



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Disertační práce

Tvorba bezpečnostních značek pomocí mikroskopie atomárních sil

Fabrication of Security Features Using Atomic Force Microscopy

Autor: **Ing. Josef Kudělka**

Studijní program: Inženýrská informatika (P3902)
Studijní obor: Inženýrská informatika (3902V023)

Školitel: doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Zdeněk Dvořák, PhD.
doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
Ing. Libor Šustr

Zlín, únor 2020

© Josef Kudělka

Klíčová slova: litografie, identifikační značení předmětů, bezpečnostní značky, mikroskopie atomárních sil, mikroskopie skenující sondou, polymer.

Key words: lithography, objects marking, security marks, atomic force microscopy, scanning probe microscopy, polymer.

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

Tuto práci bych rád věnoval mému dědovi PaedDr. Buhmilovi Šenkovi, CSc., který si její dokončení přál snad ze všech nejvíce.

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá se tvorbou a charakterizací bezpečnostních značek užitím mikroskopie atomárních sil, konkrétně tzv. rycí technikou. Vytvořené značky by mohly sloužit pro skryté identifikační značení předmětů případně i pro utajený přenos informací (steganografie). Bezpečnostní značkou se tedy v této práci rozumí jakákoliv struktura umožňující naplnění těchto cílů. Může se jednat o symbol (např. znak organizace), nápis běžným písmem nebo i kód.

Kromě značek samotných je v práci prezentováno testování vlivu jednotlivých rycích parametrů (směr, rychlost a síla rytí) na vytvářené struktury a vliv teploty na stabilitu mezoskopických polymerových struktur.

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with the creation and characterization of security marks using AFM scratching technique. These security marks could be used for invisible objects marking, possibly even for secret information transfer (steganography).

A security mark in this work means any structure that enables these goals to be met. It may be a symbol (e.g. an organization sign), a regular font or even a code.

In addition to the marks themselves, the thesis describes how presented polymer structures are affected by individual scratching parameters (direction, speed and force of scratching) and their stability when exposed to higher temperature.

OBSAH

Obsah	6
Úvod	7
1. Cíle práce	8
2. Teoretická část	9
2.1 Litografie	9
2.1.1 AFM litografie	11
2.2 Mikroskopie atomárních sil	12
2.3 Polykarbonát (PC)	14
2.3.1 Závislost polymerů na teplotě	15
3. Experimentální část	18
3.1 Volba jednotlivých parametrů	18
3.1.1 Vliv rychlosti rytí na vytvářené struktury	18
3.1.2 Vliv směru rytí na vytvářené struktury	22
3.1.3 Vliv síly rytí na vytvářené struktury	25
3.2 Vliv teploty na stabilitu vyrytých struktur	30
3.3 Tvorba bezpečnostních značek	37
3.3.1 Symbol	38
3.3.2 Nápis (FAI)	40
3.3.3 Kód (PASSWORD)	42
Přínos práce pro vědu a praxi	50
Závěr	52
Použitá literatura a zdroje	54
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	60
Seznam použitých symbolů a zkratek	61
Publikační činnost autora	62
Profesní životopis	65

ÚVOD

Nanotechnologie je jeden z nejvíce rozvíjejících se oborů současnosti s velkým budoucím potenciálem v mnoha oblastech běžného života jako je elektronika, zdravotnictví, strojírenství, chemický průmysl, optický průmysl, vojenský průmysl atd. Klíčová je zde schopnost vytvářet a upravovat velmi malé struktury v nanometrické škále. K tomu slouží nanolitografie. Tato technika, sloužící k modifikaci povrchu, se mimo jiné využívá pro výrobu integrovaných obvodů, paměťových zařízení, zobrazovacích jednotek nebo senzorů. Této tematice se obšírně věnuje i odborná literatura [1-7]. Nicméně, využití nanolitografie pro tvorbu značek v bezpečnostních aplikacích je poněkud opomíjeno. Tyto značky by například mohly sloužit pro skryté identifikační značení předmětů případně i pro utajený přenos informací (steganografie). Výhodou nanometrických struktur je jejich poměrně náročná odhalitelnost. Není možné je zobrazit optickým mikroskopem. A i při využití elektronového mikroskopu nebo mikroskopu atomárních sil je jejich nalezení a přečtení (pokud neznáme jejich polohu) značně obtížné. Nemluvě o případném pokusu o jejich kopírování nebo modifikaci.

Teoretická část této práce obsahuje zejména dělení a popis jednotlivých litografických metod s důrazem na AFM litografii, poněvadž základní silová technika této skupiny, tzv. rytí, byla použita při prezentovaných experimentech. V Experimentální části jsou prezentovány provedené experimenty a jejich výsledky.

1. CÍLE PRÁCE

Na základě článků ze zahraničních časopisů a předběžně provedených experimentů, zkušeností a konzultací byly stanoveny následující cíle disertační práce:

- Tvorba a charakterizace bezpečnostních značek, jež by mohly sloužit především pro skryté identifikační značení předmětů případně i pro utajený přenos informací (steganografie).
- Určení informační hustoty zápisu při použité technologii.

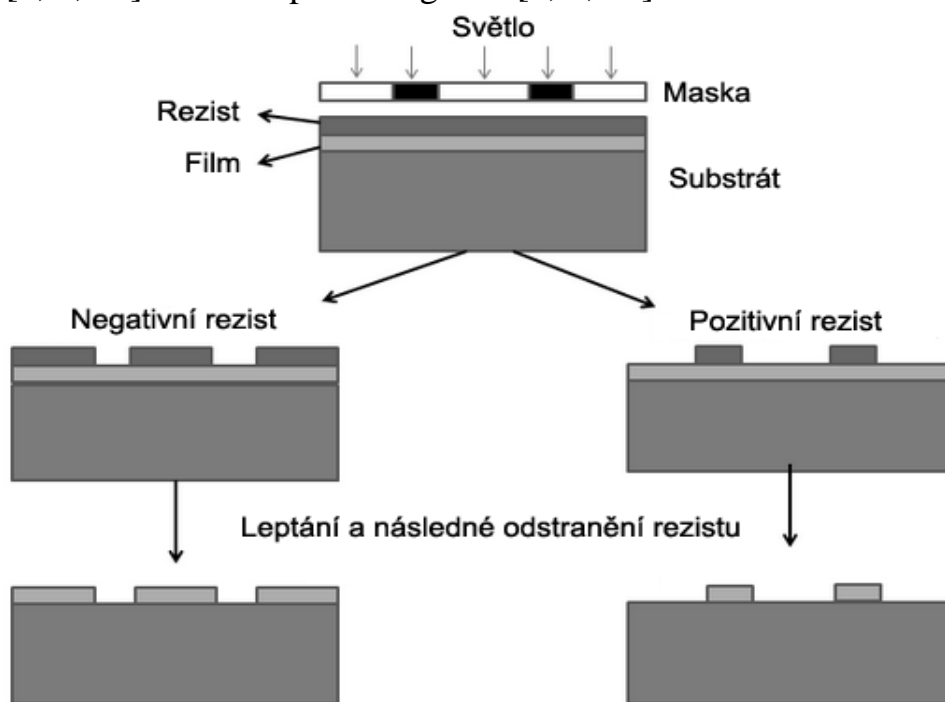
K naplnění těchto cílů sloužil zejména mikroskop atomárních sil Agilent 5420 SPM/AFM, který byl použit jak pro samotnou tvorbu značek tzv. rytím (silová AFM litografie), tak i pro následnou charakterizaci.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Litografie

Litografie (z řeckého lithos – kámen, grafein – psát) je původně tisková technika vynalezená v roce 1796 Aloisem Senefelderem. Avšak s rozvojem techniky se tento název začal používat i pro metody sloužící k modifikaci povrchu. Litografie se stala nedílnou součástí při výrobě integrovaných obvodů, paměťových zařízení, zobrazovacích jednotek nebo senzorů [1-7]. Klíčová je zde schopnost vytvářet a upravovat velmi jemné struktury. Mikrolitografie obvykle zahrnuje práci se strukturami pod 10 μm , zatímco nanolitografie pod 100 nm [8].

Postupně vznikala celá řada litografických technik o rozličných principech. Lze je rozdělit do dvou základních skupin [9] podle toho jestli využívají tzv. masku (případně formu), nebo ne. První skupina je založena na principu zakrývání části povrchu, který nemá být (nebo naopak má být, záleží na dané metodě) modifikován, maskou. Masku je po úspěšném vytvoření požadovaného vzoru odstraněna. Do této skupiny se řadí: fotolitografie (Obr. 1) [8, 9, 10], soft litografie [8, 9, 11] a nanoimprint litografie [8, 9, 12].



Obr. 1: Princip fotolitografie [13]

Metody druhé skupiny (bez masky) vytváří struktury přímo z digitálního zobrazení na počítači. Sem se mohou řadit následující techniky: elektronová litografie (electron beam lithography) [8, 9, 14, 15], iontová litografie (focused ion beam lithography) [8, 9, 16] a skenovací litografie (scanning probe lithography), jejímž nejznámějším zástupcem je AFM litografie [7, 17, 18].

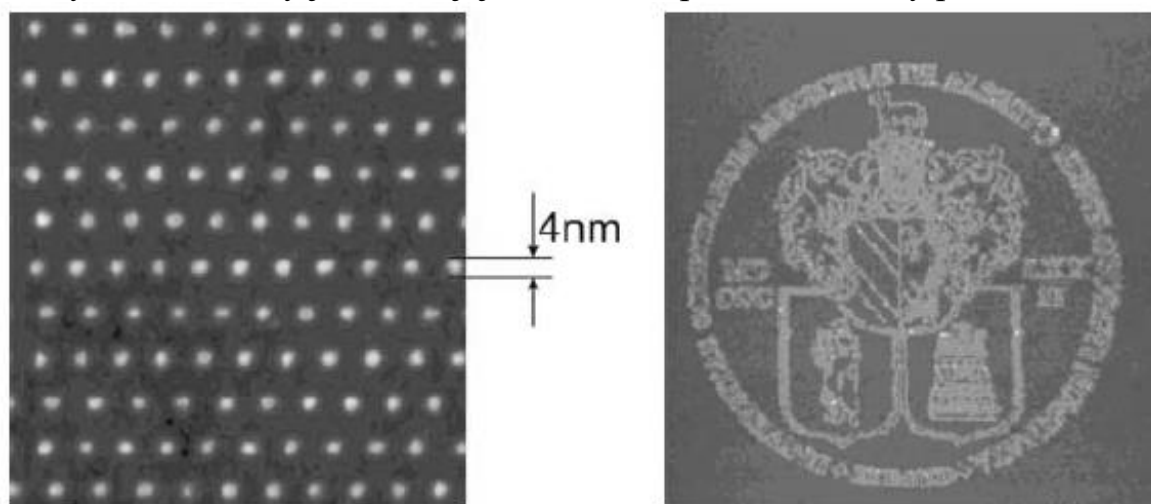
Každá z uvedených metod má své výhody i nevýhody. Vzájemně se liší v časové i finanční náročnosti, složitosti procesu, dosaženém rozlišení a požadavcích na pracovní prostředí. Pro každý typ materiálu jsou rovněž vhodné jiné metody. Přehled základních parametrů je zobrazen v Tabulce 1. Uvedené informace jsou pouze orientační, poněvadž určit maximální rozlišení i časovou náročnost je poměrně obtížné. Litografické metody se stále zdokonalují, případně se používají jejich různé variace. Stejně tak pro výrobu jednoho exemplárního vzorku může být vhodná jiná metoda, než pro jeho sériovou výrobu (Tabulka 1 počítá s větším množstvím vyrobených vzorků).

Tabulka 1: Srovnání litografických metod [9].

Metoda	Maximální rozlišení	Časová náročnost	Nejčastější aplikace
Foto-litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech až 15 nm [10]	Velmi nízká (desítky vzorků za hodinu)	Nejrozšířenější metoda, která nachází uplatnění v komerčním i laboratorním využití. Elektronika, integrované obvody, mikroprocesory
Soft litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech až 15 nm [11]	Nízká	Laboratoř na čipu (LOC - lab on a chip)
Nano-imprint litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech pod hranicí 10 nm [12]	Nízká	Bio-senzory, bio-elektronika, nanodráty
Elektronová litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech pod hranicí 5 nm [14, 15]	Vysoká	Integrované obvody, laboratorní využití např. fotonické krystaly, kanálky pro nanofluidika
Iontová litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech až 10 nm [16]	Vysoká	Laboratorní využití např. plazmatické čočky
Skenovací litografie	Desítky nanometrů, ve speciálních případech pod hranicí 5 nm [17, 18]	Vysoká až střední	Bio-elektronika, bio-senzory, detektory plynu

2.1.1 AFM litografie

AFM litografické techniky se mohou dělit podle principu na napět'ové (bias-assisted) a sílové (force-assisted) [7]. Metody první skupiny aplikují na hrot napětí a vytváří lokální elektrické pole. Jelikož vzdálenost mezi hrotem a povrchem je v nanometrické škále, tak i několik voltů může vytvořit silné elektrické pole (10^8 až 10^{10} V/m) [7, 19], díky němuž mohou být pro modifikaci povrchu využity nejrůznější fyzikální a chemické procesy [7, 20]. Pravděpodobně nejznámějšími představiteli této skupiny jsou lokální anodická oxidace (LAO - local anodic oxidation) [7, 17, 19] a elektrostatická litografie [17, 21]. Lemeshko a Saunin předpokládají, že by se LAO mohla v budoucnu využívat pro ukládání dat o velmi vysoké hustotě [17]. Ve svém výzkumu se pokusili dosáhnout maximálního rozlišení a prezentují vytvořené struktury o velikosti 4 nm a detailní znak s erbem o rozměrech menších jak $4 \times 4 \mu\text{m}$ (Obr. 2). Nevýhodou metody je ovšem její omezenost pouze na vodivý povrch.



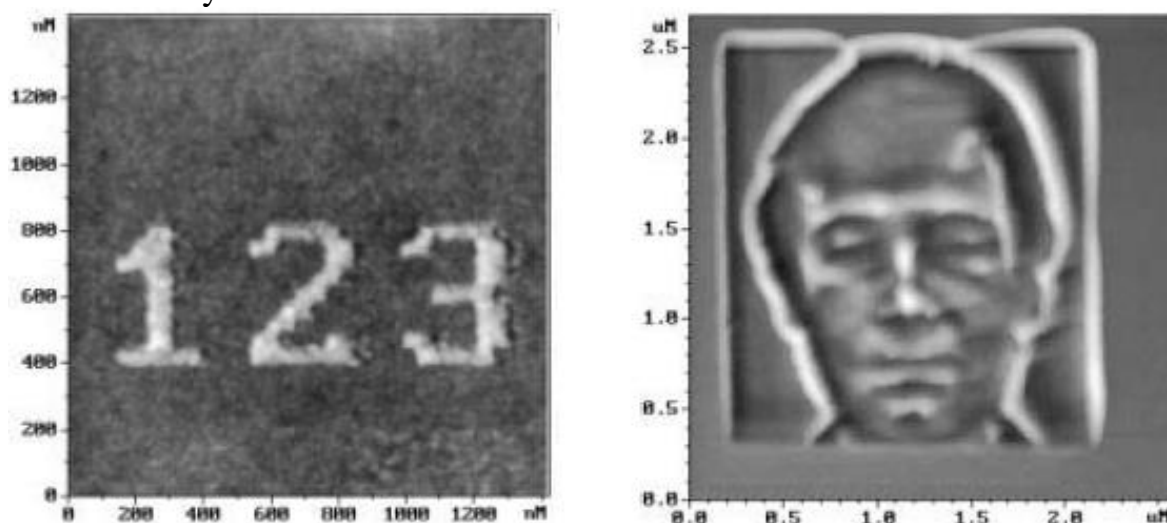
Obr. 2: Struktury vytvořené na titanové vrstvě pomocí lokální anodové oxidace [17]

Při skenování mikroskopem atomárních sil (princip je podrobněji popsán v následující kapitole) může dojít také k nežádoucí interakci mezi hrotem a povrchem a tím k jeho poškození. Tento původně nežádoucí jev ale může být využit právě k cílené modifikaci povrchu, což využívají metody silové skupiny. Jednou ze základních silových technik je tzv. rytí (scratching) [17, 22], které se provádí zabořením hrotu do povrchu (vznik díry, tzv. indenting) a jeho tažením (vznik rýhy). Dále sem lze zařadit termomechanickou litografii [7, 23] nebo techniku dip-pen (DPN) [7, 24].

Možnosti rycí techniky ovlivňuje zejména použitá sonda. Standardní křemíkové sondy jsou vhodné spíše pro měkčí materiály (např. polymer [7]). Pro tvrdší materiály je vhodné použít sondu s diamantovým hrotem.

Lemeshko a Saunin ve své práci prezentují mřížku s děrami vzdálenými 25 nm od sebe [17]. Rovněž vytvořili dobře čitelné číslice 1,2,3 na ploše o velikosti $1,4 \times 1,4 \mu\text{m}$ a obličej o rozměrech menších než $3 \times 3 \mu\text{m}$ (Obr. 3). I když tato

metoda dosahuje horšího rozlišení, než LAO, její výhodou je její uplatnění i pro nevodivé vzorky.



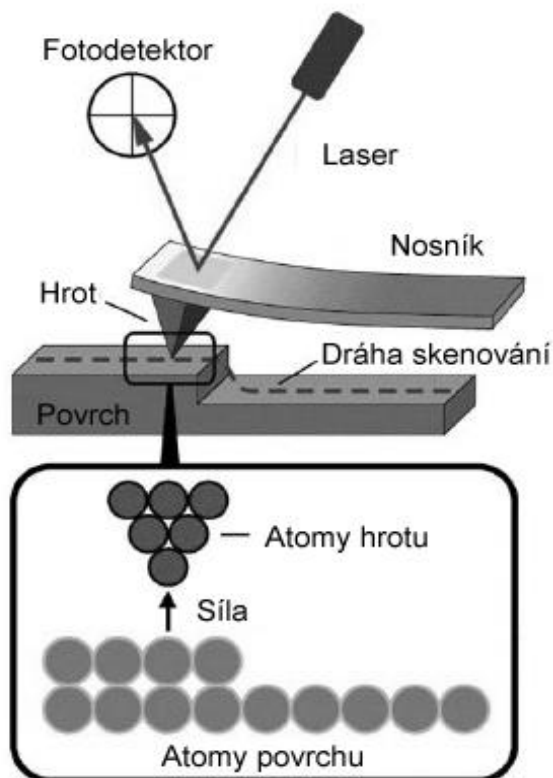
Obr. 3: Struktury vytvořené na polykarbonátu pomocí silové AFM litografie [17]

Technologii Dip-pen lze sice podle Xie řadit mezi metody silové AFM litografie [7], ale na rozdíl od ostatních výše zmíněných metod je DPN nedestruktivní. Tato technika využívá přenos molekul z AFM hrotu na substrát, což slouží k přímému „psaní“ požadovaných vzorů skládajících se z relativně malého množství molekul [24]. Dosažené maximální rozlišení je 15 nm [25].

Výhodou AFM litografie je, že modifikace povrchu i jeho následná charakterizace probíhá na jednom systému a oba procesy mohou následovat bezprostředně po sobě.

2.2 Mikroskopie atomárních sil

Mikroskopie atomárních sil (AFM) je nejznámějším typem mikroskopie skenující sondou (SPM) umožňujícím trojrozměrné zobrazování povrchu ve velmi vysokém (až atomovém) rozlišení [26]. Metoda je založena na mapování rozložení atomárních sil na povrchu vzorku (Obr. 4). Tyto síly jsou mapovány těsným přiblížením hrotu k povrchu, čímž vzniká přitažlivá nebo odpudivá síla, která způsobí ohnutí nosníku, na němž je upevněn hrot. Toto ohnutí je vyhodnocováno pomocí laserového svazku odrážejícího se od horní části nosníku do čtyř-segmentového fotodetektoru. Před vlastním měřením se systém mechanicky vyváží tak, aby energie svazku dopadající do všech segmentů byla stejná. Při měření se ohyb nosníku projeví posunem odrazu, takže energie v jednotlivých segmentech už nebudou stejné a z jejich poměrů je možno určit vychýlení nosníku.



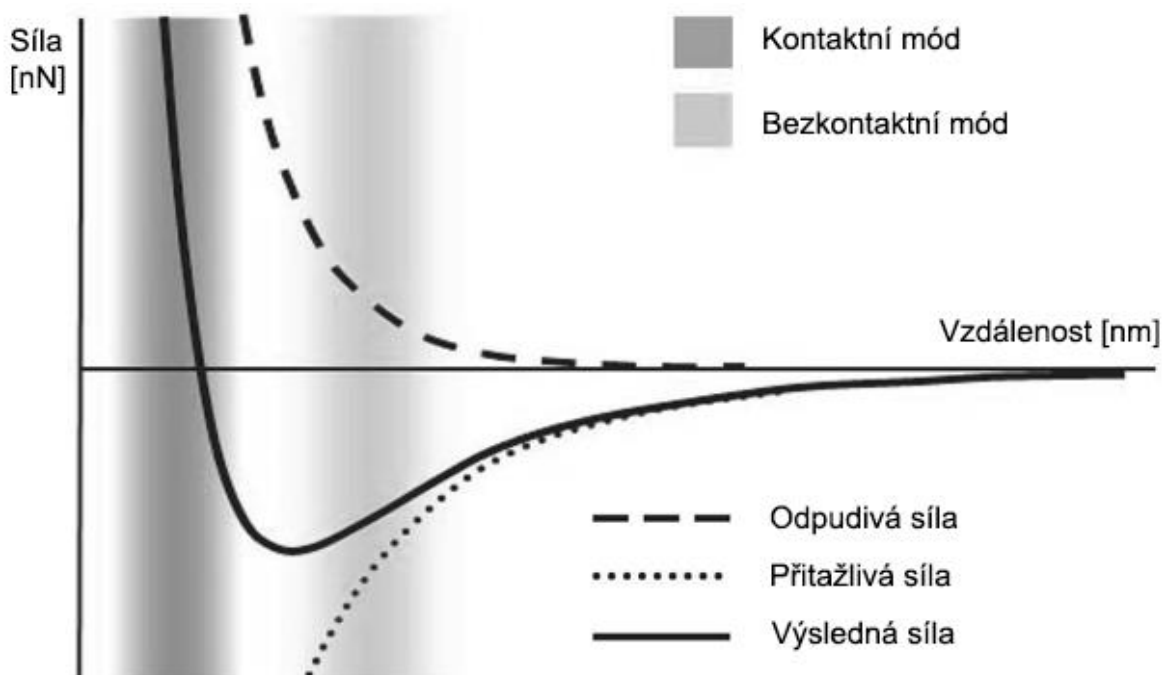
Obr. 4: Princip mikroskopie atomárních sil [27]

Síly ohýbající nosník mohou být různé fyzikální podstaty, především se však uplatňuje přitažlivá van der Waalsova síla působící na větší vzdálenosti a odpuzivá síla plynoucí z Pauliho principu, která působí, pokud je hrot v kontaktu se vzorkem [28]. Závislost síly na vzdálenosti je zobrazena na Obr. 5.

Z uvedeného lze odvodit tři základní režimy AFM:

- Kontaktní, při němž, jak už název vypovídá, se hrot pohybuje v kontaktu se vzorkem. Tento starší režim dosahuje obvykle vyššího rozlišení, než režim bezkontaktní, ale je vhodný pouze pro tvrdší vzorky, protože měkké (např. biologické) se mohou působením hrotu poškodit. Měření v kontaktním režimu může být uskutečněno dvěma různými způsoby: Režim s konstantní výškou nebo režim s konstantní silou.
- Bezkontaktní, při němž se využívá van der Waalsových sil delšího dosahu, a proto se může hrot pohybovat ve vzdálenosti 1–10 nm od povrchu. Tímto se sice mírně sníží rozlišení, ale také možnost poškození vzorku. Z důvodu lepšího poměru k šumu se tento režim zpravidla realizuje jako střídavé měření, při němž je nosník rozkmitáván s danou amplitudou poblíž své rezonanční frekvence a měří se změna amplitudy. [28]

- Pokleповý, který je hybridní kombinací předchozích režimů. Jeho zavedení plyne ze snahy o optimalizaci rozlišení a vlivů na vzorek. Stejně jako v bezkontaktním módu i zde nosník osciluje nad povrchem vzorku, ovšem rozkmit je tak velký, že v pravidelných intervalech dochází ke kontaktu hrotu se vzorkem. Bude-li systém nastaven tak, aby laterální posun hrotu nastával jen v době, kdy je dál od vzorku, získáme výhody obou metod – nepoškození vzorku i vyšší rozlišení (dotkne-li se povrchu několikrát než se laterálně posune o svůj průměr). [28]

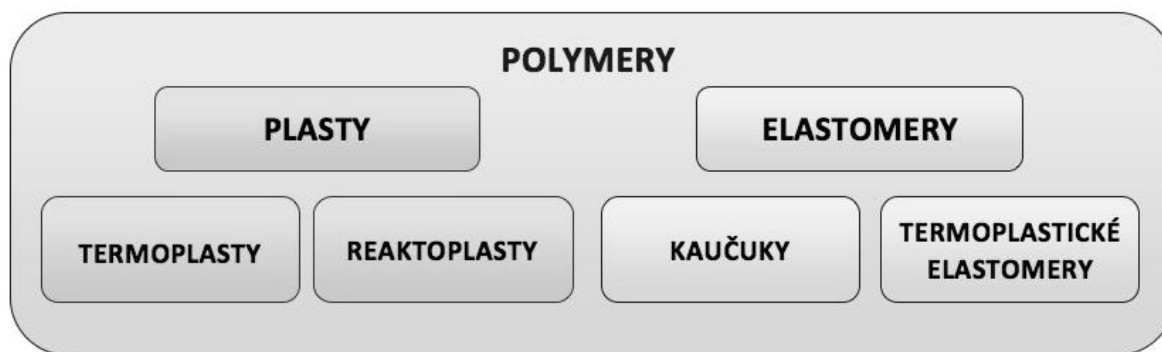


Obr. 5: Graf závislosti síly na vzdálenosti hrotu od povrchu [29]

2.3 Polykarbonát (PC)

Výběr materiálu pro tvorbu požadovaných struktur je založen na znalosti materiálových vlastností a na požadavcích vyplývajících z dané aplikace. Například: Při jaké teplotě, popřípadě v jakém prostředí, bude výrobek používán? Jak bude namáhán? Jaká má být jeho životnost apod. Po zjištění nejdůležitějších požadovaných vlastností můžeme vybrat nejvhodnější typy materiálu. Dále je důležitá dostupnost materiálu, možnosti jeho zpracování, skladování a v neposlední řadě cena.

Jako vhodný materiál pro zkušební tvorbu bezpečnostních značek, v rámci této práce, byl zvolen polykarbonát. Tento druh termoplastu (základní dělení polymerů je na Obr. 6) je poměrně levný a dostupný, dobře se zpracovává a přitom vyniká vysokou odolností vůči nárazům a povětrnostním vlivům. Mezi jeho vlastnosti patří také dobrá rozměrová stálost až do 150° C, velká pevnost v tahu a velmi dobrá odolnost proti UV - záření, oxidaci a hydrolyze. [30, 31]



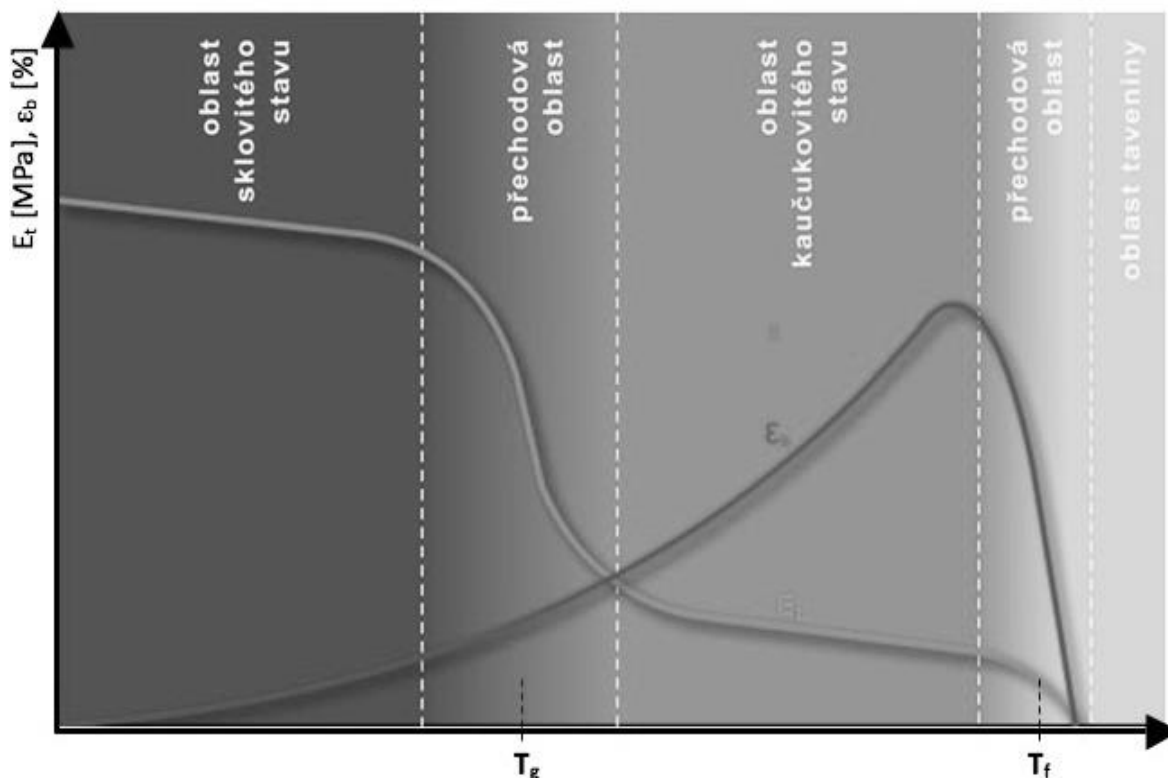
Obr. 6: Základní rozdělení polymerů [30]

2.3.1 Závislost polymerů na teplotě

Vlastnosti polymerů jsou silně závislé na teplotě. V závislosti na teplotě se mohou nacházet v tuhém nebo kapalném stavu (neplatí pro zesíťované polymery). U polymerů neexistuje plynný stav, neboť velikost makromolekul způsobuje, že jejich bod varu je ve všech případech vyšší, než je teplota rozkladu. Na rozdíl od nízkomolekulárních látek (např. vody) je pro polymery charakteristický ještě přechodový stav, mezi stavem sklovitým a kapalným, tzv. stav kaučukovitý.

V určité oblasti teplot se změny materiálu zrychlují a mohou se měnit dokonce skokem. Takové oblasti se nazývají přechodovými teplotami.

U amorfních termoplastů jsou charakteristickými přechodovými teplotami teplota skelného přechodu (T_g) a teplota viskózního toku (T_f). Pod teplotou skelného přechodu se termoplast nachází ve sklovitém stavu, nad ní ve stavu kaučukovitém (viz Obr. 7). Pod teplotou skelného přechodu je polymer tvrdý a křehký a má vysoký modul pružnosti (konstanta vyjadřující pružnost materiálu při namáhání v tahu). V přechodové oblasti v okolí T_g se vlastnosti amorfního termoplastu rychle mění a polymer nabývá kaučukovitou pružnost. S dalším nárůstem teploty (v oblasti charakterizované teplotou viskózního toku (T_f)) ztrácí kaučukovitě elastické vlastnosti a modul pružnosti klesá na nulovou hodnotu a polymer se mění ve vysoce viskózní tok, taveninu. [30, 32]

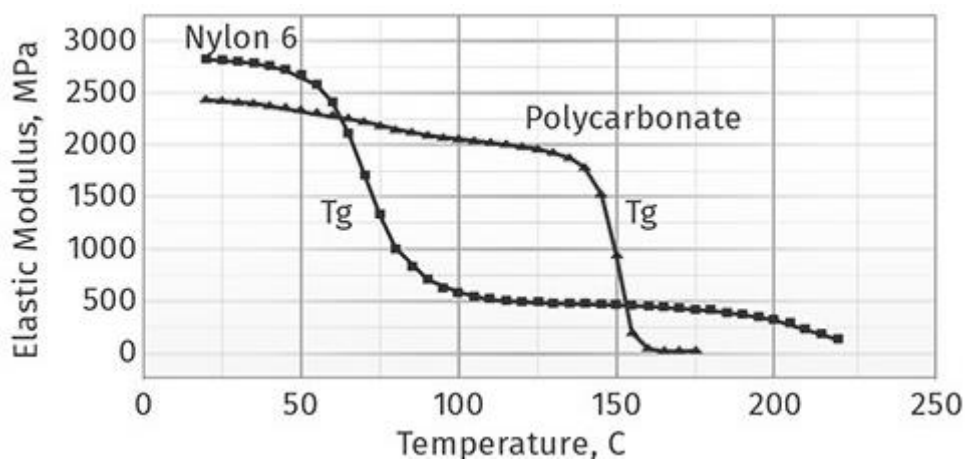


Obr. 7: Charakteristická závislost modulu pružnosti (E_t) a celkové tažnosti (ϵ_b), na teplotě [30]

Vzhledem ke skutečnosti, že k největším změnám vlastností u amorfních termoplastů dochází v oblasti skelného přechodu, je teplota zesklnění považována za teoretickou hranici použitelnosti amorfních termoplastů (pokud nejsou mechanicky namáhány). Při jejím překročení dochází k samovolné deformaci vzorku a ztrátě jeho funkčnosti.

Z praktických důvodů se volí horní použitelná teplota asi o 10 až 20 °C nižší. Maximální teplotu je nutno volit vždy s přihlédnutím ke způsobu namáhání a k době působení teplotního zatížení. [30]

Teplotní závislost modulu pružnosti pro polykarbonát se nachází na Obr. 8.



Obr. 8: Teplotní závislost modulu pružnosti pro polykarbonát [33]

Z výše uvedených obrázků (Obr. 7 a Obr. 8) je patrné, že přechodové teploty nepředstavují jednoznačnou fyzikální veličinu, ale charakterizují pouze střední hodnotu přechodové oblasti. Přechod mezi jednotlivými stavy je pozvolný (často v rozmezí desítek °C).

Teplota viskózního toku (T_f) pro polykarbonát je udávána v oblasti 267 °C, teplota skelného přechodu (T_g) v oblasti 145 °C. Maximální operační teplota bývá okolo 121 °C. [34, 35, 36]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro provedení experimentů byla vybrána základní AFM litografická technika tzv. rytí. Důvodem byla její jednoduchost a možnost uplatnění i na nevodivé materiály. Rytí i následná charakterizace vytvořených struktur byly provedeny pomocí mikroskopického systému Agilent 5420 SPM [27]. Systém byl obsluhován softwarem PicoView, jehož vestavěná funkce PicoLITH slouží pro potřeby litografie. Tato funkce umožňuje navrhovat nejrozličnější obrazce (předdefinované i vlastní) a poté je vytvořit na daný vzorek, přičemž u každého z nich mohou být nastaveny vlastní rycí parametry (směr, rychlost a síla rytí). Následná vizualizace a analýza výsledků probíhaly v programech Gwyddion [37] a Origin.

Před samotnou tvorbou požadovaného vzoru bylo potřeba seznámit se se systémem, vytvořit několik zkušebních struktur a určit vhodné nastavení počátečních parametrů. Uvedené výsledky jsou pořízeny se sondou PPP-NCH (nominální rozměry 125 x 30 x 4 μm , tuhost 42 N/m, rezonanční frekvence 330 kHz). Jako vhodný materiál byl zvolen polykarbonát (viz předešlá kapitola 2.3). Experimenty probíhaly za běžných laboratorních podmínek a nebyla vyžadována žádná speciální příprava vzorků.

3.1 Volba jednotlivých parametrů

Postupně byl testován vliv rychlosti, směru a síly rytí na vytvářené struktury. Jako základní zkušební struktura byla zvolena řada přímých čar, přičemž byly postupně střídány různé kombinace všech třech zkoumaných parametrů. Vybrané výsledky jsou zveřejněny v následujících podkapitolách. Pro vytvoření všech profilů byla použita funkce průměrování (každý profil je průměrem pěti nejbližších profilů).

3.1.1 Vliv rychlosti rytí na vytvářené struktury

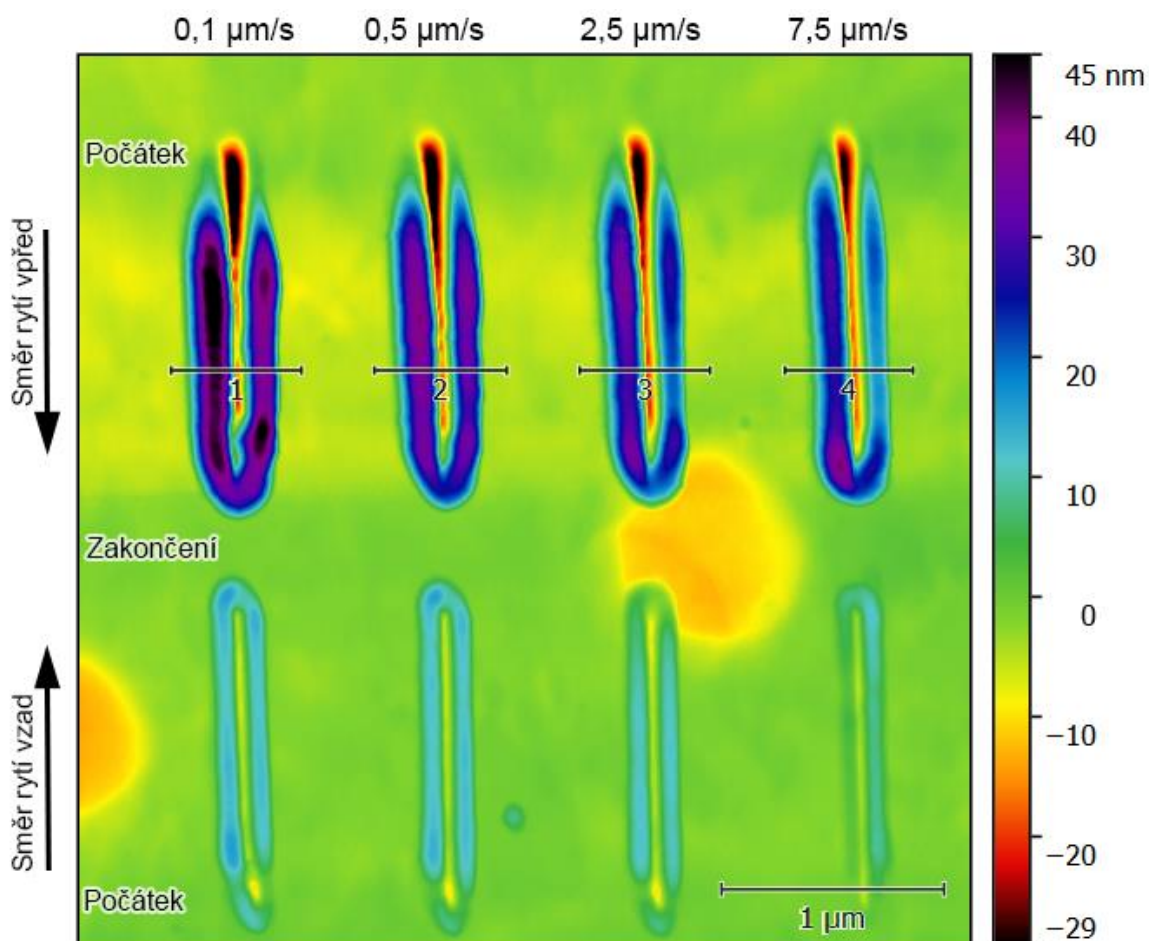
Na základě informací od výrobce byl pro testování zvolen rozsah rychlostí od 0,1 $\mu\text{m/s}$ do 15 $\mu\text{m/s}$. Rytí bylo prováděno v různých směrech a síla rytí se postupně navyšovala. Se zvyšující se silou se ukázalo, že rýhy vytvořené nižší rychlostí jsou větší (tento výsledek potvrzuje i Jiang [39]).

Na Obr. 9 jsou zobrazeny dvě řady vytvořených rýh. Vrchní řada byla vyryta směrem vpřed silou 2,7 μN . Spodní řada směrem vzad, stejnou silou. Rychlost při rytí první čáry v řadě byla nastavena na 0,1 $\mu\text{m/s}$; druhé na 0,5 $\mu\text{m/s}$; třetí na 2,5 $\mu\text{m/s}$ a čtvrté na 7,5 $\mu\text{m/s}$. Poslední rýha v řadě byla tedy vyryta 75 krát rychleji, než rýha první.

Rozdíly mezi rýhami jsou více patrné na vrchní řadě. Rýhy vytvořené směrem vpřed totiž dosahují větších rozměrů (viz následující kapitola 3.1.2 Vliv směru rytí na vytvářené struktury), tím pádem jsou i změny způsobené výběrem rychlosti viditelnější.

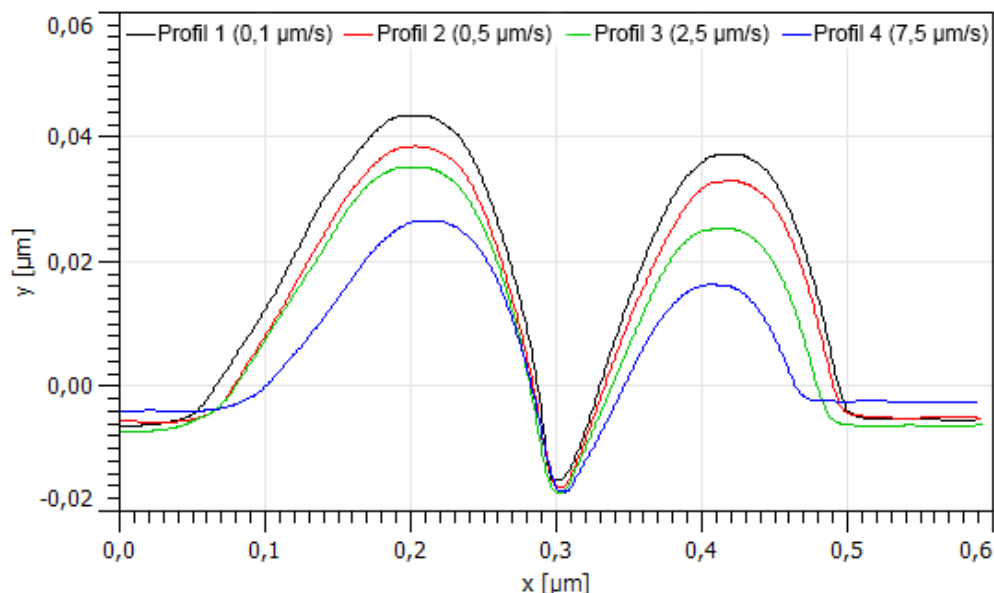
Z obrázku je patrné, že kvalitativní stránka struktur nebyla, vzhledem ke zvýšení rychlosti o 7400 %, vybranou rychlostí příliš ovlivněna. Při podrobnějším zkoumání si však lze povšimnout, že první dvě rýhy, vyryté menší rychlostí, jsou méně plynulé.

Jak již bylo zmíněno, se zvyšující rychlostí se zmenšoval rozměr rýh. Čím vyšší rychlost, tím nižší jsou postranní hřebeny z vytlačeného materiálu a rýhy jsou užší. V počáteční (nejhlubší) části rýhy se rovněž zmenšuje hloubka. Ve střední části již tato změna není příliš výrazná.



Obr. 9: Rýhy vytvořené různými rychlostmi, topografická mapa (4 x 4 μm)

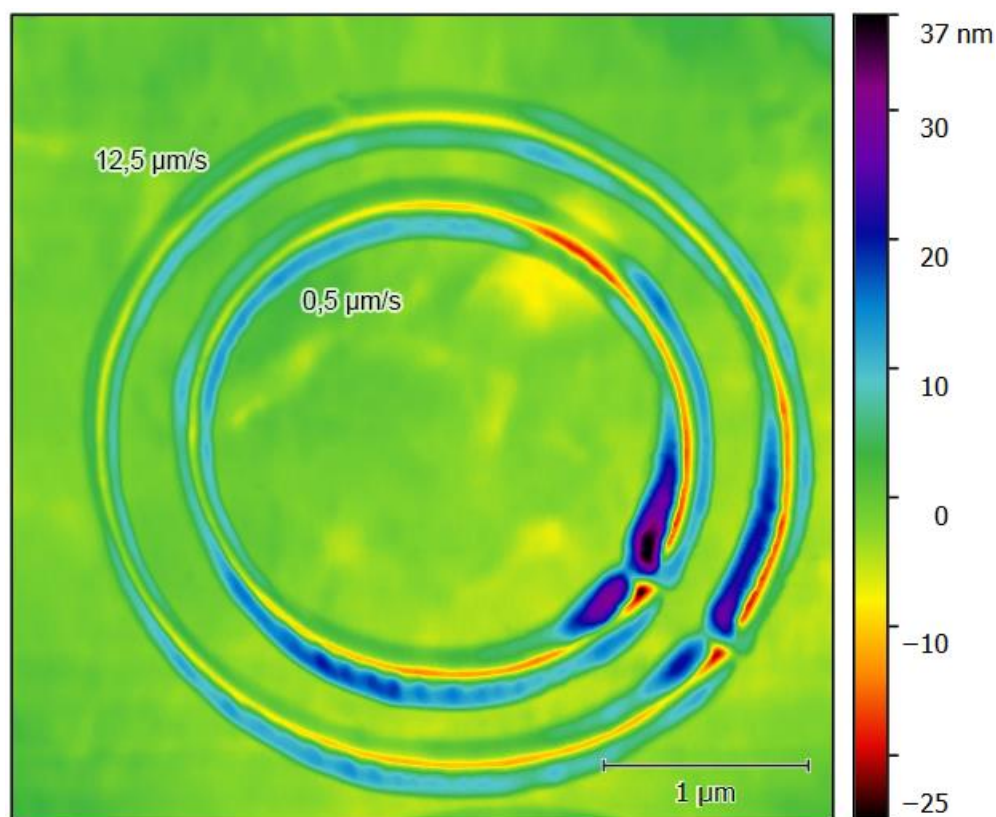
Výše popsané je dobře patrné z horizontálních profilů středních částí rýh na Obr. 10 (profily jsou vyznačeny na Obr. 9). Rozdíl mezi výškou postranních hřebenů u první a čtvrté rýhy je zřetelný.



Obr. 10: Rýhy vytvořené různými rychlostmi, horizontální profily středních částí rýh

Následně bylo testováno, jak zvolená rychlost ovlivní přesnost při napojování se na již vytvořenou část struktury. K tomuto účelu sloužily dva kruhy. Větší kruh na Obr. 11 byl vyryt rychlostí 12,5 $\mu\text{m/s}$ a menší rychlostí 0,5 $\mu\text{m/s}$. Síla rytí byla 2 μN .

V našem případě nebyl při napojování pozorován žádný rozdíl způsobený změnou rychlosti rytí.



Obr. 11: Kruhy vytvořené různými rychlostmi, topografická mapa ($4 \times 4 \mu\text{m}$)

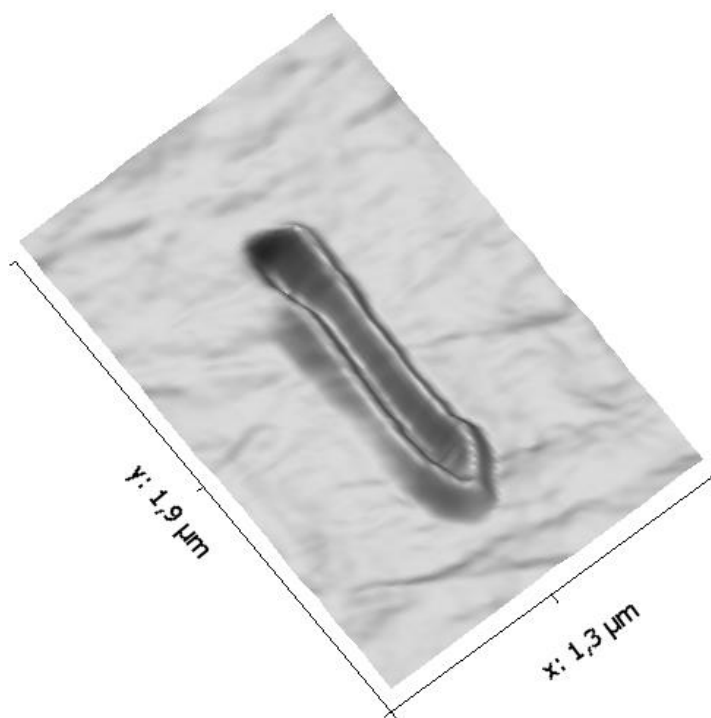
Z dosažených výsledků vyplývá, že volba rychlosti rytí má z rycích parametrů obecně nejmenší vliv na výsledné struktury. Kvalitativní stránka nebyla rychlostí příliš ovlivněna, pouze rýhy vytvořené nejmenší rychlostí byly více hrbolaté. Proto je tedy vhodnější volit rychlost minimálně 0,5 $\mu\text{m/s}$. Dále bylo zjištěno, že s vyšší rychlostí dosahují rýhy menších rozměrů. Napojování při vytváření složitějších struktur nebylo rychlostí viditelně ovlivněno.

V této práci byla nejčastěji volena rychlost 5 $\mu\text{m/s}$.

Objem vyrytého materiálu

Z topografické mapy i horizontálních profilů vyplývá, že hloubka rýhy (vzhledem ke zbytku plochy) ve středové části je velmi malá. Výraznější jsou hřebeny z vyhrnutého materiálu po okrajích. Množství vyhrnutého materiálu je ovlivněno zejména použitým materiálem a hrotem.

Na Obr. 12 se nachází detailní 3D topografické zobrazení rýhy vyryté směrem vpřed. Jsou zde dobře viditelné všechny části rýhy: počátek, střední část i zakončení s nahrnutým materiálem.

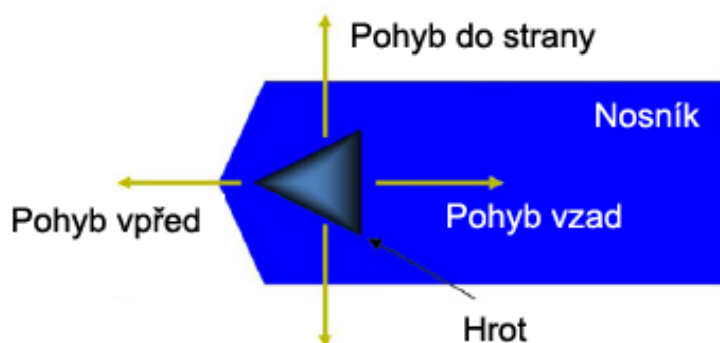


Obr. 12: Detail rýhy, 3D topografická mapa (1,3 x 1,9 μm)

Objem vytlačeného materiálu byl pomocí programu Gwyddion spočítán na $0,9 \times 10^{-21} \text{ m}^3$, zatímco objem rýhy na $0,4 \times 10^{-21} \text{ m}^3$. To znamená, že objem materiálu se rycím procesem více než zdvojnásobil (růst objemu o 125 %). Předpokládáme, že toto zvětšení je způsobeno „načechráním“ vyrytého materiálu a dochází zde tak ke zvýšení volného objemu v polymerní struktuře. Výpočet byl opakován i pro další rýhy s obdobným výsledkem.

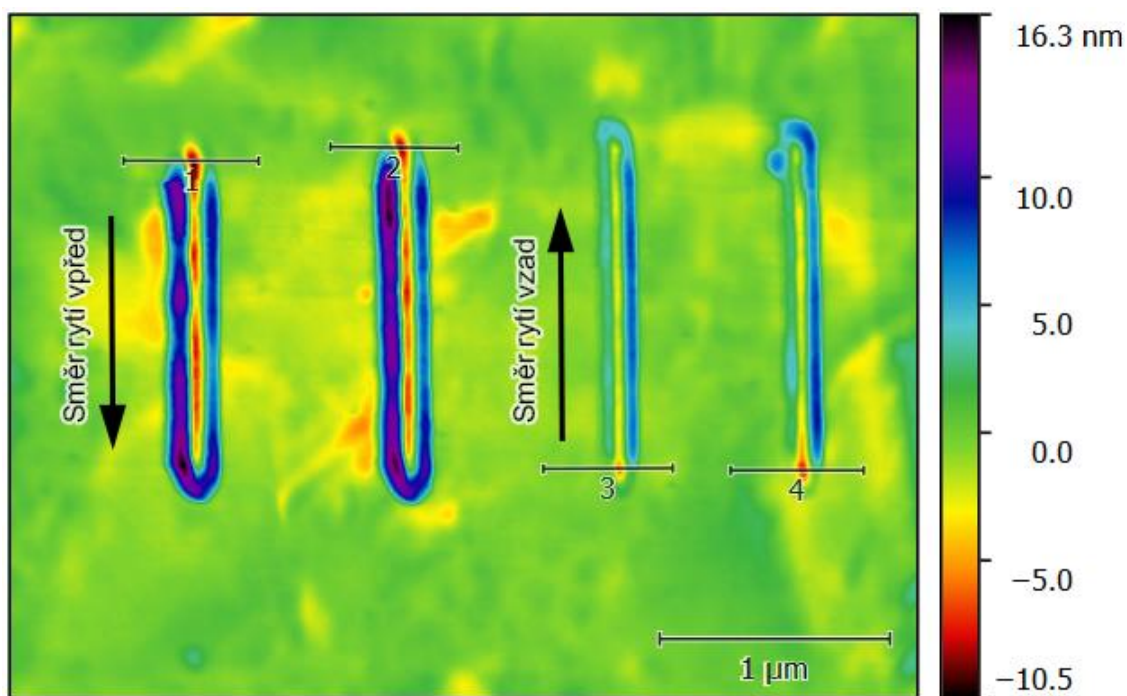
3.1.2 Vliv směru rytí na vytvářené struktury

System nabízí čtyři základní směry (Obr. 13) vytváření struktur: vpřed, vzad a do stran (vlevo, vpravo).



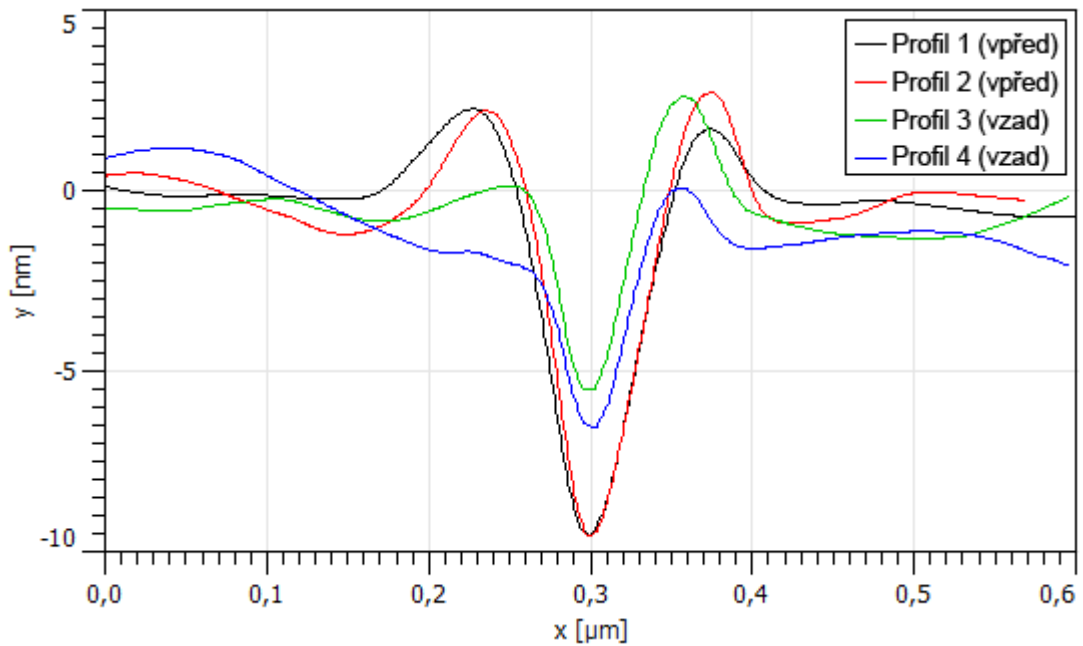
Obr. 13: Základní pohyby sondy [38]

Při experimentu byly vytvořeny čtyři čáry o délce $1,5 \mu\text{m}$ (Obr. 14), z toho první dvě směrem vpřed a druhé dvě směrem vzad. Pro všechny byla nastavena totožná rychlost $5 \mu\text{m/s}$ a síla rytí $1,6 \mu\text{N}$.

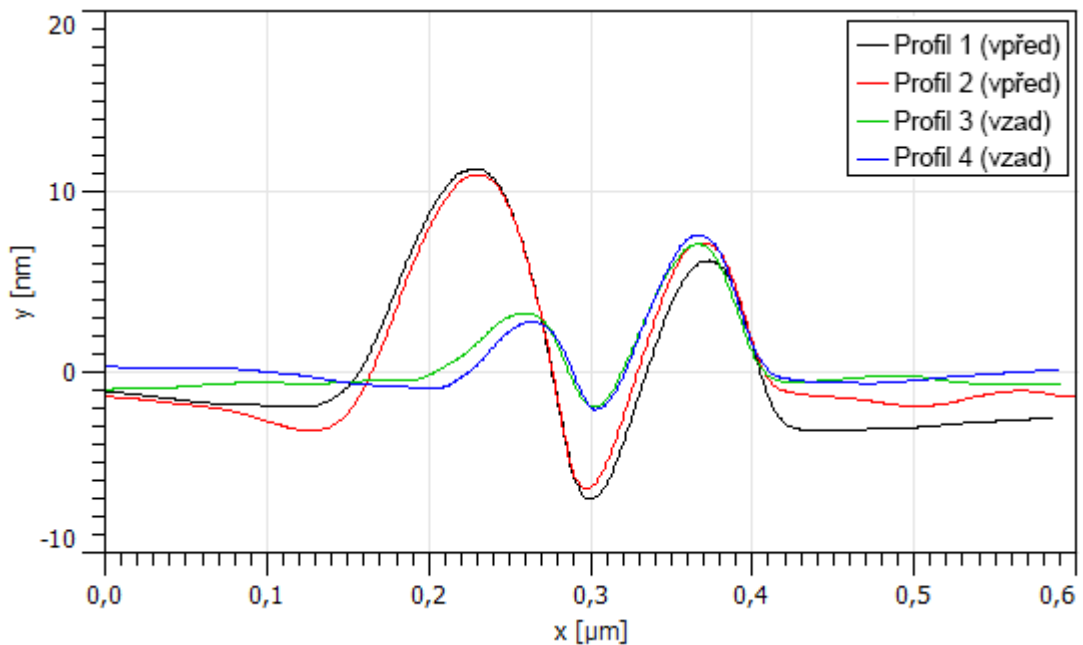


Obr. 14: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, topografická mapa ($4 \times 3 \mu\text{m}$)

Jak vyplývá z Obr. 14, rýhy vytvořené směrem vpřed dosahují při totožné síle i rychlosti rytí větších rozměrů. To dokládají i horizontální profily počátků (Obr. 15) a středních částí rýh (Obr. 16). Každý profil reprezentuje jednu rýhu a jsou číslovány podle posloupnosti na základě topografické mapy.



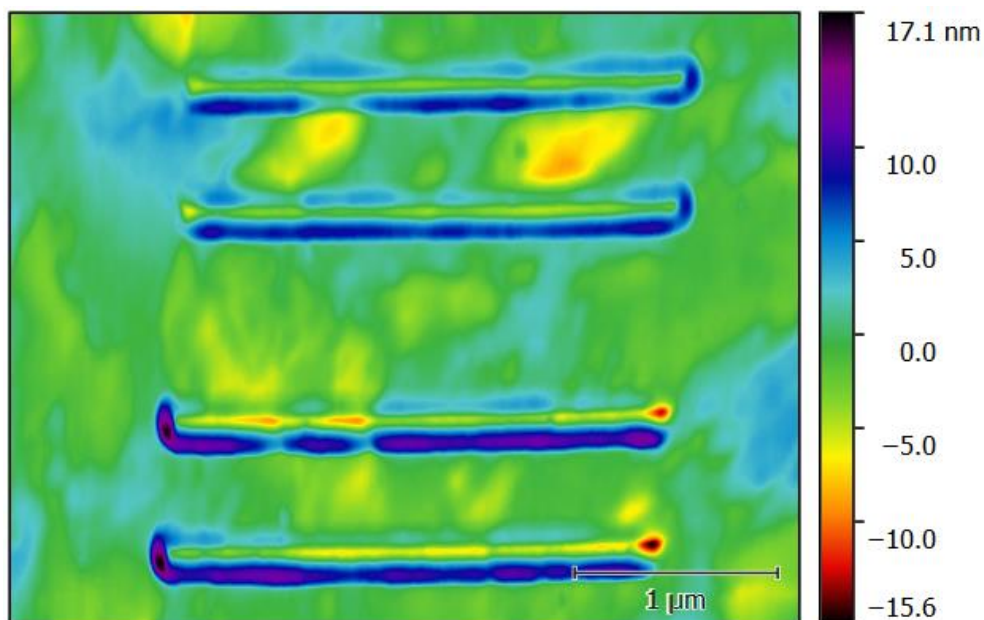
Obr. 15: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, horizontální profily počátků rýh



Obr. 16: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, horizontální profily středních částí rýh

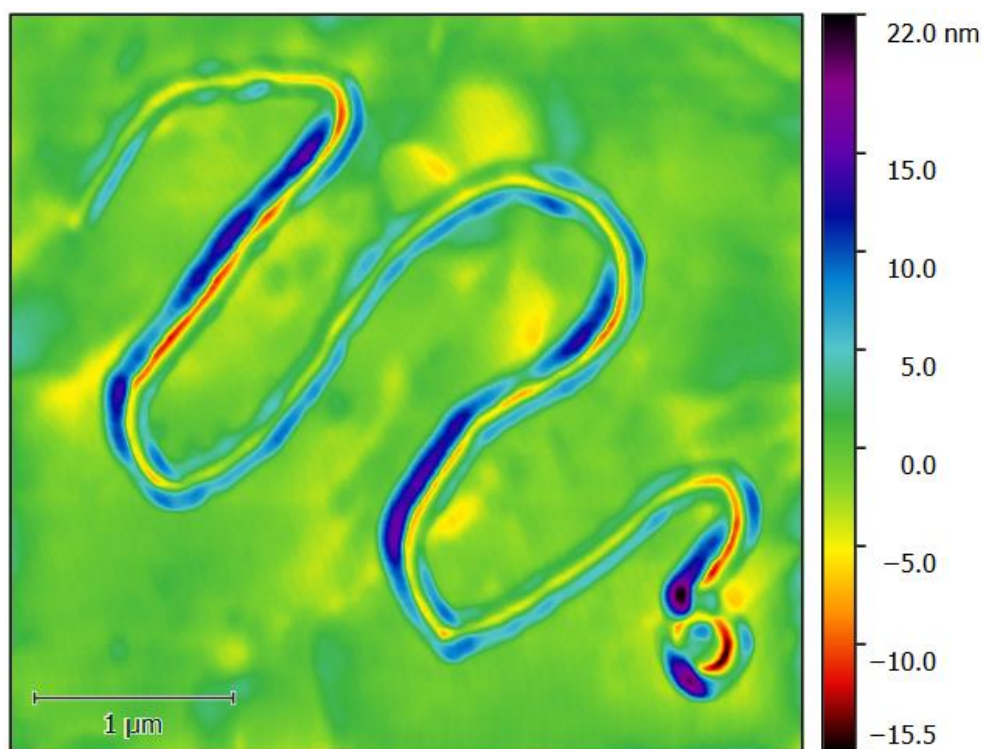
Všechny výše uvedené profily mají typický V tvar. Jejich podoba je určena tvarem hrotu, který do materiálu vytváří svůj otisk. To že rýhy vytvořené směrem vpřed jsou celkově větší je způsobeno rovněž tvarem hrotu. V tomto směru je rytí s daným hrotem efektivnější. Podoba hrotu je také příčinou toho, že velikost postranních hřebenů není v našem případě stejná. Poměr velikosti hřebenů se může měnit s každým hrotem nebo i po jeho opotřebenání.

Následně byly při stejné rychlosti i síle vyryty dvě rýhy směrem vlevo, z pohledu hrotu (na obrázku vrchní dvě), a dvě směrem vpravo. Jak vyplývá i z přiložené topografické mapy (Obr. 17), rytí směrem do stran je většinou méně vhodné než rytí vpřed a vzad. Vytvořené struktury jsou méně kvalitní a méně symetrické. Rytí bočním směrem má za následek to, že většina materiálu je vytlačena pouze na jednu stranu.



Obr. 17: Rýhy vyryté do stran, topografická mapa ($4 \times 3 \mu\text{m}$)

Při tvorbě složitějších obrazců se ale kombinaci různých směrů nevyhneme. Příkladem může být jednoduchý had na Obr. 18. Rytí bylo započato směrem vzad od konce hada. Následně musely být využity všechny směry rytí a jejich kombinace. Na tomto příkladu lze dobře pozorovat poznatky z předešlých testů. Části ryté převážně směrem vpřed jsou nejvýraznější.



Obr. 18: Had, topografická mapa (4 x 4 μm)

Z uvedeného vyplývá, že nejlepším je rytí pouze v jednom směru. Potom jsou si jednotlivé rýhy (či části rýh) nejvíce podobné. Při vytváření složitějších obrazců, kdy se kombinací všech směrů nevyhneme, jsou některé části potom menší než jiné. S tím je potřeba počítat již při návrhu.

Pokud je možné zvolit jen jeden směr rytí, bude to pravděpodobně směr vpřed nebo vzad. Tak jsou vytvořeny nejvíce symetrické struktury. Výběr mezi těmito směry je potřeba provádět většinou pro každou aplikaci a hrot. Tvar hrotu se totiž může lišit kus od kusu. Rovněž se tvar hrotu může používáním měnit. V našem případě je většinou vhodnější rytí směrem vzad.

3.1.3 Vliv síly rytí na vytvořené struktury

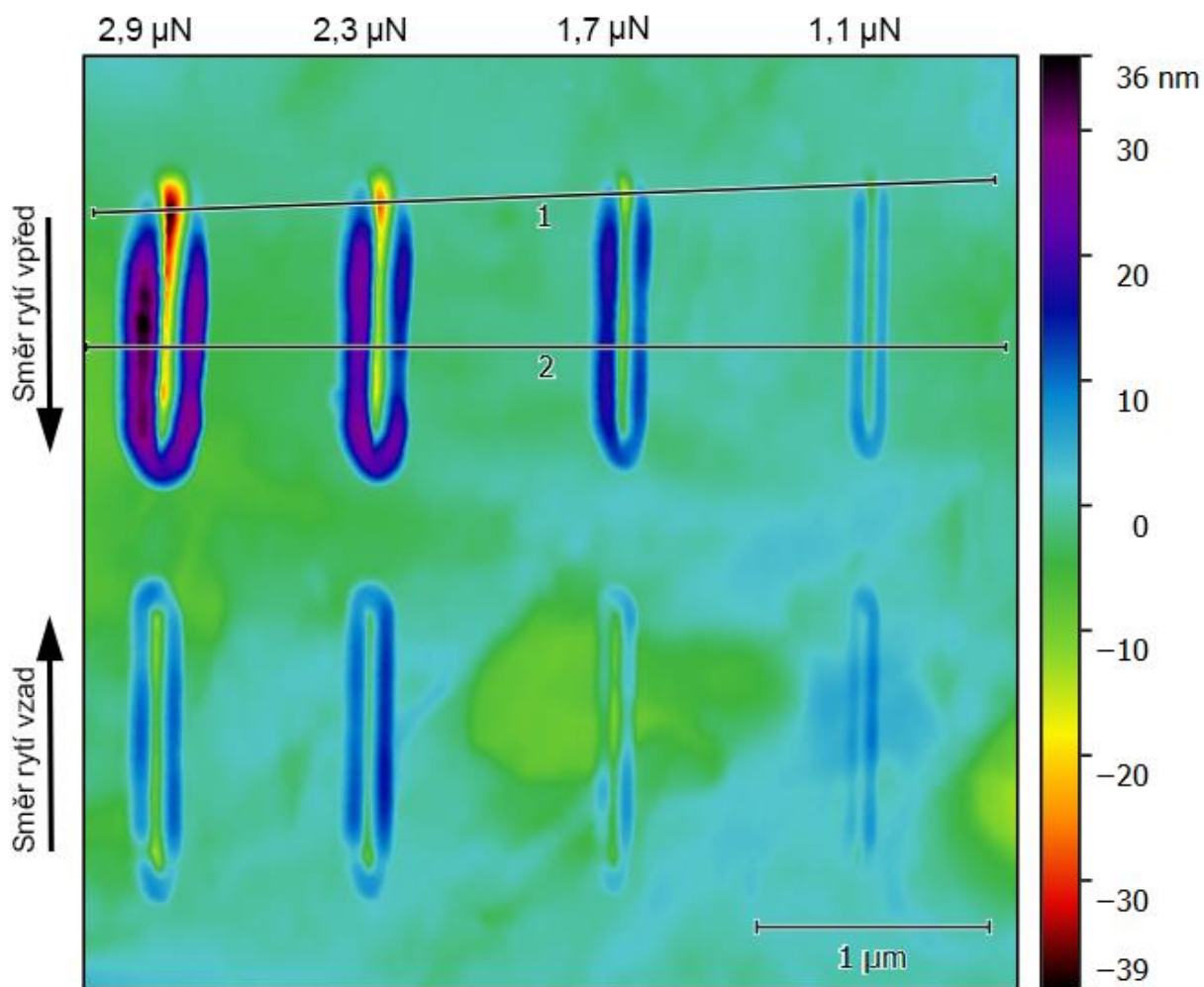
Volba síly rytí je důležitým parametrem, který ovlivňuje hloubku, výšku i šířku vytvořených struktur. Zatímco rychlost a směr rytí se mohou stanovit na základě zkušeností s daným hrotem, systémem a materiálem a dále již neměnit, velikost síly se během experimentu upravuje tak, aby vytvořené struktury odpovídaly našim představám. Sílu je často nutné upravit i při výměně hrotu, protože nový hrot může mít mírně odlišný tvar a tím pádem může při stejné síle zanechávat odlišnou stopu.

Na systému Agilent 5420 SPM [27] se dá aplikovaná síla ovlivnit nastavením hodnoty setpoint, obvykle udávané ve voltech. V kontaktním módu vyjadřuje setpoint vychýlení raménka, při kterém bude systém skenovat (či rýt). Jelikož je síla, kterou působí raménko na vzorek přímo úměrná vychýlení raménka, je možné s využitím Hookova zákona tuto sílu určit. Zvýšení setpointu má za

následek zvýšení aplikované síly, zatímco jeho snížení má za následek snížení této síly.

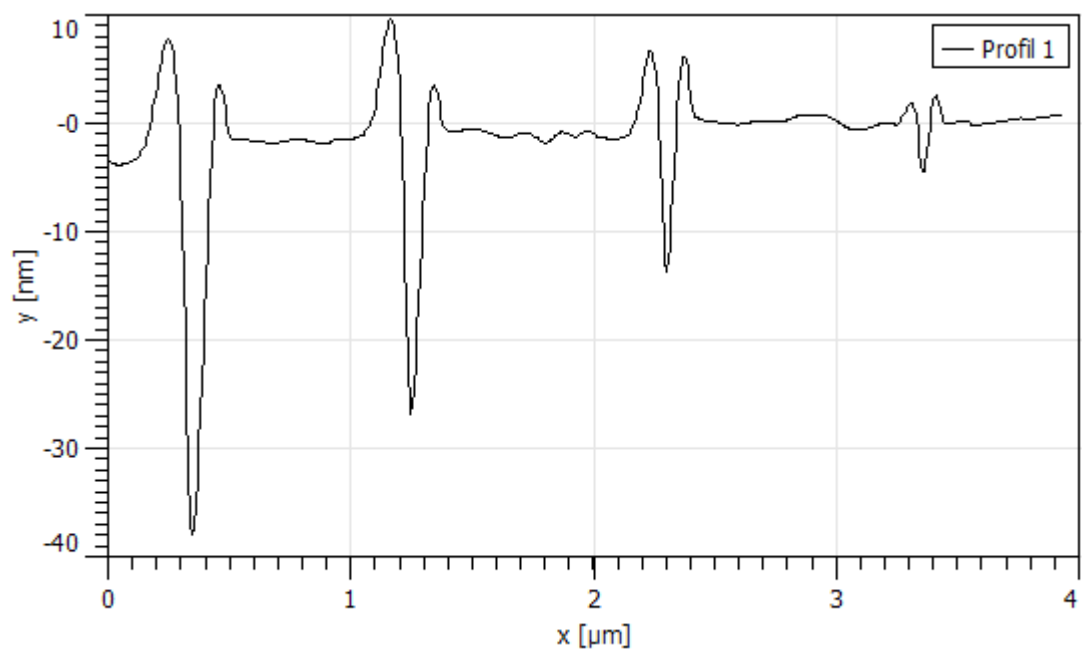
Jeho nastavení je velice důležité. Pokud bude aplikovaná síla příliš nízká, nebude systém vůbec schopen sledovat povrch nebo bude docházet k výpadkům. Pokud bude naopak aplikovaná síla příliš velká, dojde k poškození vzorku i/nebo hrotu. [27, 40]

Na Obr. 19 je vyryt vzor osmi rýh ve dvou řadách, přičemž vrchní řada byla vyryta směrem vpřed a spodní řada směrem vzad rychlostí $5 \mu\text{m/s}$. Síla rytí byla následující: první čára $2,9 \mu\text{N}$; druhá $2,3 \mu\text{N}$; třetí $1,7 \mu\text{N}$; čtvrtá $1,1 \mu\text{N}$.

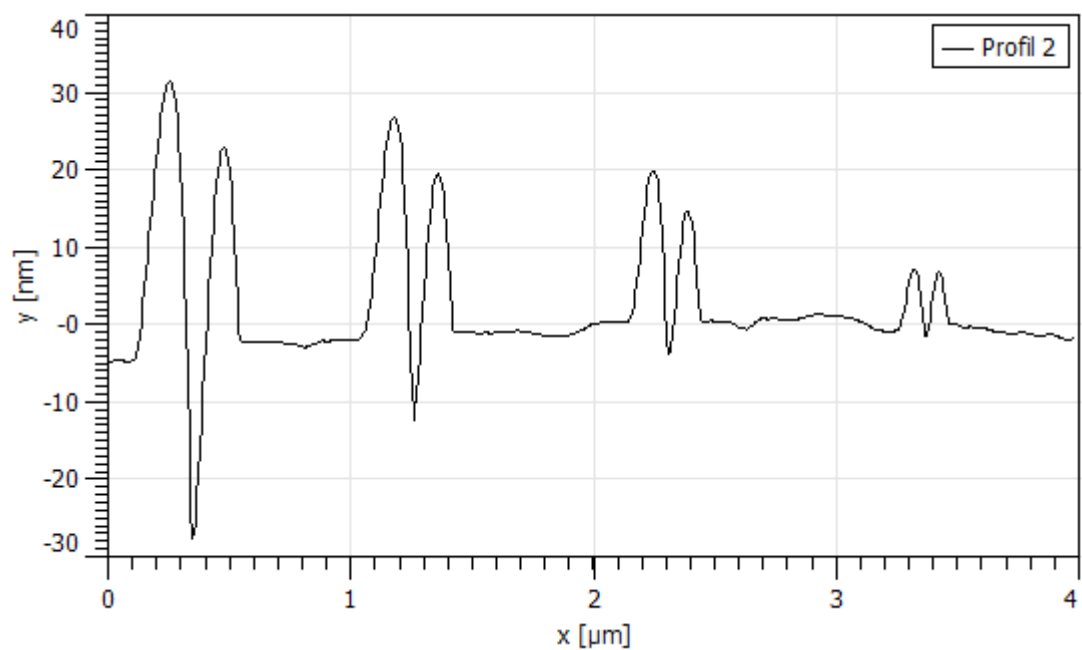


Obr. 19: Rýhy vyryté různou silou, topografická mapa ($4 \times 4 \mu\text{m}$)

Z naměřených dat byly vytvořeny dva horizontální profily. První profil (Obr. 20) byl veden počátkem rýh, druhý jejich střední částí (Obr. 21).

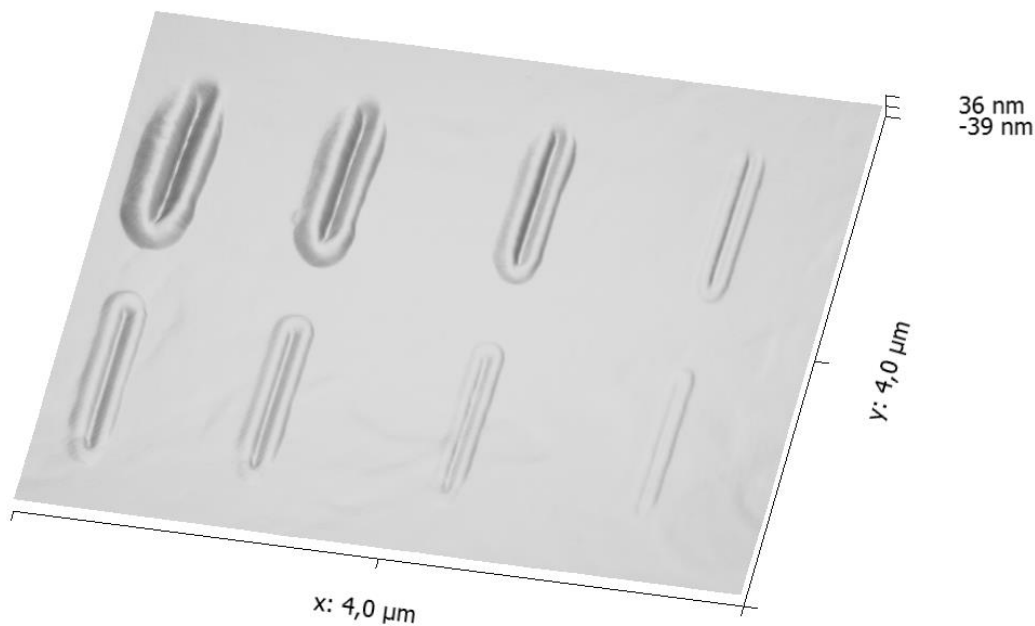


Obr. 20: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil počáteční části rýh



Obr. 21: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil střední části rýh

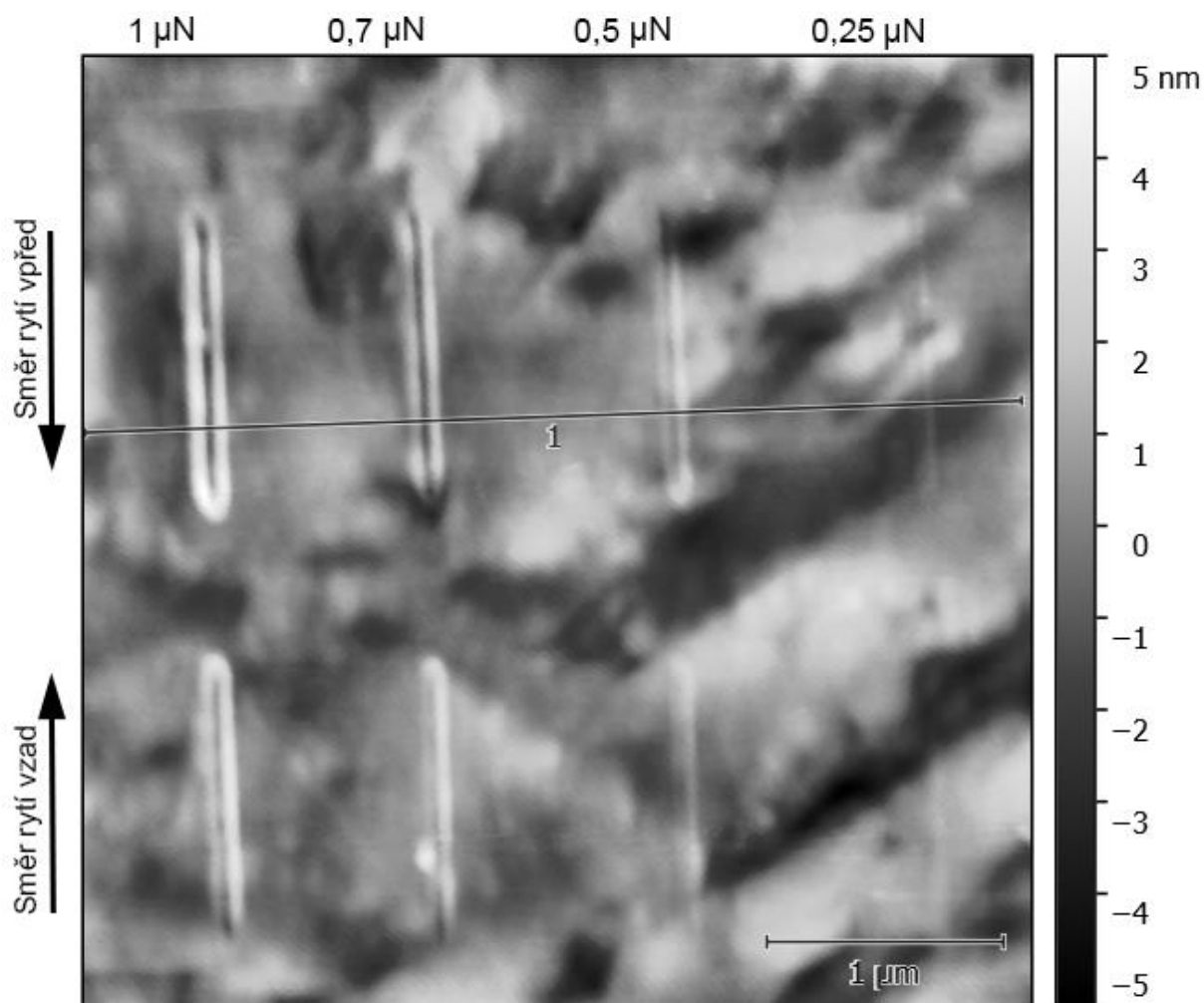
Pro lepší zobrazení byla vytvořena také 3D topografická mapa (Obr. 22).



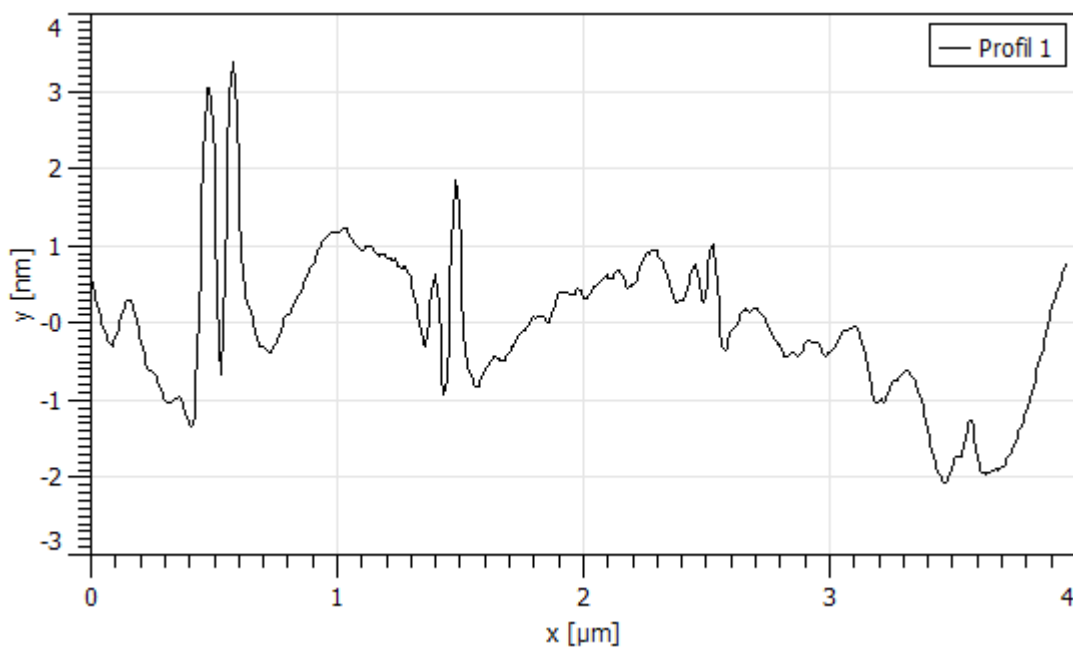
Obr. 22: Rýhy vyryté různou silou, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)

Všechny rýhy jsou dobře viditelné, hloubka v místě počátku nejmenší čtvrté rýhy je menší než 5 nm a výška odhrnutého materiálu v její střední části je 7 nm.

Síla byla v dalším experimentu zmenšena s cílem vytvořit co nejmenší viditelnou rýhu. Rycí síla: první rýha: 1 μN; druhá 0,7 μN; třetí 0,5 μN; čtvrtá 0,25 μN.



Obr. 23: Rýhy vyryté různou silou, topografická mapa (4 x 4 μm)



Obr. 24: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil střední části rýh

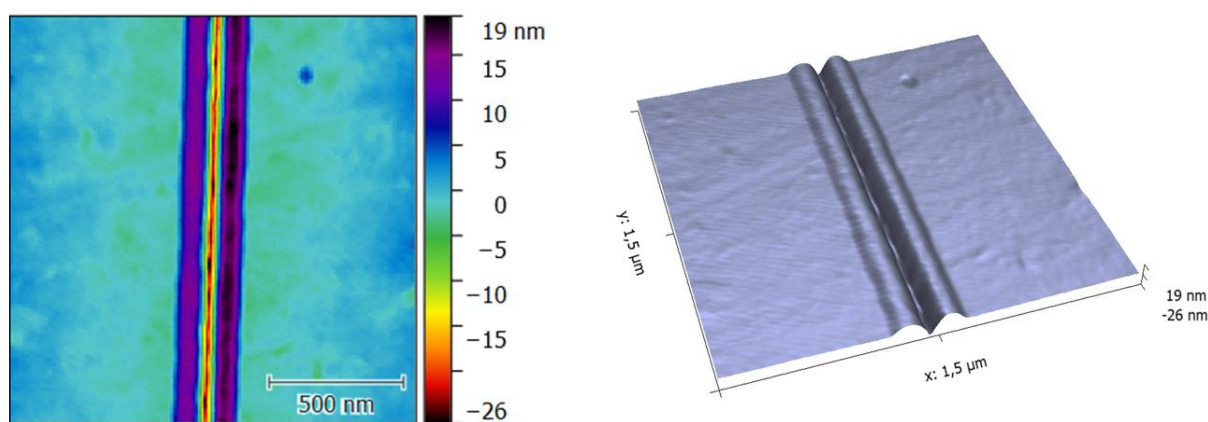
Na topografické mapě (Obr. 23) jsou stále viditelné všechny rýhy, i když poslední už se začíná ztrácet. A v horizontálním profilu (Obr. 24) ji nelze již rozeznat. K dalšímu zmenšování vyryté struktury by byl nutný hladší povrch a/nebo kvalitnější mikroskopický systém. Hloubka i výška poslední rýhy jsou, dle uvedeného grafu, pod hranicí 2 nm.

Na obrázku lze rovněž pozorovat nepatrnou šikmou rýhu, vedoucí mezi zakončením první rýhy ve spodní řadě a počátkem rýhy následující, pravděpodobně způsobenou nedostatečným zvednutím sondy při přemísťování. Tento artefakt nelze (uživatelsky) ovlivnit.

3.2 Vliv teploty na stabilitu vyrytých struktur

Jak již bylo napsáno v kapitole 2.3.1, teplota skelného přechodu (T_g) pro polykarbonát je 145 °C a maximální udávaná operační teplota bývá 121 °C. Vliv teploty na struktury v mezoskopické škále ale může být silnější. Proto byl proveden vlastní test tepelné odolnosti s cílem potvrdit či vyvrátit použitelnost mezoskopických struktur při teplotách okolo udávané maximální operační teploty.

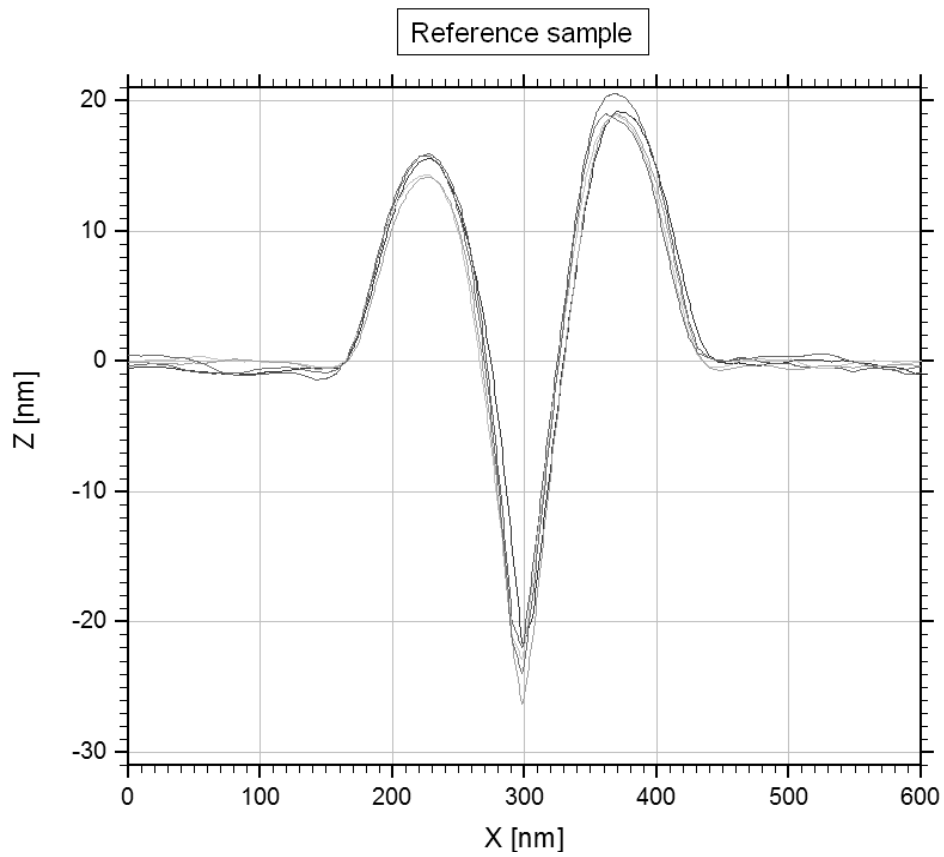
Jako testovací struktura byla opět použita jednoduchá přímá rýha. Ta byla vyryta na sérii polykarbonátových vzorků. Rychlost rytí byla zvolena 5 $\mu\text{m/s}$ a síla 2,7 μN . Topografická mapa referenční rýhy je na Obr. 25 a horizontální profil na Obr. 26.



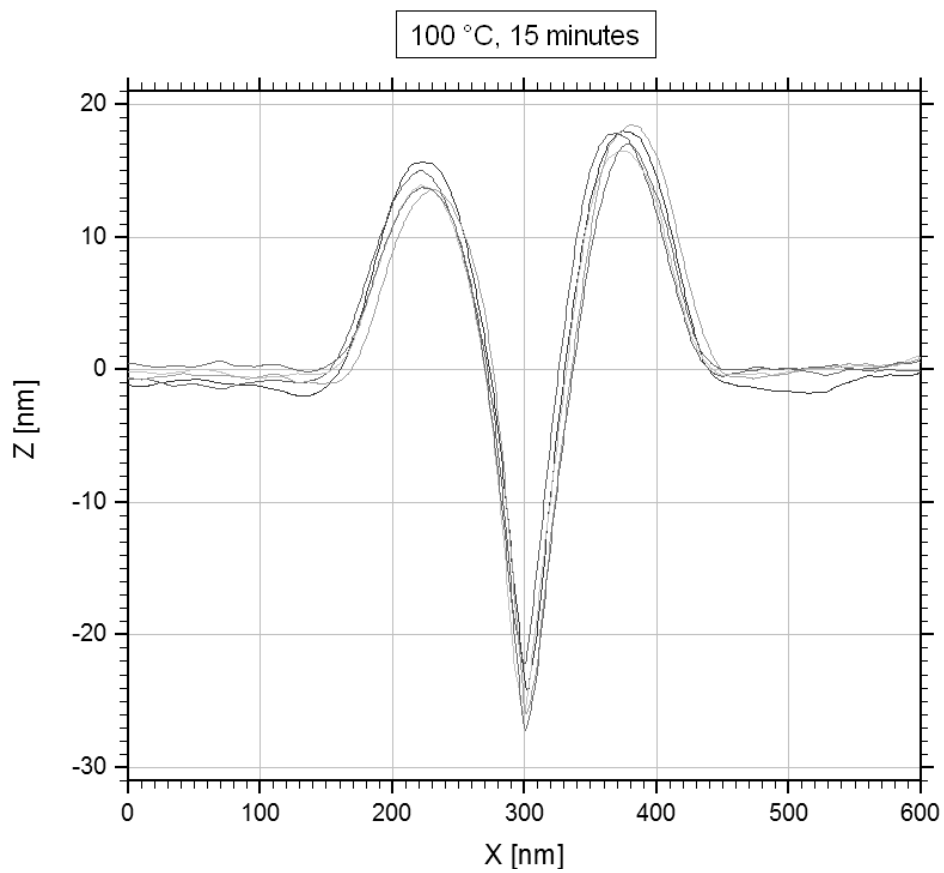
Obr. 25: Referenční rýha, 2D a 3D topografická mapa (vpravo)

Vzhledem k výše uvedeným charakteristickým teplotám byly jednotlivé vzorky vystaveny teplotám od 80 °C do 150 °C po dobu 15 minut v laboratorní sušárně Memmert UNP 200. Krok mezi teplotami byl 10 °C. Horizontální profily rýh vystavených určeným teplotám jsou na Obr. 26 až Obr. 31. Pro každou rýhu bylo vytvořeno pět profilů. Analyzovaná byla pouze střední část rýhy.

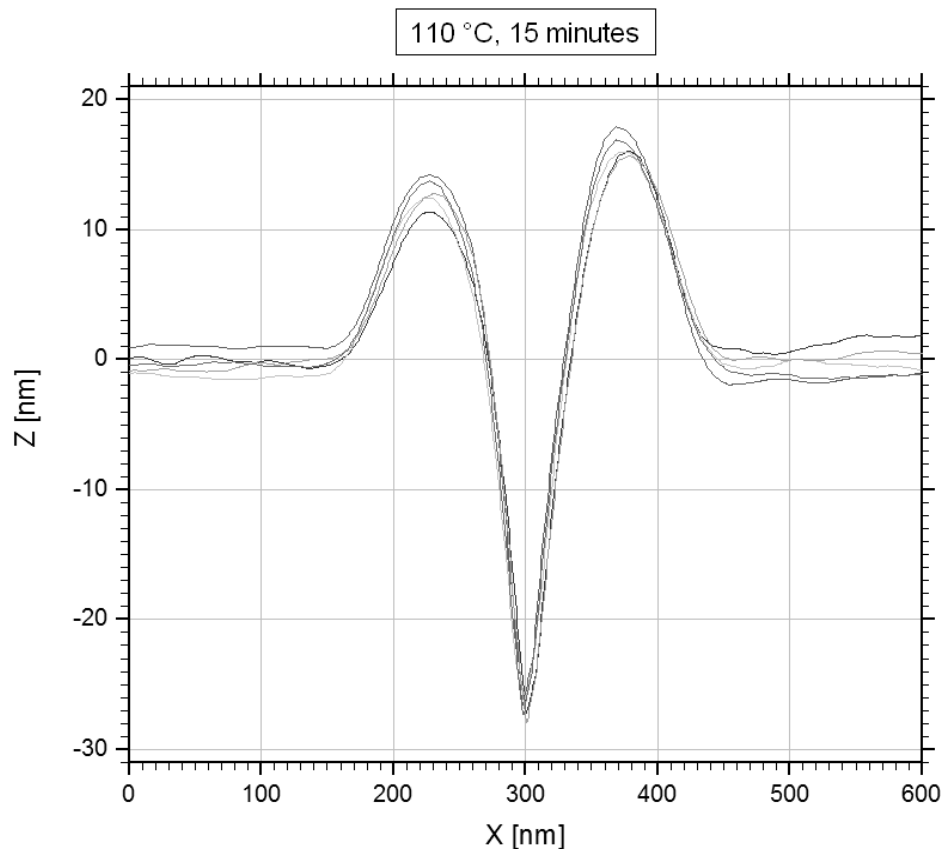
Nejnižší testované teploty 80 °C a 90 °C nezpůsobily po 15 minutách viditelné změny vzorku. Na druhou stranu nejvyšší testovaná teplota 150 °C způsobila degradaci celého vzorku viditelnou i okem. Z tohoto důvodu nejsou rýhy vystavené těmto teplotám zahrnuty mezi následujícími grafy.



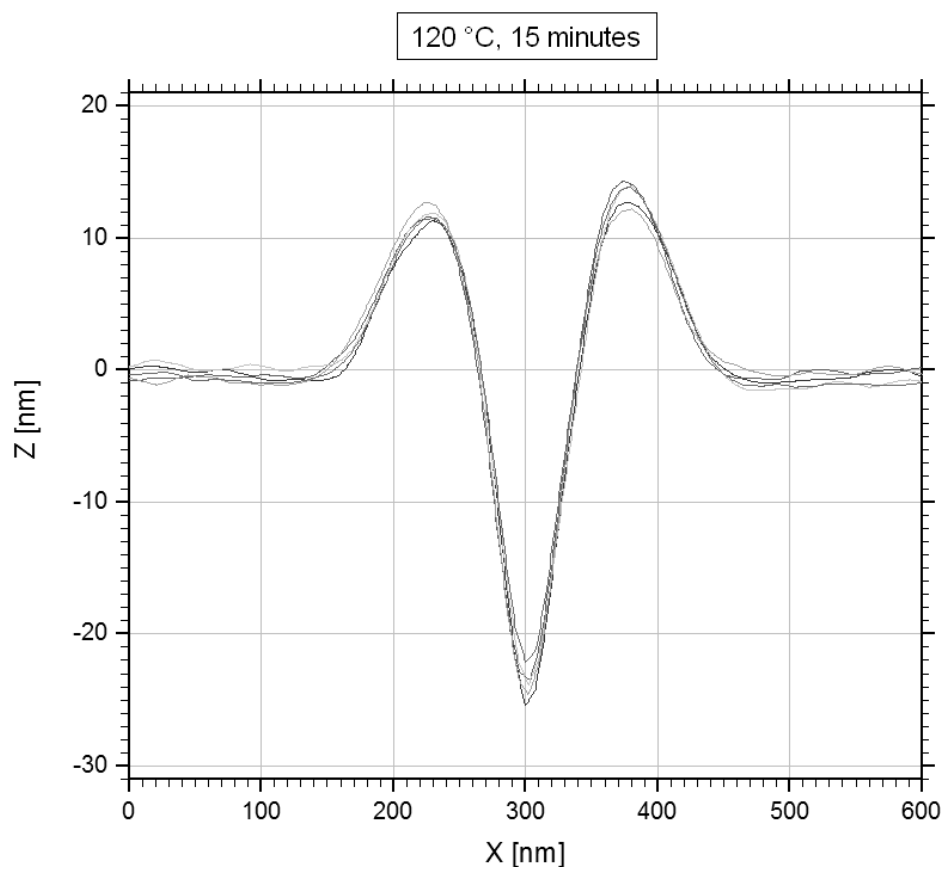
Obr. 26: Horizontální profily referenční rýhy



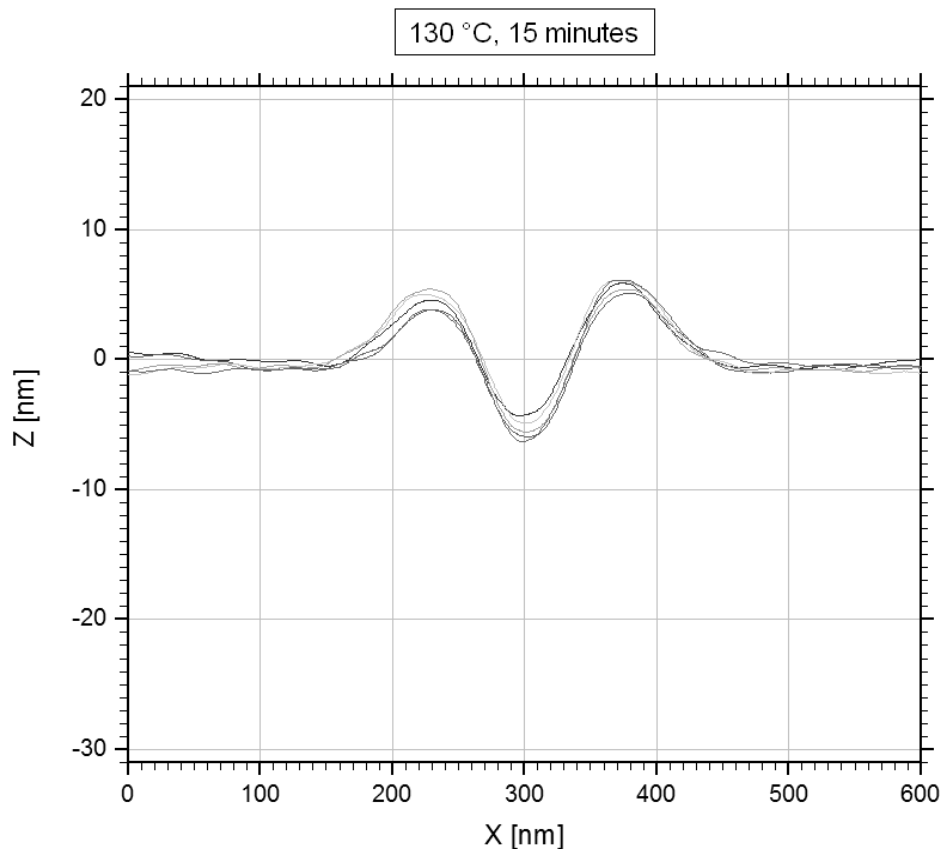
Obr. 27: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 100 °C po dobu 15 minut



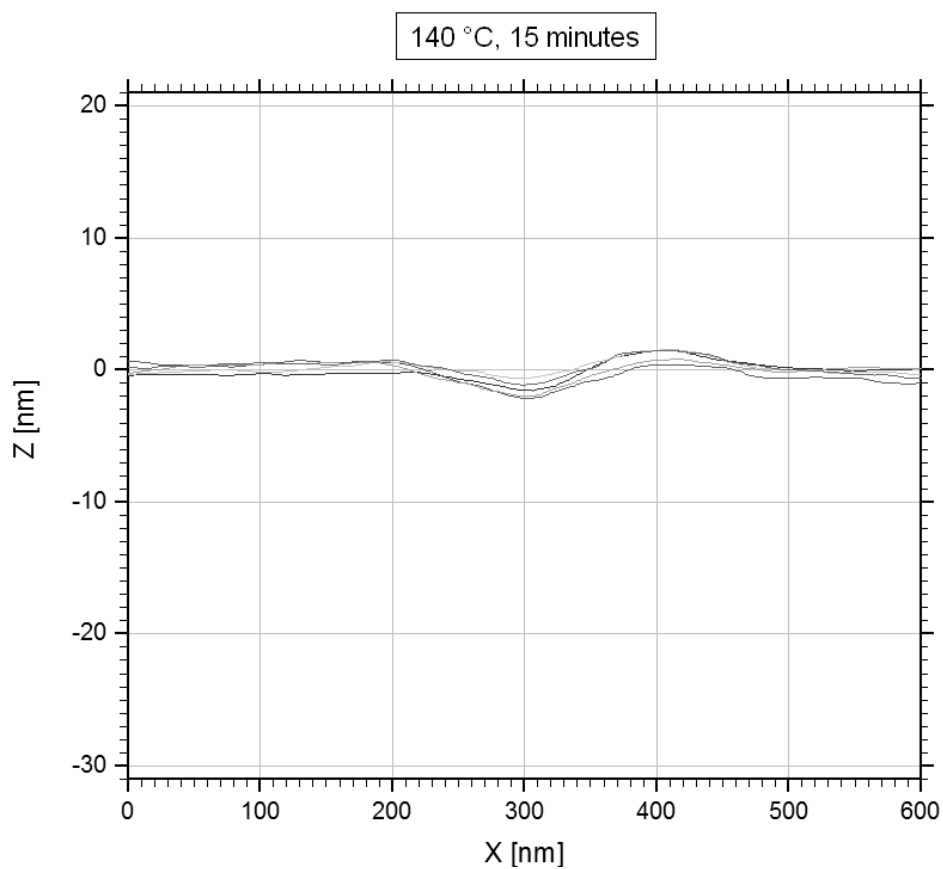
Obr. 28: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 110 °C po dobu 15 minut



Obr. 29: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 120 °C po dobu 15 minut



Obr. 30: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 130 °C po dobu 15 minut



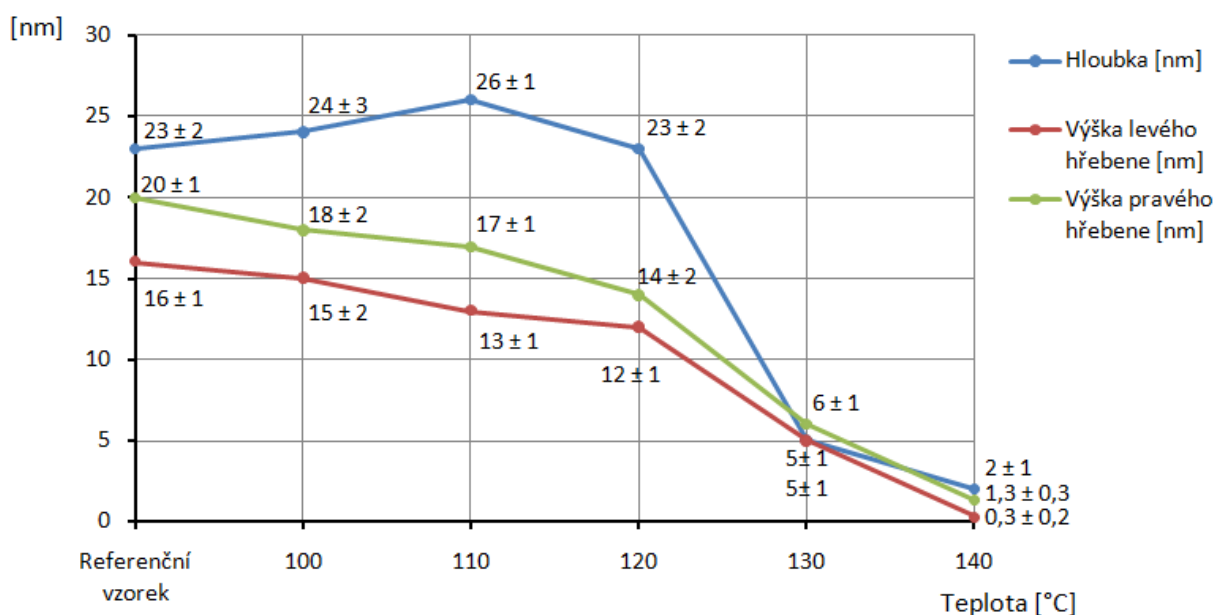
Obr. 31: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 140 °C po dobu 15 minut

Pro porovnání jednotlivých rýh byla z grafů odečtena jejich hloubka, šířka a výška postranních hřebenů. Tyto rozměry jsou uvedeny v Tabulce 2. Každá hodnota je průměrem všech pěti profilů.

Samotné odečítání hodnot bylo obtížné zejména u šířky a více degradovaných vzorků. Z tohoto důvodu není uvedena šířka pro poslední rýhu v tabulce (140 °C).

Tabulka 2: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu 15 minut.

Teplota [°C]	Hloubka [nm]	Výška levého hřebene [nm]	Výška pravého hřebene [nm]	Šířka [nm]
Referenční vzorek	23 ± 2	16 ± 1	20 ± 1	289 ± 6
100	24 ± 3	15 ± 2	18 ± 2	299 ± 6
110	26 ± 1	13 ± 1	17 ± 1	309 ± 5
120	23 ± 2	12 ± 1	14 ± 2	316 ± 7
130	5 ± 1	5 ± 1	6 ± 1	319 ± 7
140	2 ± 1	0,3 ± 0,2	1,3 ± 0,3	.



Obr. 32: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu 15 minut.

Z přiložené tabulky i grafů je zřejmé, že se zvyšující se teplotou dochází k výraznějšímu zmenšování hloubky i výšky, zatímco šířka se zvětšuje. Za pozornost stojí fakt, že při dvou nejnižších teplotách (100 °C a 110 °C) došlo naopak ke zvětšení hloubky. To může být způsobeno relaxací zbytkových mechanických napětí, vzniklých rytím.

Z uvedených výsledků lze soudit, že první změny sledovaných struktur mohly nastat již při 100 °C. Nicméně tvar rýhy je dobře zachovalý ještě i při teplotě

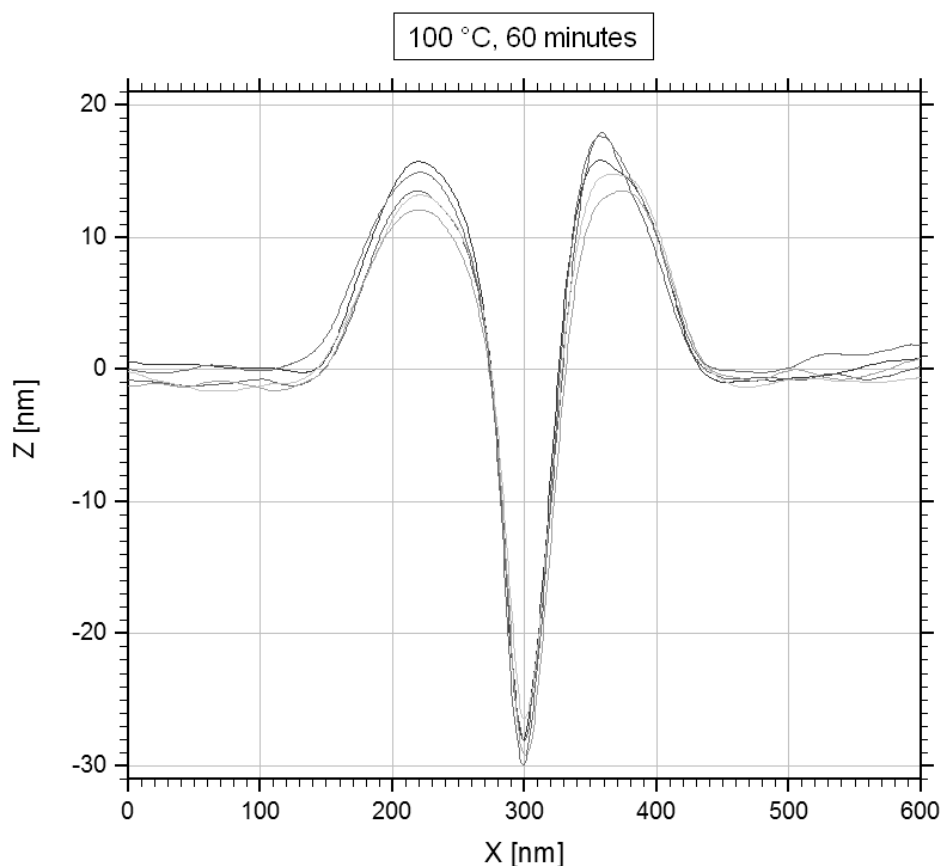
120 °C, která bývá udávána jako maximální použitelná teplota pro polykarbonát. Avšak tato teplota už výrazně ovlivnila zkoumané struktury. Výška obou hřebenů se zmenšila o více než 20 %.

Následující teplota 130 °C byla již destruktivní a lze vidět, že se již blížíme teplotě skelného přechodu. Hloubka se zmenšila o 80 %, výška o 70 % a šířka se zvětšila o 10 %.

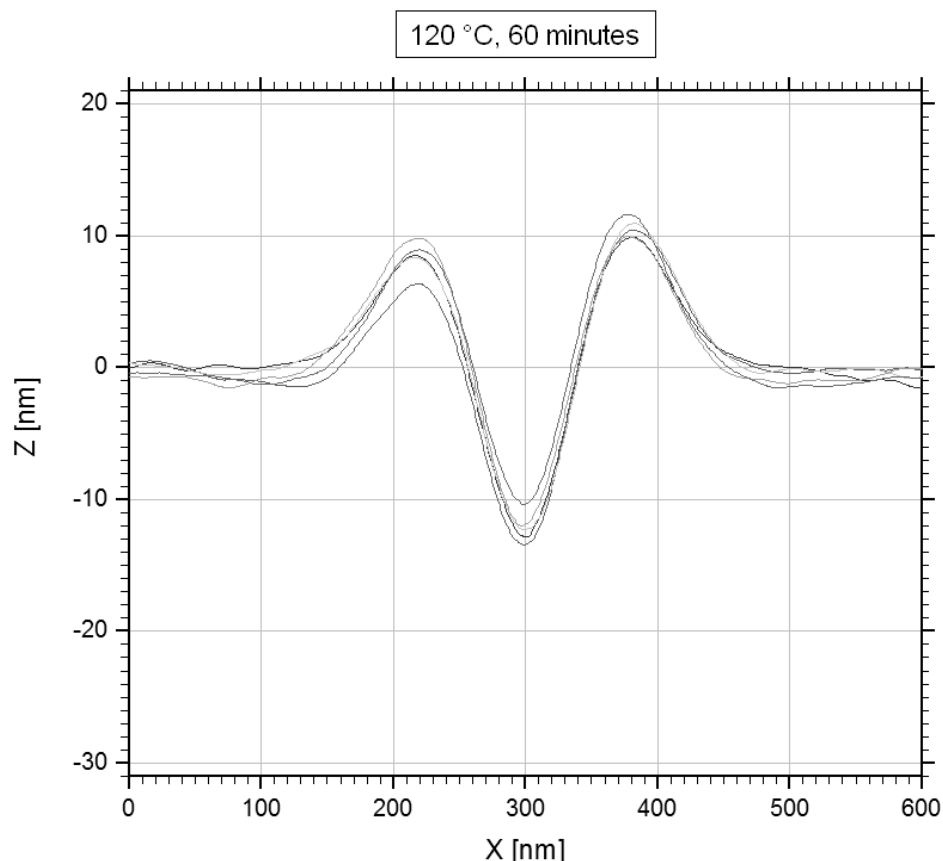
Poslední zkoumaná rýha, vystavená teplotě 140 °C (5 °C pod teplotou skelného přechodu), je už jen velice těžko rozeznatelná. Levý hřeben už téměř zmizel a výška druhého i hloubka rýhy jsou pod hranicí 2 nm.

Na základě výše uvedených výsledků byly tři vzorky opětovně vystaveny stejné teplotě na dalších 60 minut. Vybrána byla teplota 90 °C, protože tato teplota po 15 minutách nezpůsobila žádné viditelné změny. Dále byla zvolena teplota 100 °C, jakožto nejnižší teplota, která způsobila viditelné změny zkoumané rýhy v předchozím experimentu. A jako poslední teplota 120 °C, která způsobila zmenšení výšky hřebenů o 20 %, ale tvar rýhy byl stále dobře rozeznatelný. Každý z těchto vzorků byl tedy nejprve vystaven dané teplotě po dobu 15 minut a po prvním skenování a analýze na dalších 60 minut.

Ani v druhém případě teplota 90 °C nezpůsobila viditelné změny zkoumané struktury. Horizontální profily dalších dvou rýh jsou na Obr. 33 a Obr. 34. Údaje o rozměrech rýh jsou v Tabulce 3.



Obr. 33: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 100 °C po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).



Obr. 34: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 120 °C po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).

Tabulka 3: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).

Teplota [°C]	Hloubka [nm]	Výška levého hřebene [nm]	Výška pravého hřebene [nm]	Šířka [nm]
Referenční vzorek	23 ± 2	16 ± 1	20 ± 1	289 ± 6
100	28 ± 2	15 ± 1	16 ± 2	317 ± 11
120	12 ± 2	9 ± 2	11 ± 1	343 ± 11

Pokud porovnáme profily rýh vystavených dané teplotě po dobu 15 minut (Obr. 27 Obr. 29) a profily rýh po dalších 60 minutách (Obr. 33 a Obr. 34) je zřejmé, že celý proces pokračoval i po prvních 15 minutách.

Rýha vystavená teplotě 100 °C má stále zachovalý tvar i po dalších 60 minutách, ale změny u druhé rýhy, vystavené teplotě 120 °C, jsou již razantní. Při porovnání s referenční rýhou (Obr. 26) bylo zjištěno, že výška hřebenů se zmenšila o 45 %. Jelikož však byla změna výšky hřebenů po prvních 15 minutách již 20 %, můžeme usuzovat, že proces sice pokračoval dále, ale největší změny proběhly v prvních 15 minutách.

Z výše uveřejněných výsledků vyplývá, že teplota 121 °C, udávaná jako maximální operační teplota pro polykarbonát, **není** pro testované mezoskopické

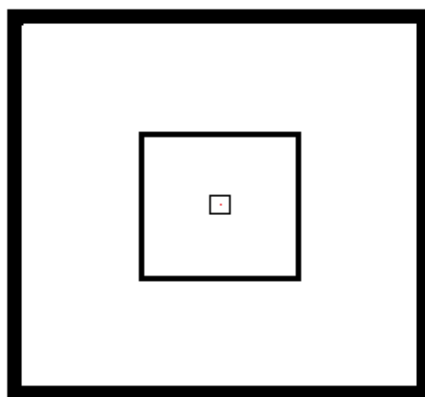
struktury vhodná. I vystavení rýhy dané teplotě po dobu 15 minut mělo za následek zmenšení výšky hřebenů o 20 %. Nejnižší teplotou, která způsobila pozorovatelné změny struktur, bylo 100 °C. Avšak tvar rýhy zůstal velmi dobře zachován jak po prvních 15 minutách vystavení dané teplotě, tak i po následujících 60 minutách. Teplota o 10 °C nižší, tj. 90 °C, již neměla viditelný vliv na testované struktury ani v jednom z testů. Pokud by dlouhodobé nebo opakované vystavení této teplotě (nebo jí blízké) připadalo v úvahu, bylo by nutné provést podrobnější testování. Vzhledem k tomu, že se v běžném prostředí jen výjimečně setkáme s teplotami přesahujícími 70 °C, můžeme předpokládat, že testované polykarbonátové struktury nebudou teplotou v běžném prostředí degradovány.

3.3 Tvorba bezpečnostních značek

Hlavním cílem této práce je vytvořit bezpečnostní značky, jež by mohly sloužit pro skryté identifikační značení předmětů případně i pro utajený přenos informací (steganografie). Bezpečnostní značkou se tedy v tomto případě rozumí jakákoliv struktura umožňující naplnění těchto cílů. Může se jednat o symbol (např. znak organizace), nápis běžným písmem nebo i kód (např. Morseova abeceda či čárový kód). V této práci je uveden příklad všech tří zmíněných možností.

Jak již bylo popsáno v úvodu, výhodou nanometrických struktur je jejich poměrně náročná odhalitelnost. Není možné je zobrazit běžným optickým mikroskopem. A i při využití elektronového mikroskopu nebo mikroskopu atomárních sil je jejich nalezení a přečtení (pokud neznáme jejich polohu) značně obtížné. Nemluvě o případném pokusu o jejich kopírování nebo modifikaci. Tato výhoda ale může přinášet i potíže při čtení dané značky. Proto je nutné volit typ značky a její velikost s ohledem na danou aplikaci. Čím větší značka bude, tím jednodušeji a rychleji se bude hledat, ale současně je více náchylná k odhalení a možnému okopírování či modifikaci.

Pro méně náročné aplikace je jednoduchým řešením vytvořit značku větší, tak aby šla pohodlně najít například i optickým mikroskopem. Pro ostatní aplikace je užitečné znát přesné umístění značky, případně toto umístění vhodně označit. Možností je zde celá řada. Značka může být umístěna například na určeném místě v sérii čtyřúhelníků (Obr. 35), přičemž největší z nich může být viditelný i optickým mikroskopem nebo okem.

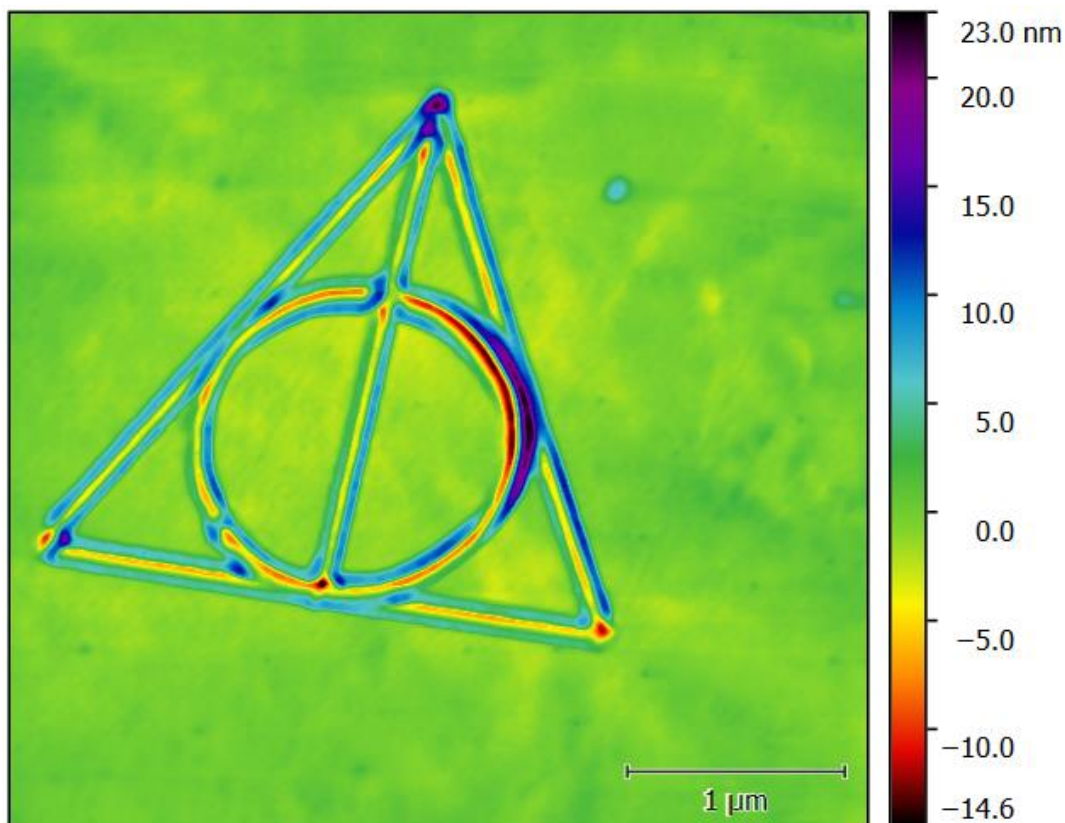


Obr. 35: Umístění značky v sérii čtýřúhelníků

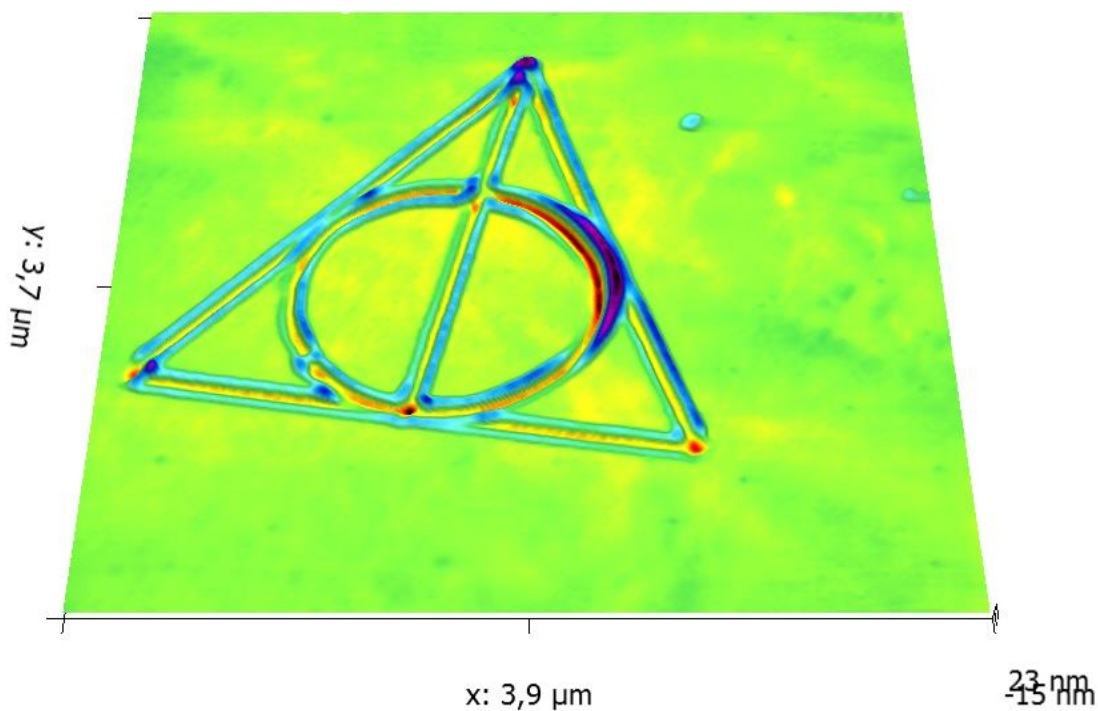
Může mít také přesně stanovené umístění v rámci většího viditelného symbolu apod. Pokud značka ponese důležitou informaci, nabízí se i možnost tuto informaci zašifrovat.

3.3.1 Symbol

Na Obr. 36 se nachází první příklad jednoduché značky: Symbol složený z trojúhelníku, jeho výšky a kružnice vepsané. Průměr kružnice je $1,4 \mu\text{m}$. Totožný symbol je i na 3D mapě na Obr. 37.

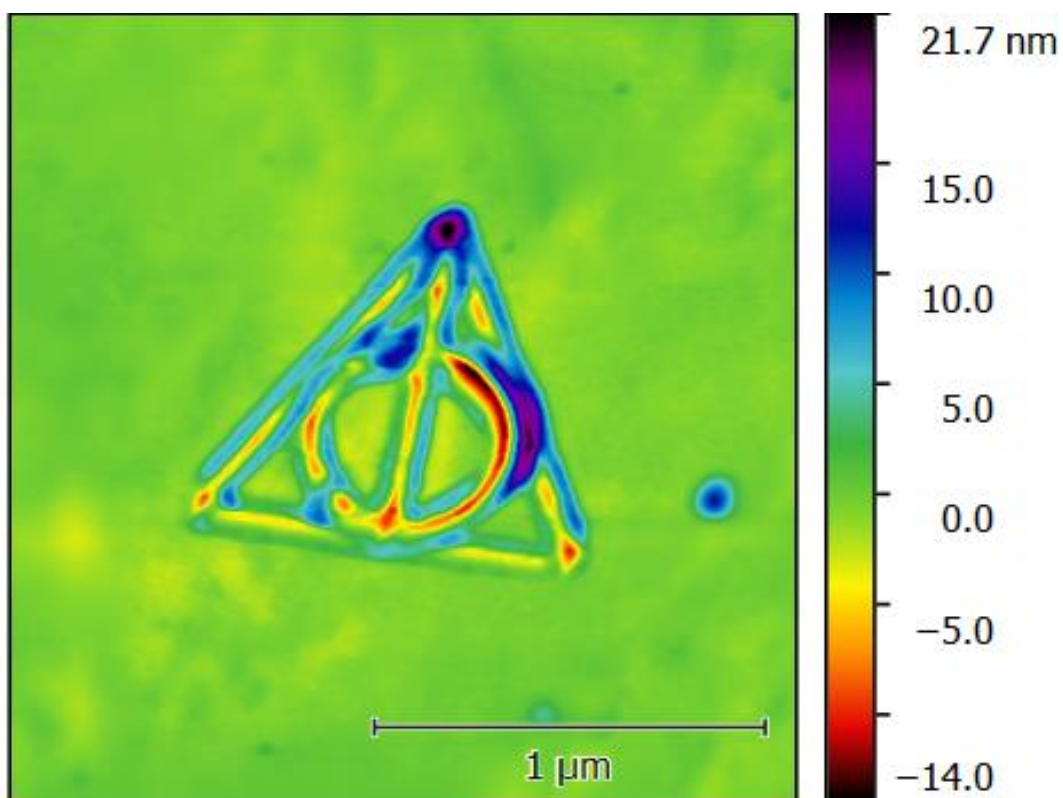


Obr. 36: Symbol – trojúhelník, topografická mapa ($4 \times 4 \mu\text{m}$)



Obr. 37: Symbol - trojúhelník, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)

Na Obr. 38 se nachází zmenšený symbol. Průměr kružnice je v tomto případě 0,5 μm.

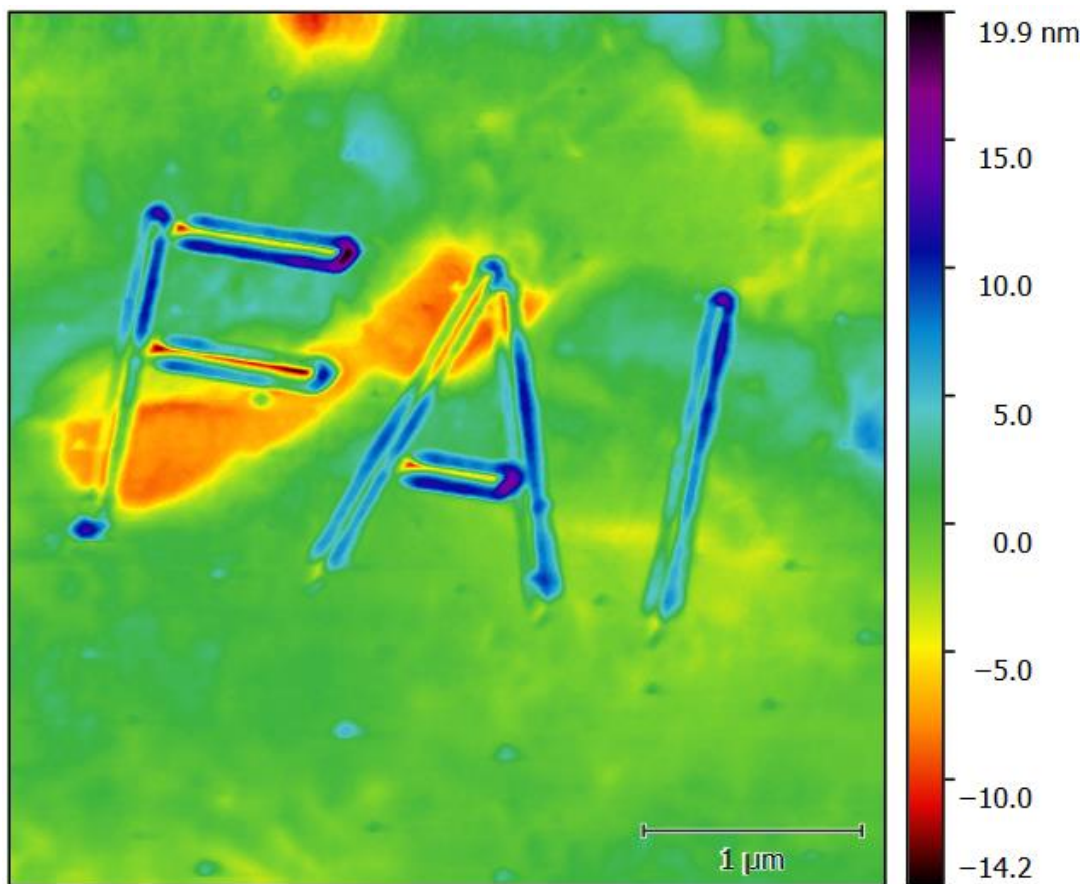


Obr. 38: Symbol – trojúhelník (zmenšený), topografická mapa (2 x 2 μm)

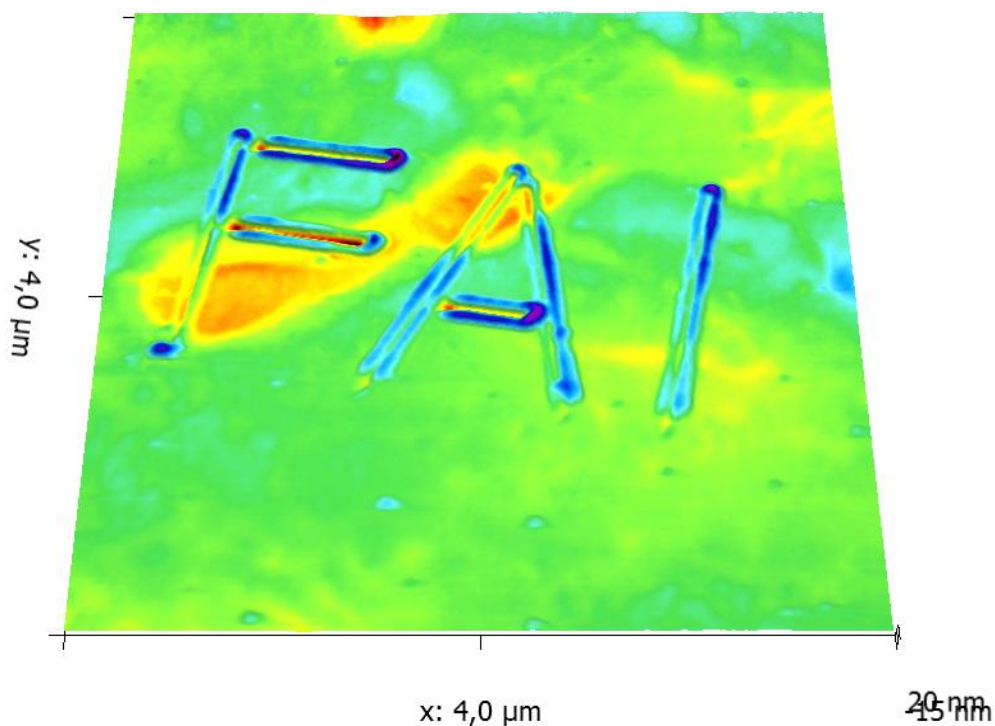
Další zmenšování by bylo při daném experimentu nežádoucí. Symbol už by nebyl dostatečně jasný.

3.3.2 Nápis (FAI)

Na Obr. 39 je vyryta zkratka FAI (Fakulta aplikované informatiky). Rozměry zkratky jsou 2,7 x 1,6 μm . Totožný nápis je i na 3D mapě na Obr. 40.

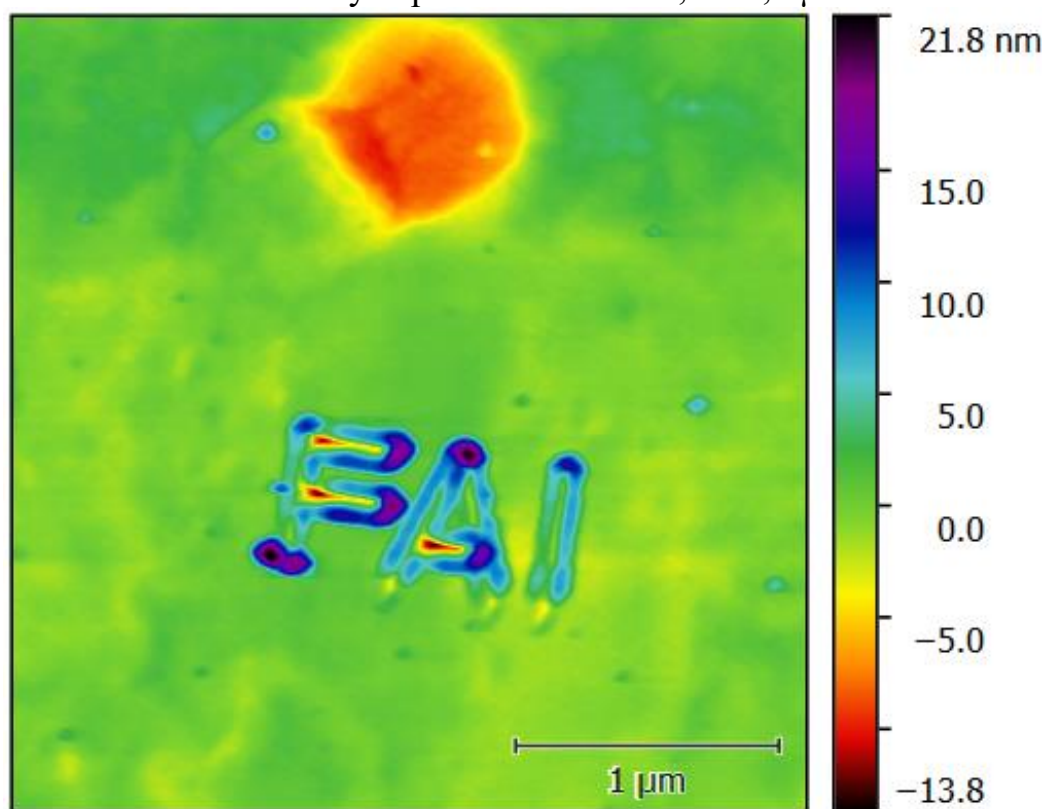


Obr. 39: Nápis FAI, topografická mapa (4 x 4 μm)



Obr. 40: Nápis FAI, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)

Na Obr. 41 se nachází zmenšený nápis o rozměrech 1,1 x 0,7 μm .



Obr. 41: Nápis FAI (zmenšený), topografická mapa (3 x 3 μm)

Další zmenšování už bylo při daném experimentu nežádoucí. Výrazně by snížilo čitelnost nápisu.

3.3.3 Kód (PASSWORD)

Jak bylo popsáno v kapitole 3.1.2 (Volba směru rytí), ideálním případem rytí je rytí pouze v jednom směru. To bohužel není možné při tvorbě symbolu nebo nápisu, kde je třeba směry měnit. Avšak při tvorbě kódu se rytí pouze v jednom směru nabízí. Příkladem může být Morseova abeceda, u které by bylo možné střídát delší a kratší rýhy nebo i čárový kód.

Pro tuto práci byl zvolen zápis v binárním kódu. Binární jedničku vždy představuje vytvořená rýha, zatímco nulu prázdné místo.

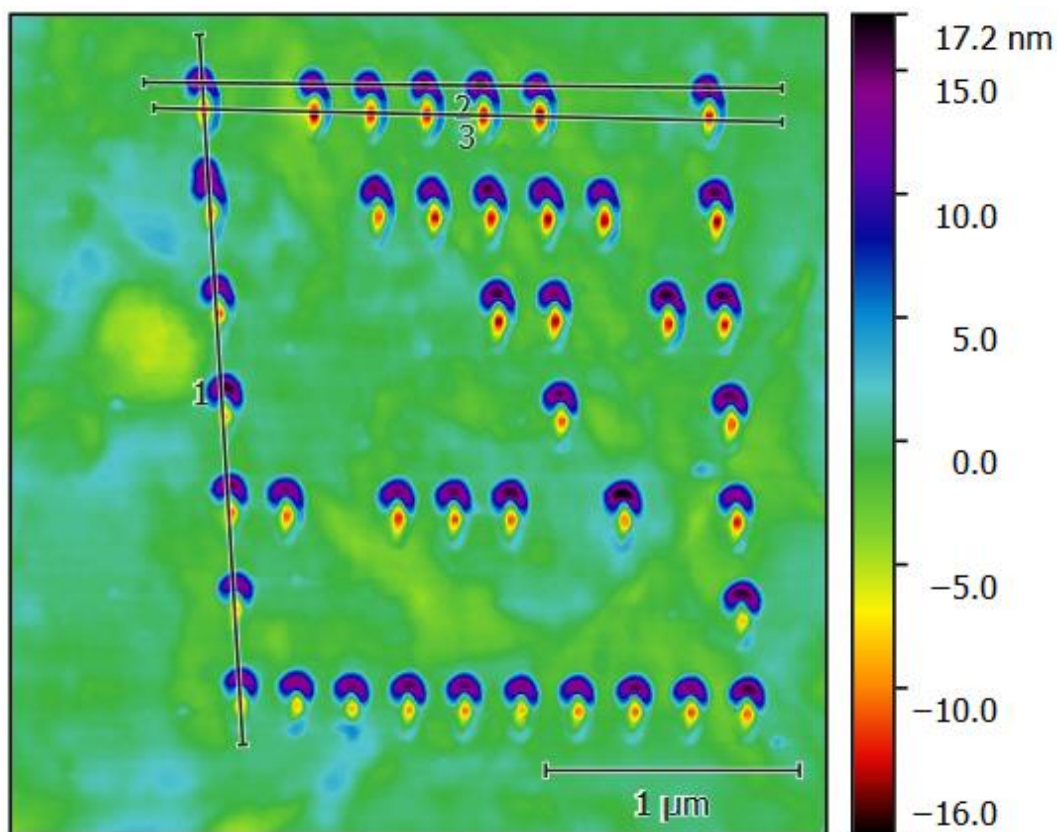
Jako zkušební slovo bylo vybráno slovo „PASSWORD“. Pro převod textu do číselné soustavy byl použit ASCII kód. Tabulka 4 zobrazuje jednotlivá písmena v desítkové, dvojkové a trojkové soustavě.

Tabulka 4: Slovo „PASSWORD" v ASCII kódu.

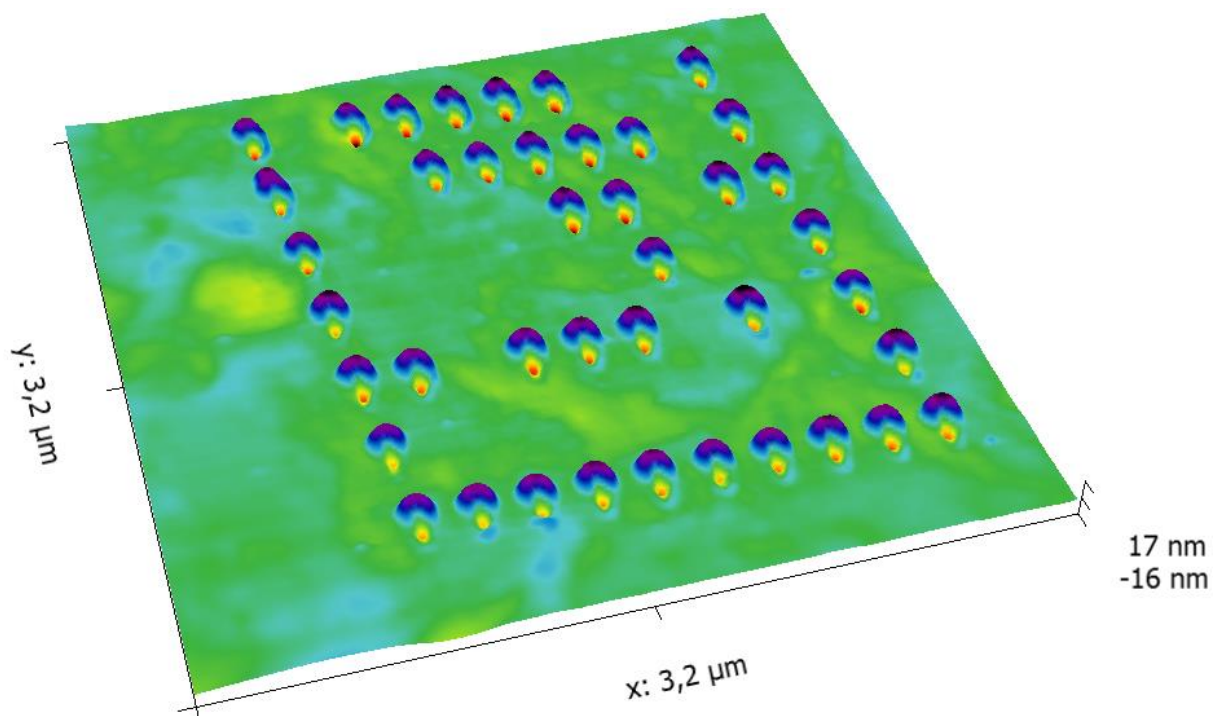
Znak	Desítková s.	Dvojková s.	Trojková s.
P	80	1010000	02222
A	65	1000001	02102
S	83	1010011	10002
S	83	1010011	10002
W	87	1010111	10020
O	79	1001111	02221
R	82	1010010	10001
D	68	1000100	02112

Dvojková soustava

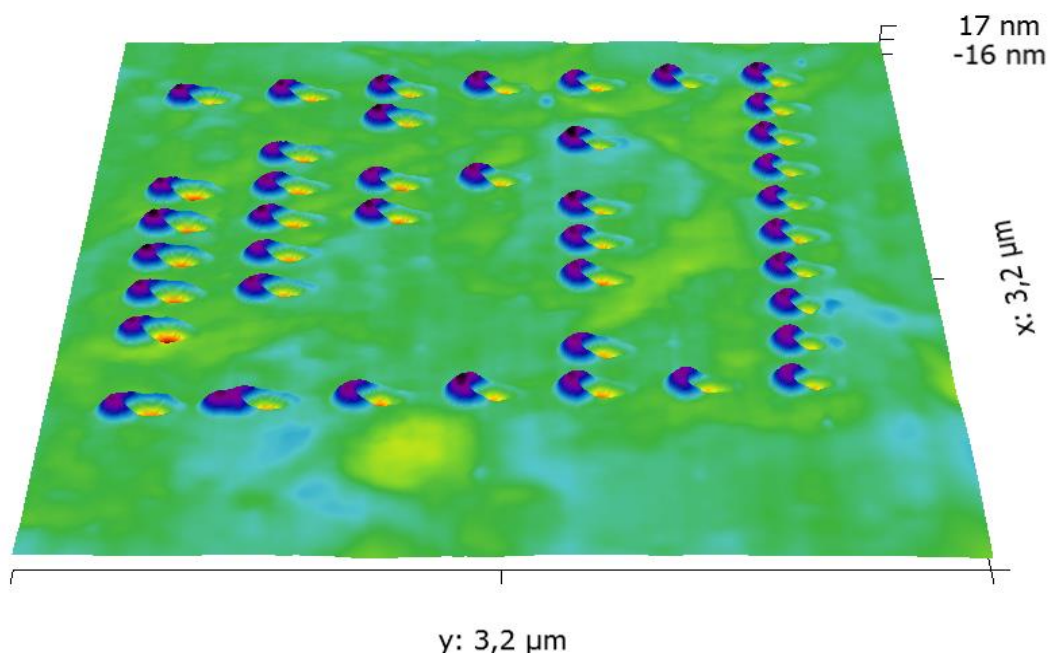
Vytvořený kód je k vidění na topografické mapě na Obr. 42 a rovněž na 3D mapách ze čtyř různých úhlů (Obr. 43 až Obr. 46). Jednotlivé znaky jsou tvořeny po sloupcích. První a poslední sloupec na mapě (celý vyplněný rýhami - jedničkami) označuje začátek a konec značky.



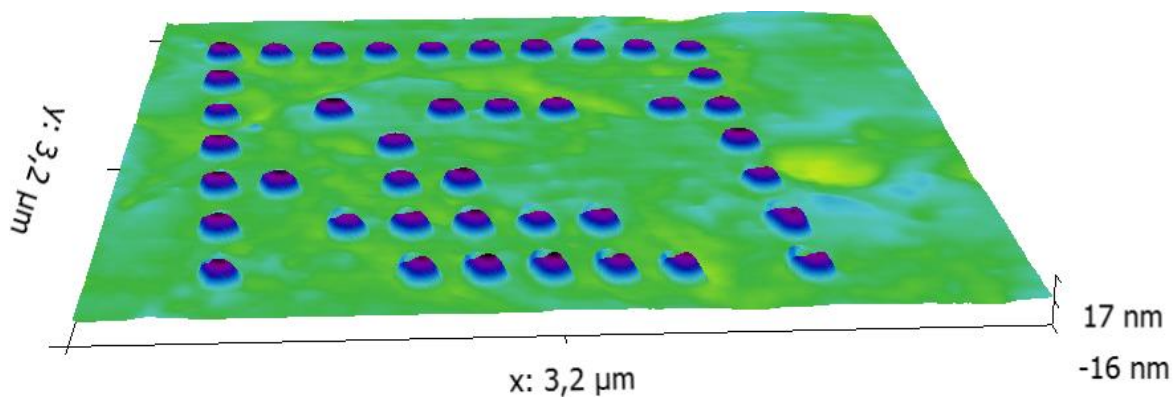
Obr. 42: Kód – slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, topografická mapa (3,2 x 3,2 μm)



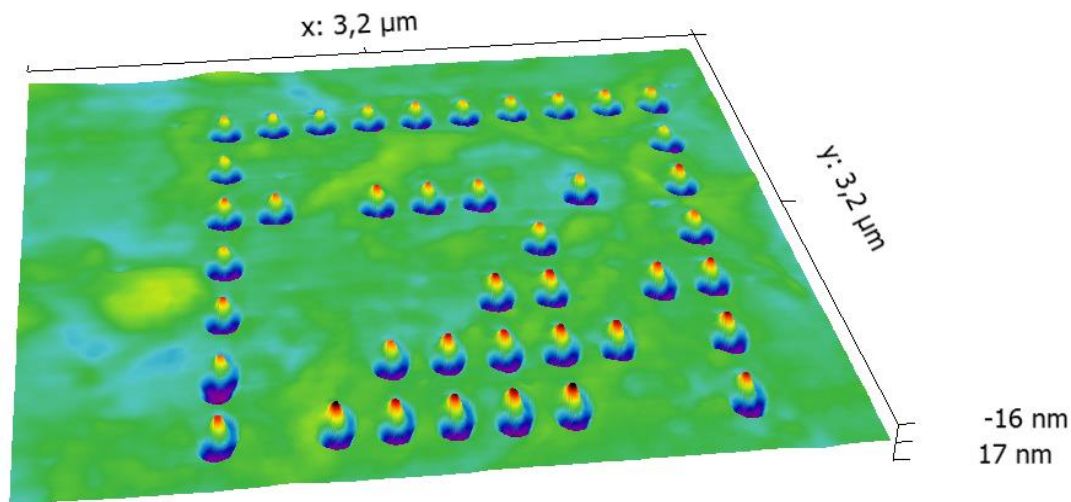
Obr. 43: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa (3,2 x 3,2 μm)



Obr. 44: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa ($3,2 \times 3,2 \mu\text{m}$), pohled ze strany

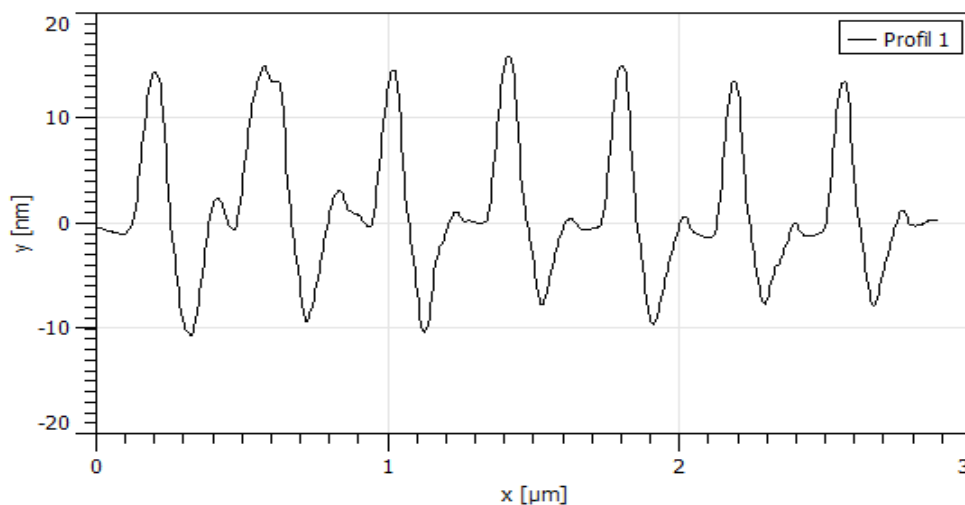


Obr. 45: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa ($3,2 \times 3,2 \mu\text{m}$), pohled zezadu

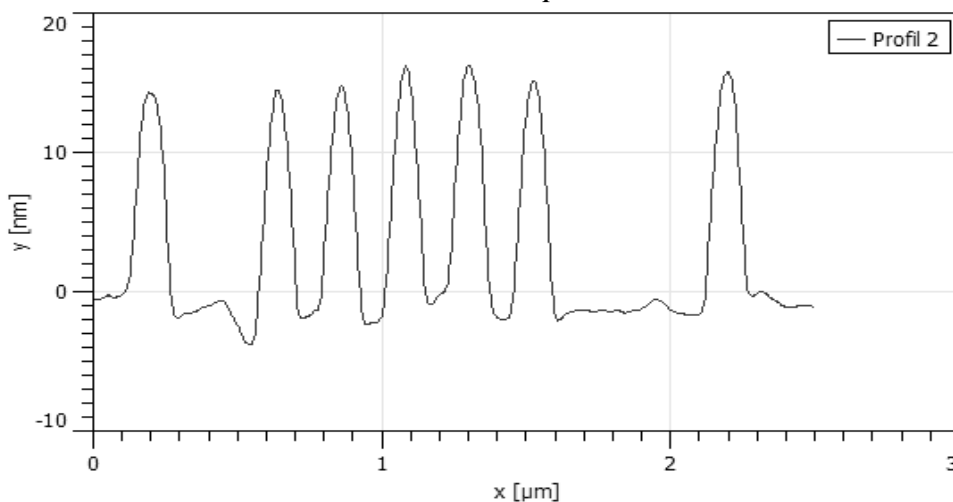


Obr. 46: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, topografická mapa ($3,2 \times 3,2 \mu\text{m}$), pohled zespodu

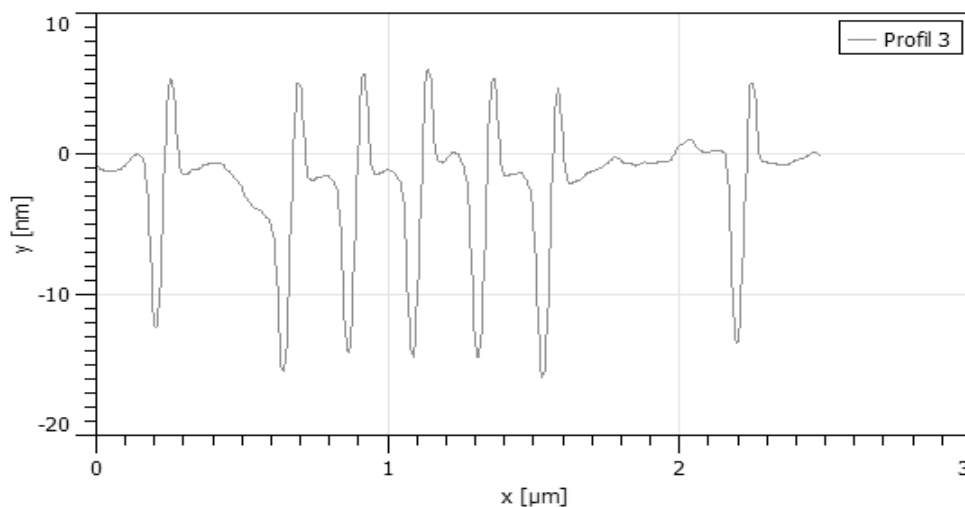
Dle vyznačení na mapě (Obr. 42) byl vytvořen vertikální profil prvního sloupce (Obr. 47) a horizontální profily prvního řádku (Obr. 48 a Obr. 49)



Obr. 47: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, vertikální profil prvního sloupce



Obr. 48: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, horizontální profil prvního řádku

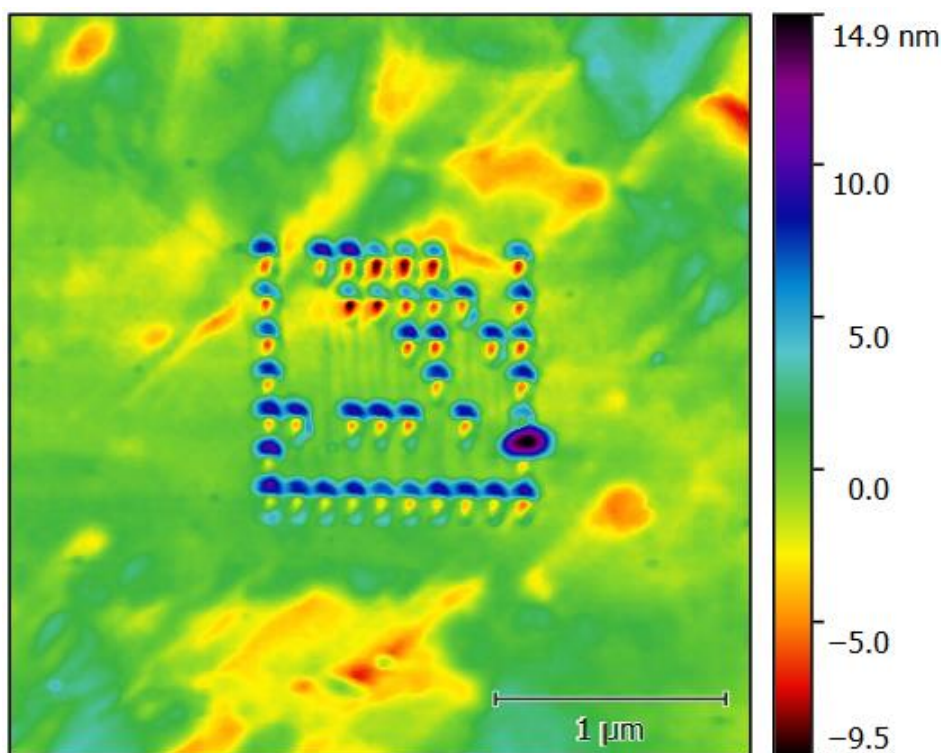


Obr. 49: Kód - slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě, horizontální profil prvního řádku (v místě největší hloubky)

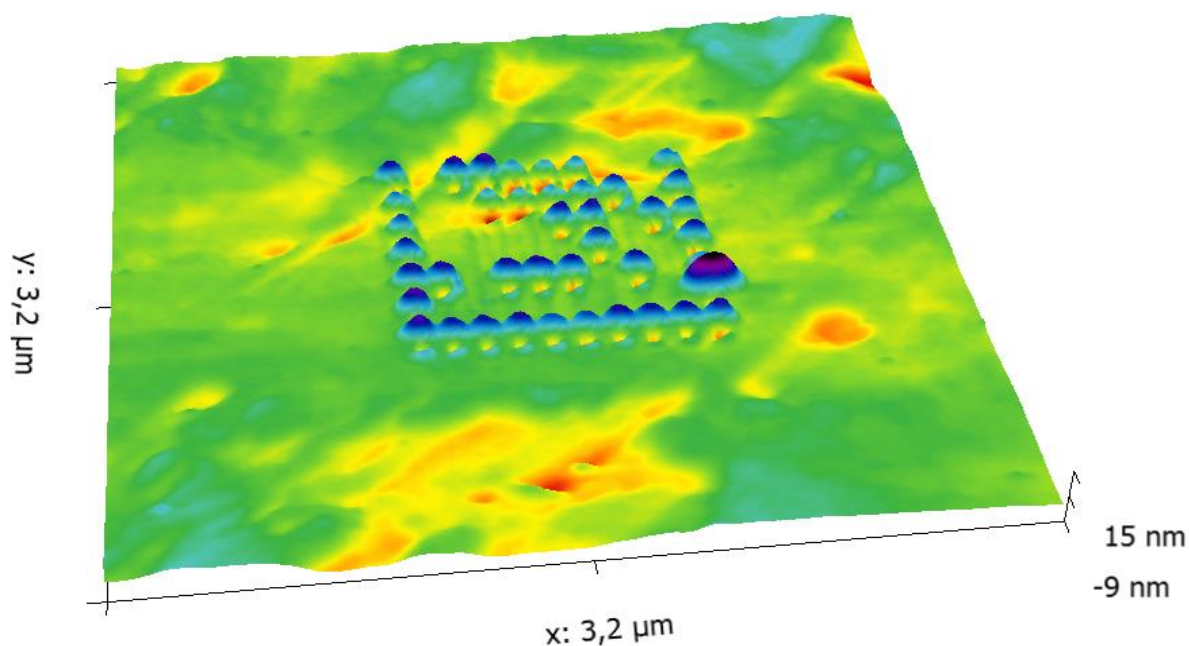
Průměrná hloubka rýhy ani výška vytlačeného materiálu nepřesahují 15 nm. Délka je 300 nm a šířka 150 nm. Rozměry značky (bez krajních orientačních sloupců) jsou 1,7 x 2,7 μm . Informační hustota tohoto 56-bitového kódu je 7,9 Gbit/in². Hustota zápisu je tedy 8,8 krát vyšší než u běžného cd (0,9 Gbit/in²).

Při této délce již není pozorovatelná typická střední část, jako u delších rýh, ale je rozeznatelný pouze hluboký počátek a vysoké zakončení z nahrnutého materiálu. Výhodou je, že při vyhodnocování mapy můžeme sledovat obě tyto části a na základě nich stanovit, kdy se jedná o rýhu a kdy například jen o povrchovou nerovnost či nečistotu. Jak vyplývá z prezentovaných map a vertikálního profilu prvního sloupce rýh (Obr. 47), při vyhodnocování sloupce směrem z vrchu dolů začíná každá rýha vysokým zakončením z vytlačeného materiálu, za kterým ihned následuje prohlubeň a opět vytlačený materiál (tentokrát už ne příliš výrazný).

Jelikož je kód dobře viditelný, byl postupně zmenšován. K tomu bylo zapotřebí umístit jednotlivé rýhy blíže k sobě a celkově je zmenšit. Tyto operace mají za následek sice zmenšení kódu ale také zhoršení jeho čitelnosti. Kód je totiž více ovlivněn nerovnostmi povrchu nebo nečistotami, které mohou zapříčinit nejistotu, případně chybu při jeho čtení. Velikost je nutné volit tak, aby byl kód stále jasně čitelný. Příklad zmenšeného kódu je na Obr. 50 a Obr. 51.



Obr. 50: Kód – slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě (zmenšená verze), topografická mapa (3,2 x 3,2 μm)



Obr. 51: Kód – slovo *PASSWORD* ve dvojkové soustavě (zmenšená verze), 3D topografická mapa ($3,2 \times 3,2 \mu\text{m}$)

Rozměry této zmenšené značky (bez krajních orientačních sloupců) jsou $1 \times 1,2 \mu\text{m}$. Informační hustota tohoto 56-bitového kódu je $30,1 \text{ Gbit/in}^2$. Hustota zápisu je tedy 33 krát vyšší než u běžného CD ($0,9 \text{ Gbit/in}^2$) a 2,4x vyšší než u disku Blu-ray ($12,5 \text{ Gbit/in}^2$).

Jak je z topografických map patrné, kód je v horní části ovlivněn prohlubní v substrátu, nicméně čitelnost je zde stále bezproblémová. Nejistotu při čtení kódu však způsobil výrůstek v pravém dolním rohu. Ten se v tomto případě nachází mezi dvěma rýhami a jejich rozpoznání je proto obtížnější, avšak při bližším přiblížení stále možné. Pokud by byl tento výčnělek větší nebo na jiném místě, mohl by znemožnit rozpoznání toho, jestli se na dané pozici nachází rýha nebo ne, a tím případně znemožnit čtení kódu. Výhodou dvojkové soustavy ovšem je, že má pouze dva stavy. Nabízí se tedy možnost dosadit do kódu obě možnosti a zjistit, která dává smysl.

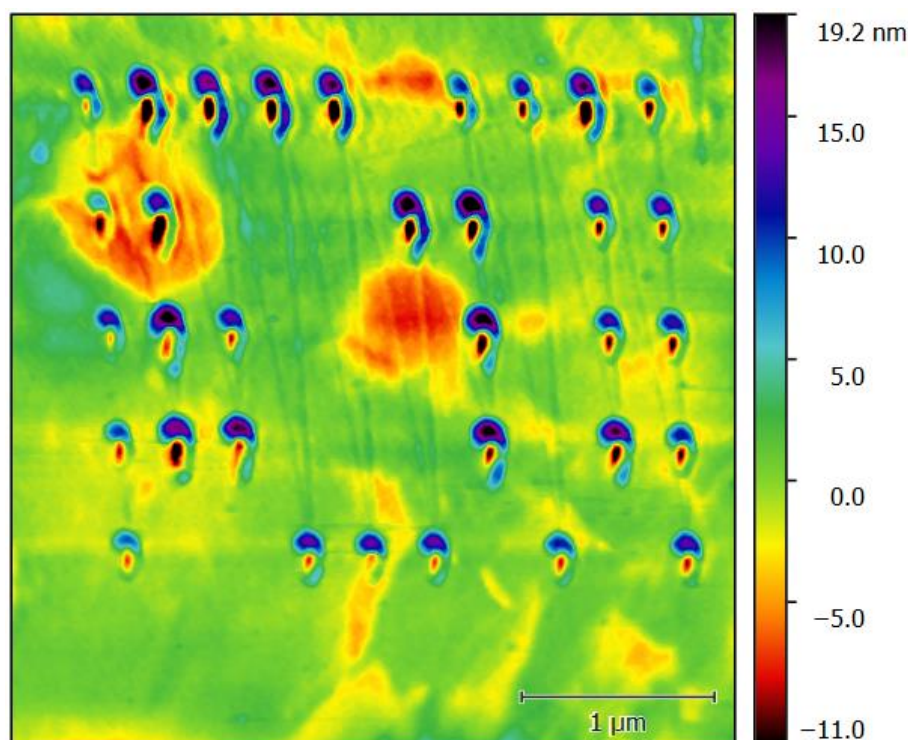
Jak vyplývá z výše uvedeného, velikost kódu je potřeba volit i s ohledem na kvalitu použitého substrátu. V našem případě je další výraznější zmenšování tohoto kódu nevhodné. Bylo by třeba použít kvalitnější hrot a/nebo substrát.

Nejvyšší dosažená informační hustota při experimentech s kódem ve dvojkové soustavě byla $35,4 \text{ Gbit/in}^2$.

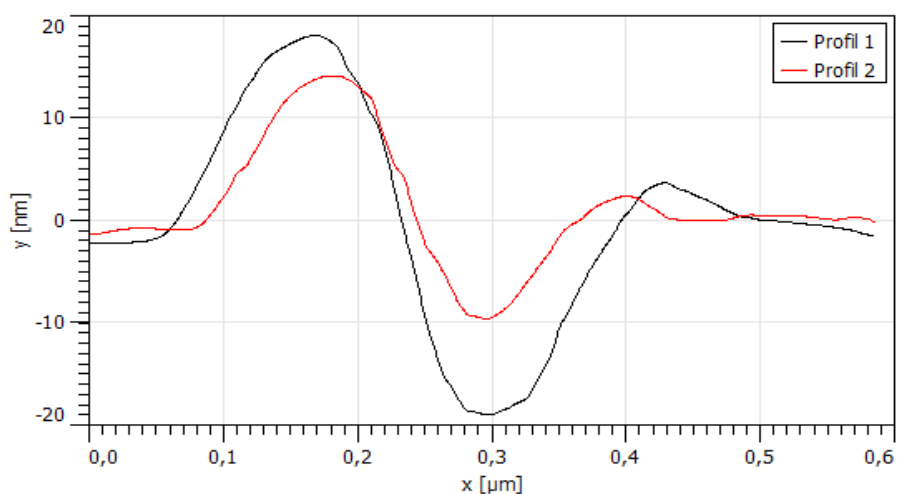
Trojková soustava

V další fázi byla testována možnost vytvoření kódu ve vyšší číselné soustavě. Prázdné místo by označovalo nulu a rýha další číslice dané soustavy, přičemž pro každou číslici soustavy by byla zvolena specifická hloubka či velikost rýhy. Tím by se mimo jiné snížil i počet vytvořených rýh a celý kód by tak měl menší rozměry.

Pro začátek byl kód vytvořen v trojkové soustavě. Ukázka kódu (opět slovo PASSWORD) je na Obr. 52. Prázdné místo představuje nulu, menší rýha jedničku a větší rýha dvojkou. Vertikální profil dvou různých rýh je na Obr. 53.



Obr. 52: Kód – slovo *PASSWORD* v trojkové soustavě, topografická mapa (4 x 4 μm)



Obr. 53: Kód – slovo *PASSWORD* v trojkové soustavě, porovnání vertikálního profilu menší a větší rýhy

Ideální by bylo, kdyby byla hloubka (či výška) rýh reprezentující jednotlivé číslice odstupňována například po pěti nanometrech. To ale v našem případě nebylo vzhledem k povrchovým nerovnostem možné dodržet a musel být zvolen větší rozdíl. I tak je nutné jednotlivé rýhy zkoumat podrobněji a čtení kódu je tím náročnější a zdlouhavější než u dvojkové soustavy. Mohl by být sice nastaven ještě větší rozdíl, což by zjednodušilo čtení, ale mělo by to za následek zvětšení kódu (v našem případě znamená větší hloubka i celkové větší rozměry rýhy).

Informační hustota výše zobrazeného kódu v trojkové soustavě (Obr. 52) je 5,2 Gbit/in². Při dalších experimentech s trojkovou sestavou byla nejvyšší dosažená hustota 17,7 Gbit/in², zatímco u dvojkové soustavy bylo dosaženo hustoty až 35,5 Gbit/in². Ukázalo se, že v našem případě ke zmenšení kódu při využití vyšší číselné soustavy nedojde, a proto nebyl kód dále vytvářen ve vyšších číselných soustavách. Ovšem pokud by to vyžadovala daná aplikace, je to možné.

PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Tato disertační práce na pomezí základního a aplikovaného výzkumu se věnuje možnosti využití AFM nanolitografie pro tvorbu skrytých značek v bezpečnostních aplikacích (např. identifikační značení předmětů). V práci je prezentována série vybraných zkušebních značek včetně dosažené informační hustoty zápisu.

Dané problematice se zatím odborná literatura, dle našeho vědomí, příliš nevěnovala a to byl důvod, proč jsme se rozhodli tomuto tématu začít věnovat. Nemalou zásluhu na výběru tohoto tématu byl také fakt, že vybavení laboratoří Fakulty aplikované informatiky umožnilo experimentálně pracovat v této technicky nejednoduché oblasti, která v současné době se stává významnou oblastí rozvoje věd nejenom základních, ale také technických. V oblasti bezpečnostních věd se publikuje mnoho prací politologických a obecně zaměřených. Naším cílem bylo přispět, byť malým poznáním, k bezpečnosti v reálném životě a konkrétních situacích. Chtěli jsme přispět k rozvoji inženýrsky dobře uchopitelné technologie.

Pro aplikaci jakéhokoliv výsledku základního výzkumu je nutno velmi obezřetně posoudit různé aspekty sledovaného jevu, protože znalost principů je sice nutnou podmínkou pro aplikaci, ale často ne postačující. Praktické použití je velmi často omezováno běžnými podmínkami uživatelského prostředí.

V nanotechnologiích není možné používat obvyklé analogie, které jsou často úspěšně aplikovány v makroskopickém měřítku. V mezoskopické oblasti jeví se stávají dominantními povrchové vlastnosti vytvářených struktur, tvořené mezimolekulárními silami, jejichž studium vyžaduje velmi sofistikovanou měřicí techniku a teoretický přístup reflektující základní rysy kvantové teorie látek. Výsledky uvedené v disertační práci se právě tyto aspekty mezoskopické vědy a technologie pokouší zdůraznit, což lze považovat za vědecký přínos předložené práce.

Pro praxi jsou ovšem důležitá data o chování materiálů, způsobu použití technologických zařízení a možnostech případného zavedení vyvíjených postupů do průmyslové výroby. Tyto otázky jsme měli také na vědomí a věnovali jsme jim část doby, která byla věnována studiu procesu vytváření mezoskopických bezpečnostních značek.

Důležitým přínosem bylo zprovoznění a následné testování nanolitografického rozšíření pro AFM mikroskop Agilent 5420 SPM/AFM ve školní laboratoři.

Bylo ukázáno, že prezentovaný typ nanolitografické techniky je vhodný pro tvorbu mezoskopických bezpečnostních značek a byly ukázány a stanoveny technologické meze použitých postupů rytí (rychlost a směr hrotu, síla přítlaku rycího elementu mikroskopu atomových sil).

V rámci výzkumu byla testována teplotní stabilita mezoskopických struktur z polykarbonátu. Bylo zjištěno, že běžně udávaná maximální operační teplota

120°C není pro mezoskopické struktury vhodná, avšak teplota v běžném prostředí neměla na struktury viditelný vliv.

Byly rovněž určeny odhady hustoty záznamu uměle vytvářené mezoskopické struktury, což má význam pro případné technologie, které by tento typ nanolitografie používaly.

ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá tvorbou a charakterizací bezpečnostních značek, jež by mohly sloužit pro skryté identifikační značení předmětů případně i pro utajený přenos informací (steganografie).

První část práce vysvětluje teoretický základ dané problematiky. Jsou zde popsány základní litografické metody, přičemž důraz je kladen na AFM litografii, která je využita v této publikaci. Za metodami následuje princip samotné mikroskopie atomárních sil (AFM). Její výhodou je použitelnost i pro nevodivé vzorky a možnost modifikace i charakterizace povrchu na jednom systému, přičemž oba procesy mohou následovat bezprostředně po sobě.

Závěr teoretické části je poté věnován polymerům a jejich závislosti na teplotě, poněvadž právě polykarbonátový substrát byl použit jako zkušební materiál při tomto výzkumu.

Tento druh termoplastu je poměrně levný a dostupný, dobře se zpracovává a přitom vyniká vysokou odolností vůči nárazům a povětrnostním vlivům. Mezi jeho vlastnosti patří také dobrá rozměrová stálost, pevnost v tahu a velmi dobrá odolnost proti UV - záření, oxidaci a hydrolýze [30, 31].

V experimentální části jsou uvedeny vybrané pokusy a jejich výsledky. Nejprve byla vytvořena série zkušebních struktur na polykarbonátovém substrátu s cílem zjistit specifika a možnosti daného mikroskopického systému. Postupně byl testován vliv směru, rychlosti a síly rytí na výsledné struktury a byly navrženy vhodné rycí parametry.

Následně byla testována teplotní stabilita vytvořených mezoskopických struktur. Bylo zjištěno, že běžně udávaná maximální operační teplota pro polykarbonát (121°C) **není** pro mezoskopické struktury vhodná, avšak teplota v běžném prostředí nemá na struktury viditelný vliv. **Námi zjištěná maximální teplota pro mezoskopické značky je 90 °C.**

Po těchto pokusech bylo vytvořeno několik příkladů samotných značek:

- a) Symbol složený z trojúhelníku, jeho výšky a kružnice vepsané o poloměru 0,25 μm ,
- b) nápis běžným písmem - zkratka FAI (Fakulta aplikované informatiky) o rozměrech 1,1 x 0,7 μm
- c) slovo „password“ v ASCII kódu. Prezentovaný 56-bitový kód byl vyryt v binární soustavě na ploše o velikosti 1 x 1,2 μm , přičemž binární jednička je reprezentována vyrytou rýhou a binární nula prázdným místem.

Informační hustota vyrobeného kódu je 30,1 Gbit/in². Hustota zápisu je tedy 33 krát vyšší než u běžného CD (0,9 Gbit/in²) a 2,4 krát vyšší než u

disku Blu-ray (12,5 Gbit/in²). Hloubka rýhy ani nahnutého materiálu nepřesahovala hranici 10 nm.

Nejvyšší námi dosažená informační hustota při experimentech s kódem ve dvojkové soustavě byla až 35,4 Gbit/in².

Hlavní výhodou těchto značek je jejich poměrně složitá odhalitelnost, a to i při použití elektronové mikroskopie nebo mikroskopie atomárních sil (velká časová náročnost při jejich vyhledávání), nemluvě o případném pokusu o jejich kopírování nebo modifikaci.

Tato výhoda ale může přinášet i potíže při čtení/hledání dané značky. Proto je nutné volit typ značky a její velikost s ohledem na danou aplikaci. Čím větší značka bude, tím jednodušeji a rychleji se bude hledat, ale současně je více náchylná k odhalení a možnému okopírování či modifikaci.

U menších značek je užitečné znát přesné umístění značky nebo její umístění vhodně označit. Možností je zde celá řada. Značka může být umístěna například uprostřed série čtyřúhelníků, přičemž největší z nich může být viditelný i optickým mikroskopem nebo okem. Může mít také přesně stanovené umístění v rámci většího viditelného symbolu apod. Pokud značka ponese důležitou informaci, nabízí se i možnost tuto informaci zašifrovat.

POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

- [1] CHEN, J., J. SHI, D. DECANINI, E. CAMBRIL, Y. CHEN and A. M. HAGHIRI-GOSNET. Gold nanohole arrays for biochemical sensing fabricated by soft UV nanoimprint lithography. *Microelectron. Eng.*, vol. 86, pp. 632-635, 2009.
- [2] PEASE, R.F. a S. Y. CHOU. Lithography and other patterning techniques for future electronics. *Proc. IEEE*, vol. 96, pp. 248-270, 2008.
- [3] CHOPRA, Jatin. Analysis of Lithography Based Approaches in Development of Semiconductors. *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2014, 61-72. DOI: 10.5121/ijcsit.2014.6604. ISSN 09754660.
- [4] IOVAN, Adrian, Marco FISCHER, Roberto LO CONTE a Vladislav KORENIVSKI. Sub-10 nm colloidal lithography for circuit-integrated spin-photo-electronic devices. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2012, 884-892. DOI: 10.3762/bjnano.3.98. ISSN 2190-4286.
- [5] TRIETSCH, S. J., T. HANKEMEIER a H. J. van der LINDEN. Lab-on-a-chip technologies for massive parallel data generation in the life sciences: A review. *Chemometr. Intell. Lab. Sys.*, doi: 10.1016/j.chemolab.2011.03.005, 2011.
- [6] TANG, Q. a S-Q. SHI,. Preparation of gas sensors via dip-pen nanolithography. *Sens. Actuators B*. vol. 131, pp. 379-383, 2008.
- [7] XIE, X.N., H.J. CHUNG, C.H. SOW a A.T.S. WEE. Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography. *Materials Science and Engineering*. 2006, , 1-48.
- [8] VENUGOPAL, Gunasekaran a Sang-Jae KIM. Nanolithography. *Advances in Micro/Nano Electromechanical Systems and Fabrication Technologies*. InTech, 2013. DOI: 10.5772/55527. ISBN 978-953-51-1085-9.
- [9] PIMPIN, Alongkorn a Werayut SRITURAVANICH. Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications. *Engineering journal*. 2012. ISSN 0125-8281.
- [10] DONG, Jianjie, Juan LIU, Guoguo KANG, Jinghui XIE a Yongtian WANG. Pushing the resolution of photolithography down to 15nm by surface

plasmon interference. *Scientific Reports*. 2014-7-8, DOI: 10.1038/srep05618. ISSN 2045-2322.

[11] LIPOMI, D.J., R.V. MARTINEZ, L. CADEMARTIRI a G.M. WHITESIDES. Soft Lithographic Approaches to Nanofabrication. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier, 2012, , 211. DOI: 10.1016/B978-0-444-53349-4.00180-1. ISBN 9780080878621.

[12] KRAUSS, P.R. a S.Y. CHOU. Sub-10 nm imprint lithography and applications. *1997 55th Annual Device Research Conference Digest*. IEEE, 1997, , 90-91. DOI: 10.1109/DRC.1997.612486. ISBN 0-7803-3911-8.

[13] KHALEEL, Haider, Hussain AL-RIZZO a Ayman ABBOSH. Design, Fabrication, and Testing of Flexible Antennas. *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*. InTech, 2013. DOI: 10.5772/50841. ISBN 978-953-51-1019-4.

[14] MANFRINATO, Vitor R., Lihua ZHANG, Dong SU, Huigao DUAN, Richard G. HOBBS, Eric A. STACH a Karl K. BERGGREN. Resolution Limits of Electron-Beam Lithography toward the Atomic Scale. *Nano Letters*. 2013, , 130321102652000-. DOI: 10.1021/nl304715p. ISSN 1530-6984.

[15] VIEU, C., F. CARCENAC, A. PÉPIN, et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Applied Surface Science*. 2000, 164(1-4), 111-117. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00352-4. ISSN 01694332.

[16] WANZENBOECK, Heinz D. a Simon WAID. Focused Ion Beam Lithography. *Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications*. InTech, 2011. DOI: 10.5772/22075. ISBN 978-953-307-602-7.

[17] LEMESHKO, S.V. a S.A. SAUNIN. Lithography with SPM. *Application notes*. NT-MDT, 8.

[18] GARCIA, Ricardo, Armin W. KNOLL a RIEDO. Advanced scanning probe lithography. *Nature Nanotechnology*. 2014-8-5, 577-587. DOI: 10.1038/nnano.2014.157. ISSN 1748-3387.

[19] DEHZANGI, Arash, Farhad LARKI, Burhanuddin Y. MAJLIS, et al. Atomic force microscope base nanolithography for reproducible micro and nanofabrication. *2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2014)*. IEEE, 2014, 408-411. DOI: 10.1109/SMELEC.2014.6920884

- [20] TOMCZAK, Nikodem a Kuan Eng Johnson GOH. *Scanning probe microscopy*. Hackensack, N.J.: World Scientific Pub. Co., 2011. ISBN 978-981-4324-76-2.
- [21] LYUKSYUTOV, Sergei F., Richard A. VAIA, Pavel B. PARAMONOV, et al. Electrostatic nanolithography in polymers using atomic force microscopy. *Nature Materials*. IEEE, 2014, 2(7), 468-472. DOI: 10.1038/nmat926. ISBN 978-1-4799-5760-6. ISSN 14761122.
- [22] AFM Lithography - Scratching. *NT-MDT* [online]. [cit. 2016-04-5]. Dostupné z: <http://www.ntmdt.com/spm-principles/view/afm-lithography-scratching>
- [23] KULKARNI, Sulabha K. *Nanotechnology: principles and practices*. New York: Springer, 2014. ISBN 978-331-9091-709.
- [24] PINER, R. D., Richard A. VAIA, Pavel B. PARAMONOV, et al. "Dip-Pen" Nanolithography. *Science*. IEEE, 2014, 283(5402), 661-663. DOI: 10.1126/science.283.5402.661. ISBN 978-1-4799-5760-6. ISSN 00368075.
- [25] Dip-Pen Nanolithography. *Mirkin Research Group* [online]. [cit. 2016-04-5]. Dostupné z: <http://mirkin-group.northwestern.edu/dip-pen-nanolithography/>
- [26] GIESSIBL, Franz J. AFM's path to atomic resolution. *Materials Today*. 2005, 32-41. DOI: 10.1016/S1369-7021(05)00844-8. ISSN 13697021.
- [27] *5420 Scanning Probe Microscope: User's Guide*. Revision D. USA: Agilent Technologies, 2012.
- [28] KUBÍNEK, Roman, Milan VŮJTEK a Miroslav MAŠLÁŇ. *Mikroskopie skenující sondou*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2003. ISBN 80-244-0602-0.
- [29] Basic Contact AFM & Dynamic Force Microscope (DFM). *Park systems* [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.parkafm.com/index.php/park-spm-modes/91-standard-imaging-mode/223-basic-contact-afm-dynamic-force-microscope-dfm>
- [30] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné také z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [31] ŠTĚPÁN, Miroslav a Jaroslav HRUBEC. *Hlavní směry aplikací plastických hmot*. Praha: Ústav pro technické a ekonomické informace, 1962.

- [32] VYBÍRAL, Bohumil. *Mechanika pružného tělesa*: Dostupné také z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>
- [33] SEPE, Michael. *Materials: The Problems with Single-Point Data* [online]. 2015 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/columns/materials-the-problems-with-single-point-data>
- [34] Polycarbonate PC. *British Plastic Federation* [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/polycarbonate.aspx>
- [35] Polycarbonate (PC) Typical Properties. *Prospector* [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/generics/25/c/t/polycarbonate-pc-properties-processing>
- [36] Polycarbonate. *International Polymer Solutions* [online]. Irvine, CA 92618 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://www.ipolymer.com/pdf/Polycarbonate.pdf>
- [37] Nečas, D. a P. Klapetek. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis, *Central European Journal of Physics*, vol. 10, No. 1, pp. 181-188, ISBN: 978- 3-527-32743-0, 2012.
- [38] TSENG, Ampere A., Chung-Feng Jeffrey KUO, Shyankay JOU, Shinya NISHIMURA a Jun-ichi SHIRAKASHI. Scratch direction and threshold force in nanoscale scratching using atomic force microscopes. *Applied Surface Science*. 2011, DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.04.065. ISSN 01694332.
- [39] JIANG, Xiaohong, Guoyun WU, Jingfang ZHOU, Shujie WANG, Ampere A TSENG and Zuliang DU. Nanopatterning on silicon surface using atomic force microscopy with diamond-like carbon (DLC)-coated Si probe. *Nanoscale Research Letters*. 2011, DOI: 10.1186/1556-276X-6-518. ISSN 1556-276x.
- [40] Set-point - contact mode. *Australian Microscopy & Microanalysis Research Facility* [online]. 2014 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://www.ammrf.org.au/myscope/spm/practice/scanning/setpoint>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip fotolitografie [13]	9
Obr. 2: Struktury vytvořené na titanové vrstvě pomocí lokální anodové oxidace [17].....	11
Obr. 3: Struktury vytvořené na polykarbonátu pomocí silové AFM litografie [17].....	12
Obr. 4: Princip mikroskopie atomárních sil [27].....	13
Obr. 5: Graf závislosti síly na vzdálenosti hrotu od povrchu [29]	14
Obr. 6: Základní rozdělení polymerů [30]	15
Obr. 7: Charakteristická závislost modulu pružnosti (E_t) a celkové tažnosti (ϵ_b), na teplotě [30].....	16
Obr. 8: Teplotní závislost modulu pružnosti pro polykarbonát [33].....	16
Obr. 9: Rýhy vytvořené různými rychlostmi, topografická mapa (4 x 4 μm)	19
Obr. 10: Rýhy vytvořené různými rychlostmi, horizontální profily středních částí rýh.....	20
Obr. 11: Kruhy vytvořené různými rychlostmi, topografická mapa (4 x 4 μm).	20
Obr. 12: Detail rýhy, 3D topografická mapa (1,3 x 1,9 μm)	21
Obr. 13: Základní pohyby sondy [38]	22
Obr. 14: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, topografická mapa (4 x 3 μm)	22
Obr. 15: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, horizontální profily počátků rýh..	23
Obr. 16: Rýhy vyryté směrem vpřed a vzad, horizontální profily středních částí rýh.....	23
Obr. 17: Rýhy vyryté do stran, topografická mapa (4 x 3 μm)	24
Obr. 18: Had, topografická mapa (4 x 4 μm)	25
Obr. 19: Rýhy vyryté různou silou, topografická mapa (4 x 4 μm)	26
Obr. 20: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil počáteční části rýh	27
Obr. 21: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil střední části rýh	27
Obr. 22: Rýhy vyryté různou silou, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)	28
Obr. 23: Rýhy vyryté různou silou, topografická mapa (4 x 4 μm)	29
Obr. 24: Rýhy vyryté různou silou, horizontální profil střední části rýh	29
Obr. 25: Referenční rýha, 2D a 3D topografická mapa (vpravo).....	30
Obr. 26: Horizontální profily referenční rýhy	31
Obr. 27: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 100 °C po dobu 15 minut	31
Obr. 28: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 110 °C po dobu 15 minut	32
Obr. 29: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 120 °C po dobu 15 minut	32
Obr. 30: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 130 °C po dobu 15 minut	33
Obr. 31: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 140 °C po dobu 15 minut	33
Obr. 32: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu 15 minut.	34
Obr. 33: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 100 °C po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).	35

Obr. 34: Horizontální profily rýhy vystavené teplotě 120 °C po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).	36
Obr. 35: Umístění značky v sérii čtyřúhelníků	38
Obr. 36: Symbol – trojúhelník, topografická mapa (4 x 4 μm)	38
Obr. 37: Symbol - trojúhelník, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)	39
Obr. 38: Symbol – trojúhelník (zmenšený), topografická mapa (2 x 2 μm)	39
Obr. 39: Nápis FAI, topografická mapa (4 x 4 μm)	40
Obr. 40: Nápis FAI, 3D topografická mapa (4 x 4 μm)	41
Obr. 41: Nápis FAI (zmenšený), topografická mapa (3 x 3 μm)	41
Obr. 42: Kód – slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, topografická mapa (3,2 x 3,2 μm).....	43
Obr. 43: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa (3,2 x 3,2 μm).....	43
Obr. 44: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa (3,2 x 3,2 μm), pohled ze strany	44
Obr. 45: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, 3D topografická mapa (3,2 x 3,2 μm), pohled zezadu	44
Obr. 46: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, topografická mapa (3,2 x 3,2 μm), pohled zespodu	44
Obr. 47: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, vertikální profil prvního sloupce	45
Obr. 48: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, horizontální profil prvního řádku.....	45
Obr. 49: Kód - slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě, horizontální profil prvního řádku (v místě největší hloubky)	45
Obr. 50: Kód – slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě (zmenšená verze), topografická mapa (3,2 x 3,2 μm).....	46
Obr. 51: Kód – slovo PASSWORD ve dvojkové soustavě (zmenšená verze), 3D topografická mapa (3,2 x 3,2 μm).....	47
Obr. 52: Kód – slovo PASSWORD v trojkové soustavě, topografická mapa (4 x 4 μm).....	48
Obr. 53: Kód – slovo PASSWORD v trojkové soustavě, porovnání vertikálního profilu menší a větší rýhy	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání litografických metod [9].	10
Tabulka 2: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu 15 minut.	34
Tabulka 3: Porovnání rozměrů rýh vystavených různým teplotám po dobu dalších 60 minut (celkem 15 + 60 minut).....	36
Tabulka 4: Slovo „PASSWORD" v ASCII kódu.	42

..

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFM	Atomic Force Microscopy (mikroskopie atomárních sil)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (americký standardní kód pro výměnu informací)
E_t	Modul pružnosti
ε_b	Tažnost
in	Inch (palec)
LAO	Local Anodix Oxidation (lokální anodická oxidace)
PC	Polycarbonate (Polykarbonát)
SPM	Scanning Probe Microscopy (mikroskopie skenující sondou)
T_f	Teplota viskózního toku
T_g	Teplota skelného přechodu
UV	Ultraviolet (ultrafialové)

..

PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

NAVRÁTIL, Milan, Vojtěch KŘESÁLEK, Josef KUDĚLKA and Tomáš MARTÍNEK. ÚSTAV ELEKTRONIKY A MĚŘENÍ, Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Jemná mechanika a optika: Zobrazení polovodičových struktur metodou mikrovlnné skenovací mikroskopie. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2014, ročník 59, č. 1. ISSN 0447-6441.

NAVRÁTIL, Milan, Vojtěch KŘESÁLEK, František HRUŠKA, Tomáš MARTÍNEK, Josef KUDĚLKA and Jaroslav SOBOTA. Scanning probe microscopy method for diagnostics of ultra-thin tungsten films on silicon substrate. In: 18th International Conference. Santorini Island, Greece, July 17-21, 2014, s. 338-343. ISBN 978-1-61804-243-9.

NAVRÁTIL, Milan, Vojtěch KŘESÁLEK, Josef KUDĚLKA and Tomáš MARTÍNEK. Mikrovlnná skenovací mikroskopie. In: Perspektivy elektroniky 2014. Rožnov pod Radhoštěm: SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610, 756 61, 2014, s. 59-68. ISBN 978-80-260-5776-5.

KUDĚLKA, Josef, Vojtěch KŘESÁLEK, Tomáš MARTÍNEK and Milan NAVRÁTIL. ÚSTAV ELEKTRONIKY A MĚŘENÍ, Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Jemná mechanika a optika: Zobrazení magnetického záznamu v IT pomocí mikroskopie magnetických sil. Praha: Fyzikální ústav akademie věd ČR, 2014, ročník 59, č. 10. ISSN 0447-6441

NAVRÁTIL, Milan, Vojtěch KŘESÁLEK, František HRUŠKA, Tomáš MARTÍNEK, Josef KUDĚLKA and Jaroslav SOBOTA. International Journal of Materials: Diagnostics of ultra-thin tungsten films on silicon substrate using atomic force microscopy. NAUN, 2014. ISSN 2313-0555

MARTÍNEK, Tomáš, Josef KUDĚLKA, Milan NAVRÁTIL, Vojtěch KŘESÁLEK, Antonín FEJFAR, Matěj HÝVL and Jaroslav SOBOTA. Nanoscale Characterization of Ultra-thin Tungsten Films Deposited by Radio-Frequency Magnetron Sputtering. In: 15th IEEE International Conference on Nanotechnology, IEEE-NANO 2015. Rome, Italy, July 27-23, ISBN 978-1-4673-8156-7.

MARTÍNEK, Tomáš, Josef KUDĚLKA, Milan NAVRÁTIL, Vojtěch KŘESÁLEK a Eva JOHANIDESOVÁ. XVII. Annual Linz Winter Workshop. Measuring Dopant Density of Silicon Wafer with Multiple P-N Junction Using Scanning Microwave Microscopy. 2015. Linz

MARTÍNEK, Tomáš, Josef KUDĚLKA, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. Characterization of epitaxial layers using scanning microwave microscopy. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, Zadar, Croatia, 21-24th October 2015, Published by DAAAM International, Vienna, ISBN 978-3-902734-06-8, 2015.

KUDĚLKA, Josef, Tomáš MARTÍNEK, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. Mapping differences in surface elasticity using force modulation microscopy. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, Zadar, Croatia, 21-24th October 2015, Published by DAAAM International, Vienna, ISBN 978-3-902734-06-8, 2015.

NAVRÁTIL, Milan, Tomáš MARTÍNEK, Josef KUDELKA and Vojtěch KŘESÁLEK. Design of scanning system for mechanoscopic analysis. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, Zadar, Croatia, 21-24th October 2015, Published by DAAAM International, Vienna, ISBN 978-3-902734-06-8, 2015.

MARTINEK, Tomas, Josef KUDELKA, Milan NAVRATIL, Tomas FORT and Vojtech KRESALEK. Characterization of ultra-thin tungsten layers. *International Journal of Applied Engineering Research*, ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 11, pp. 7523-7525. 2016

KUDĚLKA, Josef, Tomáš MARTÍNEK, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. Quality control in microelectronics using scanning microwave microscopy. In: *21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON 2016)*, 9-11 May 2016, Krakow (Poland), Electronic ISBN 978-1-5090-2214-4, ISBN 978-1-5090-2215-1, 2016

KUDĚLKA, Josef, Tomáš MARTÍNEK, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. The effect of tip speed in AFM scratching. In: *International Conference on Information and Digital Technology (IDT 2016)*, 5-7 July 2016, Rzeszów (Poland), ISBN 978-1-4673-8860-3, 2016

KUDĚLKA, Josef, Tomáš MARTÍNEK, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. Nano-steganography using atomic force microscopy. In: *16th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2016)*, pp. 157-159, 22-25 August 2016, Sendai (Japan), ISBN 978-1-5090-3914-2, 2016

KUDĚLKA, Josef, Tomáš MARTÍNEK, Milan NAVRÁTIL and Vojtěch KŘESÁLEK. The effect of scratching direction in AFM nanolithography. In: *7th International Conference on Information Science and Technology (ICIST 2017)*, 16-19 April 2017, Da Nang (Vietnam), ISBN 978-1-5090-5402-2,2017

PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

PERSONAL INFORMATION **Josef Kudělka**

📍 Stiborova 16, 77900 Olomouc (Czech Republic)

☎ +420731813453

✉ josefkudelka@centrum.cz

WORK EXPERIENCE

11/2017–Present **Business intelligence developer**
KBC, Brno (Czech Republic)
SAS, MS Access, SQL, VBA.

01/2014–09/2017 **Research assistant**
Regional Research Centre CEBlA-Tech, Zlín (Czech Republic)
Research focused on security and nanofabrication using atomic force microscopy.

EDUCATION AND TRAINING

2013–Present **Doctoral degree (Ph.D.)**
Tomas Bata University in Zlín, Faculty of Applied Informatics, Department of Electronics and Measurements, Zlín (Czech Republic)
Doctoral dissertation: Fabrication of security features using atomic force microscopy.

2011–2013 **Master's degree (Ing.), passed with honours**
Tomas Bata University in Zlín, Faculty of Applied Informatics, Zlín (Czech Republic)
Study program: Engineering informatics. Branch: Security technologies, systems and management.
Diploma thesis: Projection of semiconductor structures using atomic force microscopy.

2008–2011 **Bachelor degree (Bc.), passed with honours**
Tomas Bata University in Zlín, Faculty of Applied Informatics, Zlín (Czech Republic)
Study program: Engineering Informatics. Branch: Security technologies, systems and management.
Bachelor thesis: Metrological problems in micron and submicron distances.

2004–2008 **Graduation**
Secondary School of Electrical Engineering (SPŠE), Olomouc (Czech Republic)

PERSONAL SKILLS

Mother tongue(s) **Czech**

Other language(s)	UNDERSTANDING		SPEAKING		WRITING
	Listening	Reading	Spoken interaction	Spoken production	
English	C1	C1	C1	B2	C1
Russian	B1	B1	B1	B1	A2
German	A2	B1	A2	A2	A2
Polish	B2	B2	B1	B1	A2

Levels: A1 and A2: Basic user - B1 and B2: Independent user - C1 and C2: Proficient user
Common European Framework of Reference for Languages

Josef Kudělka

**Tvorba bezpečnostních značek pomocí mikroskopie atomárních
sil**

Fabrication of security features using atomic force microscopy

Disertační práce

Sazba: Josef Kudělka

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

2020