



Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Bakalářská práce

Využití SPM přístrojů NanoEducator a NTEGRA Aura v
nanolitografii

Autor: Tomáš Ingr
Vedoucí práce: Doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.
Studijní obor: Aplikovaná fyzika
Forma studia: Prezenční
Rok: 2012

Bibliografická identifikace

- Jméno a příjmení autora: Tomáš Ingr
- Název práce: Využití SPM přístrojů NanoEducator a NTEGRA Aura v nanolitografii
- Typ práce: Bakalářská
- Pracoviště: Katedra experimentální fyziky
- Vedoucí práce: Doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.
- Rok obhajoby práce: 2012
- Počet stran: 53
- Počet příloh: 1
- Jazyk: Český
- Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá elektronovou litografií, fotolitografií a lokální oxidační nanolitografií. Na přístroji NanoEducator se provádí silová litografie a na přístroji NTEGRA Aura lokální oxidační nanolitografie.
- Klíčová slova: Nanolitografie, NanoEducator, NTEGRA Aura, elektronová litografie, fotolitografie, lokální oxidační nanolitografie

Bibliographical identification

Author's first name and surname: Tomáš Ingr

Title: Role of NanoEducator and NTEGRA Aura in nanolithography

Type of thesis: Bachelor

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: Doc. RNDr. Roman Kubínek CSc.

Year of presentation: 2012

Number of pages: 53

Number of appendices: 1

Language: Czech

Abstract: This bachelor thesis deals with electron beam lithography, photolithography and local oxidation nanolithography. On the NanoEducator is done force lithography and on the NTEGRA Aura is done local oxidation nanolithography.

Keywords: Nanolithography, NanoEducator, NTEGRA Aura, electron beam lithography, photolithography, local oxidation nanolithography

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc., a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne: _____

Podpis:

Poděkování

Děkuji doc. RNDr. Romanu Kubínkovi, CSc., který mi pomáhal s tvorbou mojí bakalářské práce. Rád bych poděkoval Mgr. Lence Pravdové, která mě seznámila s přístroji NanoEducator a NTEGRA Aura, na kterých jsem prováděl experimentální část. Také bych rád poděkoval Mgr. Milanu Vůjtkovi, Ph.D, který mi dával užitečné rady ohledně mojí práce. Také děkuji lidem z mého okolí (i výše zmiňovaným) za jejich čas a omlouvám se za jejich „zničené nervy“.

Obsah

Úvod.....	7
1. Mikroskopie skenující sondou	8
1.1. Skenovací tunelovací mikroskopie	8
1.2. Mikroskopie atomárních sil (AFM)	11
2. Nejznámější nanolitografické techniky	15
2.1. Elektronová litografie.....	15
2.2. Fotolitografie.....	20
2.3. Lokální oxidační nanolitografie	28
3. NanoEducator a NTEGRA Aura	32
3.1. NanoEducator.....	32
3.2. NTEGRA Aura.....	41
Závěr	49
Seznam obrázků.....	50
Seznam použitých zdrojů.....	52
Příloha.....	53

Úvod

Během mého studia mě velmi zaujaly mikroskopické struktury, jejich sledování a tvorba. Proto jsem se rozhodl, směřovat i svoji bakalářskou práci a další studium tímto směrem. Jelikož univerzita má potřebné vybavení, mohl jsem využít ve své práci studijní i vědecké přístroje. Tématem mojí práce je: „*Využití SPM přístrojů „NanoEducator“ a NTEGRA Aura v nanolitografii*“.

Po konzultaci s docentem Romanem Kubínkem, jsme práci rozdělili do 4 bodů. Prvním mým úkolem je základní seznámení s mikroskopickými technikami, využívající skenující sondu. Jsou důležité k tomu, abych zjistil tvar povrchu materiálu, na kterém provádím nanolitografii. Mikroskopické techniky, které využívám, se jmenují skenovací tunelová mikroskopie a mikroskopie atomárních sil. Dalším krokem je seznámení s metodami nanolitografie. Rozhodl jsem se vybrat nejznámější nanolitografické metody. Těmi jsou elektronová litografie a fotolitografie. Další zajímavá metoda je lokální oxidační nanolitografie. Tuto metodu jsem vybral proto, že ji mohu ověřit na přístrojích, které jsou v centru nanotechnologického výzkumu (RCPTM). Posledními body je seznámení s přístroji NanoEducator, NTEGRA Aura a litografickými metodami na nich realizovanými. NanoEducator je zařízení, které se využívá pro výuku studentů. Není tedy určeno k přesným měřením potřebných v základním a aplikovaném výzkumu. Na tomto přístroji jsem se rozhodl provést silovou litografii (rytí). Přístrojem používaným k vědeckým účelům je NTEGRA Aura, který má parametry špičkového přístroje. Tento přístroj je vybaven součástmi, které umožňují provádět lokální oxidační nanolitografii. Výsledky měření jsem zpracoval v programu Image Analysis 2.2.0.

V mojí bakalářské práci se snažím sjednotit základní informace o nanolitografických metodách a na zařízeních, kterými disponuje katedra experimentální fyziky a RCPTM, se pokouším tyto nanolitografické techniky vyzkoušet. Mým hlavním cílem je získání znalostí a dovedností v nanolitografických metodách.

1. Mikroskopie skenující sondou

1.1. Skenovací tunelovací mikroskopie

Skenovací tunelová mikroskopie (STM - Scanning Tunneling Microscopy) má vznik datovaný do roku 1981, kdy ji objevil Gerd Binnig a Heinrich Rohrer. Její výhodou je, že přináší obraz povrchu v atomárním rozlišení a za určitých podmínek dokáže manipulovat s jednotlivými atomy. Ostrý vodivý hrot, jenž je přibližně ve vzdálenosti nanometru od povrchu, umožňuje s jistou pravděpodobností „pohyb“ elektronů, přes energetickou bariéru „tunelovým jevem“. Částice je popsána vlnovou funkcí, jenž exponenciálně klesá, tudíž je nenulová pravděpodobnost průniku částice skrz bariéru. Pravděpodobnost tohoto jevu je vyjádřena přibližně vztahem:

$$P \approx e^{-\frac{2}{\hbar} \int_0^d \sqrt{2m(E - V(x))} dx}, \text{ kde}$$

\hbar je redukovaná Planckova (Diracova) konstanta, d je šířka bariéry, $V(x)$ je potenciální energie (tvar bariéry), E je energie částice.

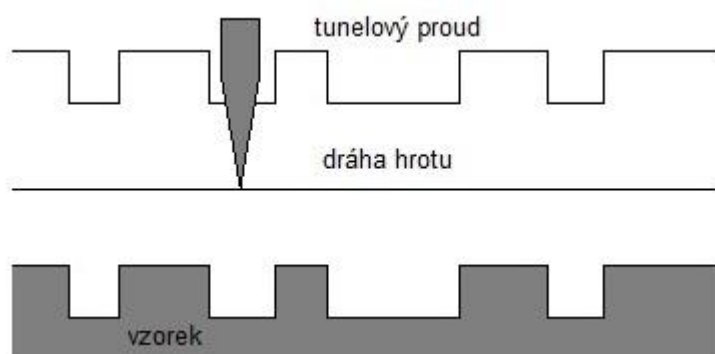
Pokud jsou hrot a vzorek ze stejného kovu, je bariéra symetrická, tzn. pravděpodobnost průniku elektronů je stejná, tudíž celkový proud je nulový. Jsou-li kovy rozdílné, dojde na začátku k vytvoření napětí a průchodu elektronů a nastává stejná situace. Přiložením napětí tak symetrie vymizí a tím získáme celkový nenulový proud.

Na počátku měření se provede hrubý posuv, přiblíží se hrot ke vzorku (např. šroubem s redukčním mechanismem). Jemný posuv probíhá během měření, nelze jej dělat mechanickým zařízením, proto se využívá piezoelektrických materiálů. Velikost vzájemného působení mezi vzorkem a hrotem záleží na vzdálenosti d . Mohou nastat 4 možnosti:

- 1) $d > 10$ nm – Téměř žádný vliv, pouze v silném poli dojde k autoemisi.
- 2) $10 < d < 1$ nm – Působí velmi slabé Van der Waalsovy síly. Pokud je napětí nízké (do 5 V) tunelování nenastane.
- 3) $1 < d < 0,3$ nm – Pohyby elektronů vedou ke vzniku přitažlivých sil. K tunelování dochází pod napětím (režim STM).
- 4) $0,3 < d$ – Převládá odpuzivá interakce.

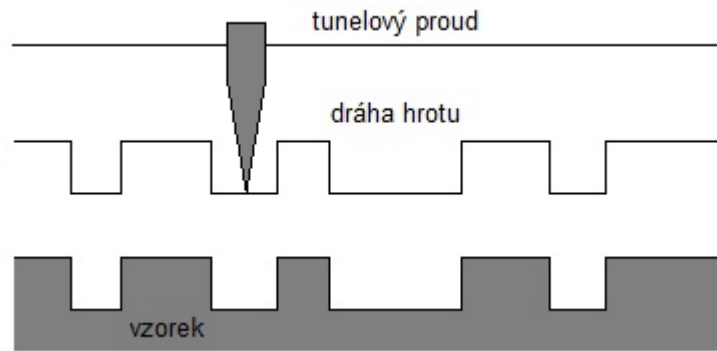
Při měření se získává pouze informace v daném místě. Proto se musí skokovým posuvem posouvat hrot ve směru x , y (zpravidla se pohybuje hrot po řádcích a v jednom směru). Tím se postupně získá matice typu a_{ij} . Indexy i , j udávají polohu bodu, zatímco hodnota nám dává velikost signálu. Signál se může získat v režimu konstantní výšky nebo konstantního proudu.

V režimu konstantní výšky se hrot pohybuje ve stálé výšce a mění se velikost tunelového proudu v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku. Když se vzorek přiblíží ke hrotu (výstupek vzorku) bariéra se zmenší a tím se zvýší tunelový proud. Pokud se vzdálenost hrotu a povrchu zvýší (např. u prohlubně na povrchu vzorku), bariéra se zvětší a tunelový proud zeslábné. Ze všech hodnot takto získaného proudu se pak sestaví výsledný STM obraz. Tato metoda je rychlá, ale má několik nevýhod. Jednou z nich je, že pokud bude výstupek vzorku vyšší, může hrot poškodit vzorek v horším případě i sondu. Pokud je však ve velké vzdálenosti, získaná data nemusejí být přesná, navíc potřebujeme dobrou elektroniku pro snímání proudu, jenž se exponenciálně mění.



Obrázek 1: Pohyb hrotu – režim konstantní výšky

V režimu konstantního proudu se nejprve přednastaví proud a pak se přiblíží hrot, aby nastalo tunelování. Při pohybu hrotu se mění jeho výška, aby zůstávala hodnota proudu konstantní. Tato metoda je pomalejší, ale dává přesnější data, ze kterých se sestaví výsledný obraz. Nevýhodou je pokud se hrot dostane na místo s jinými elektrickými vlastnostmi (např. zoxidované místo). Vlivem snížení proudu, se hrot přiblíží, aby udržel nastavenou hodnotu, a tím se může poškodit vzorek.

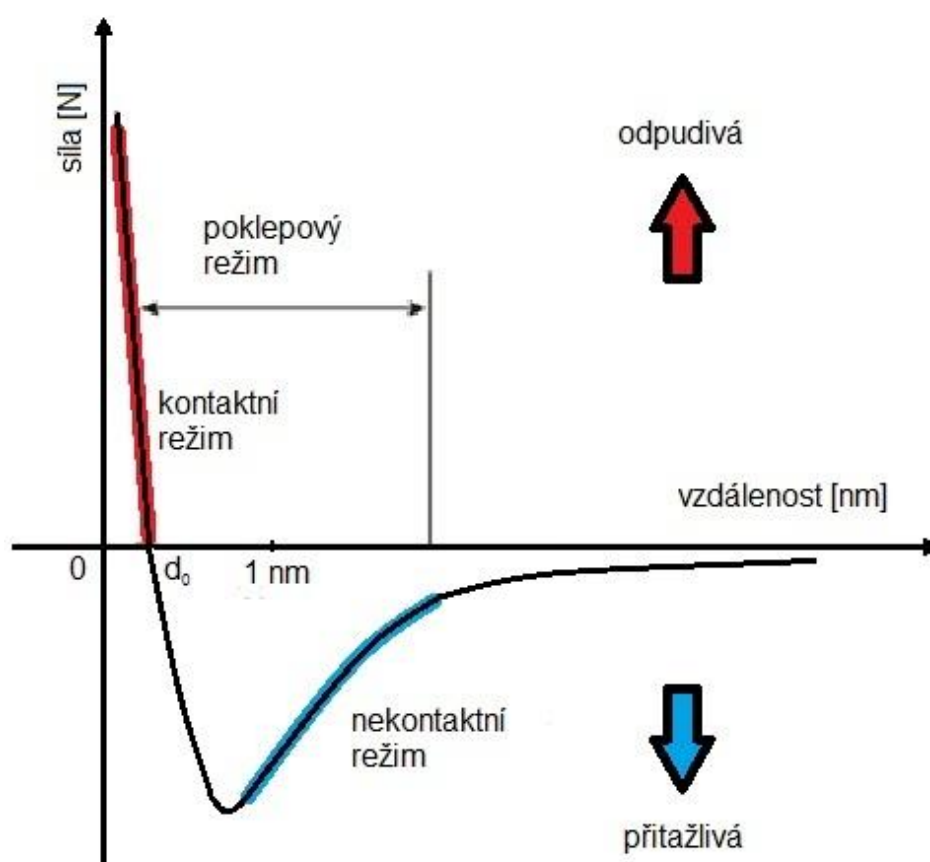


Obrázek 2: Pohyb hrotu – režim konstantního tunelového proudu

V kapitole 1.1 jsem využil doporučenou literaturu [1].
Obrázky 1 a 2 jsou upraveny podle [1].

1.2. Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Mikroskopie atomárních sil (AFM - Atomic Force Microscopy) byla objevena roku 1986, zásluhu na tom mají opět Binnig a Rohrer. Jako u STM i zde se využívá ostrý hrot, avšak u AFM nemusí být hrot z vodivého materiálu. Ovšem při měření je velmi důležitá struktura hrotu, kvůli silám působícím mezi atomy. Tato metoda má oproti STM výhodu v tom, že dokáže zobrazit i nevodivý vzorek. AFM metoda využívá přitažlivé a odpudivé síly, které u STM znehodnocovaly měření. Tyto síly způsobují ohyb raménka, které je snímáno citlivým laserem. Následně jsou data ve formě matice a_{ij} jako u STM, zpracována a je vytvořen obraz vzorku.



Obrázek 3: Závislost meziatomárních sil na vzdálenosti [1]

Na atomy působí mnoho různých sil, které ovlivňují měření. Nejvýznamnějšími silami jsou Van der Waalovy, působí na vzdálenosti do desítek nanometrů. Důležitou vlastností těchto sil je, že působí mezi libovolnými atomy. Na krátké vzdálenosti také působí odpudivá Pauliho síla. Dalšími silami jsou síly kapilární. Je-li hrot blízko

vzorku, vytvoří mikrokontakt a ten působí jako zárodek kondenzace kapaliny. Problém je pak vytvoření menisku a to v případě, kdy je poloměr hrotu pod kritickou hodnotou. Kapilární síly jsou dost veliké (pro vodu a hrot s poloměrem 100 nm je síla $9,3 \cdot 10^{-8}$ N). Pokud se hrot a vzorek k sobě přiblíží a jejich atomům se překryjí elektronové obaly, tak začnou působit odpudivé síly. Ke znehodnocení obrazu nevodivých vzorků dojde kvůli síle elektrostatické, nelze totiž odvést náboj.

AFM funguje ve třech možných režimech: kontaktním do několika desetin nanometru, nekontaktním do desítek nanometrů a poklepovém, jenž je zvláštním případem nekontaktního.

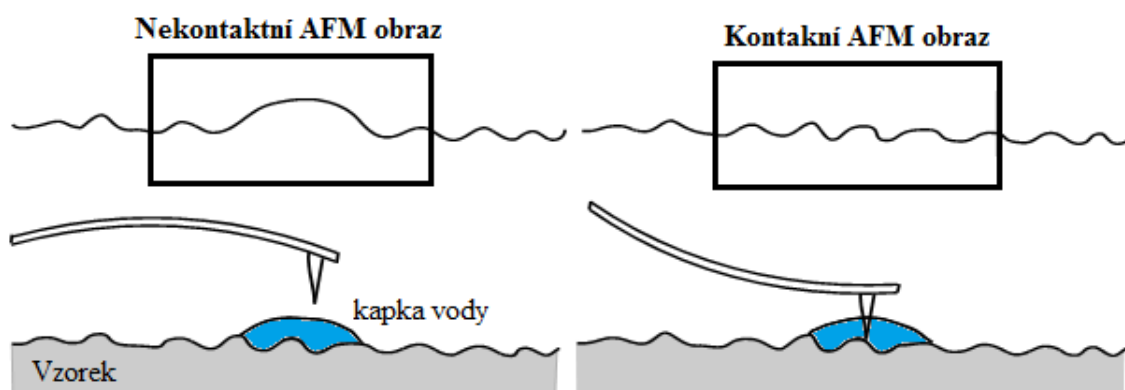
V kontaktním režimu převládá odpudivá síla díky blízkosti hrotu a povrchu. Pro tento režim se využívá hrotu s raménkem, jenž má menší tuhost, než je vazebná síla mezi atomy a proto se raménko ohýbá. Pokud by byla tuhost větší tak může dojít k poškození vzorku, čehož se využívá u nanolitografie. Na ohyb raménka působí i kapilární síly a pevnost samotného raménka. Kapilární síla je zapříčiněna vodou, která kondenzuje na vzorku v blízkosti hrotu. Voda se na vzorek a hrot dostane ve vlhkém prostředí (vzduch). Odpudivá síla, jenž působí na raménko je 10^{-8} – 10^{-6} N. Měření probíhá dvěma způsoby, s konstantní výškou nebo s konstantní silou. Při konstantní výšce se udržuje pevně daná výška nad vzorkem a měří se ohýbání raménka. Měření touto metodou je rychlé, jelikož frekvence raménka je vysoká, ale je to na úkor přesnosti měření. Nastává i problém zlomení raménka, dojde-li ke zvětšení výšky vzorku. Pokud se využije měření s konstantní silou, tak se vyvarujeme problému prohnutí raménka kapilárními silami a též závislosti na pružnosti raménka. Je to zapříčiněno tím, že se udržuje konstantní ohnutí raménka během celého měření a to tak, že se raménko (popř. vzorek) pohybuje ve směru osy z.

V nekontaktním režimu raménko s hrotem kmitá a nedotýká se povrchu vzorku, to je velká výhoda, protože nedochází ke znečištění, poškození povrchu. Jelikož je síla velmi malá 10^{-12} N, tak se stává výhodou při měření měkkých a pružných povrchů. Kvůli působení přitažlivé síly musí mít raménko větší tuhost, aby se nepoškodil povrch. Tím vzniká problém malého ohnutí a jeho překrytí šumem. Frekvence kmitajícího raménka je blízko rezonanční frekvence, která je mezi 100–400 kHz a amplituda má hodnotu několika nanometrů. Pro vyjádření rezonanční frekvence platí vztah

$$f_0 = \sqrt{\frac{(k - \delta_i F_j)}{2\pi m}}, \text{ kde}$$

k je tuhost raménka, $\delta_i F_j$ je derivace síly podle směru, m je hmotnost. Změny rezonanční frekvence slouží ke zjištění změn gradientu síly a pak ke zjištění topografie vzorku.

V nekontaktním režimu se měří s konstantní výškou nebo konstantní amplitudou. Při režimu s konstantní výškou se zafixuje poloha raménka a sledují se změny amplitudy, které nám dají matici a_{ij} . Z ní se potom sestaví výsledný obraz, problémem je derivace síly, která se těžko převádí na změny výšky vzorku. Při měření s konstantní amplitudou, se zachovává amplituda tak, že se mění poloha raménka. Tímto způsobem získáme matici, která se potom zobrazí. Kontaktní a nekontaktní režim se velmi liší při měření vzorku, který je pokryt vodou (viz obr. 4).



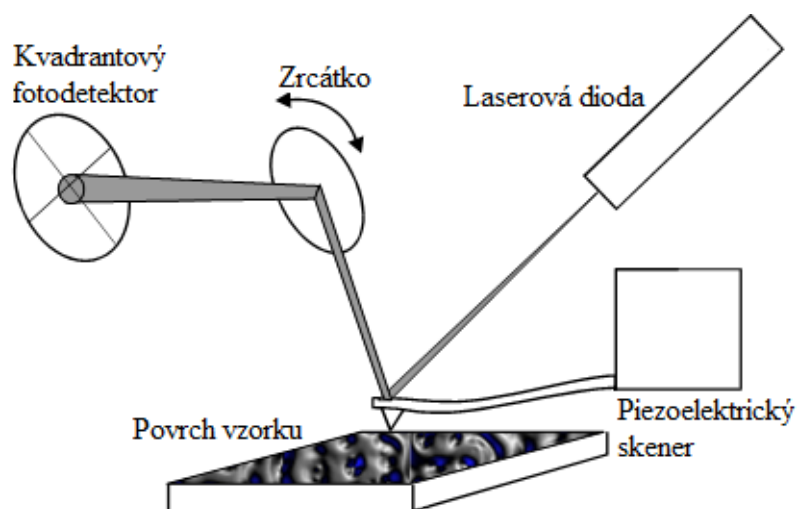
Obrázek 4: Chování hrotu s kapkou vody v kontaktní a nekontaktní režimu AFM [1]

Bezkontaktní režim kapku vody může snímat jako povrchu vzorku a tím zkreslit výsledný obraz. Dále může nastat problém, že se hrot dostane do vody a nebude mít energii na uvolnění z ní.

Posledním režimem je pokleповý (tapping mod), jeho výhodou je že pracuje na principu nekontaktního režimu (raménko kmitá nad vzorkem) s lehkými údery do vzorku. Tím se vyvaruje poškrábání povrchu. Je vhodnější než bezkontaktní, jelikož můžeme snímat větší rozpětí vzorku. Díky větší amplitudě, se zabrání uchycení hrotu ve vodě na povrchu vzorku.

Pohyby raménka se mohou sledovat několika způsoby, nejčastějším je pomocí laseru, který se od raménka odráží do fotodetektoru (viz obr. 5). Ten je velmi citlivý a

zaznamenává pohyby svazku menší než nanometr. Další možností je použití raménka z piezoelektrického materiálu, kde se elektrické napětí mění v závislosti na ohybu raménka.

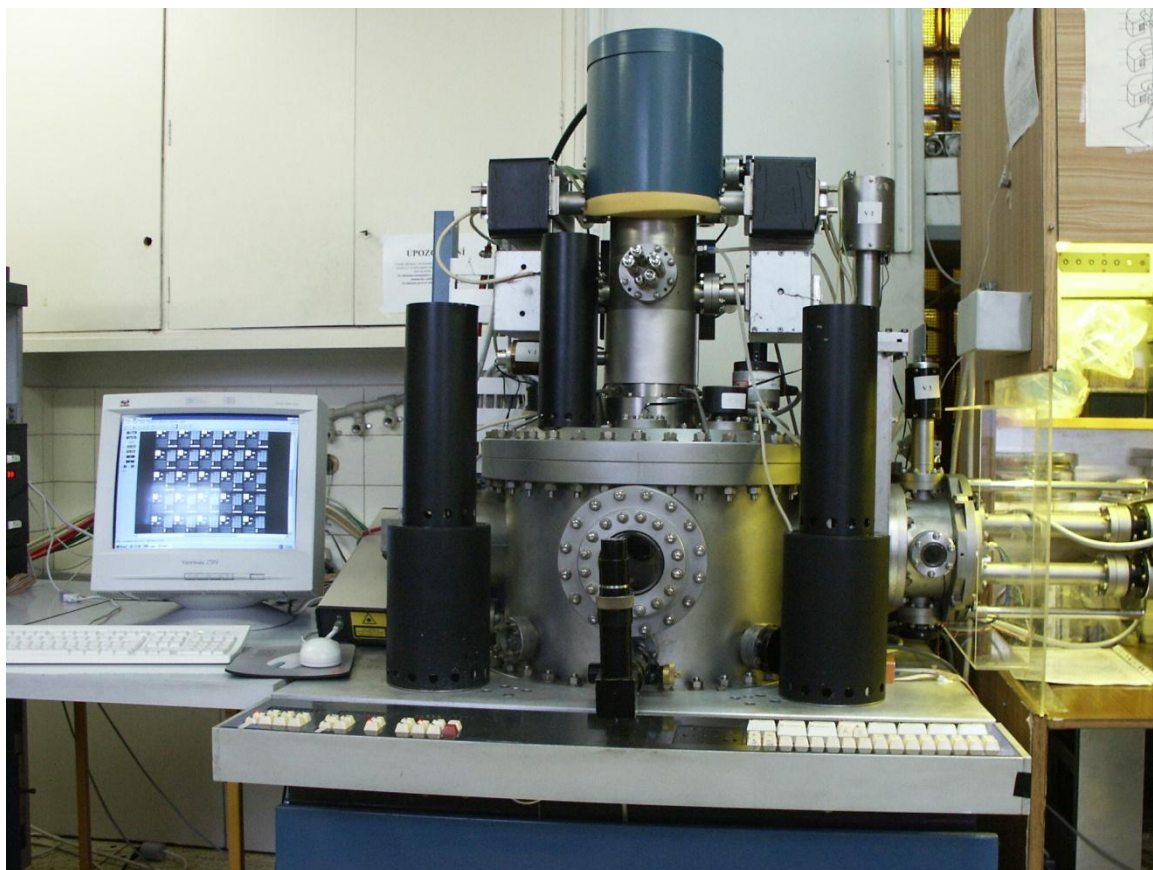


Obrázek 5: Detekce raménka pomocí laseru [1]

V kapitole 1.2 jsem využil doporučenou literaturu [1].

2. Nejznámější nanolitografické techniky

2.1. Elektronová litografie



Obrázek 6: Elektronový litograf [2]

Z názvu elektronové litografie (EBL – „electron beam lithography“) je patrné, že jde o svazek elektronů, který vytvoří obraz na povrchu, jenž je pokrytý rezistem. Pak je možné odstranit buď exponovanou či neexponovanou část rezistu. Tímto způsobem získáme velmi malou a přesnou strukturu. Tato metoda se používá při výrobě integrovaných obvodů i v tvorbě dalších nanotechnologických struktur. Elektronová litografie je omezena propustností povrchu (velmi dlouho trvá vyvolat celou křemíkovou destičku). Dlouhá expozice je citlivá na drift a nestability během měření.

Jelikož je pořizovací cena speciálních elektronových litografů vysoká, nabízí se možnost dokoupit k elektronovému mikroskopu doplňkové zařízení a tím rozšířit aplikační možnosti elektronového mikroskopu.

Zařízení elektronové litografie může být klasifikované podle tvaru paprsku a vychýlení. Dřívější systémy používaly Gaussovský tvar paprsku, nyní nové přístroje používají tvarované paprsky, které se dají různě odklánět.

Objektiv litografu

Objektiv může mít konstrukci založenou na elektrostatickém či elektromagnetickém principu. Elektrostatické objektivy mají více vad, a proto nejsou používány pro jemné zaostření a tvorbu velmi přesných struktur.

Zápis elektronovým svazkem

Doba zápisu elektronovým svazkem je daná vzorcem

$$T = \frac{DS}{I}, \text{ kde}$$

T je doba zápisu [s], I je proud svazku [A], D je dávka [C/m^2] a S je plocha [m^2].

Ze vztahu plyne, že elektronová litografie je časově náročná. Rychlost zápisu je ovlivněna více parametry, závisí to i na rozlišení, s vyšším rozlišením se doba prodlužuje. Různí autoři uvádějí různou dobu, jelikož počítají s jinými parametry [3]. Při porovnávání doby je důležité zjistit, jestli se využívá projekční typ nebo elektronový svazek. Projekční typ je podobný jako u projekční fotolitografie, s rozdílem, že se využívá elektronů nikoli fotonů. Tato metoda je rychlejší, ale nemá takové rozlišení jako metoda s elektronovým svazkem.

Chyby při expozici

V elektronové litografii se mohou chyby rozdělit do dvou kategorií. V první kategorii dochází k chybám při nesprávném vychýlení elektronového paprsku, což vede k chybám ve tvarování v paprskovém systému a špatném promítnutí na vzorek. Tyto chyby mohou pocházet ze špatné elektronově optické konfigurace či ze špatně nahaných vstupních dat. Větší datové soubory jsou náchylnější na tyto vady. Druhá kategorie (vady fyzikální povahy) je pestřejší, např. nabíjení vzorku, „mlžení“ (dálkový odraz od zpětně odražených elektronů), kontaminace povrchu, drift paprsku a částic. Jelikož elektronová litografie trvá velmi dlouho, tak je velká pravděpodobnost výskytu dalších chyb.

Interakce elektronů s hmotou vzorku

Primární elektrony dopadajícího paprsku ztratí energii při vstupu do materiálu prostřednictvím nepružného rozptylu či kolize s jinými elektrony. Při takovém nárazu může být přenos hybnosti elektronu na vázaný elektron vyjádřen vztahem

$$dp = \frac{2e^2}{bv}, \text{ kde}$$

b je nejmenší vzdálenost přiblížení mezi elektrony a v je rychlost elektronu (bez relativistických efektů).

Energie převedená kolizí je dána vzorcem

$$T = \frac{(dp)^2}{2m} = \frac{e^4}{Eb^2}, \text{ kde}$$

m je hmotnost elektronu a E je dopadající energie elektronu, vyjádřena vztahem pro kinetickou energii $E = \frac{1}{2} mv^2$.

Integrací přes všechny hodnoty T mezi nejnižšími vazebními energiemi, E_0 a energií dopadajících elektronů E , je výsledkem, že celkový průřez pro kolize je nepřímo úměrný dopadající energii E a úměrný k $\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E}$. Obecně platí, že $E \gg E_0$, takže výsledek je v podstatě nepřímo úměrný vazební energii.

Stejným integračním postupem v rozsahu od $2E_0$ do E , získáme porovnáním průřezů, že polovina nepružných srážek dopadajících elektronů produkuje elektrony s kinetickou energií větší než E_0 . Tyto sekundární elektrony jsou schopné narušit vazby (s vazebními energiemi E_0) v určité vzdálenosti od původní kolize. Kromě toho mohou vytvářet další, nízkoenergetické elektrony, což vede ke vzniku kaskády elektronů. Je tedy důležité si uvědomit významný podíl sekundárních elektronů k šíření energie ukládáním.

Pro molekulu obecně platí, že: $e^- + AB \rightarrow AB^- \rightarrow A + B^-$

Rozptyl elektronů

Kromě produkce sekundárních elektronů, se mohou primární elektrony z dopadajícího paprsku, pronikající fotorezistem s dostatečnou energií rozptýlit na velké vzdálenosti od základních filmů a substrátu. To vede k expozici oblastí na velké vzdálenosti od požadovaného místa expozice. Elektrony s větší energií, např. primární

elektrony pohybující se vpřed, mají zvýšenou možnost rozptylu s paprskem definovaném místě. Tento rozptyl se nazývá dopředný rozptyl. Občas jsou primární elektrony rozptýleny v úhlech nad 90 stupňů, což znamená, že už dále nepostupují do resistu. Tyto elektrony se nazývají zpětně rozptýlenými elektrony. Dostatečně velká dávka zpětně rozptýlených elektronů může vést k úplné expozici resistu přes oblast větší než je oblast definovaná svazkem na daném místě.

Nabíjení povrchu

Protože elektrony jsou částice se záporným nábojem, mají tendenci nabít substrát negativně, nebudou-li z povrchu substrátu odvedeny. Pro vysoké energie paprsku dopadajícího na křemíkovou desku, jsou téměř všechny elektrony z povrchu polovodiče špatně odváděny k zemi i u uzemněného vzorku. Záporný náboj získaný ze substrátu lze kompenzovat kladným nábojem na povrchu díky sekundární emisi elektronů do vakua. Přítomnost tenké vodící vrstvy nad nebo pod rezistem, je obvykle omezen možnostmi pro vysoké energie elektronového svazku (50 keV a více), jelikož většina elektronů prochází vrstvou do substrátu. Ztráta náboje ve vrstvě se obvykle projeví při energiích do 10 keV, jelikož je rezist tenčí, tak většina elektronů buď zastaví v rezistu, nebo v blízkosti vodící vrstvy. Použití je omezené vzhledem k jejich vysokému plošnému odporu, což může vést k neefektivnímu uzemnění.

Rozmezí nízkoenergetických sekundárních elektronů, které mohou přispět k nabíjení, se může lišit od 0 nm do 50 nm. Negativní nabíjení vychyluje elektronový paprsek od nabitě oblasti, zatímco pozitivní nabíjení vychyluje elektronový paprsek směrem k nabitě oblasti.

Nové hranice elektronové litografie

Aby se omezila tvorba sekundárních elektronů, bude nutné použít nízkoenergetické elektrony v primárním svazku elektronů. V ideálním případě by tyto elektrony měly mít energii v řádu několika elektronvoltů. Při těchto energiích exponovaný fotorezist nevytváří žádné sekundární elektrony, jelikož primární elektrony nemají dostatek energie. Podle literatury [4] vyplývá, že elektrony s energií pouhých 12 eV mohou pronikat 50 nm silným polymerovým fotorezistem. Nevýhodou používání nízkoenergetických elektronů je, že je těžké zabránit šíření elektronového svazku ve fotorezistu. Nízkoenergetické elektronové optické systémy jsou také těžko proveditelné

pro vysoké rozlišení. Jejich problémem jsou odpudivé elektrostatické síly (Coulombův odpor), které se více projeví při nižších energiích elektronů.

Další alternativou v elektronové litografii je naopak použití elektronů velmi vysoké energie, více než 100 keV. Při ní dochází k „praskání“ či „vrtání“ materiálu. Tento jev byl pozorován častěji u transmisní elektronové mikroskopie. Avšak, toto je velmi neefektivní proces, vzhledem k neúčinnému přenosu hybnosti z elektronového paprsku na materiál. Důsledkem toho je, že proces vyžaduje mnohem delší dobu expozice než běžné elektronové litografie. Paprsky s vysokou energií mohou navíc poškodit podklad.

Interferenční litografie, která používá elektronové svazky, je další možnou cestou pro získání vzorkového pole v nanometrovém měřítku. Hlavní výhodou používání elektronů místo fotonů v interferometru, je mnohem kratší vlnová délka při stejné energii. I přes různé komplikace a drobné rozdíly elektronové litografie při různých energiích, je stále nejpraktičtější způsobem, jak soustředit co nejvíce energie do nejmenší oblasti.

V současné době se je velký zájem o rozvoj litografických přístrojů, jenž zvýší propustnost elektronového paprsku. Tyto snahy jsou podporovány různými společnostmi (např. Multibeam Corporation). [\[8\]](#)

V kapitole 2.1 jsem využil materiály [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#), [\[5\]](#), [\[6\]](#), [\[7\]](#), [\[8\]](#).

2.2. Fotolitografie



Obrázek 7: DUV fotolitograf [9]

Fotolitografie („photolithography“) je proces k selektivnímu odstranění částí tenkého filmu nebo části substrátu, používaný při výrobě mikročipů. K přenosu geometrického vzoru z fotomasky na světlo citlivý chemický fotorezist na substrátu se využívá světla. Řada chemických úprav potom buď vryje expozici vzoru do materiálu pod fotorezistem, nebo umožní uložení nového materiálu na požadovaný vzor. Například, ve složitých integrovaných obvodech bude fotolitografický cyklus procházet až 50 krát.

Fotolitografie využívá některé základní principy s fotografickým procesem a to tak, že vzor v leptaném rezistu je vytvořen, buď přímo expozičním světlem (bez použití masky) nebo promítáním obrazu pomocí optické masky. V první fázi je postup spíše mechanickou záležitostí než chemickou. Podobá se výrobě tištěných spojů. Hlavním rozdílem mezi nimi je velikost, v nanolitografii je cílem miniatuřizace. Fáze výrobního procesu, které následují, mají více společného s leptáním než s litografickým tiskem.

Jsou používány proto, že může vytvořit extrémně malé struktury (při použití UV světla až desítky nanometrů). Proces umožňuje přesnou kontrolu nad tvarem a velikostí vytvářených objektů, a rovněž tvorbu vzorů na celém povrchu při nízkých nákladech. Hlavní nevýhody jsou, že je potřeba plochý substrát a extrémně čisté provozní podmínky.

Čištění povrchu

Pokud jsou na povrchu organické nebo anorganické nečistoty, obvykle se odstraňují chemicky mokrou cestou. Např. Postup RCA vytvořil Werner Kern [10]. Čistící postup je založený na roztocích, které obsahují peroxid vodíku. Tento postup se skládá ze tří kroků: odstranění organických látek, tenké vrstvy oxidu a iontové kontaminace.

Příprava waferu

Uvedme si typický postup přípravy na disku (waferu) z polovodičového materiálu, používaného jako substrát pro vytváření mikročipů. Disk je na počátku zahříván na dostatečnou teplotu, aby došlo k odpaření vlhkosti, která může být na povrchu. Skladované wafery musejí být chemicky vyčištěné. Pro zvýšení přilnavosti fotorezistu na wafer se používá kapalná nebo plynná adheze. Povrchové vrstvy oxidu křemičitého na waferu reagují s hexamethyldisilazanem (HMDS) a tvoří tři oxidy křemičité. Vzniká vysoce vodě odpudivá vrstva, která se svými vlastnostmi blíží vosku, který se používá na karosérie automobilů. Tato vrstva zabraňuje pronikání vody mezi vrstvu fotorezistu a povrch waferu. Zabraňuje tak odstranění malých struktur fotorezistu na vzorku.

Aplikace fotorezistu

Viskózní kapalný roztok fotorezistu je nanesen na wafer. Wafer se rychle otáčí, a tak vytváří vrstvu rovnoměrně tlustou. Rychlost je obvykle 1200–4800 otáček za minutu. Za 30–60 s se vytvoří vrstva o tloušťce 0,5–2,5 μm . Takto vytvořená tenká vrstva není však dokonale vodorovná, nerovnosti na jejím povrchu jsou do výšky (popř. hloubky) 10 nm. Ke vzniku vrstvy přispívají viskózní síly, které brání pohybu v dolní části více než v horní části. Konečná tloušťka je také daná odpařováním kapalných rozpouštědel z roztoku fotorezistu.

Fotorezistivní vrstva waferu je pak vysušena, odstraněním přebytku fotorezistivního rozpouštědla, obvykle na horké plotýnce (popř. v peci) o teplotě 60-120 °C po dobu až 30 minut. Přesný čas a teplotu udává výrobce. [\[12\]](#)

Expozice fotorezistu

Po vysušení je fotorezist vystaven expozici ultrafialového světla o dostatečné intenzitě. Pozitivní fotorezist (nejčastější typ) je rozpustný v základním činidle při expozici, negativní fotorezist je nerozpustný v organickém činidle. Tato schopnost umožňuje, aby některé části fotorezistu byly odstraněny pomocí organického činidla (analogie s fotografickými činidly).

Post-expoziční sušení (PEB) se provádí v předpřípravě, obvykle pomůže ke snížení stojatých vln způsobených destruktivní a konstruktivní interferencí. Litografie využívající UV expozici s průnikem do větší hloubky (DUV), zvýší chemickou odolnost. Tento proces je velmi citlivý na teplotu, čas a časové zpoždění při PEB, jelikož na to většina expozice reaguje (tvoří se kyselina, která umožňuje rozpuštění polymeru v základním činidle).

Činidla původně obsahovala hydroxid sodný (NaOH). Avšak sodík je extrémně nežádoucí nečistotou ve výrobě tranzistorů MOSFET, jelikož snižuje izolační vlastnosti oxidů u řídicích elektrod (sodíkové ionty se přenáší dovnitř a ven z řídicí elektrody, a tím mění prahové napětí tranzistoru). Nyní jsou používána činidla bez volných kovových iontů, např. TMAH (tetramethylammonium hydroxid).

Výsledný wafer je pak důkladně vysušen (při použití nechemicky zesíleného odporu), obvykle při 120-180 °C po dobu 20-30 minut. Tím se zpevní zbylý fotorezist, a jeho ochrannou vrstvu učiní odolnou pro budoucí iontovou implantaci, mokré chemické leptání nebo plazmové leptání. [\[3\]](#)

Leptací proces

Používají se dva druhy leptání: "mokré", při kterém se využívá kapalina a "suché" při němž se využívá plazma. Během leptání se odstraňuje horní vrstva substrátu, která není krytá fotorezistem. Ve výrobě polovodičů, se obvykle používají suché leptací techniky, aby se zabránilo závažnému podemletí fotorezistu, jelikož

vzorek může být anizotropní. To je zásadní, pokud je šířka leptané oblasti menší než tloušťka leptaného materiálu. Mokré leptací procesy jsou obvykle v přírodě izotropní, což je často nezbytné pro mikroelektromechanické systémy. Vývoj anizotropního suchého leptacího procesu, s minimální tvorbou defektů, umožňuje fotolitografiím vytvářet stále menší prvky v rezistu, které jsou převáděny do materiálu substrátu.

Odstranění fotorezistu

Ve fázi litografického procesu již nadále není fotorezist potřeba a speciální kapalinou, která rezist rozpustí, je odstraněn ze substrátu. V prvním kroku se využije aceton, chlorované uhlovodíky nebo fenolové sloučeniny. Tento proces probíhá při teplotách do 150 °C. Dalším krokem je použití kyseliny sírové. Další možností je v prvním kroku využít kyselinu sírovou s peroxidem vodíku při teplotě 180 °C a potom je dalším krokem použití zředěné kyseliny sírové. Po každém kroku vždy následuje opláchnutí deionizovanou vodou. Popřípadě může být fotorezist odstraněn pomocí plazmy obsahující kyslík, který ho oxiduje. Tento proces se nazývá spalování, a podobá se suchému leptání.

Expozice systému

Expozice systému obvykle vytváří obraz na wafer pomocí fotomasky (dále jen masky). Přes masku je osvícena pouze požadovaná oblast, ostatní části jsou kryté (bezmasková fotolitografie, využívá přesný paprsek k ozáření waferu, nevyužívá se v obchodním sektoru). Fotolitografie se dělí na kontaktní a projekční.

Kontaktní fotolitografie

V kontaktní fotolitografii (nejjednodušším expozičním systému) je maska vložena přímo na wafer. Kvůli jejich přímému kontaktu jsou maska a wafer náchylné k poškození, což je hlavní důvod, proč se kontaktní fotolitografie přestala využívat. Kontaktní fotolitografie vyžaduje rovnoměrné intenzivní světlo na celém waferu a masku přizpůsobenou přesně na prvky, které jsou již na waferu. Moderní postupy využívají stále větší wafery a dosažení potřebných podmínek na celé ploše se stává obtížnějším.

Projekční fotolitografie

Využívá se při výrobě obvodů s velmi vysokým stupněm integrace (VLSI). Na rozdíl od kontaktních masek, které pokrývají celý wafer, má projekční fotolitografie mezi waferem a maskou vloženu projekční optickou soustavu. I při využití dnešních projekčních optických soustav, je rozlišovací schopnost menší než u kontaktních masek. Výhodou projekce je téměř neomezená životnost masky. Nejdůležitějšími vlastnostmi u projekčních optických soustav je rozlišení projekčních systémů, přenosová kapacita a zkreslení, které dosahuje tisícin procenta.

Přenosová kapacita

Přenosová kapacita objektivu je definovaná přes součet čtvercových ploch, které objektiv naráz zobrazí. Šířka čtverce je rovna rozlišovací schopnosti. „*Udává tedy schopnost objektivu přenést topografii integrovaného obvodu určité složitosti.*“ [\[3\]](#)

Rozlišení projekčních systémů

Rozlišovací mez projekčních systémů je omezena v důsledku difrakce světla na kruhových objímkách optických prvků na polovinu vlnové délky použitého světla. Pro současně používané litografické metody při ultrafialovém světle (DUV) u excimerových laserů je vlnová délka 248 nm a 193 nm.

Minimální velikost, kterou může projekční systém tisknout je daná přibližně vztahem:

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \text{ kde}$$

CD je minimální velikost funkce (kritický rozměr).

k_1 je koeficient, který popisuje proces související s faktory, pro výrobu se využívá hodnoty 0,4.

λ je vlnová délka použitého světla

NA je numerická apertura (účinná světelnost objektivu) objektivu. Kvalitní objektivy mají hodnotu kolem 1,3–1,4.

$$NA = n \sin \frac{\alpha}{2}, \text{ kde}$$

n je index lomu před objektivem

α je vrcholový úhel vstupujících paprsků.

Podle rovnice (1) je minimální velikost funkce snížena se snížením vlnové délky a zvýšením numerické apertury. Tato metoda má ovšem omezení, v moderních systémech je hloubka ostrosti dána vztahem:

$$D_F = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}, \text{ kde}$$

k_2 je další koeficient související s procesem. Hloubka ostrosti omezuje tloušťku fotorezistu a hloubku topografie na waferu. K vyrovnání topografie se používá chemické mechanické leštění.

Fotomaska

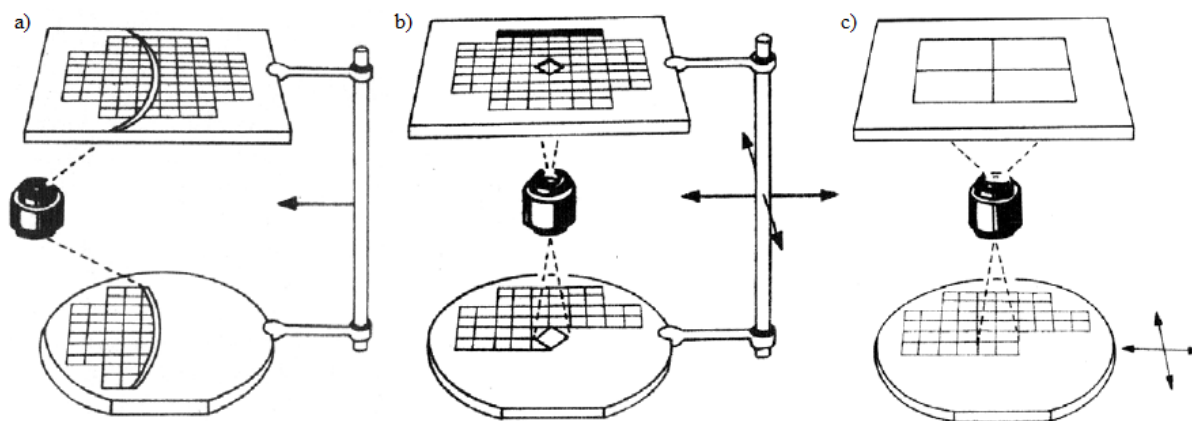
Obraz pro masku pochází z počítačového datového souboru. Tento datový soubor je převeden na řadu polygonů a je psaný pomocí fotolitografického procesu na čtvercovou plochu taveného křemenného podkladu pokrytého vrstvou chromu. Laserový paprsek nebo paprsek elektronů se používá pro expozici vzoru definovaného datového souboru. K projekci masky se využívá tři postupů: metody plynulé expozice, rastrovací expozice a s přímým krokováním.

Při metodě plynulé expozice, někdy nazývané skenující metoda, je optická soustava pevně ukotvena a pohyb po vektoru vykonává maska s waferem. Tato metoda je levnější, proto i více využívána.

Rastrovací metoda také využívá plynulého pohybu masky s waferem, ale s rozdílem, že pohyb je ve dvou směrech, které jsou na sebe kolmé.

V metodě s přímým krokováním se nepoužívá pracovní maska. Na wafer se exponuje jeden čip, potom se wafer posune a exponuje se další. Tato metoda odstraňuje chyby, které vznikaly při expozici celého waferu, těmi jsou geometrická nedokonalost a teplotní roztažnost waferu. Nevýhodou této metody je delší trvání procesu, jelikož musí dojít k posunutí waferu a kontrole pozice pomocí laseru.

Tam kde je fotorezist exponován, se může chrom odleptat.



Obrázek 8: Postupy expozice a) skenující metoda b) rastrovací metoda c) metoda s přímým krokováním [3]

Světelné zdroje

Původně fotolitografie využívala rtuťové plynové výbojky s kombinací vzácného plynu (xenon). Pro získání konkrétní spektrální čáry se využily filtry. Od začátku 60. let do půlky 80. let, se využívaly spektrální čáry s názvem "g-line" (436 nm), "h-line" (405 nm) a "i-line" (365 nm). Avšak polovodičový průmysl potřebuje větší rozlišení pro dosažení prvků vyšší integrace a také s větší rychlostí požadovaných operací při nižších výrobních nákladech.

Roku 1982 K. Jain navrhl a demonstroval excimerový laser pro fotolitografii, který se využívá ve výrobě mikroelektroniky i dnes. Stále pokračuje vývoj hustějších (výkonnějších) čipů, velikost minimálních znaků se blíží 10 nm. Tento vývoj se přibližně řídí dle Moorova zákona: "Složitost součástek se každý rok zdvojnásobí při zachování stejné ceny."

DUV excimerové lasery využívají fluorid kryptonové trubice o vlnové délce 248 nm a fluorid argonové trubice o vlnové délce 193 nm. Pro danou výrobu se využívají určité směsi plynů, důležitá je také životnost plynu, protože nedostatečná koncentrace směsi v plynu nedává požadovanou vlnovou délku. Navíc izolační materiály (např. SiO_2), které jsou vystaveny fotonům s energií větší, než je zakázané pásmo uvolňují elektrony a díry, které způsobují nežádoucí nabíjení.

Optická litografie se dostala pod velikost 50 nm použitím 193 nm ArF laseru a ponořením do kapaliny. Této technice se říká ponořovací litografie a umožňuje použít

objektivy s numerickou aperturou větší než 1,0. Jako kapalina se obvykle používá ultračistá demineralizovaná voda, která má index lomu vyšší než vzduch. Voda neustále cirkuluje, tím zabraňuje tepleným deformacím. Numerická apertura ve vztahu pro rozlišovací mez optické litografie s využitím vody dosahuje hodnoty až 1,4.

Prognózy fotolitografie

Původní předpoklady, že optická litografie brzy zanikne z důvodu neschopnosti tisknout prvky menší než 1 μm , se nevyplnily, jelikož nástupem excimerových laserů a nových technik (ponožovací litografie) se dosahuje nanometrových rozměrů. Současný výzkum, se ale více zaměřuje na elektronovou litografii, X-ray litografii či iontovou litografii.

V kapitole 2.2 jsem využil materiály [\[9\]](#), [\[10\]](#), [\[11\]](#), [\[12\]](#), [\[13\]](#), [\[14\]](#), [\[15\]](#), [\[16\]](#).

2.3. Lokální oxidační nanolitografie



Obrázek 9: NTEGRA Aura [17]

Lokální oxidační nanolitografie (LON – „local oxidation nanolithography“) je založena na principu oxidační reakce s využitím ostrého hrotu, jaký se používá u AFM. Jako první materiál pro LON byl použit Si (111), potom polykrystalický tantal. Dalšími materiály byly polovodiče III-V, kovy (titan, hliník, molybden, nikl,...) nebo nitrid křemíkové filmy.

Při lokální oxidační nanolitografii můžeme současně vytvářet vzorek i 3D zobrazení povrchu pomocí AFM. Z pojmu lokální plyne, že ovlivněná oblast je velmi malá, pokud je hrot ostrý (interaguje jen konec hrotu). Současně hrot musí být velmi blízko povrchu, AFM. Hrot je z vodivého materiálu, aby na něj mohlo být přivedeno

napětí, díky kterému vzniká oxidace. Při porovnání lokální oxidace a anodické oxidace můžeme mezi nimi vidět podobnost, protože AFM hrot je použit jako katoda a mezi hrotem a povrchem se vytváří kapalinový meniskus.

Pro lokální oxidaci se používá AFM i STM. AFM je však výhodnější, protože zpětná vazba procesu, která kontroluje snímkování v silové mikroskopii, může být použita nezávisle na procesu lokální oxidace (neovlivňování el. polem).

Při používání LON je výsledek dosažen velikostí napětí, dobou pulsu, dopovaným substrátem, tvarem kapalinového menisku a složením okolního prostředí.

Průběh lokální oxidace

Zařízení používané pro lokální oxidaci má všechny části jako tradiční silová AFM mikroskopie (nosník, hrot, laserový paprsek, článkovou fotodiodu, piezoscanner a software). Nosník a hrot by měly být vodivé. Celá sestava by pak měla být uzavřena v komoře umožňující kontrolu vlhkosti (udržuje se kolem 30-60 %). AFM může být používáno v kontaktním nebo bezkontaktním režimu. Použitím napětí v bezkontaktním režimu se získává kapalinový most (meniskus), pro jeho vznik je potřeba dosáhnout dané hodnoty napětí.

Při porovnání bezkontaktní a kontaktní AFM oxidace zjistíme, že poměr velikostí oxidovaných částí není stejný při konstantních parametrech. Z toho vyplývá, že bezkontaktní režim dovoluje řízení šířky menisku a tím řízení šířky oxidovaného bodu. Další výhodou je rychlost vertikálního růstu, která je vyšší než u kontaktního, protože kontaktní režim potřebuje odklánění nosníku během růstu oxidace.

Kapalinový meniskus

Kapalný můstek (vodní meniskus) má v AFM oxidaci dvě funkce. Za prvé poskytuje kyslík potřebný pro oxidaci povrchu (většinou OH^-). Za druhé poskytuje cestu elektrickému poli k vyvolání oxidace. Důležitý je i rozdíl mezi permitivitou prostředí uvnitř a vně kapalného mostu.

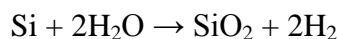
V kontaktním režimu je velikost kapalného přechodu (mostu) pevně daná velikostí hrotu, hydrofilním charakterem povrchu a tlakem vodní páry, který zmenšuje

velikost vodního menisku. V nekontaktním režimu je každý kapalným most formován podle použitého napětí, které vytvoří most (pro různá napětí různé mosty).

Kinetika LON

Při studiu kinetiky a mechanismů LO se přišlo na to, že přítlačná síla se jeví jako dominantní faktor ovlivňující rychlost růstu oxidace, dalšími jsou velikost napětí, doba pulsu, dopování substrátu, prostorový náboj v daném místě a vlhkost. Oxidační mechanismus vysvětluje několik modelů, ale žádné modely nedokážou vysvětlit rozsah získaných experimentálních dat. Protože povrch je značně lokálně oxidován, zbytek profilu zůstává beze změny neovlivněný oxidací.

Lokální oxidace se řídí touto chemickou reakcí [18]:



Materiály pro LON

Prvním materiálem pro lokální oxidaci byl křemík. Nejprve byla oxidace demonstrována na Si(111), poté se metody rozšířily na další povrchy Si(100) a Si(110). Prováděním experimentů bylo zjištěno, že tenký oxidační film na povrchu není prevencí pro další oxidaci. Lokální oxidační litografie není omezena pouze na křemík, je možné použít kombinace polovodičových povrchů (např.: GaAs, jenž je vhodný pro STM a AFM). Pro lokální oxidační litografii jsou vhodné kovové povrchy, jenž jsou anodicky oxidované (např.: tantal, titan, hliník, niob a chrom).

Nitrid titanové filmy byly přeměněny na oxynitrid titanové vrstvy. Studium kinetiky lokální oxidace u nitridu křemíku se zabývalo hodně odborníků. Někteří autoři uvádí příklad univerzálnosti LON pro modifikaci samouspořádaných monovrstev na příkladu oxidace monovrstev metylem ovlivněného silanu na křemíkových povrchích. Různorodost materiálů vhodných pro lokální oxidační litografii ukazuje celkový charakter této metody.

Aplikace LON

Lokální oxidační nanolitografií mohou být vytvořeny některé elektronické a mechanické zařízení s nanorozměry (např.: paměť, jedno elektronový transistor, supravodivé interferenční zařízení nebo vodiče). V mnoha případech lokální oxidační

nanolitografie se využívají další metody jako fotolitografie nebo mokré chemické leptání.

Paměť

Lokální oxidační nanolitografií je možné ukládat data, používá se metoda ready-only, která má nevýhodu, že se uložená data dají pouze číst nikoli přepisovat. Jednotlivé body vytvoření lokální oxidační nanolitografií jsou 40 nm od sebe a mají šířku 25 nm. Zápis probíhá formou digitalizace jako u počítačů (body oxidace jsou jedničky a místa bez nich jsou nuly). Takto lze na plochu SiO₂ uložit data o hustotě 0,7 Tbit/in² (0,1 Tbit/cm²). Při použití uhlíkových nanotrubiček jako hrotů můžeme dosáhnout hustoty 1,6 Tbit/in².

Souhrn

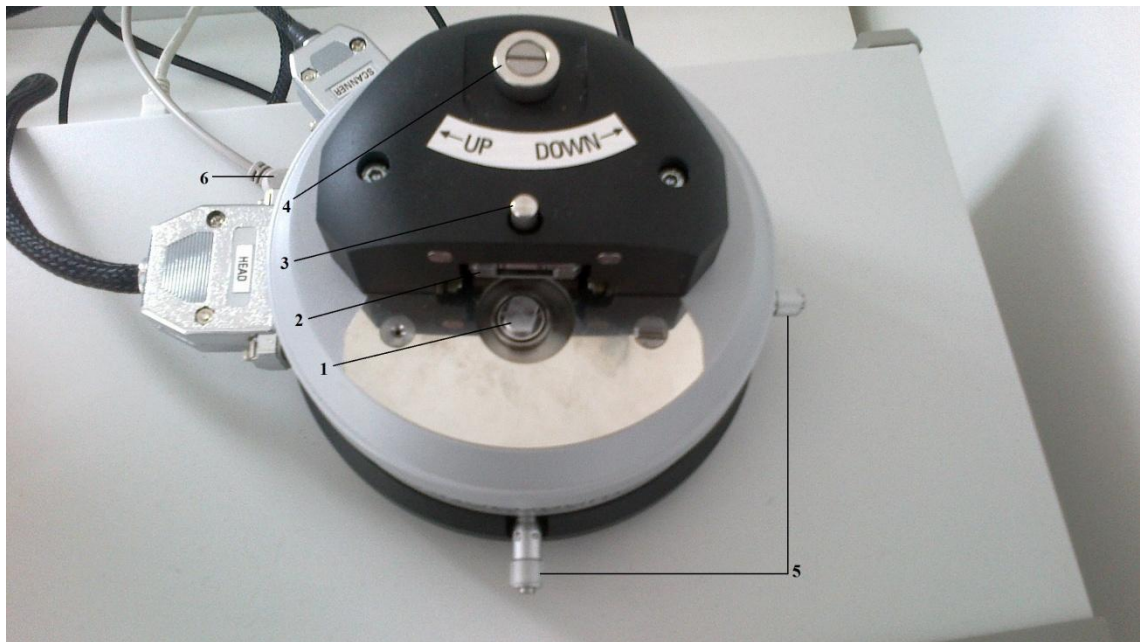
Během posledních několika let se v lokální oxidační nanolitografii se objevilo několik univerzálních metod výroby součástek nanometrového měřítka. Hrot AFM je používán jako elektroda anodické oxidace povrchu. Ve většině experimentů se vyžaduje, aby se vytvořil kapalinový meniskus mezi hrotem a povrchem. Velikost oxidace ovlivňuje několik faktorů, těmi jsou elektrické podmínky na rozhraní, velikost menisku a hromadění prostorového náboje v místě oxidace. Tři vlastnosti dávají lokální oxidační nanolitografii speciální charakter pro výrobu nanometrových součástek, jako je charakter součástek v daném místě, kombinace s již existujícími mikroelektronickými postupy a velikost pod 20 nm.

Ačkoli některé základní aspekty lokální oxidace stále nejsou zcela objasněny, další vhodnější polovodiče a kovové povrchy jsou voleny pro lokální oxidační experimenty, výrobu různých systémů s vysokou hustotou paměti pro ukládání dat u různých kvantových zařízení. Rozšířené použití AFM umožní lokální oxidaci zvláštní postavení pro zkoumání vlastností nanometrických zařízení v blízké budoucnosti. Na druhé straně technologická aplikace pro masovou výrobu nanometrických součástek není nemožná a s rutinní výrobou se můžeme setkat již v blízké době.

V kapitole 2.3 jsem využil materiály [\[17\]](#), [\[18\]](#), [\[19\]](#), [\[20\]](#).

3. NanoEducator a NTEGRA Aura

3.1. NanoEducator



Obrázek 10: NanoEducator

1 – držák vzorku, 2 – měřící sonda, 3 – šroub k upevnění sondy, 4 – šroub k přiblížení ke vzorku, 5 – šrouby k vodorovnému posunu na vzorku, 6 – konektor USB



Obrázek 11: Kamera NanoEducatoru

Parametry wolframového hrotu

Rezonanční frekvence: 8 kHz

Faktor kvality: 20

Poloměr zakřivení hrotu: 100 nm (až 10 nm)

Pro měření je důležité, aby parametry byly co nejbližší optimálním hodnotám. Po vytvoření hrotu a jeho umístění do NanoEducatoru si v programu zjistíme hodnoty rezonanční frekvence a hodnotu faktoru kvality. Během různých měření jsem vyzoroval, že pokud hodnota rezonanční frekvence je mimo interval 6–10 kHz, litografie se nezdaří (v manuálu se uvádí max. hodnota 14 khz [21]). Hodnota faktoru kvality, pro kterou se mi podařilo získat rozpoznatelný obrázek, byla v intervalu 16–30. Faktor kvality, určuje strmost píku rezonanční frekvence. Hodnoty, které uvádím, jsou spolu závislé, proto při frekvenci 10 kHz a kvalitě 30 nedostanu rozpoznatelný obrázek. Poloměr zakřivení hrotu bylo pro mě obtížné zjistit, proto jsem předpokládal, že pokud při výrobě hrotu budu dodržovat postup, dostanu potřebné zakřivení.

Výroba hrotu

Výroba hrotu je popsána v manuálu i s obrázky [21]

Silová litografie

Prvním krokem je vložení vzorku a poté upevnění hrotu. Hrot mohu manuálně přiblížit blíže k povrchu, ovšem je důležité, abych nenatlačil hrot na povrch. V programu je krokové přiblížení, které potom hrot přiblíží na potřebnou vzdálenost. Přístroj je konstruován jako učební zařízení, proto je program udělán tak, aby se postupně musely udělat všechny potřebné kroky. [22]

Měření



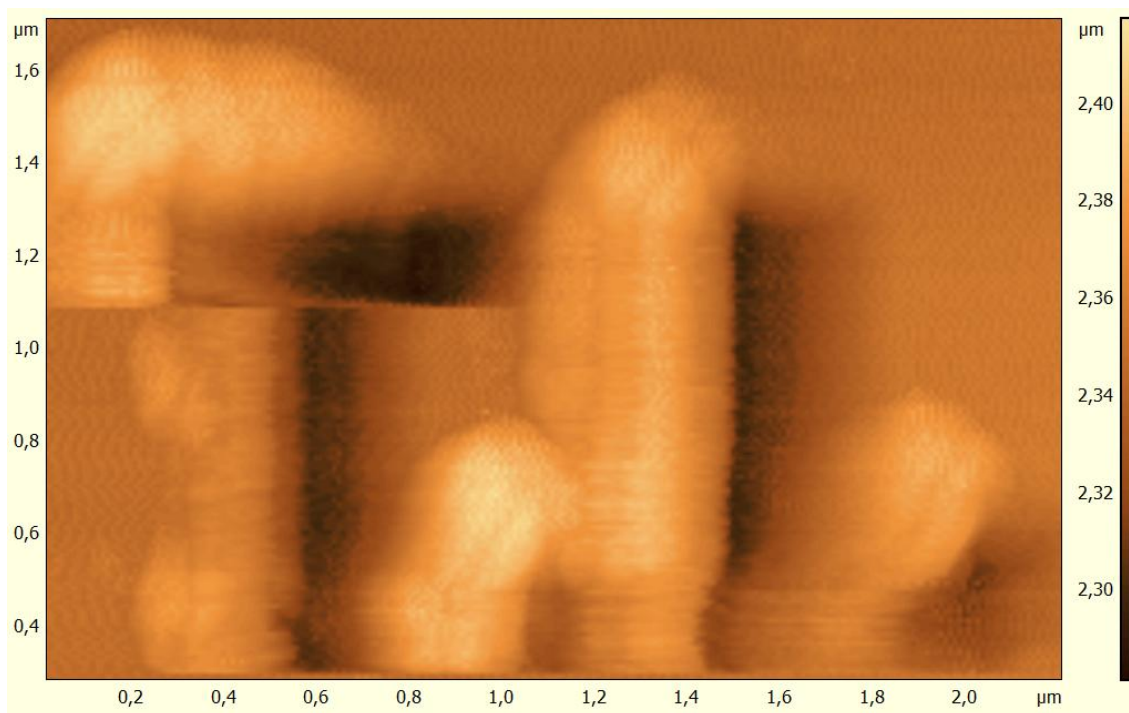
Rezonanční frekvence: 6,24 kHz

Faktor kvality: 22,9

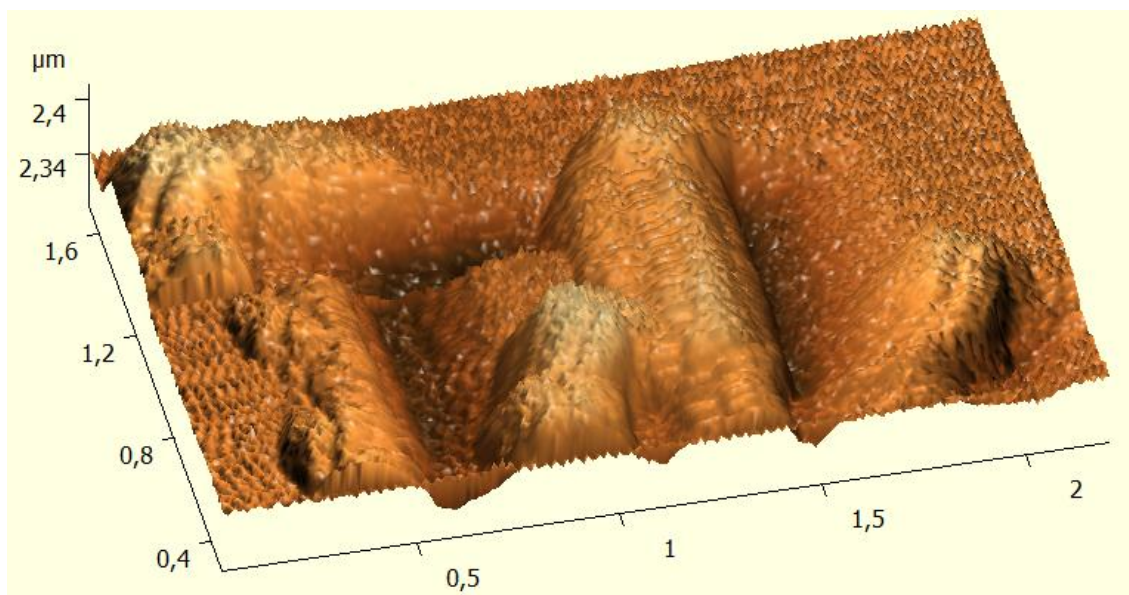
Silová hloubka: 1 500 nm

Délka interakce: 1 500 μ s

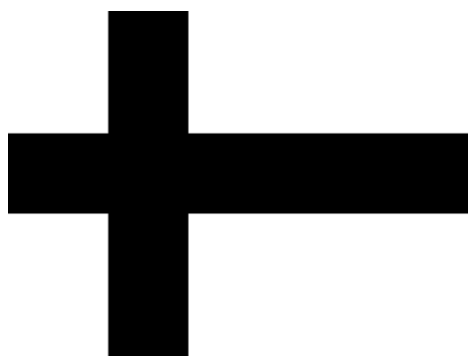
Obrázek 12: Vzor silové litografie – T.I.



Obrázek 13: T.I. – zobrazení 2D



Obrázek 14: T.I. – zobrazení 3D



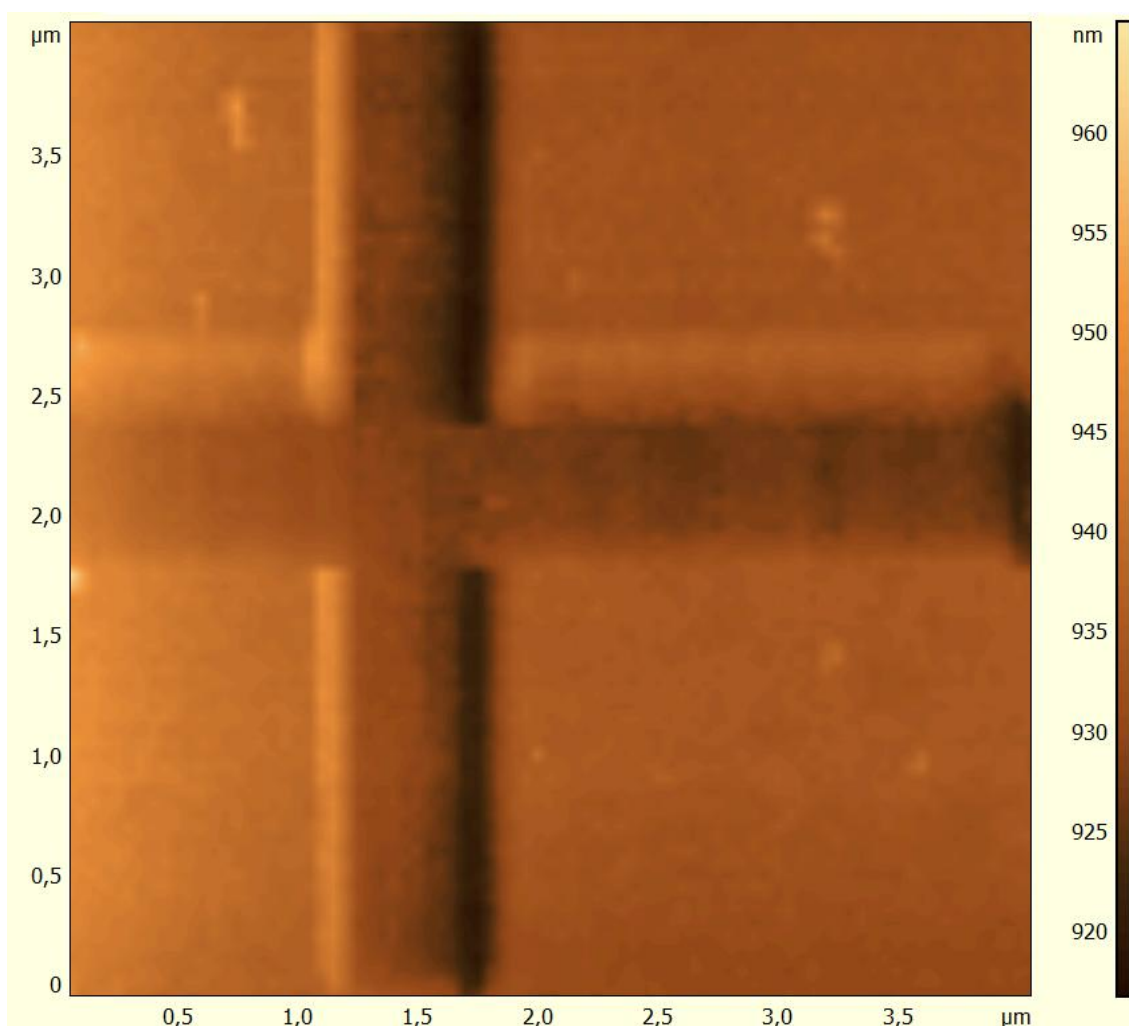
Rezonanční frekvence: 8,05 kHz

Faktor kvality: 24,4

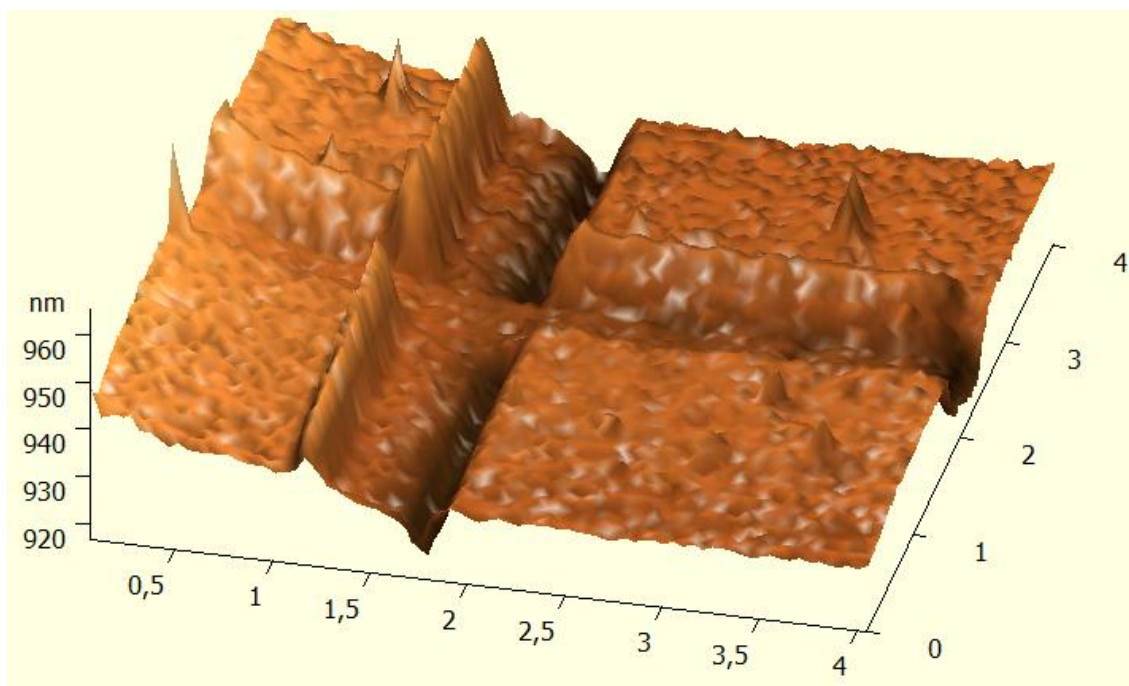
Silová hloubka: 1 000 nm

Délka interakce: 1 000 μs

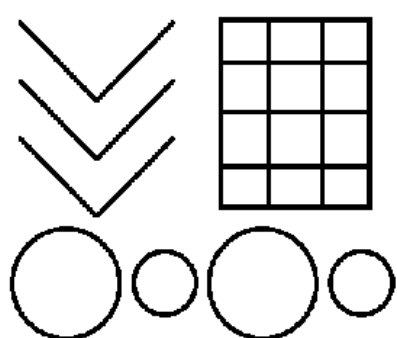
Obrázek 15: Vzor silové litografie – kříž



Obrázek 16: Kříž – zobrazení 2D



Obrázek 17: Kříž – zobrazení 3D



Obrázek 18: Vzor silové litografie – vzor

Rezonanční frekvence: 7,49 kHz

Faktor kvality: 19,6

Vzor 1: Silová hloubka: 1 500 nm

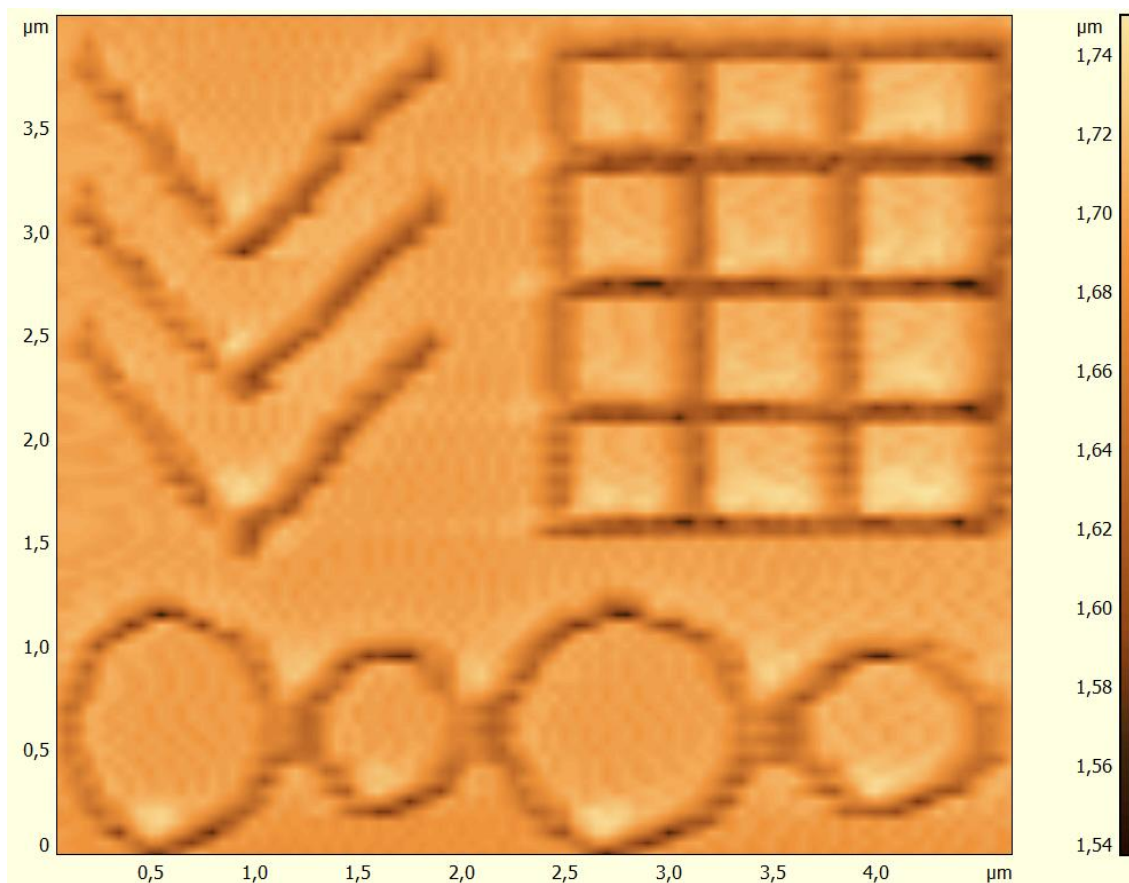
Délka interakce: 1 500 μ s

Vzor 2: Silová hloubka: 2 000 nm

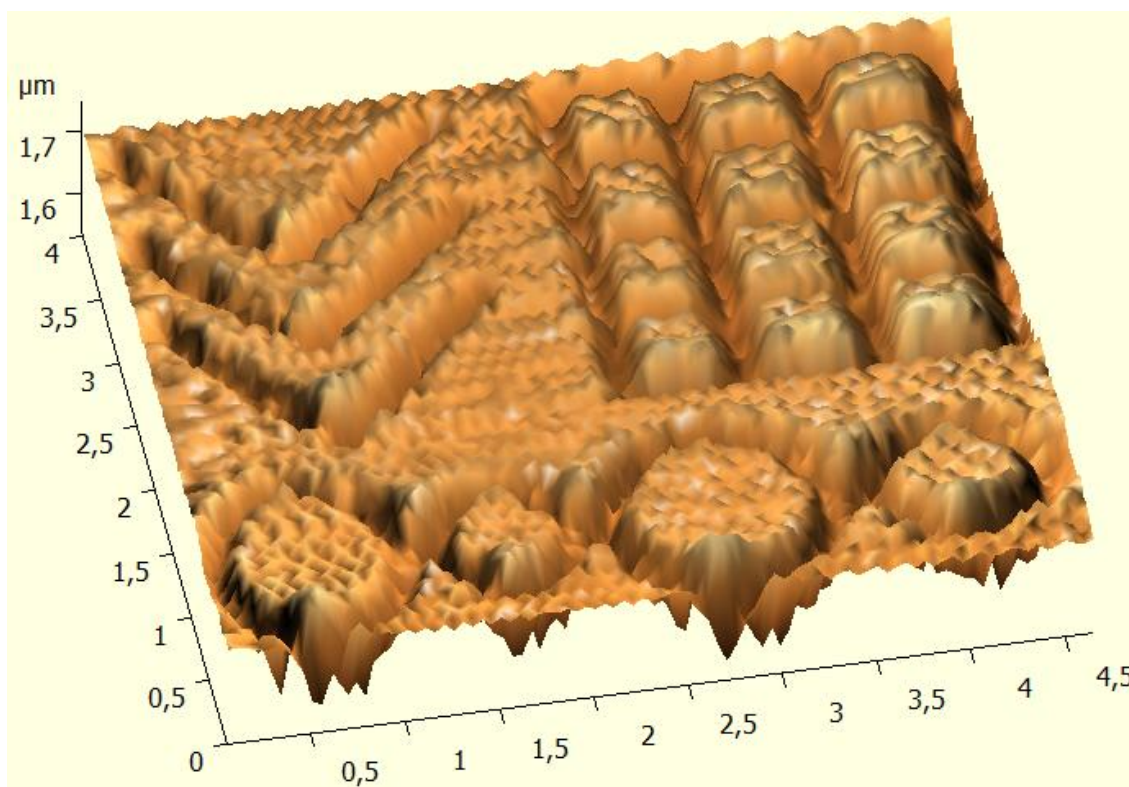
Délka interakce: 1 500 μ s

Vzor 3: Silová hloubka: 1 500 nm

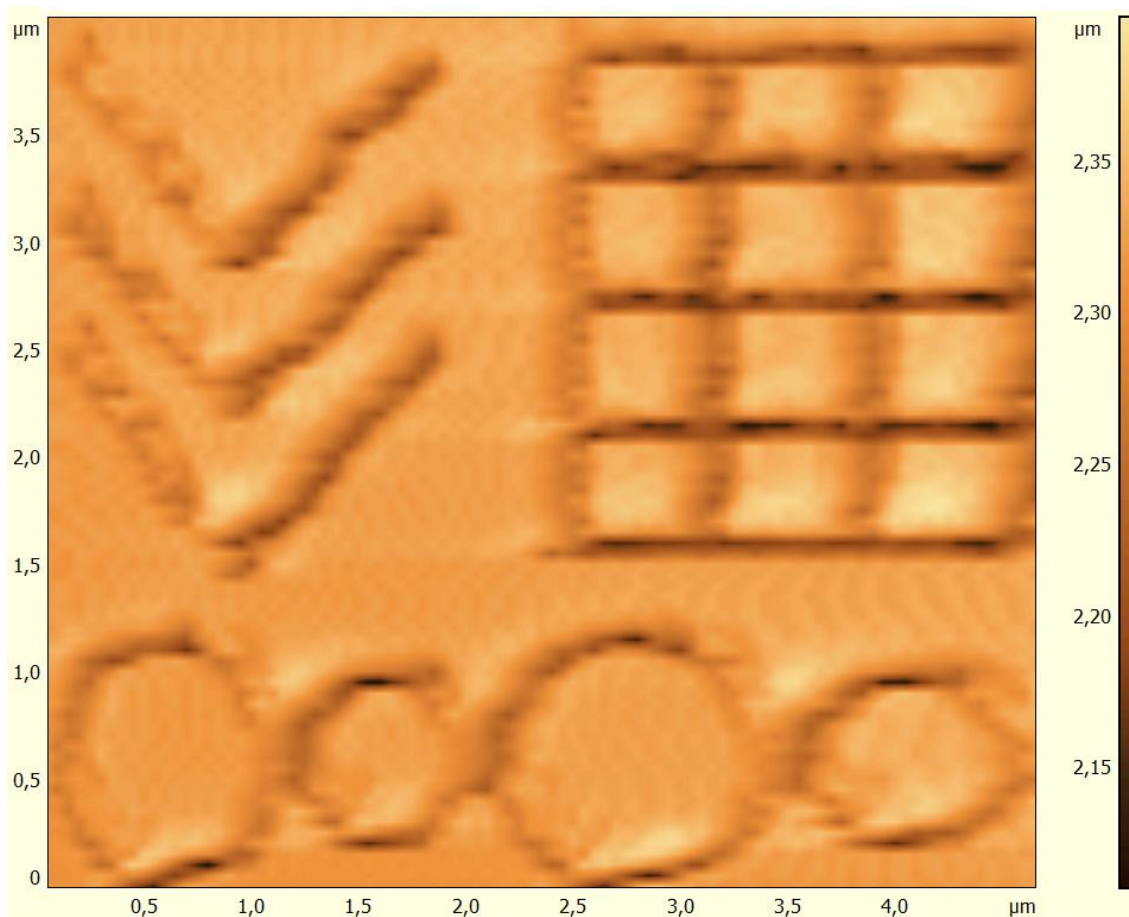
Délka interakce: 2 000 μ s



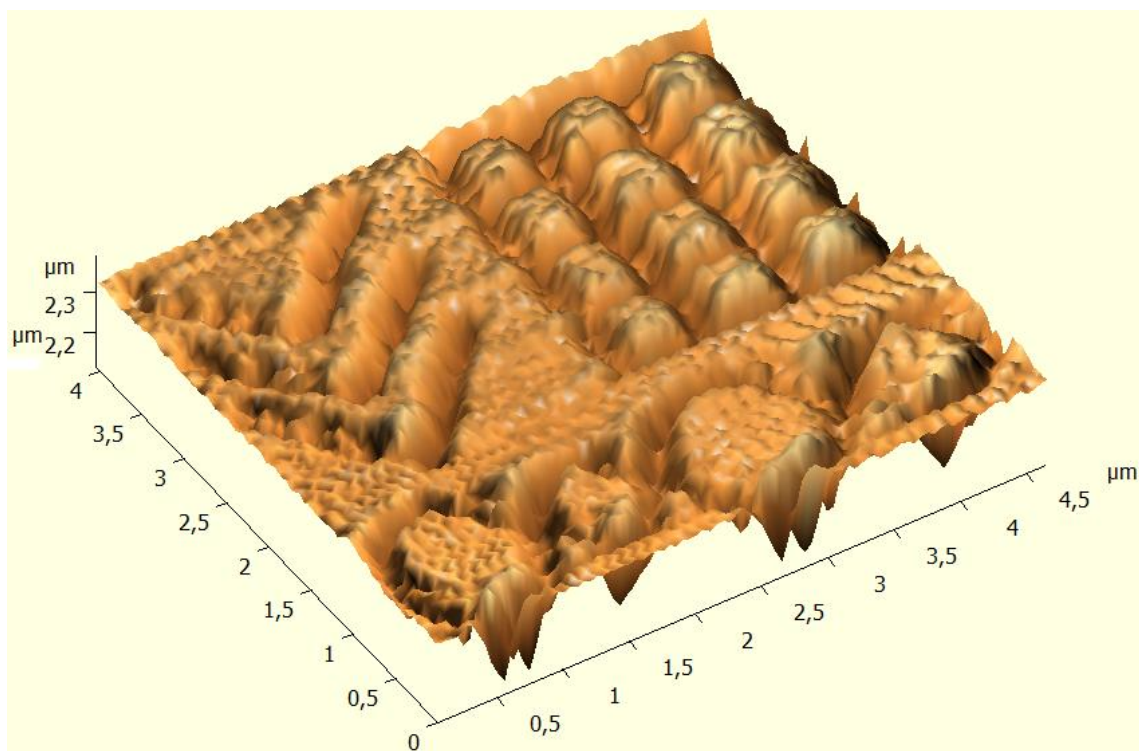
Obrázek 19: Vzor 1 - zobrazení 2D



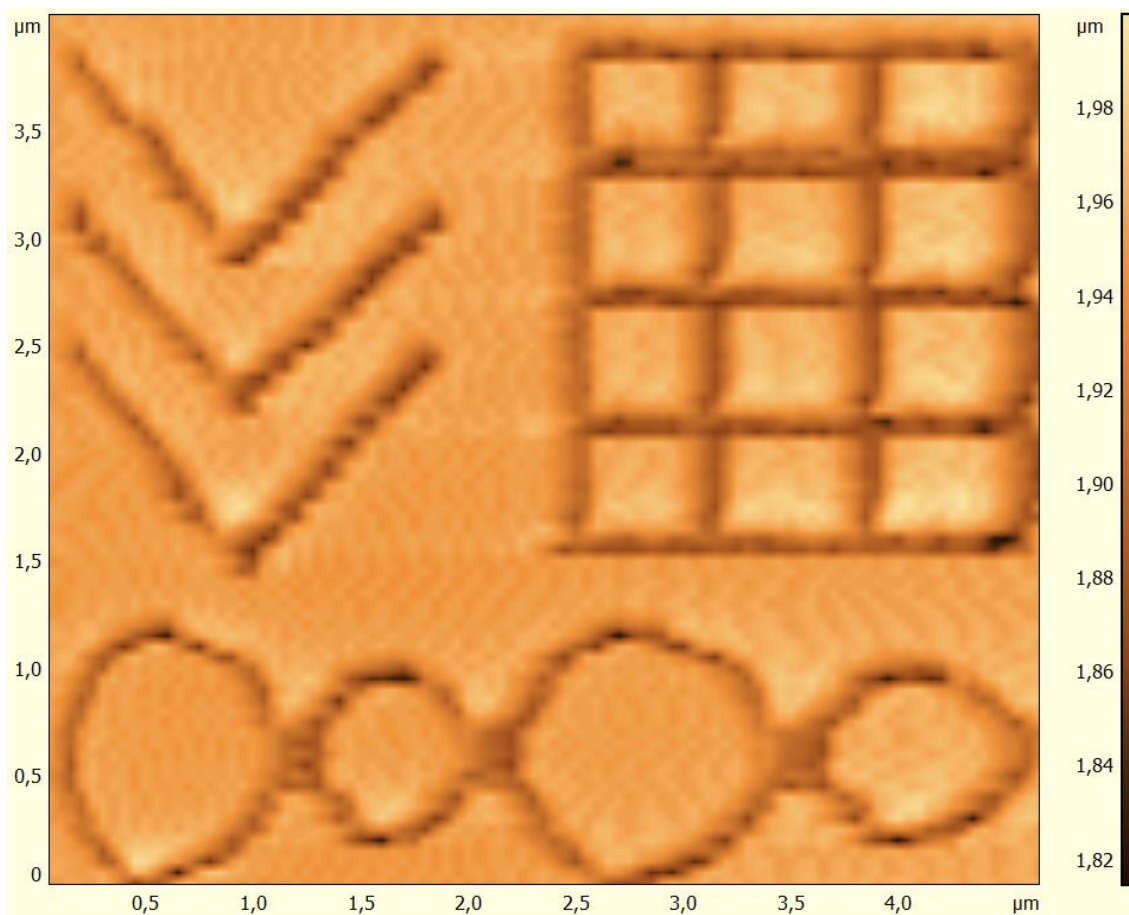
Obrázek 20: Vzor 1 - zobrazení 3D



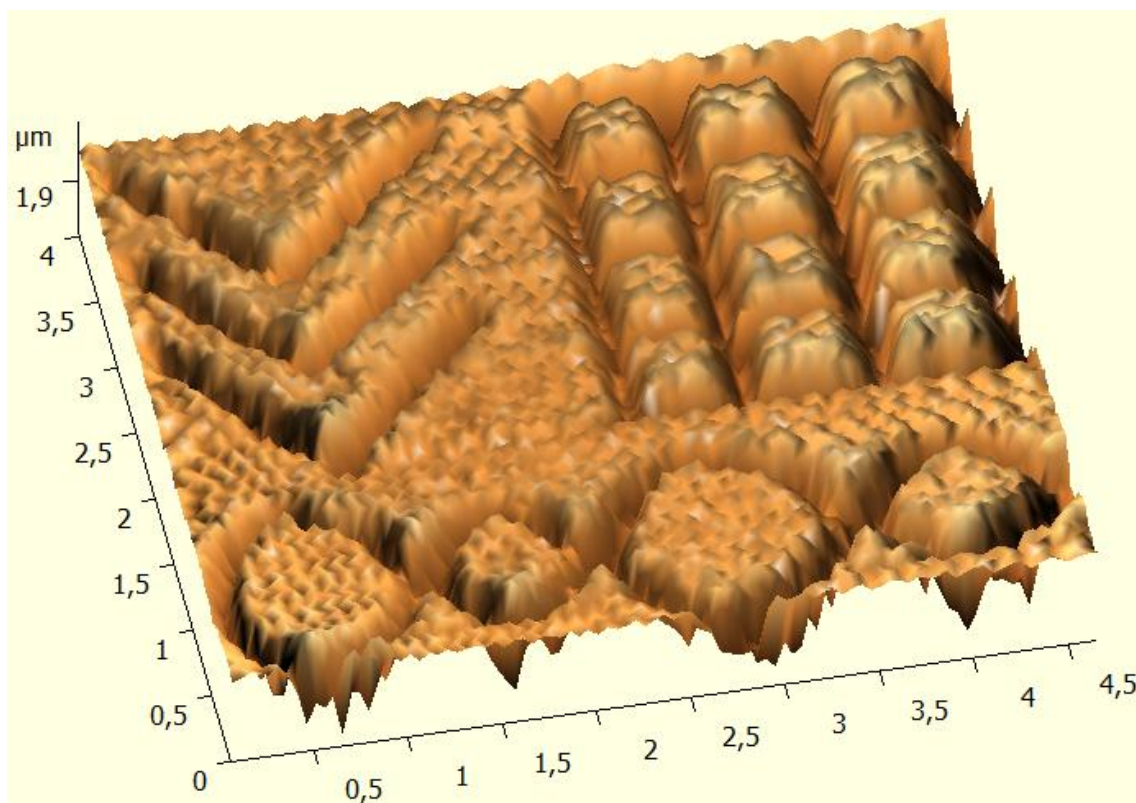
Obrázek 21: Vzor 2 - zobrazení 2D



Obrázek 22: Vzor 2 - zobrazení 3D



Obrázek 23: Vzor 3 - zobrazení 2D



Obrázek 24: Vzor 3 - zobrazení 3D

Zhodnocení výsledků

Na výsledky byla použita korekce, kvůli naklonění vzorku. Vzorky byly nakloněny přibližně o 100-150 nm

T.I.

Tento obrázek byl prvním pokusem, který se mi i povedl. Na 2D obrázku je dobře viditelná hloubka přibližně 100 nm. Při prozkoumání 3D obrázku je patrné, že hrot při svém poklepovém režimu vytlačuje materiál ven. Na některých místech vzorku vznikly kopečky materiálu.

Kříž

Dalším pokusem bylo vytlačení kříže. Podařilo se mi dosáhnout lepšího rozlišení než u T.I., hloubka vytlačeného kříže je přibližně 50 nm. Na 3D obrázku je dobře viditelné, že v místě začátku litografie je navršen materiál. V místě kde hrot skončil s poklepovým režimem, je naopak vidět lehké snížení povrchu. Důvodem snížení je, že na toto místo již nebyl vytlačen žádný materiál. Na obrázku jsou i patrné nerovnosti povrchu a šum.

Vzor 1–3

Mým cílem u těchto tří vzorů bylo zjistit, jak se projeví silová hloubka a délka interakce na výsledku. Při tvorbě vzorů jsem neměnil hrot, abych zajistil co nejpodobnější podmínky mezi nimi. Při porovnávání vzoru 1, 2 a 3 jsem zjistil, že na silové hloubce závisí víc než na délce interakce. Na vzor 3 byl použit více opotřebovaný hrot, proto povrch není tak silně ovlivněn (hloubka je menší než u vzoru 1). Při porovnávání jednotlivých vzorů, je patrné, že s rostoucí délkou interakce klesá kvalita litografie. S rostoucí silovou hloubkou, také klesá kvalita, ale pomaleji.

3.2. NTEGRA Aura

K tomuto přístroji, který jsem využil pro lokální oxidační litografii, jsem zvolil odkaz na manuál, který i když je v angličtině, je díky obrázkům názorný a lehce pochopitelný. [\[23\]](#)

Pro LON jsem využil hrot, který byl pro tuto funkci speciálně udělán. Jeho povrch byl pozlacen z důvodu zvýšení vodivosti.

Parametry hrotu DCP20

Rezonanční frekvence: 350-800 kHz

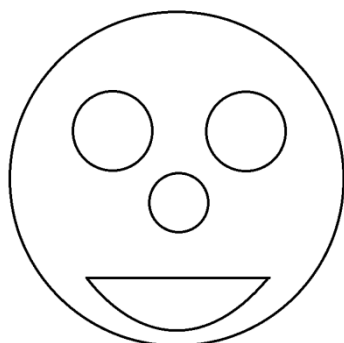
Konstantní síla: 40-110 N/m (tento parametr nemá vliv na LON)

Délka hrotu: 90 μm

Šířka hrotu: 60 μm

Tloušťka hrotu: 1,7-2,3 μm

Měření



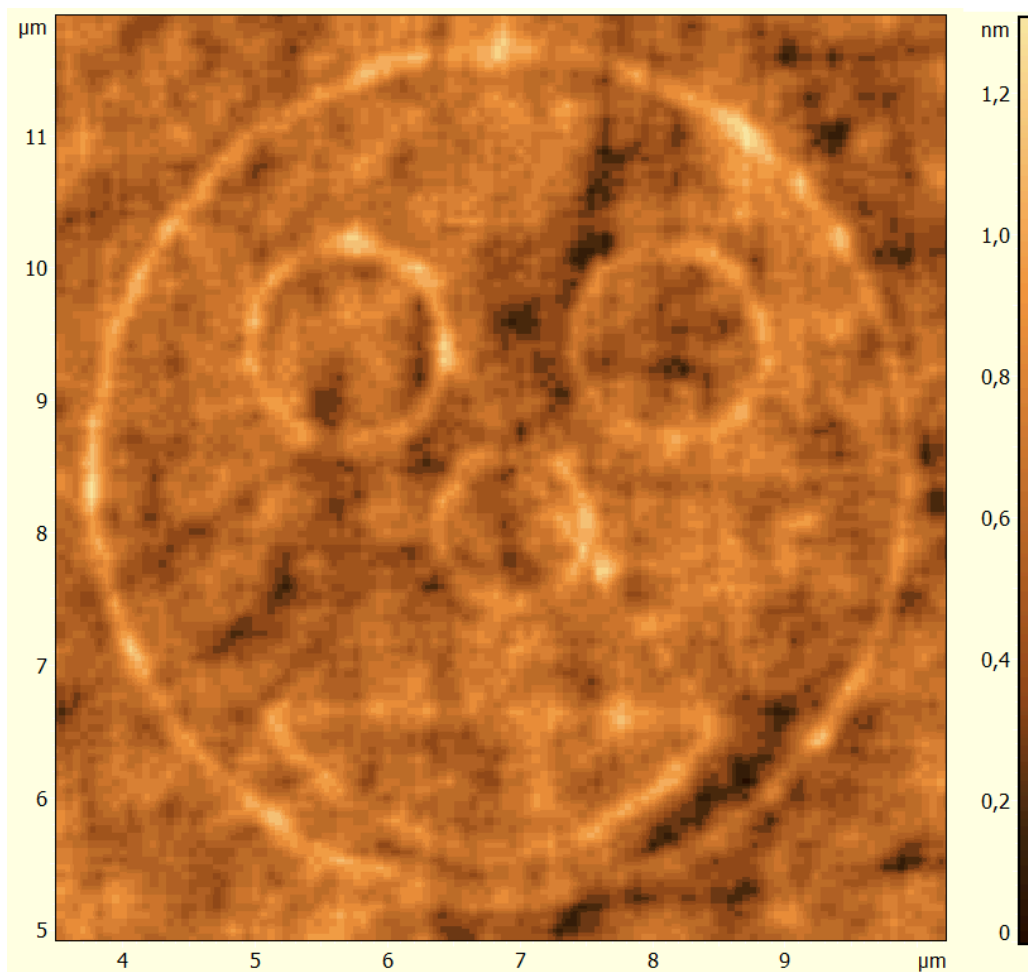
Obrázek 25: Vzor LON – smajlík

Rezonanční frekvence: 479,71 kHz

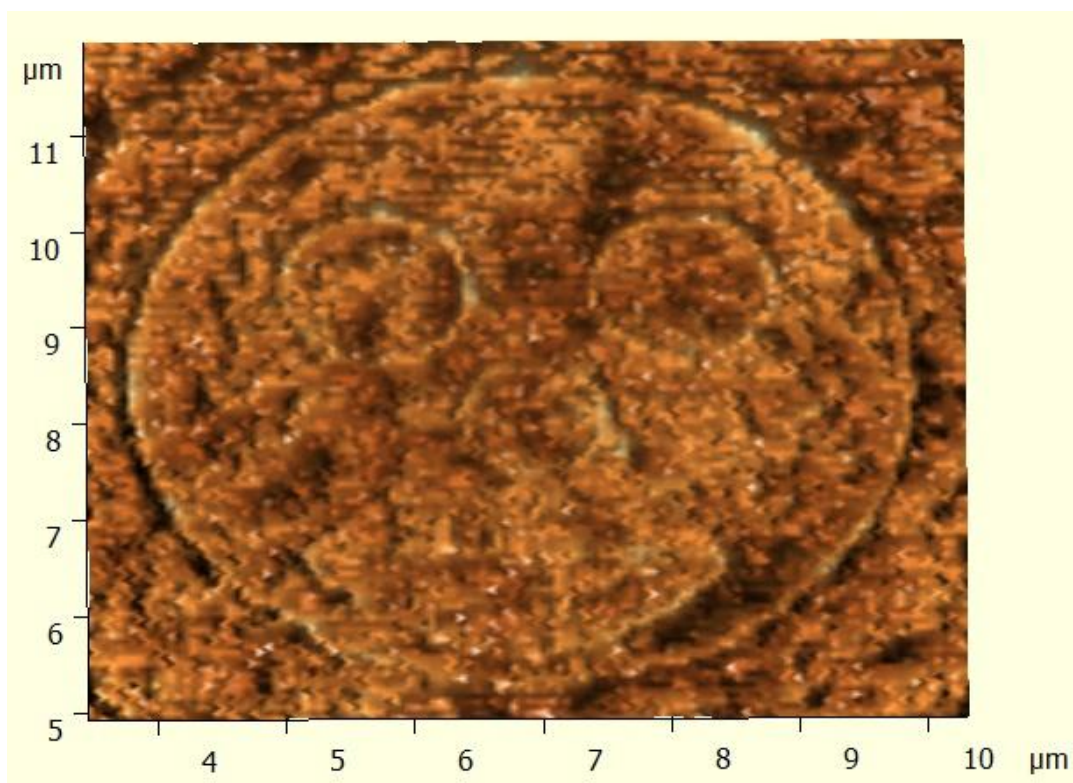
Napětí: 10 V

Doba působení: 2000 ms

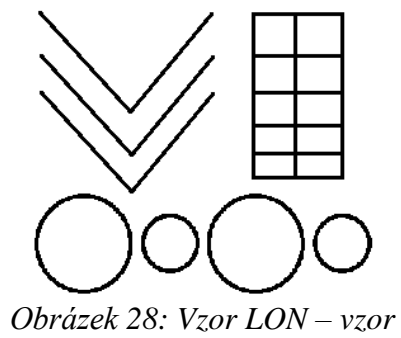
Vlhkost: 63,8 %



Obrázek 26: Smajlík – zobrazení 2D



Obrázek 27: Smajlík - zobrazení 3D



Rezonanční frekvence: 479,71 kHz

Napětí: 10 V

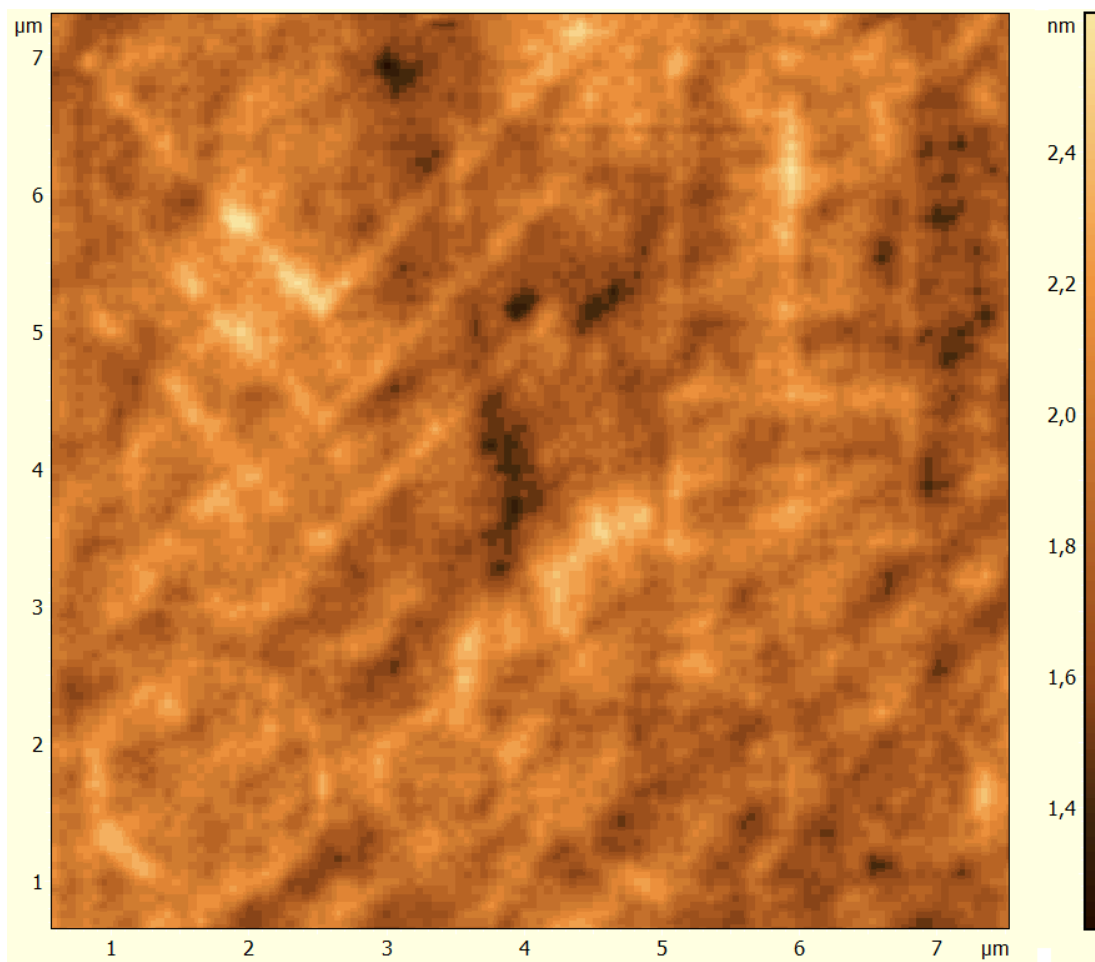
Vlhkost: 56,2 %

Vzor 1: Doba působení: 500 ms

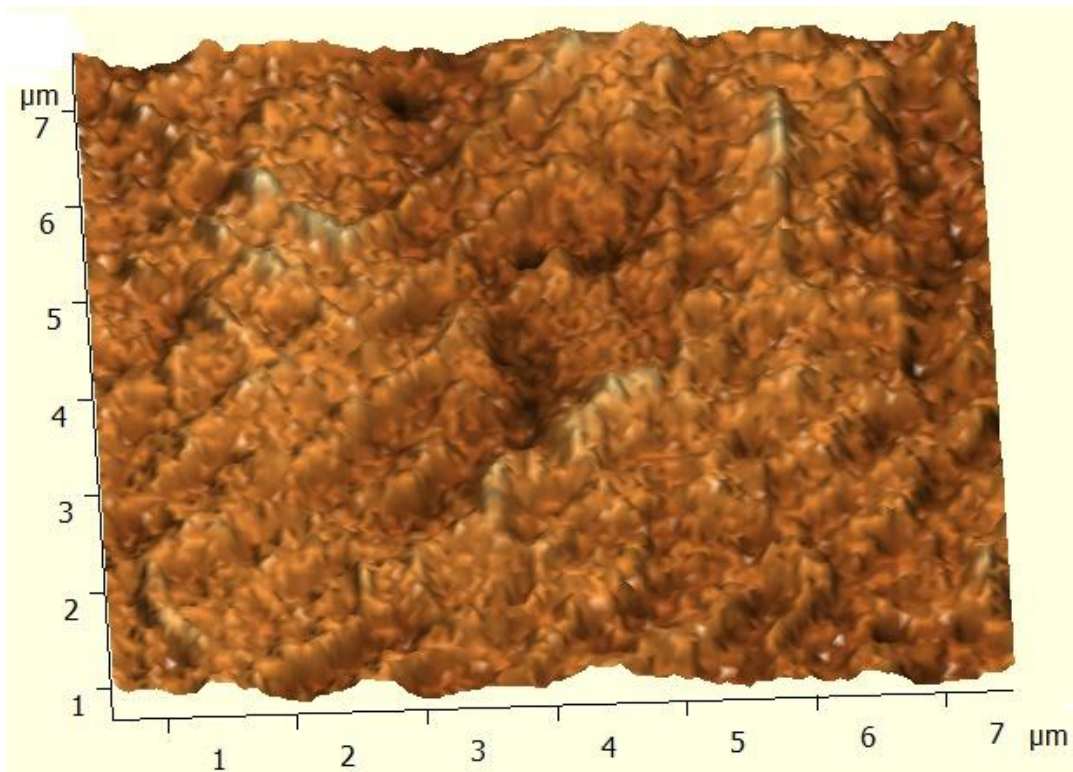
Vzor 2: Doba působení: 1000 ms

Vzor 3: Doba působení: 1500 ms

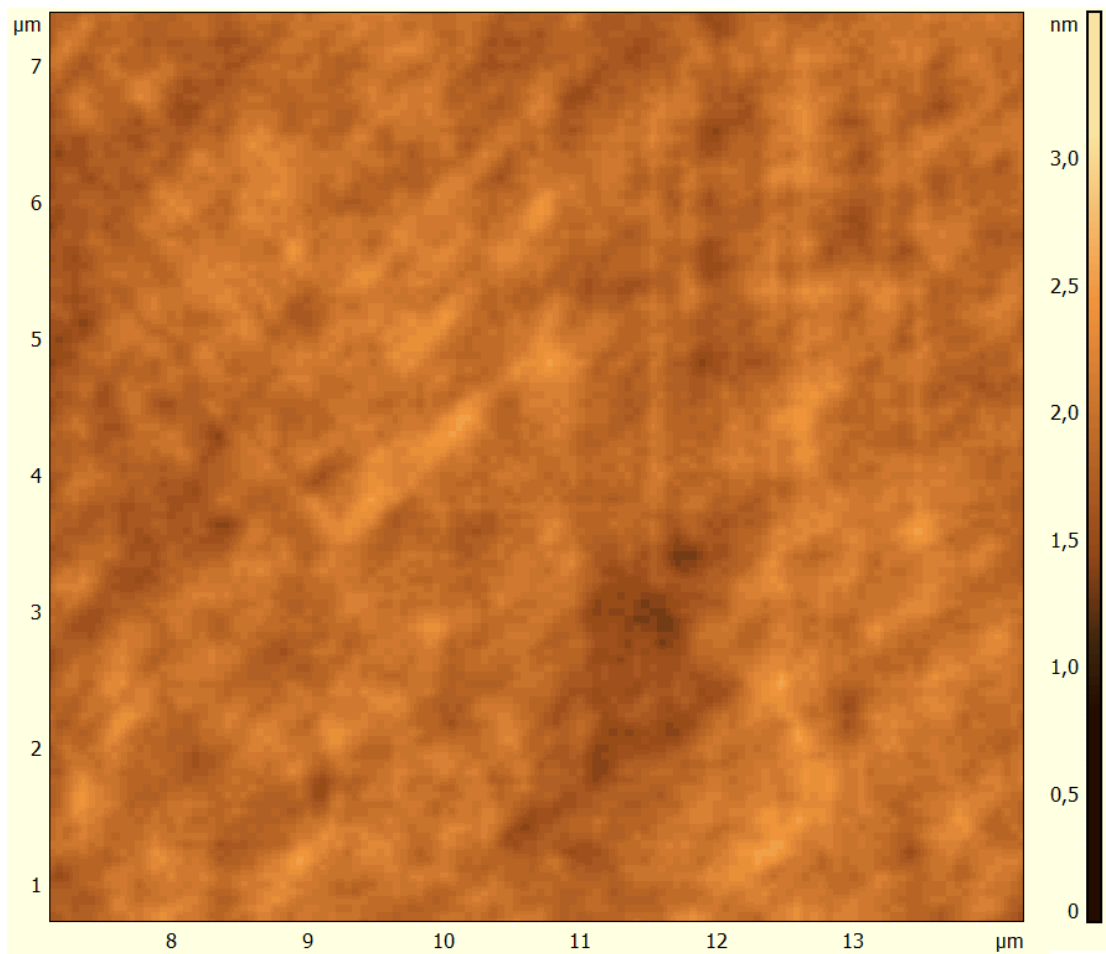
Vzor 4: Doba působení: 2000 ms



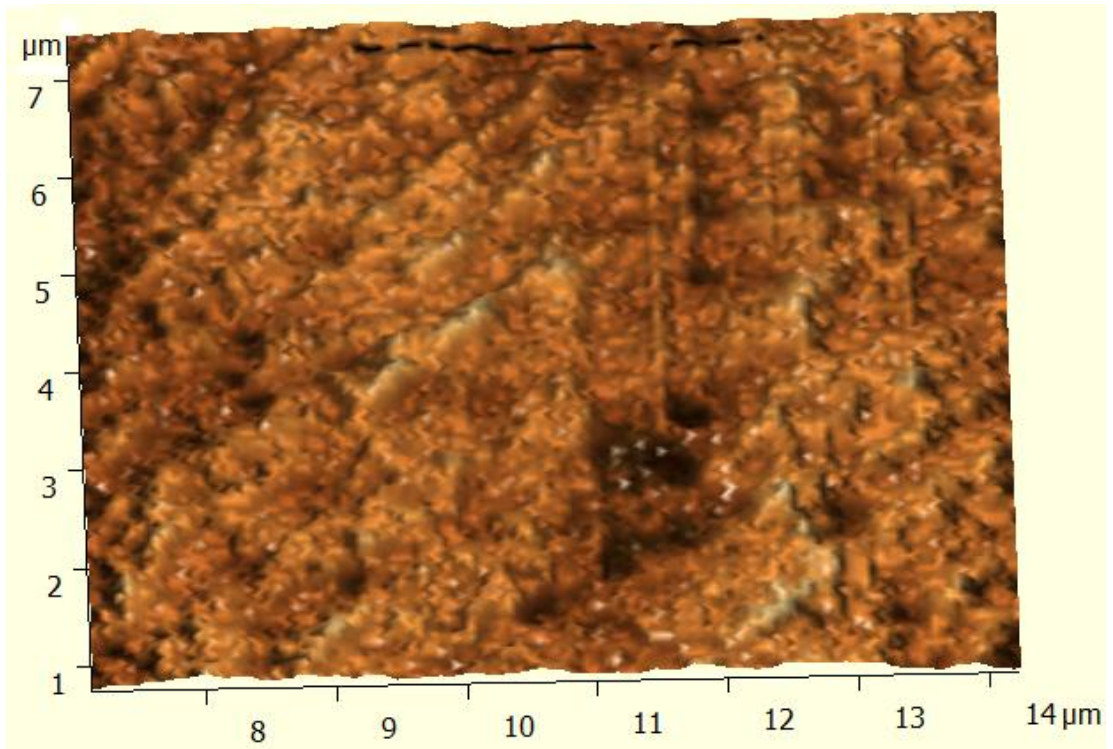
Obrázek 29: Vzor 1 - zobrazení 2D



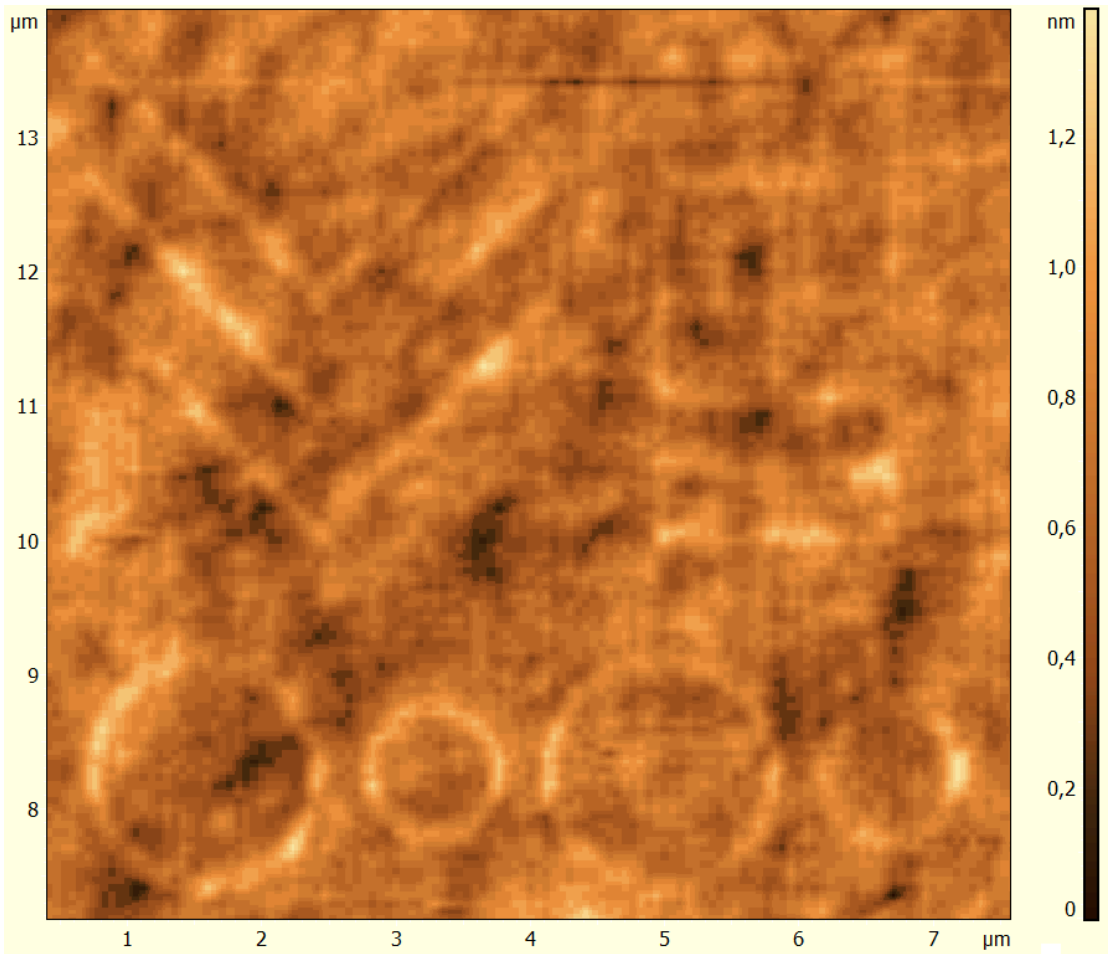
Obrázek 30: Vzor 1 - zobrazení 3D



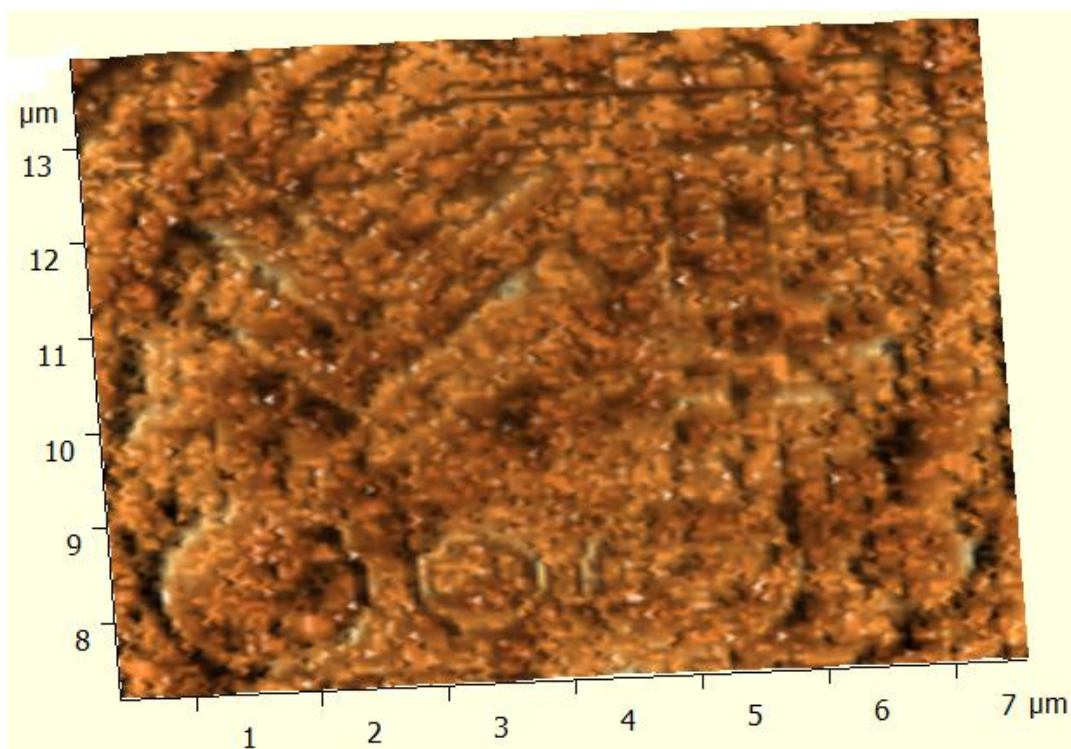
Obrázek 31: Vzor 2 - zobrazení 2D



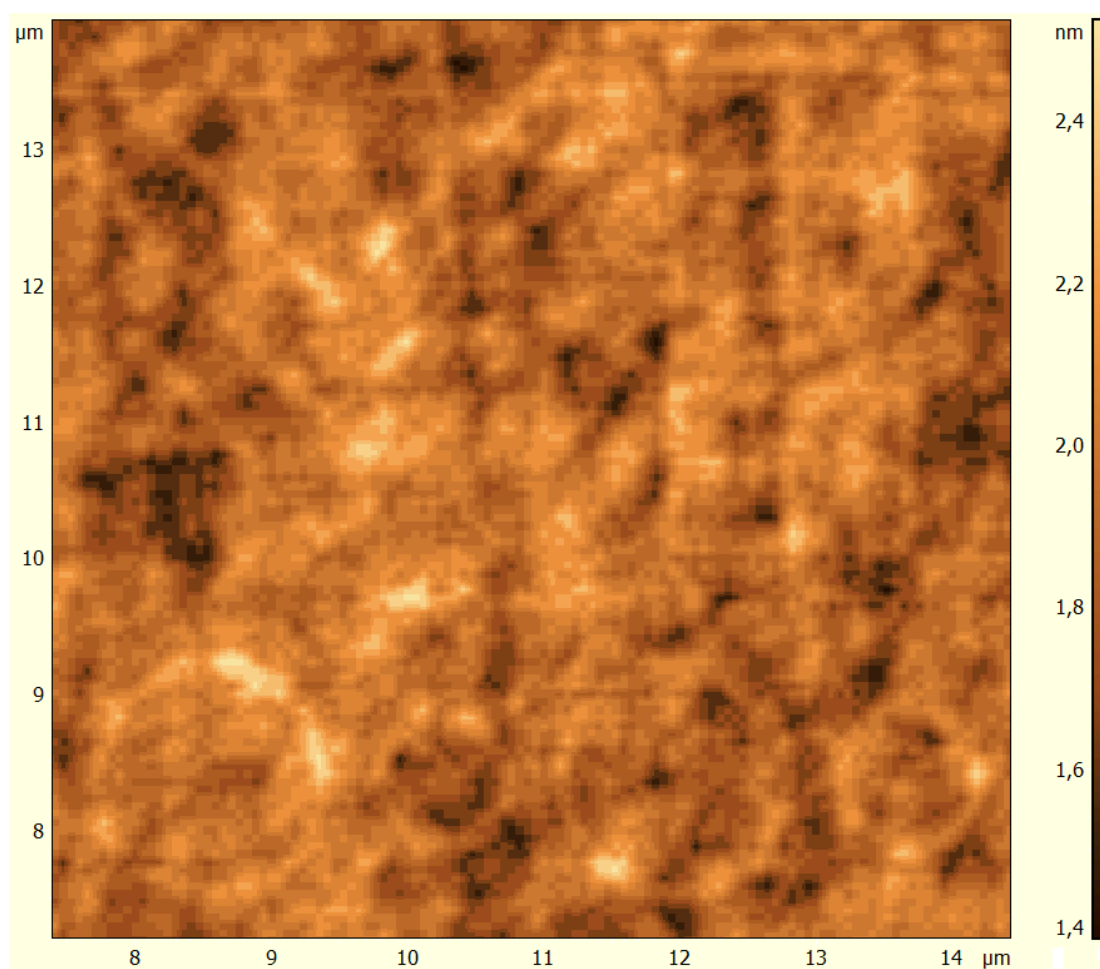
Obrázek 32: Vzor 2 - zobrazení 3D



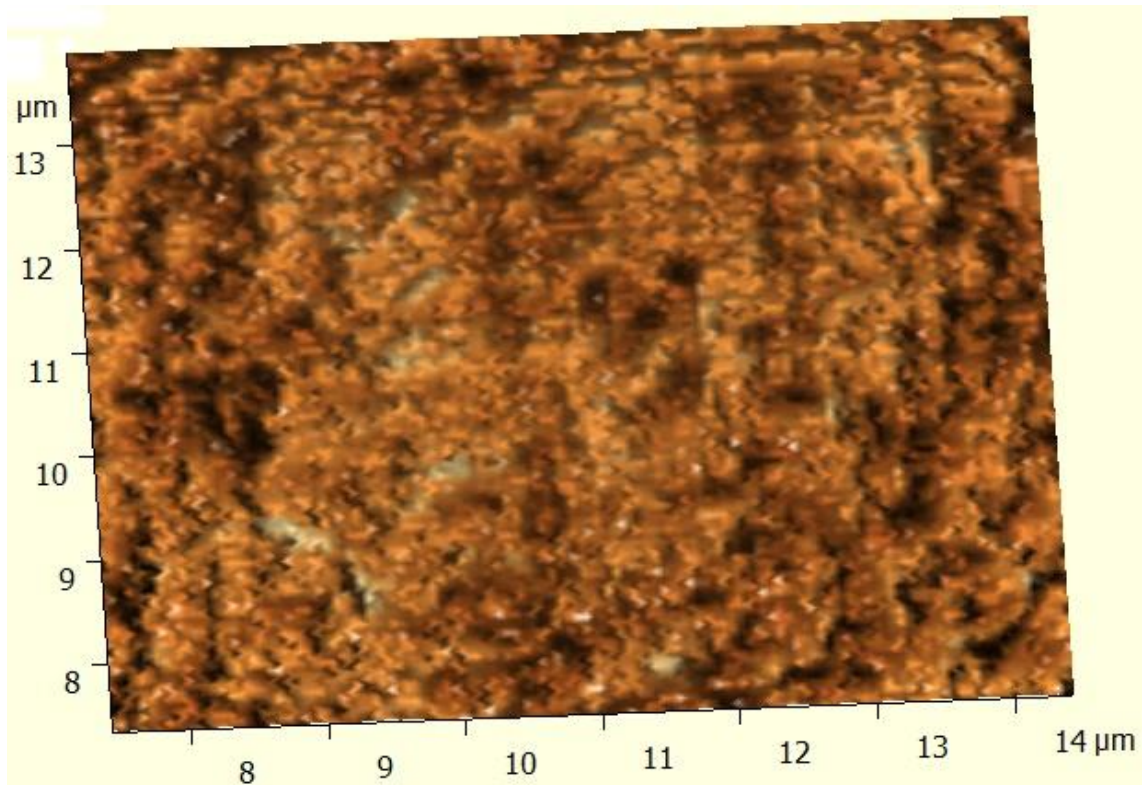
Obrázek 33: Vzor 3 - zobrazení 2D



Obrázek 34: Vzor 3 - zobrazení 3D



Obrázek 35: Vzor 4 - zobrazení 2D



Obrázek 36: Vzor 4 - zobrazení 3D

Zhodnocení výsledků

Na výsledky byla použita korekce, kvůli naklonění vzorku. Vzorky byly nakloněny přibližně o 170 nm.

První pokusy při použití metody LON se nepodařily. LON sice proběhla, ale na vzorcích nebylo poznat původní motivy, které jsem se pokoušel vytvořit.

Smajlík

Prvním úspěšným pokusem při LON byl smajlík. Z 2D obrázku jsem zjistil, že výška takto vytvořeného smajlíka je přibližně 1 nm. Jednotlivé části oxidace nejsou stejně vysoké, hlavní problém byl poškrábaný povrch. Z 3D obrázku je vidět, že se neoxiduje pouze jedno místo, ale i blízké okolí.

Vzor 1–4

Při tvorbě vzorů 1–4 jsem neměnil hrot, což je jedním z důvodů proč se kvalita zhoršuje. Pořadí, ve kterém byly vzory tvořeny, je vzor 3, vzor 1, vzor 4 a nakonec vzor

2. Na vzoru 1 je dobře patrná oxidace šikmých a vodorovných čar. Oxidace kružnic nejsou tak dobře patrné, příčinou je poškrábání povrchu. Ze špatně vytvořených motivů u vzoru 2 jsem vyvodil, že hrot byl poškozen. Použil jsem větší rozsah stupnice (přibližně 3 nm), protože při menším rozsahu stupnice (1 nm), nebyly motivy viditelné kvůli šumu a křivosti povrchu. Při porovnání vzoru 1 a 3 je nejlépe vidět jak závisí doba působení na výšce oxidace. U vzoru 3 není výška oxidace několikrát větší, ale v místech kde je povrch poškrábán (prohlubeň) se vytvořila větší výška oxidační vrstvy než u vzoru 1. Ve vzoru 4 se viditelně projevila delší doba působení tím, že se oxidovala větší plocha než u nižší doby.

Závěr

Při tvorbě textu k nanolitografickým technikám jsem využíval níže uvedené materiály. Jelikož většina dostupných materiálů je v angličtině, bylo potřeba kvalifikovaného překladu. Problematika je natolik odborná, že mi dosavadní předměty v rámci studia oboru Aplikovaná fyzika neumožnili všechny pojmy dobře pochopit. S pomocí vedoucího bakalářského práce, jsem nakonec seskupil základní informace o nanolitografiích. Jak je z bakalářské práce patrné, má elektronová litografie největší budoucnost, jelikož s ní jde dosáhnout největšího rozlišení. Fotolitografie je dnes asi nejrozšířenější metodou, její největší výhodou je rychlost, se kterou se daná součástka vyrábí. Podle mého názoru jsem dosáhl s přístrojem NanoEducator uspokojivých výsledků. Z obrázků, které jsem vytvořil, je patrné, že tato metoda není vhodná pro přesnou nanolitografii. Je to způsobeno tím, že hrot ovlivní i okolní místa (vytlačení materiálu). Při mých prvních pokusech s NTEGRA Aura jsem zjistil, že LON se nemusí vždy podařit i při dodržení stejných podmínek. Nejistil jsem důvod, čím by to mohlo být způsobeno. Na obrázcích je vidět, že se mi podařilo dosáhnout dobrého rozlišení. Velikost oxidované vrstvy je v řádech nanometrů, zatímco u silové litografie je hloubka v desítkách až stovkách nanometrů.

Když svoji práci posuzuji s odstupem krátkého času, usuzuji, že jsem dosáhl požadovaných výsledků. Bakalářská práce mi byla přínosem, naučil jsem se vytvářet odborný text jak po teoretické tak experimentální stránce. Znalosti o nanolitografiích a metodách ke skenování povrchu bych rád využil při dalším studiu, protože jsem se rozhodl pokračovat v navazujícím studiu v oboru Nanotechnologie. Věřím, že mi budou poodhaleny všechny problémy, které se vyskytují při práci s NTEGRA Aura.

Při shromažďování informací o nanolitografiích jsem narazil na internetové stránky, které byly svým obsahem pro mě velmi zajímavé. Proto jsem vytvořil přílohu a tam dané odkazy umístil.

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Pohyb hrotu – režim konstantní výšky</i>	9
<i>Obrázek 2: Pohyb hrotu – režim konstantního tunelového proudu</i>	10
<i>Obrázek 3: Závislost meziatomárních sil na vzdálenosti [1]</i>	11
<i>Obrázek 4: Chování hrotu s kapkou vody v kontaktní a nekontaktní režimu AFM [1]</i>	13
<i>Obrázek 5: Detekce raménka pomocí laseru [1]</i>	14
<i>Obrázek 6: Elektronový litograf [2]</i>	15
<i>Obrázek 7: DUV fotolitograf [9]</i>	20
<i>Obrázek 8: Postupy expozice a) skenující metoda b) rastrovací metoda c) metoda s přímým krokováním [3]</i>	26
<i>Obrázek 9: NTEGRA Aura [17]</i>	28
<i>Obrázek 10: NanoEducator</i>	32
<i>Obrázek 11: Kamera NanoEducatoru</i>	32
<i>Obrázek 12: Vzor silové litografie – T.I.</i>	33
<i>Obrázek 13: T.I. – zobrazení 2D</i>	34
<i>Obrázek 14: T.I. – zobrazení 3D</i>	34
<i>Obrázek 15: Vzor silové litografie – kříž</i>	35
<i>Obrázek 16: Kříž – zobrazení 2D</i>	35
<i>Obrázek 17: Kříž – zobrazení 3D</i>	36
<i>Obrázek 18: Vzor silové litografie – vzor</i>	36
<i>Obrázek 19: Vzor 1 - zobrazení 2D</i>	37
<i>Obrázek 20: Vzor 1 - zobrazení 3D</i>	37
<i>Obrázek 21: Vzor 2 - zobrazení 2D</i>	38
<i>Obrázek 22: Vzor 2 - zobrazení 3D</i>	38
<i>Obrázek 23: Vzor 3 - zobrazení 2D</i>	39
<i>Obrázek 24: Vzor 3 - zobrazení 3D</i>	39
<i>Obrázek 25: Vzor LON – smajlík</i>	41
<i>Obrázek 26: Smajlík – zobrazení 2D</i>	42
<i>Obrázek 27: Smajlík - zobrazení 3D</i>	42
<i>Obrázek 28: Vzor LON – vzor</i>	43
<i>Obrázek 29: Vzor 1 - zobrazení 2D</i>	43
<i>Obrázek 30: Vzor 1 - zobrazení 3D</i>	44
<i>Obrázek 31: Vzor 2 - zobrazení 2D</i>	44

<i>Obrázek 32: Vzor 2 - zobrazení 3D</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 33: Vzor 3 - zobrazení 2D</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 34: Vzor 3 - zobrazení 3D</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 35: Vzor 4 - zobrazení 2D</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 36: Vzor 4 - zobrazení 3D</i>	<i>47</i>

Seznam použitých zdrojů

- [1] Kubínek R., Vůjtek M., Mašláň M.: Mikroskopie skenující sondou, Vydavatelství Univerzity Palackého v Olomouci, 2003, 1. vydání, ISBN 80-244-0602-0
- [2] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:LitografUPT1.jpg> [ze dne 19.3.2012]
- [3] Szendiuch I., Musil V., Stehlík J.: Výroba součástek a konstrukčních prvků (MVSK), Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, 2006
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_lithography [ze dne 19.3.2012]
- [5] <http://iac.uta.edu/mntv/pdf/E-BeamLithography.pdf> [ze dne 19.3.2012]
- [6] Kadavý T.: Nanotechnologie v polovodičové elektronice, 2009, Ročníková práce z fyziky, <http://www.mensagymnazium.cz/pdf/prace-studentu/nanotechnologie.pdf> [ze dne 19.3.2012]
- [7] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433200003524> [ze dne 19.3.2012]
- [8] <http://investing.businessweek.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=3324303> [ze dne 19.3.2012]
- [9] <http://www2.ece.ttu.edu/nanophotonics/research.html> [ze dne 19.3.2012]
- [10] <http://www.cemag.us/article/rca-victorious> [ze dne 19.3.2012]
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/RCA_clean [ze dne 19.3.2012]
- [12] Scotten W. Jones: Photolithography, IC Knowledge LLC, Copyright, 2000
- [13] <http://wikipedia.infostar.cz/p/ph/photolithography.html> [ze dne 19.3.2012]
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/Photolithography> [ze dne 19.3.2012]
- [15] Stoklasa F.: Technologické procesy při výrobě polovodičových prvků I. - Aplikace litografie, 2011, <http://coptel.coptkm.cz/>
- [16] <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html> [ze dne 19.3.2012]
- [17] NT-MDT: NTEGRA katalog, 2007. <http://www.ntmdt.com/platform/ntegra>
- [18] <http://cnx.org/content/m24908/latest/> [ze dne 19.3.2012]
- [19] Garcia R., Torres S.: Alternative Lithography: Unleashing the Potentials of Nanotechnology, Local Oxidation Nanolithography, Kluwer Academic/Plenum Publisher, 2003
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/AFM_Nanolithography [ze dne 19.3.2012]
- [21] NT-MDT: NanoEducator – Instruction Manual, 2007. <http://www.ntmdt.com>
- [22] NT-MDT: NanoEducator – Practical Guide, 2007. <http://www.ntmdt.com>
- [23] NT-MDT: NTEGRA Aura – Manual, <http://www.ntmdt.com>

Příloha

Do přílohy jsem vložil odkazy na videa, na kterých je ukázka nanolitografií, výrobní haly, kde používají tyto metody a video od firmy NT-MDT o NanoEducatoru. Ve videích je komentář k jednotlivým metodám v angličtině, akorát popis přístroje NanoEducator je v ruštině.

Elektronová litografie:

<http://www.youtube.com/watch?v=25AsHRgBJDM> [ze dne 23.3.2012]

Fotolitografie:

<http://www.youtube.com/watch?v=9x3Lh1ZfggM> [ze dne 23.3.2012]

Výrobní závod: Infineon Technologies AG:

<http://www.youtube.com/watch?v=nOVVtog2IH4&feature=related> [ze dne 23.3.2012]

NanoEducatoru:

<http://www.youtube.com/watch?v=nppp7QmUU4I> [ze dne 23.3.2012]