VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

VLIV ELEKTRONOVÉHO SVAZKU NA TENKÉ VRSTVY OXIDŮ

AN INFLUENCE OF ELECTRON BEAM ON THIN OXIDE FILMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE MICHAL KOSTYÁL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JAN ČECHAL, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá skúmaním vplyvu elektrónového lúča rastrovacieho elektrónového mikroskopu na povrch vzorky SiO_2/Si(100). V práci je stručne popísaná elektrónová mikroskopia a mikroskopia atomárnych síl. Hlavným riešeným problémom je pozorovaná zmena odtieňu pri pozorovaní vzorky SiO_2/Si(100) rastrovacím elektrónovým mikroskopom. V práci je zistené, že na povrchu vzorky sa vytvárajú objekty o výške niekoľko nm. Zvyšok práce je potom venovaný meraniu závislosti výšky objektu na rôznych premenných. Merania sú väčšinou založené na selektívnom ožarovaní povrchu vzorky rastrovacím elektrónovým mikroskopom, meraní ožiarených častí pomocou mikroskopu atomárnych síl a vyhodnocovaní v aplikácie Gwyddion.

Kľúčové slová

elektrónový mikroskop, mikroskop atomárnych síl, kontaminácia vzorky, Gwyddion

Summary

This bachelor work deals with a study of the influence of electron beam of scanning electron microscope on the surface of the SiO_2/Si (100) – sample. In the work the electron and atomic force microscopy briefly described. The main objective of experimental part is to describe variation in the brightness of sample SiO_2/Si (100) in Scanning electron microscope images. In this study is found that on the sample surface are created objects few nm high.
The rest of the work is then devoted to measuring the dependence of the object's high on different variables. Experiments are generally based on the selective irradiation of the sample surface by scanning electron microscope, measurement of irradiated parts using atomic force microscope and evaluation in the application Gwyddion.

Key words

Electron microscope, Atomic force microscope, contamination of the sample, Gwyddion

Bibliografická citácia:

KOSTYAL, M. Vliv elektronového svazku na tenké vrstvy oxidů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Čechal, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu *Vplyv elektronového svazku na tenké vrstvy oxidů* vypracoval samostatne pod vedením Ing. Jana Čechala Ph.D. a Ing. Zuzany Bortlovej a uviedol v zozname literatúry všetky použité literárne a odborné zdroje.

V Brne dňa 30. mája 2010

vlastnoručný podpis autora

Poďakovanie

Ďakujem predovšetkým Ing. Zuzane Bortlovej a Ing. Janovi Čechalovi Ph.D za odborné vedenie bakalárskej práce a cenné rady a pripomienky. Rovnako by som rád poďakoval Ústavu fyzikálneho inžinierstva za veľmi príjemné pracovné prostredie.

Michal Kostyál

Obsah

Úvod....6
TEORETICKÁ ČASŤ....7
1.Elektrónová mikroskopia....7
1.1. Rozlišovacia schopnosť....7
1.2. Elektrón....8
1.2.1. Pohyb elektrónov v homogénnom elektrickom poli....8
1.2.2. Pohyb elektrónov v homogénnom magnetickom poli....8
1.2.3. Vlnové vlastnosti elektrónu....8
1.3. Elektrónový mikroskop....9
1.3.1. Interakcia elektrónu so vzorkou....9
1.3.2. Konfigurácia elektrónového mikroskopu....10
1.3.3. Detektory a vznik obrazu....12
1.3.4. Vákuový systém....13
1.3.5. Elektrónová litografia....13
2. Rastrovacia sondová mikroskopia (SPM)....14
2.1. princíp činnosti SPM....14
2.2. Mikroskop atomárnych síl (AFM)....15
2.2.1. Interakcia hrotu so vzorkom....15
2.2.2. Princíp detegovania....16
2.2.3. Módy skenovania....17
PRAKTICKÁ ČASŤ....18
3. Ožarovanie vzorky kremíku elektrónovým lúčom....18
3.1. Vymedzenie problému....18
3.2. Pozorovanie zmeny odtieňu....18
3.2.1. Metodológia ožarovania vzorky....19
3.2.2. Výsledky meraní a ich vyhodnocovanie....19
3.3. Meranie ožiarených miest pomocou mikroskopu atomárnych síl....21
3.3.1. Závislosť výšky ožiarených miest na veľkosti prúdu, veľkosti elektrónovej dávky a veľkosti prekryvu, veľkosti napätia a voľbe substrátu....22
3.3.2. Zhrnutie výsledkov meraní....28
Záver....30
Použitá literatúra:....31
Zoznam použitých skratiek,....32
Zoznam definovaných veličín....32
Obsah príloh....33

Obrázky

Obrázok 1: Rozlíšenie dvoch svetelných bodov..... 6
Obrázok 2: Interakcia elektrónového lúča so vzorkou..... 8
Obrázok 3: Lom elektrónového lúča 10
Obrázok 4: Závislosť emisie sekundárnych elektrónov na topografii..... 11
Obrázok 5: Závislosť detekcie emitovaného signálu na relatívnej polohe detektoru..... 12
Obrázok 6: Elektrónová litografia..... 12
Obrázok 7: Valcový piezoelement..... 13
Obrázok 8: Ovládanie hrotu pomocou piezoelementov 14
Obrázok 9: Lennard-Jonesov potenciál..... 15
Obrázok 10: Princíp detegovania laserovým lúčom..... 15
Obrázok 11: Princíp činnosti fotodetektoru..... 15
Obrázok 12: Spracovanie obrazu..... 16
Obrázok 13: Zmena odtieňu pozorovaných miest vzorky..... 17
Obrázok 14: Zmena odtieňa ožarovaných oblastí..... 18
Obrázok 15: Kontaminácia vzorky bez reakcie a s reakciou s atómami vzorky..... 19
Obrázok 16: Pozorovanie vzorky mikroskopom atomárnych síl..... 20
Obrázok 17: Príklad obrazu deponovaných objektov na mikroskope AFM (a) a ich vyhodnocovanie (b)..... 21

Tabuľky

Tabuľka 1: Parametre ožarovania vzorky pri pozorovaní zmeny odtieňa..... 18
Tabuľka 2: Zhrnutie výsledkov meraní..... 29

Grafy

Graf 1: Závislosť kontrastu na veľkosti dávky..... 20
Graf 2: Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky..... 23
Graf 3: Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti prúdu..... 24
Graf 4: Rast okrajov deponovaného objektu pri zvyšujúcej sa dávke..... 25
Graf 5: Rast okrajov deponovaného objektu pri zvyšujúcom sa prúde..... 25
Graf 6: Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky pre rôzne urýchľovacie napätie..... 26
Graf 7: Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky pri rôznej voľbe substrátu..... 27
Graf 8: Závislosť rastu okrajov deponovaného objektu na veľkosti dávky pre rôzne urýchľovacie napätie..... 27
Graf 9: Závislosť rastu okrajov deponovaného objektu na veľkosti dávky pri rôznej voľbe substrátu 28

Úvod

Keďže ľudské oko, s hranicou rozlíšenia približne 0,075 mm, predstavuje nedokonalý optický prístroj, pri zobrazovanie malých objektov je nutné využiť optických prístrojov posúvajúcich túto hranicu.

Asi najjednoduchšou pomôckou je šošovka, pomocou ktorej je možné dosiahnuť približne 20 násobné zväčšenie. Vhodnou kombináciou šošoviek (svetelný mikroskop) možno dosiahnuť celkové zväčšenie až približne 1650 násobné.

Limitujúcim faktorom pre ďalšie zväčšenie je difrakcia, ktorá nás núti zmenšiť vlnovú dĺžku pozorovacieho žiarenia. Pre pozorovanie tak môžeme využiť elektróny napr. v rastrovacom elektrónovom mikroskope (SEM), prípadne (pre dosiahnutie ešte lepšieho rozlíšenia) použiť technológiu pracujúcu na celkom odlišnom princípe, napr. mikroskop atomárnych síl (AFM).

Nástroje ako rastrovací elektrónový mikroskop či mikroskop atomárnych síl využívané na analýzu povrchu je rovnako možno využiť i na cielené ovplyvňovanie povrchu pozorovanej vzorky. Sú to nástroje vhodné pre litografiu, je možné s nimi vytvárať objekty s rozmermi od niekoľko mikrometrov až do desiatok nanometrov. Vďaka týmto prednostiam sú nepostrádateľné pre vedný odbor zvaný nanotechnológie.

V práci je v krátkosti popísaná rastrovacia elektrónová mikroskopia a to ako podnety k jej zavedeniu tak jednotlivé časti elektrónového mikroskopu. Rovnako bude popísaná i mikroskopia atomárnych síl (AFM), ktorá ako sa ukáže je veľmi vhodnou pre pozorovania uskutočnené v experimentálnej časti práce.

V úvodnej kapitole o elektrónovej mikroskopii sú popísané dôvody, pre ktoré je vhodné využiť elektrón pre pozorovanie objektov. V stručnosti je popisané obmedzenie rozlišovacej schopnosti svetelnej optiky Rayleighovým kritériom a popis elektrónu. Tento je zakončený konštatovaním, že elektrónu je možno priradiť vlnovú dĺžku, ktorej veľkosť je nepriamo úmerná rýchlosti. Hlavná časť kapitoly je potom venovaná popisu činnosti elektrónového mikroskopu a jeho jednotlivých častí. Na záver kapitoly je krátky popis elektrónovej litografii ako možnej funkcie elektrónového mikroskopu.

Keďže bol v praktickej časti využitý i mikroskop atomárnych síl, druhá kapitola je venovaná princípu, na ktorom toto zariadenie pracuje a tiež príbuzným technikám.

Rovnako ako pri popise elektrónového mikroskopu nebola snaha o podanie vyčerpávajúceho popisu činnosti zariadenia, ale iba o získanie základných informácií o zariadenia.

Hlavným riešeným problémom práce je pozorovaná zmena odtieňu (zmena sekundárnej emisie) pri pozorovaní vzorky SiO_2/Si(100) rastrovacím elektrónovým mikroskopom. Cieľom je zistiť, či ide o jav prechodný, alebo trvalý, prípadne bližšie popísať jeho správanie vzhľadom ku zmenu premenných (urýchľovacie napätie elektrónového lúča, prúd elektrónového lúča...). Tomuto je venovaná tretia kapitola s názvom praktická časť, ktorá popisuje priebeh experimentov. V závere sú potom zhrnuté získané výsledky.

TEORETICKÁ ČASŤ

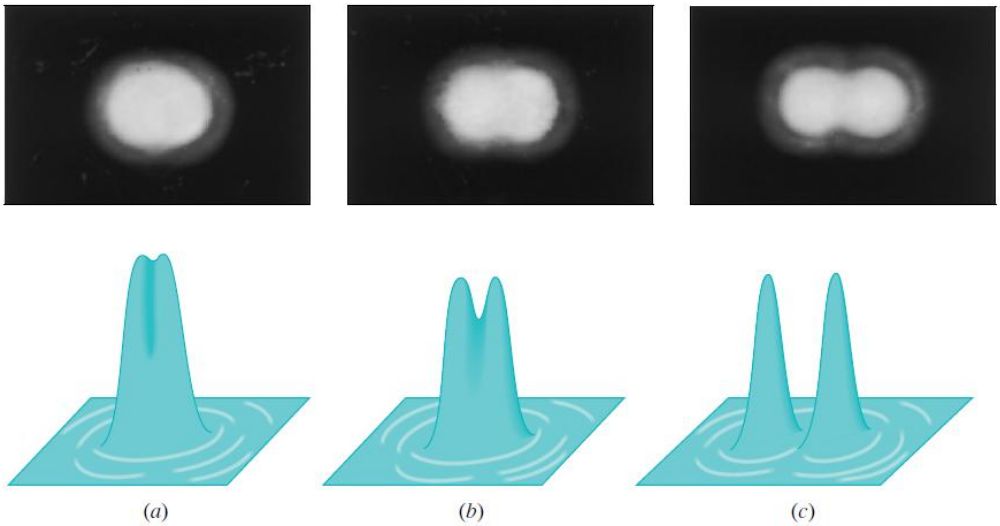
1.Elektrónová mikroskopia

„Moderný elektrónový mikroskop je relatívne jednoduchý nástroj, pomocou ktorého možno i s minimom nutného tréningu získať vysoko kvalitný obraz povrchu vzorky.“

C.W.Oatley [5]

1.1. Rozlišovacia schopnosť

Hranicou rozlíšenia nazývame najmenšiu vzdialenosť dvoch bodov, ktoré môžeme pozorovať ešte ako oddelené. *Rozlišovacia schopnosť* je jej prevrátená hodnota. Rozlišovacia schopnosť optickej sústavy je obmedzená predovšetkým difrakciou [4].
Obrazy vytvorené šošovkou sú difrakčnými obrazcami. Svetelný bod sa zobrazí ako svetelný krúžok so svetelným prstencom s klesajúcou intenzitou (Airiho disk).
Na to aby bolo možné vidieť dva body oddelené, je nutné aby im zodpovedajúce Airiho disky boli vzdialené aspoň o určitú minimálnu vzdialenosť *s* (a jej zodpovedajúcu uhlová vzdialenosť θ_R). Minimálna vzdialenosť nastáva v prípade, že centrálne maximum difrakčného obrazca jedného zdroja je v mieste prvého minima difrakčného obrazca druhého zdroja (obr.1b) [7].



Obrázok 1 Rozlíšenie dvoch svetelných bodov
Minimálna rozlíšiteľná vzdialenosť dvoch bodov (b), pri vzdialenosti menšej dva body ďalej nie je možné rozlíšiť (a) [7].

Pri vzdialenosti Airiho diskov menšej ako *s* bude rozdiel intenzity jasu natoľko malá, že body ďalej nie je možné rozlíšiť ako oddelené (obr. 1a).
Minimálna uhlová vzdialenosť je daná Rayleighovým kritériom [7]

$$\theta_R = 1{,}22\ \frac{\lambda}{d}, \qquad \text{(R.1)}$$

kde λ je vlnová dĺžka zdroja žiarenia, je θ_R uhlová vzdialenosť, a d je priemer apertúry.
K zlepšeniu rozlišovacej schopnosti optických prístrojov (zníženiu minimálnej uhlovej vzdialenosti) preto vedie zmenšenie vlnovej dĺžky žiarenia.
Zaujímavým riešením je využitie urýchleného lúča elektrónov.

1.2. Elektrón

Elektrón je elementárna častica so záporným nábojom rovným $-1{,}6022 \times 10^{-19}$ C a hmotnosťou $9{,}1093826 \times 10^{-31}$ kg.

1.2.1. Pohyb elektrónov v homogénnom elektrickom poli

Na elektrón v elektrickom poli s napätím *U* je konaná práca o veľkosti *U.e*, v dôsledku ktorej sa zmení kinetická energia elektrónu takto [4]

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = e.U, \qquad \text{(R.2)}$$

kde *e* je náboj elektrónu, *m* je hmotnosť elektrónu, v_0 (v) je počiatočná (konečná) rýchlosť a *U* je rozdiel potenciálov medzi počiatočným a koncovým bodom dráhy elektrónu.
Znamená to, že elektrón s nulovou počiatočnou rýchlosťou získa urýchlením potenciálu rýchlosť o veľkosti [4]

$$v = \sqrt{\frac{2.e.U}{m}}. \qquad \text{(R.3)}$$

Ak sa elektrón pohybuje kolmo ku siločiaram elektrického poľa (v smere osy *x*), trajektória jeho pohybu je parabola daná vzťahom [4]

$$x = \frac{e.E}{2mv_0^2}\, y^2, \qquad \text{(R.4)}$$

kde *E* je intenzita elektrického poľa, *x,y* sú súradnice elektrónu.
Elektróny vyletujúce z bodového zdroja (náhodným smerom) sú teda po prejdení rozdielu potenciálov uzavreté v kuželi s vrcholovým uhlom α [4]

$$\alpha = \mathrm{arctg}\sqrt{\frac{\varepsilon}{U}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon}{U}}, \qquad \text{(R.5)}$$

kde ε je rýchlosť zodpovedajúca počiatočnému urýchľovaciemu napätiu (vo Voltoch), *U* je urýchľovacie napätie a α je vrcholový uhol kužeľa.

1.2.2. Pohyb elektrónov v homogénnom magnetickom poli

Na pohybujúci sa elektrón v magnetickom poli (v dostatočnej vzdialenosti od pólov magnetu) pôsobí sila [4]

$$\vec{F} = e(\vec{v}_0 \times \vec{B}), \qquad \text{(R.6)}$$

kde $\vec{v}_0$ je počiatočná rýchlosť elektrónov, $\vec{B}$ je magnetická indukcia, *e* je náboj elektrónov.
<u>V zásade môžu nastať tri prípady</u> [4]

a) elektrón, ktorý je v pokoji, respektíve sa pohybuje v smere (proti smer) magnetických siločiar (φ = 0°; 180°) nie je magnetickým poľom ovplyvnený.

b) elektrón pohybujúci sa kolmo k siločiaram (φ = 90°, 270°) začne opisovať pôsobením magnetickej sily kružnicu s polomerom [4]

$$r = \frac{mv_0}{Be}. \qquad \text{(R.7)}$$

c) Pre iný smer počiatočnej rýchlosti elektrónu sa jeho trajektória zmení na skrutkovicu s osou rovnobežnou so siločiarami.

1.2.3. Vlnové vlastnosti elektrónu

Elektrónu možno, ako to experimentálne potvrdili Davisson a Germer, priradiť vlnovú dĺžku [6]

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \qquad \text{(R.8)}$$

Zväzok urýchlených elektrónov je preto analogický žiareniu s jasne definovanou vlnovou dĺžkou danou (R.8).

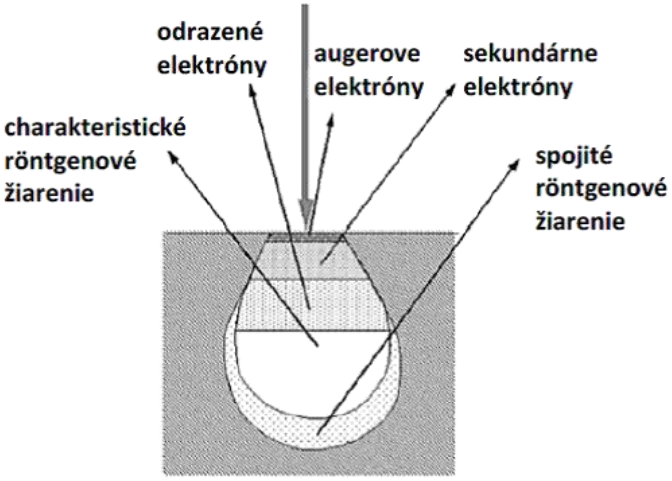
1.3. Elektrónový mikroskop

Zväčšovaním rýchlosti lúča elektrónov možno zmenšovať jeho vlnovú dĺžku (R.8). Pri využití elektrónového lúča na pozorovanie (v elektrónovom mikroskope) tak možno optimalizovať i jeho hranicu rozlíšenia (R.1).
V kapitole bude v krátkosti popísané zobrazovanie pomocou elektrónového mikroskopu a jeho jednotlivé časti.

Typy elektrónových mikroskopov [4]
Podľa spôsobu pozorovanie predmetu možno mikroskopy rozdeliť na:
a) transmisné – zobrazenie štruktúry predmetu pomocou prešlých elektrónov
b) rastrovacie – tenký lúč elektrónov postupne ožaruje predmet, tento emituje sekundárne elektróny, ktoré možno detegovať
Ďalší výklad sa budem venovať iba rastrovaciemu mikroskopu (SEM), ktorý bol v práci využitý.

1.3.1. Interakcia elektrónu so vzorkou

Interakcia elektrónu s povrchom vzorku možno vo všeobecnosti rozdeliť na elastickú a ne-elastickú [1].
Elastická kolízia je charakteristická iba minimálnou stratou energie elektrónu interagujúceho s povrchovými vrstvami vzorky. Elektrón (z elektrónového lúča) pri nej interaguje s jadrom povrchového atómu, či elektrónom v jeho obale, pričom je odrazený do rozličných smerov.
Tieto elektróny nazývame spätne odrazené elektróny (BSE).
Pri *neelastickej kolízii* odovzdáva elektrón povrchu vzorky časť svojej energie. V dôsledku toho sú z povrchu vzorky emitované sekundárne elektróny, veľmi významné pri tvorbe obrazu topografie. V dôsledku oboch spomenutých kolízií sa z povrchu vzorku uvoľňujú i ďalšie žiarenia (charakteristické röntgenové žiarenie, spojité röntgenové žiarenie) ako i Augerove elektróny [1].



obrázok 2 Interakcia elektrónového lúča so vzorkou
Pri dopade elektrónového lúča na vzorku sa emitujú sekundárne, augerove elektróny a röntgenové žiarenie [1].

Uvedené deje sú z veľkej miery determinové veľkosťou a tvarom tzv. primárnej excitačnej zóny (PEZ), čiže objemu do ktorého preniká elektrónové žiarenie (obr. 2). PEZ je daná energiou elektrónového žiarenia ako i atomárnym číslom atómov povrchu [1].

Sekundárne elektróny (SE)
Pri interakcii povrchových atómov vzorky s elektrónovým lúčom sú atómy ionizované emitovaním slabo viazaných elektrónov, ktoré označujeme sekundárne elektróny. Obyčajne majú pomerne malú energiu (priemerne 3 – 5 eV) a sú nasávané do Everhart-Thornleyho (E-T) detektoru s rozdielom napätí 200 V (viď 1.3.3.).
Sekundárne elektróny sú využívané hlavne na zobrazenie topografie povrchu. Kvalita získaného obrazu je daná množstvom detegovaných (sekundárnych) elektrónov, pričom je možné dosiahnuť rozlíšenie až 10 nm [1].

Spätne odrazené elektróny (BSE)
Pri elastickej interakcii primárnych elektrónov (elektrónového lúča) s povrchom vzorku strácajú tieto elektróny približne 20 – 40 % svojej energie a sú rozptýlené rôznymi smermi, pričom približne 10 – 50% z nich je odrazených pod uhlom väčším ako 90°. Tieto môžu byť detegované detektorom spätne odrazených elektrónov [1].
Množstvo odrazených BSE je úmerné atomárnemu číslu atómov povrchu, čo umožňuje jeho využitie na získanie obrazu kontrastu medzi oblasťami s rôznym chemickým zložením.

1.3.2. Konfigurácia elektrónového mikroskopu

Zdrojom elektrónov je elektrónová tryska, z nej sú elektróny urýchlené (rozdielom potenciálov) na energiu 0,1 – 30 keV. Pre zobrazovanie elektrónovým mikroskopom je nutné lúč z elektrónovej trysky (s polomerom ≈ 50 μm) zfokusovať (na polomer 50 nm). Na toto sa využíva systém elektrických a magnetických šošoviek. Po interakcii žiarenia so vzorkom sú sekundárne, odrazené elektróny, či röntgenové žiarenia, zachytávané v detektore a signál je vyhodnocovaný v počítači [1].
Cele zariadenie sa nachádza, z dôvodu zamedzenia ovplyvňovania elektrónov nečistotami, vo vysokom vákuu [1].

Elektrónová tryska
Pre dosiahnutie správnych zobrazovacích schopností je nutný zdroj stabilného žiarenia elektrónov s vhodnými vlastnosťami (veľký prúd, malá disperzia energie elektrónov, malá veľkosť zdroja).
Najpoužívanejším zdrojom elektrónov je volfrámová elektrónová tryska. Obyčajne je zložená z troch častí: volfrámové vlákno (katóda), Wehneltov valec a anóda. Katóda je zahrievaná privedeným prúdom na vysokú teplotu (viac ako 2800 K), čo umožňuje termoemisiu elektrónov [1].

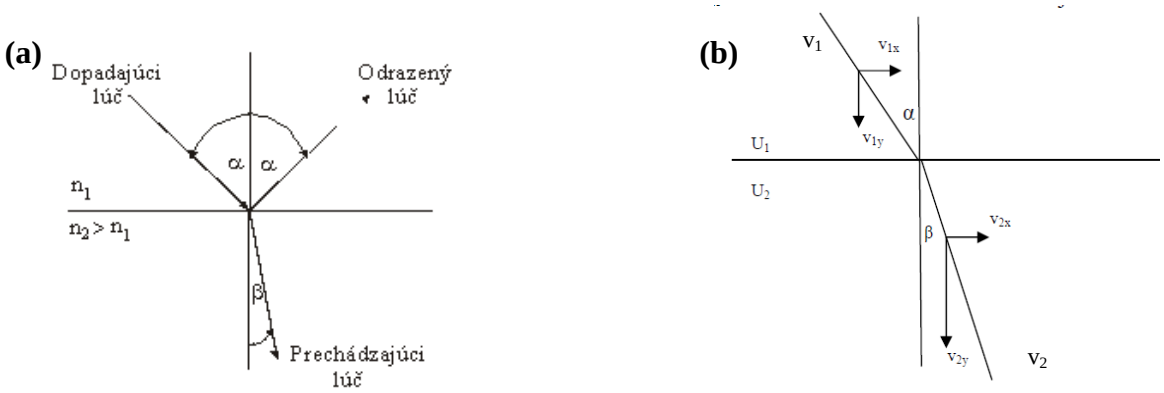
Šošovky
Pre dosiahnutie vysokého rozlíšenia je nutné, aby elektróny zúčastnené na vytvorení obrazu vystupovali z každého bodu predmetu pod dostatočne malým uhlom (mali malú aperturu), teda aby mal lúč dopadajúcehoch žiarenia dostatočne malý priemer. Toho možno dosiahnuť použitím malej clonky vymedzujúcej lúč elektrónov, alebo zaostrením dopadajúceho lúča.
Na fokusáciou elektrónového lúča sa využíva elektrické, alebo magnetické pole [1].

Elektrická šošovka
Pri dopade na rozhranie dvoch oblastí s rôznym potenciálom je správanie elektrónov analogické lomu svetla na rozhraní oblastí s rôznym indexom lomu *n*. Rýchlosť dopadajúcich elektrónov možno vzhľadom k pravouhlej sústave, danej rovinou dopadu a ose k nej kolmej,

---

[1] Vysoké vákuum je tlak menej ako 10^{-5} Pa

rozložiť na zložky v_x a v_z. Prechod elektrónu rozhraním ovplyvní, podobne ako v optike, iba zložku rýchlosti v_z, pričom zložka v_x ostáva nezmenená [4]. Situáciu ilustruje obrázok.



obrázok 3 Lom elektrónového lúča
Zákon lomu v svetelnej a elektrónovej optike [11].

Platí teda [4]

$$\sin\alpha = \frac{v_{1x}}{v_1}, \qquad \text{(R.9)}$$

$$v_{1x} = v_{2x}, \qquad \text{(R.10)}$$

$$\sin\beta = \frac{v_{2x}}{v_2} = \frac{v_{1x}}{v_2}, \qquad \text{(R.11)}$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_2}{v_1}. \qquad \text{(R.12)}$$

Vzťah R.12 je podobný Snellovnmu zákonu vo svetelnej optike:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad \text{(R.13)}$$

Avšak na rozdiel od šošovky v optike, kde sa rozhranie mení skokovo, potenciál elektrickej šošovky sa mení spojite. Napriek tomu možno vhodnou voľbou elektród zostrojiť šošovku s obdobnými fokusačnými vlastnosťami ako spojnou šošovkou v optike.

Magnetická šošovka

V kapitole 1.2.2. bolo naznačené, že elektrón v homogénnom magnetickom poli sa vplyvom magnetickej sily (R.6.) pohybuje vo všeobecnosti po skrutkovici s osou rovnobežnou so siločiarami. Pri rozklade rýchlosti na v_x (smer siločiar) a v_y (ľubovoľná pevne zvolená kolmica na smer siločiar), možno pozorovať, že zatiaľ čo zložku v_x pôsobiaca sila neovplyvní, smer vektoru zložky rýchlosti v_y sa vplyvom sily zakrivuje. Trajektóriou elektrónu v rovine kolmej na smer siločiar sa stáva kružnica s polomerom daným podľa rovnice R.7. Čas jedného obehu je nezávislý na rýchlosti [4]

$$\tau = \frac{s}{v} = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{eB}. \qquad \text{(R.14)}$$

Elektróny sa teda vždy po vykonaní cyklu (daného časom τ) pretnú v bode na ose skrutkovice (pripomeniem rovnobežnej so siločiarami) vo vzdialenosti d_n od počiatku:

$$d_n = v_x\,\tau\,n \qquad \text{pre } n \in \mathbb{N}. \qquad \text{(R.15)}$$

Tomuto po javu hovoríme niekoľkokrát opakovaná fokusácia.

Apertura

Apertúrne clony sa využívajú predovšetkým na zachytenie elektrónov, ktoré boli rozptýlené pod uhlom väčším, ako určitý zvolený uhol β, prípadne na korekciu chýb pozorovania (aberácie) [1].

1.3.3. Detektory a vznik obrazu

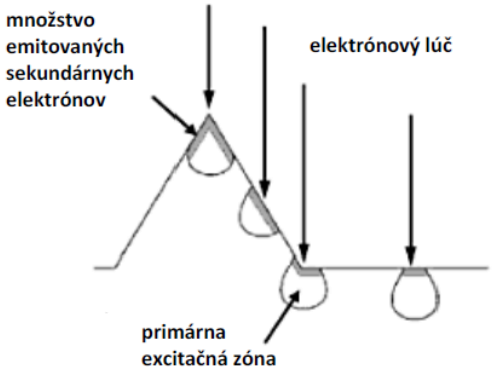
Ako bolo popísané v 1.3.1., výsledkom interakcie elektrónov so vzorkom (elastickej, neelastickej) sa môžu emitovať elektróny, prípadne žiarenie.
Zachytením a vyhodnotením tohto vhodným detektorom možno získať vlastnosti pozorovaného vzorku (obraz topografie, kompozícia povrchových atómov).
Keďže ožiarením určitého bodu elektrónovým lúčom možno (detekciou generovaného signálu) získať informáciu iba o tomto bode, pre získanie obrazu povrchu určitej veľkosti, je nutné zabezpečiť posun elektrónového lúča po povrchu vzorku v dvoch kolmých smeroch.

Detektory

Na získanie obrazu povrchu vzorku sú najpoužívanejšie sekundárne elektróny. Ich detekcia je však veľmi náročná, keďže majú malú energiu (3 - 5 eV), tvoria slabý prúd (≈10 pA). Navyše je nutné zabezpečiť, z dôvodu pohybu elektrónov lúča po povrchu vzorku, dostatočnú rýchlosť detegovania [1].
Jednou z možností je využitie *elektrónového násobiča*.
V elektrónovom násobiči sú sekundárne elektróny priťahované na katódu, kde vytvoria ďalšie sekundárne elektróny, ktoré sú priťahované na ďalšiu katódu s vytvorením ďalších elektrónov. Tento proces sa opakuje približne 10 – 20 krát za vzniku dostatočne silného signálu, ktorý je detegovaný. Najväčším nedostatkom elektrónového násobiča je však vysoká náchylnosť na kontamináciu nečistotami, ktoré výrazne znižujú jeho citlivosť [1].
Riešením je využitie *fotonásobiču* v tzv. Everhart-Thornleyho detektore. V ňom elektrónový signál generuje svetlo, to je znásobené vo fotonásobiči a naspäť premenené na elektrónový signál, ktorý je vyhodnocovaný [1].

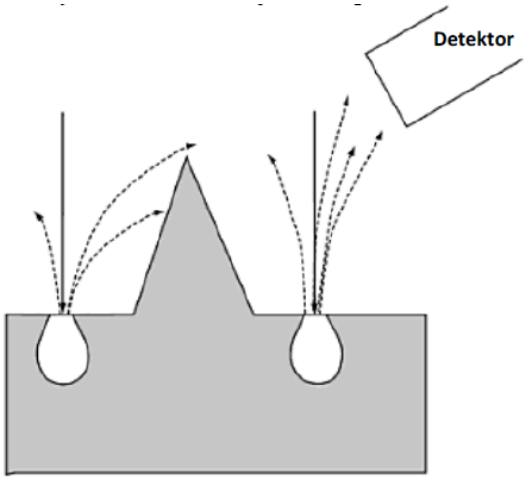
Interpretácia signálu

Keďže množstvo generovaných (sekundárnych) elektrónov závisí na hustote elektrónov na povrchu vzorku (a to je dané atomárnym číslom povrchových atómov) je možné detekciou sekundárnych elektrónov získať obraz chemického zloženia povrchu.
Využívajú sa na to rovnako odrazené elektróny, u ktorých platí rovnaká závislosť (priama úmernosť) medzi množstvom detegovaných elektrónov a atomárnym číslom povrchových atómov (viď 1.3.1.) [1].
Množstvo detegovaných sekundárnych elektrónov je rovnako funkciou topografie povrchu vzorku. Významné sú pritom dva procesy.
Dopadajúci lúč elektrónov spôsobí emisiu sekundárnych elektrónov, pričom ich množstvo závisí na topografii povrchu (líši sa na hrane a rovine), situáciu ilustruje obrázok.



obrázok 4 Závislosť emisie sekundárnych elektrónov na topografii
Schematické znázornenie emisie sekundárnych elektrónov na rovine a píku [1].

Významným faktorom je i relatívna poloha detektoru, vzorku a dopadajúceho lúča. Z častí, ktoré sú ovplyvnené (blokované) výbežkami na povrchu vzorku, dosiahne detektor menej sekundárnych elektrónov a javia sa preto tmavšie [1].



obrázok 5 Závislosť detekcie emitovaného signálu na relatívnej polohe detektoru
Z častí blokovaných výbežkami dosiahne detektor menej sekundárnych elektrónov [1].

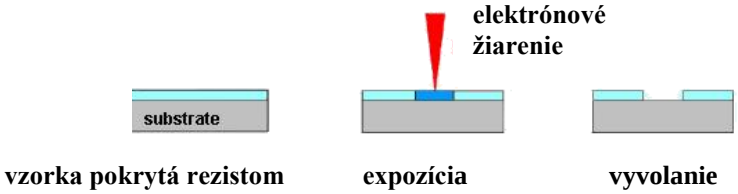
Významný faktor, ktorý ovplyvňuje emisiu sekundárnych je i samotný materiál vzorky. Tento faktor má veľký význam predovšetkým pokiaľ máme na povrchu vzorky (substrátu) umiestnenú látku s inou emisnou schopnosťou [1].

1.3.4. Vákuový systém

Pre zamedzenie ovplyvnenia dráhy elektrónového lúča nečistotami, či kontaminácii elektrónovej trysky je vo funkčných častiach mikroskopu udržiavané vysoké vákuum. Využívané sú na to predovšetkým mechanické, difúzne a turbomolekulárne vývevy (pumpy) [1].

1.3.5. Elektrónová litografia

Princíp činnosti vytvárania elektrónovej litografie je veľmi podobný rastrovaniu vzorku pri jeho pozorovaní SEM.
Na povrch vzorky je nanášaná vrstva rezistu, ktorý pôsobením elektrónového lúča mení svoje vlastnosti. Ďalej sú ožiarené časti rezistu odstránené, prípadne ponechané a odstránené zvyšné časti vrstvy rezistu [9].



obrázok 6 Elektrónová litografia
Vzorka pokrytá rezistom je na vybraných miestach ožiarená a vrstva rezistu je selektívne odstránená [10].

Rovnako je elektrónový lúč zaostrený do určitého bodu. Zatiaľ čo však v SEM dochádza k následnej detekcii generovaného signálu, pri vytváraní vzoru pomocou litografie je hlavným cieľom udelenie jasne definovanej dávky elektrónov (definovanej pomocou veľkosti prúdu a doby pôsobenia – expozície).
Pre ďalšie informácie o elektrónovej litografii by som rád čitateľa odkázal na literatúru [1].

2. Rastrovacia sondová mikroskopia (SPM)

„Za posledných desať rokov sa SPM zmenila z exotickej techniky, dostupnej iba malému množstvu výskumných stredísk, na rozšírenú a úspešnú pomôcku na získanie povrchových vlastností vzorky.“

V.I. Mironov [2]

Ďalší z mikroskopov, ktoré boli využité v tejto bakalárskej práci využité je mikroskop atomárnych síl (AFM), ktorý patrí medzi techniky na analýzu povrchu nazývaných rastrovacia sondová mikroskopia (SPM). V kapitole v krátkosti popisujem princíp činnosti SPM a predovšetkým jeho AFM prevedenie.

2.1. Princíp činnosti SPM

Analýza povrchu a lokálnych vlastností je uskutočňovaná špeciálne upraveným hrotom v tvare ihlice so špičkou o vrcholovom polomere približne 10 nm, pričom vzdialenosť hrotu od povrchu je obyčajne 0,1 – 10 nm [2].
Interakciu hrotu s povrchom možno popísať parametrom *P*. Na získanie vlastností (napr. topografie) povrchu je nutná dostatočne ostrá a jednoznačná závislosť parametru *P* na vzdialenosti hrotu od povrchu. Okrem toho je nutné zabezpečiť meranie parametru *P* v čase a často i systém spätnej väzby (feedback systém) udržujúci, aktívnym ovplyvňovaní výšky hrotu, konštantnú hodnotu parametru (P_0) [2].
Týmto mechanizmom je možno pohybom hrotu po povrchu vzorku (a meraním polohy) získať mapu *V(x,y)* topografie povrchu.
Počas skenovania sa hrot pohybujem pozdĺž rovnobežných úsečiek, hodnoty parametru sú zaznamenávané do pamäti počítača a graficky vyhodnocované.

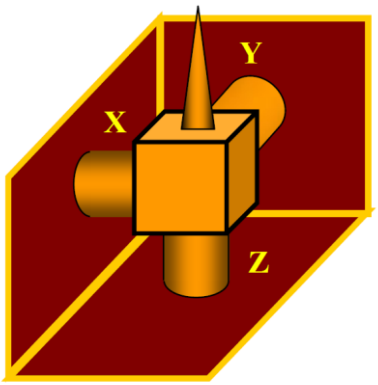
<u>Piezoelement</u>
Jemný pohyb hrotu po povrchu vzorky je zabezpečený pomocou piezoelektrického materiálu, ktorý mení v elektrickom poli svoje rozmery. Z neho sa obyčajne tvarujú duté valce, ktoré umožňujú dostatočný pohyb pri pomerne malej zmene napätia [2].

obrázok 7 Valcový piezoelement
Voľba tvaru umožňuje dostatočný pohyb pri pomerne malej zmene napätia [2] .

Pre relatívnu zmenu veľkosti (pozdĺžneho rozmeru) platí [2]:

$$\frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r \qquad \text{(R.16)}$$

Kde $\frac{\Delta x}{l_0}$ je relatívna zmena dĺžky, E_r intenzita elektrického poľa v smere *r*, $d_{\perp}$ je člen d_{31} piezoelektrického tenzora (konštanta pre daný materiál).
Použitím troch takýchto piezoelementov umožňuje presný pohyb v troch na seba kolmých smeroch.



obrázok 8 Ovládanie hrotu pomocou piezoelementov
Vhodným umiestnením troch piezoelementov možno zabezpečiť pohyb hrotu v priestore [2].

Princíp skenovania
Pohyb detektoru po povrchu je podobný ako v prípade rastrovacieho elektrónového mikroskopu. Hrot sa pohybuje pozdĺž priamok (zľava doprava a späť), pričom hodnoty parametru sú v určitých intervaloch zaznamenávané [2].

2.2. Mikroskop atomárnych síl (AFM)

Jedným z najrozšírenejších prevedení mikroskopu SPM je mikroskop atomárnych síl (AFM). Vyhodnocovaním parametrom sú interakčné sily medzi hrotom a povrchom vzorku, z ktorých je možno získať topografiu povrchu. Meranie sa uskutočňuje pomocou elastického ramienka s ostrým hrotom, pričom sila pôsobiaca na hrot povrchu vzorku spôsobuje ohyb ramienka [2].

2.2.1. Interakcia hrotu so vzorkom

Pôsobenie medzi hrotom a povrchom vzorku popisujeme pomocou Lennard – Jonesovho potenciálu [8]

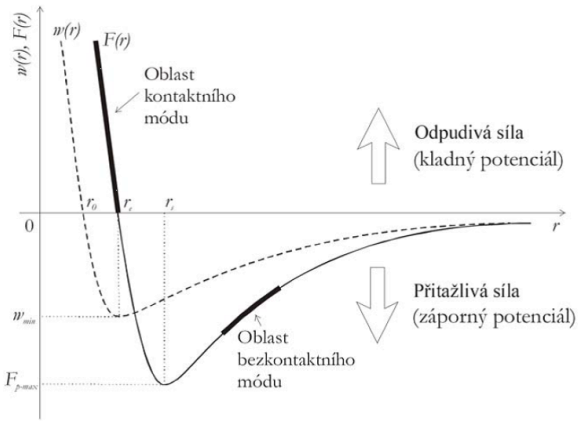
$$w(r) = 4w_0\left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{6}\right], \qquad \text{(R.17)}$$

kde r je vzdialenosť atómov, σ je rovnovážna vzdialenosť medzi atómami a w_0 je interakčný potenciál. Silu získame deriváciu energie [8]

$$F = -grad(w) = 24w_0\left[2\frac{\sigma^{12}}{r^{13}} - \frac{\sigma^{6}}{r^{7}}\right]. \qquad \text{(R.18)}$$

Člen $\frac{\sigma^6}{r^7}$ je príťažlivá zložka sily. Vzniká silovým pôsobením medzi dipólmi susedných molekúl a atómov. Je hlavnou pôsobiacou silou vo vzdialenostiach 2 – 1000 Å (x10^{-10} m) a nazývame ju van der Waalsová sila [8].

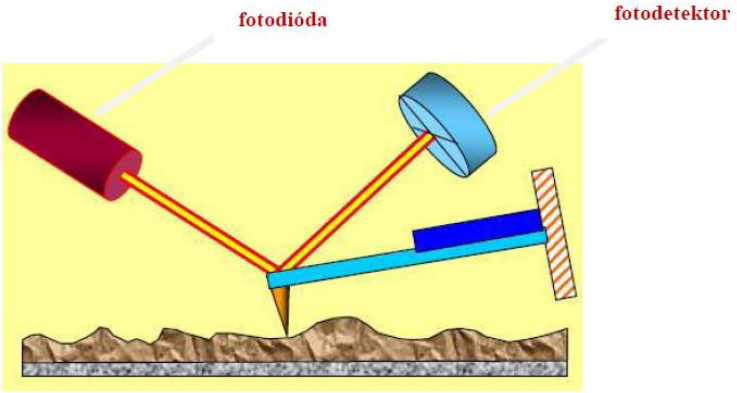
Odpudivá sila daná vzťahom $\frac{\sigma^{12}}{r^{13}}$ má pôvod v Pauliho vylučovacom princípe. Pri priblížení dvoch atómov dochádza k prekrytiu elektrónových obalov a niektoré elektróny sú nútené prejsť do stavu s vyššou energiou čo je spojené so vznikom odpudivej sily [8].
Celkovú energiu interakcie možno získať integrovaním elementárneho pôsobenia všetkým atómov povrchu a hrotu.



obrázok 9 Lennard-Jonesov potenciál
Závislosť Lennard-Jonesova interakčného potenciálu *w* a sily *F* na vzdialenosti *r* medzi dvoma časticami. [8]

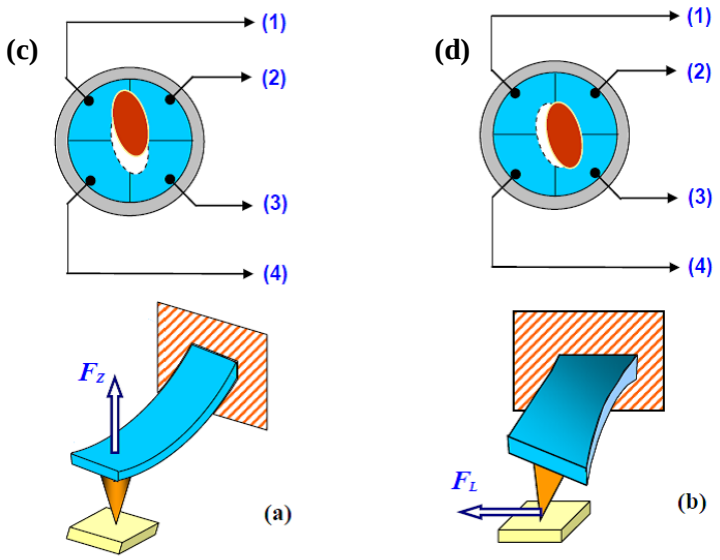
2.2.2. Princíp detegovania

Hodnotu parametru (interakčných síl) detegujeme opticky pomocou laserového lúča. Laserový lúč z fotodiódy je zaostrený na ramienko, pričom odraz je detegovaný na fotodetektore.



obrázok 10 Princíp detegovania laserovým lúčom
Zdrojom laserového lúču je fotodióda. Lúč je odrazený od hrotu a detegovaný na fotodetektore. [2]

Pohyb ramienka (hrotu) pôsobením interakčných síl spôsobuje vychýlenie odrazu laserového lúču na fotodetektore, ktorý je možno zaznamenať [2].



obrázok 11 Princíp činnosti fotodetektoru
Vzťah medzi ohybom ramienka (*a*,*b*) a vychýlením odrazu na fotodetektore (*c*,*d*) [2].

2.2.3. Módy skenovania

Metódy skenovania povrchu možno rozdeliť do dvoch skupín a to na kontaktné módy a bezkontaktné módy.

V *kontaktom móde* je hrot v priamom kontakte s povrchom a pôsobiacimi silami interakcie. Využíva sa veľmi citlivé ramienko, aby sa predišlo zbytočnému ovplyvneniu vzorku. Pri meraní udržujeme buď konštantnú silu pôsobiacu na ramienko, alebo konštantnú vzdialenosť hrotu od povrchu.

Keďže sa hrot nachádza vo vzdialenosti iba niekoľko nm od povrchu prevládajú odpudivé sily (viď 2.2.1) s veľkosťou 10^{-6} až 10^{-8} N. Sila pôsobiaca na hrot je daná vzťahom [2]

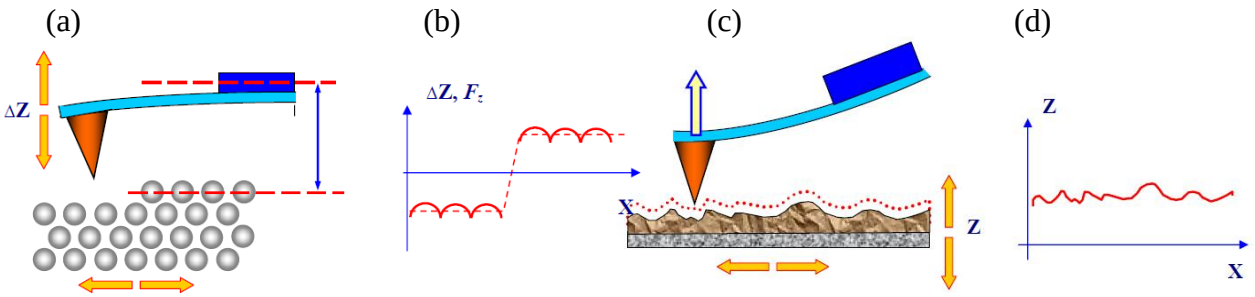
$$F = k \,.\, \Delta z, \qquad \text{(R.19)}$$

kde Δz je prehnutie a k tuhosť ramienka.

V prípade varianty kontaktného módu s konštantou silou je udržovaný stály sklon ramienka (teda i stála sila pôsobiaca na hrot) pomocou napätia pôsobiaceho na piezoelement v *z*-tovej ose (viď obr. 12 c). Meraním zmeny pôsobiaceho napätia možno získať obraz topografie povrchu vzorku [2].

Vo variante s konštantnou výškou sa hrot udržuje v určitej výške z_0 nad povrchom, pričom posun hrotu po povrchu s nerovnosťami znamená zmenu interakčných síl a ohýbanie ramienka z rovnovážnej polohy, ktorú je možno pomocou optických metód merať.

Túto variantu je možno využiť iba pri pomerne hladkých vzorkách (výška nerovností ≈ nm) je však oproti variante s konštantnou silou rýchlejšia, keďže nie je nutné stále prispôsobovanie sklonu ramienka [2].



obrázok 12 Spracovanie obrazu
Spracovanie obrazu v režime konštantnej výšky (*a*,*b*) a konštantnej sily (*c*,*d*) . [2]

Iný spôsob merania je využitie *bezkontaktného módu*, v ktorom je ramienko rozkmitané na frekvenciu blízku rezonančnej, pričom meriame amplitúdu kmitania pri konštantnej výške, prípadne systémom spätnej väzby udržujem konštantnú hodnotu amplitúdy. Mód v práci nebol nevyužitý.

PRAKTICKÁ ČASŤ

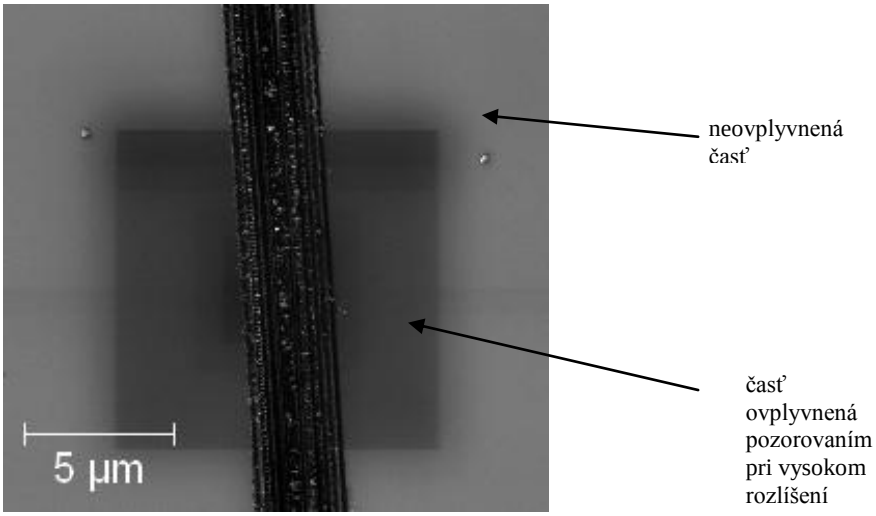
3. Ožarovanie vzorky kremíku elektrónovým lúčom

3.1. Vymedzenie problému

Hlavnou témou práce je skúmanie vplyvu elektrónového lúča na vzorky termického a natívneho SiO_2/Si.

Pri pozorovaní povrchu vzorku rastrovacím elektrónovým mikroskopom, predovšetkým pri vysokom rozlíšení, je častým úkazom zmena odtieňu (zosvetlenie, stmavenie) ovplyvnenej časti. Vzniká otázka, aký je mechanizmus tohto javu.

Bola preto formulovaná prvá hypotéza (I.), že zmena odtieňu nie je iba prechodným javom (trvácnosť viac ako 60 minút), ktorú v nasledujúcej podkapitole rozoberiem. Z výsledku vyplynie potreba formulovať ďalšie hypotézy, ktoré budú rovnako značené rímskymi číslami. Na konci kapitoly bude uvedený prehľad hypotéz so zistenými výsledkami.



obrázok 13 Zmena odtieňu pozorovaných miest vzorky
Ožiarenie určitej oblasti vzorky pri pozorovaní môže ovplyvniť jej emisiu sekundárnych elektrónov (pozoruj ako zmenu odtieňu).

3.2. Pozorovanie zmeny odtieňu

Pri pozorovaní rastrovacím elektrónovým mikroskopom, na ktorom boli uskutočnené pozorovania, je obraz topografie povrchu daný emisiou sekundárnych elektrónov. Pričom ako svetlejšie (zmena odtieňu) sa vyobrazia miesta s vyššou emisiou elektrónov, čo sú ako bolo popísané v kap. 1.3.3., miesta s nerovnosťami, prípadne z látky s vyššou emisnou schopnosťou. Vplyv môže mať i nabíjanie povrchu vzorky či ďalšie javy.

Na overenie prvej hypotézy (I.) bol povrch vzorky termického SiO_2/Si ožiarená pri daných parametroch (prúd, urýchľovacie napätie..) s premenlivou dávkou, pričom bola pozorovaná zmena odtieňa selektívne ožiarených častí oproti okoliu. Vzorka bola ďalej ponechaná voľne na vzduchu po stanovený čas *t*, po ktorom bola opätovne zmeraná zmena odtieňa pri zachovaní stanovených parametrov.

3.2.1. Metodológia ožarovania vzorky

Povrch vzorky bol selektívne ožarovaný pomocou aplikácie Drawbeam na rastrovacom elektrónovom mikroskope Tescan Vega. Ako vzorka bol využitý 45 nm termický SiO_2/Si(100). Na vzorku boli vypálené štvorčeky o rozmere 0,8x0,8µm, ožarovacia dávka bola volená v rozsahu 1 – 8000 mC/cm^2 (ďalšie parametre sú uvedené v tabuľke 1).

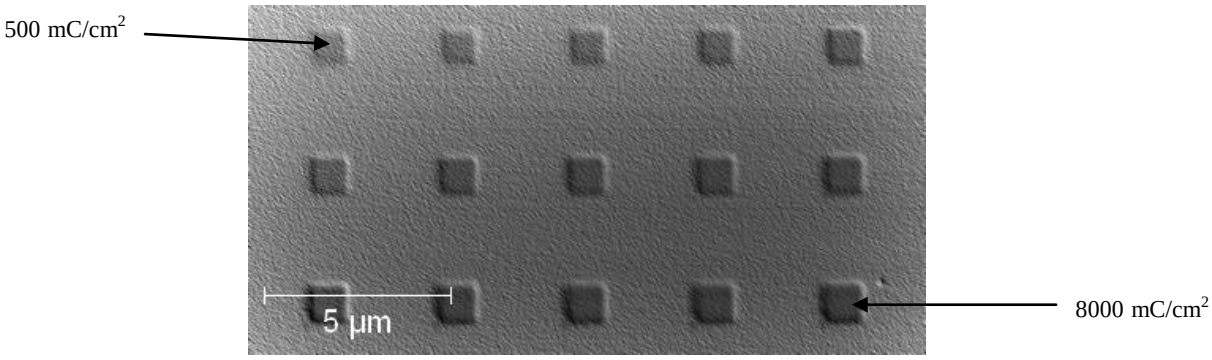
prúd	1268,86 pA
urýchľovacie napätie	30 kV
pracovná vzdialenosť (WD)	10,526 mm
kontrast	0%
jas	73,7%

Tabuľka 1 Parametre ožarovania vzorky pri pozorovaní zmeny odtieňa
Všetky parametre boli zachované pri oboch pozorovaniach.

Všetky parametre boli zachované pri oboch pozorovaniach. Dôležité bolo predovšetkým zachovanie konštantného kontrastu, keďže jeho zmena by mohla znemožniť vyhodnocovanie výsledkov (viď nižšie). Prúd bol nastavený na PC 7 (veličina s ktorou pracuje SEM) a zmeraný pomocou Faradayovej sondy (pred prvým meraním ako i po meraní druhom).
Dĺžka času medzi pozorovaniami *t* bola zvolená na 60 minút.

3.2.2. Výsledky meraní a ich vyhodnocovanie

Vzorka bola ožiarená s vyššie uvedenými parametrami a opakovane pozorovaná na elektrónovom mikroskope. Na selektívne ožiarených miestach (štvorčekoch) bola pozorovaná zmena odtieňa.

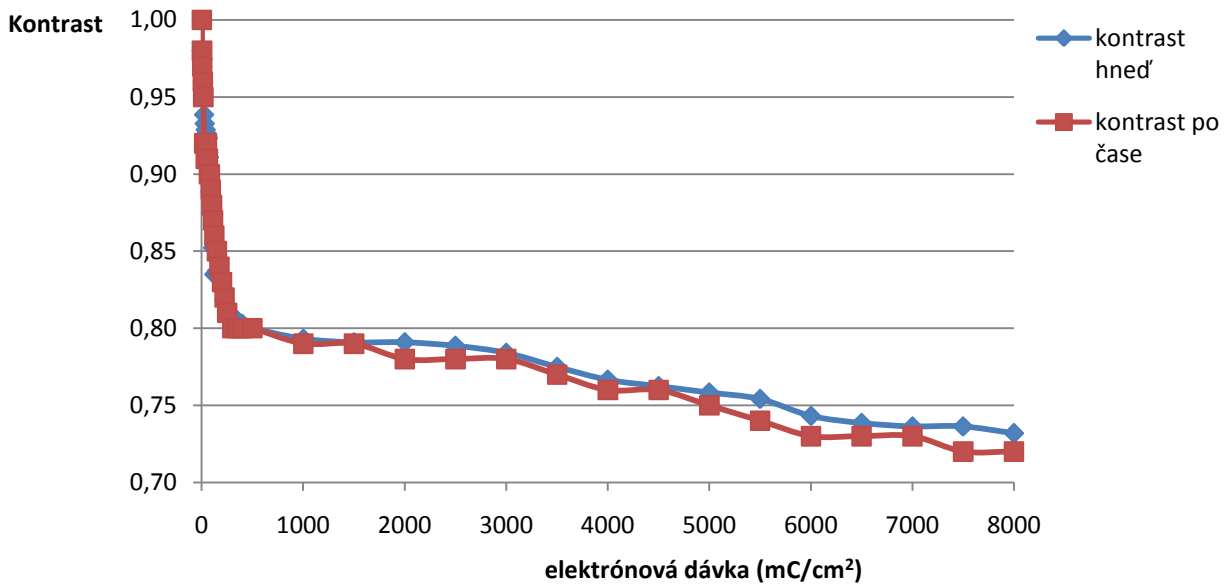


Obrázok 14 Zmena odtieňa ožarovaných oblastí
Príklad zmeny odtieňa pri ožiarení štvorčekov s dávkami 500 - 8000 mC/cm^2 . Obrázok bol pre zvýraznenie pozorovanej zmeny odtieňa upravený v programe Gwyddion.

Zmena odtieňu (jasu) bola meraná v programe Gwyddion, pričom bola zavedená veličina kontrast *K* definovaná ako:

$$K = \frac{J_o}{J_p} = \frac{n_o}{n_p}, \qquad \text{(R.20)}$$

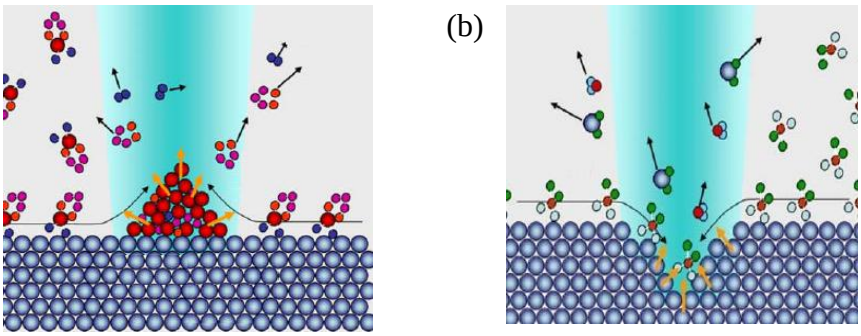
kde J_o je jas objektu, J_p je jas pozadia a n_o (n_p) je množstvo detegovaných sekundárnych elektrónov z pozorovaného objektu (z pozadia).
Veličina *K* je teda bezrozmerné číslo, pričom platí: pre *K* >1 je objekt tmavší, pre *K*<1 je objekt svetlejší, ako referenčná hodnota (jas pozadia).



Graf 1 Závislosť kontrastu na veľkosti dávky
Ožiarené miesta povrchu vzorky emitujú menej sekundárnych elektrónov, pričom nebola pozorovaná výrazná zmena sekundárnej emisie v čase.

Z grafu je možno pozorovať zmenu (zníženie) sekundárnej emisie ožiarených miest. Spočiatku je zmena pomerne výrazná, približne od dávky 200 mC/cm^2 (K = 0,8) je zmena sekundárnej emisie pozvoľnejšia.
Zároveň je vidieť, že zmena sekundárnej emisie sa za čas t výrazne nezmenila a znamená to teda potvrdenie hypotézy I. Možno z toho usudzovať, že nejde o nabitie povrchu nábojom (obyčajne krátkodobý efekt).
Naopak možno predpokladať, že elektrónový lúč spôsobí leptanie povrchu vzorky, prípadne iným spôsobom pozmení povrch vzorky. Tento jav nazývame kontaminácia vzorky.
Kontaminácia vzorky je ovplyvnenie povrchu vzorky pri ožarovaní elektrónovým lúčom. Je daná predovšetkým druhom nečistôt v komore, v ktorej je umiestnená vzorka. Pokiaľ ide o látku nereagujúcu s povrchovými atómami, na povrchu sa deponujú ostrovčeky látky bez narušenia štruktúry povrchovej vrstvy atómov. Elektrónový lúč môže spôsobiť i leptanie povrchu a narušenie povrchovej väzby medzi atómami. Povrchové atómy sa ďalej môžu naviazať na atómy v atmosfére [3].

(a) (b)

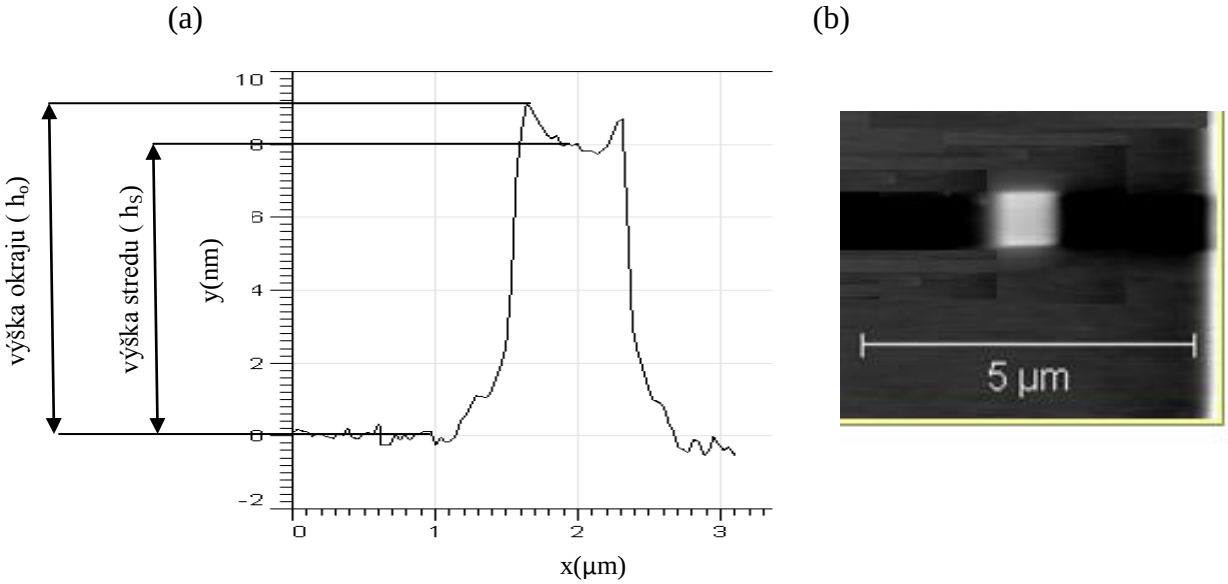


Obrázok 15 Kontaminácia vzorky bez reakcie a s reakciou s atómami vzorky
Na povrchu vzorky sa môžu deponovať ostrovčeky látky rozpustenej v atmosfére (a), prípadne môže elektrónové žiarenie spôsobiť rozklad väzieb medzi povrchovými atómami vzorky (leptanie) [3].

Na základe toho bola formulovaná hypotéza (II.), že na povrchu sa vytvorili objekty (s inou emisnou schopnosťou ako substrát), že tieto objekty majú výšku niekoľko nm (III.) a tvar vo vertikálnej rovine podobný trojuholníku (pravidelný ihlan) ako na obrázku 15 a) (IV.).

3.3. Meranie ožiarených miest pomocou mikroskopu atomárnych síl

Pre overenie hypotézy II. bola pozorovaná topografia ožiarených častí vzorky mikroskopom atomárnych síl (AFM), ktorý dokáže zobraziť trojrozmerný obraz.



Obrázok 16 Pozorovanie vzorky mikroskopom atomárnych síl
Obraz ožiareného miesta pomocou mikroskopu atomárnych síl (b) a jeho vertikálny obraz získaný vyhodnotením v programe Gwyddion (a).

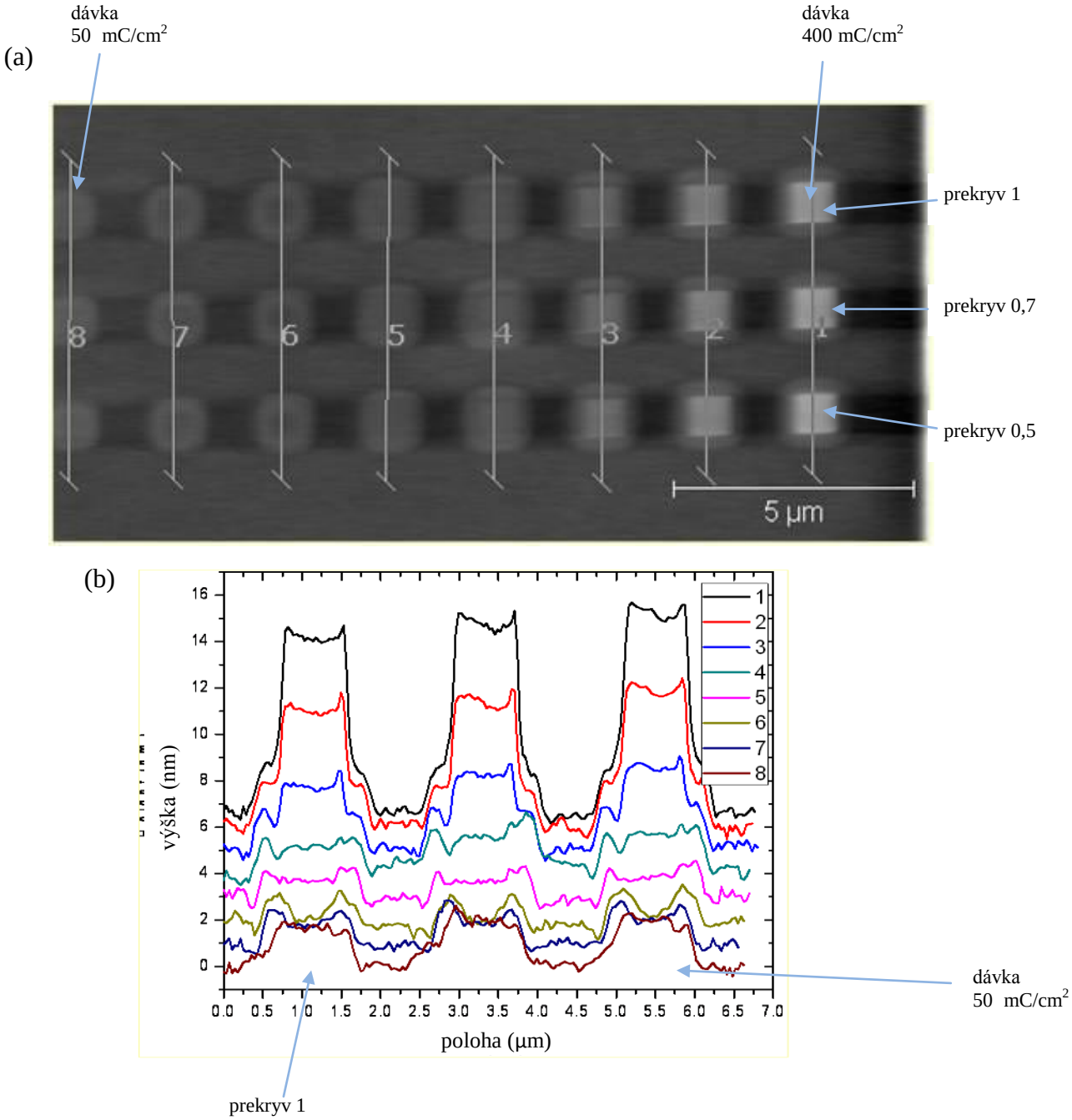
Z obrázku 16 je vidieť, že na povrchu vzorky (substráte) sa skutočne vytvoril objekt s šírkou približne zodpovedajúcou veľkosti ožiareného miesta (0,8 µm) a výškou niekoľko nm (potvrdenie hypotézy II. a hypotézy III.).
Zároveň je veľmi zaujímavý tvar vertikálneho profilu vytvoreného objektu, ktorý nezodpovedá autorom očakávanému tvaru trojuholníka (zamietnutie hypotézy IV.).
Ďalšia časť práce bola zameraná na zistenie mechanizmu rastu uvedeného objektu. Postupne boli menené jednotlivé parametre (prúd, napätie, veľkosť dávky..), pričom bolo pozorované aký to má vplyv na výšku utvoreného objektu a výšku okrajov. Predpokladalo sa pri tom, že výška objektu (a) ako i okrajov (b) bude:

- priamo úmerná veľkosti elektrónovej dávky (V.a, V.b)
- nepriamo úmerná veľkosti prúdu (VI.a,b)
- nebude závisieť na urýchľovacom napätí elektrónového lúča (VII.a,b)
- nebude závisieť na prekryve (VIII.a,b)
- nebude závisieť na šírke vrstvy SiO_2 (IX.a,b)

Zároveň sa predpokladalo, že pri závislosti na veľkosti elektrónovej dávky (resp. prúde) bude pomerne výrazný rast stredu objektu do určitej veľkosti dávky (prúdu), po ktorej začne byť rast výrazne pozvoľnejší (podobne ako v grafe 1) (X.).
Medzi uvedenými predpokladmi nie je uvedený čas (doba expozície), hoci možno predpokladať, že práve on bude kľúčovou premennou. Problém pri určení doby expozície je že údaj poskytnutý softvérom mikroskopu je často nepresný. Doba expozície je však závislá (nepriamo úmerne) na veľkosti prúdu elektrónového lúča [9]. Znamená to, že závislosť by bolo možno získať transformáciou závislosti na veľkosti prúdu.
Keďže na overenie vyššie uvedených hypotéz je nutný pomerne veľký rozsah dát s pomerne veľkou presnosťou, na overenie hypotéz V., VI. a VIII. som využil skoršie merania uskutočnené vedúcim práce, ktoré som vyhodnotil a spracoval.

3.3.1. Závislosť výšky ožiarených miest na veľkosti prúdu, veľkosti elektrónovej dávky a veľkosti prekryvu, veľkosti napätia a voľbe substrátu

Pre overenie závislosti výšky objektu na veľkosti dávky (V.) a veľkosti prúdu (VI.) a veľkosti prekryvu (VIII.) bola vzorka podobne ako v kapitole 3.2.2. selektívne ožarovaná pomocou aplikácie Drawbeam na rastrovacom elektrónovom mikroskope Tescan Vega. Ako vzorka bol opäť využitý 45 nm termický SiO_2/Si(100). Na vzorku boli opäť vypálené štvorčeky o rozmere 0,8x0,8 µm. Štvorčeky boli ožarované pri konštantnom urýchľovacom napätí zdroja 5 kV, pričom ako premenné boli zvolené parametre overovaných závislostí: veľkosť dávky 50 – 400 mC/cm^2, prúd ožarovania 11 pA – 747 pA (označenie v softvéry PC14 – PC4), a veľkosť prekryvu (vysvetlenie pojmu viď príloha 1).



Obrázok 17 Príklad obrazu deponovaných objektov na mikroskope AFM (a) a ich vyhodnocovanie (b) Zvyšovaním dávky (zľava doprava na (a), zhora dole (b)) sa mení tvar ako i výška objektov (b). Zvyšovanie veľkosti prekryvu (zhora dole (a), sprava doľava(b)) má na výšku a tvar objektov iba minimálny vplyv. Meranie uskutočnené pri prúde 14,65 pA.

Pri meraní bola, ako bolo vyššie naznačené, vyhodnocovaná zvlášť výška stredu a okraju. Pričom pre zvýraznenie rastu okrajov bola odčítaná výšky okrajov (h_o) od výšku stredu (h_s). Tým definujem *výšku rastu okrajov* (zjednodušene *rast okrajov*) h_r ako:

$$h_r = h_o - h_s \,, \qquad \text{(R.21)}$$

kde význam jednotlivých veličín je zrejmý z obrázku 16, pričom ako výška stredu h_s je braná priemerná výška vnútornej časti objektu a výška okraju h_o je definovaná ako priemerná výška hrany vyvýšenej časti objektu. Z obrázku 17 je vidieť, že pri zvyšujúcej sa dávke pôvodné okraje ustupujú do pozadia a vytvárajú sa nové. Pri vyhodnocovaní boli brané do úvahy iba okraje pre ktoré $h_o \geq h_s$.

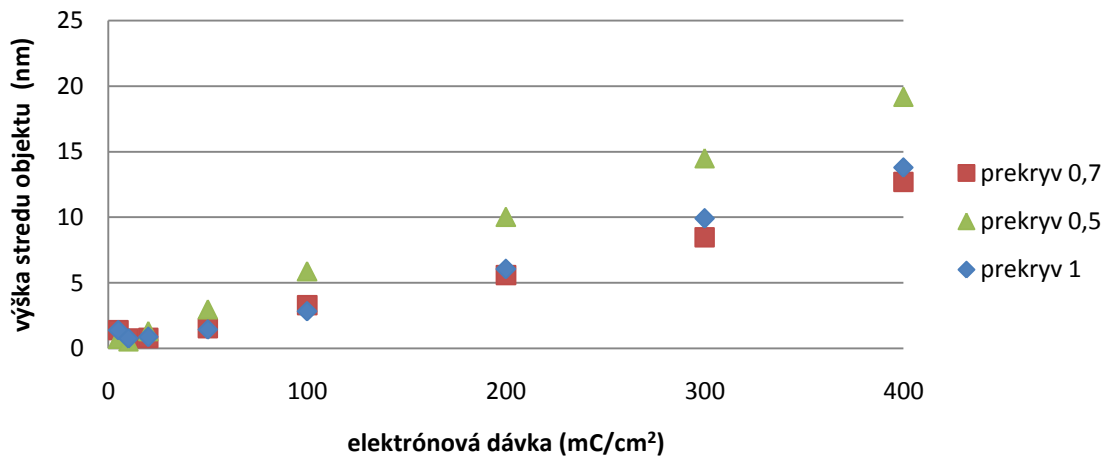
Merania boli vyhodnocované pomocou aplikácie Gwyddion.

a) Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky a veľkosti prekryvu

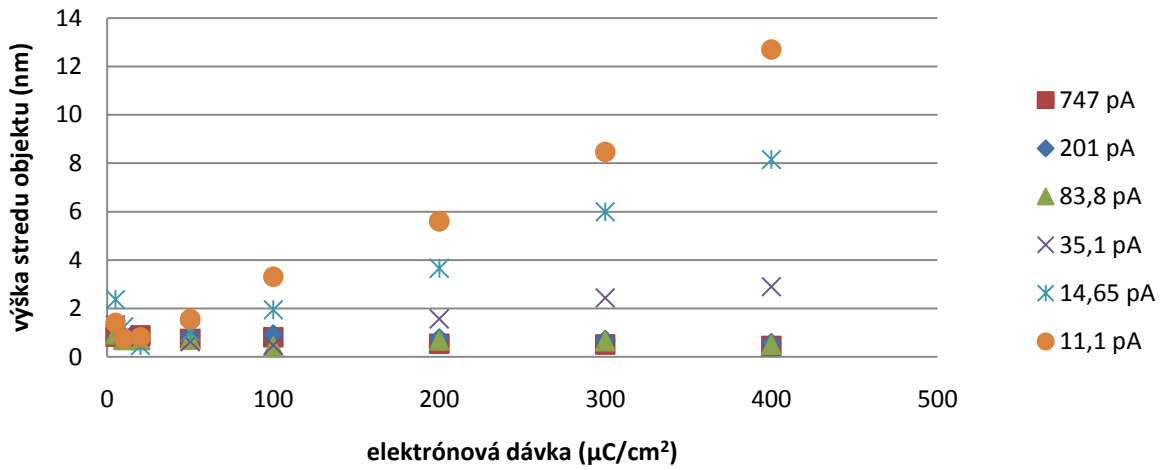
V tomto prípade bola ako základné premenné veľkosť dávky a prekryvu, pričom meranie bolo uskutočnené pri konštantnom prúde.

Ilustračne je uvedená vybraná grafickú závislosť pri prúde 11,1 pA (PC14) a spoločný graf pre všetky prúdy pre prekryv 0,7. Všetky grafy sú súčasťou prílohy 2.

(a)



(b)

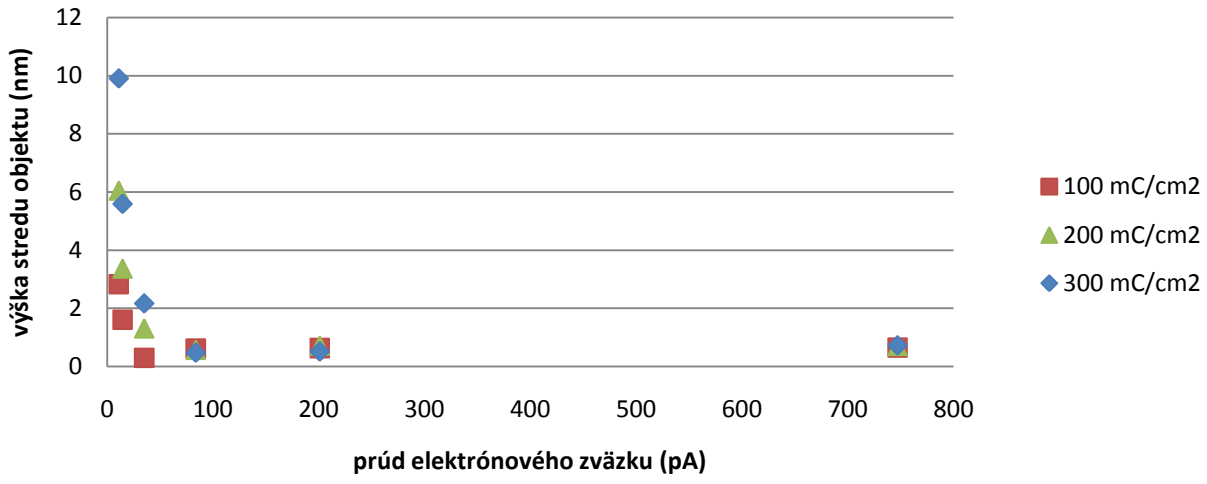


Graf 2 Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky

Z grafov je vidieť, že výška stredu objektu rastie, predovšetkým pri nižších prúdoch (14,65 pA, 11,1 pA), takmer lineárne (a). Menej významným faktorom je prekryv (b), pričom platí nepriama úmera medzi veľkosťou prekryvu a výškou deponovaného objektu (opäť pozorované hlavne pri nižších prúdoch).

Keďže výška stredu objektu rastie, predovšetkým pri nižších prúdoch (14,65 pA, 11,1 pA), približne lineárne možno preto prijať hypotézu V.a. Ovplyvňujúcim faktorom je i prekryv, pričom platí nepriama úmera medzi veľkosťou prekryvu a výškou deponovaného objektu. Hypotézu VIII.a teda zamietam.

b) Závislosť výšky stredu deponovanej objektu na prúde elektrónového lúča
Pre určenie závislosti výšky stredu deponovanej objektu na prúde bola zvolená konštantná veľkosť elektrónovej dávky a prekryvu (O = 1). Uvedený je spoločný graf pre všetky vyhodnotené dávky. Jednotlivé merania sú (kvôli prehľadnosti) súčasťou prílohy 3.

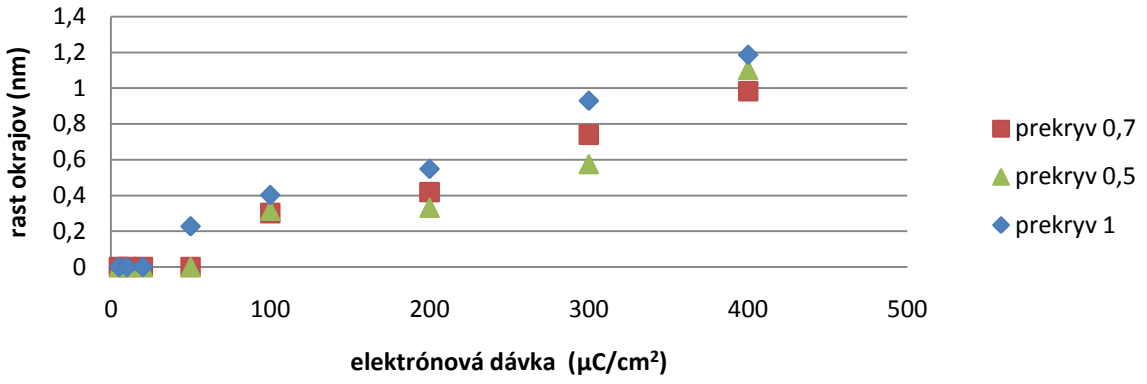


Graf 3 Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti prúdu
Zvyšovaním prúdu (pri konštantnej veľkosti dávky) výška stredu približne do hodnoty 100 pA klesá, ďalej ostáva na približne konštantnej úrovni.

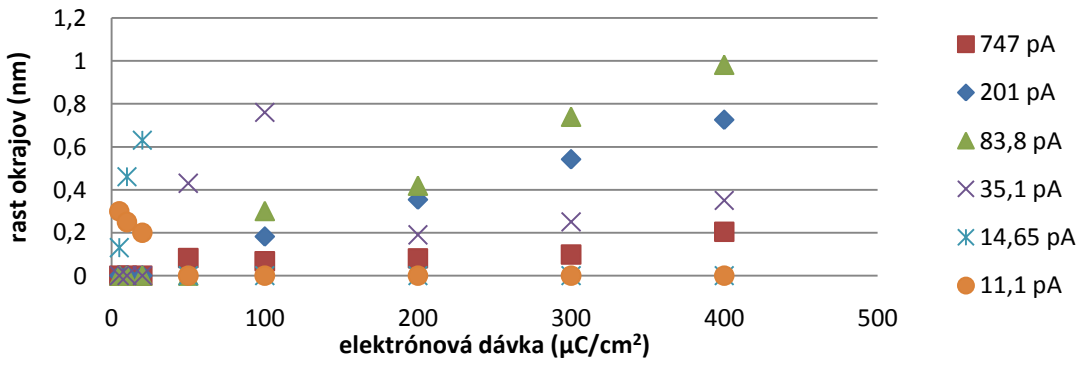
Z grafu je vidieť spočiatku veľmi výrazný pokles výšky stredu objektu zvyšovaním prúdu elektrónového lúča, ktorý sa približne pri hodnote prúdu 100 pA zastaví a ďalej ostáva výška stredu objektu na približne konštantnej hodnote (potvrdenie hypotézy VI.a).

c) Závislosť výšky okrajov na veľkosti dávky a veľkosti prekryvu.
Ďalej som sa zameral na meranie rastu okrajov (zavedenie veličiny viď R.21). Postupoval som podobne ako v časti a). Opäť boli ako základné premenné ponechané veľkosť dávky a veľkosť prekryvu, pričom meranie bolo uskutočnené pri rôznych hodnotách prúdu a prekryvu.
Opäť je uvedený ilustračný graf pri prúde 83,8 pA a spoločný graf pre všetky prúdy pre prekryv 0,7. Všetky grafy sú súčasťou prílohy 4.
Z grafických závyslostí nie je možné vyvodiť jasný záver o trende rastu. Pri vyšších prúdoch (201 pA, 83,8 pA) je závislosť výšky na elektrónovej dávke priamo úmerná, pri nižších (35,1 pA) uvedený trend pozorovaný nie je. Rovnako nemožno rozhodnúť o závislosti na prekryve (viď grafické závislosti v prílohe 4). Hypotézy V.b; VIII.b preto nemožno ani potvrdiť, ani zamietnuť.

(a)



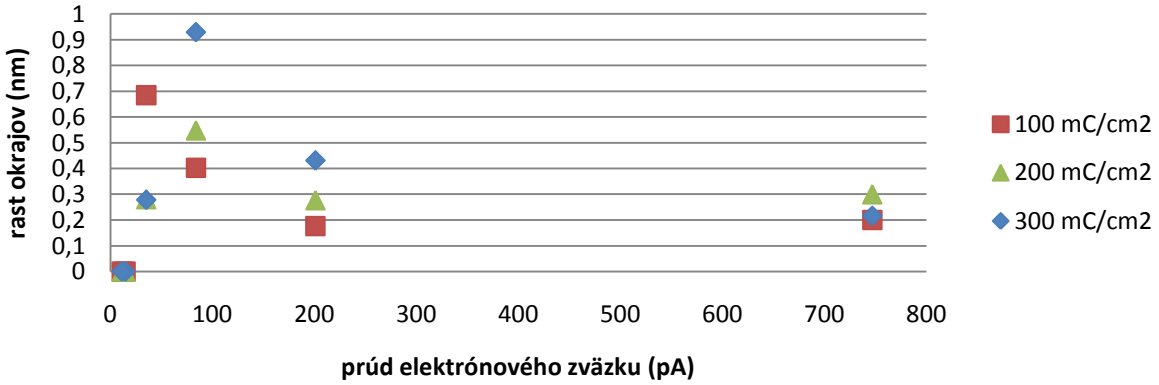
(b)



Graf 4 Rast okrajov deponovaného objektu pri zvyšujúcej sa dávke
Zvyšovanie elektrónovej dávky spôsobí pri prúde 83,8 pA 201 pA rast výšky okrajov deponovaného objektu, pri ostaných hodnotách prúdu závislosť pozorovaná nie je.

d) Závislosť výšky okrajov na prúde elektrónového lúča

Pre úplnosť je uvedená závislosť výšky okrajov na prúde elektrónového lúča. Opäť pracujem z vyššie definovanou výšku rastu, zachovávam konštantnú veľkosť elektrónovej dávky a prekryvu (O=1). Uvedený je spoločný graf pre všetky vyhodnotené dávky. Jednotlivé merania sú (kvôli prehľadnosti) súčasťou prílohy 5.

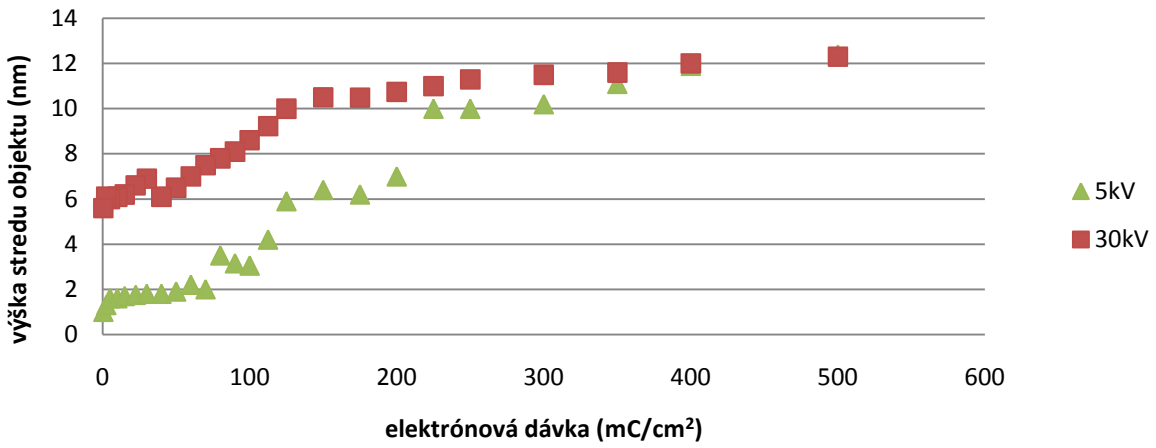


Graf 5 Rast okrajov deponovaného objektu pri zvyšujúcom sa prúde
Zvyšovanie elektrónovej dávky spôsobí spočiatku rast výšky okrajov deponovaného objektu, ktoré má svoje maximum (v tomto spektre dávok, pri danej dávke) v okolí veľkosti prúdu 100 pA, po jej prekonaní sa mení tendencia rastu okrajov na mierny pokles .

Z grafickej závislosti je vidieť že v okolí hodnoty prúdu 100 pA nastáva zmena (podobne ako v prípade b)). Tentoraz sa mení tendencia z prudkého rastu na výrazne miernejší pokles.
Na základe závislostí uvedených v prílohe 5 je nutné hypotézu VI.b zamietnuť.

e) Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča

Pri tomto pozorovaní boli štvorčeky o rozmere 0,8x0,8 µm opäť selektívne ožarovaná pomocou aplikácie Drawbeam na rastrovacom elektrónovom mikroskope Tescan Vega. Ako vzorka bol tentoraz využitý natívny SiO_2/Si(100) s 1,5 nm vrstvou SiO_2. Základnými premennými boli okrem veľkosť dávky 0,5–500 mC/cm^2 a prúdu (20,2 pA, 420,0 pA) i hodnota urýchľovacieho napätia (5 kV, 30 kV). Ako konštantná bola tentoraz zachovaná veľkosť prekryvu (0,7).

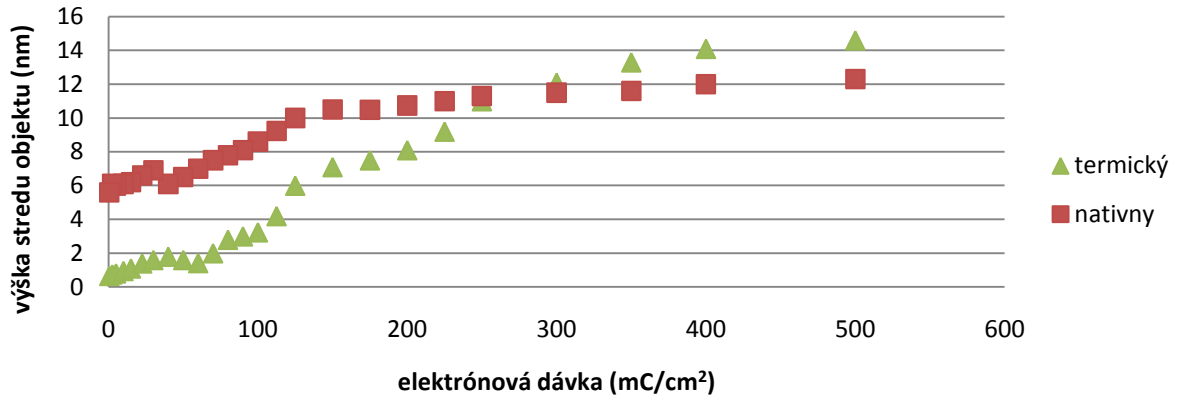


Graf 6 Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky pre rôznu hodnotu urýchľovacie ho napätia.
Výška stredu objektu je úmerná veľkosti elektrónovej dávky pre urýchľovacie napätie 5 kV, ako i pre urýchľovacie napätie 30 kV. Pre urýchľovacie napätie 30 kV je možno pozorovať zmenu v trende rastu v okolí elektrónovej dávky 100 mC/cm^2. Merané pri prúde elektrónového lúča 20,2 pA.

Z grafu je vidieť, že zmena urýchľovacieho napätia spôsobí miernu zmenu priebehu grafickej závislosti (zamietame hypotézu VII.a). Pre urýchľovacie napätie 5 kV je možno pozorovať strmšiu závislosť medzi veľkosťou dávky a výškou stredu deponovaného objektu, ako pre urýchľovacie napätie 30 kV. Trend však pre prúd 420 pA (príloha 6) pozorovaný nebol. V tomto prípade bola závislosť vyššie uvedených premenných nepriama a zmena urýchľovacieho napätia spôsobila zníženie výšky stredu (v grafickej závislosti) približne o jeden nm.

f) závislosť výšky stredu deponovaného objektu na substráte (šírke vrstvy SiO_2)

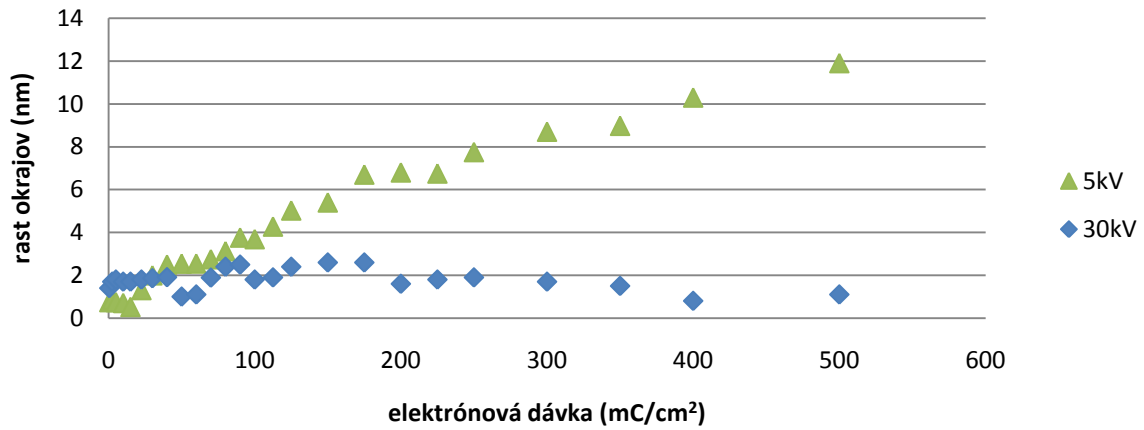
Pri tomto pozorovaní bol sledovaný vplyv substrátu na veľkosť objektu. Okrem vyššie uvedenej vzorky natívneho SiO_2/Si(100) s 1,5 nm vrstvou SiO_2, bola využitá vzorka termického SiO_2/Si(100) s 45 nm vrstvou SiO_2. Základnými premennými boli okrem voľby substrátu veľkosť dávky 0,5 – 500 mC/cm^2 a prúdu (20,2 pA, 420,0 pA). Hodnota urýchľovacieho napätia bola zvolená na 30 kV, veľkosť prekryvu 0,7.



Graf 7 Závislosť výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky pri rôznej voľbe substrátu.
Výška stredu objektu je priamo úmerná veľkosti elektrónovej dávky pre termický SiO_2, ako i pre natívny SiO_2. Rovnako ako v grafe 6 je pre urýchľovacie napätie 30 kV možno pozorovať zmenu v trende rastu v okolí elektrónovej dávky 100 mC/cm^2. Merané pri prúde elektrónového lúča 20,2 pA.

Z grafu je vidieť podobnú zmenu v trende rastu zmenou substrátu, ako v predchádzajúcom oddiely (e). Zmena substrátu ovplyvnila v grafickej závislosti počiatočnú výšku stredu objektu, ako i strmosť závyslosti (zamietame hypotézu IX.a). Hoci je pre oba substráty (termický i natívny SiO_2) možno pozorovať priamu úmernosť medzi veľkosťou dávky a výškou stredu deponovaného objektu, pre natívny SiO_2 je závislosť menej strmá. Pre prúd 420 pA (príloha 7), bol grafický priebeh pre natívny SiO_2 celkom odlišný (nepriama úmernosť medzi veličinami).

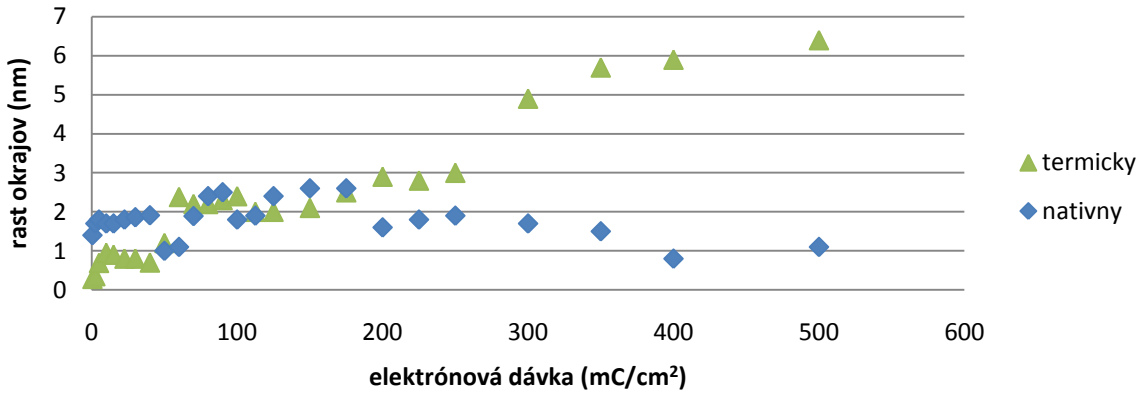
g) Závislosť výšky okrajov na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča
Rovnako ako v odsekoch c) a d) bola okrem závislosti výšky stredu pozorovaného objektu vyhodnotená i výška okrajov. Dáta boli vyhodnotené z rovnakého pokusu ako v odseku e), boli teda zachované rovnaké podmienky (natívny SiO_2/Si(100); veľkosť dávky 0,5 – 500 mC/cm^2; veľkosť prúdu 20,2 pA, 420,0 pA; hodnota urýchľovacieho napätia 5 kV, 30 kV veľkosť prekryvu 0,7)



Graf 8 Závislosť rastu okrajov deponovaného objektu na veľkosti dávky pre rôznu veľkosť urýchľovacieho napätia.
Závislosť výšky okrajov objektu na dávke pre rôzne napätia má podobný rysy ako v odseku e). Zatiaľ čo pri 5kV ide o pomerne prudký rast, pri 30kV je závislosť málo výrazná a pomerne málo určitá. Merané pri prúde elektrónového lúča 20,2 pA.

Z nameraných dát je možno pozorovať podobný priebeh závislosti pre prúd 20,2 pA, i pre prúd 420,0 pA (viď príloha 8) a to rast výšky okrajov (pri zvyšujúcej sa dávke) pre urýchľovacie napätie 5 kV a udržovanie pomerne konštantnej výšky okrajov pre urýchľovacie napätie 30 kV. Možno teda konštatovať, že voľba urýchľovacieho napätia má vplyv na výšku stredu ako i okrajov deponovaného objektu. Možno preto zamietnuť hypotézu VIII.a,b.

h) závislosť výšky okrajov na substráte (šírke vrstvy SiO_2)
Dáta boli opäť vyhodnotené z rovnakého pokusu ako v odseku f), boli teda zachované rovnaké podmienky (veľkosť dávky 0,5 – 500 mC/cm^2; veľkosť prúdu 20,2 pA, 420,0 pA; hodnota urýchľovacieho napätia 30 kV veľkosť prekryvu 0,7). Ako parameter bola opäť šírka vrstvy SiO_2 (natívny SiO_2/Si(100) s 1,5 nm vrstvou, termický SiO_2/Si(100) s 45 nm vrstvou).



Graf 9 Závislosť rastu okrajov deponovaného objektu na veľkosti dávky pri rôznej voľbe substrátu.
V závislosť výšky okrajov objektu na dávke možno pozorovať podobný priebeh ako v odseku f), pre termický SiO_2 je závislosť priama, naopak pre natívny SiO_2 je úmernosť nepriama. Merané pri prúde elektrónového lúča 20,2 pA.

Z výsledkov meraní možno pozorovať pomerne usporiadaný rast okrajov objektu (pri zvyšujúcej sa dávke) na termickom SiO_2 a naopak pomerne neurčitú závislosť pre natívny SiO_2 ako pre prúd 20,2 pA, tak i pre prúd 420,0 pA (viď príloha 9). V každom prípade je nutné zamietnuť hypotézu IX.b.

3.3.2. Zhrnutie výsledkov meraní

Pre prehľadnosť sú v tabuľke uvedené hypotézy a ich testovanie.

	hypotézy	**prijatie/zamietnutie**	
I.	*zmena odtieňu nie je iba prechodným javom*	prijatá	
II.	*na povrchu vzorky sa pri selektívnom ožiarení elektrónovým lúčom vytvoria objekty*	prijatá	
III.	*deponované objekty (vzniklé selektívnym ožiarením elektrónovým lúčom) majú výšku niekoľko nm*	prijatá	
IV	*deponované objekty majú tvar pravidelného ihlanu*	zamietnutá	
	Výška deponovaného objektu	*stred (priemer vnútornej časti)*	*okraj (priemer vyvýšenej časti)*
V.	*priamo úmerná veľkosti elektrónovej dávky*	prijatá	nemožno rozhodnúť
VI.	*nepriamo úmerná veľkosti prúdu*	prijatá	zamietnutá
VII.	*nezávisí na urýchľovacom napätí elektrónového lúča*	zamietnutá	zamietnutá
VIII.	*nezávisí na prekryve*	zamietnutá	nemožno rozhodnúť
IX.	*nezávisí na šírke vrstvy SiO_2*	zamietnutá	zamietnutá
X.	*existencia bodu v ktorom sa skokovo mení derivácia závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti elektrónovej dávky a veľkosti prúdu elektrónového lúča*	zamietnutá	zamietnutá

Tabuľka 2 Zhrnutie výsledkov meraní
V tabuľke je uvedené zhrnutie hypotéz a ich testovania.

Hypotéza X. (o existencii bodu v ktorom sa skokovo mení derivácia závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti elektrónovej dávky a veľkosti prúdu elektrónového lúča) bola zamietnutá, keďže v grafoch prílohy 2. a 3. nie je možné pozorovať výraznú zmenu priebehu od určitej hodnoty prúdu (resp. dávky).
Testovanie hypotéz I.-IX bolo popísané v praktickej časti (3.2.–3.3.).
Je nutné zdôrazniť, že závery testovania hypotéz platia iba v intervale hodnôt, v ktorom boli experimenty uskutočnené.
Ďalšia diskusia výsledkov je v závere práce.

Záver

Témou mojej práce bolo skúmanie vplyvu elektrónového lúča na tenké vrstvy oxidov. V rámci nej bola práca zameraná na štúdium a skúmanie javu nazývaného kontaminácia vzorky, prejavujúceho sa ovplyvňovaním povrchu vzorky pri pozorovaní na elektrónovom mikroskope.

Teoretická časť je rozdelená na popis elektrónovej mikroskopii a popis mikroskopii atomárnych síl, ktorá sa ukázala ako vhodný nástroj pre skúmanie vyššie uvedeného fenoménu.

Jadrom práce je samotný popis pozorovania, pričom boli formulované hypotézy, ktoré boli v práci testované. Základným riešeným problémom pritom bol popis mechanizmu zmeny odtieňu pri pozorovaní povrchu vzorky SiO_2/Si(100) rastrovacím elektrónovým mikroskopom.

Záver, ku ktorému sa pri tom dospelo je, že pôsobením elektrónového zväzku sa na povrchu vzorky vytvárajú objekty s výškou niekoľko nm a inou (nižšou) emisnou schopnosťou ako povrch vzorky.

Zvyšok práce je potom venovaný meraniu závislosti výšky objektu na rôznych premenných. Keďže sa ukázalo, že objekt má vo vertikálnej rovine tvar zrezaného ihlanu so zvýraznenými okrajmi pre vyhodnocovanie boli definované veličiny výška stredu (priemerná výška vnútornej časti objektu) a rast okraju (priemerná výška okrajov). O závislostiach boli formulované hypotézy, ktoré boli na základe pozorovaní testované. Výsledky testovania hypotéz sú uvedené v tabuľke 2.

Experimenty (k overeniu hypotéz) boli založené na selektívnom ožarovaní povrchu vzorky rastrovacím elektrónovým mikroskopom. Meranie ožiarených častí bolo uskutočnené pomocou mikroskopu atomárnych síl a vyhodnocované v aplikácie Gwyddion.

Vo všeobecnosti o vzniknutých objektoch možno povedať, že ich výška (a to ako okrajov tak i vnútornej časti) je závislá takmer na všetkých testovaných premenných, pričom závislosti sú značne nelineárne.

Očakávaným výsledkom bol rast stredu objektu so zvyšujúcou sa dávkou. Trend je výrazný hlavne pri nižších prúdoch (14,65 pA, 11,1 pA). Rovnako očakávaným bol pokles výšky stredu objektu pri zvyšujúcom sa prúde. Zaujímavým zistením bolo, že pokles bol iba do hodnoty približne 100 pA, ďalej výška stredu ostáva na približne konštantnej úrovni. Veličina ovplyvňujúca výšku stredu objektu je i hodnota prekryvu *O*, pričom bol pozorovaný mierny rast výšky stredu objektu pri zvýšení hodnoty prekryvu.

Rastu okrajov je náročnejšie postihnúť závislosťami na uvedených veličinách a z uskutočnených meraní nie je možné vysloviť jasný záver o trende závislostí.

Verím, že merania a použité pracovné algoritmy mojej práce pomôžu pri ďalšom skúmaní uvedeného javu. Myslím, že pre zistenie presného mechanizmu rastu objektov na povrchu je nutné uskutočniť ešte väčšie množstvo meraní a experimentov.

Použitá literatúra:

Monografie

[1] ZHOU W., ZHONG L., Scanning microscopy for nanotechnology: techniques and applications /New York: Springer, 2007. xiv, 522 s. :. ISBN 0-387-33325-8,s 2, s 3,s 4,s 6, s 7, s 8, s, s 23, s 24, s 27, s 28, s 29, s 30,

[2] MIRONOV V. L., Fundamentals of scanning probe microscopy, The Russian Academy of Sciences, Nizhniy Novgorod, 2004, [cit. 2010-04-03]
Dostupný z WWW: <http://www.padova.infm.it/torzo/Mironov_SPM.pdf >, s 5, s 8, s 9, s 54, s 55, s 62

[3] UTKE H.; HOFFMAN P.; MELNGAILIS J.; Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication, American Vacuum Society, 11 August 2008, s 1279, ISBN:10.11161.2955728, s 1203

[4] SUŠKIN N.; ROZSÍVAL M., Elektronový mikroskop. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. 257 s. ISBN 301-05-34, s 13, s 25, s 26, s 27, s 28, s 29, s 31, s 32, s 34, s 35, s 37, s 39, s 55, s 56, s 62

[5] OATLEY C.W., The Scanning Elektron Microscope. Part 1 /Cambridge: Cambridge University Press,1972. 194 s. ISBN 0-521-08531-4, s 7

[6] BARTL P., Metody elektronové mikroskopie. 1. vyd. Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, 1964. 399 s, ISBN 539.28621.358.833 ,s 17,

[7] HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J., Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. V Brně : Vutium, 2000. 1 s. ISBN 8021418680. s 986,

[8] BARTOŠÍK, M.: Aplikace AFM/STM v oblasti nanotechnologií. [Diplomová práce.] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 96 s.

Internetové zdroje

[9] Internetová stránka wikipedia - slobodná encyklopédia, [cit. 2010-04-03]
Dostupný z WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_lithography >

[10] Internetová stránka Opticsmanufacturing – informácie o výrobe mikrooptiky [cit. 2010-04-03] Dostupný z WWW: < http://www.opticsmanufacturing.net/index.php?id=22 >

[11] Internetová stránka Strednej odbornej školy geodetickej
[cit. 2010-04-03] Dostupný z WWW: < http://www.sgs.edu.sk/HTML/geodezia1_4.htm>

Zoznam použitých skratiek

kap.	kapitola
obr.	obrázok
SEM	rastrovací elektrónový mikroskop
AFM	mikroskop atomárnych síl
SPM	rastrovacia sondová mikroskopia
SE	sekundárne elektróny
BSE	spätne odrazené elektróny
PEZ	Primárna excitačná zóna

Zoznam definovaných veličín

<u>kontrast</u> K

$$K = \frac{J_o}{J_p} = \frac{n_o}{n_p},$$

kde J_o je jas objektu, J_p je jas pozadia, n_o (n_p) je množstvo detegovaných sekundárnych elektrónov z pozorovaného objektu (z pozadia).

<u>výšku rastu</u> h_r

$$h_r = h_o - h_s,$$

h_s je priemerná výška vnútornej časti objektu, h_o je priemerná výšky okrajov objektu $(h_o \geq h_s)$

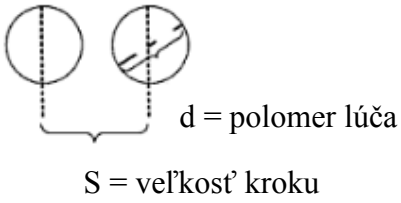
Obsah príloh

Príloha 1 1
Prekryv 1
Príloha 2 2
Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky 2
2.1. Pri prúde 747 pA 2
2.2. Pri prúde 201 pA 2
2.3. Pri prúde 83,8 pA 2
2.4. Pri prúde 35,1 pA 3
2.5. Pri prúde 14,65 pA 3
2.6. Pri prúde 11,1 pA 3
Príloha 3 4
Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti prúdu 4
3.1. Pri elektrónovej dávke 100 4
3.2. Pri elektrónovej dávke 200 4
3.3. Pri elektrónovej dávke 300 4
Príloha 4 5
Závislosť výšky okrajov na veľkosti dávky. 5
4.1. Pri prúde 747 pA 5
4.2. Pri prúde 201 pA 5
4.3. Pri prúde 83,8 pA 5
4.4. Pri prúde 35,1 pA 6
4.5. Pri prúde 14,65 pA 6
4.6. Pri prúde 11,1 pA 6
Príloha 5 7
Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti prúdu 7
5.1. Pri elektrónovej dávke 100 7
5.2. Pri elektrónovej dávke 200 7
5.3. Pri elektrónovej dávke 300 7
Príloha 6. 8
Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti urýchľovacieho napätia 8
6.1. Pri prúde 20,2 pA 8
6.2. Pri prúde 420 pA 8
Príloha 7 9
Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na voľbe substrátu 9
7.1. Pri prúde 20,2 pA 9
7.2. Pri prúde 420 pA 9
Príloha 8 10
Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča 10
8.1. Pri prúde 20,2 pA 10
8.2. Pri prúde 420pA 10
Príloha 9 11
Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča 11
9.1. Pri prúde 20,2 pA 11
9.2. Pri prúde 420 pA 11

Príloha 1

Prekryv

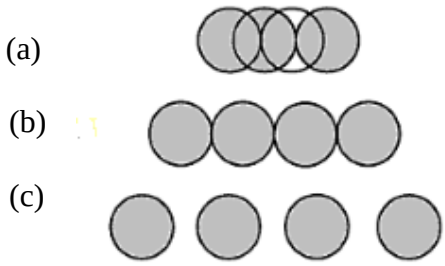
Prekryv je definovaný pomocou polomeru elektrónového lúča a veľkosti kroku (vzdialenosť dvoch miest ožarovaných elektrónových lúčom).



Definujeme ho ako:

$$O = \frac{d-s}{d}$$

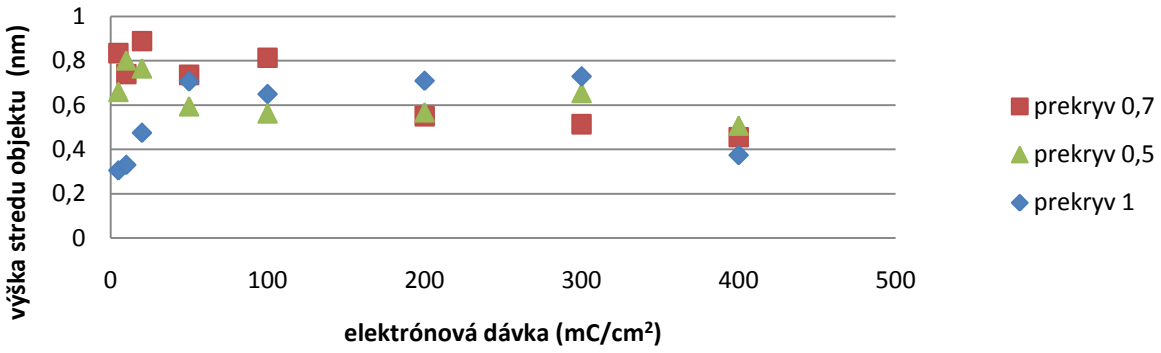
Môže byť nulový (b), pozitívny (c), ako i negatívny (a).



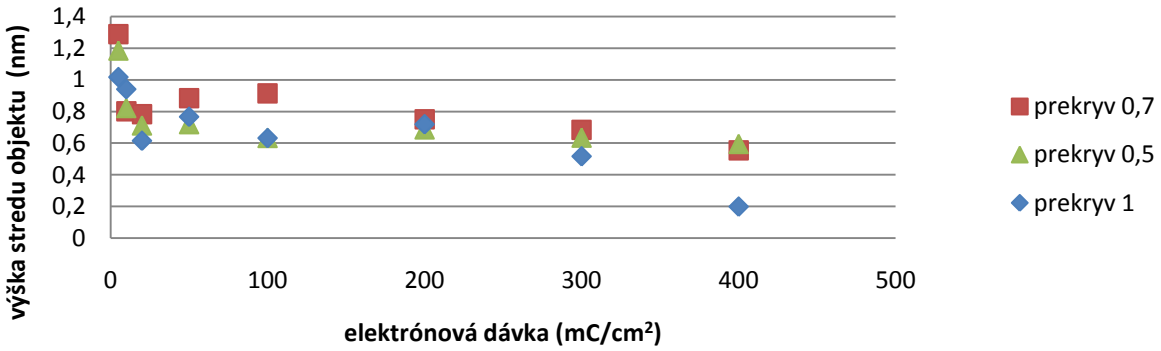
Príloha 2

Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti dávky

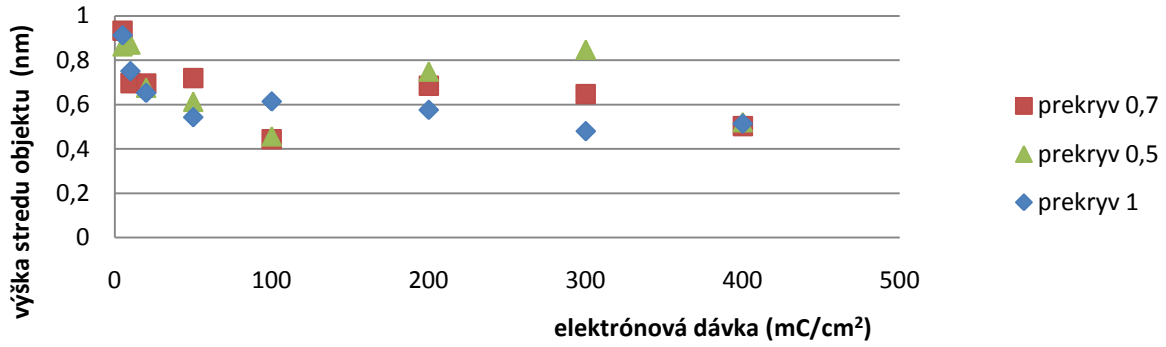
2.1. Pri prúde 747 pA



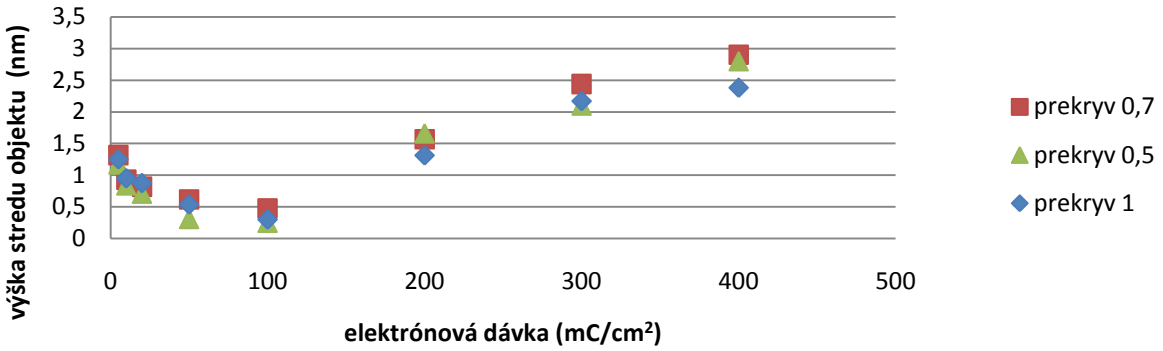
2.2. Pri prúde 201 pA



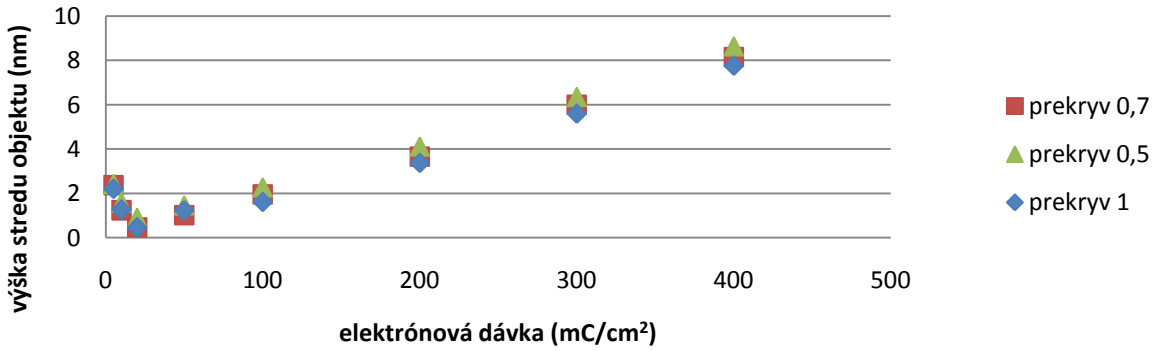
2.3. Pri prúde 83,8 pA



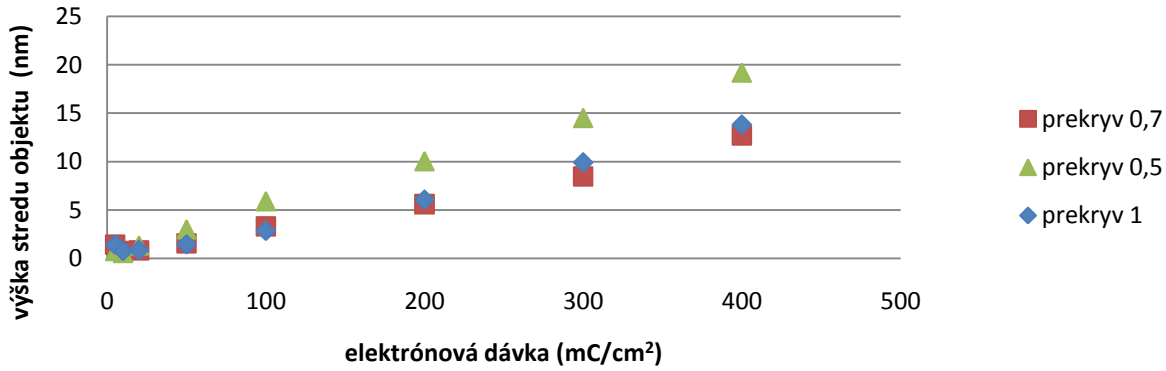
2.4. Pri prúde 35,1 pA



2.5. Pri prúde 14,65 pA



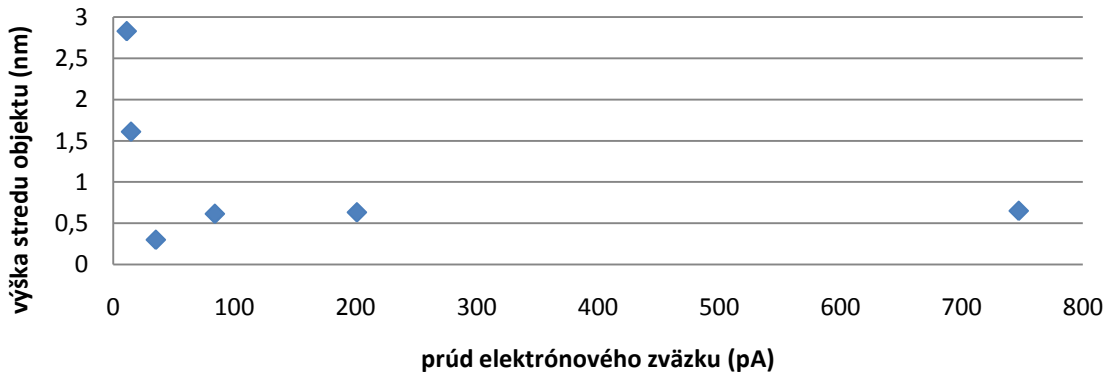
2.6. Pri prúde 11,1 pA



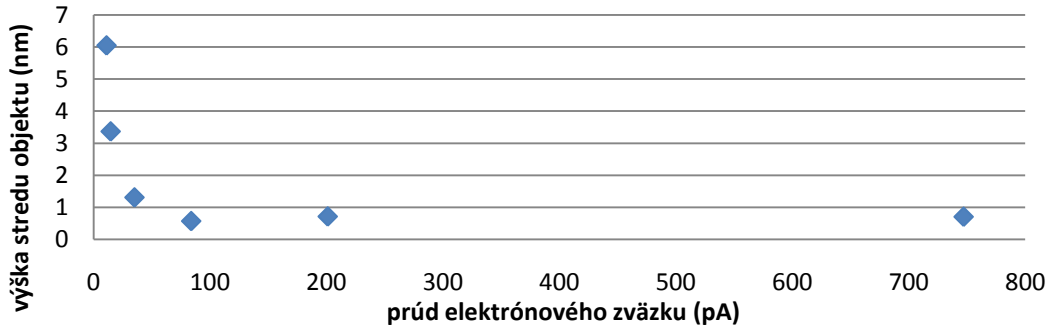
Príloha 3

Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti prúdu

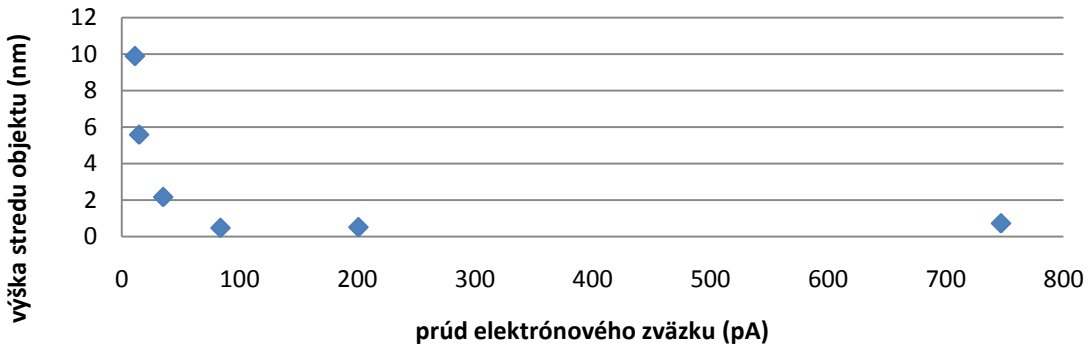
3.1. Pri elektrónovej dávke 100 mC/cm^2



3.2. Pri elektrónovej dávke 200 mC/cm^2



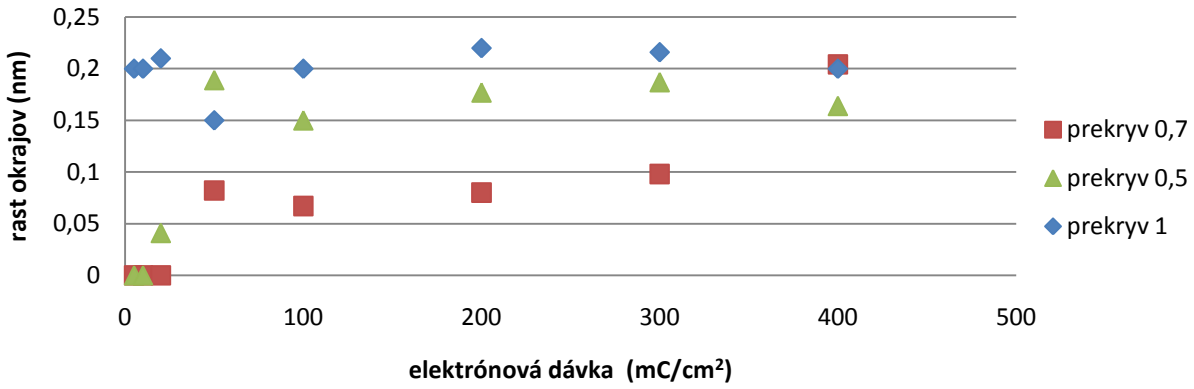
3.3. Pri elektrónovej dávke 300 mC/cm^2



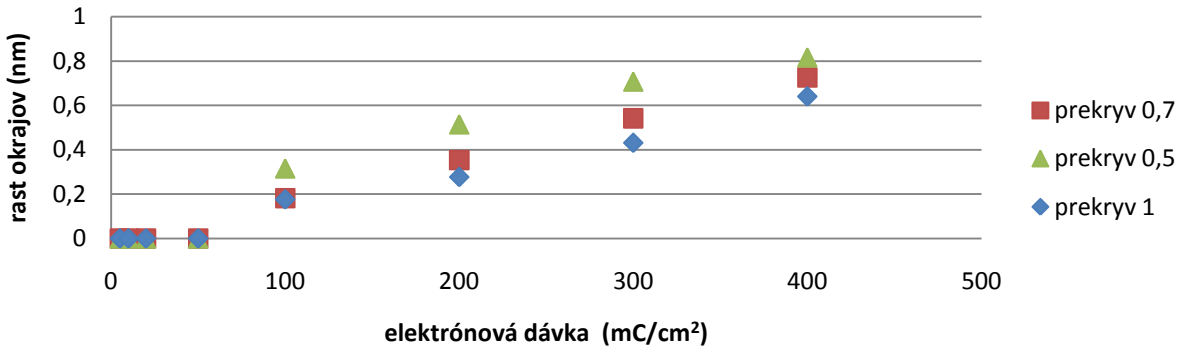
Príloha 4

Závislosť výšky okrajov na veľkosti dávky.

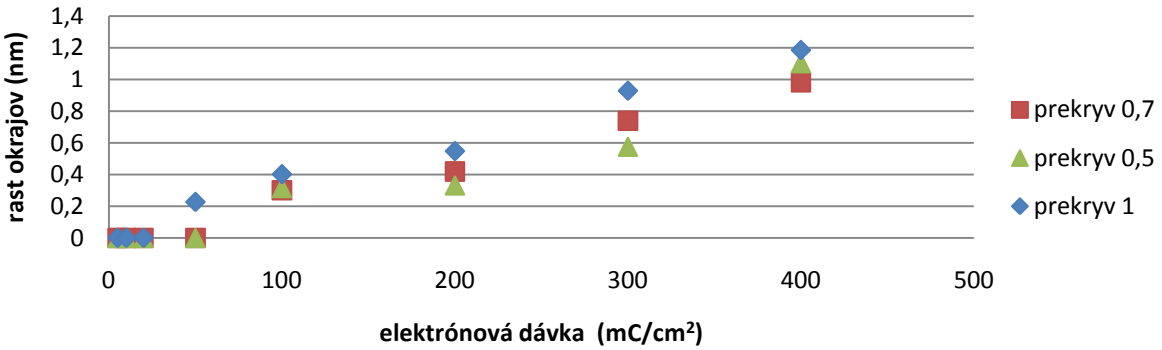
4.1. Pri prúde 747 pA



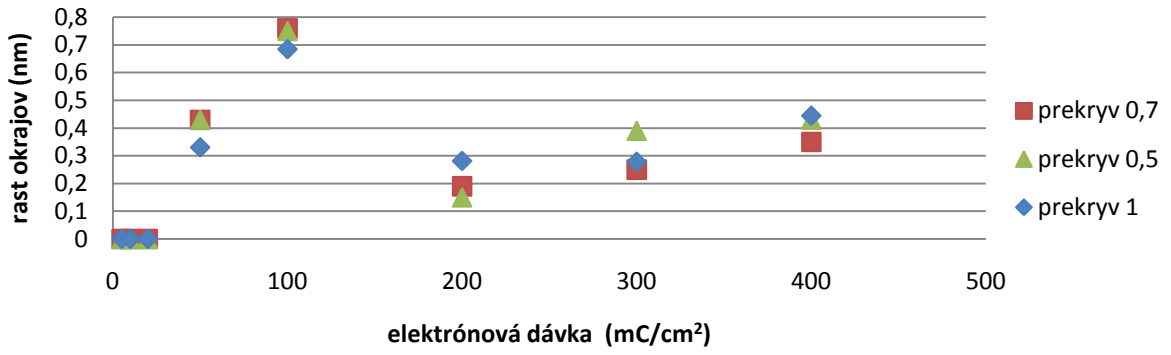
4.2. Pri prúde 201 pA



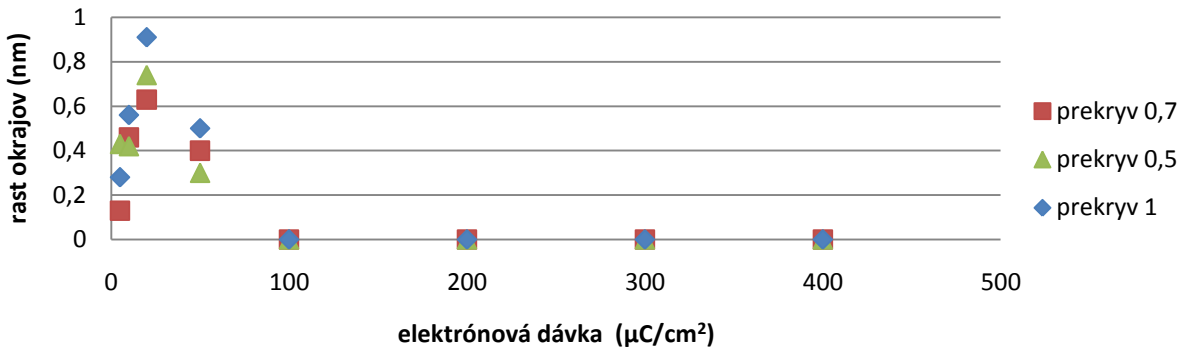
4.3. Pri prúde 83,8 pA



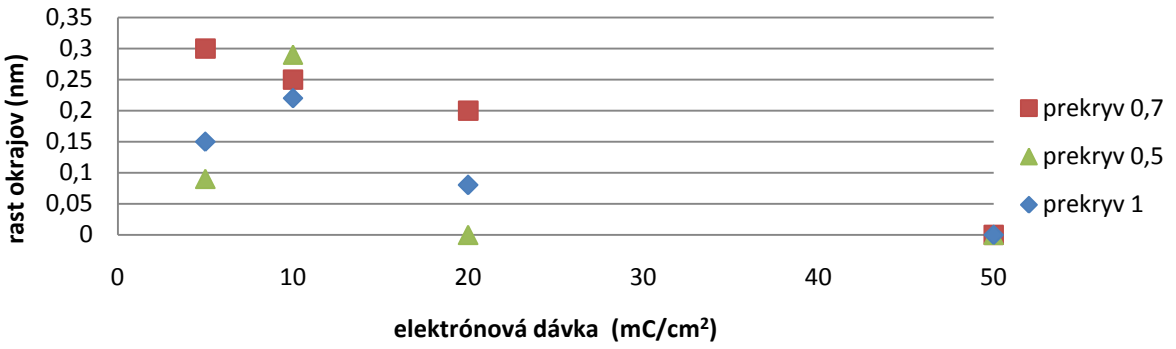
4.4. Pri prúde 35,1 pA



4.5. Pri prúde 14,65 pA



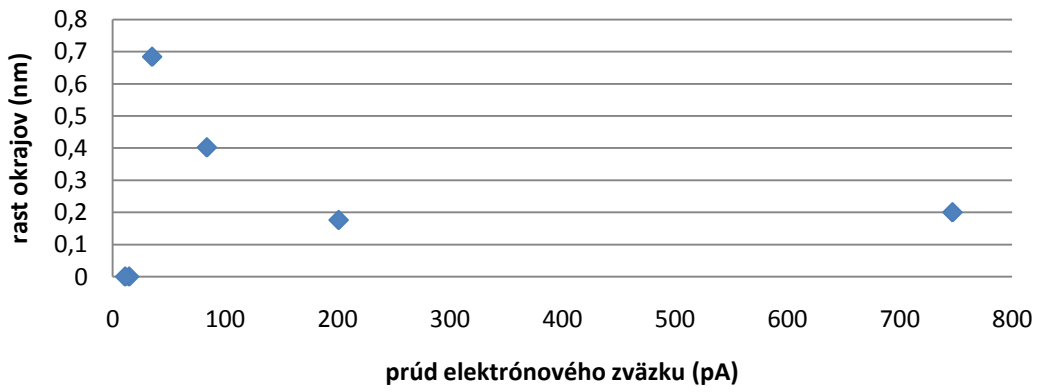
4.6. Pri prúde 11,1 pA



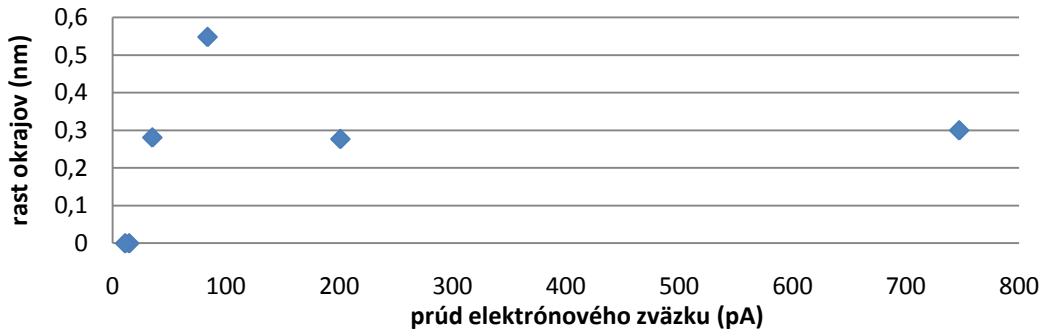
Príloha 5

Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti prúdu

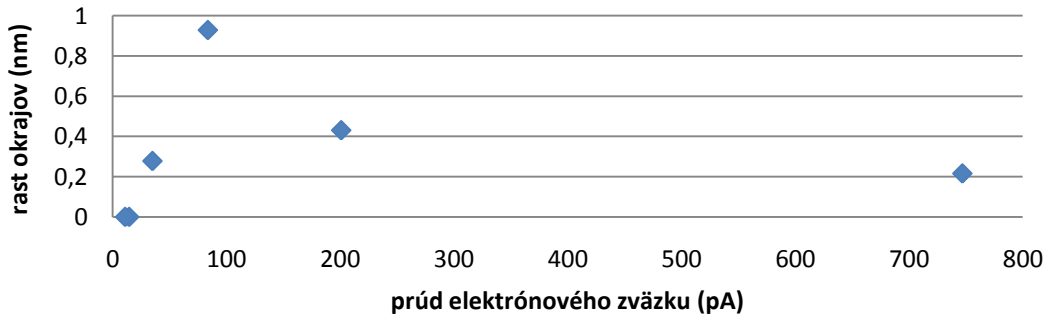
5.1. Pri elektrónovej dávke 100 mC/cm^2



5.2. Pri elektrónovej dávke 200 mC/cm^2



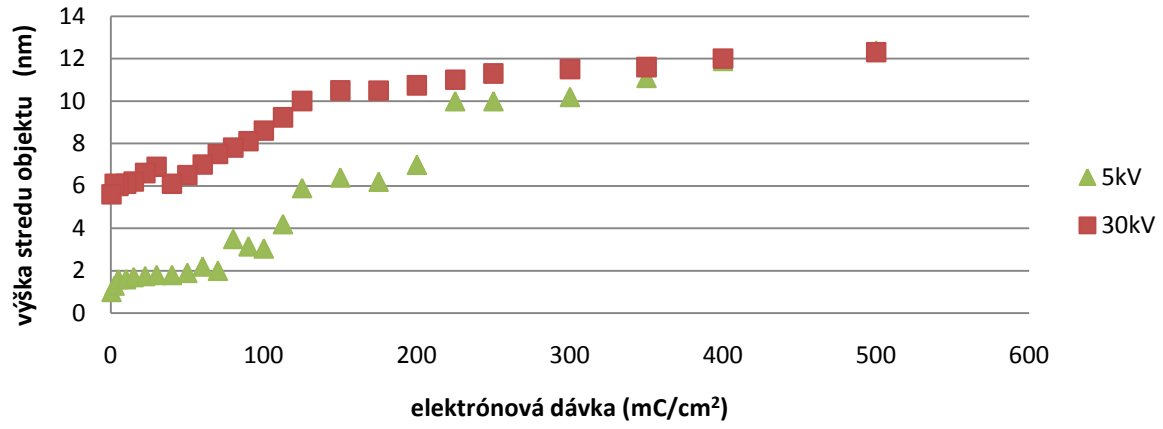
5.3. Pri elektrónovej dávke 300 mC/cm^2



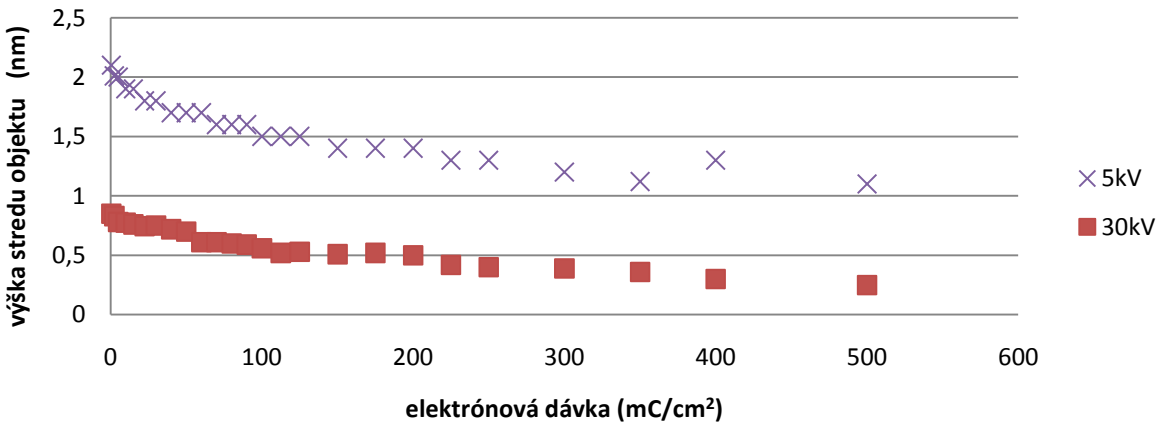
Príloha 6

Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na veľkosti urýchľovacieho napätia

6.1. Pri prúde 20,2 pA



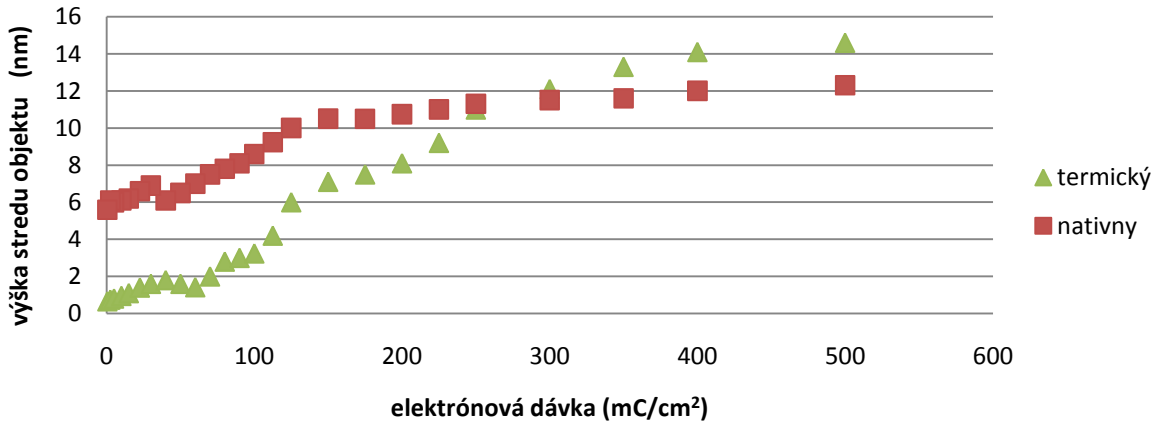
6.2. Pri prúde 420 pA



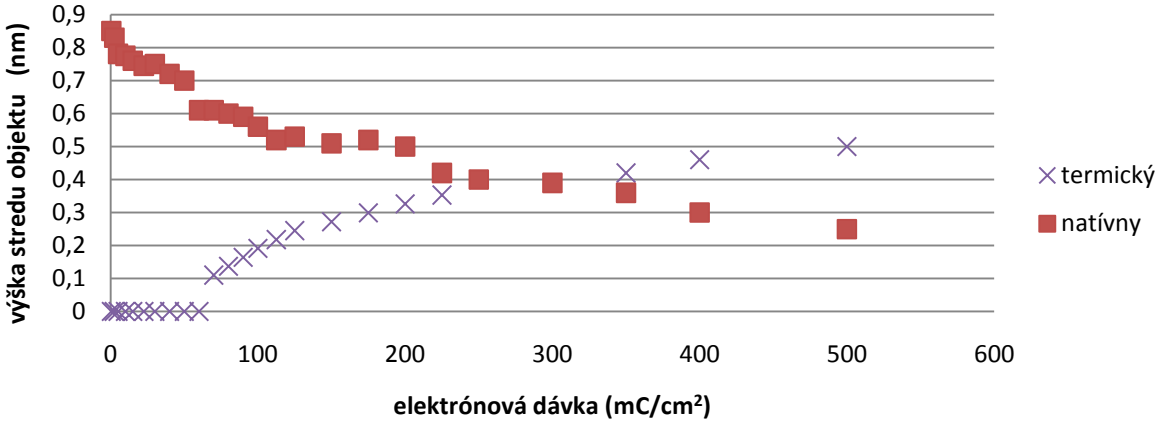
Príloha 7

Meranie závislosti výšky stredu deponovaného objektu na voľbe substrátu.

7.1. Pri prúde 20,2 pA



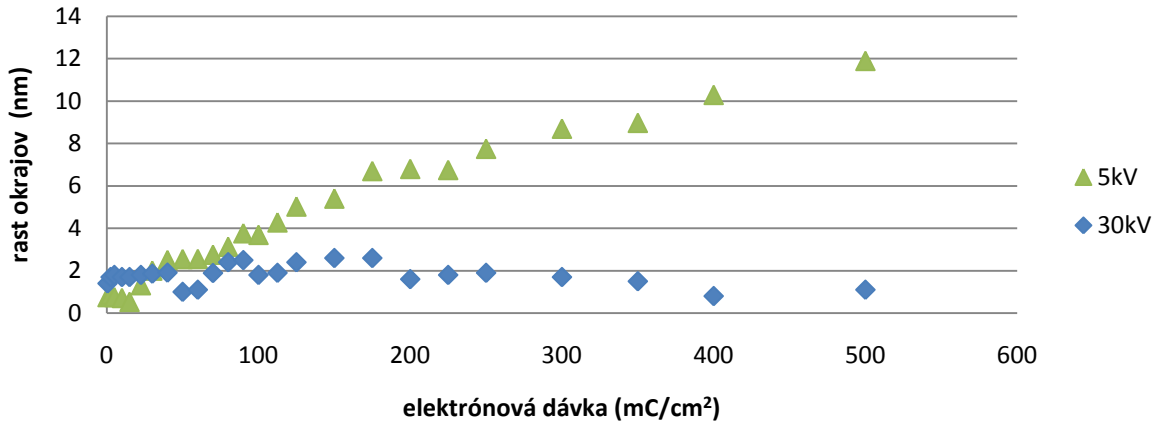
7.2. Pri prúde 420 pA



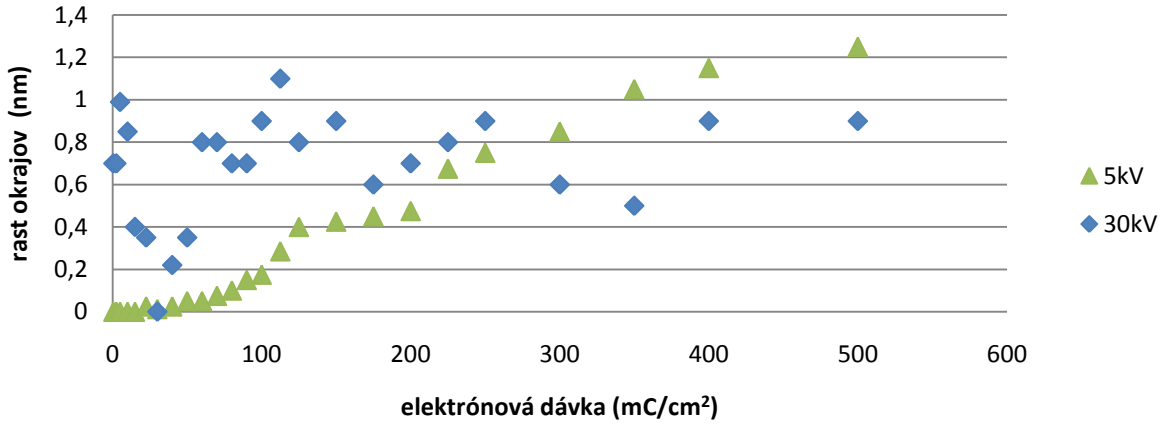
Príloha 8

Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča

8.1. Pri prúde 20,2 pA



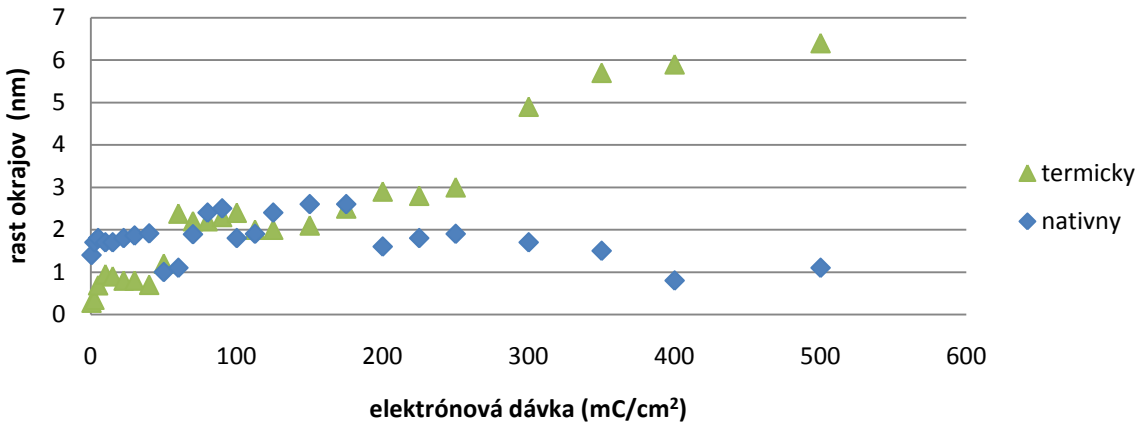
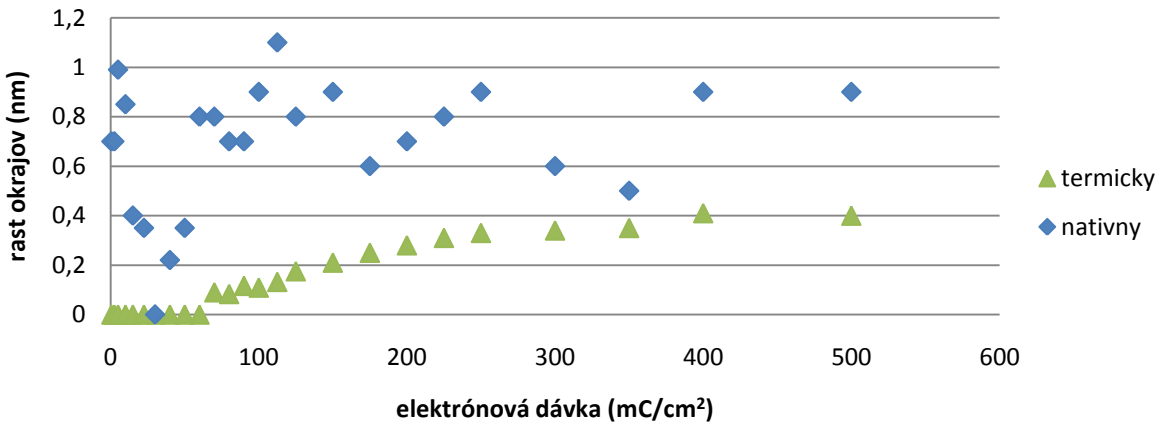
8.2. Pri prúde 420 pA



Príloha 9

Meranie závislosti výšky okrajov na veľkosti urýchľovacieho napätia elektrónového lúča

9.1. Pri prúde 20,2 pA



9.2. Pri prúde 420 pA