité materiály 21

3.2 Příprava tenkých vrstev 21

3.2.1 Depoziční aparatura 21

3.2.2 Podmínky depozice 23

3.3 Mikroskopie atomárních sil 24

3.3.1 Parametry AFM 24

3.3.2 Analýza pomocí AFM 25

4 VÝSLEDKY A DISKUZE 27

4.1 Připravené vzorky 27

4.2 Povrchová topografie 27

4.2.1 Stanovení parametrů drsnosti a výšky povrchu 27

4.2.2 Závislost RMS drsnosti na efektivním výkonu 43

4.2.3 Závislost průměrné drsnosti R_a na efektivním výkonu 45

4.2.4 Závislost maxima výšky povrchu na efektivním výkonu 46

5 ZÁVĚR 47

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 49

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 52

1 ÚVOD

Tenké vrstvy jsou materiály, jejichž tloušťka se pohybuje v rozsahu mikro až nanometrů. Je pro ně specifické, že vykazují jiné vlastnosti (např. pevnost, elektrická vodivost) než kompaktní tělesa složená ze stejného materiálu [1].

Díky tomuto faktu nalézají tenké vrstvy své uplatnění v širokém rozsahu moderních technologií. Hlavní aplikací jsou povrchové úpravy ve strojírenství, optice, elektronice, kde zlepšují vlastnosti povrchu, například jeho vodivost, pevnost, otěruvzdornost a další.

Tenké vrstvy lze připravit řadou metod. Jednou z nich je plazmochemická depozice z plynné fáze (PECVD). Nespornou výhodou plazmochemické depozice je, že změnou depozičních podmínek lze připravit tenké vrstvy různých vlastností při použití stejných monomerů. Tenké vrstvy připravené touto metodou vykazují dobrou chemickou odolnost vůči kyselinám a zásadám a také dobrou adhezi k substrátu [2].

Vysoká adheze k substrátu (matrici) je důležitá vlastnost výztuže u kompozitních matriálů, díky, které je docíleno účinného přenosu napětí z výztuže na matrici, což má za následek zlepšení vlastností kompozitu. Modifikací povrchu výztuže ze skleněných vláken pomocí PECVD dojde ke vzniku vazeb mezi skleněnými vlákny a polymerní matricí a tím ke zlepšení celkové adheze výztuže k matrici.

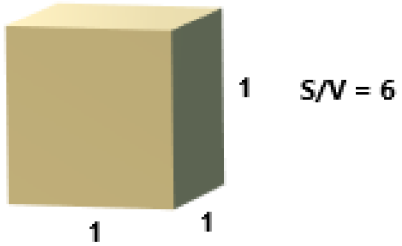
Teoretická část této bakalářské práce se zabývá přípravou tenkých vrstev z organosilikátových prekurzorů a stručným popisem analytické metody pro zkoumání jejich povrchu.

V experimentální části je podrobněji popsána technologie přípravy použitých vzorků tenkých vrstev, depoziční aparatura a podmínky depozice. Dále obsahuje stručný popis mikroskopie atomárních sil, která byla použita pro analýzu povrchu. Získané snímky povrchu tenkých vrstev a naměřená data jsou zpracována v kapitole Výsledky a diskuze.

2 TEORETICKÁ ČÁST

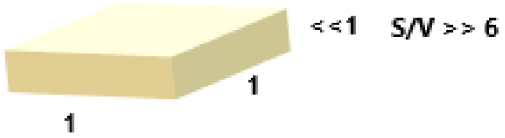
2.1 Tenké vrstvy

Jako tenkou vrstvu lze označit materiál, jehož dva povrchy jsou natolik blízko sebe, že dochází k vzájemnému ovlivňování jejich silových polí. To má za následek vznik různých fyzikálních jevů na povrchu, díky kterým mají tenké vrstvy odlišné vlastnosti od kompaktního tělesa (obr. 1) [1].



Obr. 1 Kompaktní těleso; S= povrch tělesa, V=objem tělesa

Obecně se tloušťka tenké vrstvy pohybuje v rozmezí 0,1 nm (monoatomární vrstvy) do 10 µm, ale konkrétní tloušťka závisí na sledovaném fyzikálním jevu (obr. 2). Tenké vrstvy mohou být tvořeny jak anorganickými, tak i organickými látkami či jejich spojením (organicko-anorganické) v krystalické, semikrystalické i amorfní formě. Na tenkých vrstvách lze pozorovat nápadné optické jevy, nejvýznamnější z nich je vznik interferenčních barev [1] [3].



Obr. 2 Tenká vrstva; S=povrch tělesa, V=objem tělesa

Tenké vrstvy mohou být připraveny různými metodami fyzikálními nebo chemickými. Tato práce je zaměřena na tenké vrstvy připravené plazmochemickou depozicí z plynné fáze (PECVD – Plasma-enhanced chemical vapor deposition).

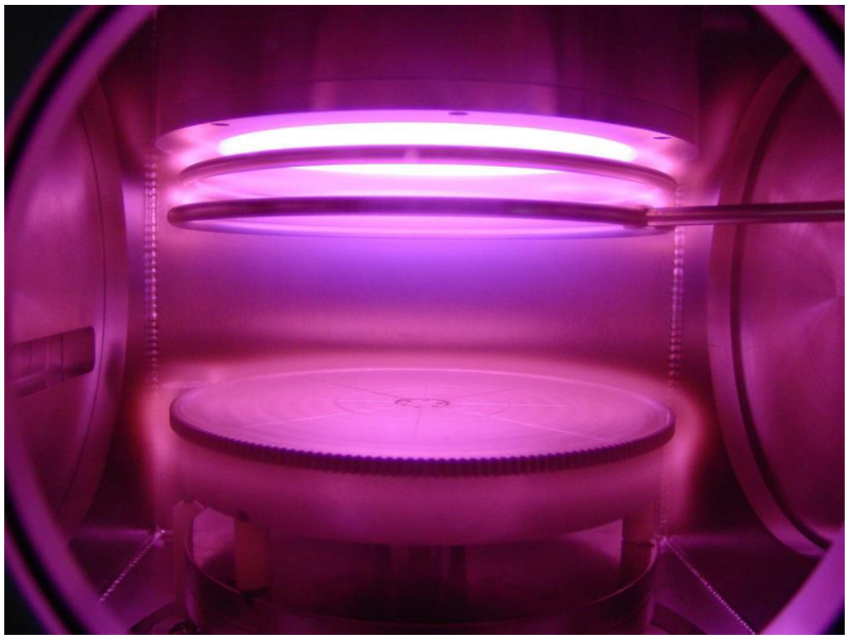
2.2 Plazmochemická depozice z plynné fáze

Chemická depozice z plynné fáze (chemical vapour deposition-CVD) využívá pro depozici reaktivní plyny zahřáté na vysokou teplotu, kterou jsou přiváděny spolu s reakčními složkami za vzniku tenké vrstvy heterogenní reakcí na povrchu substrátu [1].

U plazmochemické depozice z plynné fáze (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) je depozice prováděna v depoziční komoře, kde hoří doutnavý výboj. Dochází k ionizaci a plazmochemickým reakcím v plynné atmosféře a zároveň k depozici vrstev. Na rozdíl od vysokoteplotní chemické depozice z plynné fáze umožňuje PECVD použití nižších teplot a tím lze použít méně tepelně stabilní substráty, např. polymery [4].

2.2.1 Plazma

Plazma je jedním ze skupenských stavů hmoty. Konkrétně čtvrté skupenství hmoty a také nejrozšířenější forma látky ve vesmíru. Jedná se o ionizovaný plyn, který obsahuje volné nosiče náboje, proto má plazma zcela odlišné vlastnosti než jiná skupenství. Příklad použití plazmy v metodě PECVD je zobrazen na obr. 3 [5].



Obr. 3 Plazma v PECVD [6]

Plazmu můžeme rozdělit podle teploty (Tab. 1) na vysokoteplotní a nízkoteplotní, kde T_i je teplota iontů. Vysokoteplotní plazma je plně ionizovaná plazma, nízkoteplotní plazma je částečně ionizovaná. Ve výbojích a plazmových technologiích se využívá nízkoteplotního plazmatu [4] [5].

Tab. 1 Rozdělení plazmy dle teploty [5]

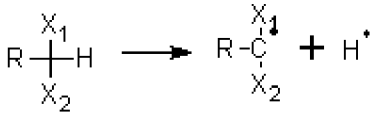
Nízkoteplotní	Vysokoteplotní (fůzní)
$T_i < 10^5$ K	$T_i > 10^6$ K

2.2.2 Mechanismus růstu tenké vrstvy

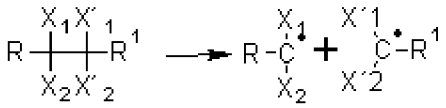
Růst tenké vrstvy probíhá mechanismem tzv. stupňovitých reakcí, který navrhl Yasuda [2] pro plazmovou polymeraci. Na rozdíl od konvenční polymerace probíhá formování polymeru v plazmatu díky atomárním (ne molekulárním) procesům. Základní reakce v plazmové polymeraci jsou fragmentace monomerních molekul, vznik aktivního místa a rekombinace aktivovaných fragmentů. Hlavní roli hraje vznik nových kovalentních vazeb mezi atomy, proto mají materiály připravené plazmovou polymerací výrazně odlišné vlastnosti od tradičních materiálů [2].

Fragmentace výchozích molekul je způsobena dvěma typy reakcí [2]:

1) Eliminace vodíku



2) Rozštěpení vazby C-C

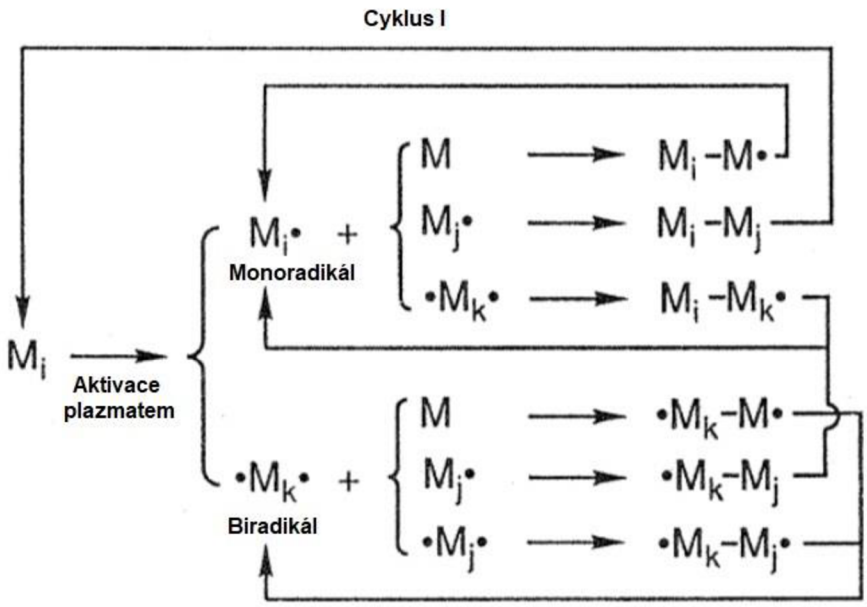


Do jaké míry proběhne fragmentace molekul monomeru na aktivované fragmenty je určeno charakterem původních molekul a energetickou úrovní plazmatu. Z tohoto důvodu mají plazmové polymery různé chemické složení v případě, že plazmová polymerace probíhá za různých depozičních podmínek, přestože jsou použity stejné výchozí molekuly pro polymeraci. Příklad depozičních podmínek uvádí tab. 2 [2].

Tab. 2 Typické depoziční podmínky

Frekvence	103–10 Hz
Výkon	10–500 W
Depoziční tlak	10-1–102 Pa
Průtok plynů/par monomeru	1–100 sccm
Depoziční doba	1–30 min
Depoziční rychlost	0,1 – 10 $\mu m \cdot h^{-1}$

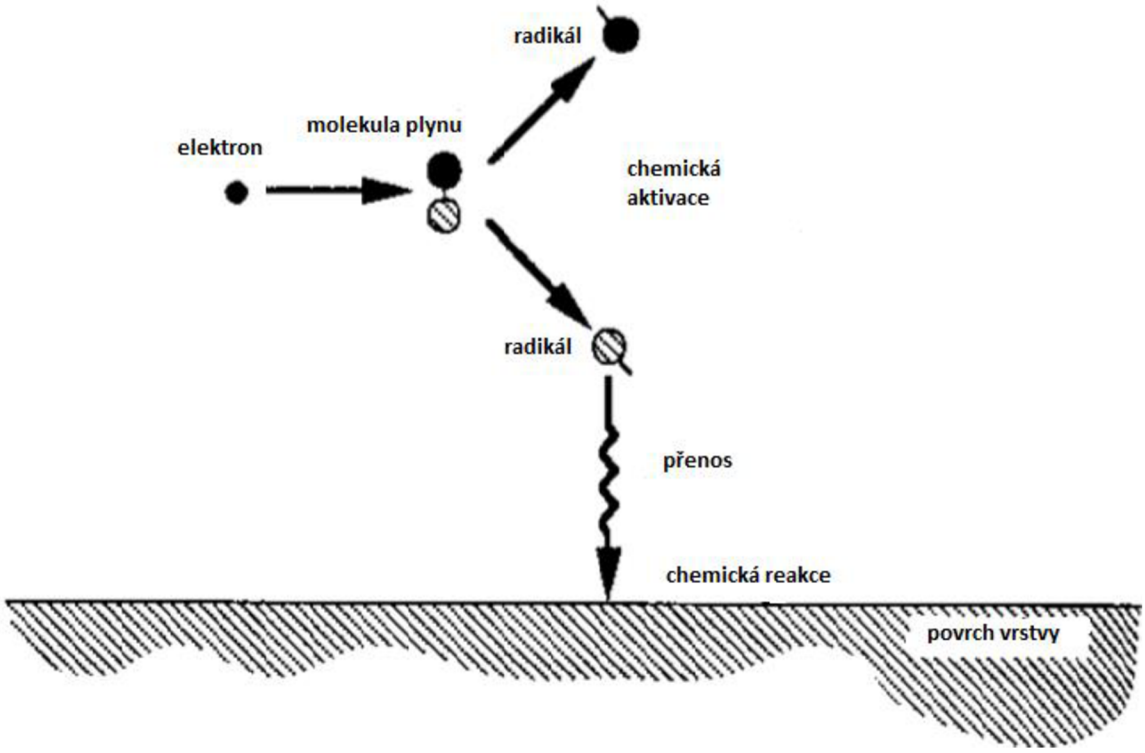
Mechanismu plazmové polymerace (obr. 4), pak dále probíhá tak, že vodík je eliminován z monomeru plazmatem za vzniku monoradikálu $M_i^{\cdot}$ a biradikálu $^{\cdot}M_k^{\cdot}$. Monoradikál $M_i^{\cdot}$ reaguje s monomerem za vzniku nového radikálu M_i-$M^{\cdot}$. Dochází k rekombinaci monoradikál $M_i^{\cdot}$ s monoradikálem $M_j^{\cdot}$ za vzniku neutrální molekuly M_i-M_j a rekombinaci s biradikálem $^{\cdot}M_k^{\cdot}$ za vzniku nového monoradikálu M_i-$M_k^{\cdot}$. Biradikál $^{\cdot}M_k^{\cdot}$ se rekombinuje s biradikálem $^{\cdot}M_j^{\cdot}$ a vzniká biradikál $^{\cdot}M_k$-$M_j^{\cdot}$. Nová neutrální molekula M_i-M_j je znovu aktivována plazmatem a dochází k tvorbě mono- nebo biradikálů. Tento proces je vyznačen na Obr. 4 jako cyklus I. Nové monoradikály M_i-$M_k^{\cdot}$ a biradikály $^{\cdot}M_k$-$M_j^{\cdot}$ se dále rekombinují a tvoří nové větší radikály – cyklus II [2].



Obr. 4 Mechanismus plazmové polymerace [2] - upraveno

Příprava tenké vrstvy plazmového polymeru sestává ze tří rozdílných procesů (obr. 5) [7]:

1) chemická aktivace molekuly prostřednictvím elektronové nárazové disociace
2) transport vytvořených radikálů k substrátu
3) jejich chemická reakce na povrchu vrstvy plazmového polymeru



Obr. 5 Příprava tenké vrstvy [7] - upraveno

2.2.3 Organosilikátové prekurzory

Organosilikátové prekurzory jsou molekuly složené alespoň z jedné molekuly křemíku a organických skupin obsahujících atomy převážně uhlíku, kyslíku, dusíku a vodíku. Výsledkem plazmochemické depozice z tohoto typu prekurzorů je tenká vrstvy hydrogenované amorfní slitiny uhlíku a křemíku (a-CSi:H). Tenké vrstvy vytvořené z organosilikátových prekurzorů vykazují výborné optické, mechanické a elektrické vlastnosti [8].

Nejčastěji používané prekurzory jsou hexamethyldisiloxan (HMDSO) a tetraetoxysilan (TEOS). Prekurzory jsou používané buď samostatně, častěji však ve směsi se vzácným plynem (např. argon) nebo kyslíkem či oxidem dusným apod. Přehled depozičních podmínek často používaných organosilikátových prekurzorů je uveden v tab. 3 [8].

Pro tuto práci byly použity tenké vrstvy připravené z tetravinylsilanu (TVS). Bylo zjištěno, že vinylová skupina obsažená v prekurzoru může mít za následek efektivní začlenění těkavé fáze do tenké vrstvy, tato těkavá fáze se následně vypaří za tvorby nanopórů, což snižuje dielektrickou konstantu [9].

Tab. 3 Organosilikátové prekurzory a jejich depoziční podmínky [8]

Název		Vzorec	Tlak	Příkon
Hexamethyldisiloxan	(HMDSO)	$(CH_3)_3Si\text{-}O\text{-}Si(CH_3)_3$	10^{-3} to 1 mbar	3 W – 100 W
Tetraethoxysilan	(TEOS)	$(C_2H_5\text{-}O)_4Si$	10^{-3} to 1 mbar	3 W– 100 W
Divinyltetramethyldisiloxan	(DVTMDSO)	Me-Si-O-Si-Me	10^{-2} – 10^{-1} mbar	14 W - 200 W
Hexamethyldisilazane	(HMDSN)	$(CH_3)_3Si\text{-}NH\text{-}Si(CH_3)_3$	0,25 Torr	7 W
Tetrakis(dimethylamino)silane	(TDMAS)	$(N(CH_3)_2)_4Si$	300 cm^3/mmPa	T_s=40 °C

2.3 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

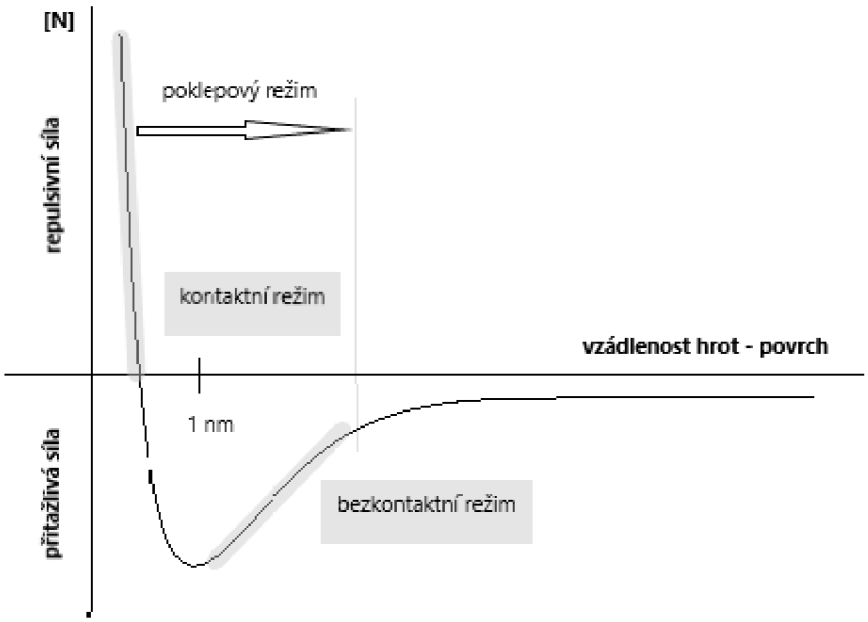
Mikroskopie skenující sondou (angl.. scanning probe microscopy – SPM) je jedna z výzkumných metod, která umožňuje zkoumat morfologii a lokální vlastnosti povrchu materiálů. Techniky SPM poskytují trojrozměrný obraz v přímém prostoru a umožňují zobrazovat výřezy vzorků až se subatomárním rozlišením. Díky tomu překrývají rozsahy dosažitelné pomocí optické a elektronové mikroskopie. Dnes prakticky každý výzkum v oblasti technologií tenkých vrstev využívá SPM techniky [10].

Z SPM metod lze jmenovat skenovací tunelovací mikroskopii (STM), skenovací tunelovací spektroskopie (ATS), mikroskopie atomárních sil (AFM) a další. V této práci je diskutována mikroskopie atomárních sil (AFM) [10].

2.3.1 Základní princip

Mikroskopie atomárních sil využívá elektromagnetických sil atomárního původu působících mezi atomy hrotu a vzorku. Princip metody je založen na pohybu hrotu nad vzorkem či v dotyku s ním a je odpuzován či přitahován vzorkem. Hrot je kolmo připevněn na nosník, ten se ohýbá díky síle působící mezi hrotem a vzorkem. Měřením ohybu nosníku lze získat informaci o velikosti interakce [10] [11].

Síly působící na nosník jsou různého původu, nejčastěji se jedná o van der Waalsovu sílu a repulsivní sílu plynoucí z Pauliho principu (Obr. 6). Van der Waalsovy síly působí při větších vzdálenostech od vzorku. Repulsivní síla pouze v dotyku, jestliže je vzdálenost menší než součet atomových poloměrů [11].



Obr. 6 Závislost atomárních sil na vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku

Z obr. 6 je patrné, že síla působící na hrot může být buď odpudivá nebo přitažlivá v závislosti na vzdálenosti hrotu. Pro popsání působící síly se nejčastěji používá Lennard – Jonesův potenciál, který popisuje vztah:

$$U_{LD}(r) = U_0\left[-2\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 + \left(\frac{r_0}{r}\right)^{12}\right], \qquad (1)$$

kde U_0 je nulový potenciál r_0 je konečná vzdálenost, při níž má potenciál nulovou hodnotu [10].

2.3.2 Režimy měření

Podle toho, zda je síla působící na hrot odpudivá nebo přitažlivá rozlišujeme tři režimy měření – kontaktní, nekontaktní a poklepový režim [11].

Kontaktní režim

V kontaktním režimu je síla působící na hrot odpudivá a hrot udržuje jemný kontakt se vzorkem. Hrot je umístěn na raménku, to má tuhost nižší, než je vazebná síla mezi atomy vzorku. Během skenování hrotu po povrchu vzorku dochází k ohybu raménka v důsledku sil působících mezi hrotem a vzorkem. Výchylka raménka odpovídá změnám topografie povrchu vzorku [11].

Kontaktní režim může být proveden ve dvou variantách [10]:

1) s konstantní silou – je udržováno konstantní ohnutí raménka a posunuje se pouze vzorkem ve směru osy z. Tato varianta je pomalejší, přesto častěji používána (skenování není ovlivněno např. pružností raménka).
2) s konstantní výškou – je udržována určená hodnota výšky z_0 a měří se ohnutí raménka.

Nekontaktní režim

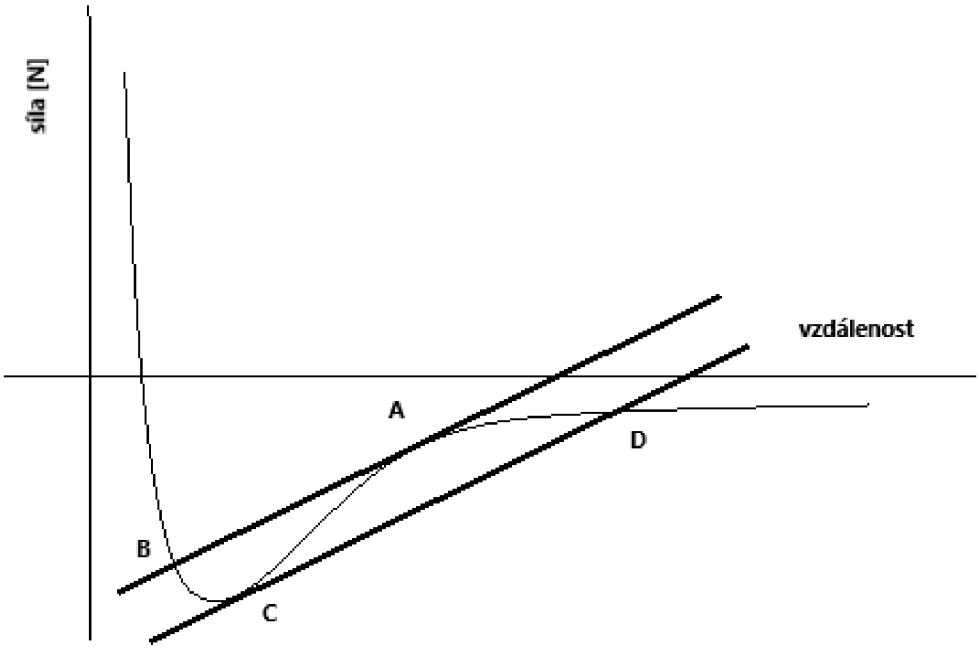
V nekontaktním režimu hrot na raménku kmitá v blízkosti povrchu vzorku, ale není s ním v kontaktu. Vzdálenost hrotu od vzorku je v řádu jednotek až desítek nm (obr. 6). Na hrot působí přitažlivá síla, která je ovšem velmi malá (10^{-12} N) [11].

Raménko kmitá v hodnotách blízkým rezonanční frekvenci (od 100 do 400 kHz), s amplitudou několika nm. Při přibližování či vzdalování hrotu od povrchu vzorku jsou detekovány změny v rezonanční frekvenci nebo amplitudě kmitů raménka. S druhou odmocninou tuhosti raménka se mění jeho rezonanční frekvence. Tuhost raménka se mění s narůstající silou a gradient síly se mění se vzdáleností hrotu od vzorku. Změna vzdálenosti hrotu od vzorku, vede ke změně gradientu síly, tedy i ke změně v rezonanční frekvenci. Rezonanční frekvence je měřena s využitím zpětné vazby. Skenerem, který se pohybuje nahoru a dolů od povrchu vzorku, je udržována konstantní hodnota rezonanční frekvence. Pohyb skeneru generuje soubor dat, potřebných k topografii povrchu [11].

Poklepový režim (tapping mode)

Jedná se o kombinaci předchozích režimů. Hrot kmitá s větším rozkmitem a dochází k občasnému dotyku hrotu s povrchem. Měřícím signálem je, stejně jako u bezkontaktního režimu, změna rezonanční frekvence [11].

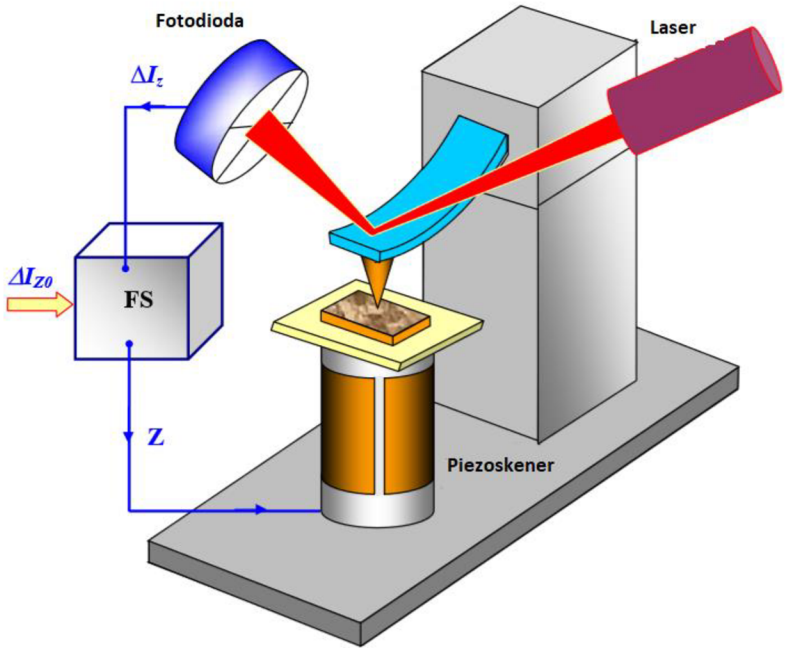
V případě, že gradient síly převýší v určitém bodě tuhost raménka, dochází k přeskoku raménka. Na obr. 7 lze pozorovat dvě rovnoběžky, jejich směrnice odpovídají tuhosti raménka a podél nich probíhají přeskoky. První přeskok nastává při přiblížení hrotu (A→B). K druhému přeskoku dochází při odtahování hrotu (C→D). Raménko (o hmotnosti *m*) vykazuje lepší efektivní tuhost je-li rozkmitáno s frekvencí *f*. V poklepovém režimu je zvolen bod nejbližšího kontaktu (vzdálenost několika desetin nm) a taková frekvence kmitů, při které se hrot do zvoleného bodu několikrát dostane, předtím, než dojde k posunu o svůj průměr. Detekce pozice raménka je nejčastěji umožněna optickou cestou [11].



Obr. 7 Působení sil v poklepovém režimu [11]

2.3.3 Konstrukční prvky mikroskopu

Konstrukční schéma AFM je zobrazeno na obr. 8. Povrchová topografie je měřena na základě malých výchylek raménka s hrotem. Tato změna je zaznamenána optickým systémem. Optický systém zpracuje ohnutí raménka přitažlivými/repulsivními silami jako parametr ΔI_z. Tento parametr slouží jako vstupní signál pro systém zpětné vazby (feedback systém – FS). Podle režimu měření udržuje systém zpětné vazby parametr ΔI_z nebo výšku hrotu (viz kapitola 2.3.2) konstantní pomocí piezoelektrického skeneru, který reguluje vzdálenost hrot – povrch vzorku ve směru roviny z [10].



Obr. 8 Konstrukční schéma AFM [10] - upraveno

Raménka a hroty

V AFM hrot měří atomární sílu a raménko funguje jako senzor této síly. Hrot i raménko jsou obvykle z jednoho materiálu. V minulosti se nejčastěji používal zahnutý wolframový drátek, později byl hrot tvořen diamantem upevněným na pásku ze zlata. Dnes jsou hroty vyráběny nejčastěji litograficky z křemíku nebo nitridu křemíku [11] [12].

Výrobní proces a vlastnosti materiálu, ze kterých je hrot vyroben mají vliv na tvar hrotu. Tvar hrotu může být například kuželový, pyramidální nebo tetraedrální. Kuželový hrot je vyroben odleptáním křemíku kolem čepičky oxidu křemičitého. Křemík lze dopovat příměsemi, čehož může být využito při měření vodivosti pomocí AFM. Křemíkové hroty jsou také lehčí, díky tomu lze dosáhnout vysokých rezonančních frekvencí. Kuželový hrot je vhodný pro zobrazení ostrých prohlubní [11] [12].

Pyramidální a tetraedrální geometrie hrotu je docíleno nanesením nitridu křemíku na krystalickou křemíkovou desku. Deska má v sobě odleptanou pyramidální/tetraedrální prohlubeň (podle požadovaného tvaru hrotu). Nanesený nitrid se vyžíhá, litograficky vytvaruje a je přenesen na jiný substrát. Hroty z nitridu křemíku jsou odolnější, něž křemíkové [11] [12].

Klasické AFM hroty mohou být doplněny nanotrubičkami. Výhodou nanotrubiček ve spojení s hrotem je zvýšení rozlišení obrazu, zlepšení odolnosti a životnosti hrotu a možnost modifikace trubiček chemicky a biologicky aktivními složkami. Nanotrubičky mohou být k hrotu připevněny mechanicky. Další možností je růst uhlíkových nanotrubiček přímo na povrchu hrotu pomocí metody CVD nebo připevnění nanotrubiček pomocí dielektroforézy [13] [14].

Raménka musí mít vysokou rezonanční frekvenci, malou setrvačnost, toho lze dosáhnout snížením hmotnosti. V kontaktním režimu je konec raménka pevně upevněn, proto dochází ke zvýšení rezonanční frekvence, nicméně kvalita odezvy je dána vlastní rezonanční frekvenci raménka. Dalším požadavkem na raménko je malá tuhost, hrot musí být citlivý i na malé síly, proto musí být ohebný. Tuhost raménka by ale neměla být nižší, než je vazebná síla mezi atomy v pevných látkách (10 Nm^{-1}) [15].

Optická detekce signálu laserovou diodou

Optická detekce signálu laserovou diodou je jedním z v současnosti nejpoužívanějších detektorů. Světlo vytvořené laserovou diodou je zaostřeno na konec raménka, od něho se odráží a paprsek dopadá na světelný detektor, zpravidla kvadrantový detektor, který je rozdělen na čtyři části. Raménko musí být ze zadní strany pokryto odrazivým materiálem a před měřením je nutné nastavit místo dopadu laseru na špičku raménka. Nastavení se provádí ručně a je kontrolováno vizuálně [10].

Pohybová zařízení – skener

Během měření je k pohybu sondy nad povrchem vzorku využíván skener obsahující piezoelektrické materiály. Vlastní skenování probíhá tak, že se skener pohybuje ve směru prvního řádku tam a zpět, posune se kolmo o určitou vzdálenost a vykoná opět pohyb tam a zpět. Sběr dat probíhá pouze při pohybu skeneru z výchozí pozice. Při cestě zpátky a posunu o řádek sonda data neshromažďuje. Vzdálenost mezi datovými body je velikost kroku [11].

Kvůli vysokým nárokům na přesnost skeneru se používají piezoelektrické materiály. Nejčastěji používaná je směs PZT ($Pb(Zr,Ti)O_3$). Skenery jsou složené z bimorfních cel – dvě piezoelektrické desky s opačnou polarizací slepené k sobě. Jakmile je aplikováno napětí jedna z desek je natažena, druhá stlačena, což má za následek prohnutí měřícího elementu [10].

2.3.4 Artefakty

Objekty, které vznikají na snímku při skenování a ve skutečnosti na vzorku neexistují jsou způsobeny tzv. artefakty. Jedná se o ztrátu informace o vzorku, která může být způsobena přímo při sběru dat, zpracováním signálu nebo nevhodně zvolenými algoritmy/programy při zpracování obrazu [16].

Zrcadlení hrotu

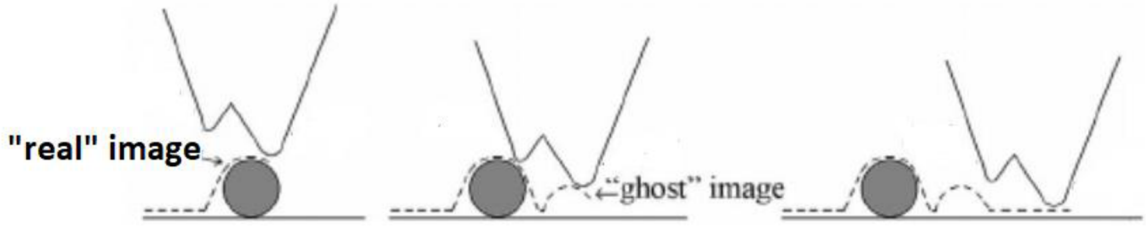
Zrcadlení hrotu nastává, pokud poloměr zakřivení špičky hrotu je podobný nebo větší než šířka zobrazovaného prvku. Tento jev je způsobený prostorovou konvolucí povrchu a hrotu, kterou je určen každý bod v obraze. Hrot se pohybuje přes zobrazovaný prvek, strany špičky hrotu přicházejí do kontaktu s hrotem dříve než vrchol špičky. Obecně platí, že čím je hrot užší tím je zobrazený obraz věrnější.

Zrcadlení hrotu se dá rozpoznat v zobrazeném snímku, pokud se ve snímku objevují struktury stejného tvaru i orientace (viz obr. 9). Pro ověření je možné vzorek otočit o 90 °, pokud je zobrazený obraz skutečný, bude tvar obrazu rotovat společně se vzorkem. Hrotový obraz bude udržovat vždy stejnou orientaci [11] [16].

Obr. 9 Příklad zrcadlení hrotu na AFM snímku globulárních proteinů na slídovém substrátu [17]

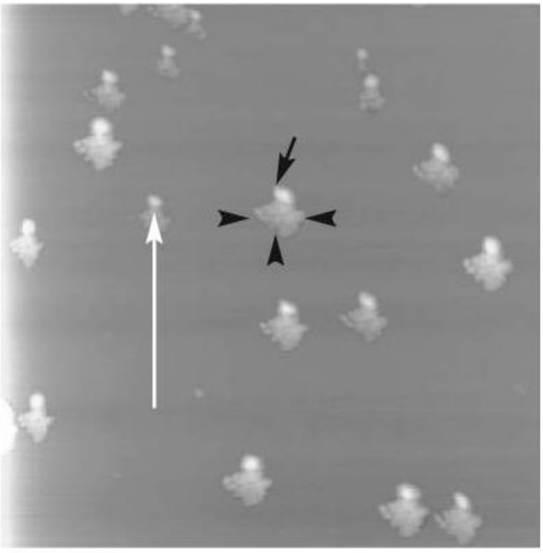
Zdvojení hrotu

Zdvojení hrotu má za následek to, že dochází ke skenování dvěma hroty, vznikají tedy dva snímky částice - „real image“, který odpovídá umístění částice a „ghost image“, jež je obrazem stejné částice na přilehlém místě (obr. 10) [18].



Obr. 10 Princip zdvojení hrotu [18] – upraveno

Ke zdvojení hrotu může dojít díky opotřebení hrotu nebo při opakovaném skenování, kdy se na hrot můžou přilepit nanočástice ze substrátu nebo z okolního prostředí. Příklad zdvojení hrotu na AFM snímku je možno pozorovat na obr. 11, kde bílé šipka směřuje na reálnou struktura a černé šipky na tzv.“ghost“ strukturu [19].

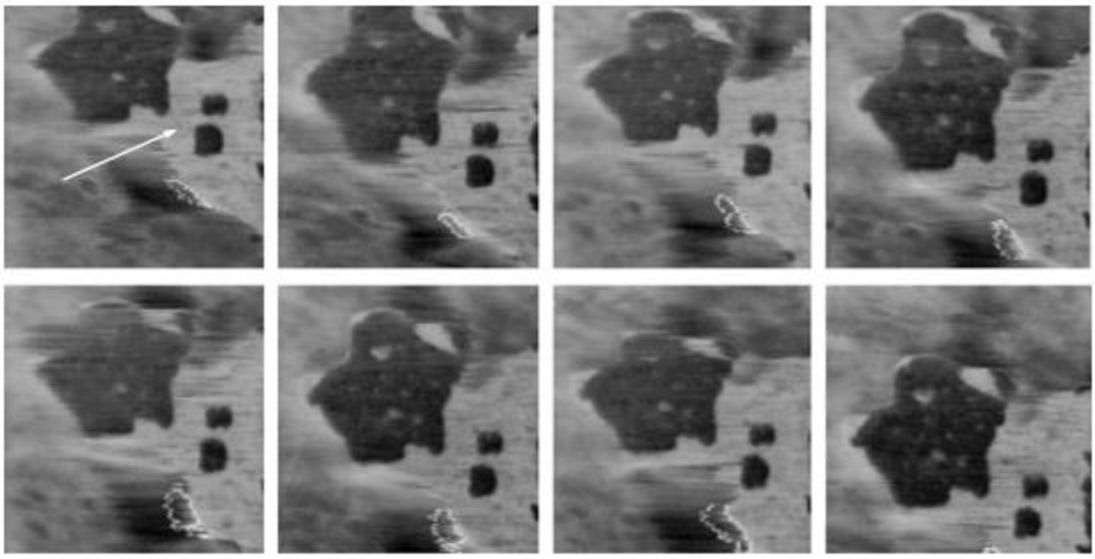


Obr. 11 Příklad zdvojení hrotu [19]

Teplotní drift

K teplotnímu driftu může dojít během měření za konstantní teploty a je způsoben vlivem okolních činitelů a změnami charakteristik přístroje. Raménko má velmi malou hmotnost, tedy i teplotní kapacitu, proto i velmi malé teplo vyprodukované např. laserem nebo dotykem vzorku může změnit teplotu raménka a jeho polohu [16] [20].

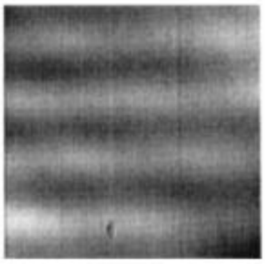
V naměřeném snímku se projeví značnými deformacemi na začátku skenování, tento jev je možné pozorovat na obr. 12. Lze jej minimalizovat zvýšením skenovací rychlosti [16].



Obr. 12 Sekvence elastických map vzorku polyuretanového triblokového kopolymeru (plocha 11 μm^2) zobrazující teplotní drift [21]

Interference

K detekci signálu se v AFM používá nejčastěji optické zařízení, proto je nutné při měření vzít v potaz i lesk vzorku a jeho schopnost odrážet světlo. V případě, že vzorek odráží světlo ve větší míře může dojít k přesvícení detektoru a ten ztratí schopnost udržet zpětnou vazbu. V důsledku tento jev může mít za následek poškození vzorku nebo raménka. Interference může nastat i mezi vzorkem a lesklou částí přístroje, ta se projevuje proužky v zobrazeném obraze (viz obr. 13). [11].



Obr. 13 Příklad artefaktu v AFM měření způsobeného interferencí [22]

Rigidita vzorku

Pokud není vzorek dostatečně pevný, může dojít k poškození vzorku hrotem (kontaktní režim, tapping mode). To se projeví na zobrazeném snímku jako rozmazaná čára [16].

Zpětná vazba

Při skenování je důležité nastavit dobře zpětnou vazbu přístroje. Slabá zpětná vazba v zobrazeném snímku způsobuje vyhlazení povrchu, hrot nesnímá detaily povrchu. V opačném případě, jeli vazba příliš silná, se v obraze objeví periodický šum následkem oscilací [11].

2.3.5 Povrchová morfologie

Struktura povrchu je definována jako opakující se nebo náhodná odchylka od ideálního povrchu, která tvoří trojrozměrnou topografii povrchu. Mikroskopie atomárních sil poskytuje trojrozměrný obraz povrchu materiálu na molekulární úrovni. Topografii můžeme definovat základním povrchem, vlnitostí a drsností povrchu [15].

Základní povrch určuje směr významného vzoru struktury povrchu. Vlnitost povrchu měří více vzdálené nerovnosti povrchu, něž je drsnost povrchu. Vlnitost může být způsobena šumem měřicího přístroje nebo vibracemi [15].

Drsnost povrchu je určena odchylkami normálového vektoru skutečného povrchu od jeho ideálního povrchu. V případě, že jsou odchylky velké je povrch drsný, v opačném případě je povrch hladký [23].

Numerickému vyhodnocení drsnosti vždy předchází odstranění vlnitosti z naměřeného snímku. Toho lze dosáhnout použitím digitálních filtrů. Podmínkou pro odstranění vlnitosti je definování limitující vlnové délky [15].

Drsnost lze definovat několika parametry například výškovými parametry R. V této práci je zmíněn kvadratický průměr RMS (angl. root mean square) drsnosti. Představuje standardní odchylku distribuce povrchových výšek, proto se jedná o důležitý parametr pro popis povrchové drsnosti statistickými metodami. Matematická definice kvadratického průměru je součet čtverce odchylek naměřených diskrétních hodnot od střední roviny [23]:

$$\mathrm{R_q} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2}, \qquad (2)$$

Druhý parametr zmíněný v této práci je průměrná drsnost $\mathrm{R_a}$ (angl.arithmetic average height). Jedná se o hojně používaný parametr drsnosti. Je definovaný jako aritmetický součet průměrných absolutních hodnot odchylek naměřených diskrétních hodnot od střední roviny:

$$\mathrm{R_a} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|\ , \qquad (3)$$

Tento parametr není tolik citlivý na větší výchylky v profilu [23].

Další parametr je maximum výšky profilu $\mathrm{R_{max}}$, které je definováno jako součet délek nejvyššího a nejnižšího bodu povrchu:

$$\mathrm{R_{max}} = \mathrm{R_p} + \mathrm{R_v}, \qquad (4)$$

kde $\mathrm{R_p}$ je délka nejvyššího bodu od střední roviny a $\mathrm{R_v}$ je délka nejnižšího bodu od střední roviny [23].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

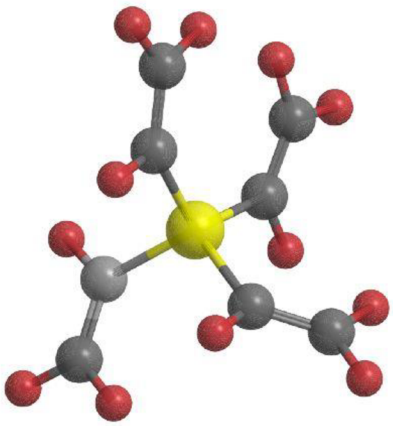
3.1 Použité materiály

Pro přípravu vzorků plazmochemickou depozicí z plynné fáze byl použit prekurzor tetravinylsilanu $Si(CH{=}CH_2)_4$ (TVS) o čistotě 97 % (obr. 14). Prekurzor byl dodán firmou Sigma-Aldrich Co, jeho molekulová hmotnost byla 136,27 $g{\cdot}mol^{-1}$, hustota 0,8 $g{\cdot}cm^{-3}$ (při teplotě 25 °C). Vinylové skupiny zajišťují dobré navázání na polyesterovou pryskyřici při použití u kompozitních materiálů [24]. Organokřemičitý prekurzor byl chlazen na teplotu 15 °C v kapalné fázi. Do reaktoru při samotné depozici vstupují jeho páry.

Substrát, na kterém byly deponovány vrstvy, byly destičky z waferu – leštěného křemíku (ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o.). Jedná se o nedopovaný křemík o tloušťce 600 µm a průměru 150±0,2 mm. Na jeho povrchu je nativní vrstva oxidu křemičitého. Pro přípravu vzorků o rozměrech 10 × 10 × 0,6 mm byl wafer nařezán pomocí laseru a pak ručně oddělen. Před depozicí byly vzorky čištěny v ultrazvukové lázni s 96 % ethanolem (Lach-Ner, s.r.o., Neratovice) po dobu 15 minut a následně usušeny.

Jako depoziční plyn byl použit argon, který byl dodán firmou Linde Gas a.s. Argon o čistotě 5.0 byl použit k předúpravě substrátu, zároveň i k jeho aktivaci. Plyn v depozičním procesu slouží i jako ochranná atmosféra a je možné ho využít i jako směsný plyn pro depozici vrstev.

Po depozici vrstev byly vzorky nalepeny kyanoakrylovátovým lepidlem Loctite 495 (Henkel) na ocelové podložky (Ted Pella, Inc.) o průměru 12 mm a následně podrobeny měření povrchové morfologie pomocí mikroskopie atomárních sil.



Obr. 14 3D model molekuly TVS

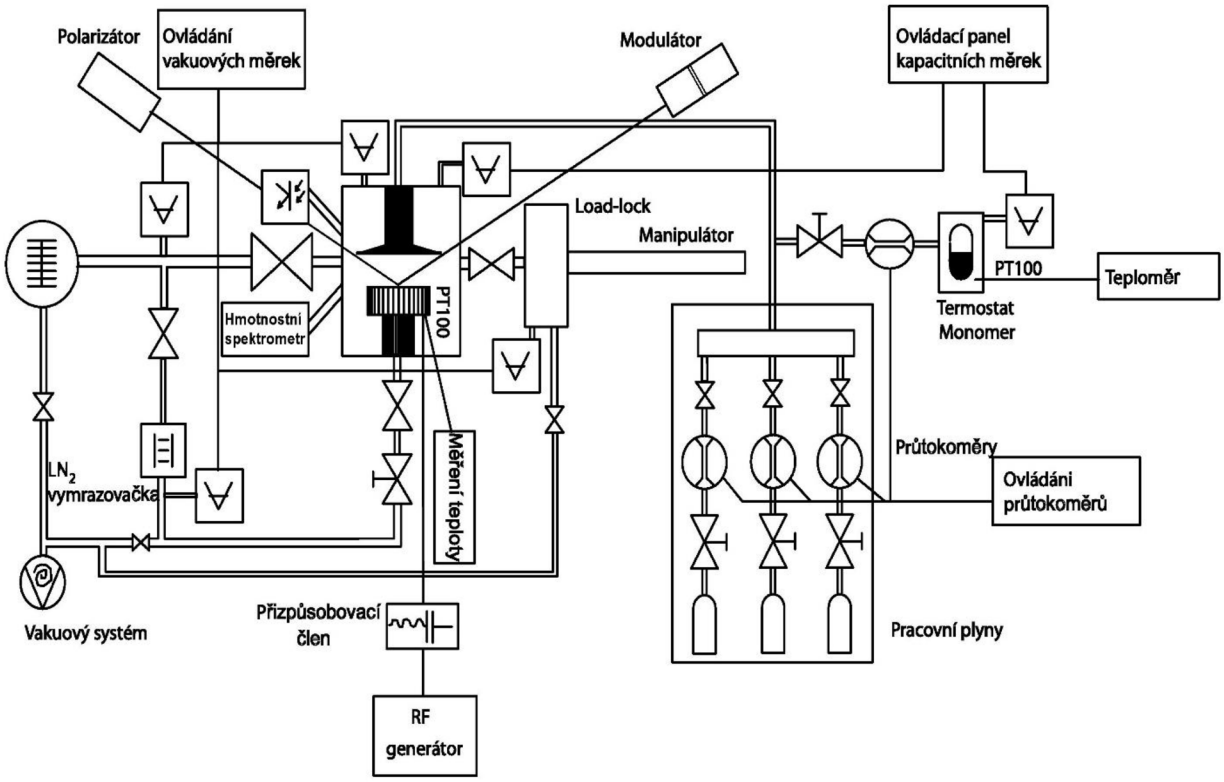
3.2 Příprava tenkých vrstev

3.2.1 Depoziční aparatura

Pro přípravu tenkých vrstev plazmochemickou depozicí metodou PECVD s kapacitně vázaným plazmatem byla použita depoziční aparatura A3 – vysokovakuový systém dosahující mezních tlaků v řádu 10^{-6} Pa. Vakua je v aparatuře dosaženo pomocí několika vývěv. Jednou z nich je rotační vývěva Scroll (TriScroll 300 Varian), která čerpá na primární vakuum. Vysokého vakua je možno dosáhnout turbomolekulární vývěvou (TMU 261 P, Pfeiffer Vacuum).

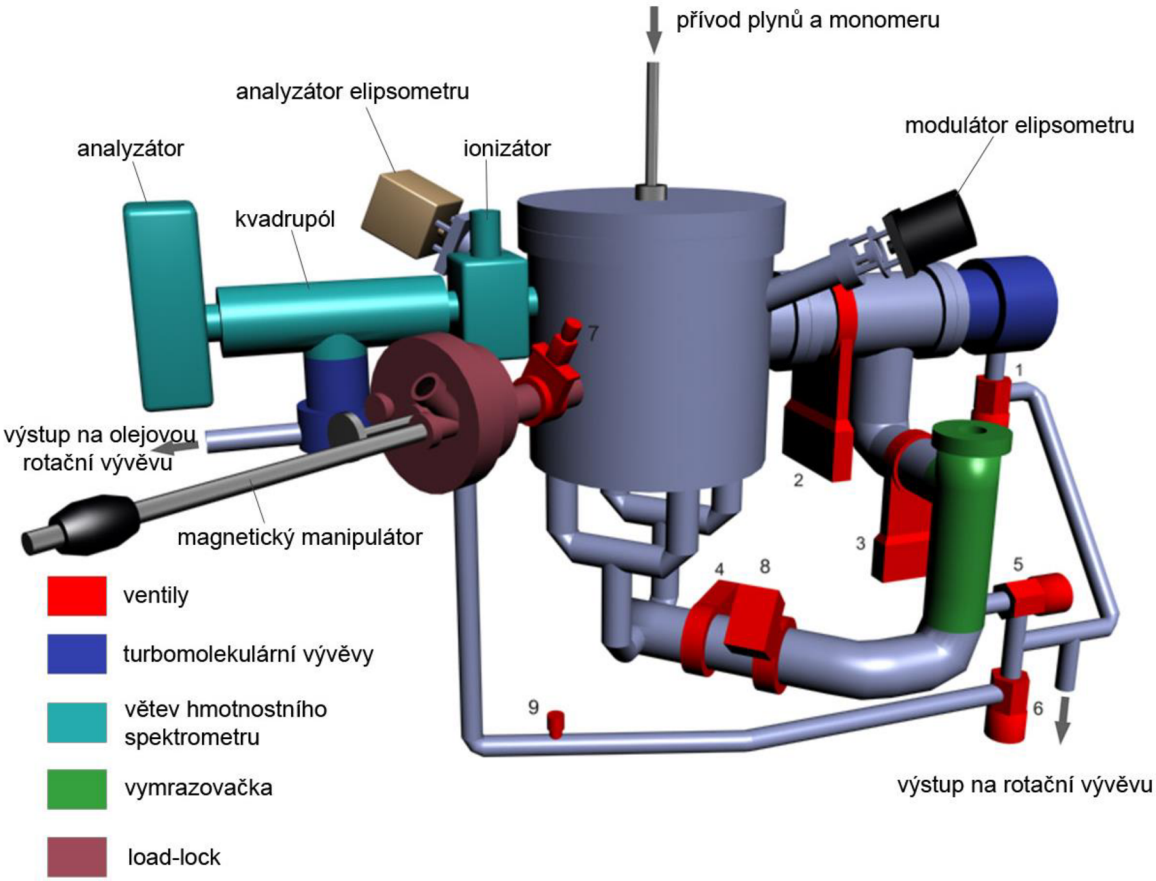
Veškeré části aparatury jsou z nerez oceli (AISI 304, 321 – firma Vakuum Praha) a jsou spojeny vakuovými „O-kroužky“ z Vitonu (DuPont^{TM}) nebo měděným vakuovým těsněním (Vakuum Praha, Pfeiffer Vacuum).

Grafické schéma aparatury je zobrazeno na obr. 15. Aparatura A3 se skládá z cylindrické komory reaktoru o rozměrech 25×25 cm, v ní jsou umístěny dvě planparalelní měděné elektrody OFHC (Oxygen Free High Conductivity) o průměru 114 mm. Horní elektrodou, která je uzemněná, se přivádí depoziční plyny do reaktoru. Dolní otočná elektroda slouží jako pracovní. Přivádí se na ni radiofrekvenční výkon (13,56 MHz) a může být osazena až šesti vzorky. Vzorky jsou upevněny v tzv. lodičkách (materiál OFHC měď) a z oddělovací komory (tzv. load-lock) jsou do elektrody vkládány pomocí magnetického manipulátoru. Celý systém lze ovládat jak manuálně, tak pomocí ovládacího programu „A3 Kontroler“.



Obr. 15 Schéma aparatury A3

K depoziční aparatuře je připojen in-situ fázově modulovaný spektroskopický elipsometr UVISEL (HORIBA, Jobin Yvon), pomocí něhož je měřena rychlost růstu a-CSi:H vrstvy a dále jsou zkoumány optické vlastnosti vzorků. Připojen k reaktoru je i hmotnostní spektrometr HAL 511/3F (Hiden Analytical) sloužící k studování reakčních pochodů během depozice a k měření čistoty sytému. Model depozičního systému se zapojeným elipsometrem a hmotnostním spektrometerem v 3D znázorňuje obr. 16.



Obr. 16 Model aparatury A3 ve 3D

3.2.2 Podmínky depozice

Před začátkem samotné depozice je důležité odčerpat hlavní komoru čerpacím systémem na primární vakuum (tlak v rozmezí $1 \cdot 10^{-5}$-$3 \cdot 10^{-5}$ Pa). Poté jsou magnetickým manipulátorem umístěny do pracovní elektrody. Pro zjištění nativní vrstvy SiO_2 je nutné změřit vlastnosti čistých substrátů spektroskopickým elipsometrem. Dalším krokem je předúprava vzorků argonovým plazmatem při průtoku Ar 10 sccm[1], tlaku v komoře 5,7 Pa, výkonu 5 W po dobu 10 minut. Díky této předúpravě dojde k aktivaci povrchu vzorku, a tak snadnějšímu navázání fragmentů monomeru TVS při depozici. Následuje opětovné odčerpání aparatury na základní vakuum a je nastaven požadovaný průtok TVS. Plazmochemická depozice je započata zapálením výboje při tlaku v komoře 2,7 Pa a při průtoku TVS 3,8 sccm.

Vzorky použity pro tuto práci byly deponovány při pulzním režimu výboje. Důležitou veličinou je dodávány efektivní výkon, který je definován vztahem:

$$P_{ef} = P_{celk.} \cdot \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}, \qquad (5)$$

kde $P_{celk.}$ je maximální výkon, t_{on} doba jednoho pulsu, po kterou je dodáván výkon, t_{off} doba mezi dvěma pulsy, po kterou není výkon dodáván.

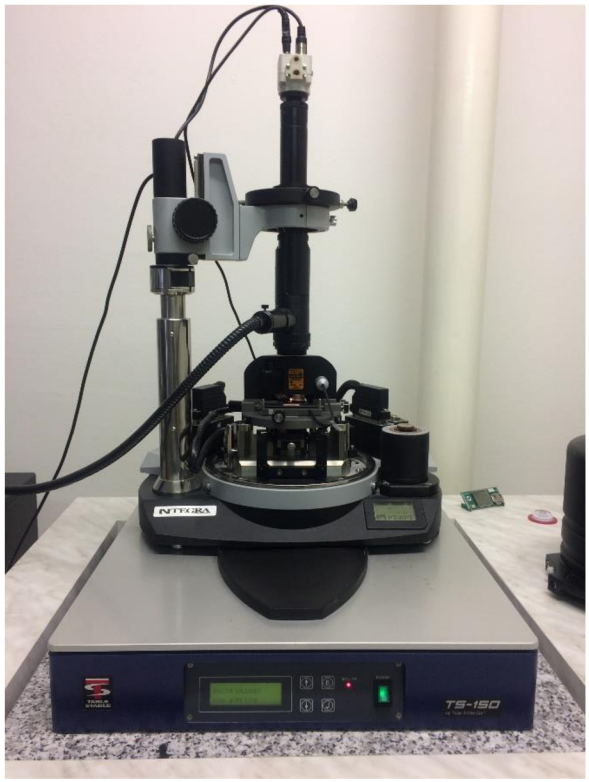
[1] jednotka cm^3/min

Jakmile je depozice ukončena, slouží argon jako inertní atmosféra po dobu jedné hodiny, při průtoku 10 sccm. Následně jsou vzorky znovu změřeny spektroskopickou elipsometrií pro získání údajů o tloušťce vrstvy a optických vlastnostech vzorků. Vzorky jsou ponechány v komoře do druhého dne, kvůli možné kontaminaci vzniklé reakci reaktivních radikálů se vzduchem. Dále dochází k měření vlastností vzorků pomocí mimo jiné mikroskopie atomárních sil.

3.3 Mikroskopie atomárních sil

3.3.1 Parametry AFM

Měření povrchové morfologie připravených vzorků pomocí AFM bylo prováděno na přístroji NTEGRA Prima/Aura (NT-MDT Spectrum Instruments, Zelenograd) zobrazeného na obr. 17. Vyhodnocení naměřených snímků bylo provedeno v softwaru Nova P9 od stejného dodavatele.



Obr. 17 Mikroskop atomárních sil NTEGRA Prima/Aura

Mikroskop skenující sondou NTEGRA Prima/Aura je složen z univerzální skenovací hlavy, kamery s optickým mikroskopem a antivibračního stolku s žulovou deskou. Kamera s optickým mikroskopem slouží k nastavení paprsku laseru na hrot raménka. Samotné měření může být zkresleno rušivými vlivy okolí jako jsou vibrace a šum, proto je mikroskop skenující sondou umístěn na antivibrační stolek s žulovou deskou TS-150 (The Table Stable Ldt, Mettmenstetten). Antivibrační stolek je schopen izolovat vibrace od 0,7 Hz do 1 000 Hz. Pro tlumení vyšších frekvencí slouží žulová deska, která je umístěna pod antivibračním stolkem. Další rušivé vlivy jako průvan, zvuk, lze eliminovat ocelovým krytem.

Pohyb vzorku je umožněn ve směru os *x,y,z* a to díky mikrometrickým šroubům (ve směru *x* a *y*), které jsou na sebe kolmé. Posun ve směru osy *z* je zprostředkován šroubem upevněným přímo v měřící hlavě, umožňuje i manuální přiblížení. Ve všech třech osách obsahuje piezoelektrický skener nízko šumové kapacitní senzory.

Mikroskop skenující sondou NTEGRA umožňuje tzv. skenování sondou nebo skenování vzorkem, kdy je pohybováno vzorkovacím podstavcem, na kterém je umístěn vzorek a sonda je nehybná. Technické parametry pro typy skenování jsou uvedeny v tab. 4. Celkové rozlišení AFM NTEGRA Prima/Aura se pohybuje v řádu atomů – molekul. V této bakalářské práci byly vzorky měřeny pomocí skenování vzorkem, které je vhodnější pro vzorky o menších rozměrech.

Tab. 4 Technické parametry AFM NTEGRA

		Skenování vzorkem	**Skenování sondou**
Velikost vzorku		průměr do 40 mm výška 15 mm	průměr do 100 mm výška 20 mm
Hmotnost vzorku		do 100 g	do 300 g
XY rozsah polohování, rozlišení		5×5 mm, 5 µm	
Citlivost polohování		2 µm	
Rozsah skenování		180×180×18 µm	
Optický systém	rozlišení	1 µm	3 µm
	zorné pole	4,5-0,4 mm	2,0-4,0 mm
Kontrola teploty	rozsah	od pokojové teploty do 150 °C	
	stabilita	≤ ±0,01 °C	
Izolace vibrací	aktivní	0,7-1000 Hz	
	pasivní	nad 1 kHz	

Pro měření byly použity raménka s hrotem NSG03 (NT-MDT Spectrum Instruments). Hroty NSG03 mají rozměry raménka: délka 135±5 µm, šířka 30±3 µm a tloušťka 1,5±0,5 µm. Kmitají s rezonanční frekvenci v intervalu od 47 do 150 kHz (typická rezonanční frekvence je 90 kHz). Jsou vyrobeny z monokrystalu křemíku N-typu nadopovaným antimonem, zrcadlivá strana je pokryta stříbrem. Poloměr hrotu je 10 nm (garantováno od výrobce). Tvar hrotu je tetraedrální, posledních 500 nm od vrcholu hrotu má tvar kónický [25].

3.3.2 Analýza pomocí AFM

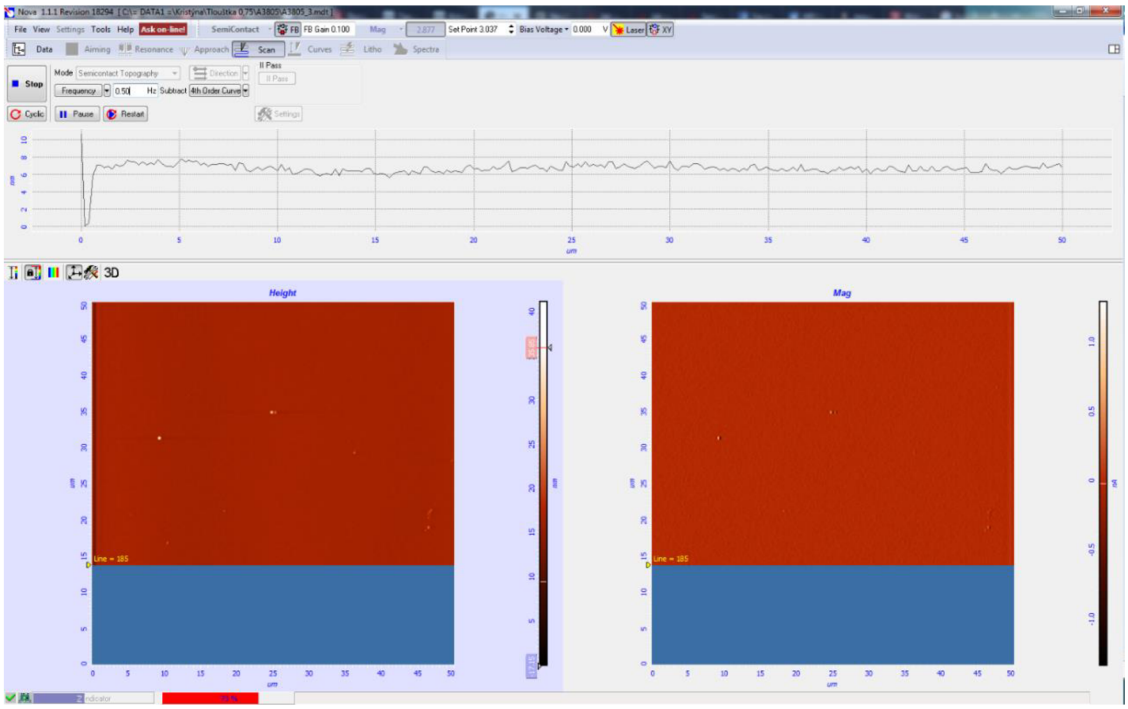
Vzorek byl umístěn na magnetický podstavec stolku, skenovací hlava připojena k řídící elektronice a postavena na základní jednotku mikroskopu. Poté byl spuštěn program Nova P9 (obr. 18) a zapnuta řídící elektronika. Následně byl nastaven laserový paprsek, aby směřoval na konec hrotu s raménkem. Pomocí otočných šroubů je laserový paprsek naladěný na dopad do středu fotodiody (rozdělené na čtyři kvadranty).

Optickým mikroskopem byla vybrána vhodná oblast pro analýzu. Pomocí programu Nova P9 bylo provedeno přiblížení vzorku k hrotu. Následně v tomto programu byly vhodně upraveny parametry pro měření. Mezi tyto parametry patří frekvence skenování 0,5 Hz, velikost skenované plochy 50×50 µm a 5×5 µm, bodové rozlišení skenovaného snímku 256 bodů, přítlak hrotu na povrch vzorku (SetPoint) – 2,0 – 10,0 a síla zpětné vazby (FB Gaint) – 0,1-1,5. Měření probíhalo v semikontaktním modu a horizontálním směru.

Mikroskopii atomárních sil byly získány snímky topografie povrchu vzorku (Height) a snímky amplitudového signálu (Mag). Amplitudový snímek je doprovodný k topografickému a jedná se o chybový signál měření. Vyjadřuje hodnotu proudu, která je potřeba k vyrovnání konstantní amplitudy kmitání raménka. Rychlost měření v semikontaktním módu je omezena zpětnou vazbou (dobou, ze kterou zpracuje signál). Síla zpětná vazby může být nastavena pro skenování jemných změn povrchu a při skenování větších změn povrchu může být systém zpětné vazby příliš pomalý na jejich rozpoznání (skenování proběhne s konstantní piezoelekrickou délkou). V důsledku to může mít za následek, že příkré změny povrchu se na snímku Height projeví ve velkém kontrastu a jemné se nemusí na snímku projevit vůbec. Na snímku amplitudového signálu lze tyto jemné změny povrchu rozpoznat, což může být výhodné zvláště při skenování větších ploch [26].

Snímky byly vyhodnoceny v softwaru Nova P9, který obsahuje i obrazový editor k úpravě snímků. Důležitou úpravou pro vyhodnocování RMS drsnosti je odstranění sklonu daného povrchu, toho je docíleno pomocí proložení polynomem čtvrtého nebo druhého stupně, kdy je každý řádek aproximován tímto polynomem. Je možné odečítat z celé roviny.

Takto upravené snímky byly použity k vyhodnocení RMS drsnosti a získání profilů jednotlivých řádků také v programu Nova P9.



Obr. 18 Uživatelské prostředí programu Nova P9

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Připravené vzorky

Pro bakalářskou práci byla vybrána série vzorků s přibližnou tloušťkou vrstvy 0,6 μm, konkrétní hodnoty uvádí tab. 5. Vzorky byly nadeponovány v pulzním režimu výboje, hodnoty jejich efektivních výkonů se pohybují od 2 W po 150 W.

Tab. 5 Přehled vzorků

Název vzorku	Efektivní výkon [W]	Tloušťka [nm]
A3804	2	707
A3805	10	581
A3808	25	653
A3806	30	692
A3807	40	496
A3809	75	584
A3968	150	730

Prvně došlo k předúpravě vzorků argonovým plazmatem při průtoku 10 sccm po dobu 10 minut při kontinuálním výkonu 5 W a tlaku 5,7 Pa. Samotná depozice probíhala při průtoku monomeru TVS 3,8 sccm a tlaku 2,7 Pa. Po ukončení depozice byly vzorky ponechány v argonové atmosféře při průtoku argonu 10 sccm a tlaku 5,7 Pa po dobu jedné hodiny.

Tyto připravené vzorky byly podrobeny měření povrchové morfologie pomocí atomové silové mikroskopie, a to konkrétně stanovení RMS drsnosti vrstev.

4.2 Povrchová topografie

Měření povrchové topografie připravených vrstev bylo provedeno v semikontaktním módu AFM (NT MDT). Byly získány snímky povrchu, které podávají informace o struktuře povrchu tenké vrstvy a její drsnosti. Znalost povrchu tenkých vrstev je stěžejní pro další výzkum mechanických vlastností tenkých vrstev.

4.2.1 Stanovení parametrů drsnosti a výšky povrchu

Pro vyhodnocení závislosti RMS drsnosti na efektivním výkonu byly podrobeny měření všechny vzorky série (viz Tab. 5). Měření probíhalo při standardním nastavením AFM a optického mikroskopu (kapitola 3.3.2). Byly zvoleny dvě velikosti plochy skenovaných oblastí - 50×50 μm^2 a 5×5 μm^2 při konstantním rozlišení 256×256 bodů. Pro každý vzorek série bylo vybráno pět snímků jednotlivých velikostí plochy. Z těchto snímků byla vyhodnocena RMS drsnosti, průměrná drsnost R_a a maximální výška povrchu pomocí programu Nova P9. U plochy 50×50 μm^2 při skenování docházelo k tvorbě artefaktu na levém okraji, který měl vliv na celkovou RMS drsnost, proto byl snímek v programu Nova P9 oříznut a artefakt odstraněn. Získané hodnoty byly zprůměrovány, byla z nich spočtena směrodatná odchylka a hodnoty byly zpracovány v programu ORIGIN.

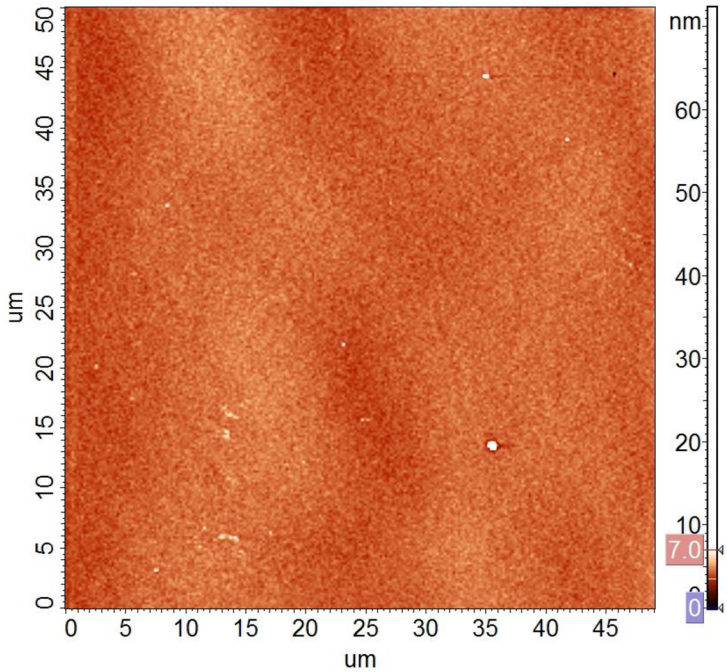
Byly zvoleny dvě velikosti plochy skenovaných oblastí - 50×50 μm^2 a 5×5 μm^2 pro analýzu, zdali na sledovaný jev má vliv i velikost skenované oblasti.

Efektivní výkon 2 W

Povrchovou morfologii vzorku A3804 s efektivním výkonem 2 W lze pozorovat na obr. 19 a obr. 21. Vzorek vykazoval jemnozrnnou strukturu. Na ploše 50×50 μm^2 se vyskytuje ve struktuře i větší zrno kulového tvaru (obr. 19). Na Obr. 20 lze pozorovat povrch vzorku ve 3D zobrazení.

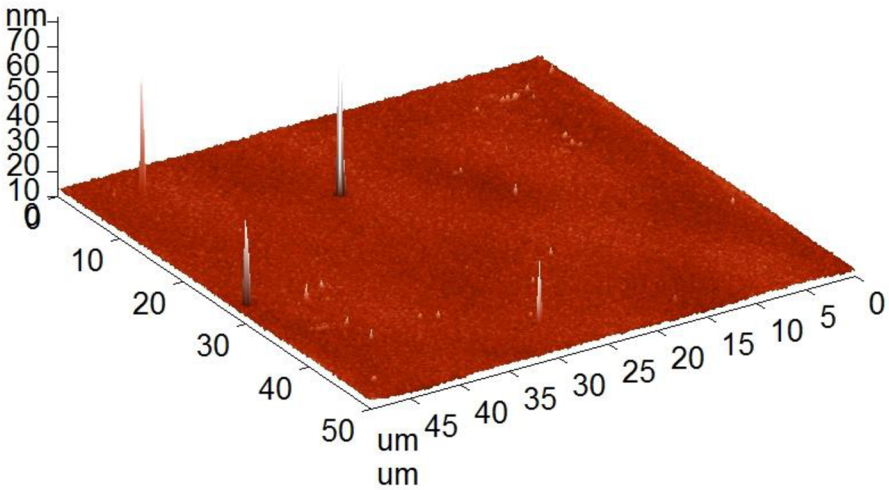
Z vybraných pěti snímků byla pro plochu 50×50 μm^2 vyhodnocena:

- RMS drsnost: 0,595±0,108 nm
- R_a: 0,299±0,008 nm



Obr. 19 Vzorek A3804 - 2 W, velikost plochy 50×50 μm^2

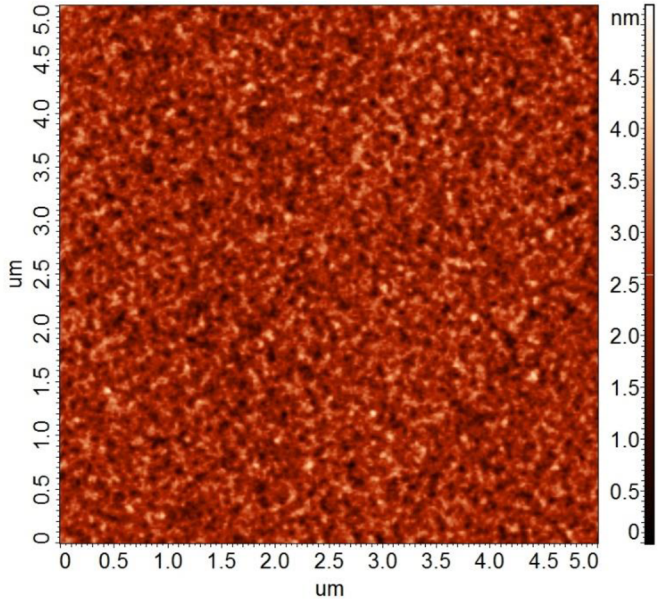
Maximum výšky plochy 50×50 μm^2 bylo 67,86±17,97 nm.



Obr. 20 Vzorek A3804 - 2 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

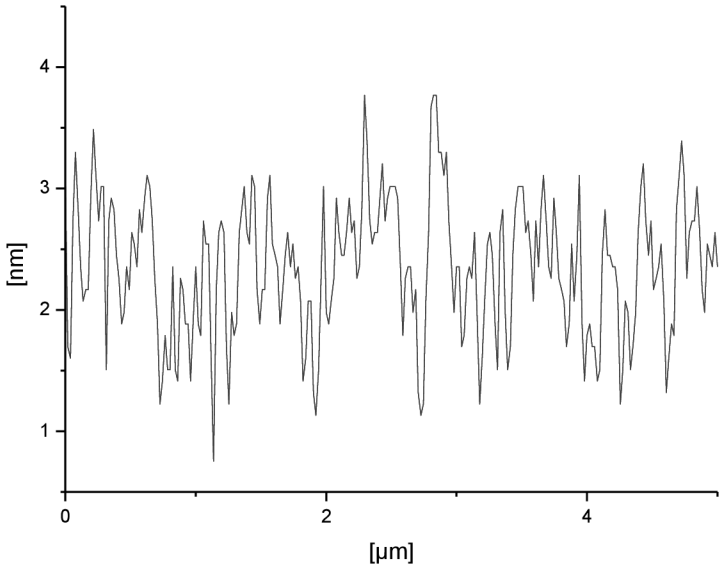
Pro plochu 5×5 μm^2 byla vyhodnoceny parametry:

- RMS drsnost: 0,586±0,015 nm
- R_a: 0,467±0,012 nm



Obr. 21 Vzorek A3804 - 2 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Na obr. 22 je znázorněn řez povrchem plochy 5×5 μm^2. Výškové maximum pro plochu 5×5 μm^2 bylo stanoveno na hodnotu 5,50±0,48 nm.



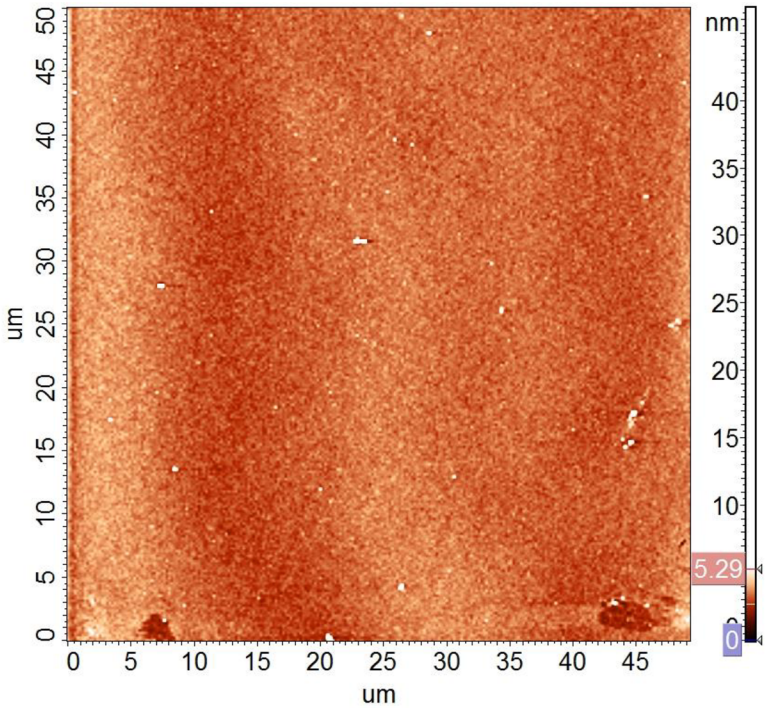
Obr. 22 Profil povrchu vzorku A3804 pro velikost plochy 5×5 μm^2

Efektivní výkon 10 W

Struktura povrchu vzorku A3805 je zobrazena na Obr. 23 a Obr. 25. Na ploše 50×50 μm^2 lze pozorovat ojedinělá větší zrna a tmavší (hlubší) místa (obr. 23). Struktura ve 3D je zobrazena na Obr. 24.

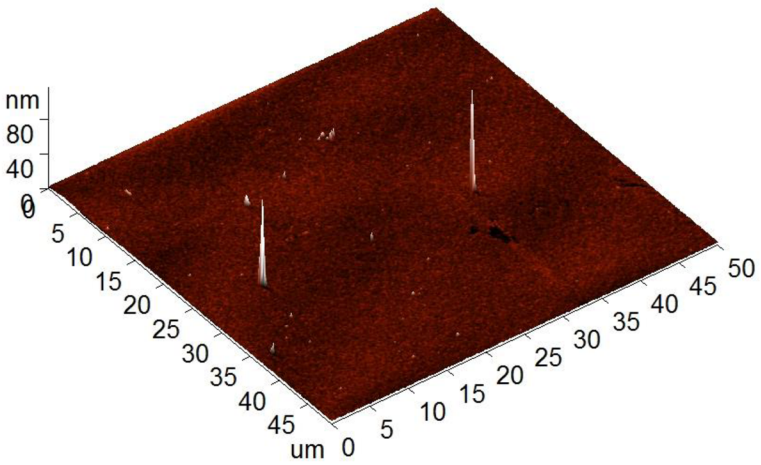
Z pěti snímků byly vyhodnoceny parametry 50×50 μm^2:

- RMS drsnost: 0,684±0,190 nm
- R_a: 0,324±0,007 nm



Obr. 23 Vzorek A3805 - 10 W, velikost plochy 50×50 μm^2

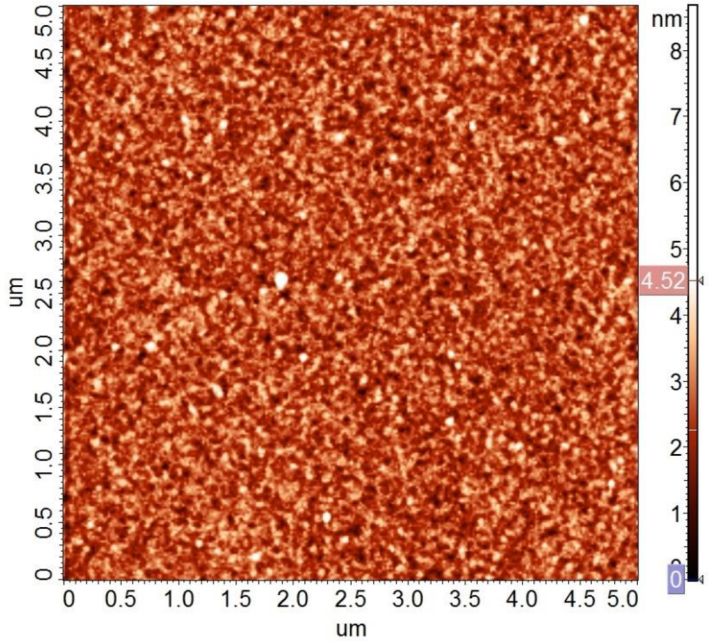
Maximum výšky plochy bylo stanoveno na 50,05±7,85 nm.



Obr. 24 Vzorek A3805 - 10 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

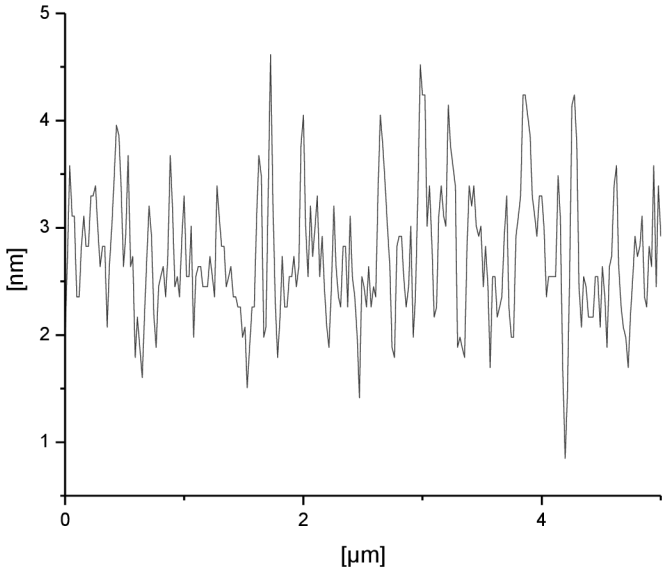
Na obr. 25 je snímek plochy 5×5 μm^2, na kterém je vidět drsnější povrch s větším zrnem kulovitého tvaru. Pro plochu 5×5 μm^2 byly naměřeny hodnoty.

- RMS drsnost: 0,648±0,011 nm
- R_a: 0,499±0,006 nm



Obr. 25 Vzorek A3805 - 10 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Řez povrchem plochy 5×5 μm^2 je zobrazen na obr. 26. Maximum plochy 5×5 μm^2 bylo odečteno ve výšce 9,81±0,84 nm.



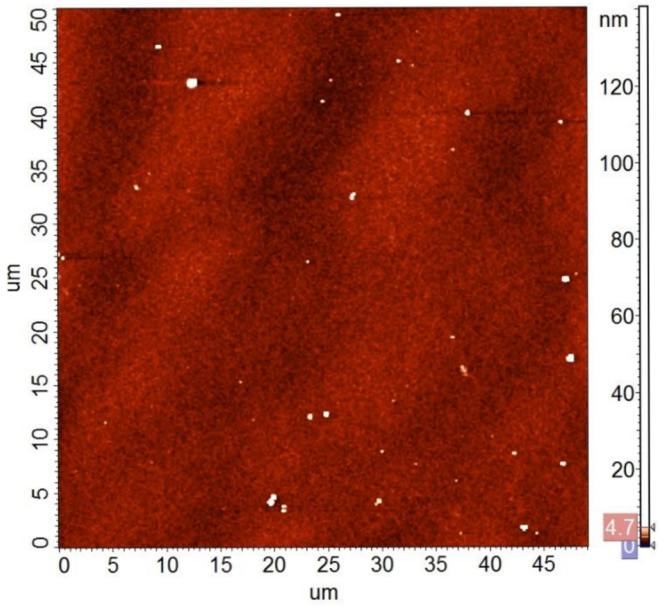
Obr. 26 Profil povrchu vzorku A3805

Efektivní výkon 25 W

Strukturu povrchu vzorku A3808 je možno pozorovat na obr. 27, obr. 28 a obr. 29. Na ploše 50×50 μm^2 se vyskytují větší zrna kulovitého tvaru.

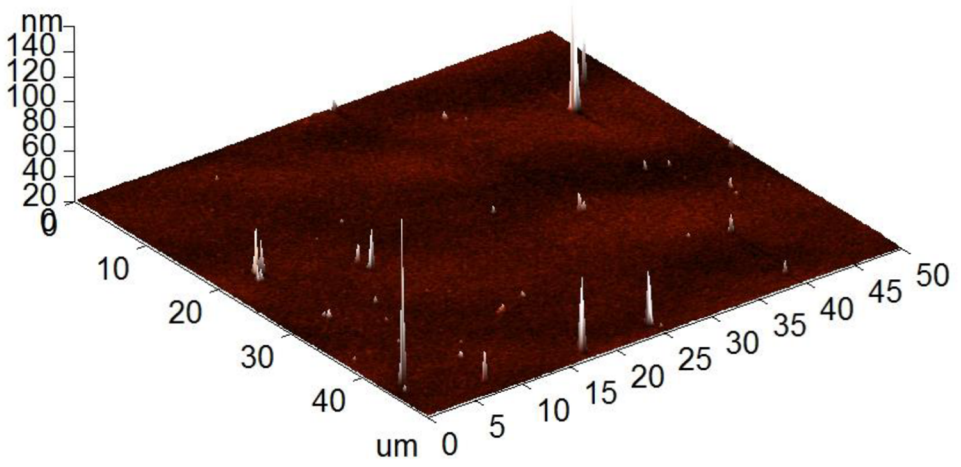
Pro plochu 50×50 μm^2 byly stanoveny hodnoty:

- RMS drsnost: 0,907±0,185 nm
- Ra: 0,276±0,016 nm



Obr. 27 Vzorek A3808 - 25 W, velikost plochy 50×50 μm^2

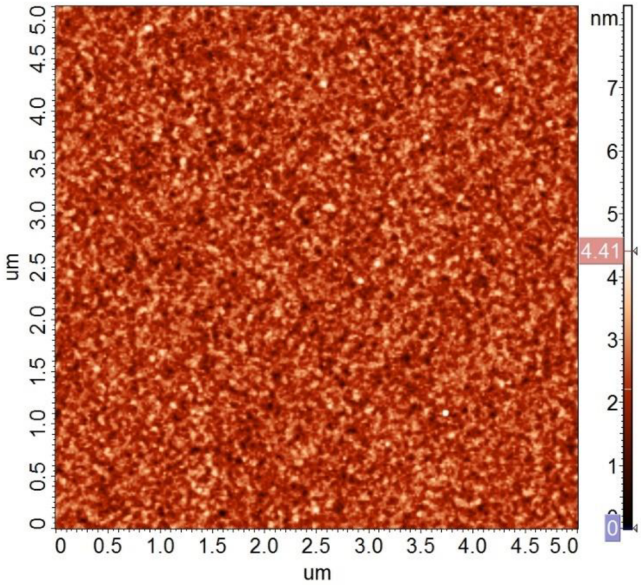
Z pěti snímků bylo vyhodnoceno maximum výšky povrchu na 82,78±29,49 nm pro plochu 50×50 μm^2.



Obr. 28 Vzorek A3808 - 25 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

Na obr. 29 je snímek povrchové morfologie pro velikost plochy 5×5 μm^2. Výškové parametry pro plochu 5×5 μm^2 byly vyhodnoceny:

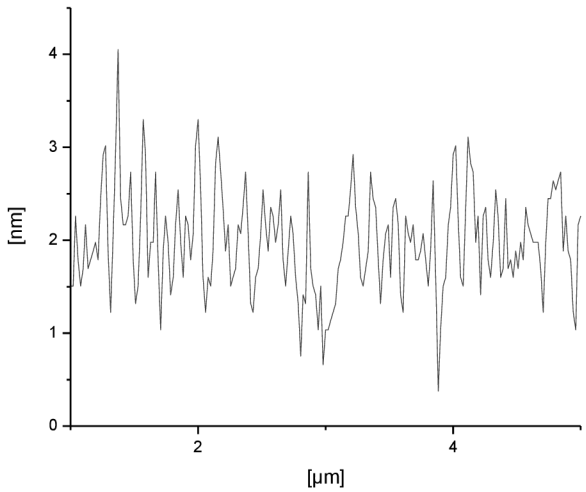
- RMS drsnost: 0,557±0,037 nm
- R_a: 0,425±0,012 nm



Obr. 29 Vzorek A3808 - 25 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Hodnota RMS drsnosti pro skenovanou plochu 50×50 μm^2 je výrazně vyšší než pro plochu 5×5 μm^2. Pro vyhodnocení RMS drsnosti pro plochu 5×5 μm^2 byly vybrány snímky, které byly skenovány v oblastech bez výskytu větších zrn. Tedy RMS drsnost pro plochu 50×50 μm^2 byla ovlivněna přítomnosti větších zrn, které její hodnotu zvýšily.

Struktura povrchu je možno pozorovat i snímku příčného řezu povrchu (obr. 30). Nejvyšší bod povrchu stanovený měřením odpovídal hodnotě 5,54±1,39 nm (plocha 5×5 μm^2).



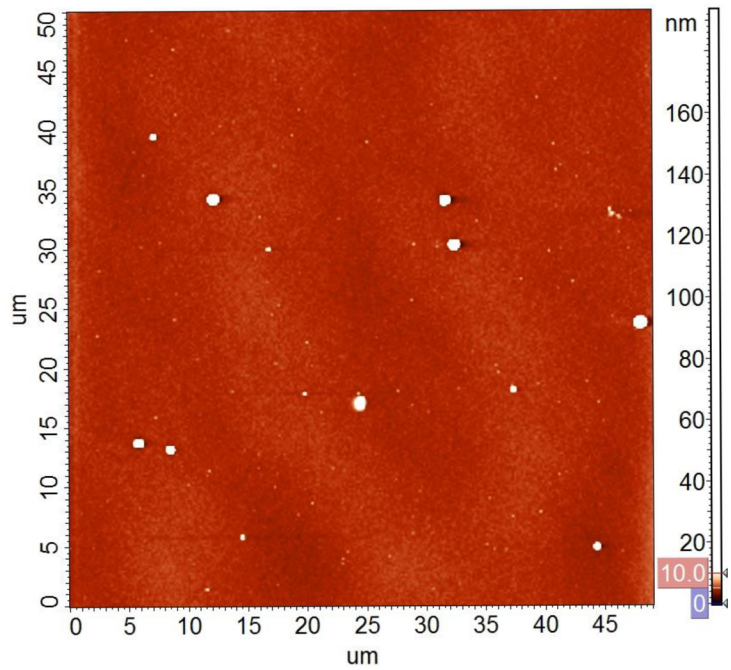
Obr. 30 Profil povrchu vzorku A3808 - 5×5 μm^2

Efektivní výkon 30 W

Povrchová morfologie vzorku A3806 je zobrazena na snímcích obr. 31, obr. 32 a obr. 33. Na obr. 31 je patrné, že struktura vzorku je jemnozrnná s výskytem větších zrn.

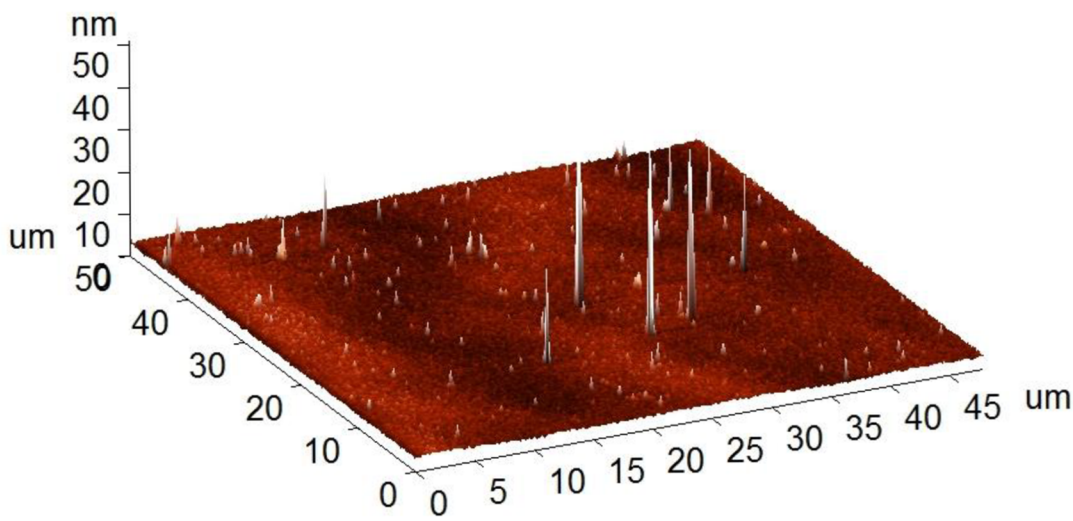
Průměrné hodnoty výškových parametrů pro plochu 50×50 μm^2 byly stanoveny jako:

- RMS drsnost: 0,797±0,212 nm
- R_a: 0,280±0,012 nm



Obr. 31 Vzorek A3806 - 30 W, velikost plochy 50×50 μm^2

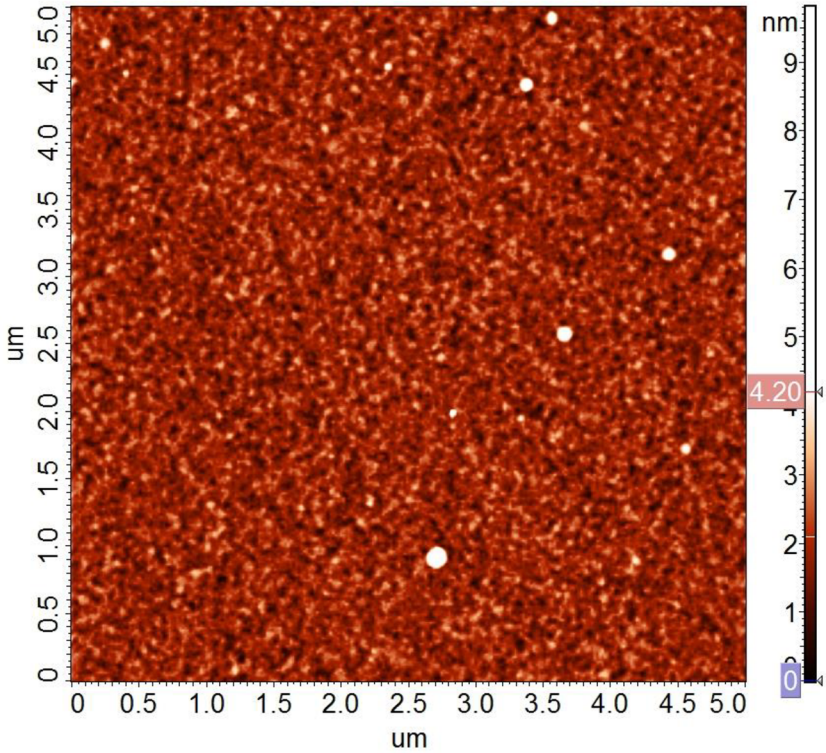
Průměrná hodnota maxima výšky povrchu pro plochu 50×50 μm^2 byla 89,49±32,24 nm.



Obr. 32 Vzorek A3806 - 30 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

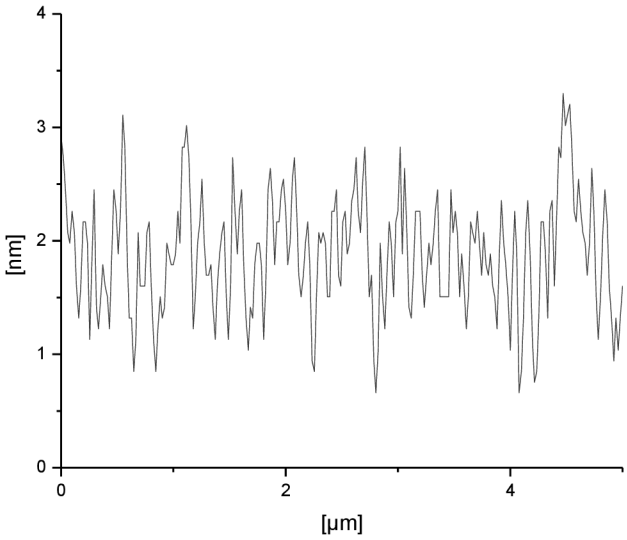
Hodnoty výškových parametrů pro plochu 5×5 μm^2 (obr. 33):

- RMS drsnost: 0,543±0,022 nm
- R_a: 0,415±0,015



Obr. 33 Vzorek A3806 - 30 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Obr. 34 zobrazuje výškový profil struktury povrchu. Maximum plochy o velikosti 5×5 μm^2 bylo stanoveno na hodnotu 9,52±1,21 nm.

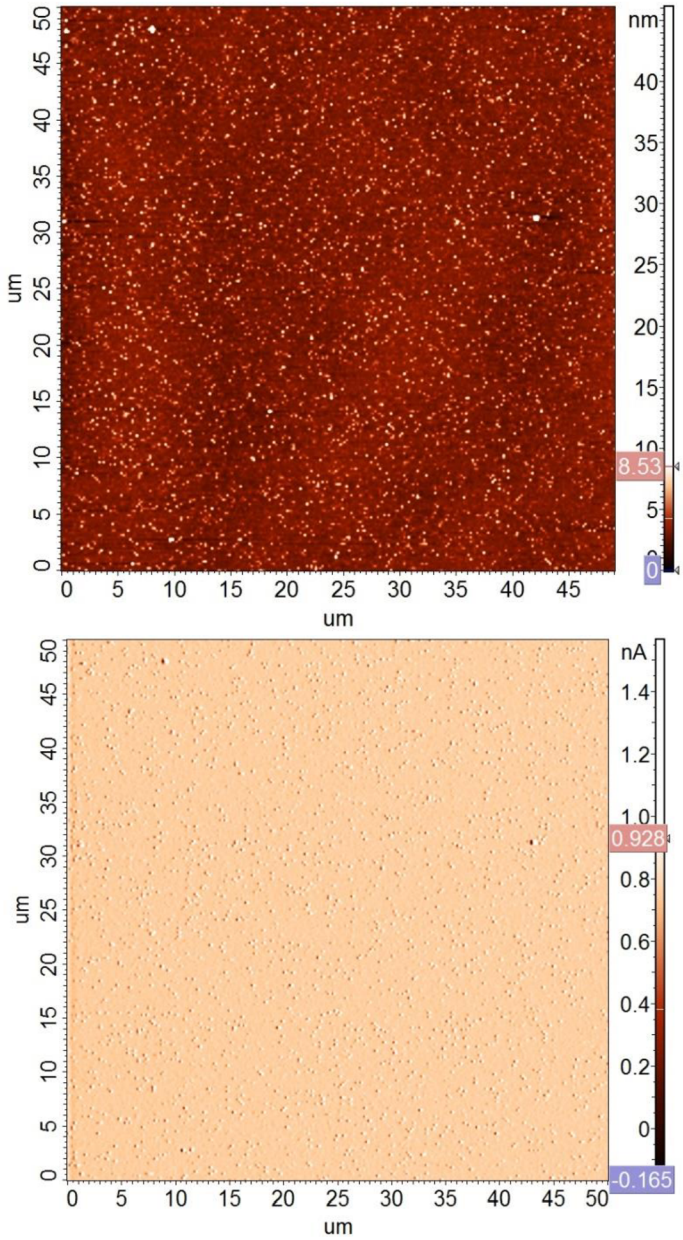


Obr. 34 Profil povrchu vzorku A3806 – plocha 5×5 μm^2

Efektivní výkon 40 W

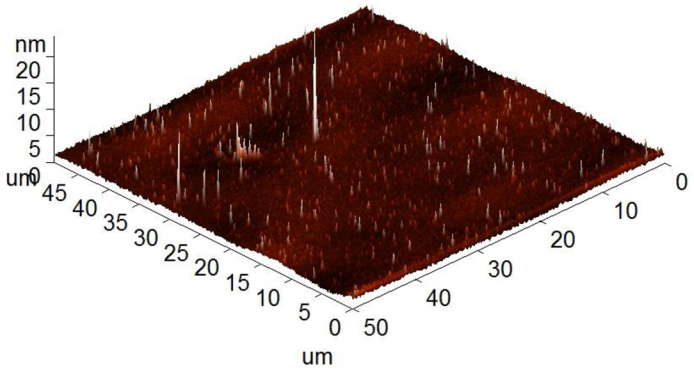
Povrchová morfologie vzorku A3807 je zobrazena na obr. 35, obr. 36 a obr. 37. Z obr. 35 je patrné, že ve struktuře vzorku efektivního výkonu 40 W se vyskytují pravidelná zrna. Ojediněle lze pozorovat i větší zrna kulovitého tvaru. Průměrné hodnoty výškových parametrů odpovídaly hodnotám (plocha 50×50 μm^2):

- RMS drsnost: 0,979±0,241 nm
- R_a: 0,276±0,004 nm



Obr. 35 Vzorek A3807- 40 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – snímek Height (horní), snímek Mag (dolní)

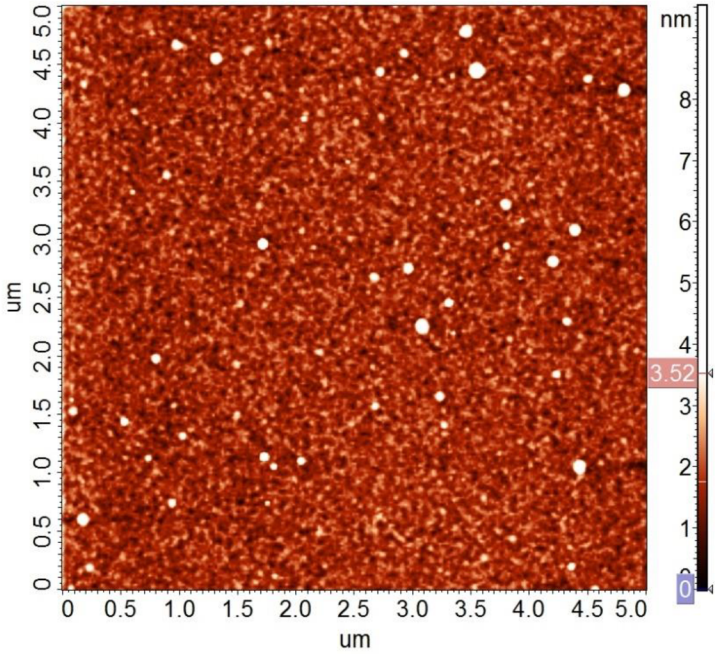
Z pěti snímků bylo vyhodnoceno maximum výšky povrchu na 87,80±21,07 nm pro plochu 50×50 μm^2.



Obr. 36 Vzorek A3807- 40 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

Na menší ploše (obr. 37) lze opět pozorovat zrnitou strukturu vzorku A3807. Parametry popisující drsnost povrchu byly pro plochu 5×5 μm^2 vyhodnoceny na hodnoty:

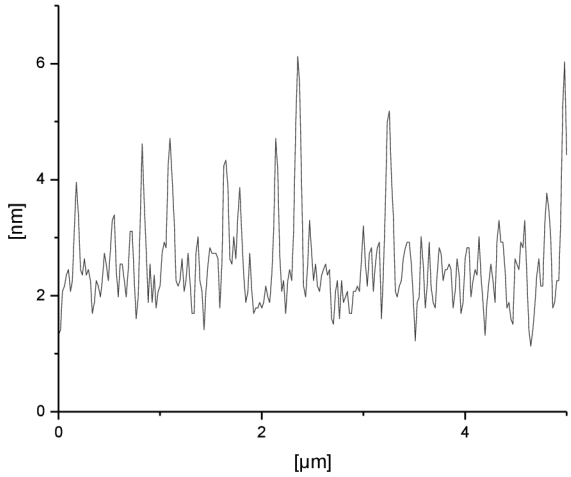
- RMS drsnost: 0,533±0,044 nm
- R_a: 0,362±0,014 nm



Obr. 37 Vzorek A3807- 40 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Rozdíl hodnot RMS drsností pro skenované oblasti je poměrně markantní. Na větší ploše je celkový počet zrn větší, navíc se ve struktuře objevují i zrna většího tvaru, které nebyly skenovány v rámci měření plochy 5×5 μm^2.

Příčný řez povrchem zobrazuje Obr. 38. Nejvyšší bod profilu plochy 5×5 μm^2 byl vyhodnocen na hodnotu 9,72±1,67 nm.

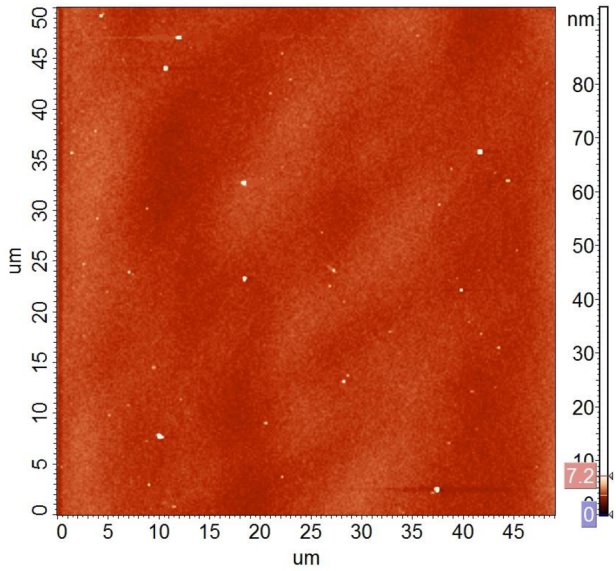


Obr. 38 Profil povrchu vzorku A3807 – plocha 5×5 μm^2

Efektivní výkon 75 W

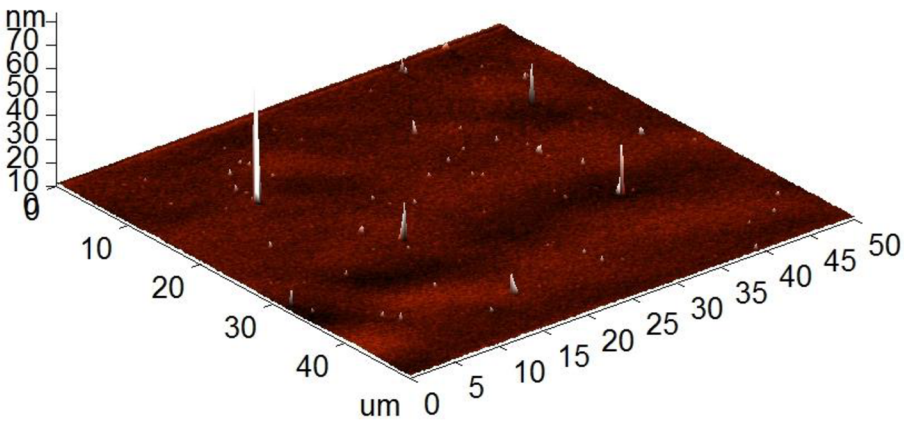
Struktura povrchu vzorku A3809 je zobrazena na obr. 39, obr. 40, obr. 41. Na snímcích obou ploch lze pozorovat hladkou strukturu s ojedinělými zrny kulovitého tvaru. Výškové parametry drsnosti povrchu pro plochu 50×50 μm^2:

- RMS drsnost: 0,513±0,075 nm
- R_a: 0,209±0,021 nm



Obr. 39 Vzorek A3809 – 75 W, velikost plochy 50×50 μm^2

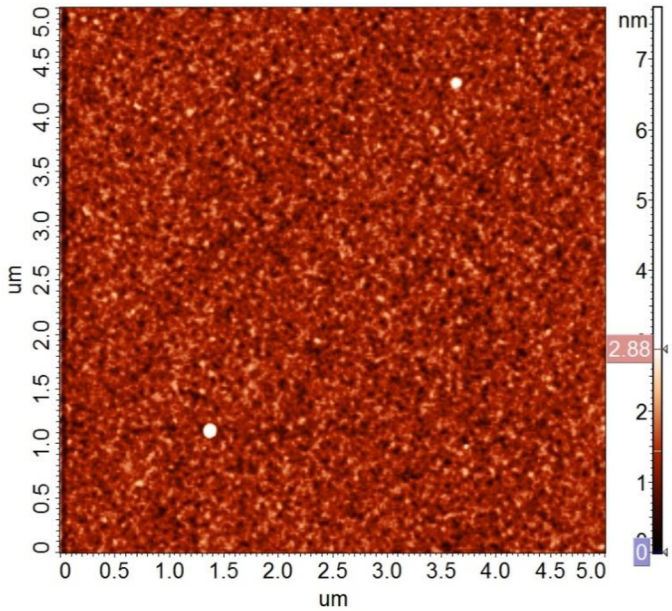
Maximum výšky povrchu pro plochu 50×50 μm^2 bylo 86,70±25,73 nm.



Obr. 40 Vzorek A3809 – 75 W, velikost plochy 50×50 μm^2 – 3D zobrazení

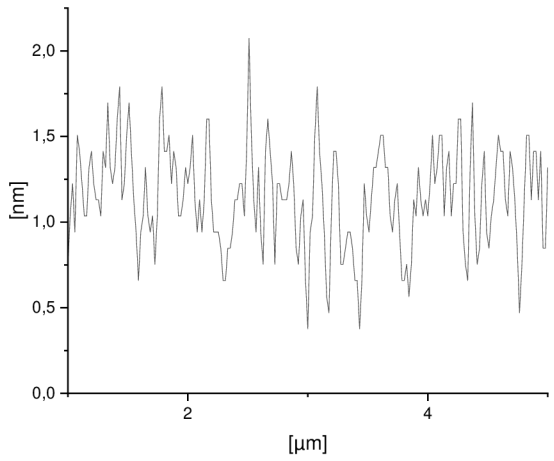
Zprůměrovaná hodnoty skenovanou plochu 5×5 μm^2:

- RMS drsnost: 0,352±0,007 nm
- R_a: 0,265±0,004 nm



Obr. 41 Vzorek A3809 – 75 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Na obr. 42 je znázorněný výškový profil povrchu vzorku. Maxima dosahuje plocha 5×5 μm^2 v hodnotě 8,99±1,92 nm.

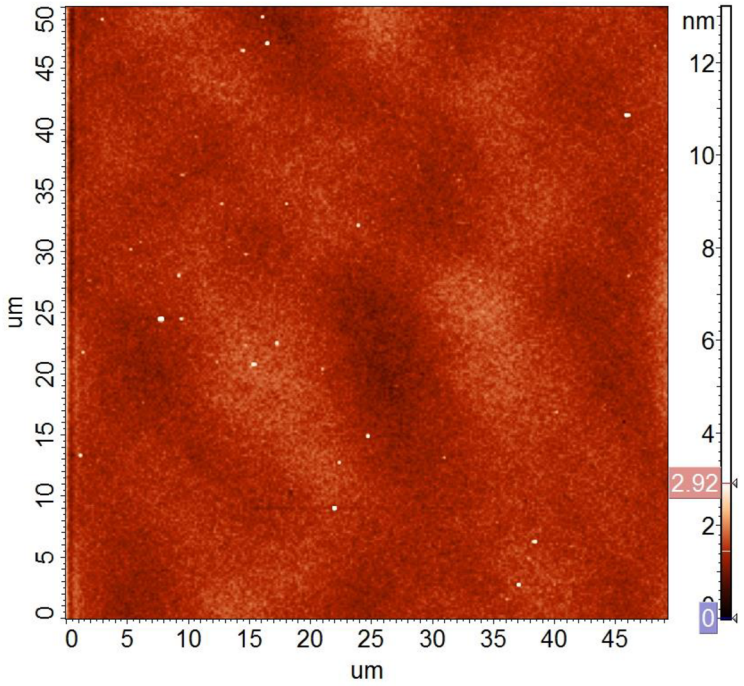


Obr. 42 Profil povrchu vzorku A3809 – plocha 5×5 μm^2

Efektivní výkon 150 W

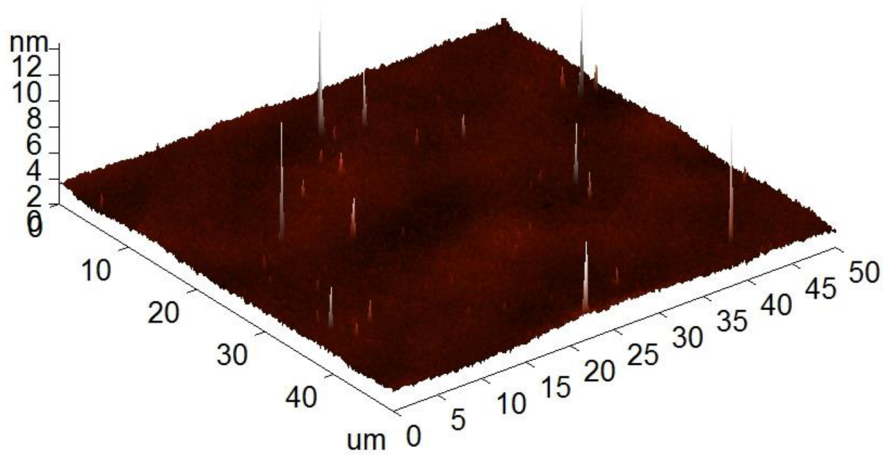
Povrchová struktura vzorku A3968 s efektivním výkonem 150 W je zachycena na obr. 43, obr. 44 a obr. 45. Na snímcích obou ploch lze pozorovat hladký povrch vzorku s ojedinělým výskytem menších zrn. Pro plochu 50×50 μm^2 byly vyhodnoceny parametry:

- RMS drsnost: 0,307±0,147 nm
- R_a: 0,148±0,014 nm



Obr. 43 Vzorek A3968 – 150 W, velikost plochy 50×50 μm^2

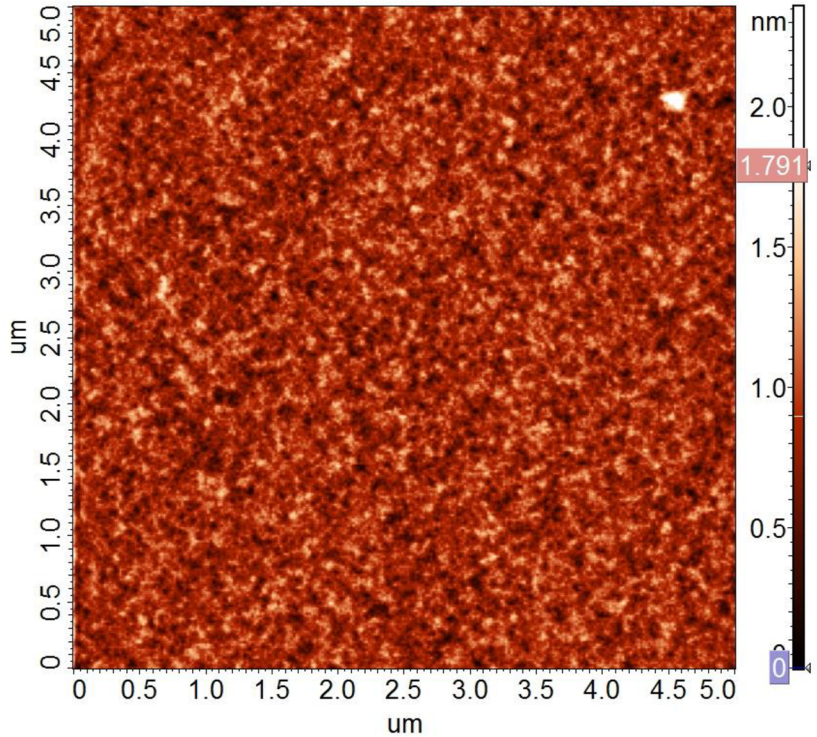
Průměrná hodnota maxima výšky povrchu pro plochu 50×50 μm^2 byla 34,96±32,88 nm.



Obr. 44 Vzorek A3968 – 150 W, velikost plochy 50×50 µm2- 3D zobrazení

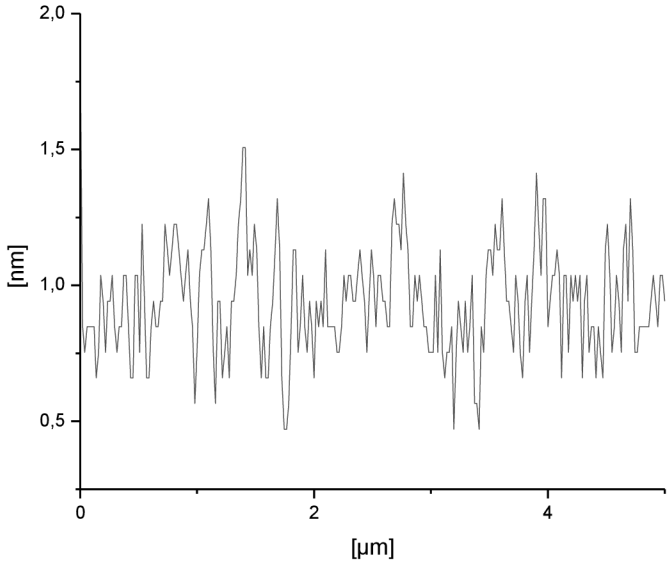
Průměrné výškové parametry pro skenovanou plochu 5×5 μm^2 byly stanoveny na hodnoty:

- RMS drsnost: 0,228±0,006 nm
- R_a: 0,175±0,001 nm



Obr. 45 Vzorek A3968 – 150 W, velikost plochy 5×5 μm^2

Obr. 46 znázorňuje příčný řez povrchem snímku skenované plochy 5×5 μm^2. Nejvyšší bod profilu skenované plochy 5×5 μm^2 dosahoval hodnoty 3,28±1,51 nm.



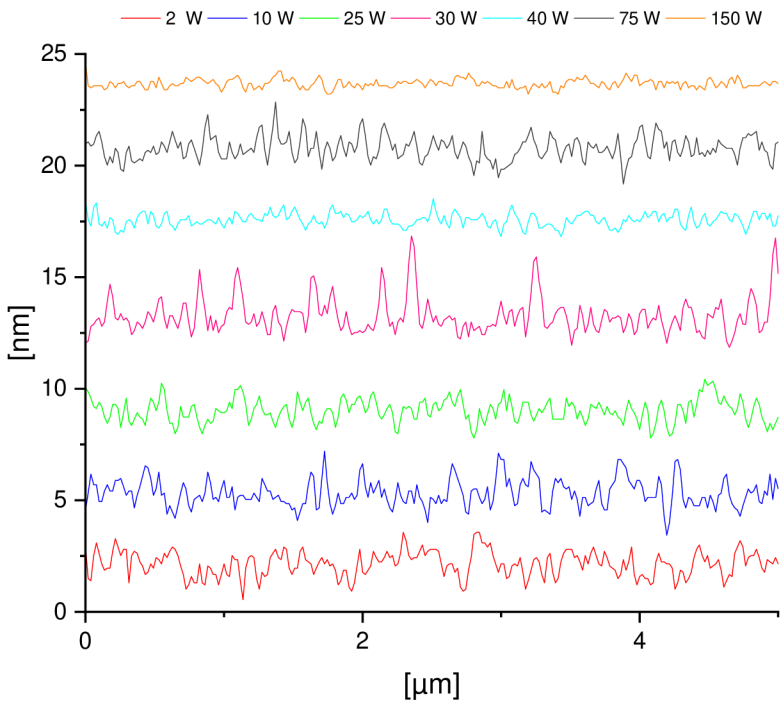
Obr. 46 Profil povrchu vzorku A3968 – plocha 5×5 μm^2

4.2.2 Závislost RMS drsnosti na efektivním výkonu

Pro stanovení závislosti RMS drsnosti na efektivním výkonu (obr. 48) byly zvoleny všechny vzorky série o efektivním výkonu od 2 W do 150 W (viz tab. 5) a jejich průměrné hodnoty RMS drsností (viz kapitola 4.2.1).

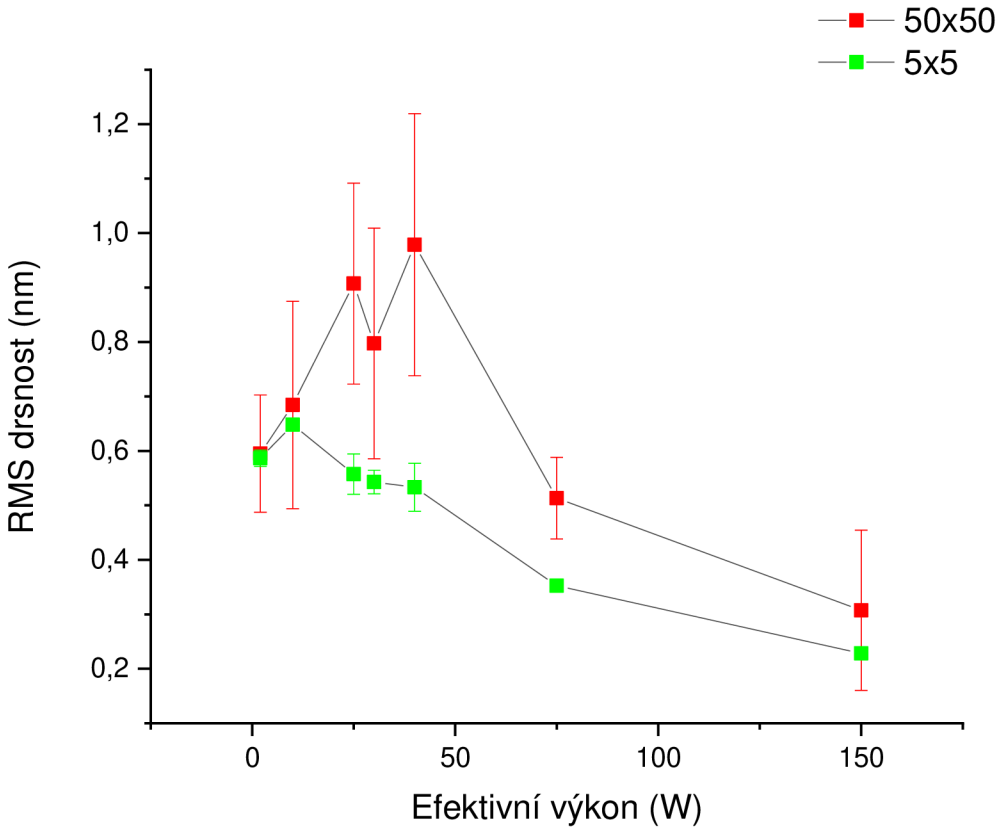
Na křivce odpovídající ploše 50×50 μm^2 lze pozorovat, že RMS drsnost s rostoucím efektivním výkonem vzrůstá, až dosáhne svého maxima pro efektivní výkon 40 W. S efektivním výkonem 75 W hodnota RMS drsnosti klesá až na minimum, které nastává v 150 W. V hodnotě efektivního výkonu 30 W dochází k mírnému poklesu RMS drsnosti, který není statisticky významný (v rámci směrodatné odchylky). U vzorků 25 a 30 W se v povrchu vyskytovala větší zrna. Nejvyšší hodnota RMS drsnosti nastala u vzorku o efektivním výkonu 40 W, na snímku AFM (obr. 35) se objevovala pravidelně viditelná zrna. Všechny hodnoty RMS drsností vykazovali přibližně stejnou hodnotu směrodatné odchylky. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 0,17 nm,

Křivka pro velikost skenované plochy 5×5 μm^2 dosahuje svého maxima v hodnotě RMS drsnosti pro efektivní výkon 10 W. Dále klesá. V efektivním výkonu 25, 30, 40 W se pohybuje kolem stejných hodnot až poklesne na své minimum odpovídající hodnotě RMS drsnosti pro efektivní výkon 150 W. Podobné hodnoty RMS drsností u efektivních výkonů 25, 30, 40 W jsou dány velmi malým rozdílem v hodnotách efektivních výkonů. Největší hodnota směrodatné odchylky byla u vzorku o efektivním výkonu 40 W. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 0,02 nm. Na obr. 47 je zobrazeno srovnání profilů pro všechny vzorky tloušťkové série.



Obr. 47 Srovnání profilů pro efektivní výkon 2-150 W

Závislosti vykazují různé trendy pro rozdílnou velikost skenované plochy. U skenované plochy 50×50 μm^2 dochází k maximu v hodnotě odpovídající efektivnímu výkonu 40 W, pro plochu 5×5 μm^2 je maximum v hodnotě efektivního výkonu 10 W. Vzorky o efektivním výkonu 25, 30 W mají ve své struktuře lokální větší zrna a vzorek o efektivním výkonu 40 W má celkově větší počet menších zrn, proto je i hodnota směrodatné odchylky větší než u plochy 5×5 μm^2. Při měření 5×5 μm^2 byly vybrány oblasti, které neobsahovali tyto zrna, proto jsou hodnoty RMS drsností pro tyto vzorky nižší. Z měření je patrné, že dochází ke snížení RMS drsnosti u vyšších hodnot efektivních výkonů 75 W a 150 W, kde dochází k minimu u obou skenovaných ploch (150 W). Závislost RMS drsnosti povrchu vrstvy na výkonu použitém pro její depozici zřejmě souvisí s dynamikou růstu vrstvy a mohla by tedy souviset s depoziční rychlostí.



Obr. 48 Závislost RMS drsnosti na efektivním výkonu

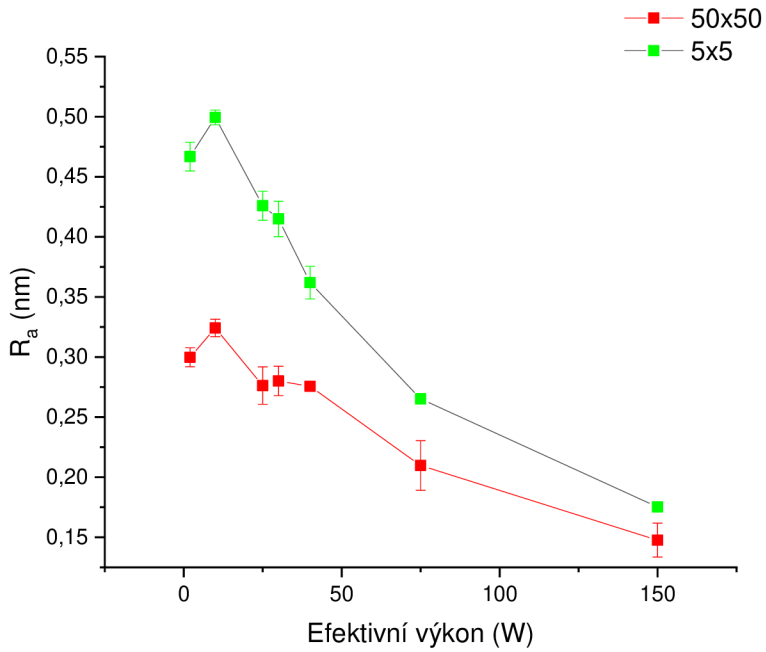
4.2.3 Závislost průměrné drsnosti R_a na efektivním výkonu

Na obr. 49 je zobrazena závislost průměrné drsnosti R_a na efektivním výkonu. Pro vyhodnocení byly použity všechny vzorky tloušťkové série. Průměrná hodnota R_a a její směrodatná odchylka byla vypočtena z pěti snímků povrchu pro obě velikosti skenované plochy.

Na křivce pro skenovanou plochu 50×50 μm^2 lze pozorovat, že hodnota průměrné drsnosti dosahuje svého vrcholu v hodnotě pro efektivní výkon 10 W. Dále dochází k poklesu. Pro efektivní výkon 25, 30 a 40 W se hodnota průměrné drsnosti pohybuje na podobných hodnotách (v rámci směrodatné odchylky). V bodě efektivního výkonu 75 W průměrná drsnost R_a stále klesá až dosáhne svého minima v hodnotě efektivního výkonu 150 W. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 0,01 nm.

Pro křivku plochy 5×5 μm^2 hodnota průměrné drsnosti stoupá, dosáhne svého vrcholu v hodnotě efektivního výkonu 10 W. Dochází k výraznému poklesu pro efektivní výkon 25 W a 30 W. V těchto dvou efektivních výkonech vykazuje R_a podobné hodnoty. U hodnot 40 i 75 W dochází k výraznému poklesu hodnot průměrné drsnosti. V bodě efektivního výkonu 150 W má hodnota R_a své minimum. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 0,02 nm.

Z grafu je patrné, že obě křivky vykazují podobný průběh U obou křivek lze pozorovat podobné hodnoty průměrné drsnosti efektivního výkonu 25 a 30 W, což je způsobeno malým rozdílem v hodnotách efektivního výkonu. Obě skenované plochy dosáhly maxima (10 W) a minima (150 W) ve stejném efektivním výkonu. Hodnoty průměrné drsnosti R_a jsou vyšší pro křivku 5×5 μm^2.



Obr. 49 Závislost průměrné drsnosti Ra na efektivním výkonu

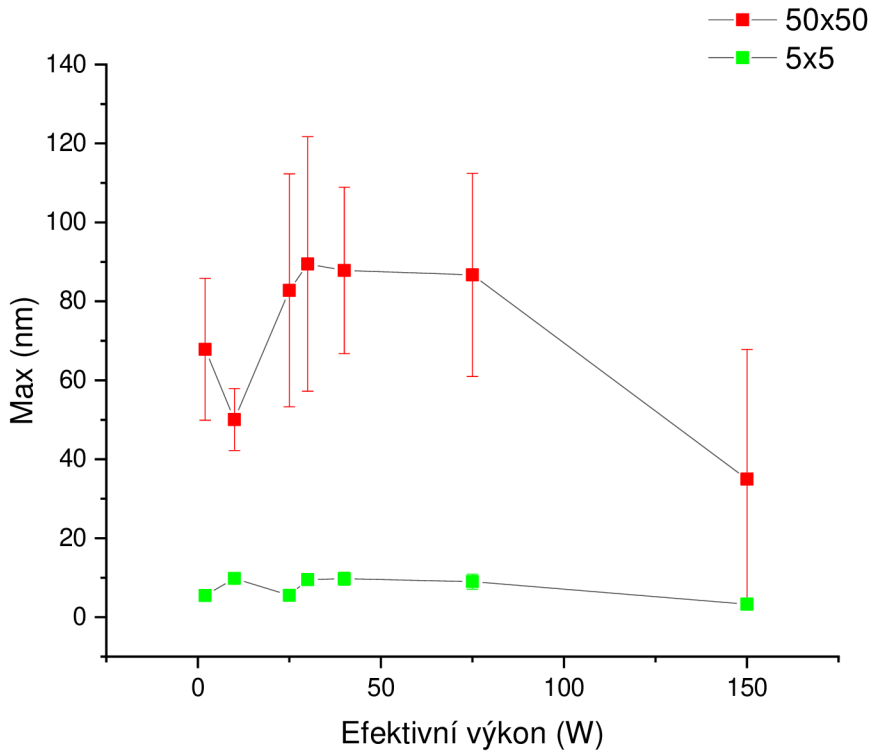
4.2.4 Závislost maxima výšky povrchu na efektivním výkonu

Závislost maxima výšky povrchu na efektivním povrchu je zobrazena na obr. 50. Maximum výšky povrchu bylo vyhodnoceno pro obě skenované plochy a všechny vzorky série. Hodnoty byly zprůměrovány z pěti snímků pro každou plochu.

Na křivce 50×50 μm^2 lze pozorovat podobné hodnoty maxima výšky pro efektivní výkon 25, 30, 40 W (v rámci směrodatné odchylky). U těchto výkonů lze na AFM snímcích pro plochu 50×50 μm^2 pozorovat výskyt lokálních větších zrn. Nejmenší hodnota maxima výšky povrchu odpovídalo efektivnímu výkonu 150 W. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 23,89 nm.

Ze závislosti na obr. 50 pro plochu 5×5 μm^2 patrné, že hodnota maxima rostla s efektivním výkonem do bodu efektivního výkonu 10 W (maximum), poté došlo k poklesu (efektivní výkon 25 W). Pro efektivní výkony 30, 40 a 75 W byly hodnoty maxima podobné (v rámci směrodatné odchylky). Minimum závislosti nastala v efektivním výkonu 150 W. Průměrná hodnota směrodatné odchylky byla 1,29 nm.

Na obr. 50 je viditelný různý průběh křivek pro obě skenované plochy. Ve struktuře povrchu 50×50 μm^2 se objevovaly lokálně větší zrna, která maximum výšky zkreslovala. Snímky plochy 5×5 μm^2 byly záměrně skenovány na místech vzorku bez výskytu větších zrn. Hodnota průměrná směrodatná odchylka pro plochu 50×50 μm^2 je vysoká (27,07 nm), z toho plyne, že hodnoty maxima výšky plochy se velmi lišily.



Obr. 50 Závislost maxima výšky povrchu na efektivním výkonu

5 ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byla provedena literární rešerše zabývající se tenkými vrstvami, jejich přípravou pomocí plazmochemické depozice z plynné fáze z organokřemičitanových prekurzorů. Část literární rešerše byla věnována mikroskopii atomárních sil jako měřící metodě použité pro analýzu povrchové morfologie.

Experimentální část předložené bakalářské práce pojednává o technologii přípravy tenkých vrstev pomocí PECVD a jejich analýze. Byla blíže popsána konkrétní depoziční aparatura, depoziční podmínky, postup přípravy vzorků a měření povrchové morfologie pomocí mikroskopie atomárních sil. Vzorky tenkých vrstev byly nadeponovány na křemičitý substrát za použití tetravinylsilanu jako monomeru a argonu sloužícího jako ochranná atmosféra. Bylo provedeno měření povrchové morfologie připravených vzorků pomocí atomární silové mikroskopie. Byly získány topografické mapy pro dvě velikosti skenovaných ploch (50×50 μm^2 a 5×5 μm^2) a z nich byla vyhodnocena RMS drsnost, průměrná drsnost povrchu R_a a maximum výšky povrchu. Dále byly získány profily povrchu analyzovaných vzorků a 3D snímky struktury profilu.

Cílem práce byla charakterizace povrchové morfologie a–CSi:H vrstev v závislosti na výkonu pro vybranou tloušťku vrstvy.

Bylo zjištěno, že drsnost povrchu se mění s efektivním výkonem tloušťkové série. RMS drsnost vycházela nejvyšší pro hodnoty efektivního výkonu 10 W (plocha 5×5 μm^2) - 0,65 nm a 40 W (plocha 50×50 μm^2) - 0,98 nm. Rozdíl v trendech byl způsobený přítomností větších zrn ve struktuře povrchu vzorků, která se vyskytovala u skenování plochy 50×50 μm^2 a zvyšovala hodnotu RMS drsnosti pro plochu 50×50 μm^2. Průměrná drsnost R_a vykazovala stejný trend pro obě křivky skenovaných ploch. Její hodnota byla nejvyšší pro vzorek o efektivním výkonu 10 W pro obě skenované plochy (0,50 nm - 5×5 μm^2 a 0,32 nm - 50×50 μm^2). Trendy křivek maxima výšky povrchu pro obě plochy se výrazně lišily. Pro plochu 50×50 μm^2 nastalo maximum v efektivním výkonu 30 W (89,49 nm) pro plochu 5×5 μm^2 vykazovalo nejvyšší hodnoty u efektivního výkonu 10 W - 9,81 nm a efektivního. Minimum nastalo shodně u obou ploch v bodě efektivního výkonu 150 W.

Z naměřených dat vyplývá, že na stanovení drsnosti měla vliv velikost skenované plochy. Při skenování větší plochy (50×50 μm^2) se ve struktuře objevovala větší zrna, která nebyla zahrnuta ve skenování menších ploch (5×5 μm^2), a zkreslovala hodnoty parametrů drsnosti. Tento jev bylo možno pozorovat i v různém průběhu křivek RMS drsností a maxima výšky pro obě skenované plochy. Naopak křivky průměrná hodnoty drsnosti, jejíž hodnoty nejsou citlivé na větší změny ve struktuře povrchu, vykazovaly stejný trend pro obě plochy a hodnota směrodatné odchylky byla pro obě plochy podobná. Přítomnost zrn u plochy 50×50 μm^2 zvýšila i její celkovou hodnotu RMS drsnosti

Nejvyšší drsnosti dosahovaly vzorky 10 W, 30 W a 40 W. Nejvyšší RMS drsnost pro plochu 5×5 μm^2 vykazoval vzorek o efektivním výkonu 10 W. Na snímku plochy 50×50 μm^2 vzorku efektivního výkonu 10 W (obr. 23) se nevyskytovala lokálně větší zrna, která by zvyšovala drsnost pro plochu 50×50 μm^2. Parametr R_a, který v tomto výkonu dosahuje

maxima, a maximum výšky plochy pro plochu 5×5 μm^2 ukazují, že povrch vzorku byl drsnější.

Vzorky o efektivním výkonu 25 a 30 W dosahovala podobných hodnot, důvodem byl malý rozdíl v hodnotách efektivního výkonu. Ve struktuře vzorku efektivního výkonu 30 W se vyskytovala lokálně větší zrna, která zvýšila hodnoty parametrů RMS drsnost, ale z hodnot maxima výšky pro plochu 5×5 μm^2 lze říci, že celkově vzorek má vyšší drsnost.

Vzorek o efektivním výkonu 40 W obsahoval ve své struktuře menší častá zrna, která byla viditelná na skenované ploše 50×50 μm^2, tak na 5×5 μm^2. Hodnota RMS drsnosti byla pro plochu 50×50 μm^2 nejvyšší, ale z průměrné drsnosti a maxima výšky povrchu lze říci, že vyšší drsnost vykazoval vzorek o efektivním výkonu 10 W.

Nejnižší drsnost vykazoval vzorek o efektivním výkonu 150 W. Nízká drsnost je zřejmá jak ze snímků obou ploch, tak z naměřených parametrů.

Topografie povrchu vrstvy zřejmě souvisí s dynamikou růstu vrstvy a mohla by tedy souviset s depoziční rychlostí. Tato idea bude předmětem dalšího výzkumu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ECKERTOVÁ, Ludmila. *Fyzika tenkých vrstev*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973. Populární přednášky o fyzice. ISBN 04-013-73.

[2] INAGAKI, N. *Plasma surface modification and plasma polymerization*. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., 1996. ISBN 15-667-6337-1.

[3] OHRING, Milton. *Materials science of thin films: deposition and structure*. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 2002. ISBN 01-252-4975-6.

[4] MARTIŠOVITŠ, Viktor. *Základy fyziky plazmy: učebný text pre magisterské štúdium*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo UK, 2006. ISBN 80-223-1983-X.

[5] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. 1. vyd. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2.

[6] Plasma sources. In: *Nano-Master, Inc.* [online]. Austin, TX: Nano.Master, Inc., 2015 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: http://www.nanomaster.com/images/deposition/pecvd/pecvd-plasma-3.jpg

[7] YASUDA, H. *Plasma polymerization*. 1. vyd. Orlando: Academic Press, 1985. ISBN 978-012-7687-605.

[8] BIEDERMAN, Hynek a Yoshihito OSADA. *Plasma polymerization processes*. 1. vyd. New York, N.Y., U.S.A.: Distributors for the U.S. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1992. ISBN 04-448-8724-5.

[9] PARK, Sung-Gyu a Shi-Woo RHEE. Plasma enhanced chemical vapor deposition of silicon oxide films with divinyldimethylsilane and tetravinylsilane. *Journal of Vacuum Science & Technology A* [online]. 2006, **24**(2), 291-295 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1116/1.2171706. ISSN 0734-2101. Dostupné z: http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.2171706

[10] MIRONOV, V.L. *Fundamentals of Scanning Probe Microscopy*. -. Novgorod: THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES INSTITUTE FOR PHYSICS OF MICROSTRUCTURES, 2004. ISBN -.

[11] KUBÍNEK, Roman, Milan VŮJTEK a Miroslav MAŠLÁŇ. *Mikroskopie skenující sondou*. Vyd. 1. Olomouc: Univerzita Palackého, 2003. ISBN 80-244-0602-0.

[12] ALBRECHT, T. R., S. AKAMINE, T. E. CARVER a C. F. QUATE. Microfabrication of cantilever styli for the atomic force microscope. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films* [online]. 1990, **8**(4), 3386-3396 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1116/1.576520. ISSN 0734-2101. Dostupné z: http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.576520

[13] CHEUNG, C. L., J. H. HAFNER a C. M. LIEBER. Carbon nanotube atomic force microscopy tips: Direct growth by chemical vapor deposition and application to high-resolution imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000, **97**(8), 3809-3813. DOI: 10.1073/pnas.050498597. ISSN 0027-8424. Dostupné také z: http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.050498597

[14] YENILMEZ, Erhan, Qian WANG, Robert J. CHEN, Dunwei WANG a Hongjie DAI. Wafer scale production of carbon nanotube scanning probe tips for atomic force microscopy. *Applied Physics Letters* [online]. 2002, **80**(12), 2225-2227 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1063/1.1464227. ISSN 0003-6951. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1464227

[15] DE OLIVEIRA, R.R.L, D.A.C ALBUQUERQUE, T.G.S. CRUZ, F.M. YAMAJI a F.L. LEITE, Dr. Victor BELLITTO, ed. *Measurement of the Nanoscale Roughness by Atomic Force Microscopy: Bas ic Principles and Applications, Atomic Force Microscopy - Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. -. -: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0414-8.

[16] GOŁEK, F., P. MAZUR, Z. RYSZKA a S. ZUBER. AFM image artifacts. *Applied Surface Science* [online]. 2014, **304**, 11-19 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.01.149. ISSN 01694332. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433214002013

[17] MARKIEWICZ, Peter. *Simulation of atomic force microscope tip–sample/sample–tip reconstruction* [online]. b.r., **13**(3) [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1116/1.587913. ISSN 0734211X. Dostupné z: http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvstb/13/3/10.1116/1.587913

[18] CHEN, Yong. Elucidation and Identification of Double-Tip Effects in Atomic Force Microscopy Studies of Biological Structures. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* [online]. 2012, **02**(03), 238-247 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.4236/jsemat.2012.223037. ISSN 2161-4881. Dostupné z http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jsemat.2012.223037

[19] CHEN, Yong, Jiye CAI, Meili LIU, Gucheng ZENG, Qian FENG a Zhengwei CHEN. Research on double-probe, double- and triple-tip effects during atomic force microscopy scanning. *Scanning* [online]. 2004, **26**(4), 155-161 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1002/sca.4950260402. ISSN 01610457. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/sca.4950260402

[20] *ČSN ISO 10878 - Nedestruktivní zkoušení – Infračervená termografie – Slovník*. . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[21] D'ACUNTO, M. a O. SALVETTI. Pattern recognition methods for thermal drift correction in Atomic Force Microscopy imaging. *Pattern Recognition and Image Analysis* [online]. 2011, **21**(1), 9-19 [cit. 2019-03-19].

DOI: 10.1134/S1054661811010056. ISSN 1054-6618. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1134/S1054661811010056

[22] KASSIES, Roel, Kees O. VAN DER WERF, Martin L. BENNINK a Cees OTTO. Removing interference and optical feedback artifacts in atomic force microscopy measurements by application of high frequency laser current modulation. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2004, **75**(3), 689-693 [cit. 2019-03-19]. DOI: 10.1063/1.1646767. ISSN 0034-6748. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1646767

[23] GADELMAWLA, E.S., M.M. KOURA, T.M.A. MAKSOUD, I.M. ELEWA a H.H. SOLIMAN. Roughness Parameters. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, **123**(1). DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2. ISSN 09240136.

[24] CECH, Vladimir. Plasma-polymerized organosilicones as engineered interlayers in glass fiber/polyester composites. *Composite Interfaces* [online]. 2012, **14**(4), 321-334 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.1163/156855407780452850. ISSN 0927-6440. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1163/156855407780452850

[25] General Information. *NT-MDT Spectrum Instruments* [online]. Zelenograd, 2012 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.ntmdt-tips.com/text/general-information

[26] MAGONOV, Dr. Sergei N. a Dr. Myung-Hwan WHANGBO. *Surface Analysis with STM and AFM: Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis*. 1. Weinheim, SRN: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995. ISBN 9783527293131.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AFM	Mikroskopie atomárních sil
ATS	Skenovací tunelovací spektroskopie
a:SiC	Organosilikátové prekurzory
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
HMDSO	Hexamethyldisiloxan
FS	Zpětná vazba
PECVD	Plazmochemická depozice z plynné fáze
P_{ef}	Efektivní výkon
RMS	Střední kvadratický průměr
R_a	Průměrná drsnost
Sccm	Standardní kubický centimetr za minutu
SPM	Mikroskopie skenující sondou
TEOS	Tetraetoxysilan
TVS	Tetravinylsilan