



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Peter Slezák

**Příprava povrchu Si(110)-Tl pro depozici organických  
molekul**

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Pavel Kocán, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2018

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce doc. RNDr. Pavlovi Kocánovi, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, ktorý mi venoval pri riešení a spracovania bakalárskej práce.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 16. Května 2016

podpis

Název práce: Příprava povrchu Si(110)-Tl pro depozici organických molekul

Autor: Peter Slezák

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Pavel Kocán, Ph.D., KFPP - MFF UK

Abstrakt:

Táto bakalárska práca sa zaoberá tvorbou anizotropného povrchu Si(110)-Tl, ktorý ďalej bude slúžiť ako substrát pre depozíciu organických molekúl ftalocyaninov medi. Cieľom bolo identifikovať relevantné parametre prípravy a optimalizovať výrobný proces povrchu Si(110) s rekonštrukciou (16x2), nájsť najlepšie parametre pre depozíciu tália na tento povrch tak, aby vznikol povrch Si(110)-Tl s rekonštrukciou (1x1) a otestovať vhodnosť tohto výsledného povrchu ako substrát pre ďalšiu depozíciu organických molekúl. V rámci práce je popísaná aparátúra použitá pri meraniach, sú popísané jednotlivé meracie postupy a tiež fyzikálne princípy spojené s prevádzkou STM.

Klíčová slova: STM, Si(110), Tl, 16x2, 1x1, ftalocyaniny

Title: Preparation of the Si(110)-Tl surface for deposition of organic molecules

Author: Peter Slezák

Department: Department of Surface and Plasma Physics

Supervisor: doc. RNDr. Pavel Kocán, Ph.D., KFPP - MFF UK

Abstract:

This bachelor thesis deals with the formation of an anisotropic surface Si (110) -Tl, which will serve as a substrate for the deposition of organic molecules of copper phthalocyanines. The aim was to identify relevant preparation parameters and optimize the producing process of surface Si (110) with the reconstruction (16x2), to find the best parameters for deposition of thallium on this surface so as to produce a surface Si (110) -Tl with reconstruction (1x1) and test the suitability of this surface as a substrate for further deposition of organic molecules. In the course of the work, the apparatus used for measurements is described, the individual measurement procedures and the physical principles associated with STM operation are also described.

Keywords: STM, Si(110), Tl, 16x2, 1x1, phthalocyanines

## Obsah

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | Úvod.....  | 1  |
| 2      | STM.....   | 2  |
| 2.1    | Princíp činnosti.....  | 2  |
| 2.1.1  | Tunelový jav.....  | 2  |
| 2.1.2  | Mód konštantného prúdu .....                                   | 2  |
| 2.1.3  | Mód konštantnej výšky .....                                    | 3  |
| 2.1.4  | Zobrazenie výsledného obrazu.....                              | 4  |
| 2.1.5  | Teplotné chyby merania a chyby v dôsledku pohybu keramiky..... | 4  |
| 2.2    | Zobrazenie mikroskopu .....                                    | 5  |
| 2.3    | Príprava merania.....  | 5  |
| 3      | Si (110) .....   | 6  |
| 3.1    | Kovy na Si (110) .....   | 9  |
| 4      | Aparatúra STM .....  | 11 |
| 4.1    | Vonkajšia časť .....   | 11 |
| 4.1.1  | Tlmiaci podstavec <a> .....                                    | 11 |
| 4.1.2  | Iontovo-Sorbčné čerpadlo <b>.....                              | 11 |
| 4.1.3  | Ionizačný vakuometer <c>.....                                  | 11 |
| 4.1.4  | Topné pásy <d>.....  | 12 |
| 4.1.5  | Vhľad do vnútornej časti aparatúry <e> .....                   | 12 |
| 4.1.6  | Náhľad na hrot s kamerou <f> .....                             | 12 |
| 4.1.7  | Počítač na ovládanie aparatúry <g> .....                       | 12 |
| 4.1.8  | Zdroje napätia <h> .....                                       | 12 |
| 4.1.9  | Zdroj vysokého napätia <i> .....                               | 12 |
| 4.1.10 | Naparovacia časť <j> .....                                     | 12 |
| 4.1.11 | Kryštál pre meranie depozície <k> .....                        | 12 |
| 4.2    | Vnútoraná časť .....   | 13 |
| 4.2.1  | Naparovadlá .....  | 13 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.2.2 | Táliové naparovadlo .....                   | 13 |
| 4.2.3 | Vyparovadlá pre organické molekuly .....    | 13 |
| 4.2.4 | Kryštál pre meranie depozície.....          | 14 |
| 4.2.5 | Hrot .....                                  | 15 |
| 4.2.6 | Otočný mechanizmus so vzorkami .....        | 16 |
| 4.2.7 | Vzorky.....                                 | 16 |
| 4.2.8 | Sublimačná titánová výveva .....            | 16 |
| 4.2.9 | Inchworm .....                              | 16 |
| 4.3   | Softvérová časť.....                        | 16 |
| 4.4   | Určovanie teploty vzorkov a kalibrácia..... | 17 |
| 5     | Príprava čistého povrchu Si(110) .....      | 18 |
| 5.1   | Príprava povrchu .....                      | 18 |
| 6     | Depozícia Tália .....                       | 23 |
| 7     | Depozícia organických molekúl .....         | 31 |
| 8     | Defekty.....                                | 33 |
| 8.1   | Defekty na povrchu s molekulami.....        | 34 |
| 9     | Záver .....                                 | 35 |
| 10    | Zoznam použitej literatúry .....            | 36 |
| 11    | Zoznam použitých skratiek .....             | 38 |

# 1 Úvod

V dnešnej dobe sa už bežne stretávame s pojmom nanotechnológie. Aj napriek tomu že mnoho ľudí vie len, že je to veľmi malé, tak v skutočnosti ani netušia ako často sú s týmito technológiami v bežnom kontakte. Pravdou je, že už niekoľko rokov stále zmešujeme jednotlivé súčiastky zariadení, až sme sa dostali na jednotlivé nanometre, z čoho aj vyplýva názov nanotechnológie. [1] Toto zmenšovanie sa postupne dostáva až na svoj vrchol, kde sú najmenšími súčiastkami jednotlivé molekuly a atómy a presne toto zmenšovanie a získavanie stále väčšieho výkonu zo stále menších zariadení je hlavnou motiváciou modernej fyziky povrchov. Konkrétne by sa dali spomenúť výsledky nedávneho výskumu, pri ktorom bol vytvorený doposiaľ najmenší kremíkový tranzistor, ktorého logické hradlo má veľkosť len jedného nanometra. [2]

Pri takomto zmenšovaní sa dostávame až na rozmery, kde už bežné metódy pozorovania nefungujú, a preto je nutné ísť ešte o krok ďalej. Najvhodnejším nástrojom na pozorovanie objektov týchto rozmerov je STM (scanning tunneling microscope - Řádkovací tunelový mikroskop), ktorý funguje na úrovni jednotlivých molekúl resp. atómov. Bližšie v kapitole STM.

Pri našej práci sa budeme zaoberať základným stavebným kameňom dnešnej modernej technológie, ktorým je kremík. Tento polokov je základom takmer každej elektroniky už od polovice minulého storočia. Za posledných 100 rokov bol predmetom skúmania pre nespočetne veľa prác v celom spektre vedeckých oborov od medicíny až po elektroniku. V elektronike sa nachádza od prvých obrovských tranzistorov až po dnešné miniatúrne mikročipy, ktorých jednotlivé časti už nie sú viditeľné voľným okom. Kremík, podobne ako uhlík a ďalšie prvky IV. skupiny, tvorí kubickú plošne centrovanú kryštalovú štruktúru diamantového typu s mriežkovou konštantou  $a = 5,43 \text{ \AA}$ . Aby som bol konkrétnejší, nebudeme sa zaoberať kremíkom samotným, ale nanoštruktúrami, ktoré na ňom vznikajú a štruktúrami ktoré na ňom vznikajú v kombinácií s inými látkami. Povrch, ktorým sa my budeme zaoberať v tejto práci je konkrétne Si (110). Ten získame rezom kryštálu kremíka kryštalografickou rovinou (110). [3]



## 2 STM

### 2.1 Princíp činnosti

STM je založená na monitorovaní prúdu a využíva kvantový tunelovací jav. Elektróny pri tomto jave prechádzajú z vodivého hrotu do taktiež vodivého vzorku bez priameho mechanického kontaktu. Medzi hrotom a vzorkom je energetická bariéra spôsobená rozdielnymi energiami v elektrónov v kovoch a vo vákuu. Táto bariéra zabraňuje priamemu prechodu elektrónov, ale v prípade, že sa hrot bude nachádzať dosť blízko vzorku nastane tunelový jav a elektróny budú cez bariéru „tunelovať“. Týmto spôsobom sme schopní zobrazovať trojdimenzionálne obrázky jednotlivých povrchov, dokonca aj jednotlivých atómov. Keď je hrot dostatočne blízko povrchu je nutné mať nastavené vhodné napätie (väčšinou medzi 2mV – 2V), pričom sledujeme prúd. STM mikroskop väčšinou využíva dva základné módy a to mód konštantného prúdu a mód konštantnej výšky.

#### 2.1.1 Tunelový jav

Je to kvantový jav známy z kvantovej mechaniky, pri ktorom častice prechádzajú potenciálovou bariérou, ktorá má vyššiu energiu ako energia častice. Takže problém sa dá v jednoduchosti popísať tak, že zväzok elektrónov naráža na bariéru a môže prejsť skrz, alebo sa odraziť. Pravdepodobnosť s akou nastane priechod cez bariéru sa dá znázorniť vzťahom:

$$P_T \propto \exp \left[ -2 \left( \frac{\sqrt{2m(E-U)}}{\hbar} \right) s \right] \quad (1)$$

Kde  $m$  je hmotnosť elektrónu,  $E$  je jeho energia,  $U$  je výška bariéry a  $s$  je jej hrúbka.

To znamená, že veľkosť prúdu tvoreného elektrónmi, ktoré prešli cez bariéru exponenciálne klesá s hrúbkou bariéry. Takže čím je priestor medzi hrotom a vzorkom väčší, tým menší prúd môžeme zachytiť. [1]

#### 2.1.2 Mód konštantného prúdu

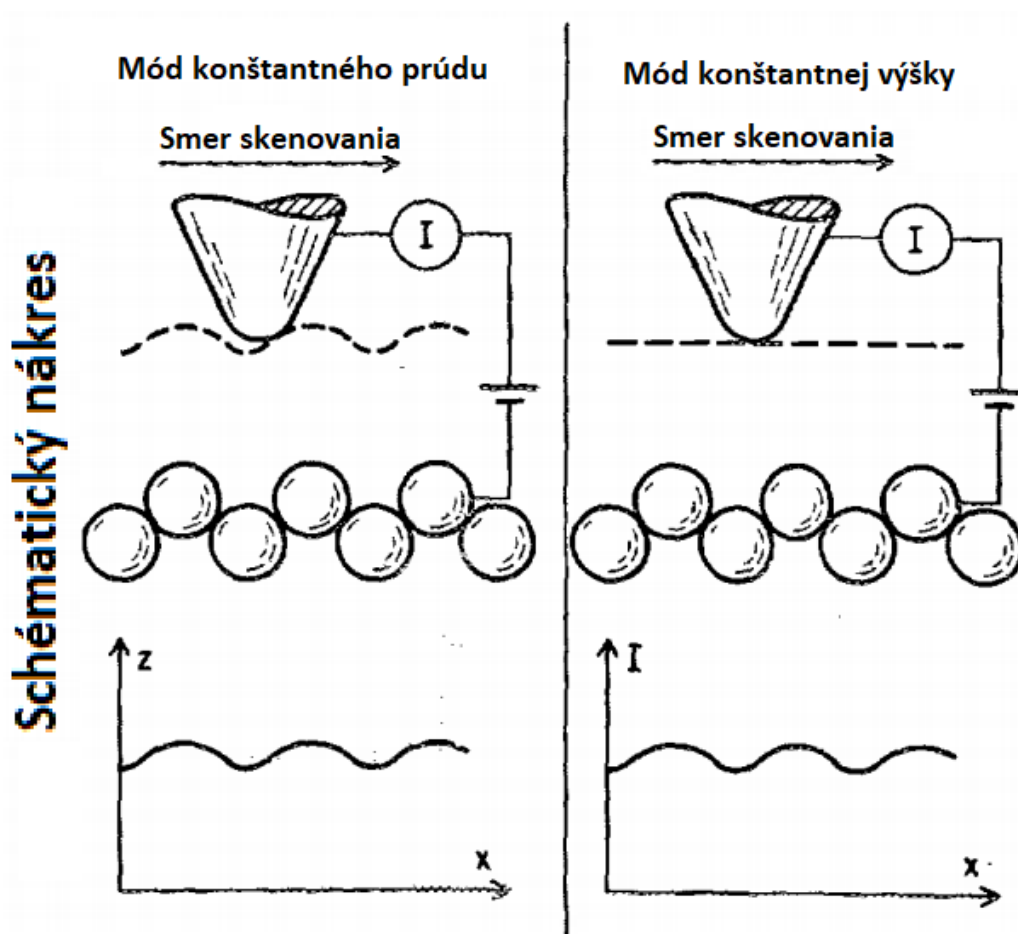
Pri tomto móde prechádza hrot ponad vzorku a sleduje sa prúd, pričom sa pomocou spätnej väzby mení výška nad vzorkom, tak aby prúd ostal konštantný. Keďže prúd prechádzajúci bariérou sa líši exponenciálne, tento spôsob spätnej väzby udržuje bariéru takmer konštantnú.

Obraz vytvorený touto metódou pozostáva z mapy  $z(xy)$ , kde získavame výšku hrotu nad povrchom a zároveň jednotlivé pásy  $x$ , ktorými hrot prechádza. Po dokončení pásu preskočí na začiatok a vytvorí ďalší pás. Rady týchto pásov tvoria osu  $y$ . Výsledný 3D obraz pozostáva z váženej kombinácie  $z$  a  $y$  voči  $x$ . Pre lepšiu predstavu sa schematický náčrt nachádza na Obr. 1 v ľavom stĺpci.

### 2.1.3 Mód konštantnej výšky

Pri tomto móde taktiež pri prechode ponad vzorku sledujeme prúd, ale už nemeňme výšku. Napätie tiež ostáva nemenné. Takže zmena prúdu nám ukazuje členitosť povrchu.

Opäť, obraz vytvorený touto metódou pozostáva z mapy  $I(xy)$ , kde získavame hodnoty prúdu hrotu nad povrchom a zároveň jednotlivé pásy  $x$ , ktorými hrot prechádza. Po dokončení pásu preskočí na začiatok a vytvorí ďalší pás. Rady týchto pásov tvoria osu  $y$ . Výsledný 3D obraz pozostáva z váženej kombinácie  $I$  a  $y$  voči  $x$ . Pre lepšiu predstavu sa schématický náčrt nachádza na Obr. 1 v pravom stĺpci. [4]



Obr. 1 – Schématické znázornenie dvoch základných skenovacích metód, kde v ľavom stĺpci je „mód konštantného prúdu“ a v pravom stĺpci je „mód konštantnej výšky“

#### 2.1.4 Zobrazenie výsledného obrazu

Zobrazenie STM môže byť často zavádzajúce, pretože aj v prípade že vidíme štruktúru povrchu, tak nevidíme polohy jednotlivých atómov a to ani v prípade že máme atomárne rozlíšenie. Keďže veľkosť tunelového prúdu nezávisí len na vzdialenosti vzorku a hrotu, ale aj na konvulcií hustôt elektrónových stavov hrotu a vzorku. Takže neurčujeme priamo topografiu povrchu, ale skôr len rozloženie vlnových funkcií atómov, čo nám v konečnom dôsledku ukazuje topografiu povrchu, ale zároveň aj lokálnu elektrónovú štruktúru povrchu.

#### 2.1.5 Teplotné chyby merania a chyby v dôsledku pohybu keramiky

Pri meraní s STM máme väčšinou také rozlíšenie, že môžeme pozorovať aj tzv. teplotný drift. Tento „drift“ je spôsobený rozdielnymi teplotami aparatury a vzorku,

čo v konečnom dôsledku spôsobuje, že vzorek z pod mikroskopu doslova „uteká“. V praxi to znamená, že sa nám skenovaný obrázok vždy mierne posúva a pri vyšších teplotách môže nastať rozmazanie alebo zakrivenie, ktoré sa nazýva creep. Tieto chyby merania sa často dajú softwarovo meniť, ale nikdy nie úplne, nakoľko sa relatívna teplota vzorku a keramiky môže meniť aj po niekoľkých hodinách. Neschopnosť dokonale kompenzovať tepelný drift je spôsobená najmä jednotlivými pohybmi keramiky. Pretože aj pri nižších teplotách, ktoré výrazne redukujú tepelný drift, pri každom presune po povrchu piezokeramika síce robí väčšinu pohybu, ale potom následne ešte dobieha do miesta určenia. Toto „dotekanie“ môže trvať ešte ďalších niekoľko desiatok minút.

## 2.2 Zobrazenie mikroskopu

V ďalších kapitolách budem postupne uvádzať obrázky zobrazenia rôznych povrchov v pomerne dobrom rozlíšení, ale rád by som priblížil presnejšie čo vlastne na výsledných obrázkoch STM môžeme pozorovať. Úplne základným predpokladom pre dosiahnutie takéhoto obrázku je dobrý hrot. Takýto hrot musí mať čo najmenší polomer krivosti, takže musí byť zaostrený ideálne na jeden atóm. Takýto hrot prakticky nie je možné normálne vyrobiť, avšak aj keď nemáme takýto hrot bežne vytvoriteľný, keď máme kuželovite zakončený makroskopický hrot, stačí aby jeden atóm na konci vyčnieval viac ako ostatné a väčšina prúdu potom bude tiecť týmto atómom, čo sa v konečnom dôsledku bude javiť ako hrot zaostrený na jeden atóm, čo znamená najmenší polomer krivosti.

## 2.3 Príprava merania

Meranie prebieha tak, že ako prvé urobíme hrubý posuv hrotu k vzorku pomocou inchwormu (bližšie popísané v podkapitole 4.2.9). Tento pohyb je čisto mechanický a po dostatočnom priblížení jeho rýchlosť spomalíme. Túto procedúru rýchleho približovania robíme pomocou kamery slúžiacej na priamy náhľad na hrot, ktorá je zobrazená na Obr. 4 <f>. Po tom ako priblížime hrot dostatočne blízko (približne milimeter od povrchu), použijeme funkciu autoapproach, ktorá posúva hrot po malých oblastiach (približne desiatky nanometrov) a po každom posunutí kontroluje, či je aparátúra schopná naviazať kontakt. Takto sa hrot približuje ku vzorku až pokiaľ nedôjde ku kontaktu, čím sa v tomto prípade myslí začiatok prechodu tunelového prúdu.

### 3 Si (110)

V dnešnej dobe už prebehlo niekoľko výskumov týkajúcich sa Si (110) a aj keď ich je relatívne veľa, stále ich nie je ani zlomok toho, čo majú na konte príbuzné povrchy ako Si (111) alebo Si (100). Sice prvá zmienka o Si (110) bola už koncom 90tych rokov, avšak výskum tohto povrchu začína byť zaujímavý až teraz vďaka reálnej možnosti uplatnenia jak v spintronike tak aj v jednotlivých zariadeniach.

Až do nedávna boli spiny elektrónov ignorované v elektronike. Pomerne nová technológia, ktorá sa nedávno vyvinula, sa nazýva „Spintronika“, čo znamená elektronika využívajúca spinu elektrónu k uchovávaní, prenosu a spracovaniu informácií.

Spintronika je dnes jednou z najrýchlejšie sa rozvíjajúcich oblastí elektroniky a spája jak spin, tak aj náboj elektrónov na získanie zariadení s novou funkčnosťou a zvýšeným výkonom. Výhodou týchto nových zariadení je zvýšená rýchlosť spracovania dát, znížená spotreba elektrickej energie a zvýšená hustota tranzistorov v porovnaní s konvenčnými polovodičovými zariadeniami. V rámci tohto výskumu sú zaujímavé magnetické polovodiče (DMS - Dilute Magnetic Semiconductor), ktorých cieľom je zachovať feromagnetické vlastnosti aj pri izbových teplotách. To ponúka príležitosť pre novú generáciu zariadení spájajúcich štandardnú mikroelektroniku so spin-závislými efektmi, ktoré vznikajú z interakcie medzi spinom nosiča a magnetickými vlastnosťami materiálu.

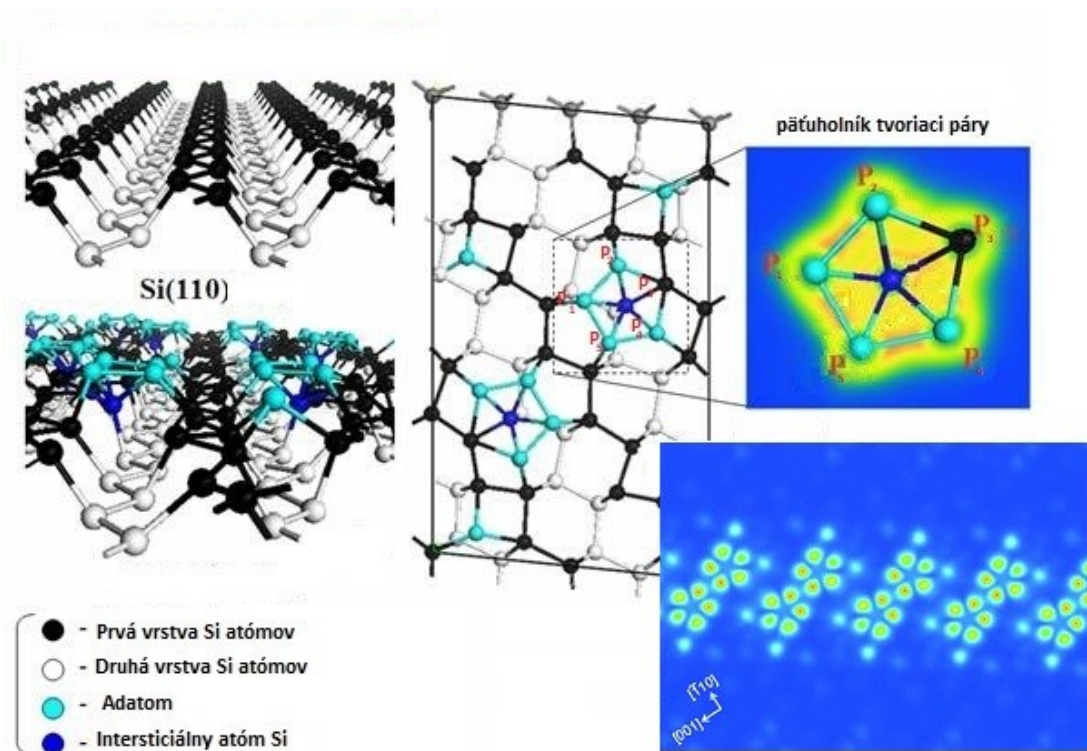
Štruktúry Si(001) and Si(111) sú v dnešnej dobe pomerne dobre preskúmané, zatiaľ čo model povrchu Si (110) ešte nebol dostatočne objasnený a potvrdený. Pri trendoch miniaturizácií zariadení sa používajú dobre známe Si(001) and Si(111). Si(001) sa využíva najmä v MOS (Metal Oxide Semiconductor) zariadeniach, avšak pri výrobe CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) zariadení sa stále častejšie začína používať aj Si (110) vďaka využitiu vysokej pohyblivosti dier. Napríklad vertikálne Fin-FET (Fin Field-effect transistor) využívajúce Si(110) povrch by mohlo byť dobrým kandidátom na vysokovýkonné p-FET tranzistory [5].

Takže dôležitosť Si(110) v mikroelektronike začína stúpať. Pre vysokú pohyblivosť dier pomaly nahrádza Si(001), ale taktiež má silnú anizotropiu, čo môže

byť veľmi užitočné pri tvorení jednodimenzionálnych nanoštruktúr. [6-7] Taktiež sa v poslednej dobe ukázal ako výborný substrát pre formovanie grafénovo kremíkových štruktúr (graphene-on-silicon – GOS[8-9]).

Čistý povrch (bez pridania ďalších materiálov) Si(110) s rekonštrukciou  $16 \times 2$  sa štandardne získava po ohriatí na  $1200^\circ\text{C}$  [10]. Potom je pomocou STM (skenovacia tunelová mikroskopia) [11] možné zobrazit' paralelné cikcak reťazce pozostávajúce z párov päťuholníkov usporiadaných striedavo nahor a nadol v monoatomárnych výškových krokoch. Aj napriek tomu, že existuje niekoľko modelov, tak sa v nich nachádzajú isté nekonzistencie a žiaden z nich nebol finálne potvrdený.

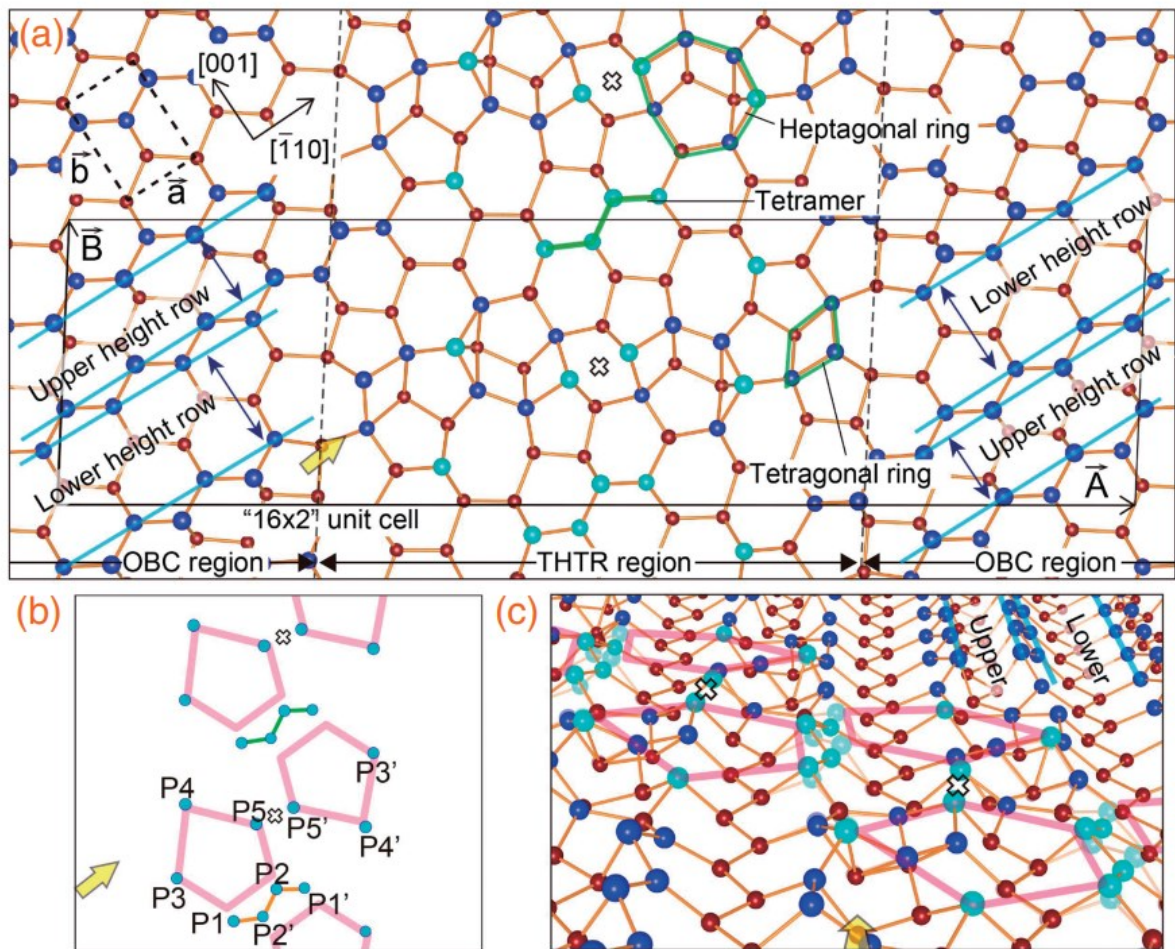
Asi najviac citovaný a používaný je model uvádzaný v [12]. V tomto modeli nám štyri atómy tvoria tetramér a spolu s intersticiálnym atómom Si tvoria päťuholník. Takéto päťuholníky potom tvoria „cikcak“ terasy, ktoré môžeme vidieť bežne na STM obrázkoch. Tento model bol neskôr podrobnejšie popísaný v [13]. Pre lepšie pochopenie tento model uvádzam na Obr. 2.



Obr.2 - Zobrazenie modelu z [12], kde čierne atómy zobrazujú vrchnú vrstvu atómov a biele spodnú. Tirkisové atómy označujú adatómy a modré intersticiálne atómy.



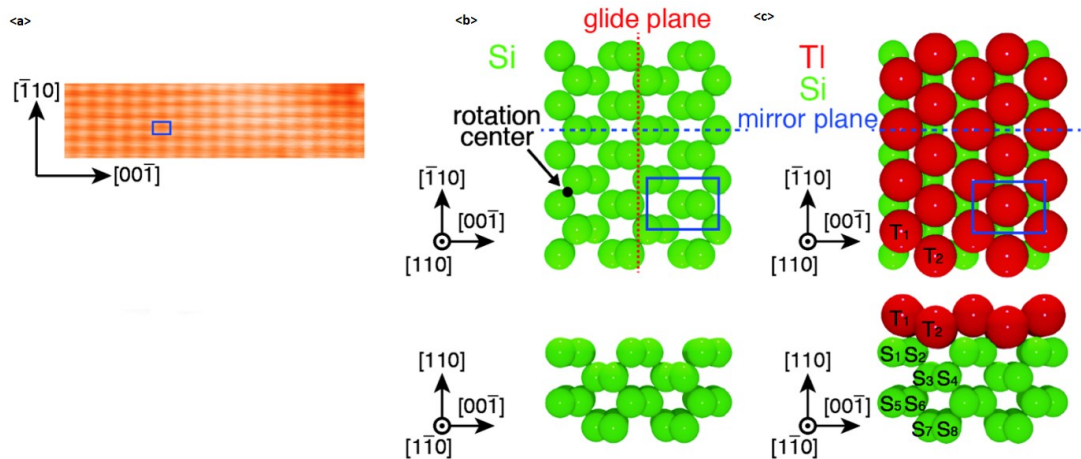
Docela nedávno vyšiel posledný typ modelu, ktorý ako prvý zavrhuje päťuholníkové štruktúry tvoriace tento povrch. V tejto štúdií [14] popisujú tento povrch pomocou pokrivených tetramérov, oproti ktorým je umiestnený sedemuholníkový prstenec alebo štvoruholníkový prstenec. Tieto prstence môžu z pohľadu STM tvoriť päťuholníkové obrazce tvorené sedemuholníkovi usporiadaniami častíc. Pre lepšiu predstavu tento model uvádzame na Obr. 3.



Obr. 3 - Zobrazenie posledného modelu z [14]. Modré atómy označujú vrchnú vrstvu (riadok) atómov a červené spodnú vrstvu atómov (analogicky k čiernej a bielej na predchádzajúcom obrázku) a tyrkysové označujú atómy modelu. Na obrázku (a) je zobrazený povrch z pohľadu z hora, kde môžeme vidieť jak základnú bunku tohto povrchu tak jednotlivé útvary, na ktorých je model založený. Na obrázku (b) je zobrazenie päťuholníkov, ktoré sú viditeľné na STM obrázkoch a na obrázku (c) vidíme 3D zobrazenie povrchu. Správnu orientáciu na obrázku zabezpečuje biely krížik a žltá šípka.

### 3.1 Kovy na Si (110)

My budeme na čistý povrch Si (110) s rekonštrukciou (16x2) deponovať tálium, kde očakávame, že sa vytvorí rekonštrukcia (1x1). Konkrétne tento povrch už bol skúmaný v [15], kde bolo deponované 1ML (MonoLayer - monovrstva) tália a zistilo sa, že táto štruktúra má symetriu  $C_{1h}$ . Taktiež sa zistilo že môže mať zvláštnu Rashba-Bychkov (ďalej RB) topológiu, ktorá sa líši od očakávaného RB obrazu. RB model nám vlastne hovorí o podobe elektrónových pásov a spinových štruktúrach a výsledky [15] o odlišnostiach povrchu Si(110)/Tl (1x1) od štandardného RB modelu. Taktiež pri tomto výskume navrhli model, ktorý popisuje tento povrch. Zobrazujeme ho na Obr. 4. Viac v [15].



Obr. 4 - Zobrazenie modelu definovaného v [15]. V časti <a> je zobrazený STM obrázok získaný za napätia -0,5V. Na obrázku <b> vidíme štruktúru Si(110) na obrázku <c> už model s táliom v rekonštrukcii Si/Tl(1x1).

Okrem Tália sa však skúmali aj iné kovy deponované na Si (110). Asi najviac sa nami skúmanému Táliu podobá Bismuth. Formovanie štruktúr s Bismuthom začína pri 570K, kedy sa začínajú narúšať štandardné cik-cak štruktúry podkladového Si(110). Pri ďalšom zohrievaní sa začnú formovať výstupky na plochom povrchu so štruktúrou 2x3. Pri zvyšovaní teploty sa postupne pokryje celý povrch touto štruktúrou. Pri 700K sa už získava finálne známa štruktúra (2x3), kde sa nahrádza pôvodná cik-cak štruktúra pomerne plochým povrchom, pričom deponované množstvo Bi sa pohybuje okolo 0.17ML [16]. Pri depozícií vyššieho



množstva Bismuthu začne vznikať rekonštrukcia (1x1) [17]. Pri ešte vyšších teplotách sa môžu tvoriť aj rekonštrukcie ako (3x4) a (3x6). Viac v [17].

Si (110) bol tiež študovaný ako možnosť pre spintroniku v podobe feromagnetických-polovodičových štruktúr, čo by mohlo byť veľmi užitočné v MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) zariadeniach. Pre vytvorenie takéhoto materiálu je potrebné aby feromagnetický materiál priamo rástol na kremíkovom substráte. Pre takéto použitie sa na povrch kremíka deponovalo železo. Normálne sa očakáva, že po depozícií magnetickej látky sa magnetizmus stratí, avšak pri Si (110) sa vytvorili železokremíkové nanovodiče, ktoré sa preukázali byť feromagnetické. [16]

Podobné využitie v elektronike má aj možnosť deponovania na Si(110) olova. Teraz ale nejde o úplnú zmenu rekonštrukcie, ale skôr o zlepšenie vlastností samotného Si(110). Po nanášaní 2.6ML Pb na Si (110) a následnom ohriatí na 260°C vzniknú samostatné pásy vzdialené od seba 3 vzdialenosti mriežkovej konštanty v smere [001]. Tieto pásy majú viacstupňovú štruktúru a potvrdenú kovovú povahu. Tento materiál je následne použiteľný v MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Viac v [18].

V kombinácií s Si (110) sa používa aj platina kvôli známej vlastnosti tvorenia stabilných silicidov ako PtSi alebo Pt<sub>2</sub>Si, ktoré majú mnoho užitočných vlastností. Pri štúdií depozície Pt na Si(110) sa objavilo niekoľko štruktúr. Pri depozícií do 0.25 ML sa ešte stále formovali 1D riadky s klasickými päťuholníkmi. Pri vyššom množstve Pt – 0.25-0.35 ML sa začal formovať 5x4 povrch. Pri približne 0.5ML sa vytvorila fáza so štruktúrou 13x2, kde boli viditeľné 1-D riadky, ktoré boli so zvyšujúcim sa pokrytím stále jasnejšie. K pokrytiu celého povrchu došlo až pri úrovni 1ML kde sa vytvorila rekonštrukcia 6x5. Pri ďalšom pokrývaní sa už neobjavila žiadna ďalšia fáza. Avšak vytvorený materiál mal silnú anizotropiu v smere [110]. [19] Neskôr sa zistilo že pri deponovaní cca 1ML na horúce Si (110) pri udržiavaní teploty vzorku medzi 700 a 800 °C vznikajú veľmi dlhé silicidové nanovodiče. Dĺžka dosahovala až 4μm. [20]

## 4 Aparatúra STM

Aparatúra, ktorú sme pri tejto práci používali je svojpomocne skonštruovaná na Katedre povrchů a plazmatu Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Prahe. Hlavným konštruktérom tejto aparatúry sú doc. RNDr. Ošťádal Ivan, CSc. V aparatúre je počas merania vždy udržiavané UHV (ultra high vacuum), ktoré zabezpečuje čistotu jednotlivých meraných substrátov. Jednotlivé časti aparatúry budem ďalej postupne opisovať. Pre zjednodušenie sme zloženie aparatúry rozdelili na bežne dostupnú (vonkajšiu) časť a časť, ku ktorej sa za bežných okolností nedostaneme:

### 4.1 Vonkajšia časť

V tejto časti popíšeme časti aparatúry viditeľné z vonku. Všetky označenia obrázkov v tejto podkapitole sa budú vzťahovať k Obr. 5 a budú v lomených zátvorkách  $\langle \rangle$ .

#### 4.1.1 Tlmiaci podstavec $\langle a \rangle$

Slúži k tlmeniu aj tých najmenších vibrácií okolia. Je zložený z troch pneumatických nôh. Keďže STM experimenty prebiehajú v prostredí, kde sa hrot nachádza len zlomok nanometru nad povrchom, čo znamená, že aj najjemnejšie vibrácie prostredia môžu spôsobiť kolíziu hrotu a povrchu, čo môže viesť k znečisteniu hrotu.

#### 4.1.2 Iontovo-Sorbčné čerpadlo $\langle b \rangle$

Zabezpečuje ultravysoké vákuum počas všetkých experimentov. Funguje tak, že pomocou elektromagnetického poľa je možné usmerňovať ióny nachádzajúce sa v plyne (vákuu). V podstate sa skladá z anódy a katódy medzi ktorými dochádza k ionizácii plynu tak, že ióny sú postupne priťahované katódou. Povrch katódy je zvyčajne z titánu, aby mohli disociované atómy reagovať s titánovou vrstvou, čo spôsobí vznik nových zlúčením, čo pôvodné molekuly úspešne zabuduje do stien čerpadla.

#### 4.1.3 Ionizačný vakuometer $\langle c \rangle$

Zabezpečuje kontrolu tlaku počas merania.

#### **4.1.4 Topné pásy <d>**

Slúžia k prehrievaniu celého STM systému po údržbe, pri ktorej je nutné mikroskop zavzdušniť. Týmto spôsobom sa zo stien mikroskopu „vypekajú“ nečistoty, ktoré by mohli ohrozovať experimenty.

#### **4.1.5 Vhľad do vnútornej časti aparatóry <e>**

Slúži ako základná spätná väzba pri experimentoch. Aj keď cez neho nie je moc vidieť, vieme vďaka nemu odhadnúť aspoň nejaké fakty ako napr. v prípade porúch zdroja počas žihania by vzorek mal emitovať svetlo. Taktiež je cez neho vidieť niektoré mechanické časti, čo nám pomáha pri manipulácii so vzorkami pomocou otočného mechanizmu popísaného nižšie. Tiež môže pomôcť pri identifikácii v prípade poruchy alebo predísť chybám experimentátora.

#### **4.1.6 Náhľad na hrot s kamerou <f>**

Slúži na kontrolu hrubého posuvu hrotu

#### **4.1.7 Počítač na ovládanie aparatóry <g>**

Slúži na ovládanie mikroskopu a jeho príslušenstva

#### **4.1.8 Zdroje napätia <h>**

Slúžia na zahrievanie vzoriek, príp. naparovadiel

#### **4.1.9 Zdroj vysokého napätia <i>**

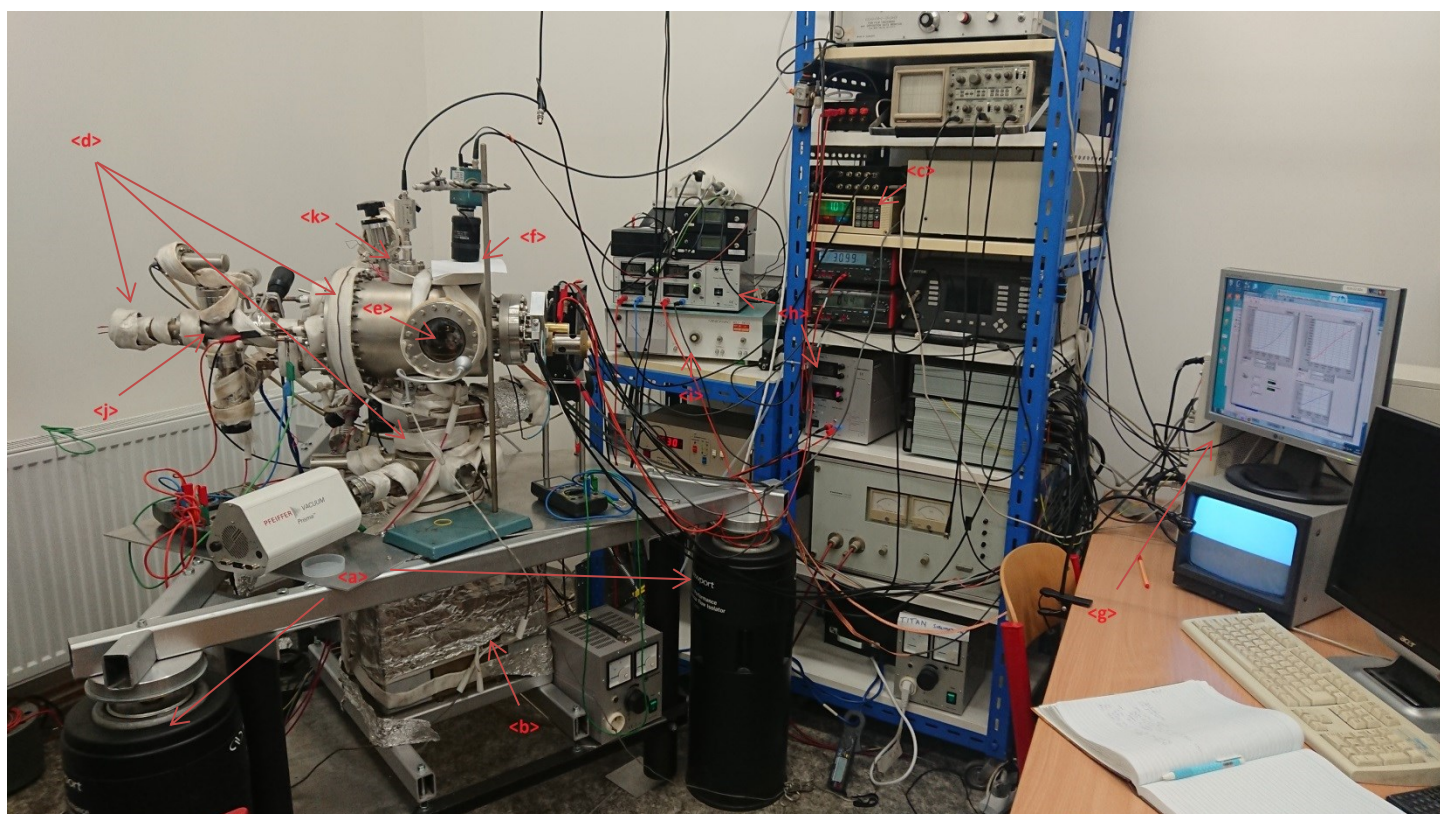
Je na časť čistenia hrotu, kedy sa hrot bombarduje elektrónmi

#### **4.1.10 Naparovacia časť <j>**

Je oddelená časť mikroskopu, ktorá je schopná úprav a údržby nezávisle na zvyšku aparatóry. Obsahuje hlavne naparovadlá, ktoré sú popísané v ďalších častiach práce.

#### **4.1.11 Kryštál pre meranie depozície <k>**

Na obrázku je vidieť len jeho zapojenie. Bližšie ho rozoberieme pri vnútornej stavbe aparatóry.



Obr. 5 - Zobrazenie aparatúry, kde sú označené jednotlivé časti rozobrané v texte

## 4.2 Vnútrotná časť

### 4.2.1 Naparovadlá

Zabezpečujú depozíciu látok na substráty. Ako je spomenuté vyššie, nachádzajú sa v oddelenej časti mikroskopu, tak aby bola možná údržba vyparovadiel nezávisle na údržbe celého systému.

### 4.2.2 Táliové naparovadlo

Funguje tak, že naparovaná látka je vložená do tenkej tantalovej trubičky. Táto trubička je pripojená na elektródy a má v sebe malý otvor. V priebehu naparovania na túto trubičku privedieme elektrický prúd a tak sa začne naparovaná látka zahrievať. So zvyšujúcou sa teplotou stúpa aj rýchlosť vyparovania, čo následne kontrolujeme kryštálom pre meranie depozície, ktorý popisujeme nižšie.

### 4.2.3 Vyparovadlá pre organické molekuly

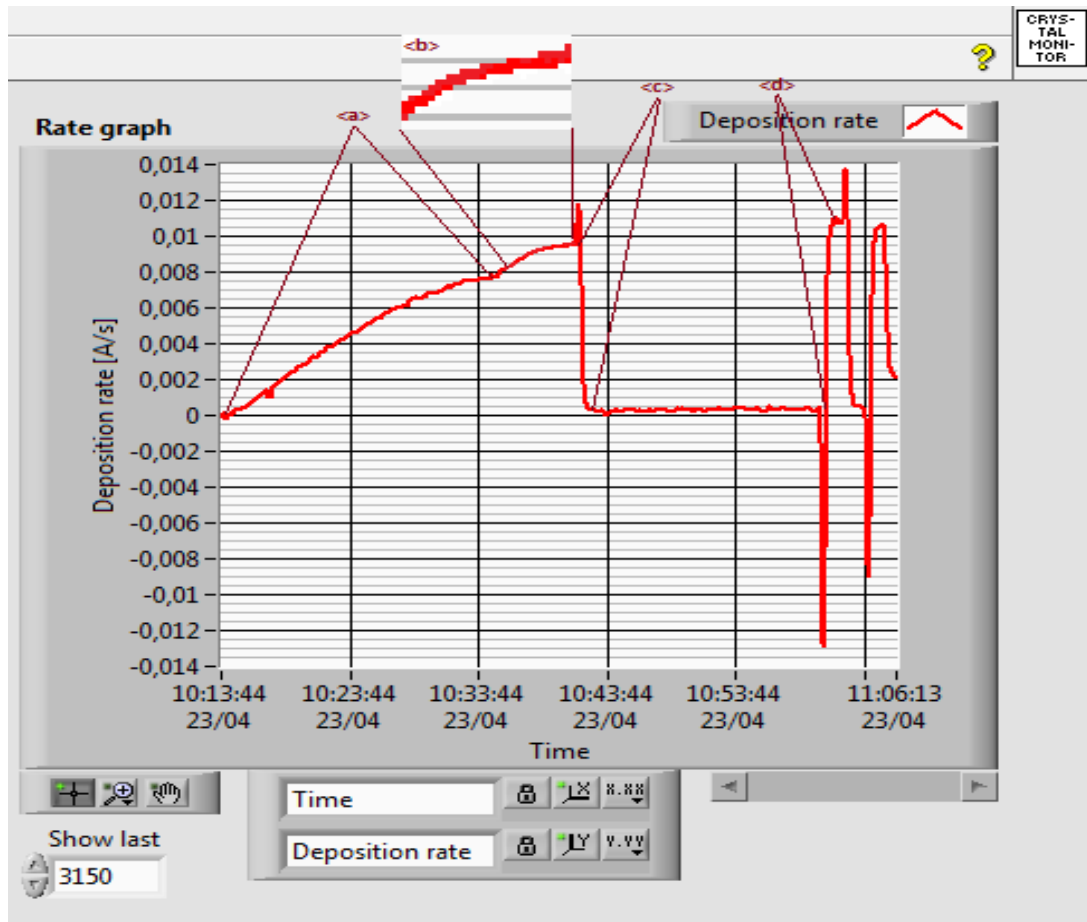
Pri týchto vyparovadlách sú ftalocianiny (organické molekuly, ktorými budeme testovať náš povrch) vložené do bornitridového kelímku. Tento kelímok je omotaný wolframovým drôtom, ktorý je pripojený na elektródy. Pri priechode prúdu wolfrámovým drôtom sa kelímok zahrieva, čím sa opäť zvyšuje rýchlosť depozície.

#### 4.2.4 Kryštál pre meranie depozície

Slúži ako kontrolný mechanizmus pre naparovací systém a vďaka metóde oscilácií monokryštálu sme schopný veľmi presne určiť deponované množstvo na vzorku. Funguje tak, že počas depozície naparujeme naparovaný materiál aj na tento kryštál, ktorý je umiestnený na clone medzi vyparovadlom a vzorkom. Keďže tento kryštál kmitá, tak naparenie látky mení frekvenciu jeho kmitov. Bohužiaľ však nikdy nemeríme naparovanie priamo. Meriame len hrúbku kryštálu a čas, čo nám v konečnom dôsledku udáva rýchlosť naparovania, z čoho potom presne určujeme naparenú hodnotu.

##### 4.2.4.1 Meranie depozície

Ako príklad uvediem meranie depozície tália na povrch Si(110), kde ako aj budeme uvádzať priamo v kapitole merania, jeden zdroj napätia bude pripojený na vzorek a jeden zdroj napätia na vyparovadlo. Po začatí zahrievania vyparovadla je nutné počkať, kým sa depozičná rýchlosť ustáli na aspoň približnej hodnote. Tento priebeh môžeme vidieť v úseku <a> a <b>. Keďže počas merania rýchlosti vyparovania sa nachádza medzi vzorkom a vyparovadlom ešte clona, na ktorej sa nachádza spomínaný kryštál na meranie depozície, nemeríme rýchlosť vyparovania počas depozície, ale len pred a po depozícií. Ako môžeme na Obr. 6 vidieť, po ustálení <b> rýchlosti vyparovania otvoríme clonu <c> medzi vzorkom a vyparovadlom a teda začneme depozíciu tália, avšak počas otvorenej clony nemeríme rýchlosť depozície. Na základe týchto údajov vypočítame dobu potrebnú pre depozíciu približne jednej monovrstvy (inak označovanej ML - MonoLayer). Počítame aj s miernym nárastom depozičnej rýchlosti, pretože aj keď už rýchlosť depozície nestúpa tak prudko ako pri začiatku zahrievania, tak stále mierne stúpa. Po dobe, ktorú sme spočítali znovu zatvoríme clonu <d> a skontrolujeme o koľko stúpila rýchlosť a v prípade, že ešte nie je nadeponované dostatočné množstvo tak prepočítame čas ktorý je potrebný na dodeponovanie materiálu, znovu otvoríme clonu a dokončíme depozíciu.



Obr. 6 - Zobrazenie priebehu merania, kde sa v oblasti <a> nachádza počiatkové zahriatie vyparovadla, v oblasti <b> je ustálenie teploty/rýchlosti depozície. Oblasť <c> je otvorenie clony – začiatok depozície a v oblasti <d> je znázornené uzatvorenie clony, kvôli kontrole depozície. Ďalej sa už len opakuje otvorenie clony dodeponovanie a znovu uzatvorenie.

#### 4.2.5 Hrot

Je zložený z wolframu a je jednou z najdôležitejších súčastí aparatury.

##### 4.2.5.1 Príprava hrotu

V prípade že bol hrot pred meraním znečistený, museli sme ho najskôr očistiť resp. znovu zaostriť. Toto zaostrovanie prebiehalo tak, že sme hrot najskôr očistili od nečistôt pomocou bombardovania elektrónov a potom na malú chvíľu pritavili náš hrot k wolframovému pliešku.

Konkrétne sme mikroskop pripojili na dva zdroje, pričom jeden bol zdrojom vysokého napätia. Pokračovali sme tak, že kladná elektróda sa nachádzala v hrote a záporná vo wolfrámovom pliešku. Samostatne sme ešte pripojili druhý zdroj



napätia na wolfrámové vlákno. Najskôr sme začali žhaviť vlákno, takže začalo emitovať elektróny, ktoré boli priťahované vysokým napätím (1kV) ku kladnej elektróde, teda hrotu. Takto sme chvíľu bombardovali hrot elektrónmi.

Potom v druhom kroku sme hrot priblížili k vláknu na vzdialenosť v rádoch  $\mu\text{m}$  a do vlákna sme pustili prúd, aby sa rozžhavilo. To spôsobilo, že sa pliešok prehne k hrotu a pritaví sa k nemu. Následne sme hrot „na silu“ odtiahli, čo má za následok zašpicatenie hrotu.

#### 4.2.6 Otočný mechanizmus so vzorkami

Slúži na to aby sa v aparátúre mohlo nachádzať vždy viac vzoriek, resp. nástrojov na úpravu hrotu.

#### 4.2.7 Vzorky

Sa nachádzajú na otočnom mechanizme vo vnútri aparátúry. Pre použitie s touto aparátúrou musia byť vzorky vodivé (resp. polovodivé).

#### 4.2.8 Sublimačná titánová výveva

Funguje na princípe reakcií zbytkovej atmosféry v aparátúre s titánom. Takže steny tejto vývevy doslova pohlcujú nežiadúce častice. V praxi funguje tak, že prúdom sa zahrieva titánová časť, ktorá začne sublimovať. Následne sublimovaný titán dopadá na chladné okraje vývevy, čím sa vytvára stále nová vrstva titánu, ktorá reaguje s plynmi v aparátúre.

#### 4.2.9 Inchworm

Je piezoelektrický lineárny motor, ktorý používame na hrubé priblíženie hrotu k vzorku a naopak. Jeho definovaný posun je 1nm.

### 4.3 Softvérová časť

Hlavným developerom softvérovej časti ovládania mikroskopu je Doc. RNDr. Pavel Sobotík, CSc., ktorému vďačíme za vytvorenie softvérového prostredia ToroSTM.exe, ktorým ovládame mikroskop.

Ovládanie jednotlivých zdrojov napätia a meracie prvky experimentu zabezpečujú malé programčeky, vytvorené v developerskom prostredí pre vedecké účely „Labview 2016“.

Priamo z mikroskopu dostávame formát obrázku v ktorom sú zaznamenané xyz dáta polohy hrotu nad povrchom, prúdové dáta, dáta o napätí a.t.d'. Tieto dáta následne spracúvame pomocou programu „Gwydion“, kde sme schopný vyššie spomínané dáta upraviť do výslednej pozorovateľnej formy.

#### **4.4 Určovanie teploty vzorkov a kalibrácia**

Zahrievanie vzorkov robíme priamym prechodom jednosmerného prúdu cez vzorek. To znamená že priame meranie teploty substrátu sa nevykonáva. Počas merania zaznamenávame len hodnoty prúdu a napätia na vzorku, čo automaticky prevádzame na príkon na vzorku. Takže pri zahrievaní vzorkov teplotu určujeme pomocou spätne kalibrovaných vzorkov. Tabuľku tejto kalibrácie máme priloženú k mikroskopu. Štandardne sa táto kalibrácia vykonáva na konci experimentálneho obdobia, kde sa potom pomocou termočlánku pripevneného priamo na substrát priradia k hodnotám zmeraného prúdu a napätia, resp. príkonu hodnoty teploty. Túto kalibráciu sa dá robiť len na konci experimentálneho obdobia preto, že po takejto kalibrácii sa vzorek vždy znehodnotí. Z týchto kalibračných grafov sme následne schopní určiť teplotu použitého vzorku. Chyba určovania teploty je približne 20°C, pričom relatívna chyba sa pohybuje medzi 1-5%.



## 5 Príprava čistého povrchu Si(110)

### 5.1 Príprava povrchu

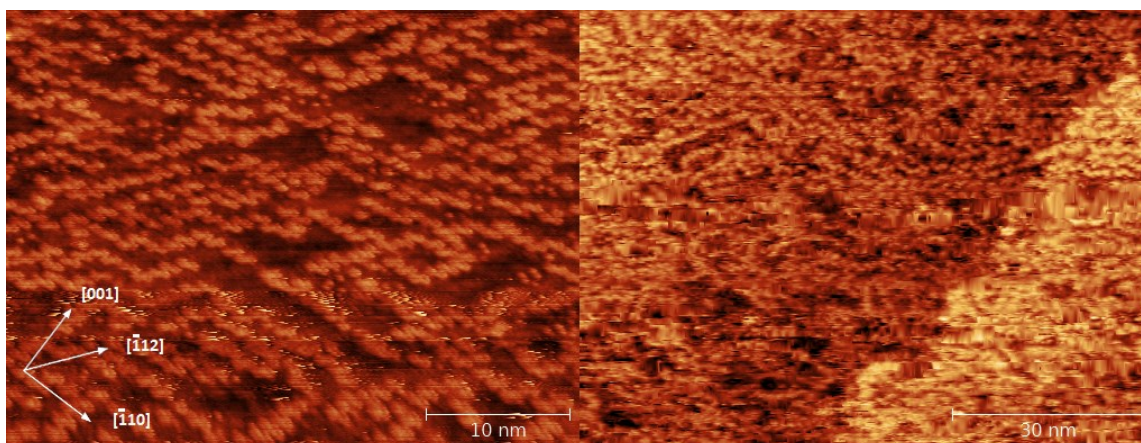
Experiment bol realizovaný pomocou STM, ktorý sme popisovali v časti „Aparatúra“. Pri všetkých meraniach bol udržiavaný tlak približne v  $4 \times 10^{-9}$  Pa. Teplotu jednotlivých vzorkov sme menili pomocou prechádzajúceho jednosmerného prúdu, resp. príkonu na danú súčiastku. Tento príkon sme následne pomocou predchádzajúcich kalibrácií priložených k mikroskopu prepočítavali na teplotu (bližšie špecifikované v podkapitole 4.4). Bohužiaľ tieto kalibrácie sú robené len do teploty 500°C, takže teploty nad túto hodnotu sme odhadovali. Jediná ďalšia teplota o ktorej vieme na základe predchádzajúcich meraní je teplota 1200°C.

Naším prvým krokom pri príprave povrchu Si (110) bolo nájdanie správneho spôsobu tvorby Si(110) s rekonštrukciou (16x2). Z počiatku sme vyskúšali niekoľko postupov ako vytvoriť nami požadovaný povrch Si (110) na základe [21-24] sme si utvorili predstavu ako by sme mohli dosiahnuť nami chcený povrch. Prehľad jednotlivých postupov ktorými sme sa inšpirovali uvádzame v tabuľke 1.

| [21]  | [22]  | [23]  | [24]  |
|---|---|---|---|
| Prvým krokom bolo 15 hodinové odplynenie vzorku na teplote 600°C. Druhým krokom bolo vyčistenie pomocou žíhnutia o teplote 1200°C, za čím nasledovalo žíhanie o teplote 600°C | Prvým krokom bolo odplynenie pomocou zahriatia na 627°C na približne 5 hodín. Druhým krokom bolo žíhnutie na približne 1250°C po dobu 3s. Tretím krokom bolo znižovanie teploty na približne 725°C po dobu jednej minúty a udržania tejto teploty po dobu 30s. Nakoniec sa vzorek nechal ochladnúť na izbovú teplotu. | Prvým krokom bolo opakované žíhanie na 1200°C. Druhým krokom bolo žíhanie na 700°C. | Tu bolo použité len jedno žíhanie na približne 625°C. |

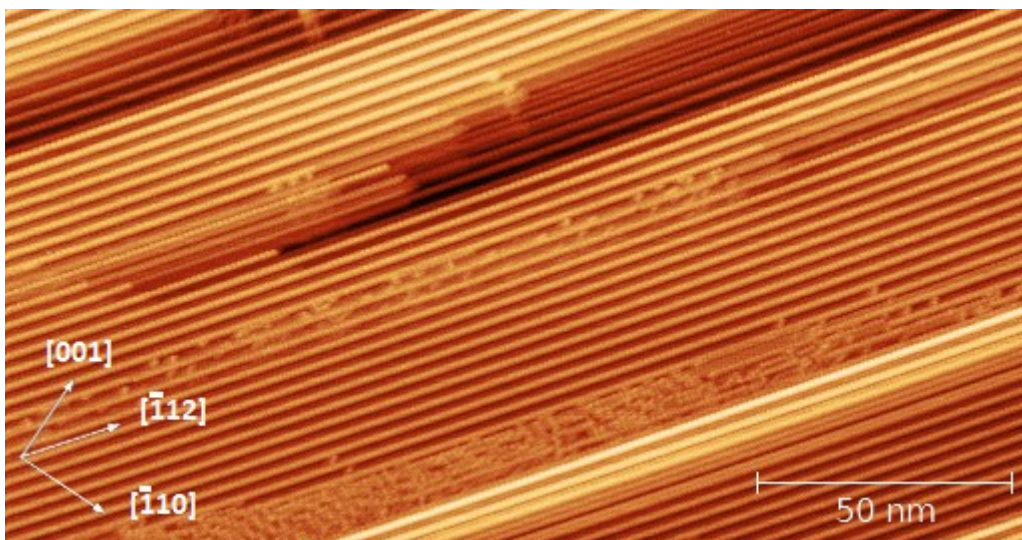
Tabuľka 1 - Popis jednotlivých postupov, na základe ktorých sme začali jednotlivé experimenty s Si(110) pre dosiahnutie rekonštrukcie (16x2).

Prvý experiment prebiehal tak, že sme robili niekoľko sekundové rýchle žíhnutia na 1200°C, po ktorých nasledovalo niekoľko dlhších žíhnutí tiež na rovnakú teplotu. Pri tomto postupe sa nám podarilo dosiahnuť čiastočnú rekonštrukciu, ale bola málo zrovnaná a často krát neúplná. Ako je vidieť na Obr. 7 prakticky sa dalo pozorovať len akési začiatky nami chcenej (16x2) rekonštrukcie.



Obr. 7 - Zobrazenie prvého pokusu tvorby Si(110). Obrázok na ľavo bol meraný s napätím na hrote -0,4V a obrázok napravo bol meraný s napätím na hrote -1,5V.

Pri ďalšom experimente sme žíhali len dva krát po dobu 8 sekúnd na teplote tvorenej príkonom na vzorku 35W, čo by malo byť približne 1200°C. Po prvom žíhnutí sme zmenili polaritu a po druhom žíhaní sme znížili príkon na vzorku na 7,5W, čo odhadujeme približne na 670°C kde sme ho udržiavali ďalšie 2 minúty. Potom sme príkon skokovo znížili ešte na 6,5W, čo odhadujeme na 610°C a odtiaľ sme znižovali prúd po 0,1A/min až kým vzorkom nepretiekal žiaden prúd. Tento postup mal výrazne lepšie výsledky ako ten predchádzajúci a vytvoril dlhé riadky. Dali sa pozorovať dlhé terasy. Náhľad takéhoto povrchu môžeme vidieť na Obr. 8. Tento povrch už vyzeral ako správny povrch (16x2), ale mohli sme na ňom pozorovať ešte drobné nedostatky, preto sme sa rozhodli ešte trochu pozmeniť a predĺžiť dobu, ktorú sme udržiavali substrát na vyššej teplote.



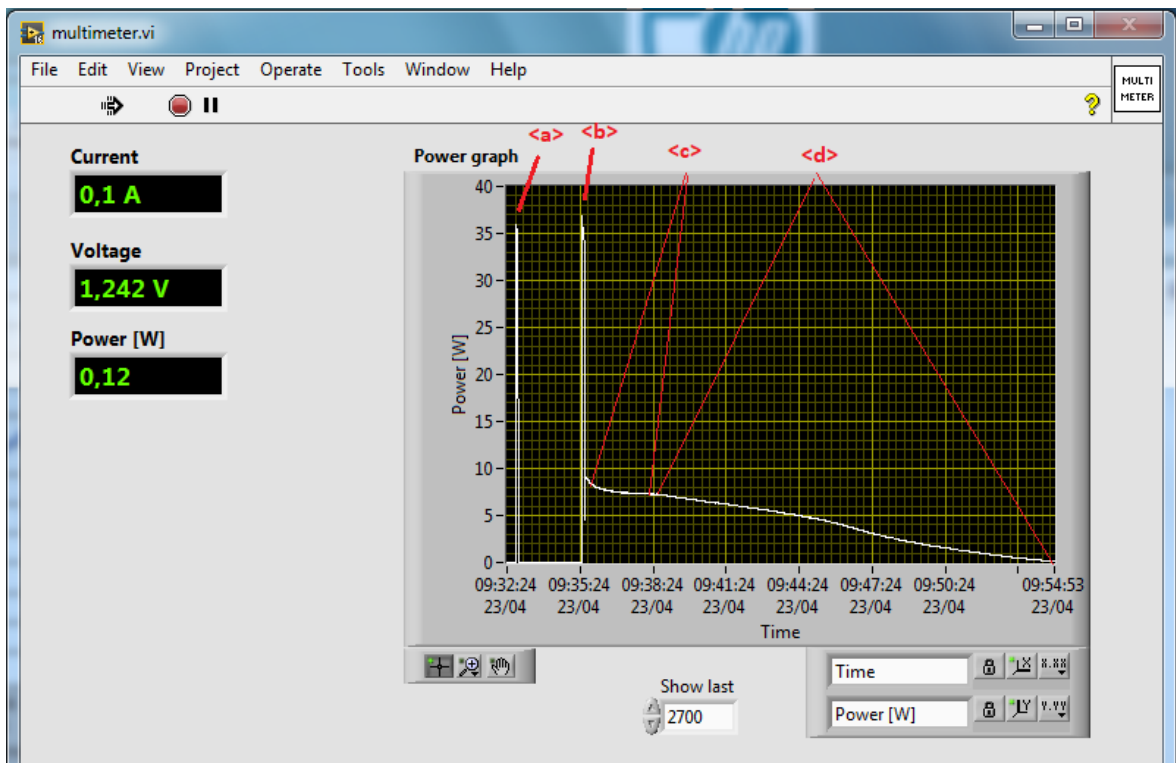
Obr. 8 - Obráz Si (110) s rekonštrukciou (16x2). Napätie na hrote počas merania bolo -1,9V. Na obrázku sú vidieť cik-cak terasy (16x2).

Nakoniec sme sa dopracovali k metóde tvorby povrchu Si(110), kde je možné vidieť 16x2 rekonštrukciu. Postup prebiehal dvomi za sebou idúcimi žíhaniaми, pričom sme po čiastočnom ochladení ešte s teplotou pomaly klesali. Presnejšie prvé žíhanie prebiehalo tak, že sme vzorku zahrievali cez ňu prechádzajúcim prúdom. Pre presnú manipuláciu s prúdom sme používali zdroj pripojený k počítaču, kde sme mohli presne určovať parametre experimentu.

Pri prvom žíhaní sme vzorek zahriali prúdom 7A, čo podľa kalibrácie z predchádzajúcich meraní pri kremíkovom substráte znamená približne 1200°C a nechali sme ho na tejto teplote po dobu 5 sekúnd. Tento proces by mal vzorku očistiť od nečistôt a nadbytočných látok z predchádzajúcich experimentov. Vzorek sme následne odpojili od prúdu a nechali ochladnúť.

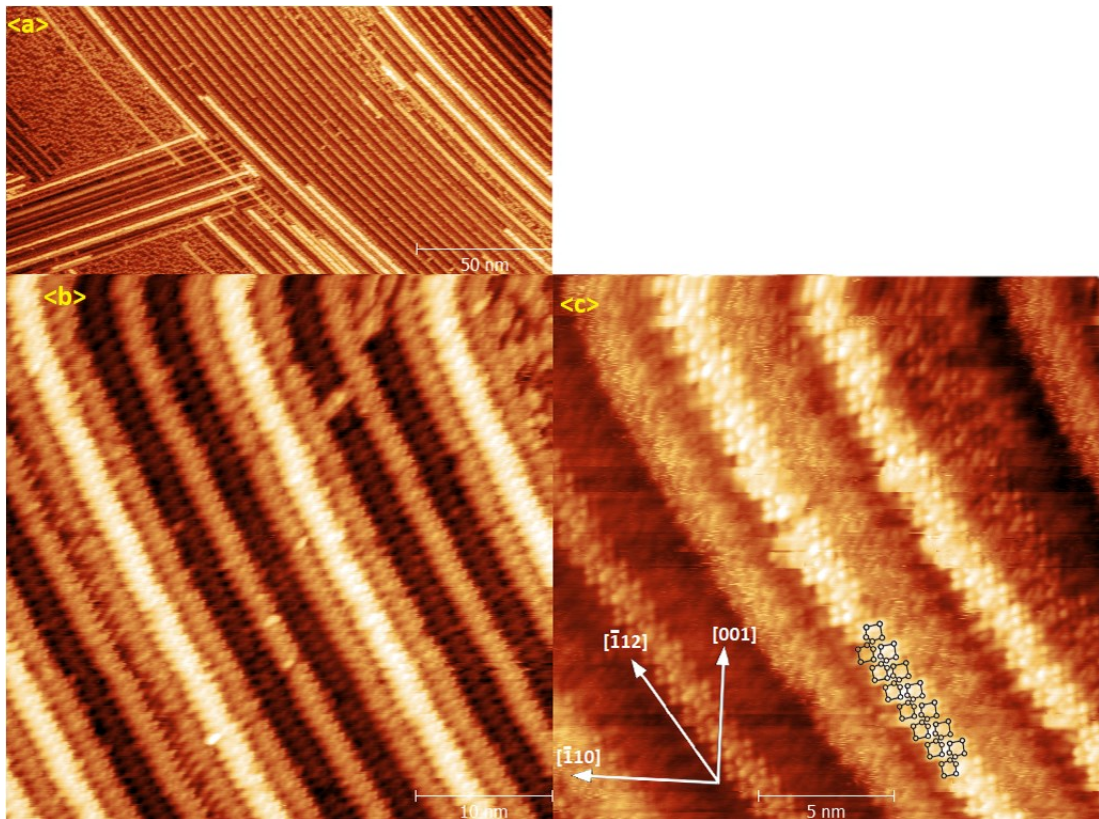
Pri druhom žíhaní sme taktiež vzorkom nechali tiecť prúd 7A (čo ho zahrialo približne na 1200°C), ale nechali sme ho na tejto teplote po dobu 7s a taktiež sme zmenili polaritu pripojenia. Potom sme skokovo znížili príkon na vzorek na 7W (čo sme odhadli ako 640°C), kde sme 3 minúty udržiavali tento príkon a následne sme metódou „rampdown“ znižovali teplotu po 0.1A/min až kým nepretiekal vzorkom žiaden prúd. Tento proces sme riadili cez počítačový program, aby bolo zabezpečené plynulé prechádzanie medzi teplotami. Priebeh tohto experimentu a použitého rozhrania vidíme na Obr. 9. Počas tohto procesu sa sformovala známa štruktúra

16x2, s ktorou sme naďalej pracovali. Povrch vytvorený týmto postupom môžeme vidieť na Obr. 10.



Obr. 9 - Rozhranie ovládania teploty pri žíhaní vzorku. Graf na obrázku znázorňuje priebeh príkonu na vzorek počas experimentu. V oblasti <a> môžeme vidieť 1. žíhnutie. V oblasti <b> vidíme 2. Žíhnutie. V oblasti <c> vidíme časť experimentu, kedy sme udržiavali teplotu. V oblasti <d> vidíme metódu rampdown, ako postupne znižuje prúd prechádzajúci vzorkou až na 0A.





Obr. 10 - Na obrázku sú znázornené výsledné povrchy Si (110) v rôznych stupňoch priblíženia. Obrázok <a> bol meraný pri napätí na hrote 1V, <b> bol meraný pri napätí na hrote -1V a <c> bol meraný pri napätí na hrote 1,3V. Čierne päťuholníky sú pozorovaním modelu opisovaného v [13].

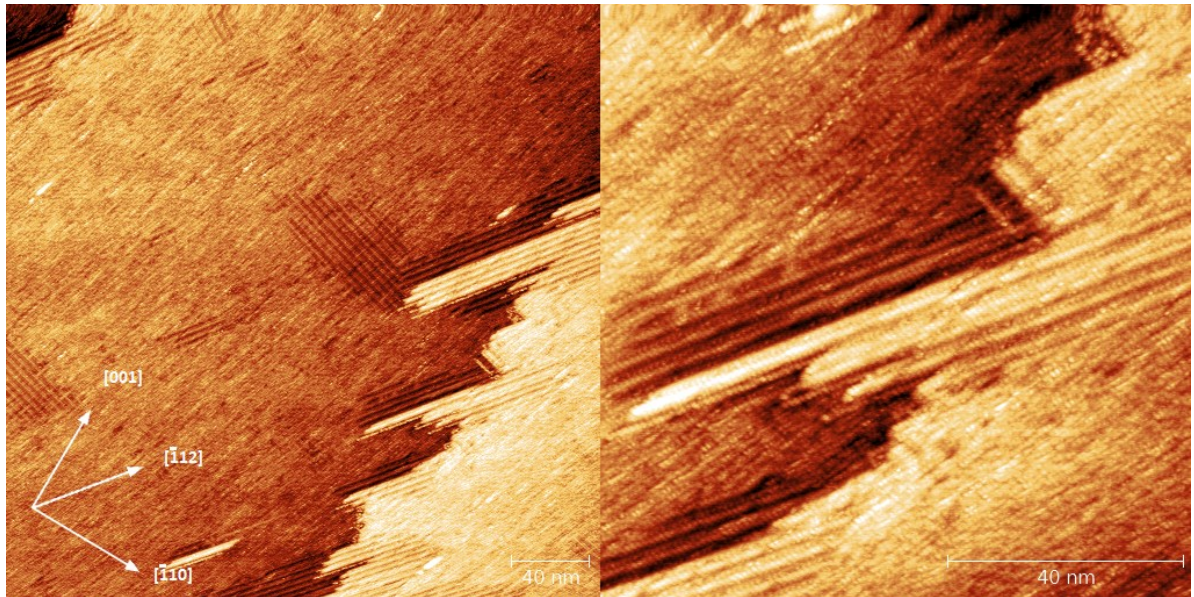
## 6 Depozícia Tália

V tejto časti našej práce bolo hlavným cieľom dostať povrch, kde by sa po depozícií tália na nami predom pripravený povrch Si(110) vytvorila rekonštrukcia Si/Tl(1x1). Najideálnejšie by bolo vytvoriť tento povrch, tak aby pokrýval celú plochu vzorku a zároveň mal čo najmenší počet defektov. Na to aby sa to podarilo museli sme povrch ohriať dostatočne, aby sa zrušili väzby starej povrchovej rekonštrukcie a vytvorilo sa nami chcené (1x1).

Naším prvým krokom bolo identifikovať relevantné parametre tak, aby sme vedeli čo ovplyvňuje výsledný povrch. Zistili sme, že náš experiment najviac ovplyvňuje teplota vzorku počas depozície. Teplotu vzorku sme určovali pomocou príkonu, ktorý sme merali priamo cez počítač. Merania, ktoré nižšie budem uvádzať sme robili aj niekoľkokrát, ale budem uvádzať hlavne experimenty s konkrétnymi podmienkami a výsledky korešpondujúce s týmito parametrami. Začali sme s príkonom zodpovedajúcemu mierne nižšej teplote ako uvedenej v [15]. Depozícia tália prebiehala vždy tak ako sme opisovali v podkapitole 4.2.4.1.

Vždy sme naparovali približne 1ML, čo v našom prípade je  $9,6 \times 10^{14} \frac{\text{atómov}}{\text{cm}^2}$ . Avšak nie je úplne nutné napariť presné množstvo, pretože pri väčšom množstve napareného tália ako je potrebné na saturáciu všetkých voľných väzieb kremíku, zvyšné tálium jednoducho desorbuje. Takto pripravený povrch sme ďalej skúmali. Nižšie budem opisovať jednotlivé postupy a výsledné povrchy.

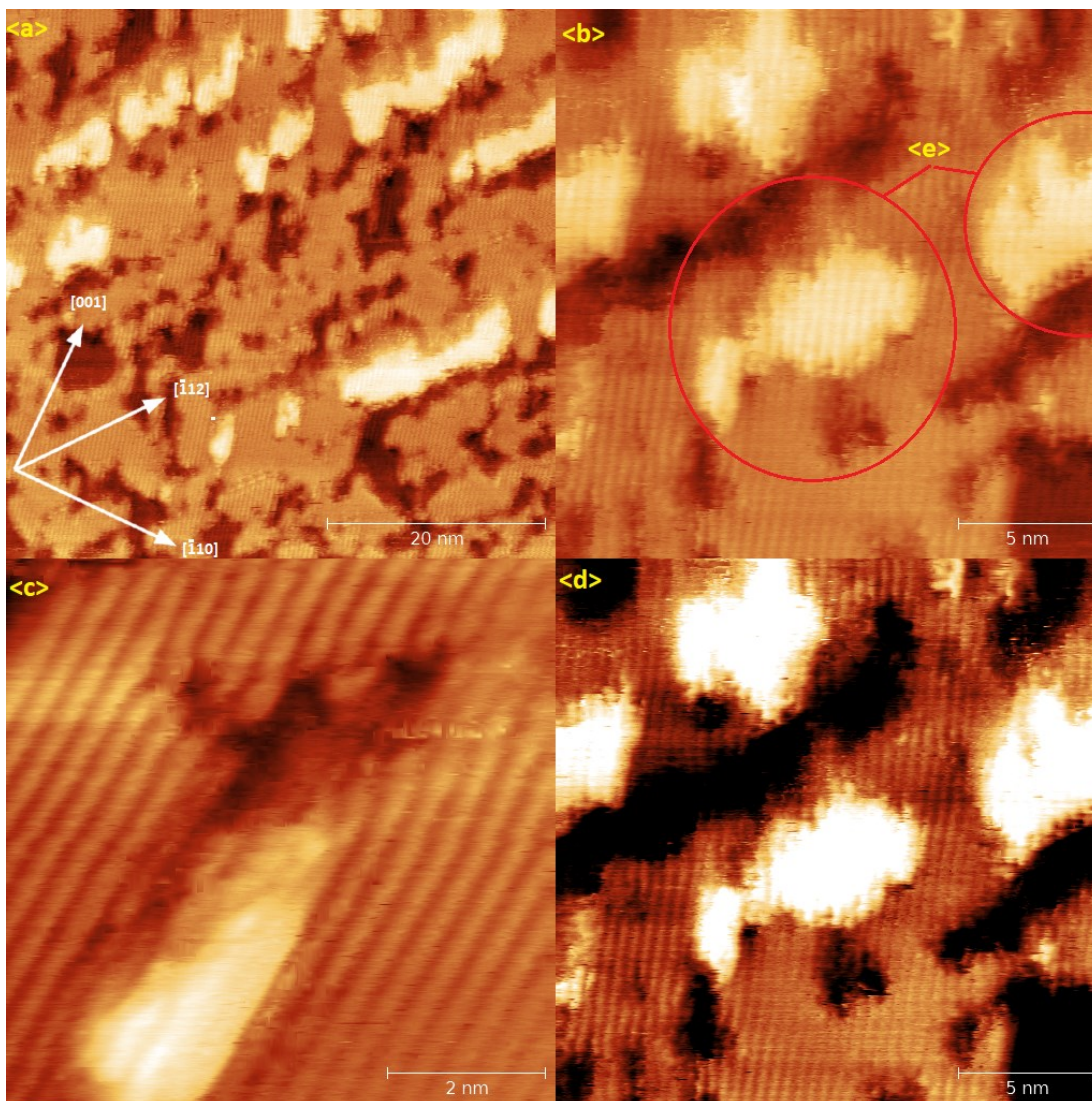
Pri prvom experimente s táliom sme deponovali tálium na pripravený povrch Si (110) s rekonštrukciou (16x2) pri mierne nižšej teplote a to približne 160°C, na čo sme potrebovali vzorek zahrievať príkonom 1,0W. Pri tejto teplote sme deponovali približne 1ML tália po dobu približne 15 minút, kde vyparovadlo bolo ohrievané prúdom o veľkosti 12,6A pri napätí 0,6V. Po dokončení depozície sme začali skúmanie povrchu. Povrch vytvorený touto metódou sa ukázal ako „nedokončený“, pretože ako je vidieť na Obr. 11, tak okrem tália vidíme ešte pozostatky z rekonštrukcie (16x2). Okrem toho rekonštrukcia tália (1x1), sa dala pozorovať len lokálne.



Obr. 11 - Zobrazenie nedokonalkej rekonštrukcie tália (1x1) na Si (110) v dvoch rôznych priblíženiach. Tieto obrázky boli robené s napätím na hrote -1V.

Pri druhom meraní sme použili teplotu vzorku počas depozície mierne vyššiu ako v [15], takže 190°C, na čo sme potrebovali vzorek zahrievať príkonom 1,26W. Pri tejto depozícii sme na povrch naniesli tiež približne 1ML tália počas približne 18tich minút. Pri tomto meraní nám bohužiaľ úplne nefungoval zdroj a pár krát počas merania prestal fungovať a bolo ho potrebné reštartovať. Na výslednom povrchu sa už dalo veľmi dobre pozorovať nami chcenú rekonštrukciu Si/Tl (1x1), avšak stále iba lokálne. Okrem toho povrch nebol rovnomerný a obsahoval veľmi veľa nezrovnalostí a defektov. Tieto chyby povrchu sa dajú jednoducho pripísať poruchám zdroja počas merania, ale taktiež ešte môže ísť o moc nízku teplotu počas depozície. Výsledný povrch vytvorený touto metódou môžeme vidieť na Obr. 12. Na obrázku je vidieť nespočet defektov a nedokonalostí. Aj napriek tomu, že už viditeľne vidíme štruktúru (1x1), tak je v mnohých oblastiach narušená, alebo nedokončená.

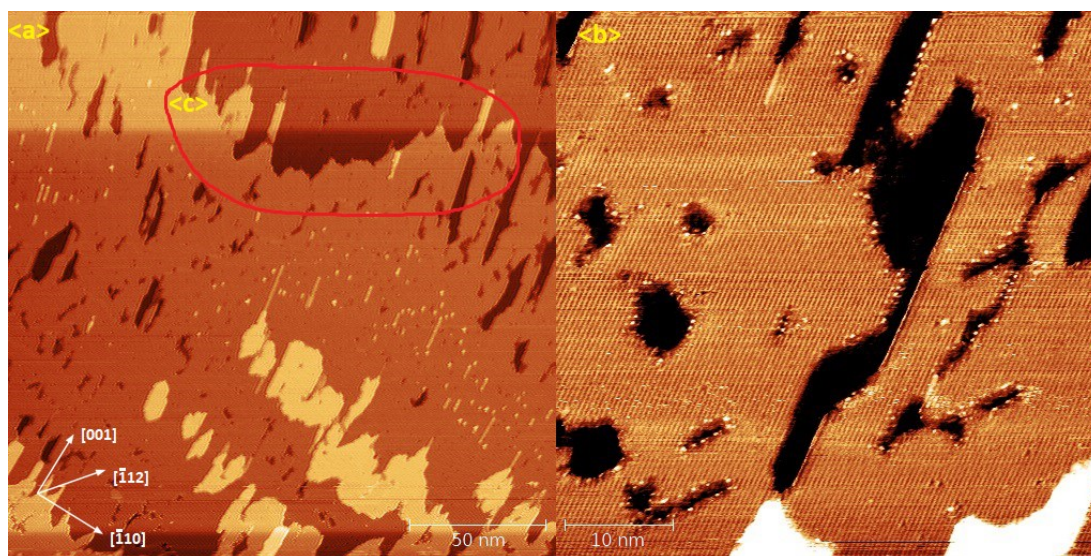




Obr. 12 - Zobrazenia druhej depozičie tália. Obrázky <a,b,d> boli merané s napätím na hrote 0,9V. Obrázok <c> bol meraný s napätím na hrote 0,8V. V oblasti <a> môžeme vidieť vzdialenú časť povrchu s mnohými defektami. V oblasti <b> môžeme vidieť priblíženú časť tohto povrchu, ktorá je taktiež zobrazená aj v oblasti <d>, kde je zameraný kontrast na nižšiu časť. V oblasti <c> je maximálne priblížená oblasť povrchu. Oblasti <e> vyznačené červenými kruhmi znázorňujú defekty spôsobené nedokončeným zrušením rekonštrukcie (16x2). Tento defekt je potom bližšie popísaný v kapitole 8.



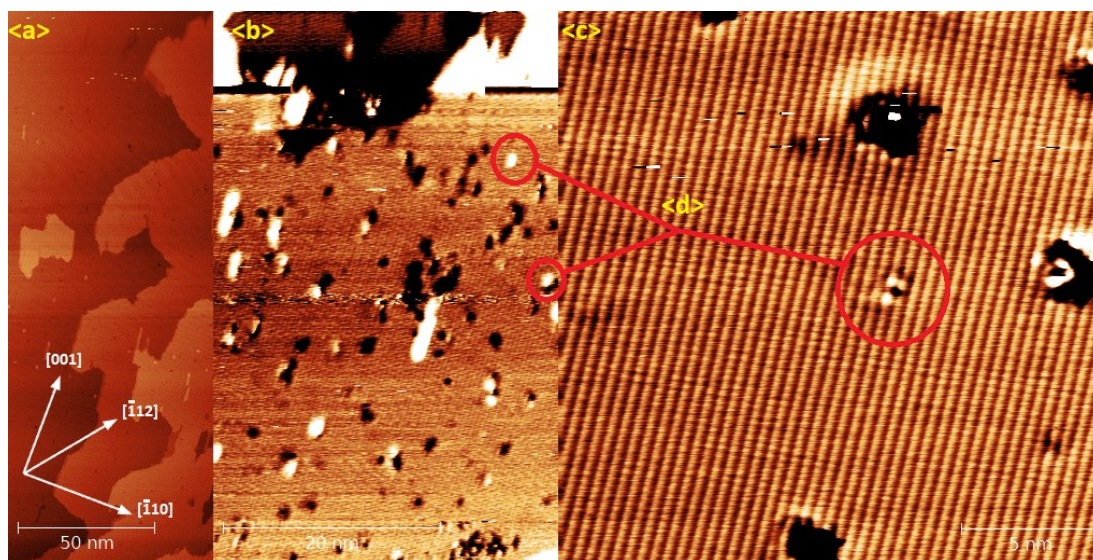
Keďže výsledky boli výrazne lepšie ako pri prvom meraní, experiment sme zopakovali pri teplote približne 170 stupňov, kde sme povrch zahrievali príkonom 1,1w, čo už by mohlo stačiť na rekonštrukciu. Na povrch sme nadeponovali približne 1MLtália počas približne 13tich minút. Pretože zjavne zvyšovanie teploty je správnou cestou, postupne prejdeme až k teplote, s najvhodnejšími výsledkami. Výsledok tohto experimentu môžeme vidieť na Obr. 13. Môžeme si všimnúť, že na častiach ktoré sú rovné vznikla už pekná rekonštrukcia (1x1), ktorá však má ešte pomerne veľa defektov.



Obr. 13 - Obrázky z experimentu, kde sa počas depozície substrát zahrieval príkonom 1,1w. Oba obrázky boli merané s napätím na hrote 1V. Na obrázku <a> môžeme vidieť vzdialený pohľad na povrch. Na obrázku <b> vidíme ten istý približený povrch. Ako si môžeme všimnúť obsahuje pomerne veľa defektov. V oblasti <c> vyznačenou červenou farbou vidíme pomerne veľké makroskopické schody, ktoré bližšie popisujeme v kapitole 8.

Pri ďalšom meraní sme použili približne takú teplotu, aká bola použitá aj pri tvorbe totožného povrchu v [15], takže približne 180°C, kde sme na ohrev potrebovali príkon o veľkosti 1,2w. Nadeponovali sme približne 1ML tália počas 12tich minút. Tu je vidieť mierne zlepšenie, čo sa týka väčších defektov viditeľných bez priblíženia, avšak po priblížení môžeme ešte pozorovať ďalšie nedokonalosti. Povrch môžeme vidieť na Obr. 14. Môžeme vidieť, že zvýšenie teploty zlepšilo proces tvorby rekonštrukcie (1x1), ale ešte nie úplne dokonale. Defekty sa zmenšili,

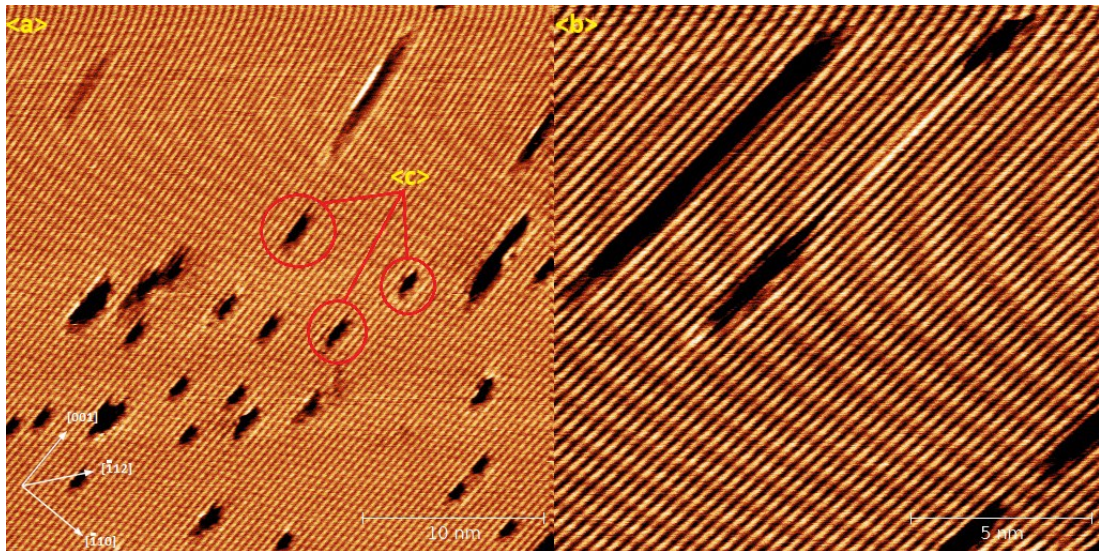
ale boli početnejšie. Každopádne ešte vyššia teplota by mohla zabezpečiť vytvorenie rekonštrukcie už bez defektov. Avšak posledné dva povrchy už by sme mohli považovať za dostačujúce, nakoľko sa na ňom dajú nájsť roviny, ktoré sú pomerne „čisté“ a pri ďalšom kroku experimentov už by bol jasný výsledok kontaktu organických molekúl s rekonštrukciou (1x1).



Obr. 14 - Tri druhy priblíženia povrchu vytvoreného pomocou príkonu 1,2w. Obrázok <a> bol meraný s napätím na hrote 2V, <b> s napätím 1,2V a <c> s napätím na hrote 1,6V. V oblasti <a> vidíme vzdialený pohľad vytvoreného povrchu s výrazne menším množstvom defektov ako na predchádzajúcich obrázkoch. V oblasti <b> vidíme priblíženejší snímok toho istého povrchu kde je vidieť, že defekty ešte úplne nezmizli, ale výrazne sa zmenšili. V oblasti <c> vidíme priblížený povrch s detailmi jak rekonštrukcie tak defektov. V oblastiach <d> môžeme bližšie vidieť malé defekty bližšie popísané v kapitole 8.

Ale keďže povrch bol značne bližšie nášmu cieľu, pokračovali sme v postupnom zvyšovaní teploty pri depozícii počas ďalších meraní. Pri ďalšom experimente sme naparovali pri teplote približne 195°C, na ktorú sme potrebovali príkon 1,3w. Deponovali sme približne 1MLtália počas 13tich minút. Pri tomto povrchu sa toho už moc nemenilo, defektov tam bolo približne rovnako ako pri poslednom meraní, čo prispievalo k potvrdeniu toho, že takýto povrch už by mohol byť považovaný za výsledný. Tento typ merania sme zobrazili na Obr. 15. Aj napriek tomu sme však urobili ešte ďalšie meranie kde sme teplotu zvýšili ešte o niečo viac.





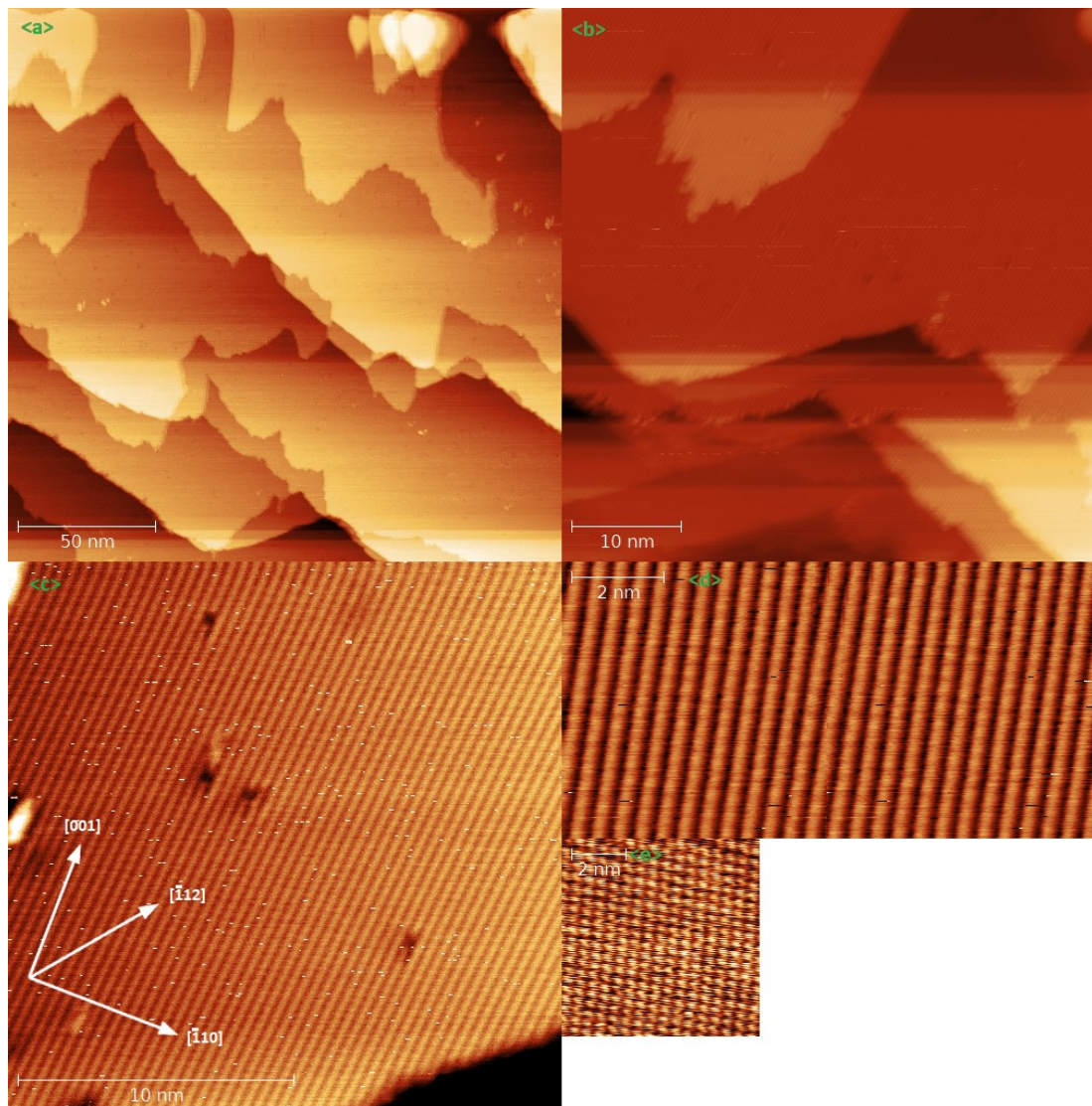
Obr. 15 - Rôzne priblíženia povrchu pripraveného pomocou príkonu 1,3w. Oba obrázky boli merané s napätím na hrote 1V. V oblasti <a> vidíme dobrú rekonštrukciu Si/Tl(1x1) s niekoľkými drobnými defektmi. V oblasti <b> vidíme detail tohto povrchu. V oblastiach <c> máme zvýraznené typy defektov, ktoré sme bližšie popísali v kapitole 8.

Nakoniec sme ešte pripravili povrch s teplotou počas depozície približne 210°C, ktorú vytváral príkon na vzorku o veľkosti 1,4w. Tento povrch bol až prekvapivo rovný. Ako je vidieť na Obr. 16, povrch tvoria veľké súvislé plochy s rekonštrukciou (1x1). Tento povrch má dokonca veľmi málo defektov viditeľných pri všetkých typoch priblíženia. Na tento typ povrchu bolo nadeponované približne 1ML tália počas 14tich minút. Na jeho povrchu si môžeme všimnúť minimálne defektov. Pri najmenších priblíženiach si môžeme všimnúť, že povrch bol pomerne schodovitý, ale to môže byť spôsobené len zlou oblasťou daného povrchu, alebo tým, že sa pri tvorení Si(110)(16x2) nezmenila polarita, avšak na výsledný povrch to vplyv nemá žiaden výrazný vplyv. Myslíme to tak, že počas zahrievania na 1200°C ešte pri tvorbe štruktúry Si(110)(16x2) sa povrch zahreje na dosť veľkú teplotu na to aby sa vrchná vrstva uvoľnila a preusporiadala sa do žiadanej rekonštrukcie (16x2), avšak pri tomto procese nastáva aj tzv. elektromigrácia, čo znamená že atómy podľa ich elektrického náboja počas zahrievania elektrickým prúdom sa po povrchu premiestňujú smerom k opačne polarizovanej katóde. Viac o tomto jave v [25]. Ako si môžeme na Obr. 16 všimnúť, v oblasti <a> a <b> je vzdialené zobrazenie a je vidieť minimum „makroskopických“ defektov. Na oblastiach <c-e> máme zobrazené

detaily tohto povrchu, kde môžeme vidieť niekoľko nepatrných defektov. Tieto defekty v takto vytvorenom povrchu na nami dobre pozorovateľných obrazoch tvoria iba do 5% zobrazovaného povrchu. Takýto povrch môžeme považovať za finálny. Pre prehľadnosť sú v tabuľke 2 znázornené všetky experimenty s táliom s ich výsledkami.

| # | Teplota | Deponované množstvo | Doba depozície | Zhodnotenie povrchu   |
|---|---------|---------------------|----------------|---|
| 1 | 160°C   | 1ML                 | 15min          | Pozostatky z rekonštrukcie 16x2, rekonštrukcia (1x1) je viditeľná len lokálne                   |
| 2 | 190     | 1ML                 | 18min          | Rekonštrukcia (1x1) viditeľná, povrch rozrušený, nezrovnaný (počas merania bol poškodený zdroj) |
| 3 | 170     | 1ML                 | 13min          | Rekonštrukcia (1x1) viditeľná, povrch má veľa defektov  |
| 4 | 180     | 1ML                 | 12min          | Rekonštrukcia (1x1) viditeľná, povrch má veľa výrazne menších defektov ako #3                   |
| 5 | 195     | 1ML                 | 13min          | Rekonštrukcia (1x1) viditeľná, málo defektov  |
| 6 | 210     | 1ML                 | 14min          | Rekonštrukcia (1x1) viditeľná, výrazne menej defektov ako pri predchádzajúcom meraní.           |

Tabuľka 2 - Zhrnutie jednotlivých meraní.

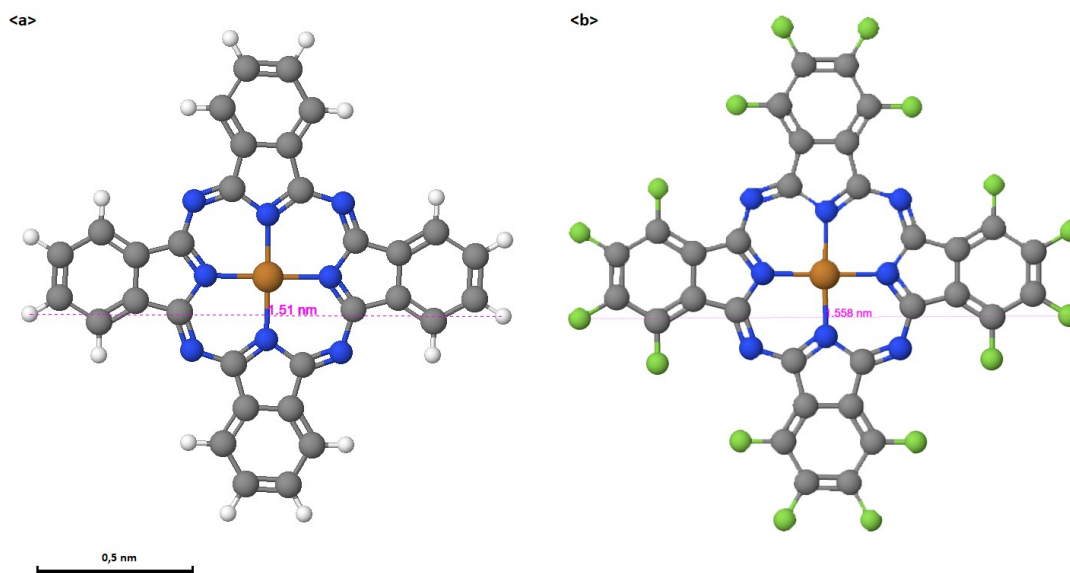


Obr. 16 - Zobrazenie najefektívnejšieho spôsobu pre tvorbu Si/Tl (1x1). Meranie obrázku <a-b> prebiehalo s napätím na hrote 1,5V, <c> s napätím na hrote 1V, <d> s napätím na hrote 1,6V a <e> s napätím na hrote 0,5V. V časti <a> a <b> môžeme vidieť vzdialenejšie zobrazenie tohto povrchu.

Teplotu by sme mohli ešte ďalej zvyšovať, ale to nie je náš cieľ. Kolegovia z katedry tento experiment už robili a aj keď zatiaľ nie je súčasťou žiadnej práce, povrch by pri vyššej teplote začal mať stále viac defektov, až pokiaľ by sa neuvoľnila rekonštrukcia (1x1) a tálium by postupne nezačalo desorbovať.

## 7 Depozícia organických molekúl

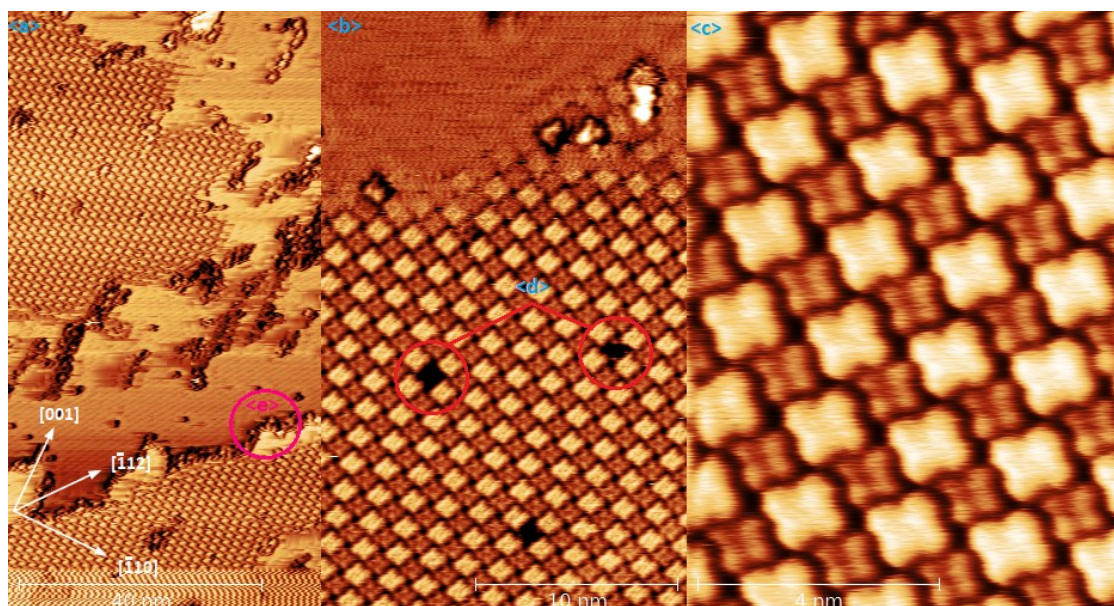
Po úspešnej príprave táliového povrchu Si/Tl (1x1) je našim posledným krokom overiť, či je tento povrch vhodný pre depozíciu organických molekúl, čím by sa dal pohodlne meniť jeho charakter a vlastnosti. Do tohto experimentu boli priamo zapojení aj kolegovia doc. RNDr. Pavel Kocán, Ph.D. a RNDr. Peter Matvija, Ph.D., ktorí nadeponovali organické molekuly ftalocianiny, aby sme mohli overiť vhodnosť materiálu pre depozíciu tohto typu molekúl. Priebeh depozície bol približne rovnaký ako depozícia tália, až na to že už sme nezahrievali substrát. Naparovali sme konkrétne CuPC, ktorého molekulu znázorňujeme na Obr. 17 <a> a F<sub>16</sub>CuPc, ktorého molekulu znázorňujeme na Obr. 17 <b>.



Obr. 17 - Zobrazenie molekuly CuPC a F<sub>16</sub>CuPc s porovnaním dĺžok. Na obrázku <a> vidíme 3D zobrazenie danej molekuly, kde oranžový atóm znázorňuje meď, modrý atóm zobrazuje dusík, šedý atóm zobrazuje uhlík a biele atómy sú vodíky. Na obrázku <b> máme znázornenú molekulu F<sub>16</sub>CuPc, ktorá obsahuje namiesto vodíka flór, ktorý je znázornený zelenými atómami.



Takže na predom pripravený povrch Si/Tl(1x1) bolo v priebehu 10 minút nadeponované približne 0,45ML CuPc a následne počas 2,5 minúty ešte 0,2ML  $F_{16}CuPc$ . Pri meraní bolo takmer na celom povrchu vidieť 2D plyn (2D plyn tvoria molekuly, ktoré sú priamo nad povrchom, ale nie sú zasadené do žiadnej štruktúry), ale na niektorých úsekoch bola vidieť pekná šachovnica z oboch molekúl. Tento povrch môžeme vidieť na Obr. 18. Na Obr. 18 <c> vidíme mozajku z oboch typov molekúl, avšak len ťažko sa určí, ktorá je ktorá. Dalo by sa predpokladať, že molekuly s flórom budú viac nabitejšie, čo znamená že budú mať viac obsadených stavov a teda keďže sme merali s kladným napätím na hrote, mohli by byť svetlejšie zobrazené.



Obr. 18 - Zobrazenie povrchu s organickými molekulami. Obrázok <a> bol meraný s napätím na hrote 0,8V a obrázky <b-c> s napätím na hrote 1,2V. V oblasti <a> je vidieť vzdialený pohľad, so zvýrazneným defektom v oblasti <e>, ktorý je bližšie popísaný v kapitole 8. Na obrázku <b> je vidieť priblíženejší obrázok, kde vo vrhnej časti je vidieť 2D plyn a plynulý prechod do mozajky z ftalocyaninov. Tiež sú tam znázornené v oblastiach <d> defekty, ktoré sú bližšie popísané v kapitole 8. Na obrázku <c> je detail mozaiky tvorenej ftalocyaninmi.

## 8 Defekty

Ako som spomínal zo začiatku merania, niektoré nami vytvorené povrchy obsahovali niekoľko typov defektov. V tejto kapitole si priblížime tie najčastejšie a najlepšie pozorovateľné z nich. Pre pochopenie defektov je potrebné si uvedomovať, čo sa deje počas tvorby novej rekonštrukcie (prípadne zániku starej).

Keď sa zruší rekonštrukcia nastane pomerne veľký presun hmoty. Pri tomto presune sa objavujú nadbytočné atómy ktoré sa pri znižovaní teploty ukladajú znovu do nejakej štruktúry. Prirodzene sa tvoria oblasti s prebytkom a oblasti s nedostatkom atómov. Nakoniec sa však spoja prebytky s nedostatkami a väčšina atómov sa zabuduje do prirodzených schodov povrchu, takže z prebytkov vzniknú vrchné schody, resp. zaplnia menšie diery a z nedostatkov vzniknú spodné schody. Za dokonalého povrchu a podmienok by sa pravdepodobne vytvoril jeden alebo dva veľké schody. Avšak v skutočnosti sa stáva, že niektoré atómy sa k nejakému schodu nedostanú a zostanú niekde na povrchu a vytvoria tzv. 2D schod. Najviac sme sa k tomuto ideálu priblížili pri meraní, kde sme tálium deponovali na povrch o teplote približne 195°C a preto sme ho označili za finálny. Podobné defekty sa už rozoberali na povrchu, kde pod táliom bol substrát Si(111) v [26].

Takže na tomto princípe môžeme vidieť štyri základné typy defektov jeden je malý schod, ktorý je tvorený zhlukom atómov Si, ktoré pri zrušení rekonštrukcie 16x2 nemali dost' teploty resp. kinetickej energie a „nenaši“ tzv. schod celého povrchu (schodom povrchu myslíme veľký schodovitý útvar, ktorý môžeme vidieť na každom vzdialenejšom snímku napr. na Obr. 13) a začali vytvárať nový malý schod. Druhý typ je vlastne opakom prvého defektu, kde sa nenašlo dost' atómov na zaplnenie nejakej diery (vyššie spomínaného nedostatku atómov). Takéto defekty sa zobrazujú na STM snímkach ako tmavšie oblasti rôznych veľkostí od celistvých dier až po pár atómové dierky. Pri týchto väčších „ostrovčekoch“ môže nastať prípad, kedy je ostrovček dost' veľký a v takomto prípade vznikne rekonštrukcia aj na takomto schode resp. v diere. Tento prípad je výborne pozorovateľný na Obr. 12 <e>. Pre zvýraznenie sme ho vyznačili červenou farbou.



Tým sa presúvame k tretiemu a štvrtému typu, ktoré sú len konkrétne prípady prvých dvoch typov a teda sú tiež opakom jeden druhého. Ide o drobné defekty väčšinou spôsobené len jedným alebo pár atómami. V jednom prípade ide o prebytočný atóm (znázornené na Obr. 14 <d>, kde sme defekty zvýraznili červenou farbou), ktorý vytvorí bodový defekt, ktorý vidíme ako svetlý bod a v druhom prípade ide tiež o bodový defekt, ale tvorený nedostatkom, ktorý sa nám môže zobrazovať ako tmavá diera v povrchu. Tieto defekty v danom mieste úplne poškodia rekonštrukciu (1x1). Tieto defekty môžeme veľmi dobre pozorovať na Obr. 15 <c>, kde sme ich pre zvýraznenie označili červenou farbou.

### 8.1 Defekty na povrchu s molekulami

Pri depozícií približne jednej ML tália, sa saturujú všetky atómy kremíku, čo v ideálnom prípade vytvorí dokonalý povrch Si/Tl (1x1). Ale keďže ideálny prípad nastáva len výnimočne, tak pri defektoch už na povrchu tália sa môže stať, že v takejto oblasti nie je saturácia úplná a teda na oblastiach defektov popísaných vyššie sa objavujú nesaturované kremíky, s ktorými molekuly okamžite reagujú a pripoja sa k nim. Takéto útvary sa potom zobrazujú ako zaoblené hrany pôvodných schodov. Tieto útvary si môžeme všimnúť na Obr. 18 <e>

Druhým typom defektu už na povrchu s deponovanými molekulami by mohol byť prípad, keď defekt z 1x1 rekonštrukcie ovplyvní aj depozíciu organických molekúl. Konkrétne by sme uviedli bodové defekty, kde je jeden atóm (resp. malá skupinka atómov) kremíka nezpracovaný do povrchu a bodovo zabráni rekonštrukcií tália (1x1). Takýto defekt potom nedovolí jednej (alebo viacerým, ale len v malom množstve) z molekúl sa „usadiť“ a vytvorí nami pozorovateľnú diery v tvare chýbajúcej molekuly. Takýto defekt môžeme pozorovať na Obr. 18 <d>

## 9 Záver

V súlade so zadaním bakalárskej práce, sme sa zoznámili s technikou STM, pochopili sme jej podstatu a naučili sme sa s ňouarábať. Naše vedomosti sme spracovali v prvej časti tejto práce. Potom sme sa zoznámili s problematikou povrchu Si(110) a s jej možnými využitiami a aplikáciami vo svete. Ďalej sme študovali kombináciu Si (110) s ostatnými materiálmi a ich možnosťou využitia ďalej vo svete. Stručný prehľad je uvedený v kapitole Si(110). V poslednej z úvodných častí (Aparatúra) sme preukázali znalosť aparatury a podrobne sme ju rozobrali a opísali.

Ďalším z hlavných cieľov bolo pripraviť povrch Si(110) s rekonštrukciou (16x2). Počas niekoľkých príprav sme identifikovali relevantné parametre, ktoré ovplyvňovali správnu tvorbu rekonštrukcie. Zistili sme, že pre tvorbu je veľmi podstatný čas priamo po žíhaní. Počas tohto obdobia je nutné znížiť teplotu ktorú udržujeme niekoľko minút. Najvhodnejšou teplotou sa ukázala teplota vytvorená príkonom o veľkosti 7W, čo je približne 230°C, pričom sme túto teplotu udržiavali po dobu 3 minút.

Pri depozícii tália sme zistili, že najdôležitejším parametrom pri tvorbe povrchu Si/Tl(1x1) je teplota počas depozície tália. Urobili sme mnoho experimentov s mnohými teplotami a postupne sme sa dopracovali k záveru, že pri nízkych teplotách atómy pri zmene rekonštrukcie nemajú dost' energie na zrušenie starej rekonštrukcie a vytvorenie novej a zároveň keby sme použili príliš vysokú teplotu, tak by tálíum začalo desorbovať, čo by viedlo k tvoreniu ďalších defektov. Preto sme nakoniec za finálnu označili teplotu, pri ktorej sa nám podarilo dosiahnuť povrch so súvislými rovinami pokrytý minimálnym množstvom defektov.

Tento výsledok sme dosiahli pri teplote počas depozície približne 210°C.

Zhodnotili sme nami vytvorené povrchy a odiskutovali sme čo presne na nich vidíme a aj možné spôsoby prečo na nich vznikajú defekty a ako aj hotové povrchy s požadovanými rekonštrukciami ako Si/Tl(1x1).

Nakoniec sme overili, že je možné tento povrch ďalej použiť pre depozíciu organických molekúl. Vhodnosť sme overili depozíciou molekúl Ftalocyaninov.

## 10 Zoznam použitej literatúry

- [1] P. K. Hansma, Jerry Tersoff *Journal of Applied Physics* 61, R1 (1987)
- [2] S. B. Desai, S. R. Madhvapathy, A. B. Sachid, J. P. Llinas, Q. Wang et al. *Science* 07 Oct 2016: Vol. 354, Issue 6308, pp. 99-102
- [3] O'Mara W. C., Herring R. B., Hunt L. P.: *Handbook of Semiconductor Silicon Technology*, Noyes Publications, 1990, 349-352
- [4] G.Binnig H.Rohrer *Surface Science* Volume 126, Issues 1–3, 2 March 1983, Pages 236-244
- [5] T. Yamasaki et al 2016 *Appl. Phys. Express* 9 035501
- [6] A. Visikovskiy, M. Yoshimura, K. Ueda, *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008) 7626
- [7] K. Bhattacharjee, A. Roy, K. Kundu, B. Dev, *Phys. Rev. B* 77 (2008) 115430.
- [8] M. Suemitsu, Y. Miyamoto, H. Handa, A. Konno, *J. Surf. Sci. Nanotechnol.* 7 (2009) 311.
- [9] H. Fukidome et al 2011 *Appl. Phys. Express* 4 115104
- [10] Y. Yamada, A. Girard, H. Asaoka, H. Yamamoto, and S. Shamoto, *Phys. Rev. B* 76, 153309 (2007)
- [11] T. Ichikawa, *Surf. Sci.* 544, 58 (2003)
- [12] A. A. Stekolnikov, J. Furthmüller, and F. Bechstedt, *Phys. Rev. Lett.* 93, *Phys. Rev. B* 70, 045305 (2004).
- [13] K. Sakamoto, M. Setvin, K. Mawatari, J. Eriksson, K. Miki and R. Uhrberg *Physical Review B. Condensed Matter and Materials Physics*, (79), 4, 045304. 2009
- [14] T. Yamasaki, K. Kato, T. Uda, T. Yamamoto, T. Ohno *Applied Physics Express* 9, 035501 (2016)
- [15] E. Annese, T. Kuzumaki, B. Müller, Y. Yamamoto et al. *Phys. Rev. Lett.* 117, 016803 (2016)

- [16] T. Oyama, S. Ohi, A. Kawazu, and G. Tominaga, *Surf. Sci.* 109, 82 (1981).
- [17] S. N. Takeda, and H. Daimon *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 34, 051401 (2016)
- [18] M. Kopciuszynski, R. Zdyb, P. Nita, M. Dachniewicz, P. Dyniec *Applied Surface Science* 373 (2016) 8–12
- [19] A. Visikovskiy, M. Yoshimura, K. Ueda et al. *Applied Surface Science* 254 (2008) 7626–7629
- [20] A. Visikovskiy, M. Yoshimura, K. Ueda et al 2009 *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 08JB11
- [21] Toshu An, Masamichi Yoshimura, Izumi Ono, and Kazuyuki Ueda *Phys. Rev. B* 61, 3006 –January 2000
- [22] K. Sakamoto; M. Setvin; K. Mawatari; et al. *Phys. Rev. B* 79, 045304 –January 2009
- [23] N. D. Kim, Y. K. Kim, C.-Y. Park, H. W. Yeom, H. Koh, E. Rotenberg, and J. R. Ahn *Phys. Rev. B* 75, 125309 –March 2007
- [24] A. Miyachi, H. Sone and S. Hosaka *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 10 (2006) pp. 2595 to 2598
- [25] E.D. Williams *Solid-State-Communications*, Volume 107, Issue 11, 7 August 1998, Pages 681-691
- [26] P. Kocan, P. Sobotík, and I. Ostádal *PHYSICAL REVIEW B* 84, 233304 (2011)

## 11 Zoznam použitých skratiek

STM – scanning tunneling mikroskop(y) – skenovacia tunelová mikroskopia

UHV – ultra high vacuum – ultra vysoké vákum

ML – monolayer - monovrstva

DMS - Dilute Magnetic Semiconductor – polovodiče dopované magnetickými látkami

MOS – Metal Oxide Semiconductor

CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor

MOSFET tranzistor - Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor – tranzistor ktorý je na základe napätia schopný meniť vodivosť súčiastky

FinFET - Fin Field-Effect Transistor – variácia MOSEF

RB - Rashba-Bychkov – model o podobe elektrónových pásov a spinových štruktúrach