

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ ELEKTRONIKY

a

Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.



**Reliéfní struktury připravené pomocí
elektronové litografie**

Disertační práce

Michal Urbánek

Školitel: doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D. BRNO 2012

Tato práce byla vypracována na

Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

pod vedením

doc. Ing. Vladimíra Kolaříka, Ph.D.

Bibliografický záznam

Autor	Mgr. Michal Urbánek Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav fyzikální elektroniky
Název dizertační práce	Reliéfní struktury připravené pomocí elektronové litografie
Studijní program	Fyzika
Studijní obor	Fyzika plazmatu
Školitel	doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.
Rok obhajoby	2012
Klíčová slova	elektronová litografie, reliéfní struktury, jev blízkosti, AFM, nanolitografie

Bibliographic entry

Author	Mgr. Michal Urbanek Faculty of Science, Masaryk University Department of physical electronic
Title of dissertation	Relief structures prepared by electron beam lithography
Degree programme	Physics
Field of study	Plasmaphysics
Supervisor	doc. Ing. Vladimir Kolarik, Ph.D.
Year of defence	2012
Keywords	e-beam lithography, relief structures, proximity effect, AFM, nanolithography

Thomas Tracy měl tygra.

Poděkování

Tímto chci vyjádřit poděkování doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D., pod jehož vedením byla tato práce zpracována, svým kolegům z Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. v Brně jmenovitě Miroslavu Horáčkovi, Stanislavu Královi, Stanislavu Krátkému, Františku Matějkovi, Milanu Matějkovi a své rodině za neustálou podporu. Lucy.

Tato práce vznikla za podpory projektů TIP FR TI1/574, TIP FR TI1/576 (MPO ČR), ALISI (CZ.1.05/2.1.00/01.0017) a projektu GAČR č. 102/05/2325.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracoval sám a pouze s použitím uvedené literatury.

.....

Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na litografické techniky v mikronovém a sub mikronovém rozlišení. Zaměřuje se na technologii elektronové litografie, technologii zápisu do polymerních materiálů (elektronových rezistů), následných procesů zpracování expozice, včetně vyvolání rezistu mokrou cestou.

K vyhodnocení struktur připravených zápisem elektronovým svazkem se nejčastěji používá skenování reliéfu pomocí mikroskopu atomárních sil (AFM). Tento způsob vyhodnocení umožňuje mezioperační kontrolu, která není běžně možná s pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Této metodě je věnována druhá kapitola práce.

V další části se práce soustřeďuje na rozptyl elektronů při interakci s pevnou fází (neboli jev blízkosti), který může významně ovlivnit rozlišení struktur zapisovaných elektronovým svazkem. Pochopení a popis tohoto jevu vede k vývoji metod umožňujících omezit vliv tohoto jevu na kvalitu a rozlišení realizovaných struktur. V této kapitole jsou popsány navržené expoziční testy a jejich vyhodnocení pomocí mikroskopických snímků AFM, SEM, optického mikroskopu (OM) a konfokálního mikroskopu (CLSM), které měly posloužit ke zjištění jednotlivých parametrů modelu rozptylové funkce. Z těchto navržených testů se podařilo zjistit pouze parametr dopředného rozptylu.

V poslední části se práce věnuje popisu nanolitografických technik s pomocí AFM, zejména pak metodě přímého rytí do polymerních materiálů, které zůstávalo stranou hlavního zájmu předchozích výzkumů. Jsou zde shrnuty výsledky zápisu do různých typů rezistů jak v kontaktním, tak i nekontaktním režimu AFM, a dále s použitím různých hrotů (hroty s Diamond-like carbon (DLC) vrstvou a křemíkové hroty).

Abstract

This work deals with lithographic techniques in micron and sub micron resolution. In the first part, the spotlight is focused on e-beam lithography, exposure technology, processing after exposure and resist development.

The most useful method used for evaluation of relief structures is atomic force microscopy (AFM), because in contrast with scanning electron microscopy we are able to evaluate the structures in between individual technological steps with AFM. This method is described in the second part.

The third part is focused on scattering during the interaction with solid state (proximity effect), which can significantly influence pattern resolution. Understanding of proximity effect leads to development of methods, that can reduce the influence of proximity effect on realized structures' resolution and quality. In this part I describe suggested testing patterns and their microscopy methods evaluation (AFM, SEM, OM, CLSM). Described testing pattern should have served as determination of scattering function parameters. Nevertheless, it was possible to determine only forward scattering parameter.

In the last part, mainly nanoscratching into soft polymer materials and own AFM nanolithography techniques are described. Achieved results of nanoscratching in contact and close contact AFM mode with use of various tips (Diamond-like Carbon (DLC) coated tips and silicon tips) are discussed.

Obsah

Úvod	1
1 Elektronová litografie a litograf Tesla BS600	2
1.1 Úvod	2
1.2 Elektronový litograf Tesla BS600	2
1.2.1 Elektronově optická soustava	5
1.3 Technologie zpracování rezistů	5
1.3.1 Příprava podložky	6
1.3.2 Nanášení rezistu	6
1.3.3 Sušení rezistu (pre bake)	8
1.3.4 Expozice elektronovým svazkem	8
1.3.5 Vyvolání latentního obrazu	8
1.3.6 Vytvrzení rezistu	10
1.4 Rezisty	13
1.4.1 Pozitivní rezist	13
1.4.2 Negativní rezist	13
2 Metoda AFM	15
2.1 Historie	15
2.2 Konstrukce mikroskopu AFM	16
2.2.1 Skener	16
2.2.2 Hrot a nosník (cantilever)	17
2.2.3 Detektor	17
2.2.4 Řídící elektronika	19
2.2.5 Optický mikroskop	19
2.3 Působící síly	20
2.3.1 Měřící režimy AFM	20
2.4 Software	22
2.4.1 Měřící software - SPM Cockpit	22
2.4.2 Vyhodnocovací software - NanoRule	23

2.5	Příprava struktur na pozorování jejich kolmého řezu SEM	24
3	Jev blízkosti (proximity effect)	28
3.1	Úvod	28
3.2	Jev rozptylu elektronů v pevné fázi	28
3.2.1	Dopředný rozptyl	28
3.2.2	Rozptyl zpětně odražených elektronů	29
3.2.3	Model a parametry	29
3.3	Způsoby ošetření rozptylu elektronů	30
3.3.1	Urychlovací napětí	31
3.3.2	Tloušťka rezistu	31
3.3.3	Vícevrstvé rezisty	31
3.3.4	SW korekce expozičních dat	31
3.4	Expoziční testy k určení rozptylové funkce	31
3.4.1	Vyhodnocení testu pomocí AFM	33
3.4.2	Vyhodnocení testu konfokálním mikroskopem (CLSM)	34
3.4.3	Vyhodnocení testu optickým mikroskopem	34
3.4.4	Vyhodnocení testu pomocí SEM	35
3.4.5	Další úpravy expozičního testu	36
3.4.6	Korekce expozice pomocí softwaru	45
4	SPL (scanning probe lithography)	50
4.1	Lokální anodická oxidace (LAO)	50
4.2	Expozice rezistu citlivého na elektrony	52
4.3	Metoda DPN (dip pen nanolithography)	53
4.4	Přímé rytí hrotem do materiálu	55
4.5	Přímé rytí hrotem do materiálu - výsledky	59
4.5.1	Experiment	59
4.5.2	Razítka připravená v kontaktním režimu	59
4.5.3	Čáry v kontaktním a pokleповém režimu	61
4.5.4	Standardní a DLC hroty	62
4.5.5	Shrnutí	63

Závěr	65
Seznam publikační činnosti	67
Seznam použité literatury	70
Seznam obrázků	78
Příloha A	79
Příloha B	80
Příloha C	82

Úvod

Dizertační práce se zabývá problematikou přípravy reliéfních struktur pomocí elektronové litografie a metodami jejich následného vyhodnocení během dalšího technologického procesu. Zejména je kladen důraz na vyhodnocování exponovaných struktur metodou mikroskopie atomárních sil (AFM). Znalost hloubky a reliéfu je velmi důležitá pro další zpracování a pochopení jevů probíhajících během expozice a vede pak k odstraňování nežádoucích jevů během technologického procesu přípravy struktur, který využívá zápisu elektronového svazku.

V další části se dizertační práce věnuje problematice jevu blízkosti (proximity effect - PE), ke kterému dochází v důsledku rozptylu elektronového svazku v rezistu a v substrátu a jež má za následek snížení rozlišení a změnu požadovaných rozměrů exponovaných struktur vzhledem k jejich zamýšleným rozměrům. V této části byly uskutečněny expozice s testy navrženými pro získání jednotlivých parametrů v modelu jevu blízkosti a znalost těchto parametrů bude zahrnuta do expozičního programu, tak aby vliv jevu blízkosti byl minimalizován. Do další části dizertační práce je zahrnuto studium metody přípravy struktur v rozlišení pod 100 nm pomocí nanolitografie AFM využívajícího přímé rytí hrotem, která by mohla sloužit jako doplňující k elektronové litografii pro zápis doprovodných značek ve vysokém rozlišení.

Cíle dizertační práce

- studium reliéfních struktur metodou AFM, vyhodnocení period, hloubek a reliéfů navržených struktur
- studium jevu blízkosti při expozici tvarovaným elektronovým svazkem s urychlovacím napětím 15 kV
- návrh testovacích struktur, které budou sloužit k určení parametrů jevu blízkosti
- nalezení vhodných metod pro vyhodnocení struktur připravených elektronovou litografií
- příprava struktur v sub 100 nm rozlišení metodou přímého rytí pomocí AFM

1 Elektronová litografie a litograf Tesla BS600

1.1 Úvod

Metoda elektronové litografie využívající koncepce zápisu elektronovým svazkem se začala používat koncem 60. let 20. století, kdy první experimenty probíhaly na zařízeních vzniklých úpravou rastrovacích elektronových mikroskopů. Následným objevem polymeru PMMA (polymethyl methakrylát) se začala rozvíjet technologie elektronových rezistů [1]. PMMA až dodnes zůstává nejčastěji používaným rezistem, do něhož se realizuje většina expozic elektronovým svazkem. Zápis elektronovým svazkem v současnosti využívá především dva z možných tvarů svazků:

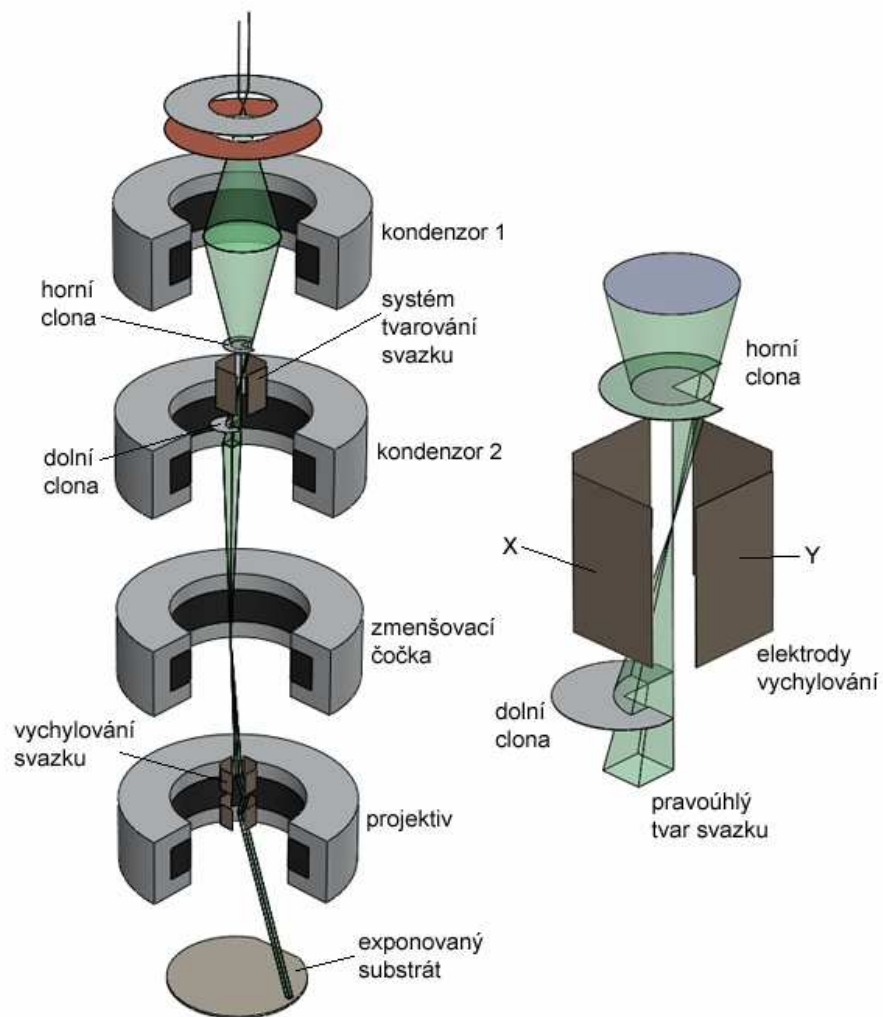
1. litograf s bodovým svazkem (Gaussovský svazek)
2. litograf s tvarovaným svazkem

Elektronový litograf s Gaussovským rozložením energie elektronů ve svazku využívá zápisu na principu rastrování svazkem jako klasická vakuová obrazovka s katodovou trubicí či metody rastrovací elektronové mikroskopie (SEM, TEM). Teoretický průměr svazku dosahuje 2 nm.

Během 80. let 20. století docházelo v důsledku požadavků polovodičového průmyslu na rychlost expozice a velikost masek při výrobě integrovaných obvodů (VLSI, ULSI) k nahrazování Gaussovského svazku tvarovaným svazkem (Variable Shaped Beam - VSB). Jako zdroj elektronů se v obou typech litografů používá katoda z wolframu, ale systém s tvarovaným svazkem má na rozdíl od litografu s bodovým svazkem navíc soustavu clon, která umožňuje tvarování svazku. Taková strategie zápisu pak vede ke zrychlení zápisu (zápis na větší plochu během jedné expozice) a vektorový způsob zápisu umožňuje libovolnou výchylku svazku.

1.2 Elektronový litograf Tesla BS600

Elektronový litograf Tesla BS600 byl vyvinut během 80. let 20. století na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Tento systém pracuje s rozměrově proměnným



Obrázek 1: Schéma optické soustavy litografu Tesla BS 600 a tvarovacího systému [3].

pravoúhlým a vektorově rozmítaným svazkem. Technické parametry litografu jsou následující:

	výchozí (rok 1988)	aktuální (rok 2011)
zdroj elektronů	autoemisní TFE katoda W [100] + ZrO _x (T ~ 1800 K)	autoemisní TFE katoda W [100] + ZrO _x (T ~ 1800 K)
urychlovací napětí	15 kV	15 kV
tvar svazku	pravoúhlý	pravoúhlý
rozměr svazku	(0,1 až 6,3 μm) s krokem 100 nm	ST ¹ : (0,1 až 6,3 μm) s krokem 50 nm TZ ¹ : (0,017 až 3,1 μm) s krokem 17 nm
velikost vychylovacího pole	max. 3,2767 mm v osách X a Y	ST : 3,000 mm TZ : 2,000 mm
krok vychylování	100 nm	50 nm
souřadnicový stůl	100 x 100 mm, až 4" substrát odměřování pozice pomocí interferometrie (He-Ne laserem) λ = 633 nm krok λ/16 ≈ 39,6 nm	100 x 100 mm až 4" substrát odměřování pozice pomocí interferometrie (He-Ne laserem) λ = 633 nm krok λ/512 ≈ 1,2 nm
způsob zápisu	vektorový	vektorový

¹**ST** - standartní režim, **TZ** - režim litografu s expozicí zmenšeným a otočeným razítkem o 45° [U11]

1.2.1 Elektronově optická soustava

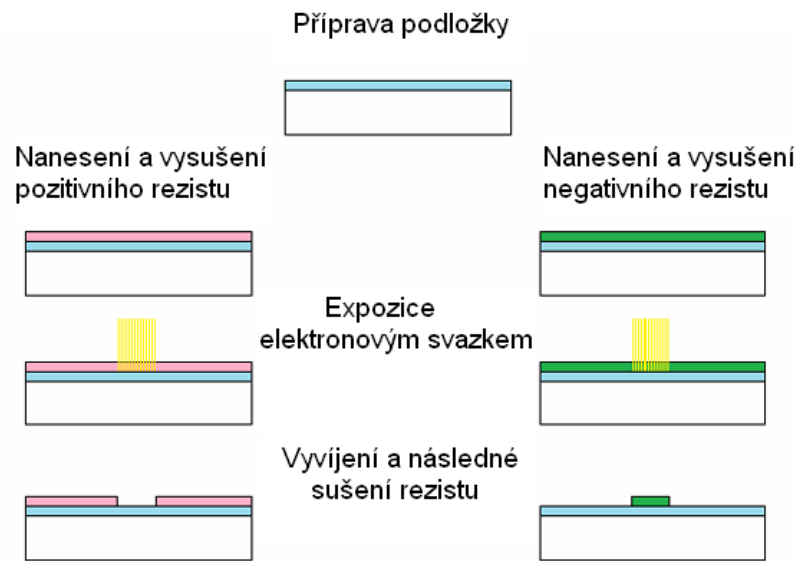
Elektronově optická soustava se skládá z elektronové trysky a čtyř elektromagnetických čoček (viz obrázek 1). Elektronový svazek ze zdroje je promítnut kondenzorem 1 mezi formovací clony, které umožňují formování svazku jeho vychylováním ve dvou na sebe kolmých směrech, tento systém slouží současně k zatemnění elektronového svazku. Kondenzorem 2 je svazek promítnut do ohniska zmenšovací čočky, následně se svazek projektivem promítne do roviny substrátu a vychylovací soustava zajistí vychýlení svazku na požadované místo na substrátu. Popis dalších částí expoziční aparatury je možné nalézt v [2].

1.3 Technologie zpracování rezistů

V předchozích odstavcích je pojednáno o záznamovém zařízení, které pracuje na principu zápisu elektronovým svazkem. Text v následujících odstavcích bude věnován technologii zpracování materiálů citlivých na elektronový svazek (elektronových rezistů), které umožňují zápis elektronovým svazkem.

Proces zpracování rezistů lze shrnout do kroků popsaných obrázkem (obrázek 2).

1. příprava podložky
2. nanášení rezistu
3. sušení
4. expozice elektronovým svazkem
5. vyvolání latentního obrazu
6. vytvrzení rezistu



Obrázek 2: Schéma jednotlivých kroků při zpracování rezistu

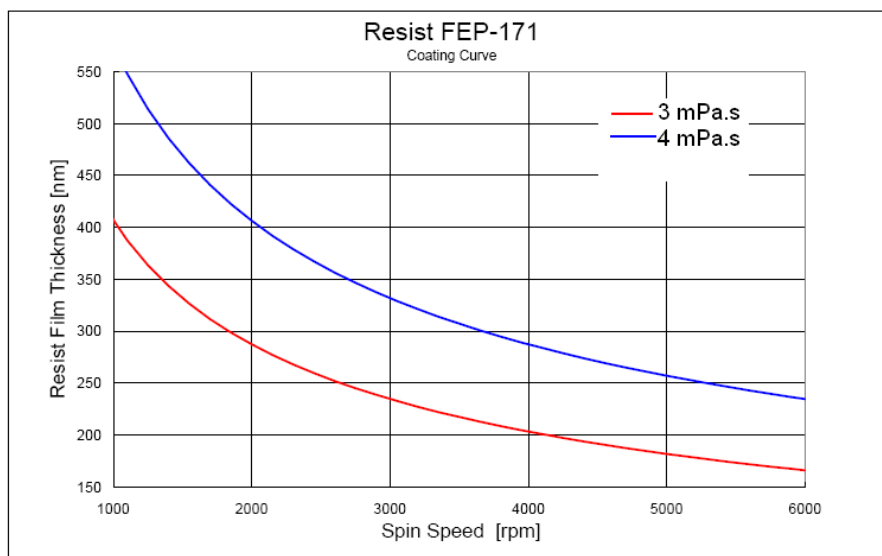
1.3.1 Příprava podložky

Podložka (Si podložka, skleněná deska) pro nanášení rezistu se před samotným nanášením musí zbavit nečistot. Povrch podložky lze ošetřit následujícím způsobem:

1. čištění chemickou cestou - nejprve se podložka na odstředivce umyje roztokem detergentu, následně se oplachuje deionizovanou vodou a potom následuje oplach čistým isopropylalkoholem, aby se odstranila z povrchu voda
2. kombinace plazmatu a chemické cesty (pro případ nanášení rezistu na Si salánek) - zbytky organických nečistot lze spálit v kyslíkovém plazmatu, následně již postačuje desku opláchnout deionizovanou vodou a osušit infračerveným zářením.

1.3.2 Nanášení rezistu

V úvodu bylo řečeno, že elektronový rezist je materiál citlivý na svazek elektronů. Většinou se jedná o polymerní materiál. Elektronové rezisty lze v zásadě rozdělit



Obrázek 3: Závislost tloušťky naneseného rezistu FEP-171 na otáčkách odstředivky pro jeho různé viskozity [6].

na dva typy podle toho, jak se mění jejich vlastnosti v interakci se svazkem elektronů. Jejich popis je uveden v následující sekci 1.4.

K nanášení rezistu se používá metoda odstředivého lití (spin coating), kdy se nakape několik kapek rezistu na podložku a roztočením podložky na vyšší otáčky (1000 - 10000 rpm²) dojde k nanesení homogenní vrstvy rezistu. Výsledná tloušťka naneseného rezistu je pak dána vztahem [5]:

$$w = \frac{k_n c^2}{\sqrt{\omega}} \quad (1)$$

w - výsledná tloušťka rezistu [nm]

k_n - konstanta zahrnující viskozitu a parametry odstředivky

c - koncentrace roztoku [hmotnostní %]

ω - otáčky odstředivky [rpm]

²z anglického revolutions per minute = otáčky za minutu

1.3.3 Sušení rezistu (pre bake)

Po nanesení rezistu na podložku odstředivým litím je potřeba před samotnou expozicí vysušit takto připravený rezist a zbavit jej zbytků rozpouštědla. Sušení lze provádět buď v peci anebo na vyhřáté podložce (tzv. Hot plate sušení). Doba sušení rezistu je obecně doporučena výrobcem tak, aby nedošlo k vytvrzení rezistu.

1.3.4 Expozice elektronovým svazkem

K expozici elektronovým svazkem se využívá elektronového litografu. V našem případě se jedná o zařízení TESLA BS600, popsané v sekci 1.2. Teoretické rozlišení litografu závisí na vlnové délce elektronů a tedy na energii elektronů. Pro použité urychlovací napětí 15 kV je přibližně vlnová délka elektronů 10 pm (ze vztahu 2) a dá se dosáhnout velmi dobrého rozlišení zápisu, které je především ovlivněno dopředným rozptylem elektronů (pro větší urychlovací napětí se dopředný rozptyl svazku zmenšuje, viz obrázek 4) a jevem blízkosti (podrobnější popis tohoto jevu v kapitole 3).

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU}} \quad (2)$$

h - Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)

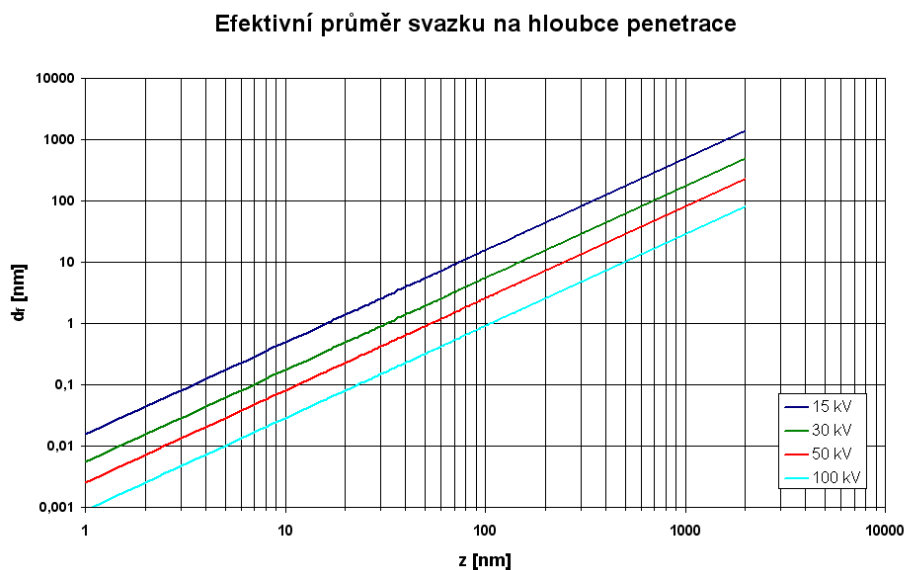
m_0 - hmotnost elektronu ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg)

e - náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

U - urychlovací napětí (15 kV)

1.3.5 Vyvolání latentního obrazu

Po expozici požadovaných dat do vrstvy rezistu následuje krok vyvolání a tím pádem i vytvoření požadovaného tvaru ve vrstvě polymeru. K vyvolávání se používá vývojka, jejíž složení se pro různé rezisty (i různé technologické procesy) může lišit. Pro nejčastěji používaný rezist PMMA se jako vývojka používá methylisobuthylketon (MIBK) nebo jeho směs s isopropylalkoholem (IPA) v různých koncentracích



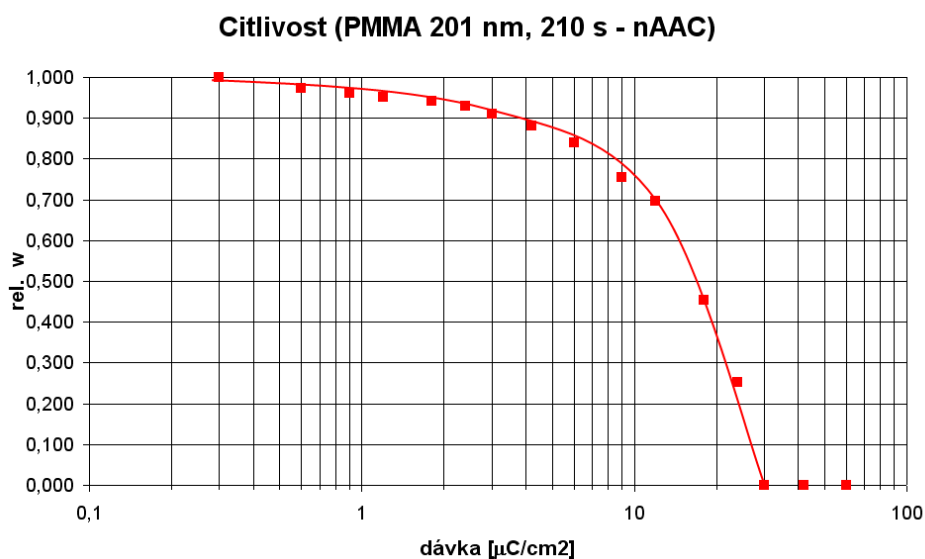
Obrázek 4: Efektivní průměr svazku v závislosti na penetrační hloubce.

pro dosažení požadovaného rozlišení a kontrastu. Například dle doporučení výrobce MicroChem [7]:

- MIBK:IPA 1:1 - vysoké rozlišení, vysoká citlivost
- MIBK:IPA 1:2 - vyšší rozlišení, střední citlivost
- MIBK:IPA 1:3 - velmi vysoké rozlišení, nízká citlivost
- MIBK - nízké rozlišení

Výsledný tvar vzniklý ve vrstvě rezistu neovlivňuje jen použitá vývojka, ale velmi důležitou roli ovlivňující rychlost vyvolávání hraje teplota. Proto je potřeba zajistit stálou teplotu pro dosažení reprodukovatelného vyvolávání. Po dokončení vyvolání je nutné odstranit zbytky použité vývojky a to buď tzv. stopperem a následným odstředěním nebo pouhým odstředěním vývojky na odstředivce.

K určení citlivosti rezistu pro daný systém rezist - vývojka za určité teploty slouží expoziční test citlivosti (viz obrázek 6). Tento test je určen k vyhodnocení úbytku rezistu v závislosti na expoziční dávce na profilometru. Hodnoty relativních



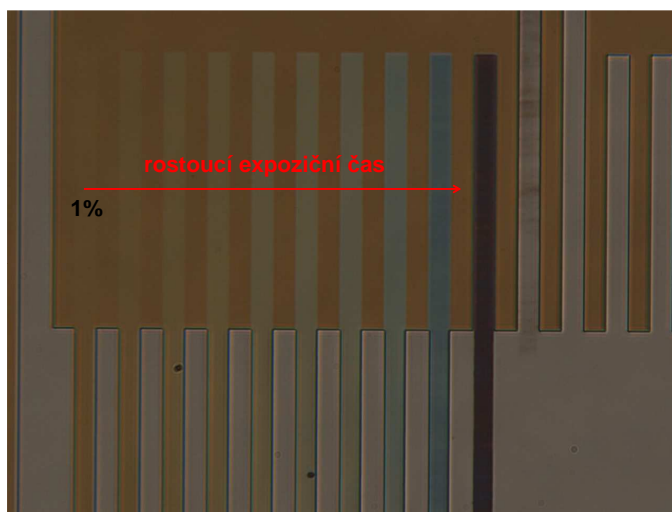
Obrázek 5: Křivka citlivosti rezistu PMMA 950k MW ($30 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$) - tloušťka 201 nm, vývojka n-amylacetát, doba vyvolávání 210 sekund, $T = 22^\circ\text{C}$.

expozičních časů jsou nastaveny následovně: 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 14 %, 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, 140 %, 200 % (zvětšující se dávka ve směru šipky viz obrázek 6). Protože rozměry tohoto testu jsou nevhodné k jeho vyhodnocení pomocí AFM, navrhl jsem test citlivosti se stejným nastavením relativních časů, který bude určen k měření na AFM (viz obrázek 7). Vyhodnocení obou testů je provedeno v obrázku 8. Z tohoto grafu byla určena citlivost rezistu PMMA 950k MW³ s tloušťkou 179 nm jako $14 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Kontrast rezistu vychází 1,8 z testu pro AFM a 1,5 z měření na profilometru. Oba dva testy jsou v dobré shodě a mohou být použity k určení citlivosti rezistu.

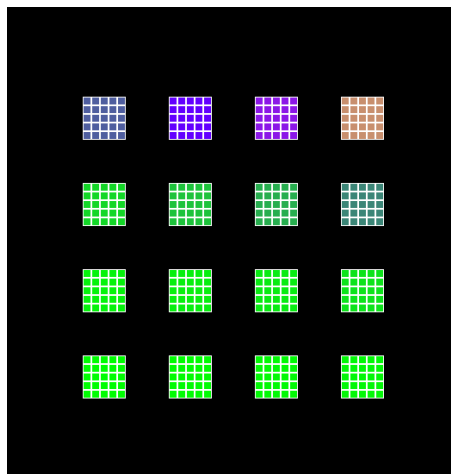
1.3.6 Vytvrzení rezistu

Po fázi vyvolání přichází na řadu konečné sušení (někdy též označováno jako "hard bake"), aby bylo dosaženo vytvrzení rezistu pro jeho lepší odolnost. K vytvrzení rezistu lze opět využít pec nebo vytvrzení na vyhřívané desce ("Hot

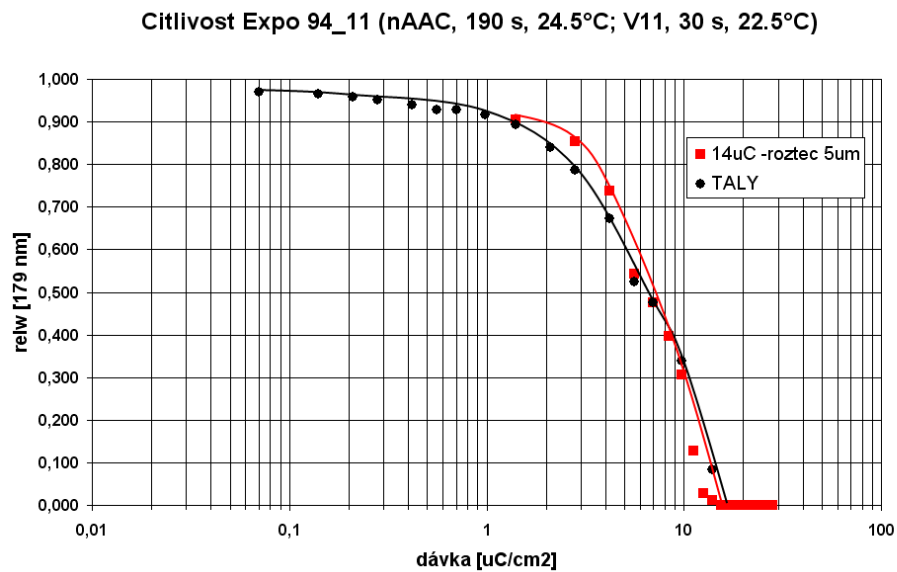
³950k MW - molekulární hmotnost 950 000



Obrázek 6: Test citlivosti rezistu určený k měření profilometrem.



Obrázek 7: Test citlivosti určený k měření pomocí AFM



Obrázek 8: Srovnání citlivosti PMMA 950k MW změřené na testu určeném pro AFM a testu určeném na měření profilometrem.

Plate”). Stejně jako u předchozího sušení jsou časy sušení doporučené výrobcem rezistů.

Příklad zpracování rezistu PMMA 950k MW, $w = 200 \text{ nm}$

- ošetření Si waferu HMDS⁴, odstředit při 5000 rpm
- nanesení PMMA (950k MW 6%hm v anisolu) - odstředivé lití 9000 rpm
- sušení - Hot Plate 150°C, 9 minut
- expozice - dávka 100 až 200 μs (při proudové hustotě 0,2 $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
- vyvolání - 210 sekund vývojkou n-amylacetát při $T = 22^\circ\text{C}$ (viz obrázek 5)
- sušení - Hot Plate 100°C, 1 minuta

⁴HMDS - hexamethyldisilazan

1.4 Rezisty

1.4.1 Pozitivní rezist

Po ozáření elektronovým svazkem dojde k narušení vazeb polymeru a požadovaný zápis vznikne v místech, kam dopadal elektronový svazek

Vlivem ozáření pozitivního rezistu vznikají fragmenty s nižšími molárními hmotnostmi, průměrnou molární hmotnost fragmentů vyjadřuje vztah [5]:

$$M_f = \frac{M_n}{1 + \left(G_{(S)} M_n \frac{E_a}{\rho} N_A \right)}, \quad (3)$$

M_f - průměrná molární hmotnost fragmentů po ozáření [g.mol⁻¹]

M_n - numericky průměrná molární hmotnost výchozího polymeru [g.mol⁻¹]

$G_{(S)}$ - degradační účinnost polymeru [počet případů/ 100 eV]

E_a - hustota absorbované energie [eV]

ρ - hustota výchozího polymeru [g.cm⁻³]

N_A - Avogadrova konstanta [mol⁻¹]

1.4.2 Negativní rezist

U tohoto typu rezistů dochází k síťovacím procesům, kde na ozářených místech dojde k nárůstu průměrné molární hmotnosti, která je dána vztahem [5]:

$$M_w = \frac{K^*}{Q} G_x, \quad (4)$$

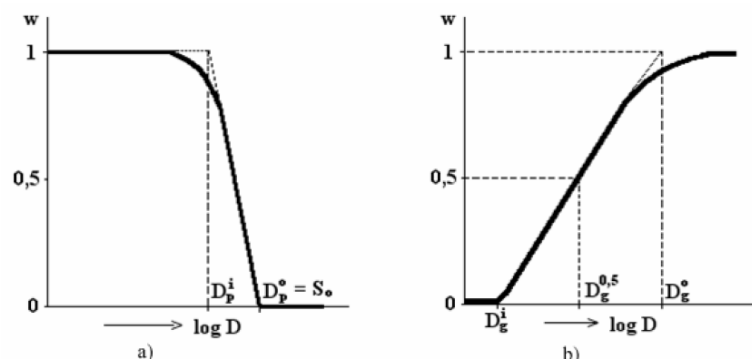
M_w - průměrná molární hmotnost sesíťovaných míst [g.mol⁻¹]

K_* - konstanta pro daný rezist

Q - dávka ozáření [C.cm⁻²]

$G_{(X)}$ - síťovací účinnost [počet případů/100 eV]

Důležitou vlastností rezistu je jeho citlivost, tedy dávka [$\mu\text{C.cm}^{-2}$], která je nutná buď k narušení vazeb nebo sesíťování. Citlivost rezistu se určuje experimen-



Obrázek 9: Křivky citlivostí pro a) pozitivní rezist, b) negativní rezist [5].

tálně jako závislost relativních hloubek na expoziční dávce pro daný typ rezistu (viz obrázek 9).

Z křivek citlivosti rezistu lze pak stanovit kontrast rezistu (kontrast je definován jako absolutní hodnota číselného vyjádření směrnice ke křivce citlivosti v její lineární oblasti) , veličinu vyjadřující rychlost reakce rezistu na změnu dávky, která má vliv na dosažené rozlišení motivu. Hodnota kontrastu se určuje pro pozitivní rezist dle vztahu [5]:

$$\gamma = \left| \frac{1}{\log \left(\frac{D_p^i}{D_p^o} \right)} \right| \quad (5)$$

a pro negativní rezist [5]:

$$\gamma = \left| \frac{1}{\log \left(\frac{D_g^o}{D_g^i} \right)} \right| \quad (6)$$

Za dobrý kontrast u pozitivních rezistů se považuje hodnota γ kolem 3 a hodnota γ přes 5 je již označována za velmi vysoký kontrast. U negativních rezistů se hodnoty kontrastu pohybují okolo 1.

2 Metoda AFM

Difraktivní struktury připravované v laboratoři mikrolitografie Ústavu přístrojové techniky jsou realizovány s různou periodou, hloubkou [U12]. Periody těchto struktur bývají většinou dobře definovány, a proto nás zajímá především reliéf a hloubka, které ovlivňují výsledné vlastnosti difraktivních struktur. K určení výše zmiňovaných parametrů struktur nám slouží metoda AFM (mikroskopie atomárních sil - z angl. Atomic Force Microscopy), která nám poskytuje informace o hloubce a tvaru reliéfu. Výhoda této metody spočívá také v tom, že umožňuje mezioperační kontrolu (kontrolu holubky a reliéfu mezi jednotlivými vyvoláními, kde SEM⁵ nelze použít (nežádoucí expozice citlivého rezistu elektronovým svazkem). Na rozdíl od elektronové rastrovací mikroskopie poskytuje AFM 3D rekonstrukci povrchu.

2.1 Historie

Počátkem 80. let 20. století vynalezli G. Binnig a H. Rohrer STM (scanning tunneling microscopy) [10, 11] a dali tak nahlédnout do nanosvěta předpovídaného R. P. Feynmanem. V roce 1986 byli za tento objev oceněni Nobelovou cenou [12]. Z metody tunelovací mikroskopie (STM) pak byly odvozeny další metody mikroskopie rastrující sondou (SPM). Jednou z těchto metod je metoda AFM, která je založena na detekci meziatomárních sil mezi povrchem a rastrujícím hrotem. Tento hrot, připevněný na ohebném raménku skenuje povrch vzorku. Měřením ohybu raménka, ke kterému dochází působením meziatomární síly mezi povrchem a hrotem, se sestaví obraz povrchu (topografie). Výhodou AFM vůči STM je, že lze měřit vzorky umístěné v libovolném prostředí - vakuum, vzduch, kapalina. Odpadá také požadavek na vodivost vzorku, proto lze metodou AFM zkoumat povrchy různých materiálů od vodivých až po izolanty (často zkoumané jsou povrchy polymerů [13, 14, 15, 16] a biomolekul [17, 18, 19]). Následující 2 sekce obsahují detailnější informace o hlavních částech mikroskopu AFM a jeho měřících módech.

⁵rastrovací elektronová mikroskopie; v češtině se používá i zkratka REM

Obrázek 10: AFM mikroskop Nano-RTM

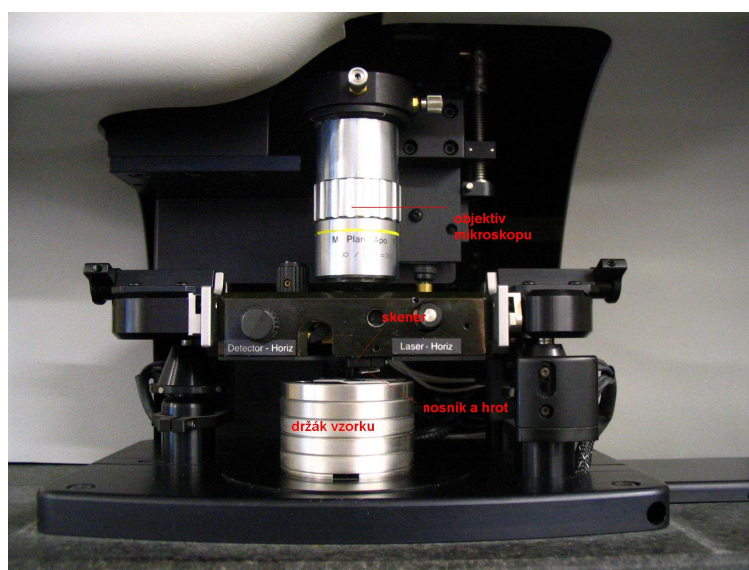
2.2 Konstrukce mikroskopu AFM

2.2.1 Skener

Skenování AFM mikroskopu je možné dvěma následujícími způsoby:

- skenování hrotem - vzorek zůstává ve stálé pozici a hrot se pohybuje po povrchu vzorku (toto uspořádání je použito v konstrukci mikroskopu Nano - RTM používaného na Ústavu přístrojové techniky - viz obrázek 4)
- skenování vzorkem - hrot během měření zůstává ve stálé pozici a pohybuje se vzorkem

Skener, který je konstruován z piezokeramik měnících svůj objem podle přiváděného napětí (nejčastěji používaným materiálem PZT [22]), má za úkol velmi přesné polohování hrotu nad povrchem ve všech třech osách X, Y, Z. Rozsah pohybu v Z-ové ose bývá okolo 10 μm s rozlišením 0,1 nm. V osách X a Y skener umožňuje pohyb (rastrování) v rozsazích do 150 μm . K hrubému posuvu hrotu nad povrchem a přiblížování vzorku k povrchu slouží motorčky s mikrometrickým posuvem (obrázek 11).



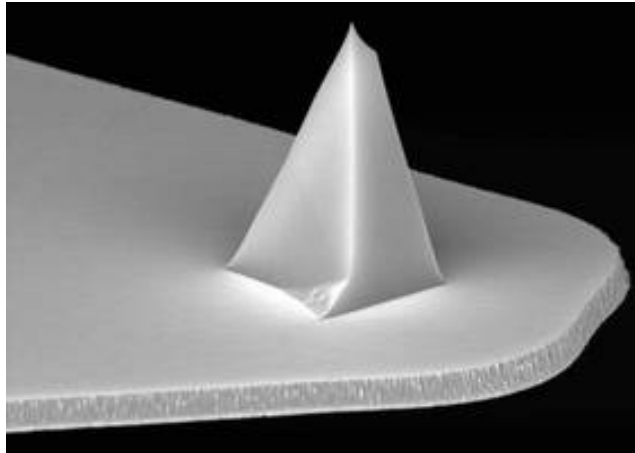
Obrázek 11: Detail skenovacího modulu mikroskopu Nano-RTM

2.2.2 Hrot a nosník (cantilever)

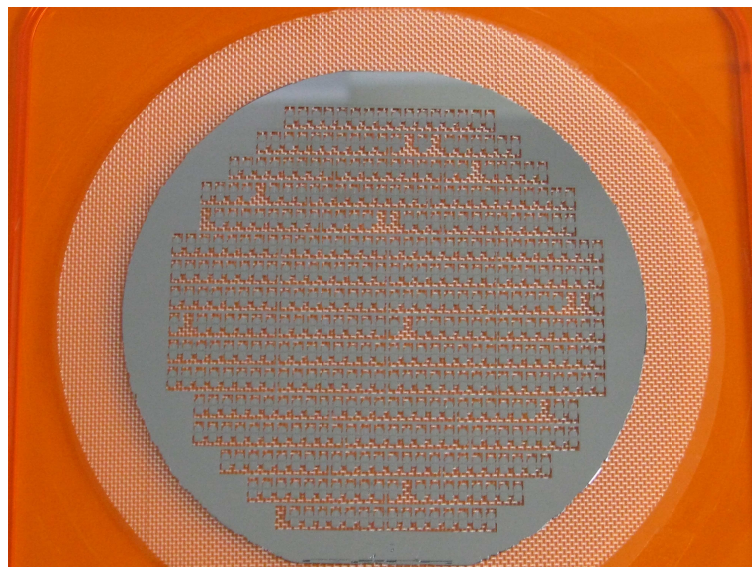
Principem měření je detekce ohybu nosníku, na kterém je upevněn jemný hrot. Na tento hrot působí síly, které ohýbají nosník a detekce výchylky nosníku je využita k rekonstrukci topografie povrchu. Hroty jsou různých rozměrů a nejčastěji jsou vyrobeny z křemíku, oxidu křemíku nebo nitridu křemíku. Povrch může být funkcionalizován rozličnými vrstvami (například DLC, PtIr, Co). Lze také zaostřit tvar hrotu, kdy se metodou CVD nechá na něm vyrůst uhlíková nanotrubička [12] tzv. high aspect ratio hrot.

2.2.3 Detektor

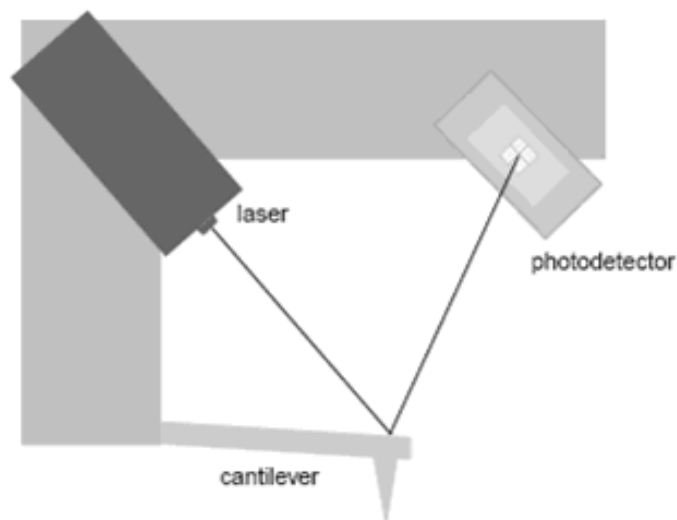
Většina komerčně dostupných AFM mikroskopů využívá k detekci ohybu nosníku laserovou fotodiodu. Stejně je to i u mikroskopu Nano-RTM. Princip snímání je následující: Na raménko je zaměřen laserový svazek, který se od něj odráží na světelný detektor rozdělený na dvě citlivé části (duanty). Ze začátku se laser nastaví tak, aby na oba duanty dopadala stejná energie svazku. Při samotném měření detektor podle poměru energií v obou duantech vypočítá ohyb raménka. V dnešní době se fotodetektor rozděluje v další ose kolmé k první pro měření



Obrázek 12: AFM hrot



Obrázek 13: Si wafer s kontaktními AFM hroty



Obrázek 14: Princip snímání pozice raménka laserem [20].

zkřutu raménka (lateral force microscopy) pro detekci materiálového kontrastu na povrchu skenovaného vzorku (viz obrázek 14).

2.2.4 Řídící elektronika

Činnost mikroskopu AFM je řízena pomocí PC (řízení měření, zobrazování, zpracování a interpretace naměřených dat), napájení piezokeramik skeneru, laseru, obvody zpětné vazby a oscilační obvody. Toto řízení je rozděleno do dvou částí, klasického PC, které ovládá uživatel, a jednotky se signálovým procesorem a napájecími zdroji. Činnost mikroskopu je ovládána přes speciální software, který zpracovává obraz v reálném čase a umožňuje nastavení parametrů např. zpětné vazby.

2.2.5 Optický mikroskop

Důležitou součástí je optický mikroskop (viz obrázek 10), který umožňuje kontrolu správného umístění místa dopadu laserové stopy na nosníku a velmi usnadňuje orientaci a vyhledání správného místa na povrchu měřeného vzorku.

2.3 Působící síly

V sekci 2.1 bylo řečeno, že AFM pracuje na principu snímání meziatomárních sil mezi hrotem a povrchem vzorku. Mezi síly, které se nejvíce uplatňují, patří van der Waalsovy síly. Tyto přitažlivé síly působí mezi jakýmkoliv atomy nezávisle na jejich chemické podstatě. Van der Waalsovy síly na vzdálenosti větší než 5 nm klesají s osmou mocninou vzdálenosti. Dále pak působí odpuzivé síly krátkého dosahu podle Pauliho vylučovacího principu, tyto síly vznikají v důsledku překrývání vlnových funkcí elektronů. Pokud na vzorku vznikne lokální náboj, tak mezi hrotem a povrchem vzorku působí elektrostatické síly podle Coulombova zákona. Dalšími uplatňujícími se silami jsou síly kapilární, které mají původ v menisku zkondenzované vody ze vzdušné vlhkosti (hrot v kontaktu tvoří kondenzační jádro). Měření kapilárních sil lze pak využít třeba k charakterizaci kontaminace povrchu nečistotami [21]. Celková závislost působících sil vycházející odvozením z Lennard-Jones potenciálu "6 - 12" [22]:

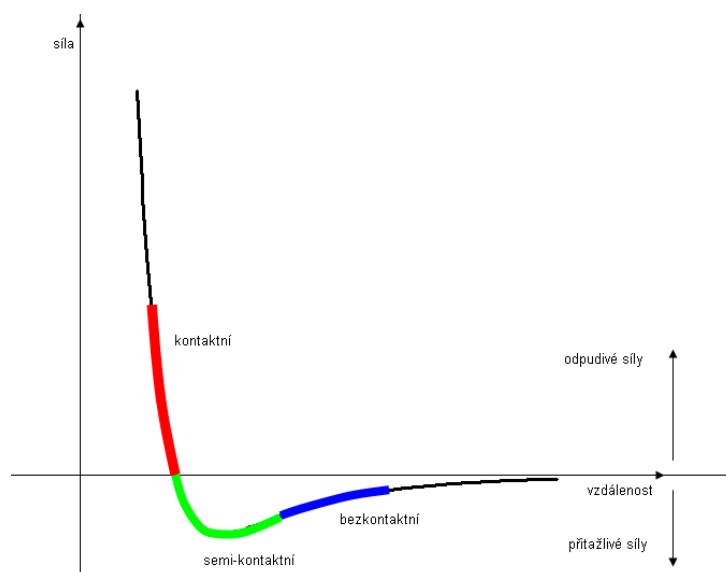
$$U(r) = \varepsilon \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \quad (7)$$

je vidět na obrázku 15. Kde ε je konstanta, r je vzdálenost mezi hrotem a povrchem a r_0 je vzdálenost, kdy výsledná působící síla bude nulová.

2.3.1 Měřící režimy AFM

Metoda AFM má několik možných měřících režimů, tento odstavec se soustřeďuje na nejběžněji 3 používané: kontaktní (dotykový), bezkontaktní (bezdotykový) a poklepový.

Kontaktní režim: Hrot je natolik blízko vzorku, že konečná síla je odpuzivá (znázornění působících sil mezi hrotem a povrchem - viz obrázek 15). Raménko však nesmí mít větší tuhost nežli vzorek, protože by mohlo dojít k poškození vzorku (především u biologických vzorků). Naopak pro režim SPL (scanning probe lithography) je žádoucí, aby tuhost raménka byla větší než tuhost vzorku (viz kapitola 4). Tento režim může probíhat několika možnými způsoby:



Obrázek 15: Znárodnění působící výsledné síly mezi hrotem AFM a povrchem vzorku [23].

- s konstantní výškou - udržuje se pořád stejná z-ová souřadnice, při skenování přes vyvýšené místo se zvětší odpudivé síly a dojde k většímu ohnutí nosníku. Výhodou této metody je, že je velmi rychlá. Lze ale měřit pouze vzorky s malým výškovým rozdílem, aby nedošlo ke zlomení nosníku.
- s konstantním ohnutím (s konstantní silou) - pomocí zpětné vazby se udržuje konstantní ohnutí nosníku, tento způsob je pomalejší, ale častěji používaný, protože se neprojevuje nelinearita nosníku.

Nekontaktní režim: Vzdálenost hrotu od povrchu je taková, že síla je přitažlivá (viz obrázek 15). Výhodou tohoto režimu z důvodu velmi malé síly mezi hrotem a povrchem ($\sim 10^{-12}$ N) je, že ho lze použít i pro měkké vzorky. Poněvadž jsou působící síly velmi malé, má tento režim větší náchylnost k šumu. Proto je nosník rozkmitáván v okolí své rezonanční frekvence a amplituda je nastavena tak, aby nedocházelo k dotyku hrotu s povrchem. Detekují se pak změny rezonanční frekvence či změny amplitudy kmitů.

Pokleповý režim: Na rozdíl od obou předchozích režimů se hrot střídavě dotýká, nedotýká vzorku (poklepává na povrch). Výhodou proti dotykovému režimu je, že nepoškozuje vzorek třením nebo tažením (snížení laterálních sil) a díky velké amplitudě oscilací nosníku se předchází vlivu přitažlivých kapilárních sil. Proti bezdotykovému režimu má větší rozsah v ose Z.

2.4 Software

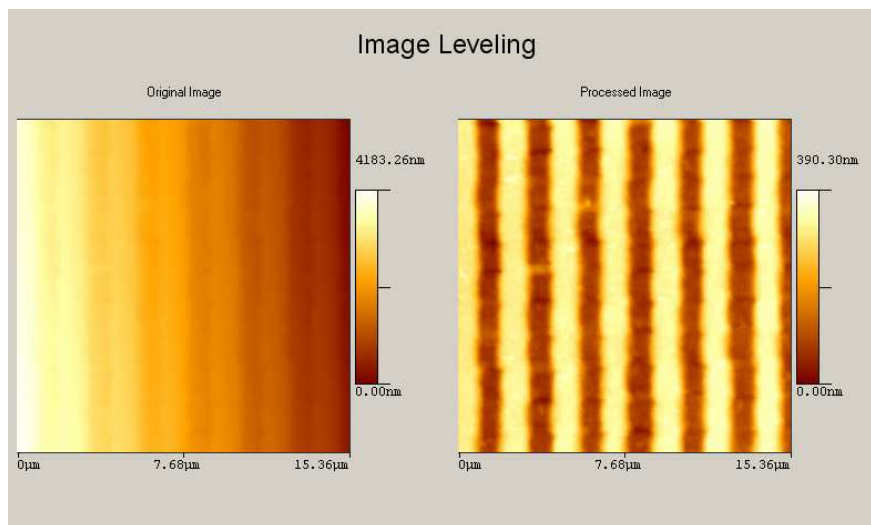
Nedílnou součástí mikroskopu AFM je také software. Zpravidla bývá rozdělen do dvou zcela oddělených programů, kdy jeden slouží pro ovládání zařízení a získání měřených dat. Druhý je pak výlučně pro zpracování a analýzu naměřených dat.

2.4.1 Měřící software - SPM Cockpit

Na začátek měření je důležité vybrat, ve kterém režimu bude mikroskop AFM měřit, zda v kontaktním či nekontaktním. V nekontaktním režimu je nutné provést před samotným měřením nastavení vlastní frekvence kmitání nosníku, toto naladění se provádí softwarově. Před spuštěním měření se ještě provádí přístrojové nastavení správné umístění dopadajícího laseru na nosník a nastavení pozice fotodiody.

Další důležité parametry nastavení:

- Scan Size - nastavení velikosti skenovacího pole (u Nano-RTM je skenovací rozsah $80 \times 80 \mu\text{m}$)
- Scan Rate - skenovací rychlost v Hz (reciproční hodnota udává dobu skenování jednoho řádku) - obvykle používaná rychlost byla od 0,5 do 1 Hz v závislosti na velikosti skenovaného pole. Se zvyšující rychlostí se zvyšuje opotřebení hrotu.
- Resolution - rozlišení udává počet bodů v řádku - minimálně 64×64 maximálně 1024×1024 .
- Scan Angle - úhel skenování



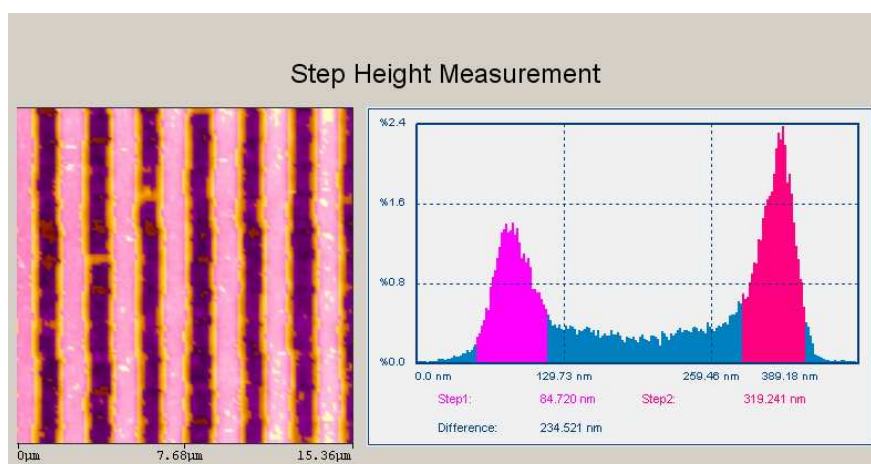
Obrázek 16: Ukázka vyrovnání obrazu na přímé mřížce v softwaru NanoRule.

- Setpoint - přítlak nosníku, při velkém přítlaku (využití v nanolitografii) může dojít k poškození vzorku nebo hrotu, při malé hodnotě dochází k odskočení hrotu od vzorku.
- Gain - zisk zpětnovazební smyčky, při velké hodnotě se do obrazu dostává šum

Skenovací rychlost a rozlišení obrazu pak ovlivňuje dobu skenování. Doba pro získání obrázku v rozlišení 128×128 při 0,5 Hz je přibližně 4,5 minuty [U12].

2.4.2 Vyhodnocovací software - NanoRule

K vyhodnocení naměřených dat se používá komerční software NanoRule dodávaný výrobcem AFM mikroskopu Nano-RTM. Software umožňuje především náhled naměřených dat ve 2D a 3D. Dalšími jeho důležitými funkcemi je možnost tzv. levelingu (tedy vyrovnání obrazu), odečtení hloubek a možnost náhledu profilů. Další funkce jsou podrobněji popsány v [24]. Protože odečtení hloubek struktur je podstatnou částí před dalšími technologickými postupy zpracování struktur (další vyvolávání rezistu, chemické či plazmochemické leptání, pokovení), je zde popsána



Obrázek 17: Ukázka odečtení hloubky přímé mřížky v softwaru NanoRule (hloubka 235 nm).

základní metodika k vyhodnocení hloubek. Po získání AFM dat se provádí leveling (viz obrázek 16). Poté se provede odečtení hloubky dané struktury pomocí histogramu (rozdíl mezi nejnižšími a nejvyššími body v obraze na základě četnosti zastoupení jednotlivých výšek - viz obrázek 17).

2.5 Příprava struktur na pozorování jejich kolmého řezu SEM

Při měření AFM mikroskopem dochází k nežádoucím jevům jako konvoluce hrotu s povrchem a díky tomu je znemožněna např. správná interpretace hloubek, kdy hrot AFM při skenování povrchu nedosáhne dna úzkých struktur [U8]. Proto jsem se snažil nalézt vhodný postup pro přípravu vzorků na jejich pozorování pomocí SEM na kolmém řezu [25, 26]. Cílem bylo připravit vzorky ustřižené niklové fólie, ve které byla pravidelná difrakční mřížka na odraz v blízké UV oblasti s periodou pod 300 nm. Niklová fólie byla ustřižena na rozměry 0,5 x 1 cm. Tyto ústřižky niklové fólie pak byly nalepeny pomocí dvousložkového lepidla (vytvrditel-



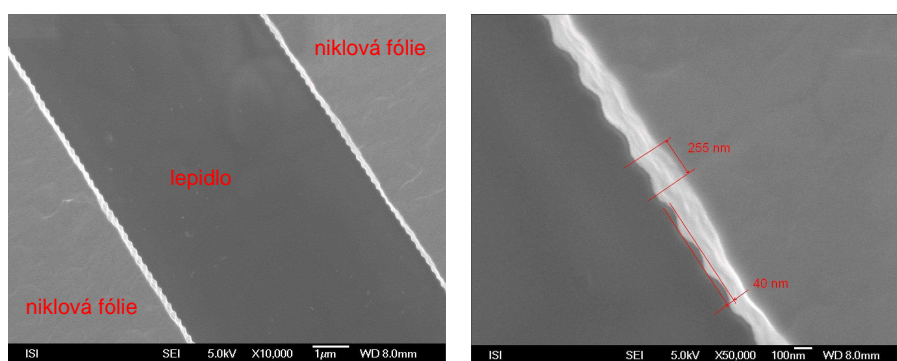
Obrázek 18: Snímky z konfokálního mikroskopu: vlevo po broušení, vpravo po iontovém leptání.

ného teplotou) na křemíkovou podložku o stejných rozměrech. Dva takto připravené vzorky byly přilepeny k sobě (orientovány difrakční strukturou v niklu k sobě). Proces vytvrzování probíhal v peci při teplotě 140°C po dobu jedné hodiny. Slepené vzorky byly vloženy do hliníkového disku, který sloužil jako držák během broušení a leštění. Drsnost brousícího papíru byla P2500. Pro leštění byla použita diamantová pasta s velikostí zrn 0,7 µm (na obrázku 18 vlevo snímek vzorku z konfokálního mikroskopu po broušení).

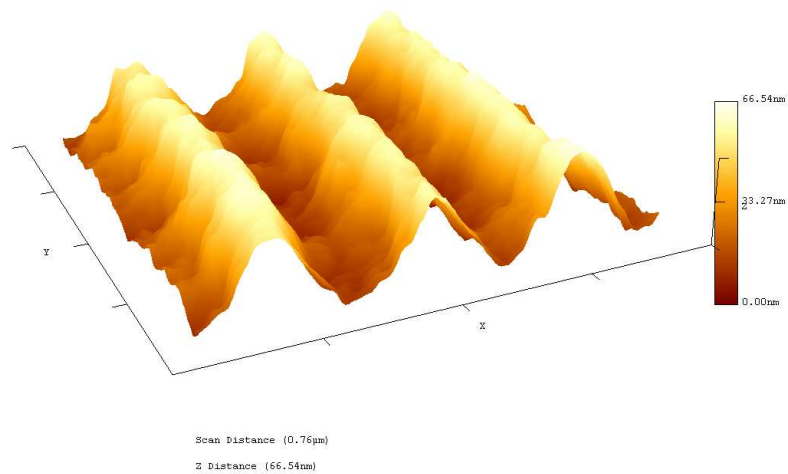
Aby byla difrakční mřížka v niklové fólii pozorovatelná na kolmém řezu, musela se niklová fólie po broušení leptat pomocí svazku iontů (na obrázku 18 vpravo snímek vzorku z konfokálního mikroskopu po iontovém leptání). Toto bylo provedeno leptáním ve svazku argonových iontů v komoře (obrázek 19), která je čerpaná turbomolekulární vývěvou. Předčerpání je zajištěno rotační olejovou vývěvou. Urychlovací napětí iontů argonu bylo 9,4 kV, proud ve svazku 14 µA, tlak v komoře iontové leptačky $2,5 \cdot 10^{-3}$ Pa. Celková doba leptání byla 10 minut. Připravené vzorky byly pozorovány metodou SEM (obrázek 20).



Obrázek 19: Komora iontového leptacího zařízení.



Obrázek 20: Snímky ze SEM: vlevo viditelné jednotlivé vrstvy, vpravo odečtení periody a hloubky UV mřížky (zvětšení 50k).



Obrázek 21: 3D AFM snímek difrakční mřížky pro UV oblast v niklu.

Z pořízených obrázků ze SEM byly určeny základní parametry mřížky v niklové fólii: hloubka = 40 nm a perioda mřížky 255 nm. Bylo také provedeno měření na AFM mikroskopu (obrázek 21), ze kterého se podařilo určit stejné parametry s následujícími hodnotami: hloubka = 45 nm a perioda = 263 nm. Hrbolky na povrchu mřížky jsou pravděpodobně zrnka niklu, u kterých lze předpokládat velikost v řádu desítek nanometrů.

3 Jev blízkosti (proximity effect)

3.1 Úvod

Rozlišení elektronové litografie je limitováno především rozptylovými jevy, při kterých je exponováno okolí místa, kde dopadá elektronový svazek. Může tak obecně dojít k významnému zkreslení požadovaného tvaru.

Pro korekci rozptylových jevů je potřeba znát přesné rozložení absorbované energie v exponovaném rezistu. Obecně je toto rozložení funkcí nastavení systému a tvar tohoto rozdělení je nezávislý na dávce a poloze v případě rovinného homogenního substrátu. Model vyjadřující rozdělení energie je popsán v bodě 3.2.3.

3.2 Jev rozptylu elektronů v pevné fázi

U elektronů, které vnikají do rezistu, dochází k velkému množství rozptylových jevů pod malými úhly (dopředný rozptyl) a tedy následnému rozšiřování původního průměru elektronového svazku. Při průchodu elektronů z rezistu do substrátu se elektrony rozptylují pod velkými úhly (zpětný rozptyl). Zpětně odražené elektrony pak ovlivňují absorbovanou dávku a po vyvolání rezistu i tvar struktury v jiném blízkém místě rezistu.

3.2.1 Dopředný rozptyl

Při průniku elektronů do rezistu dochází k rozptylu elektronů pod malými úhly, tento rozptyl pak může rozšířit průměr elektronového svazku proti původnímu rozměru svazku na povrchu rezistu. Efektivní průměr d_f svazku, ovlivněný dopředným rozptylem, se dá v určité hloubce rezistu vyjádřit pomocí empirického vztahu

$$d_f = 0.9(R_t/V_b)^{1.5}, \quad (8)$$

kde d_f je efektivní průměr svazku v nanometrech, R_t je tloušťka rezistu v nanometrech a V_b je urychlovací napětí v kilovoltech [1].

3.2.2 Rozptyl zpětně odražených elektronů

Při průchodu elektronů z rezistu do substrátu, na kterém je rezist nanesen, dochází k rozptylu elektronů pod velkými úhly (k tomuto rozptylu dochází i ve vrstvě rezistu, ale vzhledem k nižšímu protonovému číslu atomů obsažených v rezistu je tento příspěvek méně významný). Část těchto elektronů se vrací zpět do rezistu a tam způsobují další expozici rezistu v jiném místě, než svazek elektronů dopadal. Dolet elektronů (typická vzdálenost, kterou elektron urazí v materiálu pevné látky, než předá veškerou kinetickou energii) závisí na energii primárních elektronů a použitém substrátu. Při použití substrátu z materiálu s nižším protonovým číslem dochází k odrazu menšího množství zpětných elektronů.

3.2.3 Model a parametry

Rozložení absorbované energie v materiálu ve vzdálenosti r od místa dopadu primárního svazku je možné vyjádřit rozptylovou funkcí $f(r)$, kterou lze aproximovat dvojitou Gaussovskou funkcí:

$$f(r) = \frac{1}{1 + \eta} \left(\frac{1}{\pi\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\pi\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right), \quad (9)$$

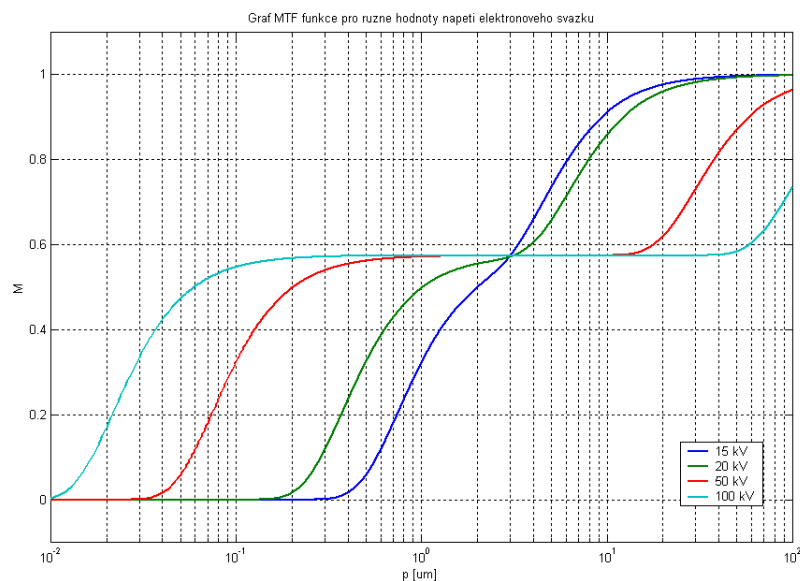
kde η je poměr absorbované energie zpětně odražených a absorbované energie od dopředně rozptýlených elektronů, α je dosah (užší rozptyl) dopředně rozptýlených elektronů a β je dosah zpětně rozptýlených elektronů (širší rozptyl).

Běžná metoda pro kvantitativní popis rozptylových jevů je modulační přenosová funkce (MTF ⁶). Lze ji získat z jednorozměrné Fourierovy transformace funkce rozložení absorbované energie a následného normování [27]:

$$M = \frac{1}{1 + \eta} \left(\exp\left(-\frac{\pi^2\alpha^2}{p^2}\right) + \eta \exp\left(-\frac{\pi^2\beta^2}{p^2}\right) \right), \quad (10)$$

kde p je délková perioda. Ideálně by mělo být $M = 1$ pro všechna p . Při rozptylu

⁶z angl. Modulation Transfer Function



Obrázek 22: Graf MTF funkce pro různé hodnoty urychlovacího napětí (tloušťka rezistu 500 nm).

elektronů je ale M menší než 1 a je závislé na p . M může být menší než 1, ale pro korekci rozptylových jevů požadujeme, aby bylo nezávislé na p .

Pro rezist o tloušťce 500 nm je poměr absorbované energie zpětně odražených a absorbované energie od dopředně rozptýlených elektronů 0,74, v intervalu $\pm 15\%$ od této hodnoty není nutné ošetřovat rozptyl [29], čili rozmezí vzdáleností, kde se dávka liší o méně než 15 %, je pro tuto tloušťku rezistu a urychlovací napětí $V_b = 15$ kV od 1 do 3 μm (obrázek 22).

3.3 Způsoby ošetření rozptylu elektronů

Z předchozího textu je patrné, že rozptylový jev má vliv na exponované struktury, a proto je jeho ošetření žádoucí z důvodu zachování vysokého rozlišení a přesných rozměrů požadovaných struktur. Možnosti jak omezit vliv rozptylu jsou shrnuty v následujících odstavcích.

3.3.1 Urychlovací napětí

Rozptyl zpětně odražených elektronů je závislý na urychlovacím napětí. Snižováním urychlovacího napětí se snižuje i rozptyl zpětně odražených, ale roste rozptyl dopředně rozptýlených elektronů. Pro nízké urychlovací napětí se pro co nejvyšší potlačení proximity jevu z tohoto důvodu používají tenké vrstvy rezistů. Pro některé aplikace může být ale použití tenkých rezistů nevhodné.

3.3.2 Tloušťka rezistu

Hodnoty parametru pro zpětný rozptyl elektronů klesají pro nižší urychlovací napětí, ale snížením urychlovacího napětí svazku narůstá parametr dopředného rozptylu nad $1 \mu\text{m}$. Tomuto se dá předejít použitím rezistu s menší tloušťkou (desítky nanometrů) při použití nízkých urychlovacích napětí. Nevýhodou je, že procesy při zpracování rezistu vyžadují často jeho větší tloušťku.

3.3.3 Vícevrstvé rezisty

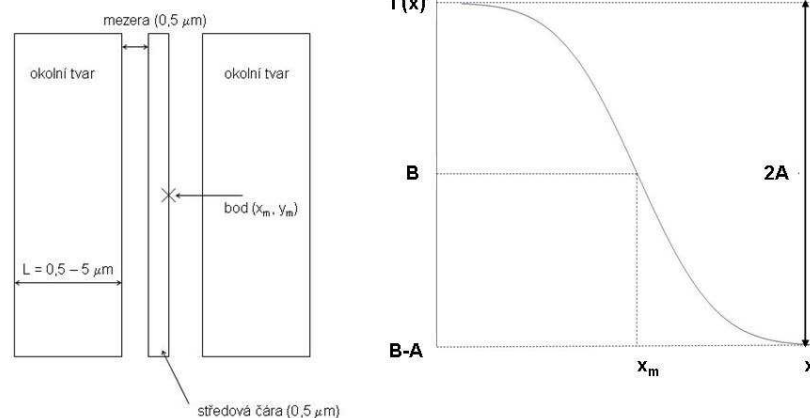
Ke snížení vlivu rozptylových jevů lze také použít metodu vícevrstevných rezistů. Vrchní tenká vrstva se používá pro expozici struktur, zatímco spodní tlustá vrstva jiného rezistu slouží ke snížení vlivu rozptylu zpětně odražených elektronů (dolet zpětně odražených elektronů je větší než pro křemík).

3.3.4 SW korekce expozičních dat

Jednou z možností, jak ošetřit vliv rozptylových jevů, je softwarová korekce expozičních dat. Na základě znalosti parametrů rozptylové funkce, tedy parametrů α, β, η , lze v softwaru ošetřit rozměry a dávky struktur zamýšlených k expozici.

3.4 Expoziční testy k určení rozptylové funkce

Za účelem získání jednotlivých parametrů rozptylové funkce byl navržen expoziční test. Motiv je složený ze střídání tvarů čára (šířka od $0,5 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$ s krokem $0,5 \mu\text{m}$), mezera o šířce $0,5 \mu\text{m}$, čára o šířce $0,5 \mu\text{m}$, mezera o šířce $0,5 \mu\text{m}$, čára

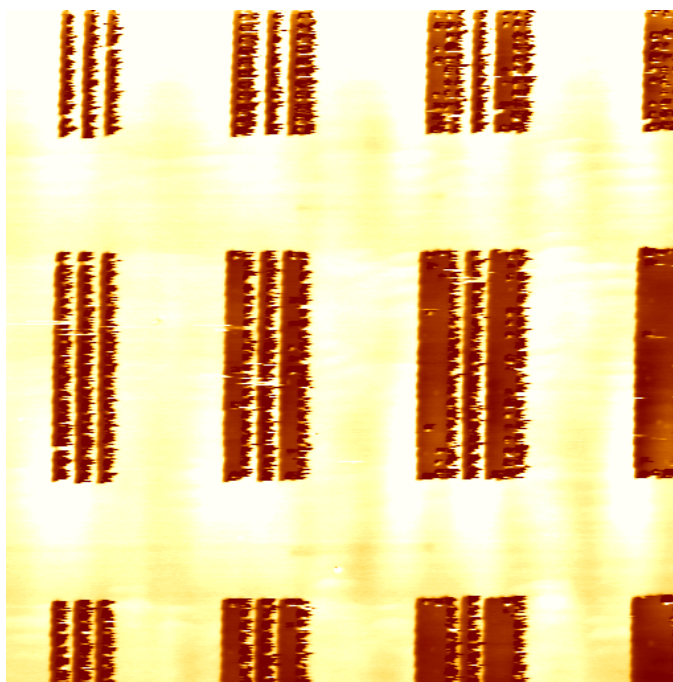


Obrázek 23: Vlevo - schéma exponovaného tvaru, vpravo - průběh intenzity v blízkosti bodu x_m .

(šířka od $0,5 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$ s krokem $0,5 \mu\text{m}$), svislá délka čar $5 \mu\text{m}$ - tedy 10 tvarů v řádku. Rozteč mezi jednotlivými tvary $5 \mu\text{m}$. Řádek je opakován 10x s různým nastavením relativního expozičního času (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 %). Motiv je ohraničený rámečkem o rozměrech $0,25 \text{ mm} \times 0,3 \text{ mm}$. Celkový rozměr testovacího motivu: $0,9 \text{ mm} \times 0,3 \text{ mm}$. Test byl exponován do rezistu FEP-171 o tloušťce 160 nm . Rezist FEP-171 byl zvolen pro jeho velkou citlivost a kontrast, a proto se předpokládalo, že realizované struktury budou dosahovat vysokého rozlišení. Dávka odpovídající 100 % relativnímu času byla $5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. K vyvolání byla použita vývojka TMAH (hydroxid tetramethylamonný) po dobu 25 s při teplotě 23°C .

V následujících odstavcích budou popsány 4 způsoby vyhodnocení testovací struktury: AFM, konfokální mikroskop (CLSM)⁷, optický mikroskop (OM), SEM [U7].

⁷z angl. confocal laser scanning microscope



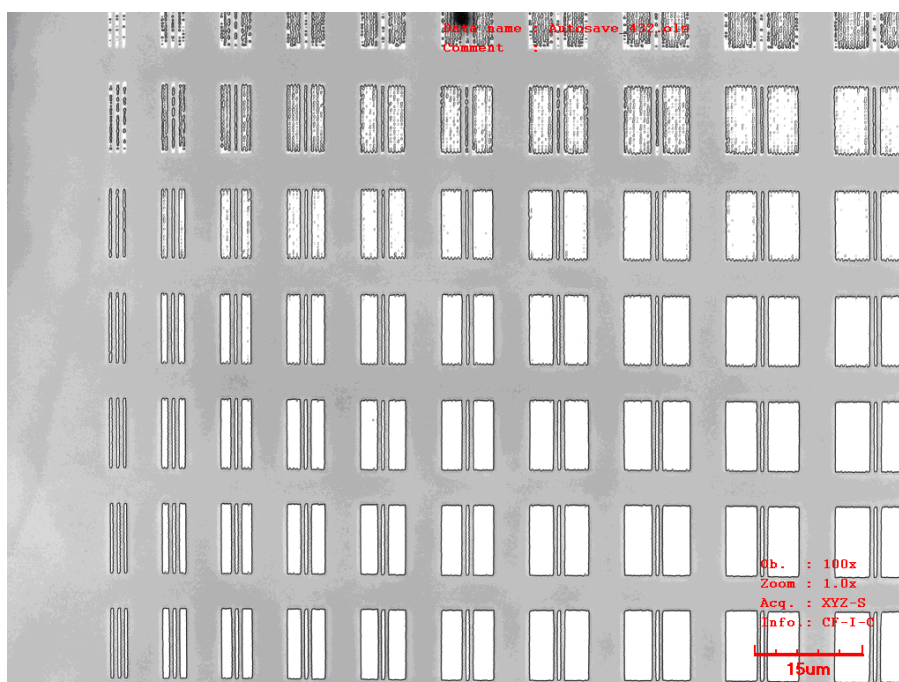
Obrázek 24: Ukázka testovací struktury měřená pomocí AFM.

3.4.1 Vyhodnocení testu pomocí AFM

Mikroskopem AFM Nano-RTM byly zobrazeny testovací tvary se šířkou okolní čáry od $0,5 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$ pro relativní časy 80, 90, 100, 110 % (struktury exponované nižšími relativními časy nebyly vyvolány do dna). Odečtením pološířky středové čáry a vynesení závislosti expoziční dávky na pološířce středové čáry (obrázek 23 ukazuje intenzitu v okolí bodu x_m), lze pak určit parametr ϱ jako maximální strmost intenzity. Parametr α pak souvisí s parametrem ϱ dle následujícího vztahu

$$\varrho = \frac{-2}{\alpha\sqrt{\pi}} \quad (11)$$

za předpokladu, že sousední exponované tvary jsou vzdáleny více než 2α a parametr β je mnohem větší než α [28]. Průměrná hodnota parametru α určená z měření AFM je 132 nm.



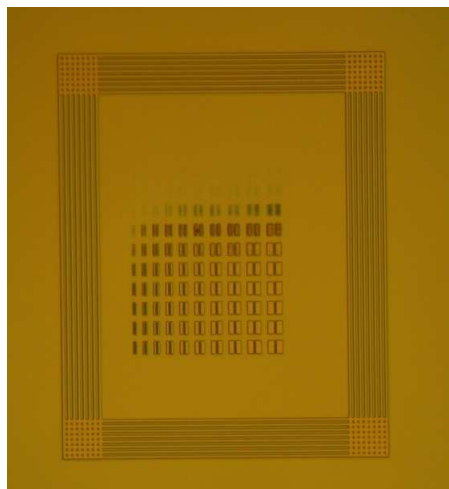
Obrázek 25: Ukázka testovací struktury zobrazená konfokálním mikroskopem.

3.4.2 Vyhodnocení testu konfokálním mikroskopem (CLSM)

Pomocí CLSM Olympus LEXT 3100, byly změřeny stejné parametry exponovaného testu tzn. pološířka čar pro stejné hodnoty okolních šířek čar a relativní časy (70, 80, 90, 100, 110 %). Z těchto měření byla určena průměrná hodnota parametru $\alpha = 118$ nm.

3.4.3 Vyhodnocení testu optickým mikroskopem

Pomocí optického mikroskopu Leitz byly odečteny parametry exponovaného testu (viz obrázek 26) pro šířky okolních čar od 0,5 do 3,0 μm a relativní časy 80, 90, 100, 110 %. Z těchto měření byla určena průměrná hodnota parametru $\alpha = 122$ nm.

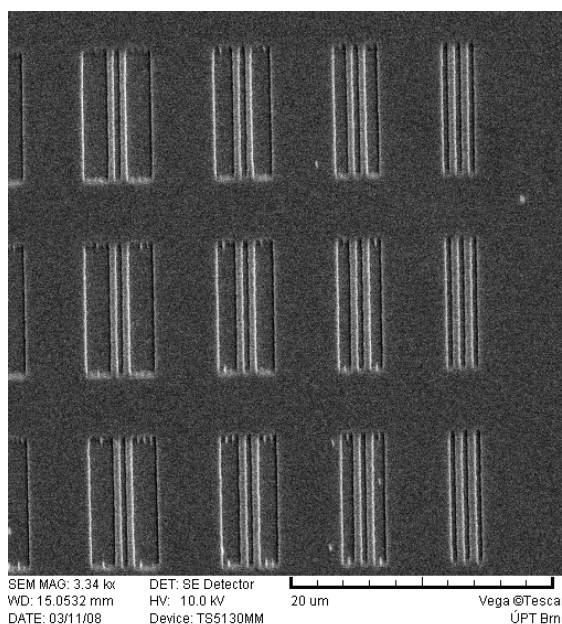


Obrázek 26: Celkový náhled testovací struktury zobrazený optickým mikroskopem Leitz, pro vyhodnocení byly použity snímky s větším zvětšením.

3.4.4 Vyhodnocení testu pomocí SEM

Rastrovacím elektronovým mikroskopem Tescan VEGA byly změřeny a odečteny (viz obrázek 27) hodnoty pološířek středových čar s okolními šířkami čar od 0,5 do 3,0 μm pro relativní časy 70, 80, 90, 100, 110 %. Z těchto měření byla určena průměrná hodnota parametru $\alpha = 106 \text{ nm}$.

Z navržených exponovaných testovacích struktur měly být určeny proximity parametry α, β, η . Podařilo se však určit pouze parametr α , protože nebylo naexponováno dostatečné množství struktur s odpovídajícími expozičními časy (rozsah relativních časů od 20 do 110 %). Pro určení parametru β je potřebná expozice struktur vyšší dávkou (relativním časem), aby se dal v závislosti dávky na pološířce čáry určit inflexní bod. V rámci vyhodnocování testu bylo také důležité nalezení optimální vyhodnocovací metody (maximální efektivita). Hodnota parametru α je srovnatelná pro všechny 4 metody měření. Hodnoty získané metodou SEM jsou značně zašuměné, ale i přesto jsou srovnatelné se zbývajícími metodami. Z hlediska rychlosti je nejvhodnější použití optického mikroskopu, ale následné odečítání hodnot je kvůli absenci vhodného softwaru poměrně zdlouhavé. Vyhodnocování testu je



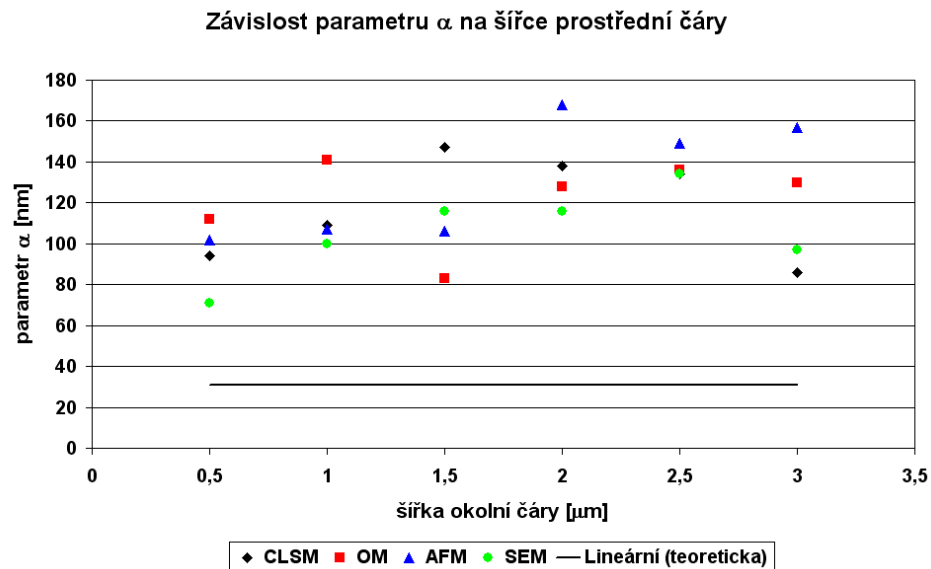
Obrázek 27: Ukázka testovací struktury zobrazená SEM.

naopak velmi pohodlné a rychlé v softwarech dodaných se SEM a AFM, ale samotné měření struktur je časově náročnější (malý rozsah pohybu AFM, pokovení před SEM měřením, následná evakuace). Výhodou těchto dvou metod je větší přesnost. Nejvhodnější metodou k měření a následnému vyhodnocení je konfokální mikroskop, kde je spojena dostačující přesnost a rychlost metody.

3.4.5 Další úpravy expozičního testu

Protože měření předchozí testovací struktury mikroskopem AFM bylo časově velmi náročné (řádově dny), byl proveden pokus zjednodušit tuto strukturu tak, aby bylo možné expozice testovacích struktur měřit v kratším čase (hodiny).

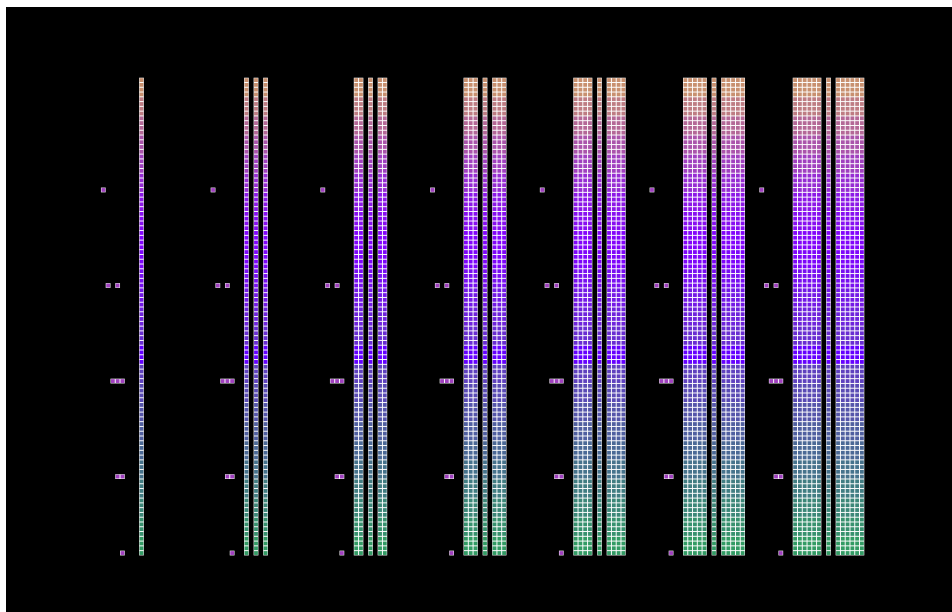
Motiv je opět složený ze střídání tvarů čára (šířka od $0 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$ s krokem $0,5 \mu\text{m}$), mezera o šířce $0,5 \mu\text{m}$, čára o šířce $0,5 \mu\text{m}$, mezera o šířce $0,5 \mu\text{m}$, čára (šířka od $0 \mu\text{m}$ do $5 \mu\text{m}$ s krokem $0,5 \mu\text{m}$), svislá délka čar $50 \mu\text{m}$ - tedy 6 tvarů (viz obrázek 31). Rozteč mezi jednotlivými tvary $5 \mu\text{m}$. Tvar je exponován s různým nastavením relativního času 50 % (dole) až po 200 % (nahore) (od 50 %



Obrázek 28: Závislost parametru α na šířce prostřední čáry pro jednotlivé metody měření.

metoda	α [nm]
AFM	132
konfokální mikroskop	118
optický mikroskop	122
SEM	106
α_{TEOR} [29]	31

Obrázek 29: Srovnání výsledků jednotlivých metod.

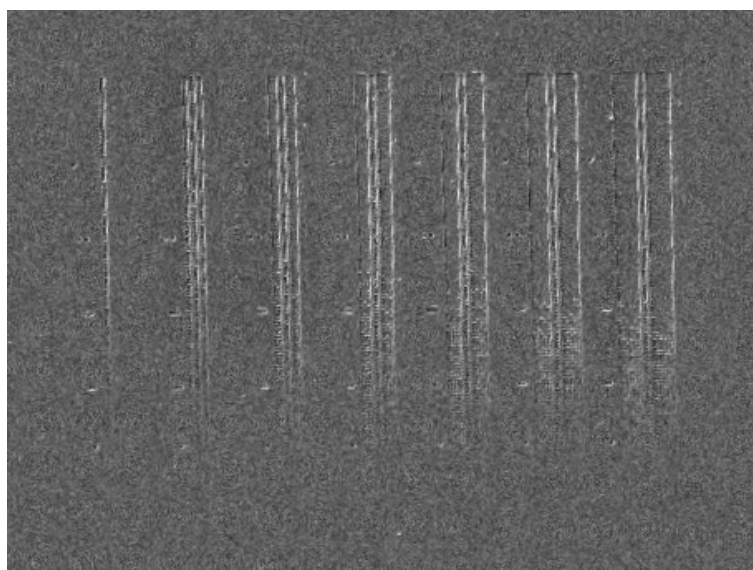


Obrázek 30: Náhled na simulaci upravené testovací struktury (ukázka dat pro expozici testovací struktury viz Příloha A).

do 140 % s krokem 5 %, od 140 % do 200 % s krokem 10 %). Délka úseku čáry, která je exponovaná stejným časem je $2 \mu\text{m}$. Pro lepší rozpoznání jakým časem je exponováno, jsou vedle krajní čáry umístěny značky exponované relativním časem 160 % (razítko $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ - relativní čas 50 %, 2 razítka $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ vedle sebe - relativní čas 70 %, 3 razítka $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ vedle sebe - relativní čas 95 %, razítko $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$, mezera, razítko $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ - relativní čas 120 %, razítko $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ - relativní čas 150 %). Motiv je ohraničený rámečkem o rozměrech $0,25 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$. Celkový rozměr testu: $0,9 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm}$.

Mikroskopem AFM byly změřeny tvary se šířkou okolní čáry od $0,5 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$. Měřením pološířky středové čáry a vynesení závislosti expoziční dávky na pološířce středové čáry, lze pak určit parametr ρ (viz vztah 11) jako maximální pokles.

Šířka prostřední čáry byla měřena AFM mikroskopem Nano-R. Na obrázku 32 je ukázka tvaru exponovaná relativními časy 110 % až 130 % s krokem 5 %



Obrázek 31: Testovací struktura zobrazená pomocí SEM - k odečtení hodnot pološírek byly použity snímky s větším zvětšením.

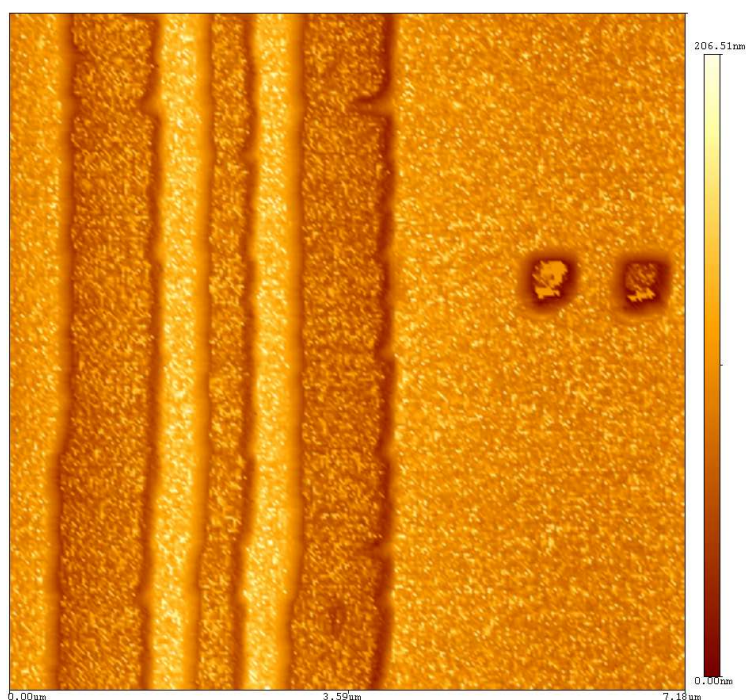
na vzdálenosti $2 \mu\text{m}$ od spodu nahoru; šířka okrajových čar je $L = 1,0 \mu\text{m}$.

Z tohoto AFM měření byla odečtena pološířka čáry v hloubce rezistu 110 nm (viz obrázek 35) pro naměřené dávky a pro parametry L . V závislosti na této pološírce byla vynesena dávka, kterou byla struktura exponována (D_0/D), $D_0 = 10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ (dvojnásobek citlivosti-viz sekce 1.3), D - expoziční dávka. Z těchto závislostí lze určit parametr ρ . Z parametru ρ lze pak podle vztahu 11 opět určit parametr α .

Test byl exponován do rezistu FEP-171 s tloušťkou 170 nm . Dávka odpovídající relativnímu expozičnímu času je $5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. K vyvolání byla opět použita vývojka TMAH, doba vyvolávání byla 52 s při teplotě 23°C .

AFM byly změřeny pološířky středové čáry s okolní tloušťkou čar $0,5$ a $3,0 \mu\text{m}$. Z naměřených hodnot vnesených do grafu v závislosti na expoziční dávce byla určena průměrná hodnota parametru $\alpha = 85 \text{ nm}$. Hodnoty pološírek čar s tloušťkou okolních čar od $1,0$ do $2,5 \mu\text{m}$ nejsou zahrnuty, protože naměřené hodnoty byly rozházené a vyskytovaly se mezi hodnotami těchto dvou závislostí (pro další testy je nutná korekce dat a vyhlazení exponovaných tvarů zmenšením razítka).

V tabulce 33 jsou uvedeny hodnoty odečtené z měření AFM testovacích tvarů



Obrázek 32: Ukázka AFM měření testovací struktury.

a hodnoty parametrů ρ a α .

Po změření testovacích tvarů mikroskopem AFM byl vzorek pokoven naprášením (asi 100 nm vrstva Ag) pro snadnější měření SEM Tescan Vega. Odečtené hodnoty jsou v tabulce 34.

Z měření SEM byly odečteny pološířky středové čáry s okolní tloušťkou čar 0,5 a 1,0 μm a z těchto hodnot vnesených do grafu v závislosti na expoziční dávce byla určena průměrná hodnota parametru $\alpha = 62$ nm. Teoretická hodnota parametru α pro rezist s tloušťkou 170 nm je 34 nm. Pro další hodnoty naměřených pološířek čar došlo ke stejnému jevu jako u hodnot naměřených AFM (hodnoty značně zašumělé a v intervalu mezi závislostmi pro okolní šířku 0,5 a 1,0 μm).

Při srovnávání dvou odpovídajících si měření SEM a AFM je nutné uvážit ostrost hrotu AFM, tedy rozdíl asi 80 nm v pološířce (viz obrázek 38), který vznikl při měření AFM a SEM je způsoben konvolucí hrotu s povrchem (uvažovaná ostrost hrotu je 100 nm).

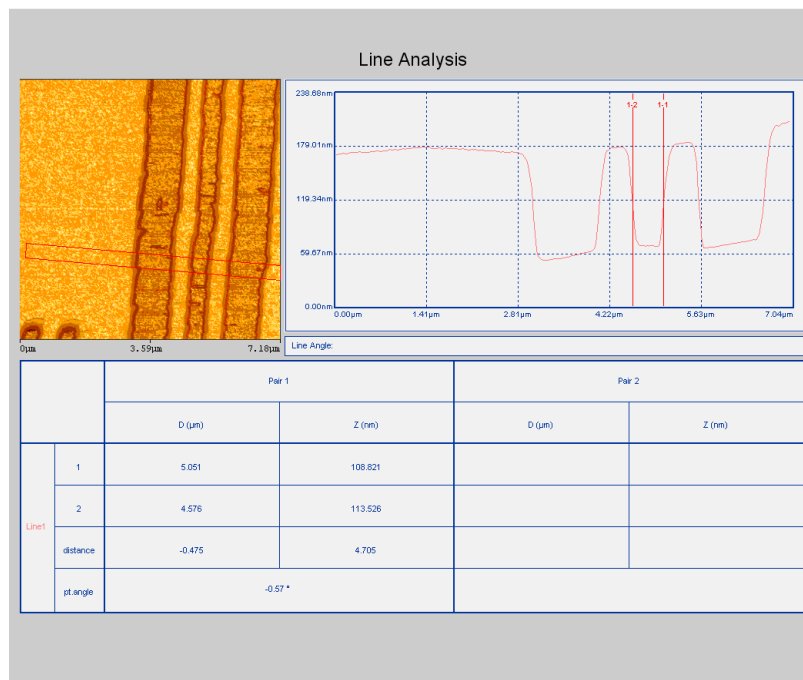
Teoretická hodnota parametru α je výrazně jiná než naměřená hodnota

D_0/D [-]	dávka [%]	pološířka [nm]		průměr
		$L=0,5 \mu\text{m}$	$L=3,0 \mu\text{m}$	
2,22	90	-	-	
2,11	95	216	220	
2	100	223	239	
1,90	105	230	242	
1,82	110	231	239	
1,74	115	234	257	
1,67	120	236	266	
1,6	125	249	273	
1,54	130	245	279	
1,48	135	264	314	
1,43	140	256	309	
1,33	150	260	298	
1,25	160	266		
1,18	170	278	302	
1,11	180	278	317	
1,05	190	306	331	
1	200		343	
	ϱ [nm^{-1}]	-0,0161	-0,0113	-0,0137
	α [nm]	70	99	85

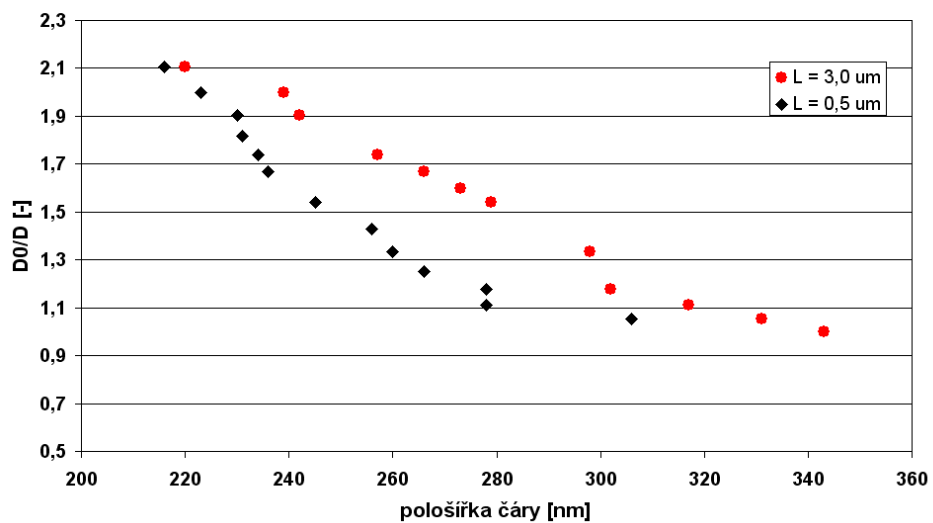
Obrázek 33: Odečtení pološířky z měření AFM.

D_0/D [-]	dávka [%]	pološířka [nm]		průměr
		$L=0,5 \mu\text{m}$	$L=1,0 \mu\text{m}$	
2,22	90		156	
2,11	95	138	179	
2	100	161	184	
1,90	105	171	178	
1,82	110	177	187	
1,74	115	187	189	
1,67	120	176	213	
1,6	125	195	205	
1,54	130	186	189	
1,48	135	204	229	
1,43	140	201	203	
1,33	150	215	242	
1,25	160	198	230	
1,18	170	202	254	
1,11	180	218	267	
1,05	190	232	289	
1	200	250		
	ϱ [nm^{-1}]	-0,0206	-0,0163	-0,0185
	α [nm]	55	69	62

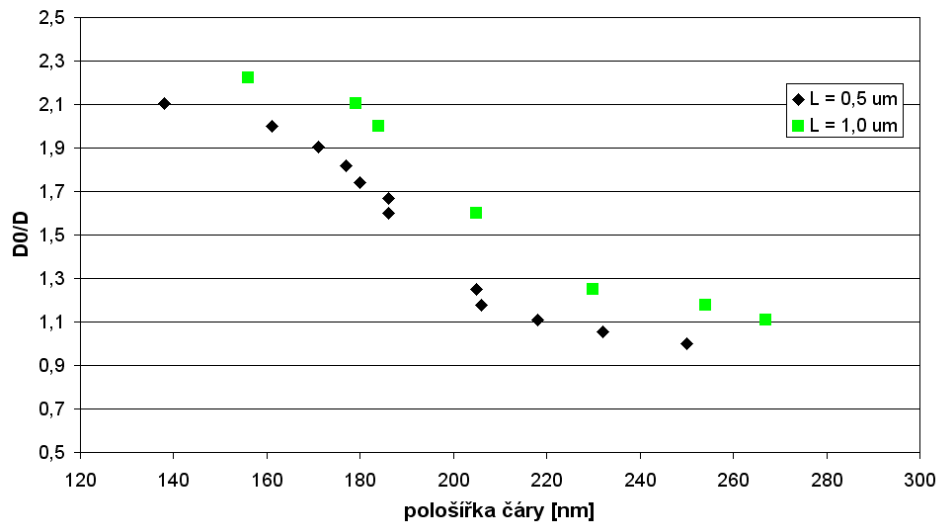
Obrázek 34: Odečtení pološířky z měření SEM.



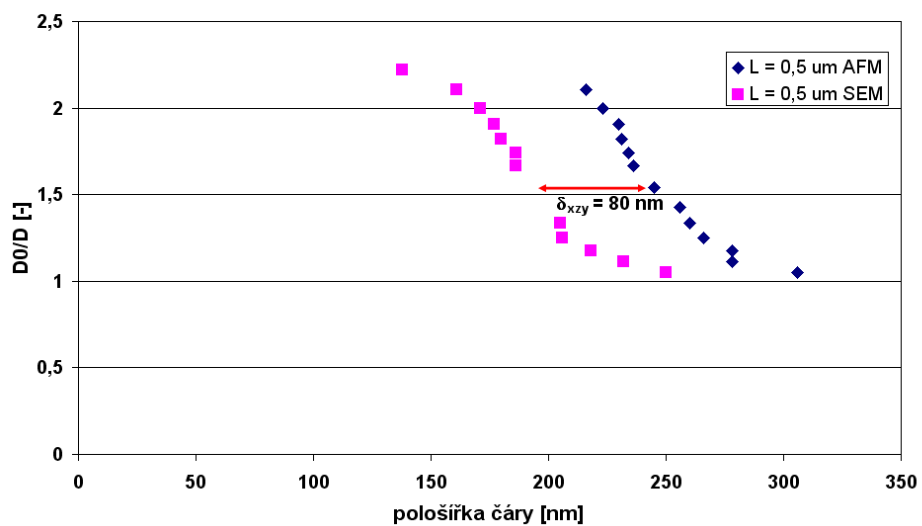
Obrázek 35: Způsob odečtení pološířky středové čáry.



Obrázek 36: Graf závislosti expoziční dávky na pološířce čáry - měření AFM.



Obrázek 37: Graf závislosti expoziční dávky na pološírce čáry - měření SEM Tescan Vega.



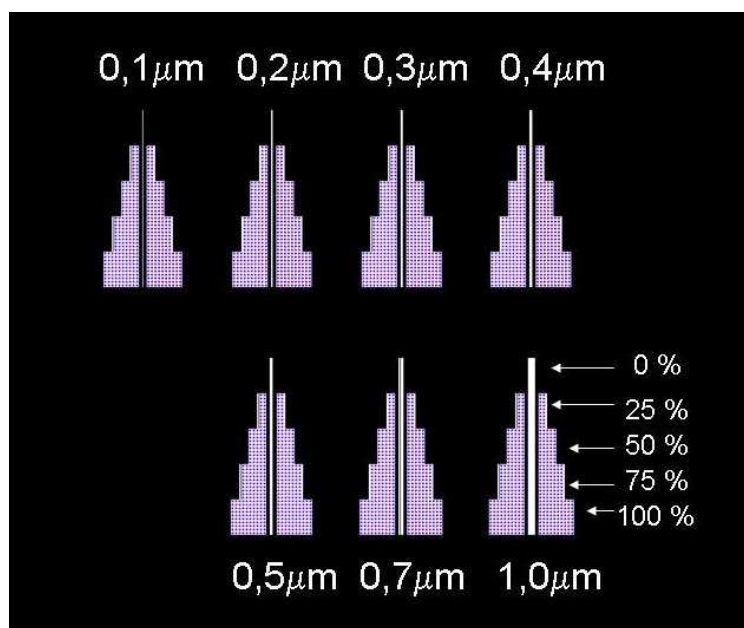
Obrázek 38: Srovnání měření AFM a SEM.

parametru, protože je tento model uvažován pro Gaussovský typ svazku s velikostí stopy elektronového svazku v řádech nanometrů. Litograf BS600 pracuje s tvarovaným svazkem, kde nejmenší dosažitelné rozměry expozičního razítka jsou 100*100 nm ve standardním módu. Proto tento parametru spíše než dopředný rozptyl zahrnuje současně i další jevy, ke kterým při expozici dochází (např. rozptyl svazku na clonách). Z exponovaných testů se nepodařilo určit parametr β rozptylové funkce, protože není pravděpodobně splněna podmínka $\beta \gg \alpha$ [28]. Proto také nešlo určit parametr η podíl zpětně odražených elektronů. Z literatury [29] plyne, že hodnota tohoto parametru je konstantní pro různá urychlovací napětí.

3.4.6 Korekce expozice pomocí softwaru

Ve spolupráci s firmou Eltek se podařilo naprogramovat modul expozičního softwaru, který má za úkol provádět korekci jevu blízkosti. V expozičním softwaru jsem připravil test pro ověření funkčnosti modulu korekce jevu blízkosti, testovací struktura je znázorněna na obrázku 39 (ukázka dat pro expozici této testovací struktury viz Příloha B). Tento test sestává z čar o různé šířce od 100 nm do 1 μm , obklopených expozicemi okolí, která odpovídají plochám o velikosti 0, 25, 50, 75, 100% (viz obrázek 39). Ve výchozím souboru pro test jsou dávky pro expozici jednotlivých razítek nastaveny tak, že jsou ve všech místech testu stejné a odpovídají 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Vyvinutý modul softwaru umožňuje zobrazení rozložení dávky, které je pro daný test zachyceno v obrázku 40. Lze vidět, že energie svazku se vlivem rozptylových jevů absorbuje také v okolí jednotlivých struktur. Metodou korekce dávek jsou pak v softwaru dávky jednotlivých razítek přepočítány tak, aby v celé ploše jednotlivého razítka byl součet expoziční dávky a dávky okolí alespoň 100% tedy 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Rozsah vypočítaných dávek byl v rozmezí od 30 do 118,5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Nastavení parametrů popsaných v modelu (viz odstavec 3.2.3) bylo následující: $\alpha = 0,20 \mu\text{m}$, $\beta = 1,20 \mu\text{m}$ a $\eta = 0,74$; simulace testu s upravenými dávkami je na obrázku 41. Expozice testu byla provedena do rezistu PMMA 950k s tloušťkou 200 nm, použitá vývojka nAAC⁸ a doba vyvolávání 180 s při teplotě 25°C. Následně byly změřeny šířky středových čar

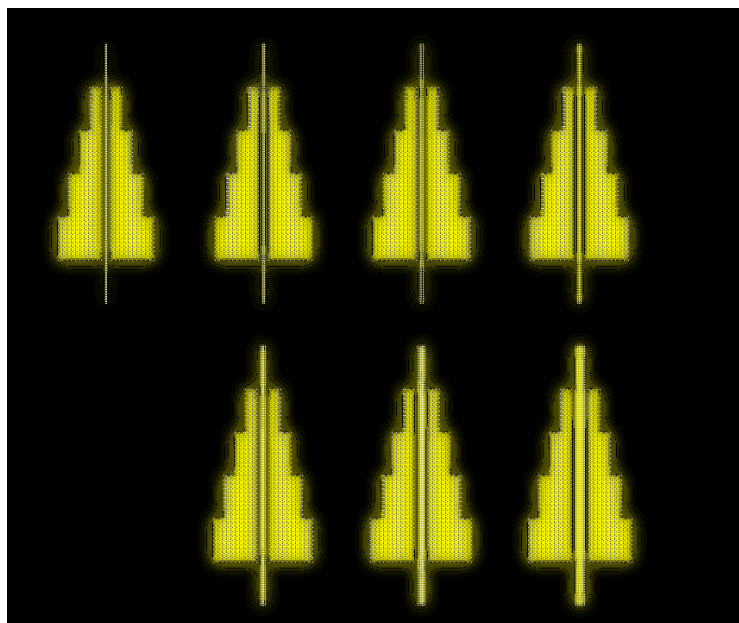
⁸n-amyl acetát



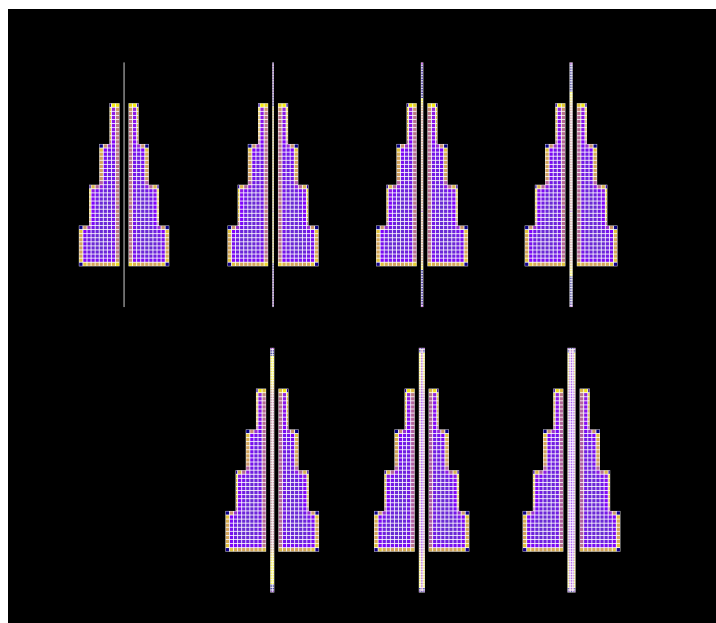
Obrázek 39: Popis testu k ověření funkčnosti softwarového modulu korekce jevu blízkosti.

pomocí AFM pro všechny velikosti ploch exponovaného okolí (0, 25, 50, 75, 100% - ukázka AFM měření viz obrázek 42).

Na obrázku 43 je snímek z konfokálního mikroskopu, na němž je expoziční test s různou šířkou středové čáry. Snímek zachycuje test, na kterém nebyla provedena korekce. Na dalším obrázku 44 je již test s provedenou korekcí jevu blízkosti. Jednoznačně lze vidět z obou obrázků, že korekce jevu blízkosti je velmi patrná na hranách struktur, které jsou vyvolány až na křemíkový substrát. Velmi významnou se tak stává i korekce expozice středové čáry (viz obrázek 45, kde je znázorněn rozdíl skutečné šířky exponované středové čáry a její navržené šířky na nominální hodnotě šířky středové čáry. V grafu jsou vynechány hodnoty pro velikosti 50, 75 a 100% okolních exponovaných ploch kvůli zachování přehlednosti grafu. Lze vidět, že šířky bez korekce jsou značně zašuměné, kdežto se softwarovou korekcí expozičních dávek se skutečná šířka čáry velmi blíží navržené šířce pro čáry se šířkou 300 nm a větší. Pro středové čáry užší než 300 nm se hodnota jejich šířky začíná výrazněji odlišovat od navržené šířky kvůli nastavené vysoké dávce v upravených datech.



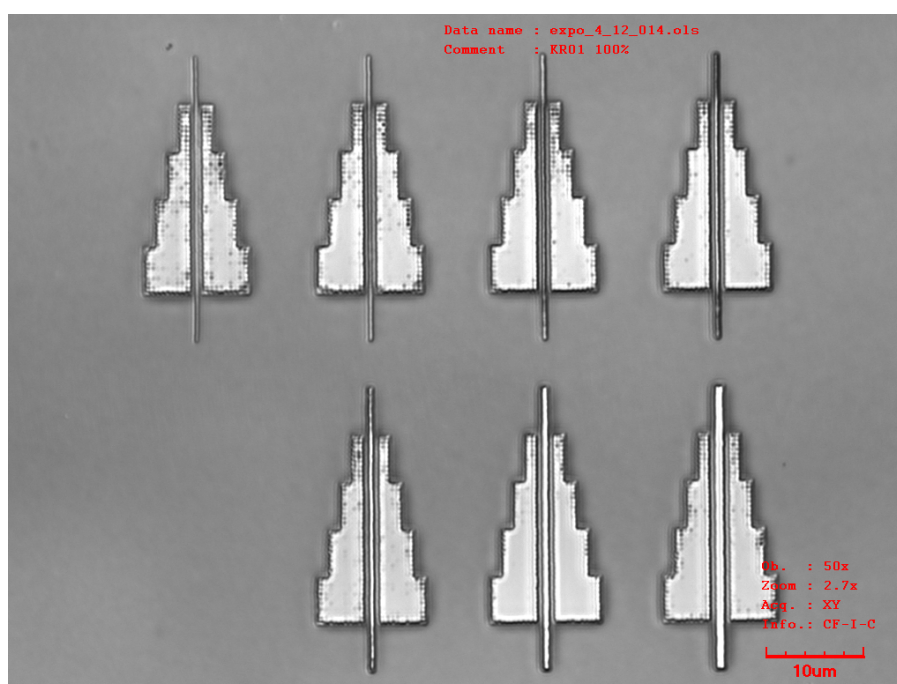
Obrázek 40: Znázornění vlivu jevu blízkosti na testovací strukturu.



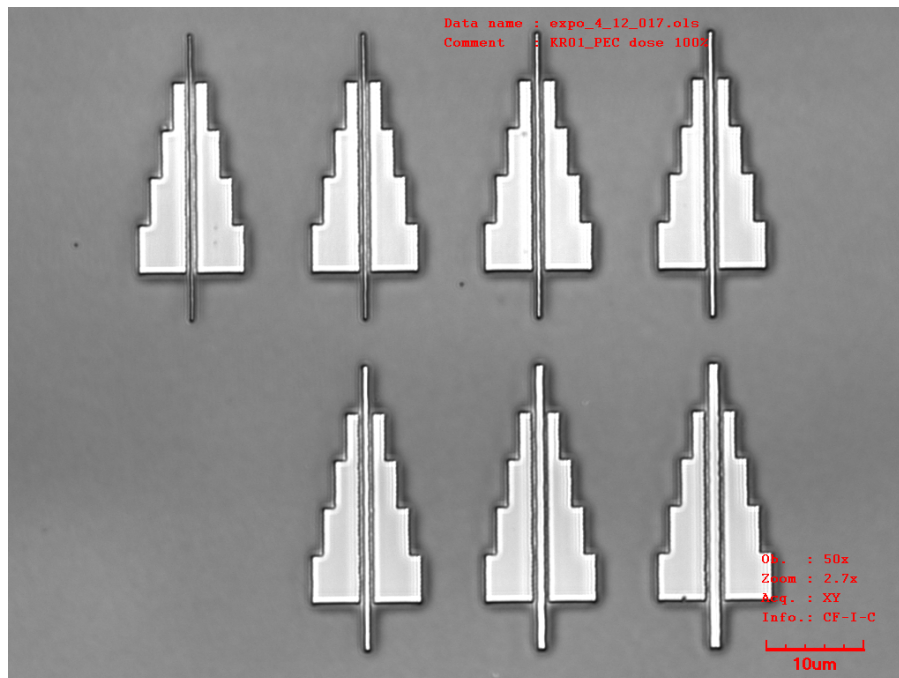
Obrázek 41: Simulace testu k ověření funkčnosti softwarového modulu korekce jevu blízkosti s upravenými dávkami.



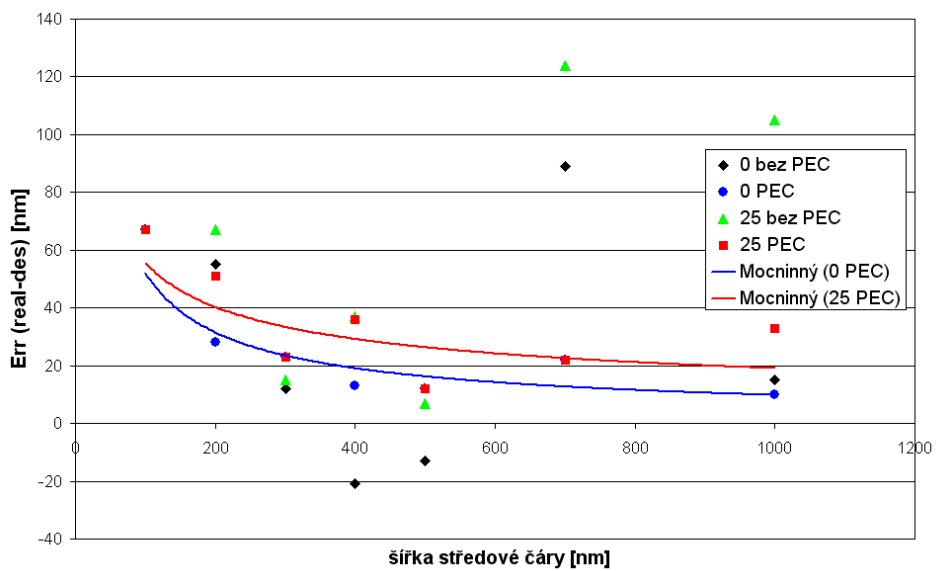
Obrázek 42: Ukázka AFM měření testovací struktury.



Obrázek 43: Test bez korekce jevu blízkosti.



Obrázek 44: Test s korekcí jevu blízkosti.



Obrázek 45: Znázornění rozdílu mezi skutečnou a navrženou šířkou čáry.

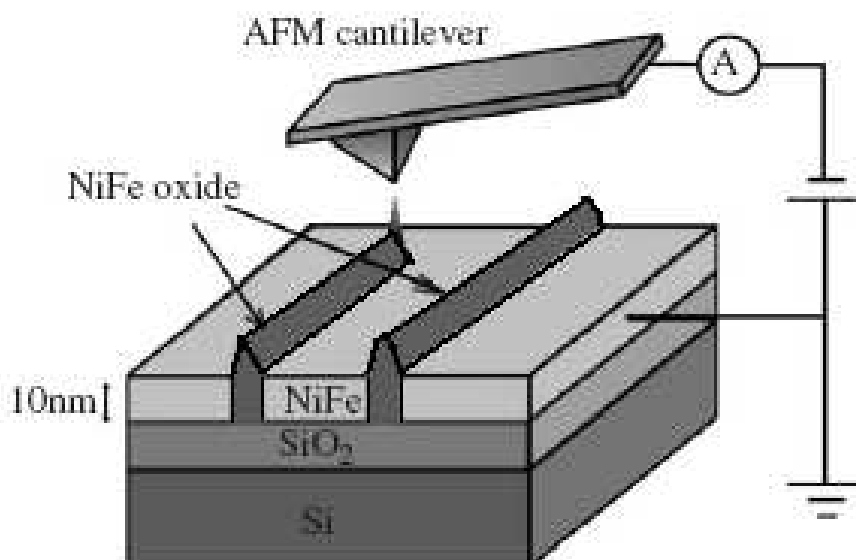
4 SPL (scanning probe lithography)

Moderní průmysl a technologie používané v současnosti neustále zvyšují svůj požadavek na vytváření drobných struktur, jejichž rozměry jsou v nanometrovém rozsahu. AFM metoda prodělala během posledních dvou desetiletí velký rozvoj, co se týká zpracování povrchů a vytváření různých nanostruktur. Byly vyvinuty různé techniky využívající zařízení AFM k přípravě struktur v rozměrech nano. Tyto techniky jsou označovány jako SPL (scanning probe lithography) a jsou nejčastěji používány k vytváření nanostruktur a nanozařízení v různých materiálech (kovy, oxidy, polovodiče, ale také polymerní materiály). Lze jimi připravovat různé tvary od jednotlivých bodů, čar a mřížek až po 3D struktury [30] s různými rozměry od desítek až po stovky nanometrů a s hloubkou od několika nanometrů po desítky nanometrů. Takto připravené struktury pak mohou vykazovat zcela nové vlastnosti díky velkému poměru plochy k objemu těchto struktur, např. větší katalytickou aktivitu. Možnost zápisu struktur v těchto rozměrech pak umožňuje jejich vysokou hustotou na povrchu, čehož se dá využít k větší kapacitě uchovaných dat nebo ke zvětšení počtu senzorů na stejně velké ploše v medicínských aplikacích.

4.1 Lokální anodická oxidace (LAO)

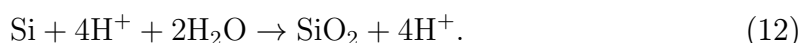
Při metodě lokální anodické oxidace (viz obrázek 46) je přivedeno napětí mezi hrot mikroskopu AFM a substrát. Hrot, na který se přivádí napětí, je speciálně upravený pokovením vrstvou vhodného kovu tak, aby byl vodivý (hrot pro EFM - electric force microscopy). Původní pokusy s lokální anodickou oxidací byly prováděny na křemíkovém povrchu. Postupně s rozvojem této metody se rozšiřovala i řada materiálů užívaných jako substrát (vrstvy Cr, Al, Ti, Nb, NiFe) [31, 32, 33, 34, 35]. Lokální anodická oxidace byla také úspěšně realizována i na dalších polovodivých materiálech jako GaAs, AlGaAs [36].

Lokální anodická oxidace může být provedena jak v kontaktním tak i poklepovém režimu AFM. Záporné napětí přivedené na hrot změní povrch polovodičového či kovového substrátu tak, že na povrchu vznikne vrstva oxidu materiálu.

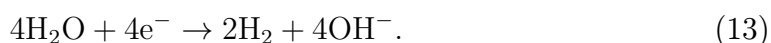


Obrázek 46: Princip metody lokální anodické oxidace [34].

Pro dosažení lokální anodické oxidace je nezbytné, aby se hrot přiblížil do takové vzdálenosti od povrchu, kdy dojde ke vzniku vodního menisku. Přivedené elektrické pole s intenzitou přes 1 V/nm dokáže hydrolyzovat vodní vrstvu mezi hrotem a povrchem za vzniku aniontů OH^- a O^{2-} . Tyto anionty jsou schopné difundovat přes rostoucí oxidovou vrstvu a dále oxidovat povrchovou vrstvu materiálu [37]. U křemíkového povrchu dochází k následující chemické reakci:



souběžně s ní probíhá reakce



Důležitými parametry, které ovlivňují zápis struktur lokální anodickou oxidací jsou především: materiál a tvar hrotu, zápisová rychlost, přivedené napětí, vzdálenost hrotu od povrchu a relativní vlhkost. Proces samotné oxidace je velmi citlivý na materiál a tvar hrotu. Hrot musí být dobře vodivý, ostrý a odolný, protože

během zápisu je extrémně namáhán vysokým elektrickým polem a vysokou vlhkostí. Nejčastěji se používají standartní hroty Si_3N_4 , na kterých je nanесena tenká vrstva kovu (Au, Cr, Pt). Tloušťka kovové vrstvy se pohybuje v řádu desítek nanometrů.

Dalším parametrem ovlivňujícím výsledné struktury je zápisová rychlost. Malá zápisová rychlost může vést k významnému rozšíření zapisovaných struktur, velká zápisová rychlost má za následek snížení výšky vznikajícího oxidu. Optimální zápisová rychlost se pohybuje okolo $0,5 \mu\text{m/s}$ [38].

Přiváděné napětí silně ovlivňuje výšku a šířku čar oxidu a pohybuje se do 10 V. Pro křemík zvyšováním napětí roste výška oxidové vrstvy lineárně až do dosažení výšky oxidu přirozenou oxidací. Zvyšováním napětí narůstá ale také šířka čar, proto je nezbytné nalezení kompromisu v šířce a výšce připravených struktur.

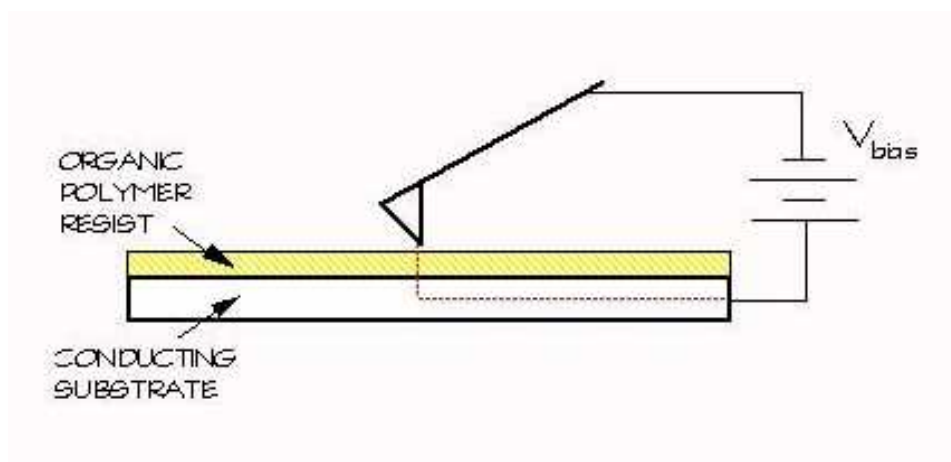
Relativní vlhkost je parametr mající zásadní vliv při anodické oxidaci. Proto, aby byly vytvořeny stabilní podmínky, bývá zařízení AFM umístěno v komoře se stálou vlhkostí vzduchu. Při malé vlhkosti nemusí oxidace fungovat spolehlivě, protože nedojde k vytvoření vodního menisku, velká vlhkost vede naopak k rozšiřování čar během zápisu.

4.2 Expozice rezistu citlivého na elektrony

Metoda expozice rezistu funguje na obdobném principu jako metoda LAO popsaná v sekci 4.1, kdy se sonda (hrot) určená pro měření pohybuje v blízkosti povrchu rezistu citlivého na elektronový svazek. Současně je z ní emitován proud, který exponuje požadovanou strukturu do citlivého materiálu.

Rezist musí být tlustý řádově desítky nanometrů tak, aby byl procházející proud dostatečně velký a mohl narušit chemické vazby v rezistu. Standardně se vrstvy elektronového rezistu pro EBL připravují metodou odstředivého lití. Protože tak tenké vrstvy je obtížné připravit touto metodou bez defektů (vzhledem k tomu, že se musí použít vysoká koncentrace rozpouštědel a vysoké otáčky, dochází často ke vzniku děr v rezistu). Z tohoto důvodu se k nanášení rezistů využívá techniky Langmuir Blodgett⁹(LB) [39]. Metoda LB umožňuje nanášet vrstvy různých materiálů z hladiny roztoku, na kterém je vytvořena monovrstva. Monovrstvy lze nanášet

⁹metoda pojmenovaná dle vynálezců Irvinga Langmuira a Katharine Burr Blodgett



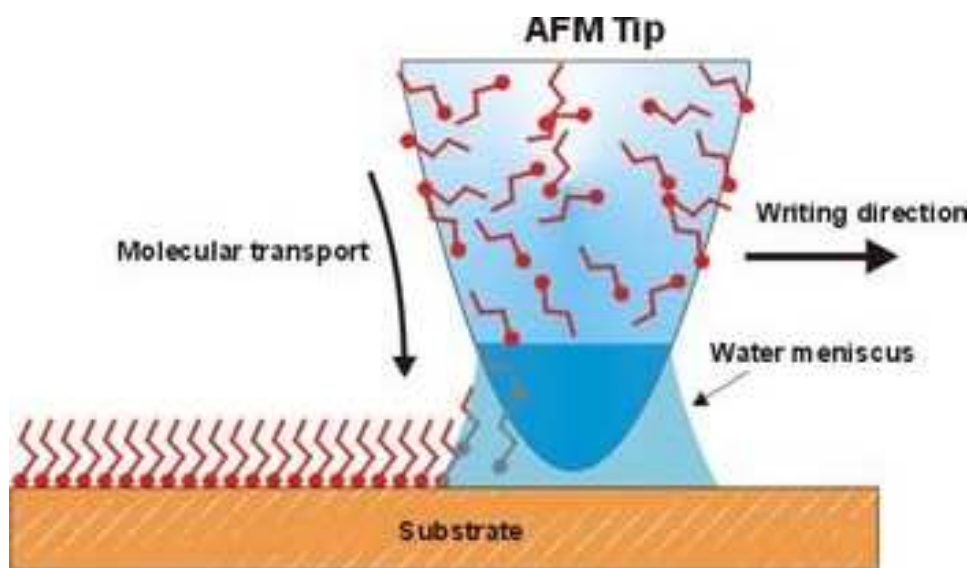
Obrázek 47: Princip expozice rezistu AFM hrotem [40].

opakovaně až do požadované tloušťky vrstvy. Další podrobnosti k metodě jsou uvedeny v [41]. Nejčastěji používaným rezistem je PMMA (polymethylmethakrylát).

Napětí přiváděné na hrot se pohybuje v desítkách voltů, proud procházející rezistem je v jednotkách pA [42]. Další parametry (materiál a tvar hrotu, zápisová rychlost, přivedené napětí, vzdálenost hrotu od povrchu a relativní vlhkost) mající vliv na expozici jsou diskutovány v předchozí sekci 4.1.

4.3 Metoda DPN (dip pen nanolithography)

Dip pen nanolitografie je zaměřena na poměrně jednoduchý úkol přenosu inkoustu (molekul nebo částic) z hrotu AFM na povrch substrátu. Stejně jako u klasického inkoustu hraje důležitou roli tvar hrotu, zápisová rychlost, složení inkoustu a materiál substrátu. Dalšími významnými parametry, které ovlivňují přenos inkoustu z hrotu na povrch jsou teplota, vlhkost vzduchu a opotřebení hrotu. Princip metody je znázorněn na obrázku 48. Hrot mikroskopu AFM je na určitou dobu smočen v inkoustu. Následně se provádí pohyb hrotu v kontaktu s povrchem,



Obrázek 48: Princip metody DPN [47].

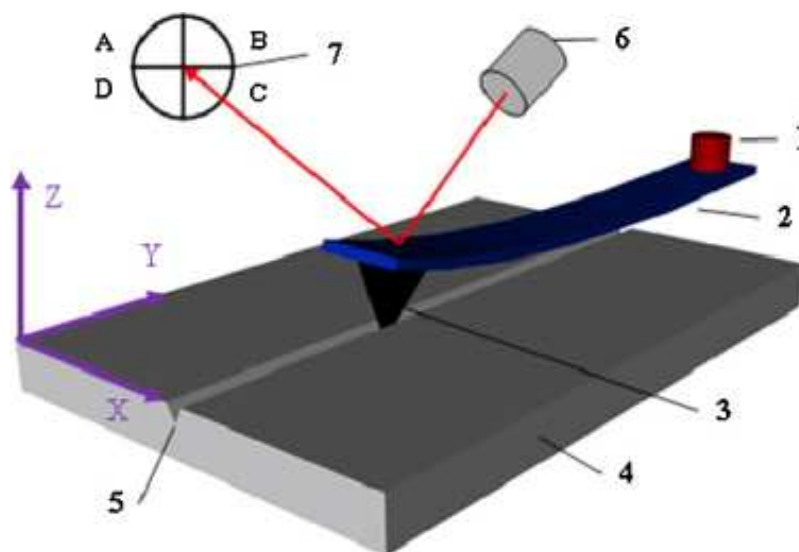
na který chceme zapisovat požadovaný tvar struktur. Během tohoto pohybu hrotu nad povrchem přechází inkoust z hrotu přes vodní meniskus, který se vytvoří mezi povrchem a hrotem, na povrch "popisovaného vzorku" a následně se molekuly inkoustu na povrchu samovolně uspořádají (SAMs - self assembled monolayers) [43]. Právě vytvoření vodního menisku je velmi významným krokem při přenosu molekul inkoustu z hrotu na povrch substrátu a bylo ověřeno pozorováním elektronovým mikroskopem [44, 45]. Tvar menisku je také ovlivněn charakterem povrchu a zásadní vliv na přenos inkoustu má hydrofobnost/hydrofilita povrchu substrátu. S rostoucí hydrofobností substrátu rapidně klesá rychlost přenosu inkoustu [46]. Kontrolou vlhkosti vzduchu lze ovlivňovat rychlost přenosu molekul. Pro větší vlhkost (větší meniskus) nastává větší přenos molekul pro hydrofilní inkousty. Pro hydrofobní inkousty se přenosová rychlost v závislosti na vlhkosti vzduchu výrazně nemění. K transportu molekul inkoustu z hrotu dochází i při zápisu v atmosféře suchého N_2 , kdy i za nulové relativní vlhkosti dojde k vytvoření menisku z vodní vrstvy adsorbované na povrchu substrátu a přenosu molekul inkoustu [48] Větší vlhkost

vzduchu vede k vytvoření většího menisku a zvětšení kapilárních sil mezi hrotem a povrchem substrátu, což má za následek větší opotřebení hrotu během zápisu. Dochází k nárůstu poloměru hrotu a zvětšování kontaktní plochy hrotu s povrchem a změnám transportní rychlosti molekul. Pomocí DPN lze realizovat struktury v sub 100 nm rozměrech, pro jejichž zápis v závislosti na široké škále substrátů (Au, GaAS, Si, SiO_x, Ge) se vybírá odpovídající inkoust (organické molekuly [49], organické polymery [50], biologické molekuly - proteiny a DNA [51], koloidní částice [52]). Metodou DPN byly realizovány jako první struktury zapsané inkoustem ODT (1-octandecanethiol - hydrofobní inkoust) a MHA (kyselina merkaptohexadekanová - hydrofilní inkoust) na polykrystalickém zlatém substrátu a tento zápis je využíván dodnes. Struktury zapsané MHA lze využít jako rezistové leptací masky.

4.4 Přímé rytí hrotem do materiálu

Hrot AFM je vtlačěn do materiálu a vrývá do něj požadovaný tvar (viz obrázek 49). Hloubka rytí je kontrolována silou působící na hrot (pomocí zpětné vazby piezokeramik). Hloubka a šířka struktury je potom závislá na přítlačné síle, počtu cyklů a rychlosti pohybu hrotu [54]. Metodou rytí lze připravit čáry nebo body široké od desítek do stovek nanometrů s hloubkou v desítkách nanometrů. Tyto struktury mohou být připraveny na různém povrchu, a to jak měkkém (polymery), tak tvrdém (kovy, oxidy, polovodiče). Další důležité faktory ovlivňující proces rytí jsou popsány v následujícím textu.

Hroty mohou mít různou tuhost a rezonanční frekvenci. Hrot připevněný k nosníku je charakterizován vlastnostmi materiálu (tvrdost, tuhost) a rozměry (poloměrem, průřezem, výškou, poměrem šířka/výška - aspect ratio). Obvykle jsou hrot a nosník vyrobeny ze stejného materiálu. K výrobě hrotu a nosníku se nejčastěji používá metody leptání. Hroty lze také vyrobit depozicí různých materiálů a následným opracováním pomocí iontového svazku. Nejčastěji používanými jsou komerčně dostupné hroty z Si a Si₃N₄ s koeficientem tuhosti od 0,01 N/m do 50 N/m a rezonanční frekvencí 5 až 300 kHz. Při rytí je nosník zatížen poměrně velkými silami (stovky nN) ve srovnání se zátěží nosníku při běžném získávání dat (pN). Proto hroty používané pro rytí mají vyšší koeficient tuhosti, vyšší rezonanční frekvenci,



Obrázek 49: Princip nanorytí (1 - piezokeramika, 2 - nosník, 3 - hrot, 4 - substrát, 5 - vyrytá čára, 6 - laser, 7 - kvadrantní fotodioda) [53].

větší tvrdost a odolnost proti opotřebení. Hroty pro rytí jsou ve většině případů používány v kontaktním módu. Rytí do materiálu lze také provádět v pokleповém režimu, ale snižuje se tím síla působící na povrch. Protože v pokleповém režimu ovlivňuje proces samotného rytí a výsledný tvar struktur i amplituda oscilací a frekvence kmitání hrotu, je tento způsob mnohem komplikovanější než v kontaktním módu. Hlavní nevýhodou je mělkost připravených struktur a opotřebení hrotu. Při běžném nastavení AFM mikroskopu je potřeba pro dosažení požadované hloubky rytí opakovat, někdy i stonásobně. Toto je časově náročné, a navíc dochází k opotřebení hrotu, které může vést k nepřijatelnému zhoršení přesnosti struktur. Opotřebení hrotu lze snížit volbou vrstvy vhodného povlaku (DLC) nebo výrobou hrotu přímo z tvrdého materiálu (diamant). Speciálně vyvinuté diamantové hroty s koeficientem tuhosti až 820 N/m umožňují dosažení hloubek až kolem 100 nm při zatížení silou 500 μN do křemíkového substrátu [55]. V poslední době byl vyvinut zápis rytím pomocí hrotu s uhlíkovou nanotrúbkou, který umožňuje zápis velmi jemných struktur. Za účelem zvýšení počtu připravených struktur, byla vyvinuta snaha o zvýšení rychlosti zápisu, která je standardně $\mu\text{m/s}$. Rychlost zápisu byla

v některých případech zvýšena natolik, že byla srovnatelná s rychlostí zápisu elektronovou litografií [56]. Při zápisu libovolnou z metod SPM nanolitografie, je také kladen důraz na celkový počet struktur zapsaných během časového intervalu. Zvýšit počet připravených struktur pomohl vývoj zápisu polem hrotů. Byly například vyvinuty metody zápisu polem až 50 hrotů. Pole hrotů je také využito pro vytváření paměťových médií (systém Millipede od IBM [57]). Při zápisu vícenásobným hrotem hraje velmi důležitou roli také tvar hrotu a jeho rozměry, které následně ovlivňují ohyb a zkroucení nosníku. Zásadní význam má také úhel naklonění hrotů při přiblížování k povrchu (pro samostatný hrot není tento faktor tak významný).

	LAO	EXPO	DPN	RYTÍ
hroty	Si, Si ₃ N ₄ pokovené (Au, Cr, Pt, PtIr)	Si, Si ₃ N ₄ pokovené (Au, Cr, Pt, PtIr)	Si, Si ₃ N ₄	Si, Si ₃ N ₄ diamant, DLC
vstupní parametry	relativní vlhkost vzdálenost napětí rozměry hrotu	relativní vlhkost vzdálenost napětí rozměry hrotu	relativní vlhkost vzdálenost inkoust rozměry hrotu hydrofilita/hydrofobnost povrchu	síla tuhost tvrdost rozměry hrotu rezonanční frekvence
materiály	Ga, GaAs, AlGaAs, Si NiFe, Ti, Cr, Al, Nb	elektronové rezisty (PMMA)	Au, SiO _x GaAs, Si, Ge	slída, polymery (PMMA, PI) Si, MgB ₂ , MoO ₃ kovy (Au, Cu, Ni, Al)
rozměry struktur	výška: desítky nm šířka: 10 až 100 nm	výška: desítky nm šířka: 10 až 100 nm	výška: jednotky nm šířka: 10 až 100 nm	výška: stovky nm šířka: 10 až 100 nm
rychlost zápisu	μm/s	μm/s	μm/s	μm/s

Obrázek 50: Přehledová tabulka metod litografie skenující sondou.

4.5 Přímé rytí hrotem do materiálu - výsledky

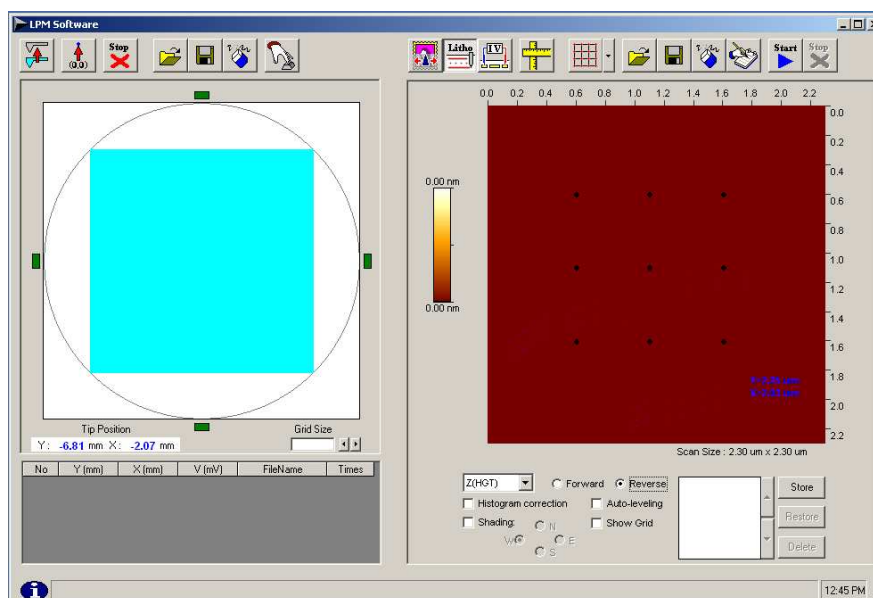
Metodě přímého rytí hrotem do materiálu bylo věnováno méně pozornosti než dalším výše uvedeným metodám litografie skenující sondou. Jak už bylo řečeno v předchozím odstavci 4.4, hloubka připravovaných struktur je závislá na parametrech jako ostrost hrotu, síla působící na hrot a samotném materiálu, do kterého se hrotem ryje. V tomto odstavci jsou prezentovány vlastní dosažené výsledky, kde je také zhodnocen vliv použitého hrotu a přítlačné síly na zápis struktur do polymerních materiálů užívaných jako elektronové rezisty (PMMA, SU-8) vykazující různou měkkost [U2].

4.5.1 Experiment

Všechny experimenty se zápisem struktur do polymerních materiálů byly prováděny na zařízení mikroskopu atomárních sil Nano-RTM od výrobce Pacific Nanotechnology, který je schopen pracovat jak v kontaktním tak i nekontaktním režimu. Pro zápis struktur lze využít komerčního softwaru LPM (obrázek 51), který umožňuje pracovat s různými tvary struktur (především jednotlivé body, čáry, mřížky a bitmapy). Pro rytí jsem používal standardní křemíkové kontaktní hroty s konstantou tuhosti 0,35 N/m, standardní křemíkové pokleповé hroty s konstantou tuhosti 55 N/m a hroty s vrstvou DLC (diamond like carbon) s konstantou tuhosti 50 N/m. Ostrost standardních křemíkových hrotů byla pod 10 nm a hrotů s vrstvou DLC 50 nm. Síla působící na hrot je vypočtena z přiloženého napětí (hodnota setpointu) na piezokeramiku, změna o 1000 mV v hodnotě setpointu znamená vertikální výchylku v pozici hrotu o 400 nm, vynásobením výchylky hrotu konstantou tuhosti dostaneme sílu působící na povrch vzorku. Jako materiály pro zápis struktur byly použity vrstvy polymerů PMMA a SU-8 s různou měkkostí, vrstvy těchto polymerů byly nanášeny odstředivým litím na křemíkových 3" podložkách.

4.5.2 Razítka připravená v kontaktním režimu

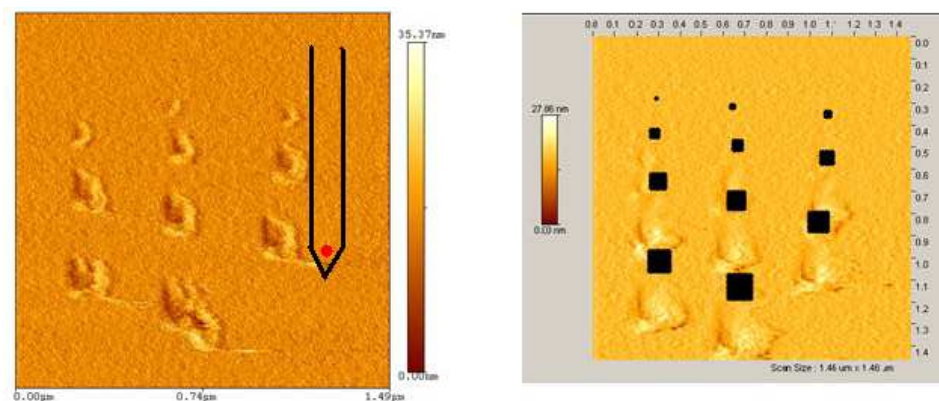
Jako první experiment se zápisem struktur do polymerních materiálů byla navržena sada dat obsahující razítka (viz obrázek 52 vlevo) od velikosti 1*1 až po ve-



Obrázek 51: Ukázka komerčního softwaru LPM umožňujícího litografický mód AFM.

likost 11×11 vpichů (celkový počet vpichů 506). Sada těchto bodů byla zapsána do vrstvy rezistu PMMA o tloušťce 200 nm nanesené na křemíkové podložce. Sada razítek byla zapsána v kontaktním režimu při hodnotě setpointu -1000 mV (přítláčná síla $0,14 \mu\text{N}$) a době přitlaku pro každý bod 500 ms. Celkový čas pro zápis této sady razítek byl asi 10 minut. Na obrázku 52 vpravo je znázorněn rozdíl mezi polohou zapsaných razítek a navrženou polohou razítek. Se zvětšujícím se počtem vpichů se zvětšuje rozměr razítka a zvětšuje se také dosažená hloubka. Během zápisu vznikají také artefakty, při kterých není zachován navržený pravoúhlý tvar razítka a skutečná poloha razítka je odchýlena od navržené pozice razítka. Orientace držáku s hrotem během zápisu byla rovnoběžná s vertikální osou v obrázku 52 vlevo. Posloupnost zápisu probíhala následujícím způsobem: odshora dolů a zleva doprava (první se zapisovaly pixely v horní řadě a následně pixely v dolních řadách daného razítka).

Na obrázku 53 vlevo je znázorněna dosažená hloubka jednotlivých razítek v závislosti na velikosti zapisovaných razítek. V grafu je uvažována jak hloubka

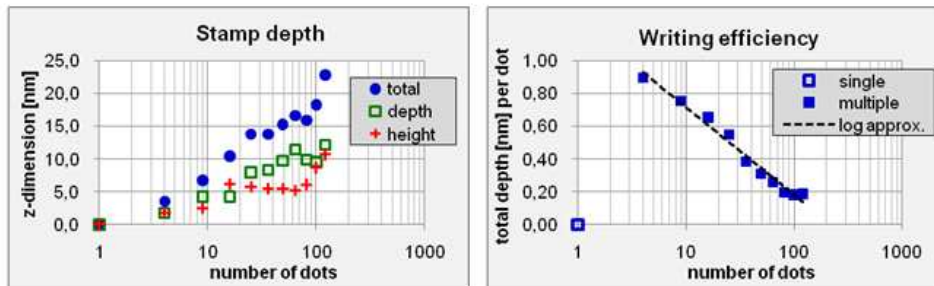


Obrázek 52: Sada razítek různých velikostí (vlevo - znázorněna i orientace hrozu během zápisu) a srovnání navrženého a zapsaného tvaru (vpravo).

(depth) i výška (height) vytlačeného materiálu, a dále součet těchto hodnot (total). Z tohoto grafu je zřejmé, že pro dosažení výšky reliéfu 10 nm je nutné za daných podmínek provést zápis 16 vpichů. V obrázku 53 vpravo je vyhodnocena efektivita zápisu jako poměr mezi celkovou hloubkou razítka a počtem vpichů v razítku. Hloubka razítka se zvětší jen minimálně se zvětšující se velikostí razítka, a proto je výhodnější použití razítka s nižším počtem vpichů, kdy razítko je dobře viditelné. Za daných podmínek (ostrost hrotu, setpoint, doba přitlaku, polymer a skenovací režim) je z obrázku 53 vpravo zjevné, že tento případ nastane pro razítko 2*2 s nominální navrženou velikostí 20*20 nm². Při změně parametrů zápisu lze tuto sadu razítek v její zjednodušené formě použít pro nastavení vhodných parametrů rytí hrotem.

4.5.3 Čáry v kontaktním a poklepovém režimu

Pro určení rozdílnosti rytí v kontaktním a poklepovém režimu byla připravena sada čar pro zápis do polymeru PMMA. Data obsahují sadu 5 čar se zvyšujícím se počtem opakování, první čára je opakována jednou, poslední pětkrát. Na obrázku 54 (orientace hrotu v průběhu zápisu je stejná jako v obrázku 52) lze srovnat výsledky

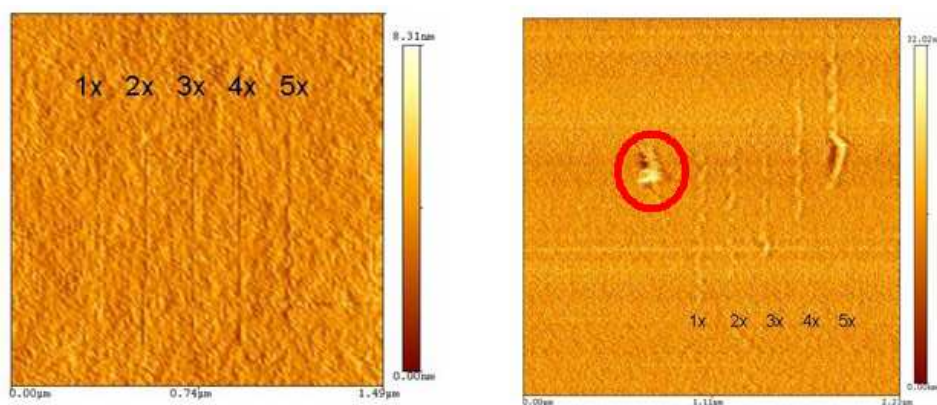


Obrázek 53: Hloubka razítek (vlevo) a optimální velikost razítka (vpravo).

dosažené zápisem stejných dat v kontaktním a poklepovém režimu SPM. V obou režimech byl přítlak hrotu nastaven na hodnotu - 1000 mV a rychlost zápisu na 10 nm/s. Hloubka čar v poklepovém režimu je 1 nm a šířka 100 nm. Ve srovnání s čarami v kontaktním režimu, kde hloubka čar dosahuje od 6 nm do 19 nm a jejich šířka se pohybuje v rozmezí od 300 nm do 500 nm, jsou čáry v poklepovém režimu užší a mělké. A na rozdíl od čar zapsaných v kontaktním režimu mají přesnější pozici vůči požadovanému tvaru, což je patrné ze srovnání obou obrázků.

4.5.4 Standardní a DLC hroty

Pro další experiment v kontaktním režimu byl použit polymer SU-8, který vykazuje lepší vlastnosti (měkkost) než PMMA a očekává se větší dosažená hloubka zapsaných struktur. Sada navržených dat je složena z mřížky bodů 3*3 se vzdáleností jednotlivých bodů 500 nm (vstupní soubor pro zápis mřížky 3*3 pomocí softwaru LPM viz Příloha C). Sada těchto bodů byla zapsána do vrstvy SU-8 (tloušťka 200 nm) nanesené na křemíkové podložce. Hodnota setpointu byla nastavena na -1000 mV (přítlačná síla standardního hrotu tedy $0,42 \mu\text{N}$) a doba přítlaku byla 500 ms. Navržená data byla zapsána standardním křemíkovým hrotem (viz obrázek 55 vlevo - každý bod opakován 5x) a hrotem s DLC vrstvou (viz obrázek 55 vpravo - bez opakování). Při použití standardního křemíkového hrotu byla hloubka

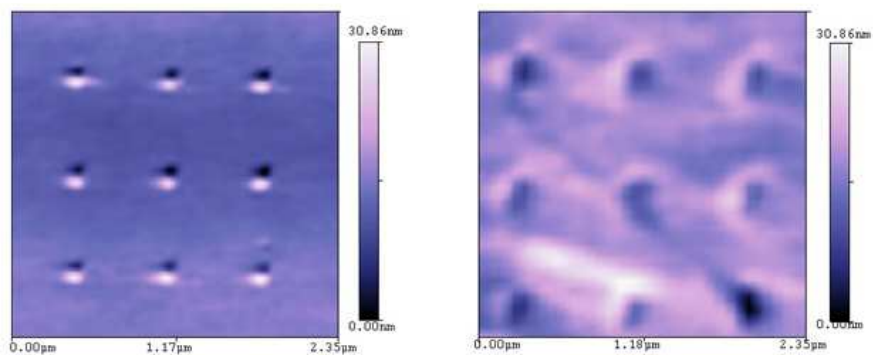


Obrázek 54: Srovnání zápisu čar v poklepovém režimu (vlevo) a v kontaktním režimu (vpravo) - vytvořený artefakt byl zřejmě způsoben při přibližování hrotu k povrchu před vlastní litografií.

vpichů 9 nm, šířka 64 nm a rozteč mezi body 650 nm. Hloubka bodů dosažená rytím hrotem s DLC vrstvou byla 15 nm (maximum 18 nm v pravém dolním rohu mřížky), šířka 340 nm a rozteč bodů od sebe 760 nm.

4.5.5 Shrnutí

Pomocí přímého rytí hrotem do materiálu jsme schopni s použitím standardního křemíkového hrotu připravit struktury v sub 100 nm rozměrech jak v kontaktním tak poklepovém režimu. Při srovnání poklepového a kontaktního režimu můžeme říci, že čáry připravené v poklepovém režimu jsou lépe pozicovány a jsou užší než čáry zapsané v kontaktním režimu. Vychýlení pozic čar od požadované polohy navržené struktury může být zapříčiněno tečením piezokeramik v průběhu zápisu s ohledem na nízkou rychlost zápisu struktur. Měření (skenování) povrchu bylo prováděno stejným hrotem jako zápis jednotlivých bodů, přičemž nastavený přítlak (setpoint) odpovídal hodnotě používané při běžných měřeních (např. v kontaktním režimu -1900 mV). Bodová mřížka připravená do vrstvy SU-8 standardním křemíkovým hrotem i hrotem s DLC vrstvou vykazuje pravidelný tvar ve srovnání s razítky



Obrázek 55: Mřížka 3x3 v SU-8 - zápis křemíkový hrotem (vlevo) a hrot s DLC vrstvou (vpravo).

zapsanými do vrstvy PMMA. I když jsou body v mřížce při zápisu standardním křemíkovým hrotem opakovány 5x, jejich hloubka je menší než hloubka dosažená při zápisu hrotem s DLC vrstvou.

Závěr

Práce byla zaměřena na litografické techniky zápisu struktur. První část práce se věnuje technologii elektronové litografie a specifickému typu zápisu tvarovaným svazkem. V této části je uveden popis technologie zpracování elektronových rezistů, včetně procesu vyvolání a následných dalších procesů zpracování. Jsou zde vyhodnoceny a porovnány testy citlivosti pro dvě různé metody měření. Z dosažených výsledků je patrné, že navržené testy jsou ekvivalentní a lze jich obou využít ke zjištění kontrastu a určení citlivosti daného systému rezistu a vývojky za určité teploty.

V druhé kapitole se práce věnuje popisu metody AFM, která byla nejčastěji využívána pro vyhodnocování struktur připravených elektronovou litografií. Je patrné, že tuto metodu lze použít pro mezioperační kontrolu v průběhu jednotlivých expozičních vyvolání, protože metodou SEM by došlo k další expoziční rezistu a metoda také nevyžaduje další úpravu povrchu pokovením.

Třetí část je věnována jevu blízkosti, který při expoziční elektronovým svazkem hraje důležitou roli a může zásadně ovlivnit rozlišení exponovaných struktur. Jsou zde navrženy expoziční testy, které měly sloužit k určení jednotlivých parametrů rozptylové funkce. Z navržených testů se podařilo určit hodnotu dopředného rozptylu pro jednotlivé metody vyhodnocení (AFM, SEM, CLSM, OM). Průměrná hodnota vycházející z jednotlivých měření je 120 nm, což je asi 4x více než teoretická hodnota pro tloušťku rezistu 160 nm. Z následně upravených testů byl určen parametr α metodou AFM (85 nm) a metodou SEM (62 nm). Z těchto měření vychází parametr dopředného rozptylu 2 až 3x větší než teoretická hodnota pro tloušťku 170 nm. Předpokládám tedy, že rozdíl mezi teoretickou hodnotou a naměřenými daty je způsoben rozdílností typem zápisu, kdy litograf BS600 využívá tvarovaného svazku a parametr α zahrnuje další jevy jako například rozmazání svazku na tvarovacích clonách. Byly exponovány testy, které sloužily k zjištění funkčnosti softwaru pro korekci jevu blízkosti. V modelu pro softwarovou korekci byly použity koeficienty uvedené v literatuře [29] a jak je patrné z dosažených výsledků, korekční software dokáže ošetřit expoziční čar se šířkou větší než 300 nm tak, aby skutečná šířka čar dobře korespondovala s jejich navrženou šířkou.

V poslední části se práce zabývá metodami nanolitografie a především přímým rytím hrotem do materiálu. Touto metodou se mi podařilo připravit s použitím standardního křemíkového hrotu struktury v sub 100 nm rozměrech jak v kontaktním tak poklepovém režimu. Lze říci, že čáry připravené poklepovým režimem jsou lépe pozicovány a jsou užší než čáry zapsané v kontaktním režimu. Podařilo se mi také připravit bodovou mřížku do vrstvy SU-8 standardním křemíkovým hrotem i hrotem s DLC vrstvou. I přesto, že jsou body v mřížce při zápisu standardním křemíkovým hrotem opakovány 5x, vykazují menší hloubku než při zápisu hrotem s DLC vrstvou.

Seznam publikační činnosti

[U1] V. Kolařík, F. Matějka, M. Horáček, M. Matějka, M. Urbánek, Nanolitografie a kompenzace magnetického pole v prostředí s průmyslovým rušením, *Jemná mechanika a optika*, **11-12**, 312-316, ISSN 0447-6441, 2011.

[U2] M. Urbánek, V. Kolařík, M. Matějka, SPM Nanoscratching in the Sub 100 nm Resolution. In NANOCON 2011 Conference proceedings. 2011. od s. 57. ISBN 978-80-87294-23-9.

[U3] M. Matějka, M. Urbánek, V. Kolařík, Scanning Probe Microscopy: Measuring on Hard Surfaces. In NANOCON 2011 Conference proceedings. 2011. od s. 113. ISBN 978-80-87294-23-9.

[U4] P. Urbánek, I. Kuřitka, M. Urbánek, The Influence of Thickness and Used Solvent on Luminescence and Photodegradation of Polysilane Thin Films. In NANOCON 2011 Conference proceedings. 2011. od s. 34-35. ISBN 978-80-87294-23-9.

[U5] J. Zobačová, E. Hueger, M. Urbánek, J. Polčák, L. Frank, Imaging of SiCN thin films on silicon substrate in the scanning low energy electron microscope. In proceedings of the 10th IUVESTA international summer school, 2011, 30.5.- 4. 6. 2011, Devět Skal , Czech Republic , Editors: A. Fejfar, A. Vetushka. ISBN 978-80-260-0619-0.

[U6] E. Mikmeková, M. Urbánek, T. Fořt, R. Di Mundo, Effect of Hydrogen on the Properties of Amorphous Carbon Nitride Films. 2010 International Conference on Manufacturing Science and Technology (ICMST 2010). Chengdu : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2010. S. 291-295. ISBN 978-1-4244-8759-2. [International Conference on Manufacturing Science and Technology - ICMST 2010. Kuala Lumpur (MY), 26.11.2010-28.11.2010]

- [U7] M. Urbánek, V. Kolařík, S. Král, M. Dvořáková, Determination of proximity effect forward scattering range parameter in E-beam lithography. In proceedings of 12th International seminar. Skalský dvůr: ISI ASCR, 2010. p.67-68. ISBN 978-80-254-6842-5.
- [U8] M. Urbánek, T. Fořt, E. Flodrová, Preparation of samples with diffraction grating for SEM. In Proceedings of IDS 2010. Smolenice: MTF STU, p.516 - 518, 2010.
- [U9] V. Kolařík, M. Horáček, F. Matějka, M. Matějka, M. Urbánek, S. Král, Elektronový litograf s urychlovacím napětím 15kV a tvarovaným svazkem do 25 nm - BS600/TZ-0. [E-Beam Writer at 15kV with Shaped Electron Beam of Minimum Size 25 nm BS600/TZ-0.] 2009.[prototyp]
- [U10] V. Kolařík, F. Matějka, M. Horáček, B. Lencová, M. Matějka, S. Král, M. Urbánek, P. Mikšík, J. Vašina, R. Horák, Technologie zápisu elektronovým svazkem proměnné velikosti 66 - 2100 nm. [E-Beam Writing Technology with Variable Beam Size of 66 - 2100 nm.], 2009. [ověřená technologie]
- [U11] V. Kolařík, F. Matějka, B. Lencová, S. Kokrhel, M. Horáček, T. Radlička, M. Urbánek, L. Daněk, Zápis tvarovaným elektronovým svazkem. [Writing System with Shaped Electron Beam.] Jemná mechanika a optika. Roč. 53, č. 1 (2008), s. 11-16. ISSN 0447-6441.
- [U12] M. Urbánek, Reliéfní struktury připravené pomocí elektronové litografie. In PDS 2006 - Sborník prací prezentovaných na Seminári doktorandů oboru elektronová optika (2006). -(Müllerová, I.). - Brno, Ústav přístrojové techniky.-s.51-54. ISBN 80-239-7957-4.

[U13] V. Kudrle, A. Tálský, M. Urbánek, J. Janča, Increase of dissociation degree in afterglow due to admixtures. *Acta Physica Slovaca*, vol. 53, No. 5 p. 397 - 400. ISSN 0323-0465. 2003.

[U14] V. Kudrle, A. Tálský, M. Urbánek, Increase of dissociation degree in afterglow due to admixtures. In *Proceedings of the XIVth SAPP*. Bratislava: MFF UK, 2003. p.120-121. ISBN 80-8040-195-0.

Seznam použité literatury

- [1] R. Choudhury, Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication: Vol 1: Microlithography, ISBN 0-8194-2378-5, 1997.
- [2] V. Kolařík, Elektronový litograf BS 600, Československá akademie věd, Zpravodaj, Ústav Přístrojové Techniky Brno, 1988.
- [3] S. Krátký, Studium vlastností periodických mřížek vytvořených elektronovou litografií, Bakalářská práce, FEKT, VUT Brno, 2010.
- [4] Z. Cui, Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits, Springer, New York, ISBN 978-0-387-75577-9, 2008.
- [5] F. Matějka, Elektronová litografie: Teoretické základy a rezistový proces. Laboratoř elektronové litografie, Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., dostupné z: http://www.isibrno.cz/teams/EBL/ebl_fm.pps, [cit. 2012-02-10], březen 2008.
- [6] K. Nidaira, EB positive resist for mask process, FEP-171, 2002.
- [7] NANOTM PMMA and Copolymer, dostupné z <http://www.microchem.com/Prod-PMMA.htm>. [cit. 2011-12-13], prosinec 2011.
- [8] SU-8 Permanent Epoxy Negative Photoresist, PROCESSING GUIDELINES FOR: SU-8 2000.5, SU-8 2002, SU-8 2005, SU-8 2007, SU-8 2010 and SU-8 2015, dostupné z <http://www.microchem.com/Prod-SU82000.htm>. [cit. 2011-12-13], prosinec 2011.
- [9] B. Cui, T. Veres, High resolution electron beam lithography of PMGI using solvent developers, *Microelectronic Engineering*, **85**, 810-813, 2008.
- [10] G. Binnig, H. Rohrer, Scanning tunneling microscopy, *Helv. Phys. Acta* ,**55**, 726-735, 1982.

-
- [11] G. Binnig et al., 7x7 reconstruction on Si (111) resolved in real space, *Phys. Rev. Lett.* **50** (2), 120-123, 1983.
- [12] E. Meyer, H. J. Hug, R. Bennewitz, Scanning Probe Microscopy, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-43180-2, 2004.
- [13] B. K. Annis et al., Application of atomic force microscopy to a block copolymer and an extended chain polyethylene, *Macromol. Chem. Rapid Commun.* **13**, 169-172, 1992.
- [14] S. N. Magonov, D. H. Reneker, Characterization of polymer surfaces with atomic force microscopy, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **27**, 175-222, 1997.
- [15] Q. Lan, G. Haugstad, Characterization of polymer morphology in polyurethane foams using atomic force microscopy, *J. of Applied Polymer Science*, **121**, 2644-2651, 2011.
- [16] H. Kaczmarek, P. Galka, A. Szalla, Atomic force microscopy studies of poly(methylmethacrylate) doped with photoinitiator, *J. of Applied Polymer Science*, **123**, 2458-2466, 2011.
- [17] J. M. Soletti et al., Characterisation of mixed miscible and nonmiscible phospholipid Langmuir-Blodgett films by atomic force microscopy. *J. Vac. Sci & Technol. B* **14**, 1492-1497, 1996.
- [18] A. P. Gunning et al., Atomic force microscopy of interfacial proteins films. *J. Colloid & Interface Science* **183**, 600-602, 1996.
- [19] Y. Fang, J. Yang, The growth of bilayer defects and the induction of interdigitated domains in the lipid loss process of supported phospholipid bilayers. *Biochim Biophys. Acta* **1324**, 309-319, 1997.
- [20] AFM NanoR™ User's Manual.
- [21] B. Stegemann et al., Spherical AFM probes for adhesion force measurements on metal single crystals, In: Méndez-Vilas A, Díaz J, editors. Modern Research and

- Educational Topics in Microscopy, Series 3. Vol. 2. Badajoz, Spain: Formatex; 820-827, 2007.
- [22] V. J. Morris, A. R. Kirby, A. P. Gunning, Atomic Force Microscopy, Imperial College Press, ISBN 1-86094-199-0, 2001.
- [23] R. Kubínek, M. Vůjtek, M. Mašláň. Mikroskopie skenující sondou. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci, ISBN 80-244-0602-0, 2003.
- [24] NanoRuleTM 2.0 User's Manual.
- [25] W. Hauffe, Production of Microstructures by Ion Beam Sputtering, Chapter 6 in Sputtering by Particle Bombardment III (Eds. R. Behrisch and K. Wittmack), Springer Ser. Topics in Applied Physics, Vol. 64 (Springer - Verlag Heidelberg New York 305, 1991.
- [26] R. Alani, W. Hauffe, R.J. Mitro, Microsc. Microanalysis **6**, Suppl.2 496, 2000.
- [27] G. Owen, Methods for proximity effect correction in electron lithography, *Journal of Vacuum Science Technology B*, **8(6)**, 1889-1892, 1990.
- [28] E. Seo, B. K. Choi, O. Kim, Determination of proximity effect parameters and the shape bias parameter in electron beam lithography, *Microelectronic Engineering*, **53**, 305-308, 2000.
- [29] A. van de Kraats, Proximity Effect in E-Beam Lithography, dostupné z <http://nanolithography.gatech.edu/proximity.pdf>, [cit. 2006-06-08].
- [30] A. W. Knoll et al., Probe-based 3D nanolithography using self-amplified depolymerization polymers, *Adv. Mater.*, **22**, 3361 - 3365, 2010.
- [31] H. Sugimara et al., Nanofabrication of titanium surface by tip-induced anodization in scanning tunneling microscopy, *Japanese Journal of Applied Physics*, **32**, 553, 1993.

- [32] E. S. Snow, P. M. Campbell, AFM fabrication of sub-10-nanometer metal-oxide devices with in situ control of electrical properties, *Science*, **270**, 1639-1641, 1995.
- [33] J. Shirakushi et al., Single-electron charging effects in Nb/Nb oxide-based single-electron transistors at room temperature, *Applied Physics Letters*, **72**, 1893-1895, 1998.
- [34] Y. Takemura, J. Shirakashi, AFM lithography for fabrication of magnetic nanostructures and devices, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **304**, 19-22, 2006.
- [35] F. Lopour et al., Application of AFM in microscopy and fabrication of micro/nanostructures, *Surf. Interface Anal.*, **34**, 352-355, 2002.
- [36] M. Bartosik et al., The influence of humidity on the kinetics of local anodic oxidation, *Journal of Physics: Conference Series*, **61**, 75-79, 2007.
- [37] E. S. Snow, P. M. Campbell, Fabrication of Si nanostructures with an atomic force microscope, *Applied Physics Letters*, **64**, 1932-1934, 1994.
- [38] A. E. Gordon et al., Mechanism of surface anodization produced by scanning probe microscopes, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **13**, 2805-2808, 1995.
- [39] P. Davidsson et al., Nanolithography by electron exposure using atomic force microscope, *Microelectronic Engineering*, **45**, 1-8, 1999.
- [40] Exposure of resist, dostupné z http://www.stanford.edu/group/quate_group/LithoFrame.html, [cit. 2012-03-13], březen 2012.
- [41] Langmuir-Blodgett film, dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Langmuir-Blodgett_film, [cit. 2012-03-13], březen 2012.
- [42] C. Martin et al., Nanolithography on thin layers of PMMA using atomic force microscopy, *Nanotechnology*, **16**, 1016-1022, 2005.

- [43] Z. Liu, Dip-Pen Nanolithography, Department of Chemistry, University of Alabama, dostupné z http://www.bama.ua.edu/chem/seminars/student_seminars/fall05/papers - f05/liu-sem.pdf, [cit. 2007-04-10], 2005.
- [44] B. L. Weeks, M. W. Vaughn, J. J. DeYoreo, Direct imaging of meniscus formation in atomic force microscopy using environmental scanning electron microscopy, *Langmuir*, **21**, 8096-8098, 2005.
- [45] B. L. Weeks, J. J. DeYoreo, Dynamic meniscus growth at a scanning probe tip in contact with a gold substrate, *J. Phys. Chem. B*, **110**, 10231-10233, 2006.
- [46] J. R. Hampton, A. A. Dameron, P. S. Weiss, Double-ink dip-pen nanolithography studies elucidate molecular transport, *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 1648-1653, 2006.
- [47] D. S. Ginger, H. Zhang, C. A. Mirkin, The evolution of dip-pen nanolithography, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 30-45, 2004.
- [48] P. E. Sheehan, L. J. Whitman, Thiol diffusion and the role of humidity in "dip-pen nanolithography", *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 156404-156107, 2002.
- [49] R. D. Piner et al., "Dip-Pen" nanolithography, *Science*, **283**, 661-663, 1999.
- [50] B. W. Maynor et al., Direct writing of polymer nanostructures: poly(thiophene) nanowires on semiconducting and insulating surfaces, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 522-523, 2002.
- [51] L. M. Demers et al., Direct patterning of modified oligonucleotides on metals and insulators by Dip-Pen Nanolithography, *Science*, **296**, 1836-1838, 2002.
- [52] J. C. Garno et al., Precise positioning of nanoparticles on surfaces using scanning probe microscopy, *Nano Lett.*, **3**, 389-395, 2003.
- [53] Z. Dong et al., Development of CNT-ISFET based pH sensing system using atomic force microscopy, *Sensors and Actuators A*, **173**, 293-301, 2012.

-
- [54] M. Gregor et al., Preparation of variable-thickness MgB₂ thin film bridges by AFM nanolithography, *Physica C*, **435**, 82-86, 2006.
- [55] N. Kawasegi et al., Nanomachining of silicon surface using atomic force microscope with diamond tip, *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, **128**, 723-729, 2006.
- [56] N. Kodera, M. Sakashita, T. Ando, A dynamic PID controller for high-speed atomic force microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 083704, 2006.
- [57] Millipede memory, dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Millipede_memory, [cit. 2012-03-13], březem 2012.
- [58] C. F. Quate, Scanning probes as a lithography tool for nanostructures, *Surface Science*, **386**, 259-264, 1997.
- [59] A. A. Tseng, Tip-based nanofabrication: Fundamentals and applications, Springer, New York, ISBN 978-1-4419-9898-9, 2011.

Seznam obrázků

1	Schéma optické soustavy litografu Tesla BS 600 a tvarovacího systému [3].	3
2	Schéma jednotlivých kroků při zpracování rezistu	6
3	Závislost tloušťky naneseného rezistu FEP-171 na otáčkách odstředivky pro jeho různé viskozity [6].	7
4	Efektivní průměr svazku v závislosti na penetrační hloubce.	9
5	Křivka citlivosti rezistu PMMA 950k MW ($30 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$) - tloušťka 201 nm, vývojka n-amylacetát, doba vyvolávání 210 sekund, $T = 22^\circ\text{C}$. 10	10
6	Test citlivosti rezistu určený k měření profilometrem.	11
7	Test citlivosti určený k měření pomocí AFM	11
8	Srovnání citlivosti PMMA 950k MW změřené na testu určeném pro AFM a testu určeném na měření profilometrem.	12
9	Křivky citlivostí pro a) pozitivní rezist, b)negativní rezist [5].	14
10	AFM mikroskop Nano-R TM	16
11	Detail skenovacího modulu mikroskopu Nano-R TM	17
12	AFM hrot	18
13	Si wafer s kontaktními AFM hroty	18
14	Princip snímání pozice raménka laserem [20].	19
15	Znázornění působící výsledné síly mezi hrotem AFM a povrchem vzorku [23].	21
16	Ukázka vyrovnání obrazu na přímé mřížce v softwaru NanoRule.	23
17	Ukázka odečtení hloubky přímé mřížky v softwaru NanoRule (hloubka 235 nm).	24
18	Snímky z konfokálního mikroskopu: vlevo po broušení, vpravo po iontovém leptání.	25
19	Komora iontového leptacího zařízení.	26
20	Snímky ze SEM: vlevo viditelné jednotlivé vrstvy, vpravo odečtení periody a hloubky UV mřížky (zvětšení 50k).	26
21	3D AFM snímek difraktivní mřížky pro UV oblast v niklu.	27

22	Graf MTF funkce pro různé hodnoty urychlovacího napětí (tloušťka rezistu 500 nm).	30
23	Vlevo - schéma exponovaného tvaru, vpravo - průběh intenzity v blízkosti bodu x_m	32
24	Ukázka testovací struktury měřená pomocí AFM.	33
25	Ukázka testovací struktury zobrazená konfokálním mikroskopem. . .	34
26	Celkový náhled testovací struktury zobrazený optickým mikroskopem Leitz, pro vyhodnocení byly použity snímky s větším zvětšením.	35
27	Ukázka testovací struktury zobrazená SEM.	36
28	Závislost parametru α na šířce prostřední čáry pro jednotlivé metody měření.	37
29	Srovnání výsledků jednotlivých metod.	37
30	Náhled na simulaci upravené testovací struktury (ukázka dat pro expozici testovací struktury viz Příloha A).	38
31	Testovací struktura zobrazená pomocí SEM - k odečtení hodnot pološírek byly použity snímky s větším zvětšením.	39
32	Ukázka AFM měření testovací struktury.	40
33	Odečtení pološířky z měření AFM.	41
34	Odečtení pološířky z měření SEM.	42
35	Způsob odečtení pološířky středové čáry.	43
36	Graf závislosti expoziční dávky na pološířce čáry - měření AFM. . .	43
37	Graf závislosti expoziční dávky na pološířce čáry - měření SEM Tescan Vega.	44
38	Srovnání měření AFM a SEM.	44
39	Popis testu k ověření funkčnosti softwarového modulu korekce jevu blízkosti.	46
40	Znázornění vlivu jevu blízkosti na testovací strukturu.	47
41	Simulace testu k ověření funkčnosti softwarového modulu korekce jevu blízkosti s upravenými dávkami.	47
42	Ukázka AFM měření testovací struktury.	48

43	Test bez korekce jevu blízkosti.	48
44	Test s korekcí jevu blízkosti.	49
45	Znázornění rozdílu mezi skutečnou a navrženou šířkou čáry.	49
46	Princip metody lokální anodické oxidace [34].	51
47	Princip expozice rezistu AFM hrotem [40].	53
48	Princip metody DPN [47].	54
49	Princip nanorytí (1 - piezokeramika, 2 - nosník, 3 - hrot, 4 - substrát, 5 - vyrytá čára, 6 - laser, 7 - kvadrantní fotodiody) [53].	56
50	Přehledová tabulka metod litografie skenující sondou.	58
51	Ukázka komerčního softwaru LPM umožňujícího litografický mód AFM.	60
52	Sada razítek různých velikostí (vlevo - znázorněna i orientace hrozu během zápisu) a srovnání navrženého a zapsaného tvaru (vpravo). . .	61
53	Hloubka razítek (vlevo) a optimální velikost razítka (vpravo).	62
54	Srovnání zápisu čar v poklepovém režimu (vlevo) a v kontaktním režimu (vpravo) - vytvořený artefakt byl zřejmě způsoben při přib- ližování hrotu k povrchu před vlastní litografií.	63
55	Mřížka 3x3 v SU-8 - zápis křemíkový hrotem (vlevo) a hrot s DLC vrstvou (vpravo).	64

Příloha A

Ukázka vstupního souboru upraveného expozičního testu k určení parametrů jevu blízkosti

BEGC

test proximity s carami 0.5 um a mezerou 0.5 um, okolo obdelnik od 0.5 do 3 um
s krokem po 0.5 um test slozen ze dvou tvaru ohranicenych obdelnikem
(250um*400um), celkovy rozmer testu (0.9mm*0.4mm) relativni casy v rozmezi
50 az 200 % - nastaveno pro davku 5 uC
ENDC

```
CELE 20
#SetFastDefl 4
OKNO 16384 16384
JU01
DEXY 5000, 0
JU01
STOP

MOT1 1
FOR P20 = 0 TO 6 STEP 1
JU02
END
CALL RAMECEK
RETR

MOT2 2
CALL ZNACKY
FOR P10 = 50 TO 140 STEP 5
TIME P10
FOR P30 = 1 TO P20
$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 5 0
END
DEXY 5 0
$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 10 0
FOR P30 = 1 TO P20
$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 5 0
END
DEXY 0,20
P21 = 10 * P20 + 15
DEXY -P21 0
END

FOR P10 = 150 TO 200 STEP 10
TIME P10
FOR P30 = 1 TO P20
$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 5 0
END
DEXY 5 0

$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 10 0
FOR P30 = 1 TO P20
$OBD 5,5,1,4,0,0,5
DEXY 5 0
END
DEXY 0,20
P21 = 10 * P20 + 15
DEXY -P21 0
RETR

RAMECEK:
DEXY -1650,1500
TIME 200
$OBD 20,20,125,8,0,20,40
DEXY 0,-3700
$OBD 20,20,8,200,0,40,20
DEXY 0,0
$OBD 20,20,125,8,0,20,40
DEXY 2200,0
$OBD 20,20,8,200,0,40,20
DEXY 0 2200
RETR

ZNACKY:
TIME 160
$OBD 5,5,1,1,0,0,0
DEXY -5,80
$OBD 5,5,2,1,0,5,5
DEXY -5,100
$OBD 5,5,3,1,0,5,5
DEXY -5,100
$OBD 5,5,2,1,0,10,5
DEXY -5,100
$OBD 5,5,1,1,0,0,0
DEXY 35,-380
RETR

.END 20
```

Příloha B

Ukázka vstupního souboru k ověření korekce jevu blízkosti

BEGC

test proximity s carami od 0.2 do 1 um a mezerou 0.5 um, expozice okoli od 0 do 100 % test slozen ze dvou tvaru ohranicenych obdelnikem (250um*400um), celkovy rozmer testu (0.9mm*0.4mm) ENDC

```
CELE 20
#proxi on
#SetFastDefl 4
OKNO 16384 16384
DEXY 0,-1500
JU01
DEXY 5600, 0
JU01
STOP

MOT1 1
////čára 0.1 um
$OBD 1,2,1,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 61,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -81,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 36,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -31,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 200, -200
//// čára 0,2 um
$OBD 2,2,1,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 62,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0

$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -82,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 37,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -32,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 200, -200
//// čára 0.3 um
$OBD 3,2,1,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 63,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -83,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 38,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -33,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 200, -200
////čára 0.4 um
```

```

$OBD 2,2,2,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 64,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -84,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 39,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -34,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -350,-550
////druhá řada
////čára 0.5 um
$OBD 2.5,2,2,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 65,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -85,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 40,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -35,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 200, -200
////čára 0.7 um
$OBD 2.5,2,3,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 67,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -87,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 42,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -37,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 200, -200
////čára 1.0 um
$OBD 2,2,5,150,0,0,0
DEXY -55,50
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 70,0
$OBD 5,5,10,10,0,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY 35,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -90,0
$OBD 5,5,7,10,0,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY 12.5,50
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 45,0
$OBD 5,5,5,10,0,0
DEXY 0,50
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY 10,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
DEXY -40,0
$OBD 5,5,2,10,0,0
DEXY -2.5,0
$OBD 2.5,5,1,10,0,0
CALL RAMECEK
RETR
RAMECEK:
DEXY -1650,1500
TIME 200
$OBD 20,20,125,8,0,20,40
DEXY 0,-3700
$OBD 20,20,8,200,0,40,20
DEXY 0,0
$OBD 20,20,125,8,0,20,40
DEXY 2200,0
$OBD 20,20,8,200,0,40,20
DEXY 0 2200
RETR
.END 20

```

Příloha C

Ukázka vstupního souboru pro nanolitografii - mřížka 3x3 body

```
[LithoData]
DataNum=1
Data0001
UseData=1
DrawPattern=2
X1um=0.607243
Y1um=0.607243
X2um=1.609195
Y2um=1.609195
Rum=0
Xmax=2.349429
Ymax=2.349429
Setpoint=-1000
dSetpoint=0
Voltage=0
dVoltage=0
HoldTime=500
dHoldTime=0
ScanSpeed=0
GridPattern=0
GridXpoints=3
GridYpoints=3
PolyPattern=0
PolyPoints=0
Rotate=0
PointNum=9
Point0001=0.607243, 0.607243, -1000, 0, 500
Point0002=1.108219, 0.607243, -1000, 0, 500
Point0003=1.609195, 0.607243, -1000, 0, 500
Point0004=0.607243, 1.108219, -1000, 0, 500
Point0005=1.108219, 1.108219, -1000, 0, 500
Point0006=1.609195, 1.108219, -1000, 0, 500
Point0007=0.607243, 1.609195, -1000, 0, 500
Point0008=1.108219, 1.609195, -1000, 0, 500
Point0009=1.609195, 1.609195, -1000, 0, 500
```

pattern č.2 odpovídá mřížce
počáteční x-ová souřadnice zápisu
počáteční y-ová souřadnice zápisu
koncová x-ová souřadnice zápisu
koncová y-ová souřadnice zápisu

velikost pole
velikost pole
nastavení přítlačné síly

doba přítlaku

počet bodů mřížky v ose X
počet bodů mřížky v ose Y

celkový počet bodů mřížky