

# **Zobrazování polovodičových struktur užitím mikroskopie atomárních sil**

Projection of Semiconductor Structures Using Atomic Force  
Microscopy

Bc. Josef Kudělka

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef KUDĚLKA**  
Osobní číslo: **A11524**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Zobrazování polovodičových struktur užitím  
mikroskopie atomárních sil**

Zásady pro vypracování:

- 1. Seznamte se s metodou mikroskopie atomárních sil.**
- 2. Popište použitý měřicí systém.**
- 3. Realizujte měření vybrané polovodičové struktury.**
- 4. Provedte vizualizaci a vyhodnocení měření.**
- 5. Navrhněte další postup při použití daného měřicího systému.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **AGILENT TECHNOLOGIES. 5420 Scanning Probe Microscope: Users guide** [online]. USA, 2012 [cit. 2013-02-05]. Rev D. Dostupné z: [http://nano.tm.agilent.com/PDFs/5420\\_User\\_Guide\\_Revision\\_D.pdf](http://nano.tm.agilent.com/PDFs/5420_User_Guide_Revision_D.pdf)
2. **AGILENT TECHNOLOGIES. Scanning Microwave Microscopy Mode: Users guide** [online]. USA, 2011 [cit. 2013-02-05]. Revision B-2. Dostupné z: [http://nano.tm.agilent.com/PDFs/SMM\\_Mode\\_User\\_Guide\\_Rev\\_B-2.pdf](http://nano.tm.agilent.com/PDFs/SMM_Mode_User_Guide_Rev_B-2.pdf)
3. **GROVE, [by] A.S. Physics and technology of semiconductor devices.** New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, 1967. ISBN 978-047-1329-985.
4. **HAUGSTAD, Greg. Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications.** Hoboken, N.J.: John Wiley, c2012, xxii, 464 p. ISBN 978-047-0638-828.
5. **WU, Shijie a Theresa HOPSON. SMM Imaging of Dopant Structures of Semiconductor Devices.** In: Application note [online]. USA: [c] Agilent Technologies, 2012 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-0562EN.pdf>
6. **HAWKES, P a John C SPENCE. Science of microscopy.** New York: Springer, c2007, 2 v. lxxviii, 1265, 126 p. ISBN 03-872-5296-7.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**  
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**3. června 2013**

Ve Zlíně dne 8. února 2013



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá principy zobrazování povrchů a měřením elektromagnetických vlastností vzorků pomocí metod vycházejících z mikroskopie atomárních sil (AFM). Největší důraz je kladen na studium polovodičových struktur s využitím kontaktního módu mikroskopie atomárních sil a skenovací mikrovlnné mikroskopie (SMM). K měření je použit mikroskopický systém Agilent 5420 SPM, který je v této práci rovněž popsán.

Klíčová slova: mikroskopie skenující sondou, SPM, mikroskopie atomárních sil, AFM, skenovací mikrovlnná mikroskopie, SMM

## **ABSTRACT**

This thesis describes the principles of surface visualisation and measurements of electromagnetic properties of samples using methods based on atomic force microscopy (AFM). The main purpose is the study of semiconductor structures using contact mode atomic force microscopy and scanning microwave microscopy (SMM). These measurements were taken using the microscopy system Agilent 5420 SPM, which is also described in this thesis.

Keywords: scanning probe microscopy, SPM, atomic force microscopy, AFM, scanning microwave microscopy, SMM

Děkuji Ing. Milanovi Navrátilovi, Ph.D. a doc. RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, CSc.  
za odborné konzultace, připomínky a za optimistický a kolegiální přístup.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL (AFM – ATOMIC FORCE MICROSCOPY)</b> .....	<b>12</b>
1.1 PRINCIP AFM.....	12
1.1.1 Pracovní režimy.....	13
1.2 VARIACE AFM.....	15
1.2.1 Skenovací mikrovlnná mikroskopie (SMM – Scanning Microwave Microscopy).....	15
1.2.1.1 S parametry .....	18
1.2.1.2 Měření koncentrace dopantů u polovodičů.....	19
1.2.2 Mikroskopie elektrostatických sil (EFM – Electric Force Microscopy).....	20
1.2.3 Mikroskopie modulovaných sil (FMM - Force Modulation Microscopy).....	20
1.2.4 Mikroskopie laterálních sil (LFM – Lateral Force Microscopy).....	21
1.2.5 Mikroskopie magnetických sil (MFM – Magnetic Force Microscopy) .....	22
1.2.6 Mikroskopie fázových rozdílů (PDM - Phase Detection Microscopy).....	23
1.2.7 Skenovací teplotní mikroskopie (SThM - Scanning Thermal Microscopy).....	23
1.2.8 Mikroskopie příčných sil (TDFM - Transverse Dynamic Force Microscopy).....	23
1.2.9 Mikroskopie ultrazvukových sil (UFM - Ultrasonic Force Microscopy).....	23
<b>2 POUŽITÝ MĚŘICÍ SYSTÉM - AGILENT 5420 SPM</b> .....	<b>24</b>
2.1 MIKROSKOP - AGILENT 5420 SPM/AFM .....	26
2.1.1 Tělo mikroskopu (Microscope Base) .....	26
2.1.2 Sonda (Probe).....	27
2.1.3 Kónické zakončení (Nose Cone).....	28
2.1.4 Skener (Scanner) .....	28
2.1.5 Detektor (Detector) .....	30
2.1.6 Stolek (Sample Plate).....	30
2.1.7 Video systém (Video System).....	30
2.2 ŘÍDICÍ JEDNOTKA (HEB - HEAD ELECTRONICS BOX) .....	31
2.3 AFM KONTROLÉR (AFM CONTROLLER) .....	31
2.4 ANTIVIBRAČNÍ IZOLAČNÍ KOMORA (VIBRATION ISOLATION CHAMBER) .....	32
2.5 PŘÍSLUŠENSTVÍ K MAC III MÓDU.....	32
2.6 PŘÍSLUŠENSTVÍ K SMM MÓDU .....	33
2.7 PŘÍSLUŠENSTVÍ PRO MĚŘENÍ V KAPALINÁCH .....	33
2.8 PŘÍSLUŠENSTVÍ PRO REGULACI TEPLoty .....	34
2.9 SOFTWARE.....	34

<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>MĚŘENÍ, VIZUALIZACE A ANALÝZA VYBRANÉ POLOVODIČOVÉ STRUKTURY</b> .....	<b>36</b>
3.1	PROCES NASTAVENÍ SYSTÉMU .....	37
3.2	KALIBRACE .....	42
3.2.1	Proces kalibrace.....	42
3.3	MĚŘENÍ VYBRANÉ POLOVODIČOVÉ STRUKTURY .....	45
3.4	VIZUALIZACE NAMĚŘENÝCH DAT .....	46
3.5	ANALÝZA VIZUALIZOVANÝCH DAT.....	49
<b>4</b>	<b>NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU PŘI VYUŽITÍ DANÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>52</b>
4.1	BREAKOUT BOX .....	52
4.2	PICOLITH .....	52
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ</b> .....	<b>55</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>59</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>63</b>

## ÚVOD

V úvodu své diplomové práce vysvětluji důvody, proč bylo vybráno k vypracování právě téma Zobrazování polovodičových struktur užitím mikroskopie atomárních sil, jaké byly stanoveny cíle a také členění celé práce.

Nanotechnologie je jeden z nejvíce rozvíjejících se oborů současnosti s velkým budoucím potenciálem v mnoha oblastech běžného života jako je elektronika, zdravotnictví, strojírenství, chemický průmysl, optický průmysl, vojenský průmysl atd.. Všechny tyto oblasti jsou také provázány s oborem Bezpečnostní technologie, systémy a management, který studuji, a proto jsem se již v druhém ročníku vysoké školy zaměřil na obor nanotechnologie. První dva roky jsem pracoval na sestavení a testování skenovacího a litografického mikroskopického systému, jenž v současnosti používají další studenti. Když naše univerzita zakoupila profesionální systém Agilent 5420 SPM, začal jsem pracovat na něm.

Systém Agilent 5420 SPM ovládá většinu neznámějších mikroskopických metod jako jsou skenovací tunelová mikroskopie, mikroskopie atomárních sil nebo mikroskopie magnetických sil, ale kromě toho i poměrně novou metodu skenovací mikrovlnné mikroskopie.

Po zprovoznění systému a počátečním testování trvajícím jeden rok jsem si dal v této práci následující cíle:

- Popsat metodu mikroskopie atomárních sil a z ní vycházející variace s důrazem na skenovací mikrovlnnou mikroskopii.
- Popsat použitý měřicí systém, jeho jednotlivé komponenty a jejich zapojení.
- Provést měření polovodičové struktury užitím mikroskopie atomárních sil a skenovací mikrovlnné mikroskopie.
- Vizualizovat a analyzovat naměřená data.
- Navrhnout další postup při použití daného měřicího systému.

Členění práce vychází ze stanovených cílů. Teoretická část seznamuje s metodami založenými na mikroskopii atomárních sil a s měřicím systémem. Praktická část se věnuje provedení nastavení systému, kalibraci, samotnému měření polovodičové struktury,

vizualizaci a analýze naměřených dat. Nakonec praktické části je navržen další postup při použití systému. V závěru celé práce jsou jednotlivé body shrnuty a vyhodnoceny, přičemž největší prostor je věnován vyhodnocení naměřených dat.

Nyní následuje první kapitola teoretické části vysvětlující princip a dílčí variace mikroskopie atomárních sil.

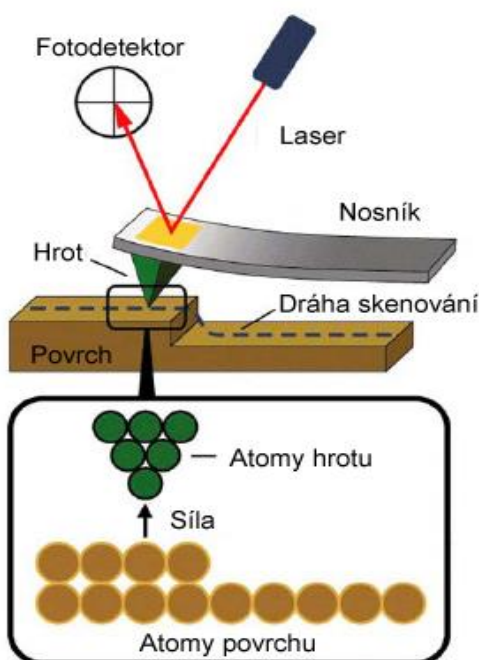
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL (AFM – ATOMIC FORCE MICROSCOPY)

Mikroskopie atomárních sil je mikroskopická technika umožňující trojrozměrné zobrazování nebo upravování povrchu. Jako první ji v roce 1986 realizovali Gerd Binnig, Calvin F. Quate a Christoph Gerber. Díky její hlavní výhodě – možnosti měření i nevodivých vzorků se stala nejrozšířenější odnoží mikroskopie skenující sondou (SPM – Scanning Probe Microscopy).

## 1.1 Princip AFM

Metoda je založena na mapování rozložení atomárních sil na povrchu vzorku. Tyto síly jsou mapovány těsným přiblížením hrotu k povrchu, čímž vzniká přitažlivá nebo odpudivá síla, která způsobí ohnutí nosníku, na němž je upevněn hrot. Toto ohnutí je snímáno citlivým, zpravidla laserovým snímačem a vytváří měronosnou veličinu. [1]

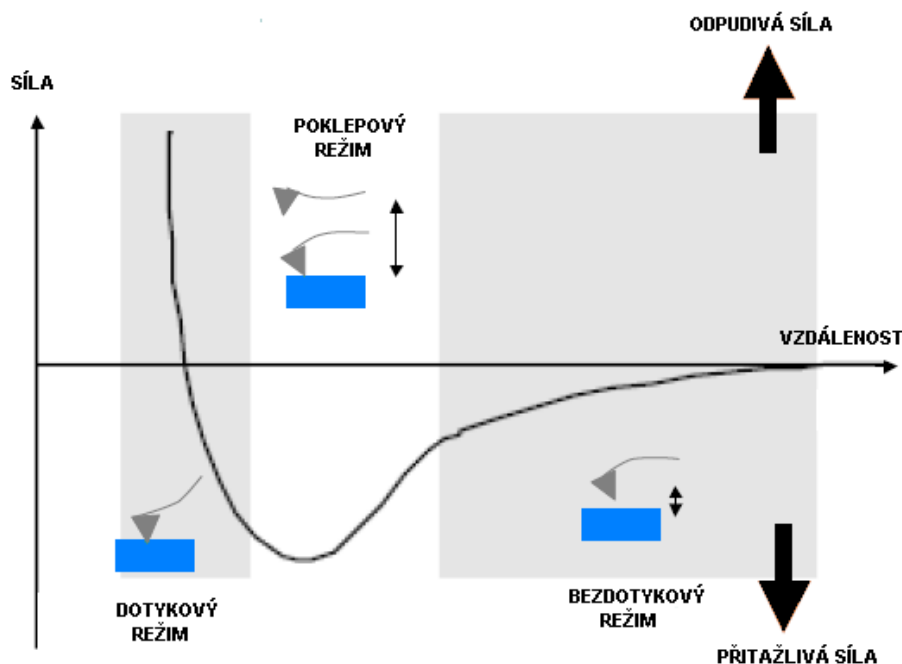


Obr. 1. Princip AFM [2]

Detektor ohnutí je tvořen laserovou diodou, která vytváří skvrnu konečné velikosti, jež dopadá na špičku nosníku a od něj se odráží. Odražené světlo dopadá na světelný detektor rozdělený na dvě citlivé části. Před vlastním měřením se systém mechanicky vyváží tak, aby energie svazku dopadající do obou částí (duantů) byla stejná. Při měření se ohyb

projeví posunem odrazu, takže energie v jednotlivých duantech už nebudou stejné a z jejich poměrů je možno určit vychýlení nosníku. V současné době se obvykle využívá kvadrantní detektor, který je rozdělen na čtyři části a umožňuje detekovat pohyb skvrny v dalším kolmém směru - tedy zkrut nosníku. [1]

Síly ohýbající nosník mohou být různé fyzikální podstaty, především se však uplatňuje přitažlivá van der Waalsova síla působící mezi dvěma atomy na větší vzdálenosti a odpudivá síla plynoucí z Pauliho principu, která působí na menších vzdálenostech. Celková síla může být jak odpudivá, tak i přitažlivá v závislosti na vzdálenosti hrotu. [1]



Obr. 2. Síly ohýbající raménko [3]

### 1.1.1 Pracovní režimy

Z tohoto "rozdělení" je možno odvodit následující pracovní režimy:

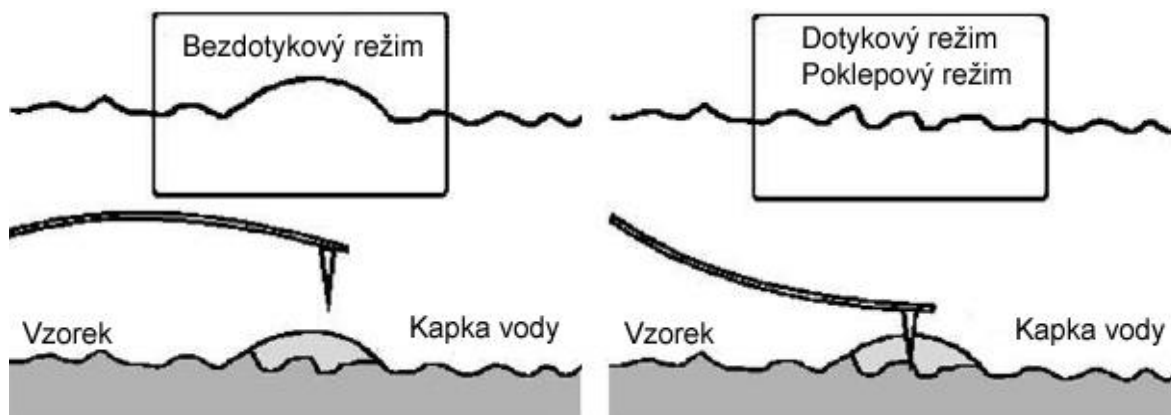
- **Dotykový (Contact mode)** - zde je vzdálenost hrotu a povrchu tak malá, že výsledná síla je odpudivá a snaží se ohýbat nosník od povrchu. Bude-li jeho tuhost menší než efektivní tuhost držící pohromadě atomy povrchu, lze ohnutí nosníku použít k měření sil. V opačném případě se nosník neohne, ale může způsobit poškození vzorku. Do ohnutí se však ještě promítají i jiné síly, které brání kvalitnímu zobrazení. Jde především o kapilární síly vznikající v kapičkách vody

zkondenzované na povrchu vzorku z okolní vlhkosti. Další působící veličinou může být vlastní pružnost nosníku. [1]

Tento režim lze rovněž provozovat ve dvou modifikacích, a to sice:

- Režim s konstantní výškou, při němž je udržována určená hodnota výšky a měří se ohnutí nosníku. Metoda dosahuje lepšího rozlišení i rychlosti než metoda s konstantní silou, ale používá se pouze u plochých povrchů, kde jsou malé výkyvy nosníku a u rychle měnících se povrchů, kde je nezbytná vysoká rychlost. [1, 2]
  - Režim s konstantní silou, kdy se udržuje konstantní ohnutí nosníku a posunuje se vzorkem (či hrotem) ve směru osy z. Tato modifikace je častěji používaná, protože se vyvarujeme problému způsobených pružností nosníku a můžeme skenovat povrchy s větší výškovou různorodostí. Rychlost skenování a velikost rozlišení je ovšem limitována obvodem zpětné vazby. [1, 2]
- 
- **Bezdotykový (Non-contact mode)** - je vibrační technika, při níž je vzdálenost mezi hrotem a vzorkem udržována v strmé části vzestupné závislosti van der Waalsových sil. Její výhodou je měření bez mechanického kontaktu, což umožňuje měřit i měkké a elastické vzorky a zabraňuje možnému znečištění. Protože je v tomto režimu nosník ke vzorku přitahován, musí být dostatečně tuhý, aby nedošlo k přiskočení ke vzorku a k poškození. Zároveň však na něj v této vzdálenosti působí malé síly a je tedy ohnutí velmi malé, tudíž i měřicí signál je velmi malý. [1]
  - **Pokleповý (Tapping mode)** – tento režim je výhodnější než dotykový v případech, kde by hrozilo poškození povrchu třením nebo tažením, a je rovněž vhodnější než bezdotykový, je-li nutno snímat větší plochy. [1]

Uvedené režimy se výrazně liší v případech, kdy je zkoumaný povrch částečně pokryt zkondenzovanou vodou.



Obr. 3. Režimy AFM [4]

Bezdotykový režim bude snímat reliéf odpovídající povrchu vodní kapky, ale dotykový i pokleповý budou sledovat povrch vzorku. [1]

## 1.2 Variace AFM

S postupem času a rozvojem techniky mikroskopie atomárních sil se objevila celá řada různých variací vhodných pro studium určitých typů povrchů a jejich vlastností. Jednotlivé variace jsou často obsaženy v jednom přístroji a můžeme tak současně získat i více druhů signálů.

V následujícím výčtu nejznámějších metod vycházejících z AFM je největší pozornost věnována skenovací mikrovlnné mikroskopii (SMM), jakožto poměrně nové a málo popsané metodě slibující velký potenciál zejména při měření fyzikálních vlastností materiálů. Níže uvedený popis vychází z použití v systému Agilent 5420 SPM.

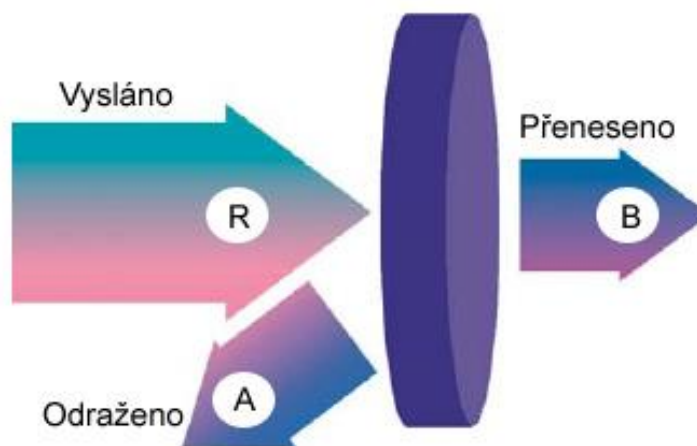
U ostatních metod je popsán jejich obecný princip platící v nezávislosti na použitém měřicím systému.

### 1.2.1 Skenovací mikrovlnná mikroskopie (SMM – Scanning Microwave Microscopy)

Mapování fyzikálních vlastností materiálů je velice důležité pro materiálový a polovodičový průmysl. Tato mapování jsou ovšem složitější než pouhé zobrazování topografie, poněvadž v mnoha případech jsou tyto vlastnosti ovlivněny strukturami

nacházejícími se pod povrchem zkoumaného vzorku. Je proto tedy důležité zvolit správnou techniku, aby byly tyto vlastnosti citlivě změřeny v dostatečném rozlišení a zkoumaný vzorek zůstal nepoškozen. Od objevení SPM a AFM bylo vyvinuto několik metod (např. SCM, SMM, SSRM, EFM, CSAFM, KFM) umožňujících taková měření. Zatímco každá z uvedených metod má své výhody i nevýhody, SMM a SCM prokázaly největší potenciál jak v oblasti vědeckého výzkumu, tak i v průmyslových aplikacích. [6, 8]

Skenovací mikrovlnná mikroskopie je metoda kombinující měřicí schopnosti vektorového obvodového analyzátoru (VNA – Vector Network Analyzer) s nanometrickým rozlišením a polohovacími schopnostmi mikroskopu atomárních sil. Umožňuje měřit nejen impedanci, kapacitanci a dielektrické konstanty, ale také koncentraci dopantů v polovodičích. [6, 8]

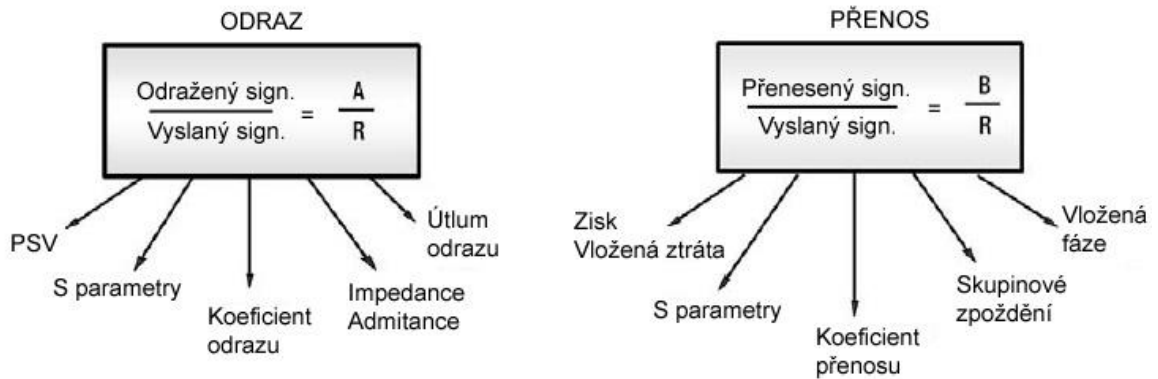


Obr. 4: Optická analogie k SMM [8]

Princip metody je snadno pochopitelný užitím optické analogie. Když vyslané světlo narazí na objekt, část světla je odražena a část je přenesena skrz. Množství odraženého a přeneseného světla je následně změřeno a porovnáno s vyslaným světlem. Pomocí výpočtů je posléze možno určit optické vlastnosti objektu. [8]

Stejný princip je využit i v mikrovlnné oblasti. VNA má dva pracovní režimy: přenos a odraz. V režimu přenosu je porovnáván vyslaný signál (generovaný ve VNA) se signálem přeneseným skrze měřený vzorek, zatímco v režimu odrazu je vyslaný signál porovnáván se signálem odraženým od měřeného vzorku. [6, 8]

V užívané terminologii je vyslaný signál označován písmenem R (referenční), odražený signál písmenem A a přenesený signál písmenem B. Z hodnoty jejich amplitudy a fáze lze vypočítat odrazové a přenosové parametry. [9]



Obr. 5. Odrazové a přenosové parametry [9]

Některé veličiny mají čistě skalární podobu (fáze není měřena nebo je ignorována, např. útlum odrazu), některé vektorovou (např. impedance) a některé přímo souvisí s fází (např. skupinové zpoždění). [9]

$$\Gamma = \frac{V_{\text{reflected}}}{V_{\text{incident}}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

$$\rho = |\Gamma| \quad (2)$$

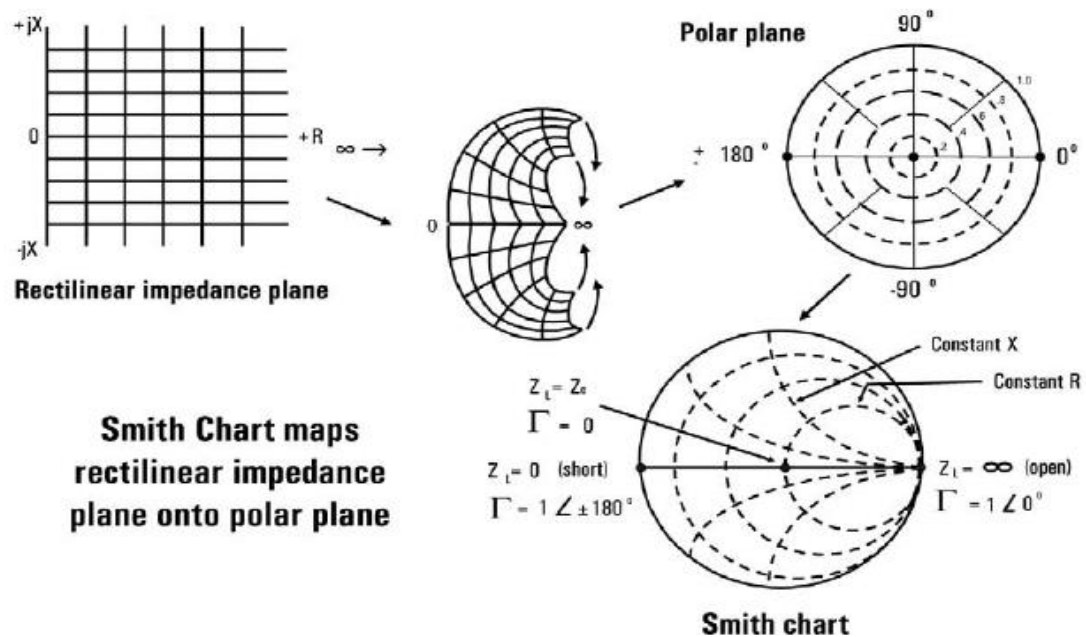
Koefficient odrazu (Reflection Coefficient) gamma ( $\Gamma$ ) je vyjádřen jako poměr velikosti odraženého ( $V_{\text{reflected}}$ ) a vyslaného ( $V_{\text{incident}}$ ) signálu ve voltech. Může být také dopočítán ze znalosti impedance přenosového vedení  $Z_0$  a zátěže  $Z_L$ . [9]

Magnitudu gammy určuje rho ( $\rho$ ). V praxi mohou teoreticky nastat tyto tři případy:

1. Veškerý signál bude přenesen  $\rightarrow \rho = 0$  ( $V_{\text{reflected}} = 0$ )
2. Část signálu se odrazí  $\rightarrow \rho > 0$  ( $V_{\text{reflected}} > 0$ )
3. Veškerý signál bude odražen  $\rightarrow \rho = 1$  ( $V_{\text{reflected}} = V_{\text{incident}}$ )

Z uvedeného tedy vyplývá:  $0 \geq \rho \leq 1$

Z uvedeného vztahu je tedy možné matematicky vypočítat impedanci měřeného bodu. Toto jedno číslo by ovšem nedávalo úplný obraz vzhledem k tomu, že impedance se zpravidla mění s frekvencí a bylo by tedy obtížné výsledky správně interpretovat. Pro vyřešení tohoto problému a správnou interpretaci výsledků je využíván Smithův diagram (Smith Chart). Tato funkce je integrovaná v samotném VNA. [9]



Obr. 6. Smithův diagram [9]

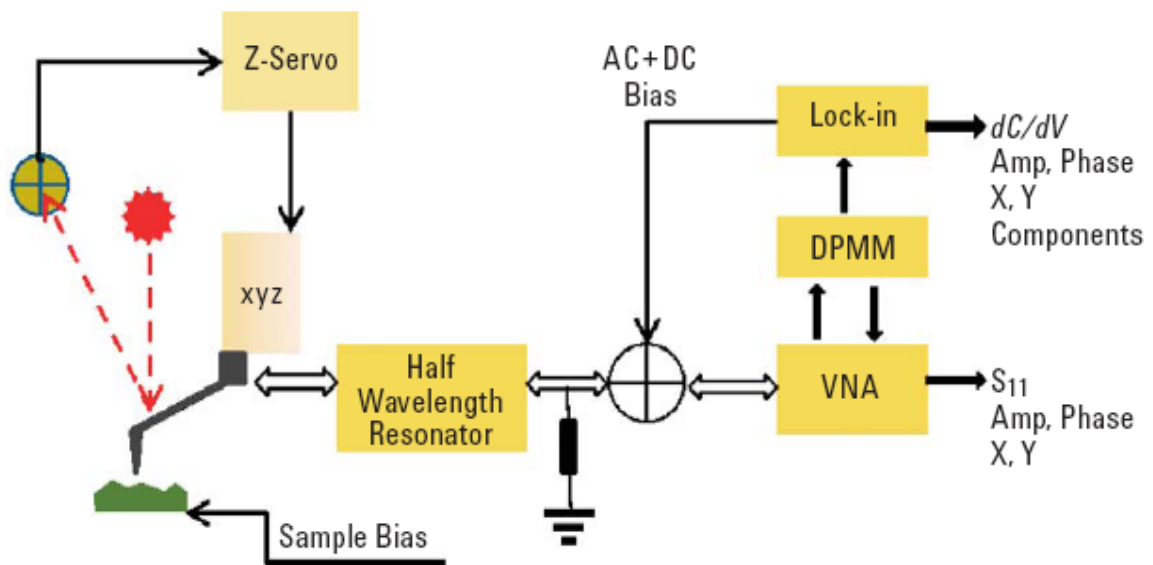
Největší citlivost  $\Gamma$  je dosažena při rezonanci, kdy je impedance testovaného vzorku srovnatelná s charakteristickou impedancí. Při měření v blízkosti rezonance měřený komplexní koeficient odrazu přímo souvisí s impedancí v kontaktním bodě testovaného vzorku a jsou zaznamenány i malé změny impedance. To je využito i při měření kapacitance, která je při správné kalibraci určena ze změny impedance. Pro kalibraci je používán kalibrační standard – zlaté čepičky na schodovitých vrstvách oxidu křemičitého (silicion oxide) na křemíkové (silicon) podložce. [8]

### 1.2.1.1 S parametry

Měření proudu a napětí při vyšších frekvencích je často obtížné. Proto bývají měřeny tzv. S parametry, jež souvisí s dobře známými parametry jako koeficient odrazu, ztráta a zisk. Jejich výhodou je poměrně snadná měřitelnost, využitelnost při simulacích, analýzách a možnost dopočítání dalších parametrů v případě potřeby. [9]

### 1.2.1.2 Měření koncentrace dopantů u polovodičů

S využitím dC/dV kontroléru (nazývaném též DPMM - Dopant Profile Measurement Module) je systém schopen měřit souběžně s topografií a kapacitancí také koncentraci dopantů v polovodičích. Mikrovlnný signál z VNA je rozdělen na dvě části. První část je zesílena a použita jako lokální oscilační signál (LO) pro dC/dV směšovač. Druhá část je také zesílena a společně s RF signálem z MAC kontroléru poslána do sondy. [10]



Obr. 7. SMM – Měření kapacity a koncentrace dopantů [10]

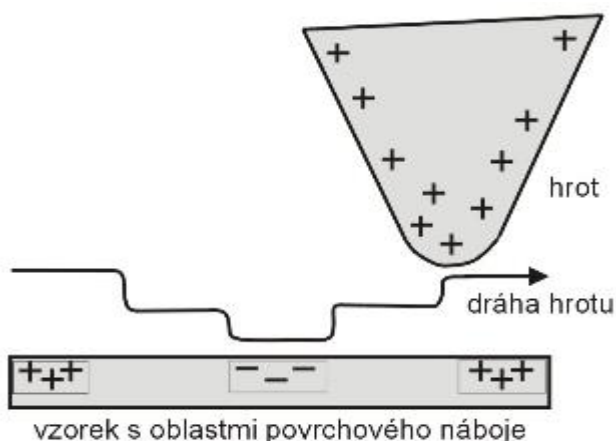
Vzhledem ke změnám kapacity vzorku vyvolaným RF signálem je mikrovlnný signál odražen a modulován v závislosti na něm. Poté je odražený a namodulovaný RF signál rozdělen na dvě části, z čehož první část je po zesílení poslána do směšovače DPMM, kde je smíšena s LO signálem a demodulována. Tento demodulovaný signál je následně využit lock-in zesilovačem k získání amplitudového a fázového dC/dV signálu. Druhá část je poslána do VNA k získání hodnoty kapacity. [10]

V případě, že systém není pro měření koncentrace dopantů kalibrován, jsou viditelné pouze změny koncentrace bez směrodatných hodnot.

### 1.2.2 Mikroskopie elektrostatických sil (EFM – Electric Force Microscopy)

Metoda slouží k mapování rozložení elektrostatických nábojů na povrchu vzorku. Na hrot i povrch je přivedeno napětí, ale vzájemně se nedotýkají. Při změně náboje na povrchu dojde k ohybu nosníku v závislosti na velikosti náboje, což lze vyhodnocovat podobně jako u mikroskopie magnetických sil. [14]

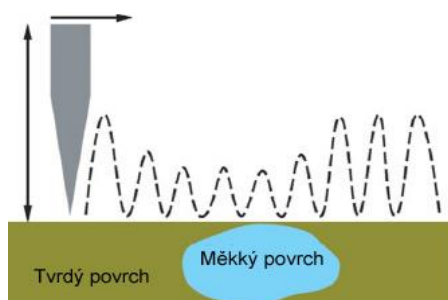
EFM se používá především ke studiu prostorových změn hustoty povrchového náboje. Tímto způsobem může být mapováno např. elektrostatické pole elektronických obvodů při zapnutí a vypnutí přístrojů. Tato technika, známá jako „napěťová sonda“ je cenným nástrojem pro testování aktivních mikroprocesorových čipů v submikronových mezích nebo v nanotechnologických aplikacích. [15]



Obr. 8. EFM [15]

### 1.2.3 Mikroskopie modulovaných sil (FMM - Force Modulation Microscopy)

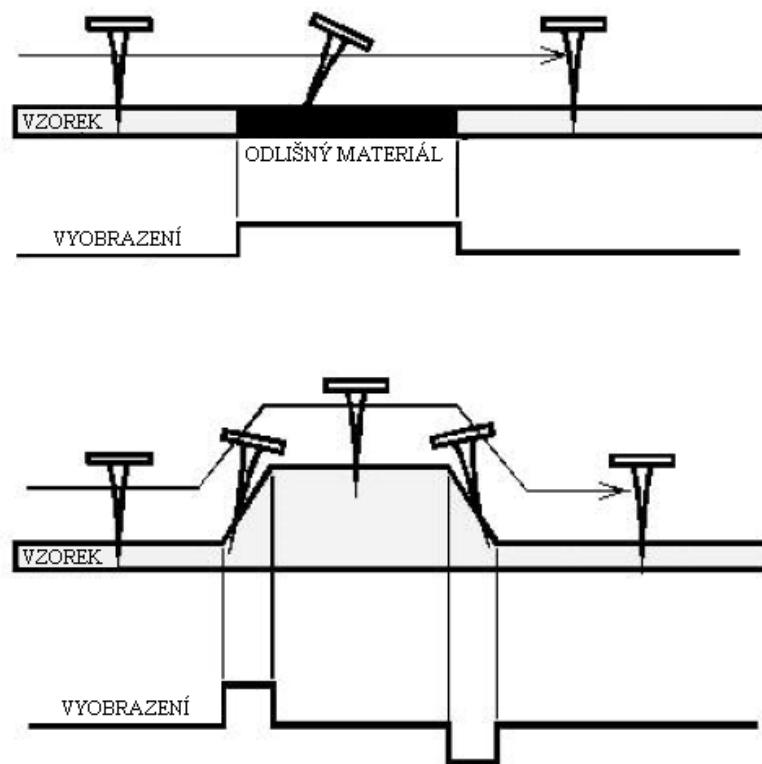
FMM vychází z dotykového AFM režimu s konstantní silou a je určena pro měření elastických vlastností povrchu. Nosník je periodicky rozkmitán s frekvencí nad mezní hodnotou zpětné vazby. Výsledná amplituda kmitání hrotu se poté mění v závislosti na elastických vlastnostech vzorku. [1, 14]



Obr. 9. FMM [2]

#### 1.2.4 Mikroskopie laterálních sil (LFM – Lateral Force Microscopy)

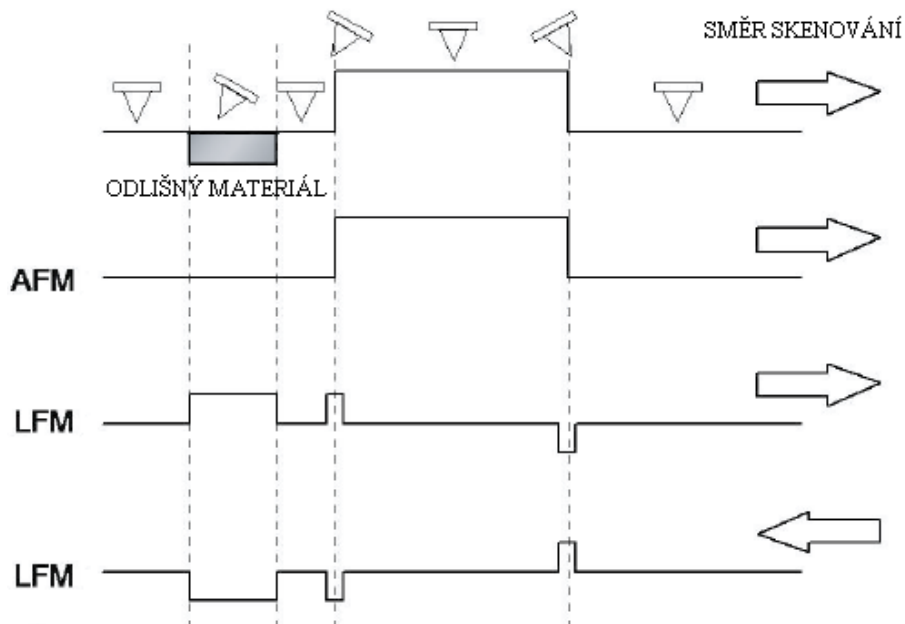
LFM vychází z vyhodnocení příčného ohybu (krutu) nosníku, ke kterému dochází v důsledku rozložení sil na nosníku umístěném rovnoběžně k rovině povrchu vzorku. LFM je užitečná pro zobrazování změn vyplývajících z nehomogenit povrchu (změna koeficientu tření) a také pro získání obrazu povrchů tvořených stupňovitými nerovnostmi (hranami). [15]



Obr. 10. LFM [15]

Ve vrchní části obrázku (Obr. 10) dochází ke krutu nosníku v důsledku rozdílného koeficientu tření u odlišných materiálů. Ve spodní části v důsledku povrchových nerovností.

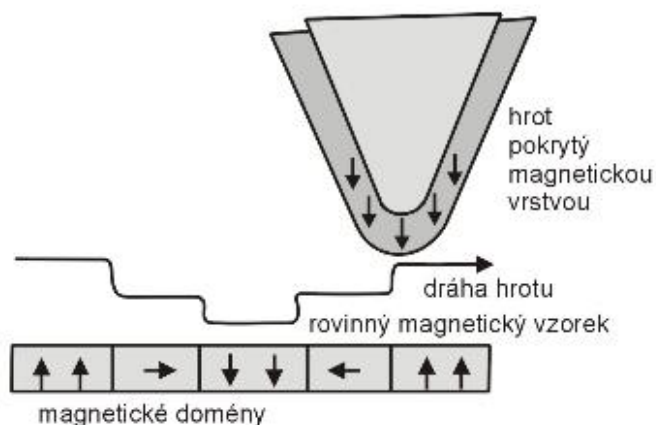
Na obrázku (Obr. 11) je znázorněn vliv směru skenování u metody LFM a její srovnání s metodou AFM.



Obr. 11. Srovnání LFM a AFM [17]

### 1.2.5 Mikroskopie magnetických sil (MFM – Magnetic Force Microscopy)

Mikroskopie magnetických sil zobrazuje prostorové rozložení magnetických sil na povrchu vzorku. Princip je podobný jako u bezdotykové AFM, jen hrot je pokryt ferromagnetickou vrstvou. Rozlišení je však asi desetkrát horší. Ve výstupním signálu jsou zahrnuta jak data topografická, tak i magnetická a lze je rozlišit snímáním obrazu při různých výškách. Protože magnetické síly jsou dalekého dosahu, je tedy blízko povrchu obraz převážně topografický, dále jen magnetický. [1, 15]



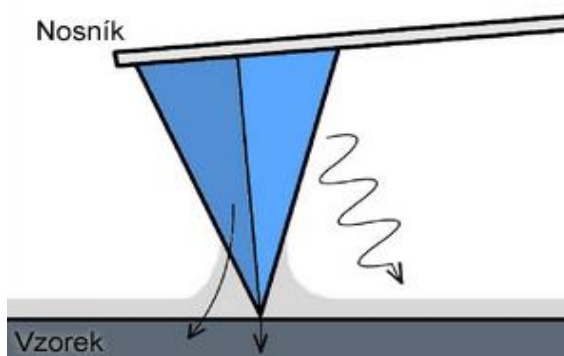
Obr. 12. MFM [15]

### 1.2.6 Mikroskopie fázových rozdílů (PDM - Phase Detection Microscopy)

PDM je použitelná s jakoukoliv vibrační technikou a spočívá v registrování změn ve fázovém zpoždění mezi budícím a detekovaným signálem. Je schopna detekovat změny v elasticitě, tření nebo adhezi. Používá se jako analogie k FFM pro vzorky měřitelné jen bezkontaktně. [1]

### 1.2.7 Skenovací teplotní mikroskopie (SThM - Scanning Thermal Microscopy)

SThM je metoda sloužící k mapování teploty či teplotní vodivosti. Při měření se nad povrchem pohybuje mikrotermočlánek, který je tvořen spojením dvou kovů (např. wolfram a nikl). Termočlánek je ohříván průchodem stejnosměrného proudu a provádí skenování v blízkosti povrchu. Protože okolní vzduch má značně menší tepelnou vodivost než vzorek, nastane při přiblížení k povrchu značný pokles termoelektrického napětí. Změna termoelektrického napětí podél povrchu odpovídá změnám v tepelné vodivosti. [15]



Obr. 13. SThM - vedení tepla [18]

### 1.2.8 Mikroskopie příčných sil (TDFM - Transverse Dynamic Force Microscopy)

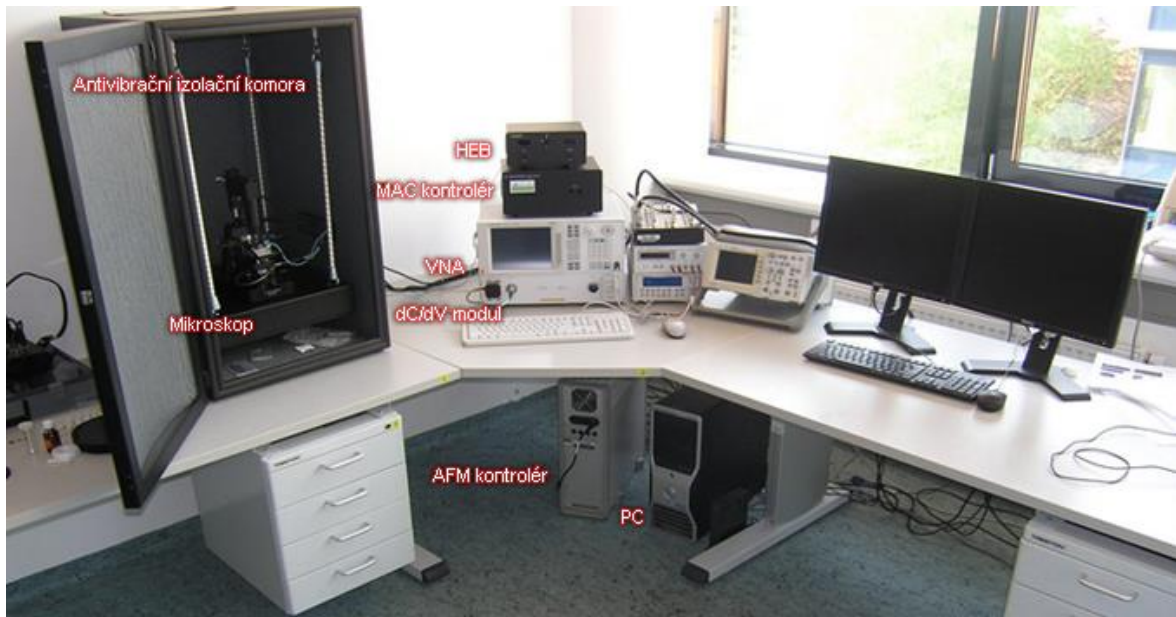
TDFM využívá nosníku, který je umístěn kolmo ke vzorku a je rozkmitáván v rovině rovnoběžné se vzorkem. Interakcí se vzorkem se mění koeficient tlumení a tím i amplituda a rezonanční frekvence, jejichž variace lze použít k sestavení obrazu. [1]

### 1.2.9 Mikroskopie ultrazvukových sil (UFM - Ultrasonic Force Microscopy)

UFM využívá ultrazvukové excitace vzorku, především pro mapování materiálových vlastností. Klasická mikroskopie využívá „lineární“ režim detekce, v němž je sledována amplituda a fáze pohybu nosníku. V UFM je použit „nelineární“ režim, při němž se detekuje vzorkem generovaná ultrazvuková síla. [1]

## 2 POUŽITÝ MĚŘICÍ SYSTÉM - AGILENT 5420 SPM

Pro měření byl použit systém Agilent 5420 SPM, jenž byl sestaven dle manuálu. Jedná se o vysoce přesný modulární systém umožňující díky atomárnímu rozlišení detailně zkoumat materiály a provádět charakterizaci povrchu. V dané sestavě umožňuje práci v těchto režimech: kontaktní AFM, pokleповý AFM (AAC, MAC), EFM, FMM, KFM, LFM, DLFM, MFM, SMM, STM, snímání vodivosti. [2, 5]

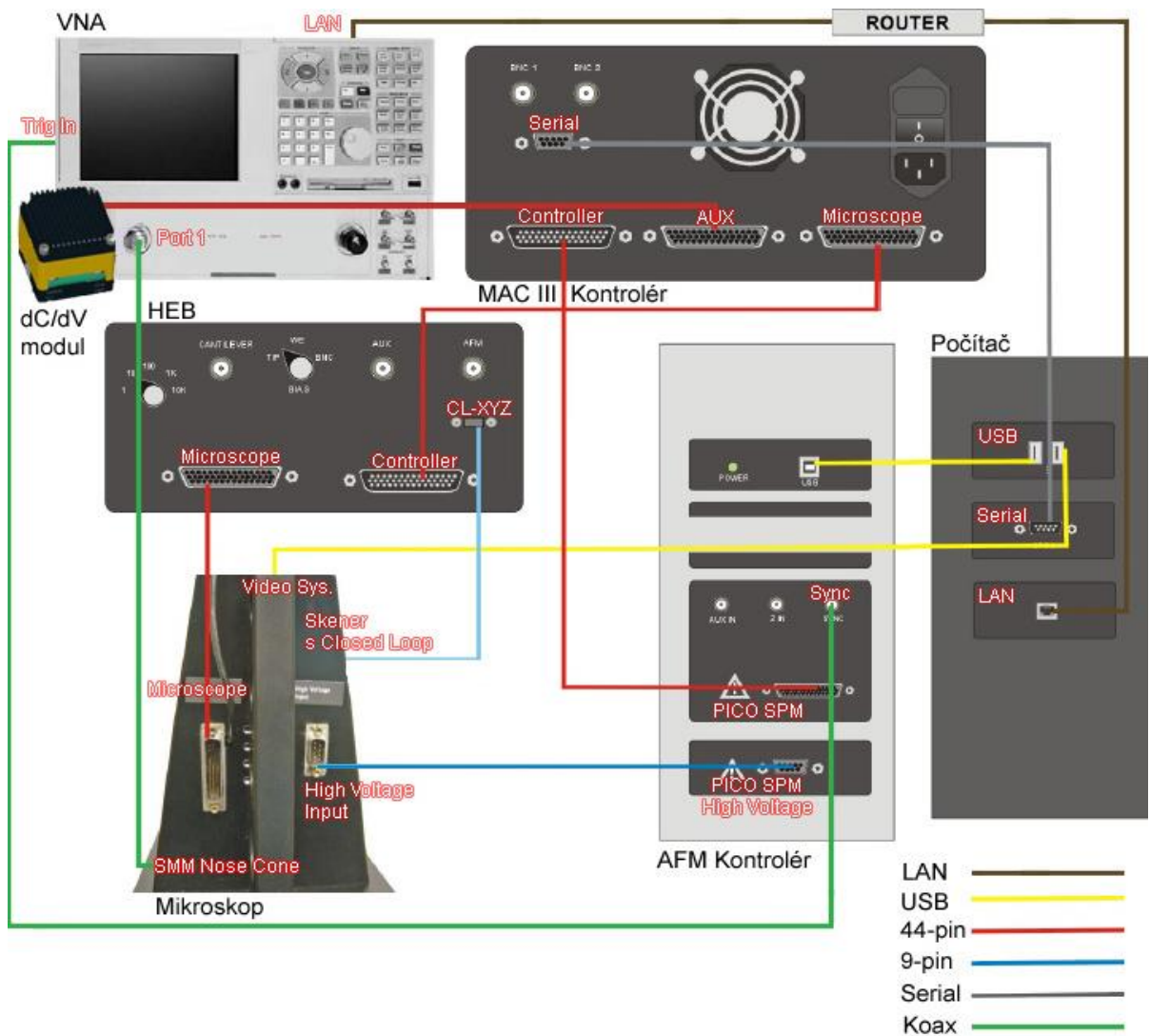


Obr. 14. Měřicí systém

Systém se skládá z následujících komponent:

- Mikroskop - Agilent 5420 SPM/AFM
  - Sonda (Probe)
  - Kónické zakončení (Nose cone)
  - Skener (Scanner)
  - Detektor (Detector)
  - Stolek (Sample plate)
  - Video systém (Video system)
- Řídící jednotka (HEB - Head Electronics Box)
- AFM kontrolér (AFM Controller)
- Antivibrační izolační komora (Vibration Isolation Chamber)

- Systémové volitelné součásti
  - Příslušenství k SMM módu
  - Příslušenství k MAC III módu
  - Příslušenství pro měření v kapalinách
  - Příslušenství pro regulaci teploty
- PC
- Software
  - PicoView
  - PicoImage

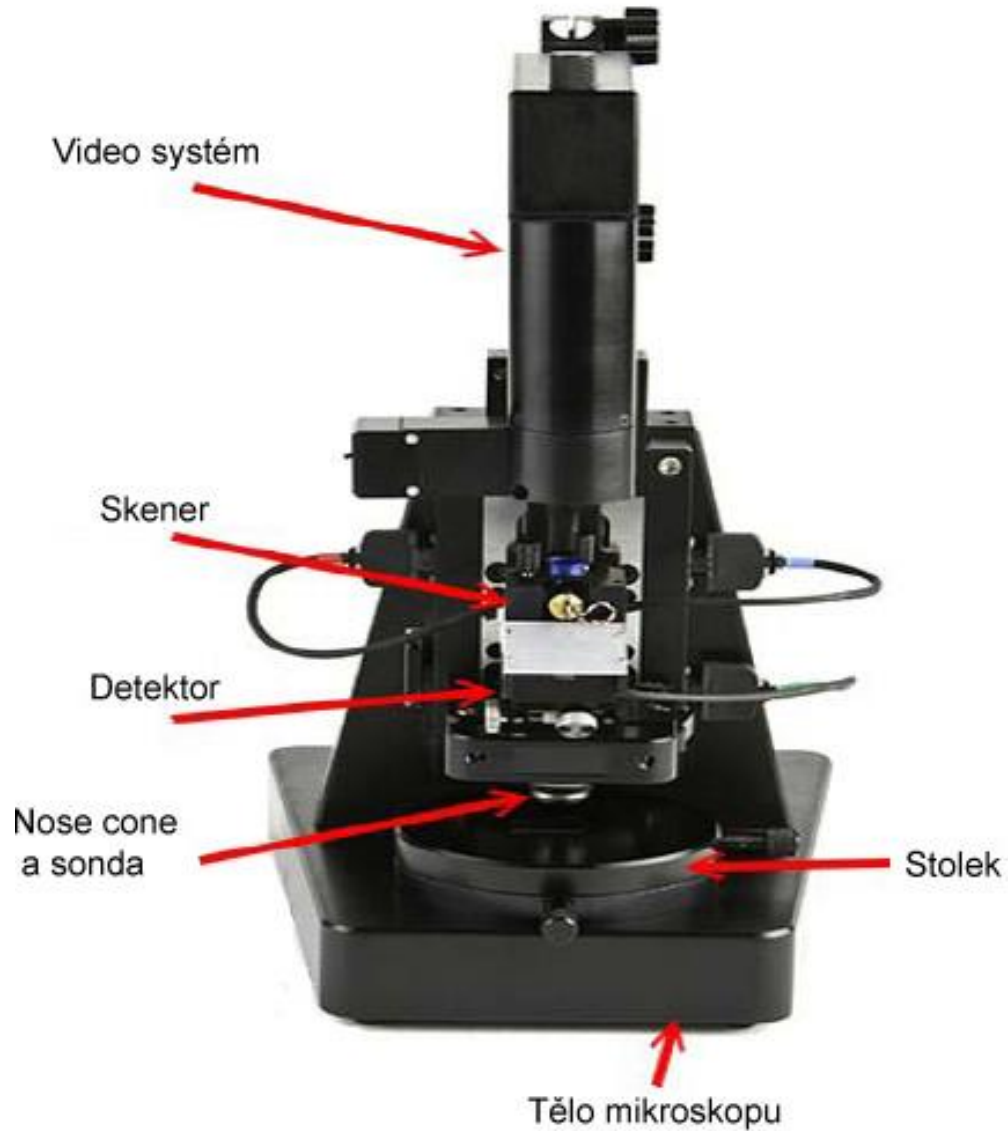


Obr. 15. Schéma zapojení

Výše uvedené schéma (Obr. 15) znázorňuje propojení jednotlivých komponentů systému.

## 2.1 Mikroskop - Agilent 5420 SPM/AFM

Mikroskop se skládá z následujících komponentů:



Obr. 16. Mikroskop - Agilent 5420 SPM/AFM [2]

### 2.1.1 Tělo mikroskopu (Microscope Base)

Tělo mikroskopu slouží k uchycení skeneru a stolku. Obsahuje video systém a servomotor pro pohyb v ose Z. Prostřednictvím vnitřní kabeláže a konektorů zprostředkovává komunikaci elektroniky s dalšími částmi systému.

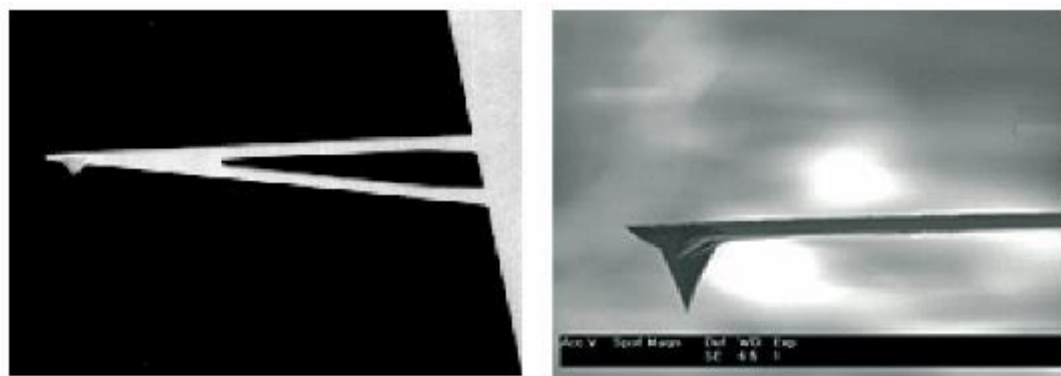
### 2.1.2 Sonda (Probe)

Ke skenování je nezbytná tzv. skenovací sonda. Sondy mohou nabývat různých podob. Obecně je můžeme rozdělit na sondy pro STM a pro AFM.

Sonda pro STM je poměrně jednoduchá - postačuje ostrý vodivý hrot (tip). Proto se v začátcích STM používaly pouze rozstřížené dráty, a až s potřebou vyššího rozlišení se začalo využívat chemického leptání. Nejčastějším materiálem pro výrobu hrotu je wolfram nebo slitina platiny a iridia. [1, 2]

U mikroskopii založených na AFM nestačí pouze ostrý hrot, ale je nutné vytvořit také nosník (cantilever) sloužící jako senzor působících sil. Po prvních pokusech se zahnutými hroty se začaly používat nosníky připravované litografickými technologiemi. [1]

Nejčastěji mají nosníky trojúhelníkový (V-tvar) nebo obdélníkový tvar a jsou vyrobeny z křemíku a nitridu. Vlastnosti nosníku závisí na jeho použití. Pro dotykové režimy se používá pružný, pro bezdotykové naopak tvrdý nosník. Hrot ani nosník AFM obecně nemusí být vodivé, ale nosník musí být vhodně upraven k detekci (odrazná či vodivá strana odvrácená od vzorku). Velikost litografií vyrobeného nosníku bývá v rozmezí 100–200  $\mu\text{m}$  délka, šířka 10–40  $\mu\text{m}$  a tloušťka do 2  $\mu\text{m}$ . [1, 2]



*Obr. 17. Trojúhelníkový nosník s hrotem [6x]*

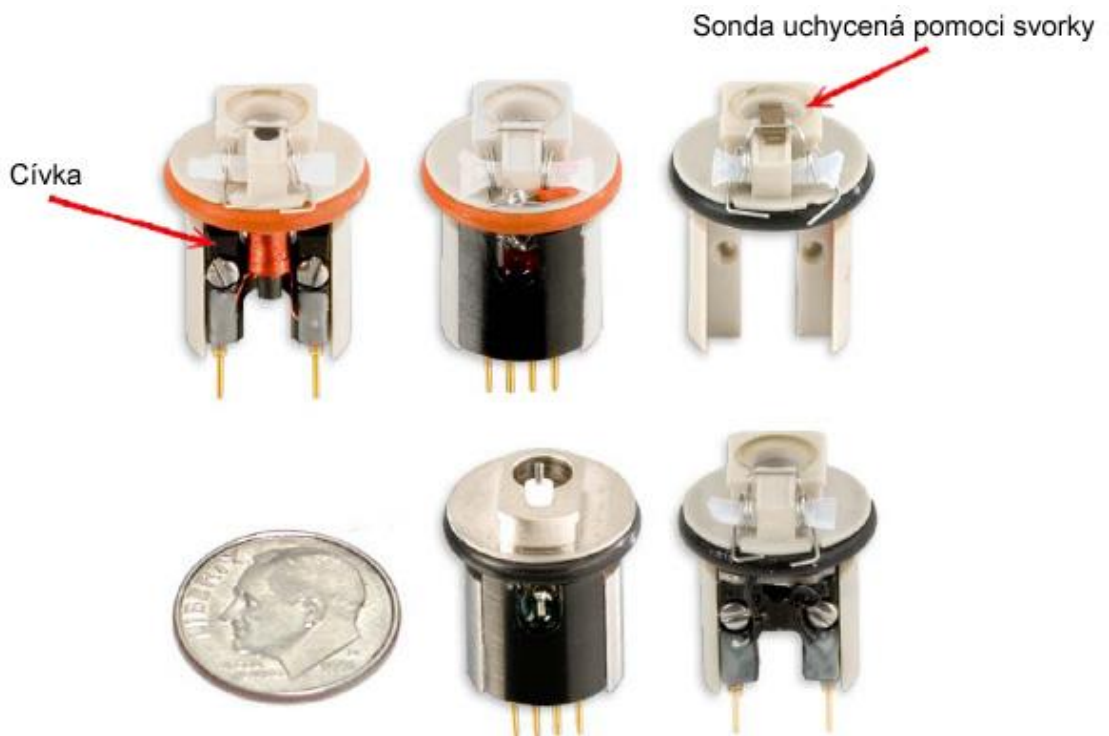
Pro rychlejší měření a omezení nežádoucích vlivů jsou kladeny na nosník požadavky vysoké rezonanční frekvence a malé setrvačnosti. [1]

Tvar hrotu může být kuželovitý, pyramidový nebo čtyřboký. Jeho ostrost a tvar výrazně ovlivňují velikost dosaženého rozlišení. [2]

Výběr správné sondy je odvozen od dané skenovací metody, zkoumaného vzorku a prostředí, ve kterém je prováděno měření.

### 2.1.3 Kónické zakončení (Nose Cone)

Nose cone slouží k uchycení sondy, zatímco on samotný je uchycen ve skeneru. Stejně jako u sond, i zde existuje celá řada různých typů, jež jsou vybírány podle dané aplikace. Některé z typů mohou obsahovat i elektroniku (např. cívka v Top Mac nose cone).



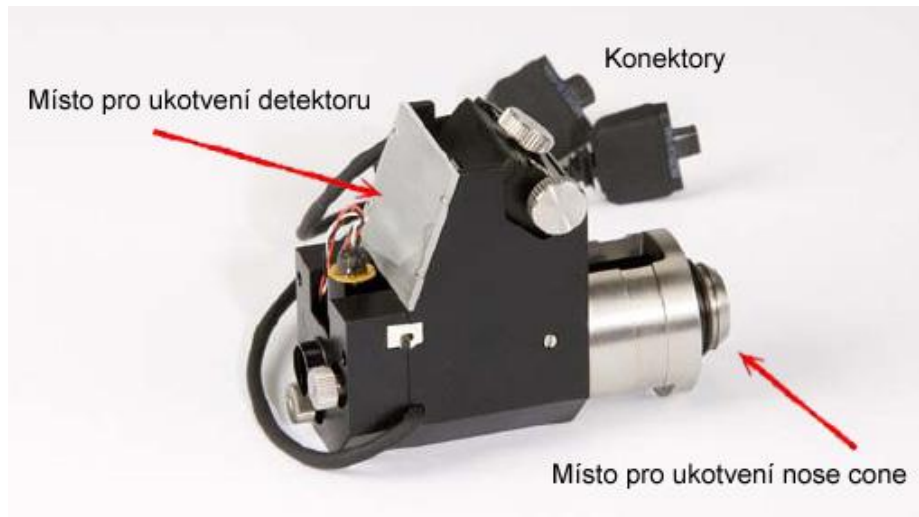
Obr. 18. Nose cone, ve směru hodinových ručiček z horní levé části: Top MAC, CSAFM, AFM kontaktní mód, AAC, STM [2]

### 2.1.4 Skener (Scanner)

Systém Agilent 5420 SPM je systém se stacionárním vzorkem a pohyblivou sondou propojenou prostřednictvím nose cone se skenerem, který umožňuje její pohyb v pravidelném rastru. Pohyb v ose Z a pohyb v rastru v osách X a Y je zajišťován aplikováním vysokého napětí na piezokeramické prvky skeneru, jež se působením elektrického pole prodlužují nebo zkracují. [2]

Kromě piezokeramických prvků obsahuje skener zdířku pro nose cone, držák detektoru a konektory.

Skener je označován jako multifunkční, protože může být využit v řadě aplikací v závislosti na připojeném nose cone a sondě. [2]



Obr. 19. Skener [2]

Agilent SPM využívá dva typy skenerů: typ A a typ B. Nicméně v systému Agilent 5420 SPM může být použit pouze typ B, který lze rozdělit na další čtyři typy:

- Malý multifunkční skener obsahující čtyři piezopláty (2 pro pohyb v ose X a 2 pro osu Y) a piezotrubičku (pro osu Z). Skener umožňuje skenovat na ploše  $10 \mu\text{m}^2$  a dosáhnout atomového rozlišení.
- Velký multifunkční skener, který obsahuje dvakrát více piezoelementů a umožňuje skenovat na ploše  $90 \mu\text{m}^2$ .
- Velký multifunkční skener umožňující polohování se zpětnou vazbou (closed-loop positioning). Při tomto polohování je možno pomocí pozičních senzorů měřit vzdálenost v jednotlivých osách.
- STM skener pro skenovací tunelovou mikroskopii. [2]

### 2.1.5 Detektor (Detector)

Fotodetektor snímá odraz laserového paprsku od nosníku. Dolní a horní části slouží k měření prohnutí nosníku (signál deflekce pro AFM), zatímco levá a pravá část slouží k měření zkrutu (signál frikce pro LFM). [2]

Detektor se do skeneru vkládá ve stavu, kdy je skener ukotven k mikroskopu. Na detektoru se nachází dvě ovládací kolečka sloužící k vyvážení systému a DIP přepínač k nastavení zesílení signálu.



Obr. 20. Detektor [2]

### 2.1.6 Stolek (Sample Plate)

Standardní stolek pro umístění vzorků umožňuje posuv v osách X a Y pomocí ovládacích koleček po stranách. Obsahuje také magnet, který brání svévolnému pohybu vzorku připevněnému na kovové podložce.

Pro specifické aplikace (např. měření v kapalinách, měření s kontrolou teploty nebo MAC) jsou k dispozici vzorkové desky, pro jejichž použití je nutno na mikroskop umístit přídatný držák. [2]

### 2.1.7 Video systém (Video System)

Video systém je integrován v těle mikroskopu. Skládá se z optiky a kamery propojené USB kabelem s počítačem. Systém pomáhá nastavit sondu na zájmovou oblast vzorku a také na její hrot zaměřit laser. [2]

## 2.2 Řídicí jednotka (HEB - Head Electronics Box)

HEB vyhodnocuje a zobrazuje signál z detektoru. Levý ukazatel A zobrazuje celkový signál (součet všech částí detektoru). Pravý ukazatel B zobrazuje signál deflektce nebo frakce podle stavu přepínače pod ukazatelem. Vypínač uprostřed přístroje slouží k zapnutí a vypnutí laseru. Trojpolohový spínač vlevo dole umožňuje hrubé přiblížení nebo oddálení v ose Z. HEB také generuje oscilační napětí pro AC mód. [2]



Obr. 21. HEB [2]

## 2.3 AFM kontrolér (AFM Controller)

AFM kontrolér generuje vysoké napětí pro piezoelementy a další kontrolované prvky. [2]



Obr. 22. AFM kontrolér [2]

## 2.4 Antivibrační izolační komora (Vibration Isolation Chamber)

Tato komora izoluje mikroskop od vibrací, vzduchových turbulencí, akustického hluku a dalších negativních vlivů. Navíc pomáhá k udržení stálé teploty během měření. [2]



Obr. 23. Antivibrační izolační komora [2]

## 2.5 Příslušenství k MAC III módu

Příslušenství k MAC módu obsahuje MAC kontrolér, MAC nose cone, MAC sondy, AAC nose cone, AAC sondy a vzorkovou desku. Je nezbytné pro měření v následujících módech: pokleповý mód (AAC, MAC), EFM, FMM, KFM, MFM, SMM.

MAC kontrolér pracuje ve spojení s HEB a AFM kontrolérem. AFM kontrolér dodává vysoké napětí do piezoelementů ve skeneru. HEB zpracovává informace z detektoru a kontroluje servomotory pro přibližování a oddalování. MAC kontrolér generuje pomocí lock-inu signál do nose cone, případně pracuje se signály z dalších vstupů. [2]

MAC III oproti normálnímu MAC módu využívá tři lock-in zesilovače, což poskytuje větší flexibilitu, umožňuje měření v EFM a KFM módech a poskytuje „Q kontrol“ pro lepší kontrolu oscilace nosníku. [2]

## 2.6 Příslušenství k SMM módu

Práce v SMM módu vyžaduje SMM sondy, speciální SMM nose cone, servisní nářadí a vektorový obvodový analyzátor (VNA – Vector Network Analyzer) PNA N5230A sloužící k měření elektromagnetických vlastností (např. impedance a kapacitance).



Obr. 24. VNA (vlevo) a SMM nose cone [6]

Pro měření koncentrace dopantů je navíc potřeba dC/dV kontrolér (dC/dV Controller Module, označovaný jako DPMM), jenž se připojuje k VNA, a přídavný napájecí zdroj.



Obr. 25. dC/dV kontrolér (vlevo) a napájecí zdroj [6]

## 2.7 Příslušenství pro měření v kapalinách

Základem pro měření v kapalinách je kapalinová komůrka (liquid cell) doplněná těsnícím kroužkem, vzorkovou deskou a držáčky. Může být rovněž doplněna hadičkou. Obvykle se využívá pro AFM, MAC a STM měření. [2]

## 2.8 Příslušenství pro regulaci teploty

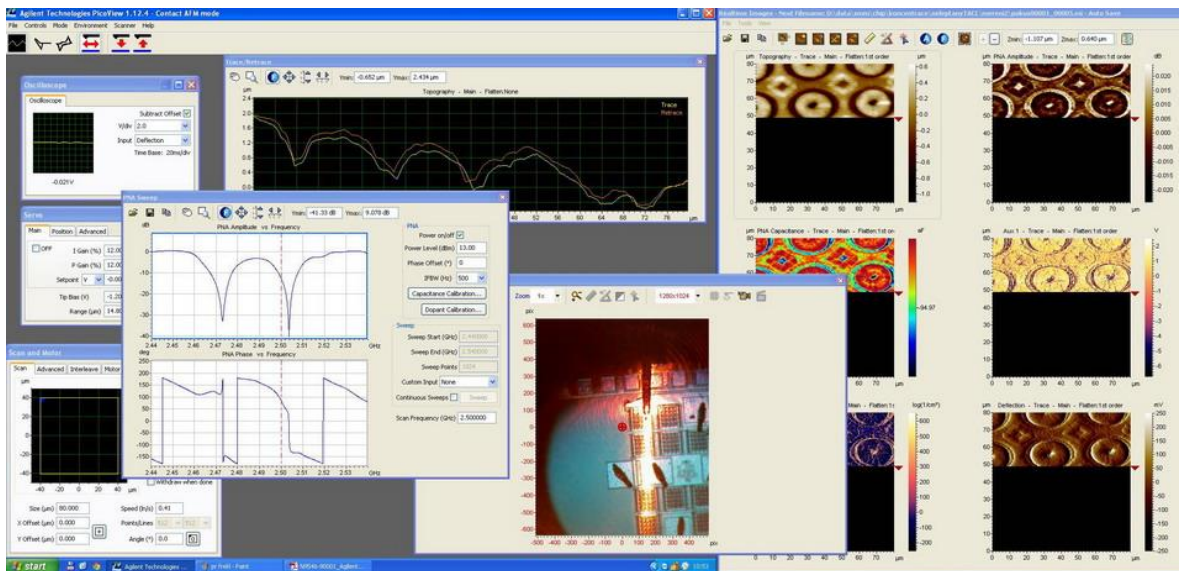
Příslušenství pro regulaci teploty obsahuje regulátor teploty a vzorkové desky (vzorková deska je vybrána podle teploty a dané aplikace).



Obr. 26: Vzorková deska [2]

## 2.9 Software

System Agilent 5420 standardně obsahuje program PicoView, který je používán zejména při měření samotném, a program Pico Image Basic sloužící k analýze naměřených dat a k jejich úpravě.



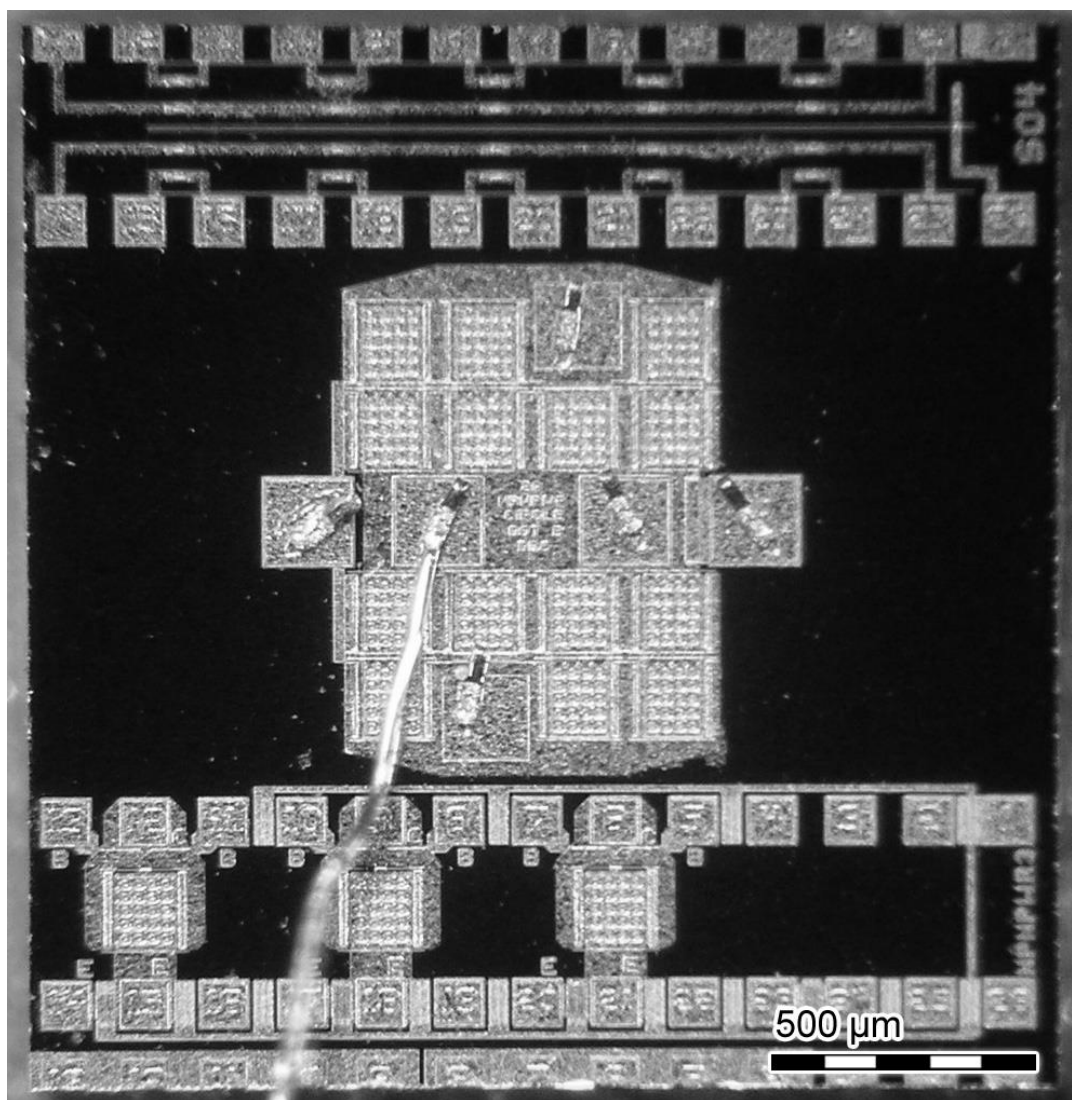
Obr. 27. Pico View

Na Obr. 27 je snímek obrazovky z programu PicoView. V levé části se vybírá skenovaná oblast a nastavují parametry, kdežto v pravé části jsou zobrazeny průběžné výsledky měření.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 MĚŘENÍ, VIZUALIZACE A ANALÝZA VYBRANÉ POLOVODIČOVÉ STRUKTURY

Pro měření s cílem ověřit výrobní technologii a schopnosti měřicího systému Agilent 5420 SPM byl vybrán chip s bipolárními PNP tranzistory.



*Obr. 28. Chip*

Na Obr. 28 je zkoumaný chip zobrazený optickým mikroskopem Olympus SZX7 při zvětšení 22,4. Orientační měřítko je odvozeno od přiloženého objektivového mikrometru firmy L.E.T. optomechanika.

Před samotným měřením byla potřeba nastavit měřicí systém a provést kalibraci.

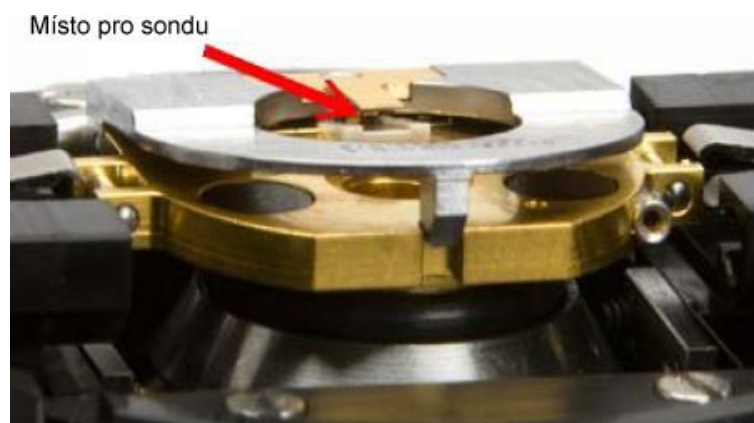
### 3.1 Proces nastavení systému

1. Zapnutí všech komponentů systému a spuštění softwaru Pico View.
2. Nasazení SMM nose cone na skener.



Obr. 29. SMM nose cone na skeneru [6]

- a) Umístění skeneru do servisního držáku.
  - b) Uvolnění extrahovacího mechanismu, nasazení a dotlačení nose cone na skener.
  - c) Utažení nose cone šroubovákem.
3. Zasunutí SMM sondy do nose cone.



Obr. 30. Zasunutí SMM sondy [6]

- a) Nadzvednutí horního plíšku pomocným nástrojem.
- c) Zasunutí sondy za použití pinzety a pomocného nástroje.
- d) Vyjmutí pomocného nástroje.

4. Vložení skeneru do mikroskopu.



Obr. 31. Vložení skeneru do mikroskopu [2]

- a) Otevření držáku skeneru.
- b) Zasunutí skeneru do držáku a zaklapnutí držáku.
- c) Zapojení kabelů.

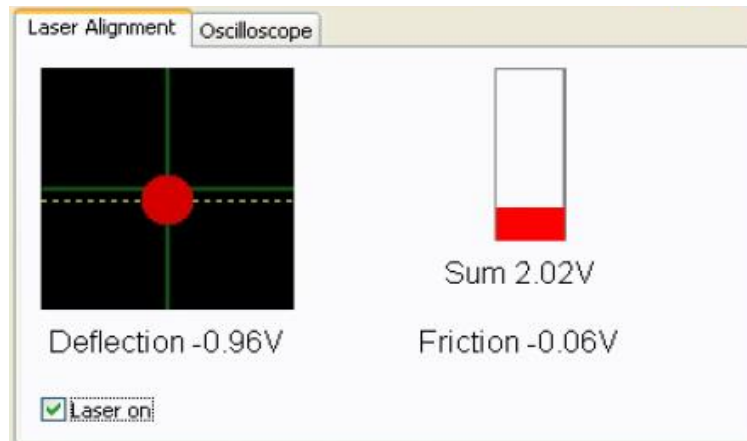
5. Zaměření laseru na nosník.



Obr. 32. Zaměřený laser [2]

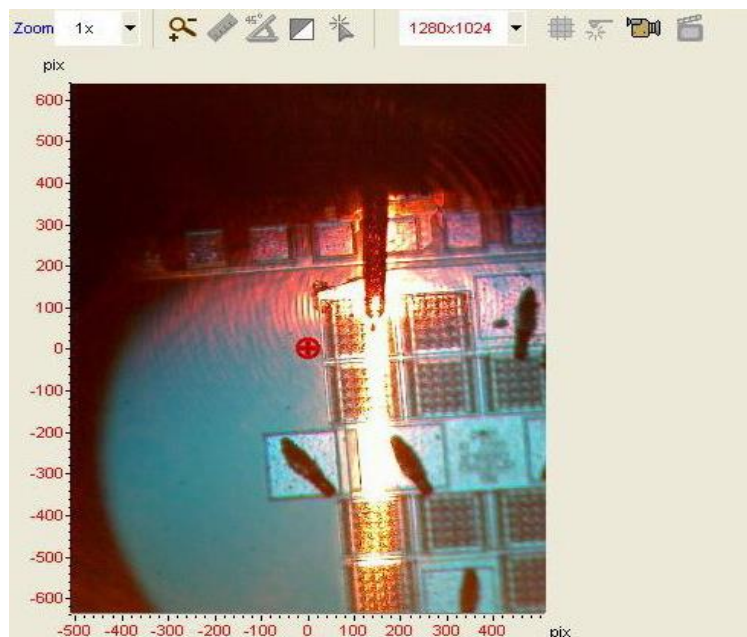
- a) Laser se pomocí zaměřovacích koleček na skeneru a obrazu z kamery v Pico View zaměří tak, aby se odrazil od nosníku.
- b) V závěru zaměřování je pozorováno pouze stínítko skeneru a jemnými pohyby koleček je docíleno vytvoření co nejostřejší laserové tečky na stínítku.

6. Vložení detektoru do skeneru a zaměření.



Obr. 33. Zaměření

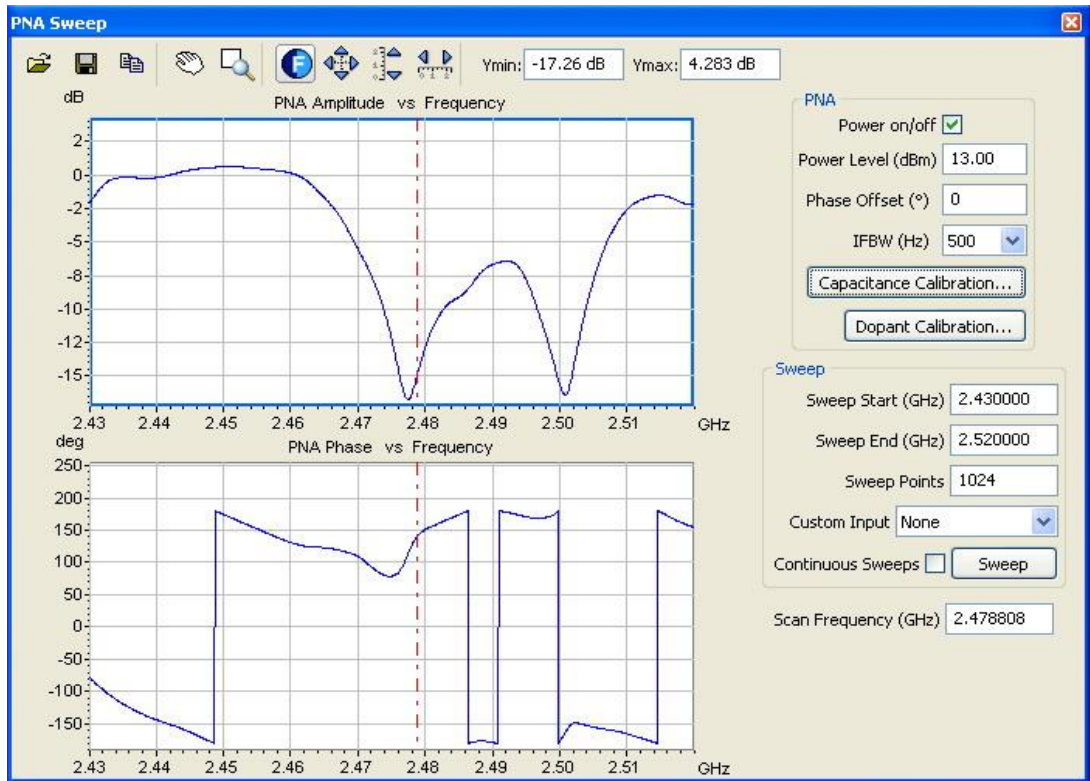
- Vložení detektoru do skeneru a zapojení kabelu do konektoru na těle mikroskopu.
  - Otevření okna Laser Aligment v programu Pico View.
  - Zaměření odraženého laseru do středu detektoru užitím koleček na detektoru.
7. Umístění zkoumaného vzorku, hrubé přiblížení a výběr požadované oblasti.



Obr. 34. Výběr požadované oblasti

- Vzorek na kovové podložce je umístěn na magnetický střed stolku.
- Při neustálém sledování (a zaostřování) obrazu z kamery je spínačem na HEB prováděno hrubé přibližování skeneru ke vzorku v ose Z. Pohyb vzorku v osách X a Y je umožněn kolečky po stranách stolku.

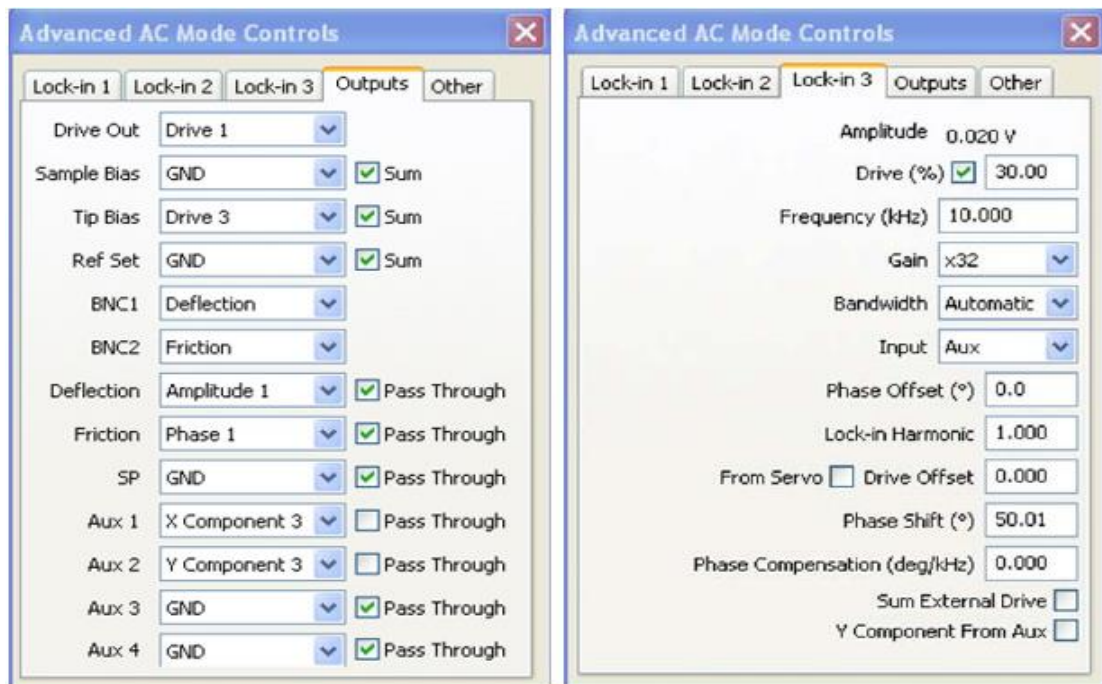
## 8. Nastavení skenovací frekvence.



Obr. 35. PNA Sweep

- a) Otevření okna PNA Sweep (v nabídce Controls - PNA).
- b) Nastavení frekvenčního rozsahu podle typu sondy (rozsah je uveden zpravidla na balení sond).
- c) Nastavení počtu bodů (více bodů = lepší rozlišení, ale delší čas vykreslování).
- d) Kliknutí na tlačítko Sweep.
- e) Vizuální výběr nejvhodnějších špiček (zpravidla ty největší) v grafu PNA Amplitude vs. Frequency.
- f) Úprava frekvenčního rozsahu za účelem detailnějšího zobrazení vybraných špiček
- g) Opětovné kliknutí na tlačítko Sweep.
- h) Přetažení červené čerchované čáry označující skenovací frekvenci do blízkosti vrcholu vybrané špičky a její přesné umístění v závislosti na průběhu v grafu PN Phase vs. Frequency.
- i) Tímto je určena skenovací frekvence.

## 9. Nastavení měřicích parametrů.



Obr. 36. Advanced AC Mode Controls [6]

- a) Nastavení parametrů v záložkách Outputs a Look-in 3 v okně Advanced AC Mode Controls (v nabídce Controls – Advanced – AC Mode).
- b) Přejít na okno Servo. Nastavení Gain (např. 10 %), Setpoint (např. 0 V) a Tip Bias (např. -1,2 V).
- c) Přejít na okno Scan and Motor. Výběr skenované oblasti, zadání rychlosti skenování (např. 1 ln/s) a počtu bodů na řádek (např. 256).

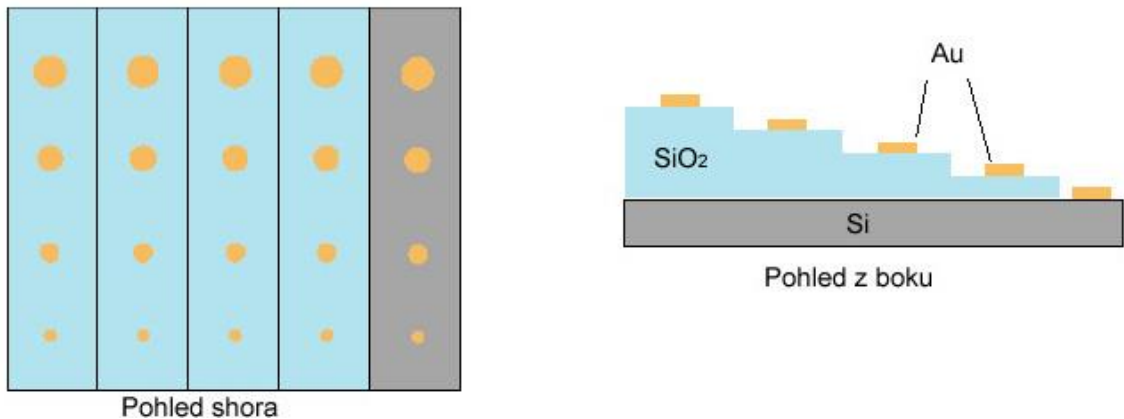
## 10. Provedení zkušební měření.

- a) Nastavení ukládání signálů.
- b) Kliknutí na tlačítko Approach a vyčkání na přiblížení.
- c) Spuštění skenování.
- d) Sledování průběhů vybraných signálů (případná úprava nastavení jejich zobrazení a využití základních měřicích funkcí).
- e) Úprava měřicích parametrů a skenovací frekvence v závislosti na sledovaném průběhu.

## 11. Zastavení měření, oddálení skeneru od vzorku, vyjmutí vzorku, zahájení kalibrace.

### 3.2 Kalibrace

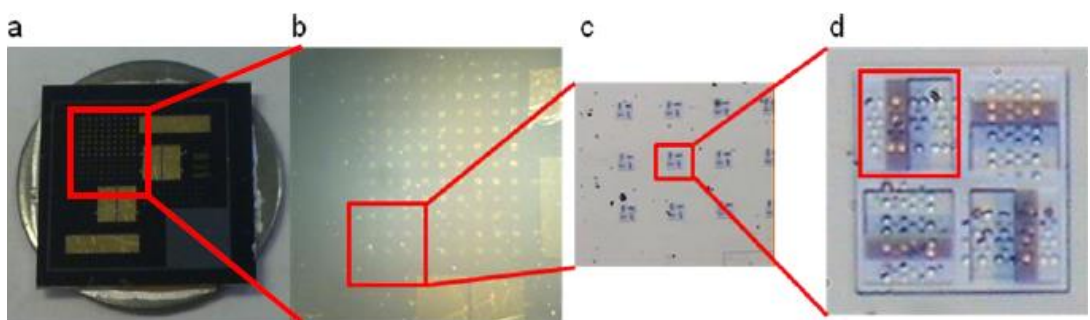
Pro kalibraci kapacitance je nezbytný vhodný kapacitanci standard – zlaté (Au) čepičky na schodovitých vrstvách oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) na křemíkové (Si) podložce. Pozn.: Standard pro koncentraci dopantů nebyl v univerzitní laboratoři k dispozici, byla tedy pozorována pouze změna koncentrace, nikoliv absolutní hodnoty.



Obr. 37. Kalibrační kapacitanci standard [11]

#### 3.2.1 Proces kalibrace

1. Umístění kapacitanci standardu na stolek.
2. Přiblížení ke standardu a výběr požadované oblasti.



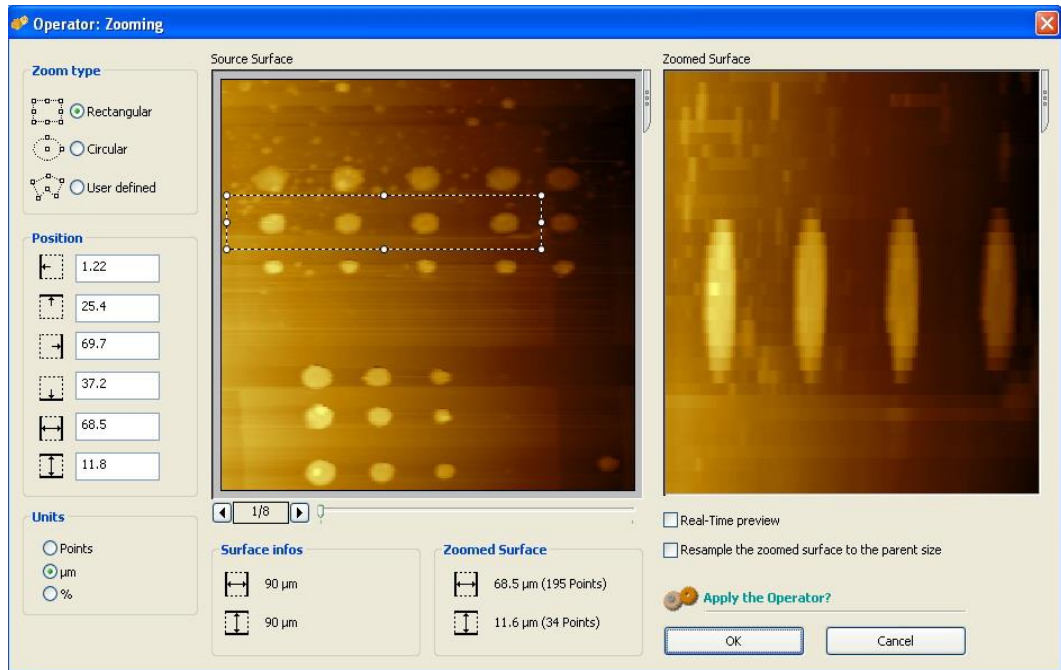
Obr. 38. Výběr požadované oblasti na kapacitanci standardu [11]

3. Naměření (a uložení) topografie a PNA amplitudy.

Pozor! Od této chvíle už se v průběhu celého měření nesmí skenovací frekvence měnit. V opačném případě by bylo potřeba kalibraci provést znovu.

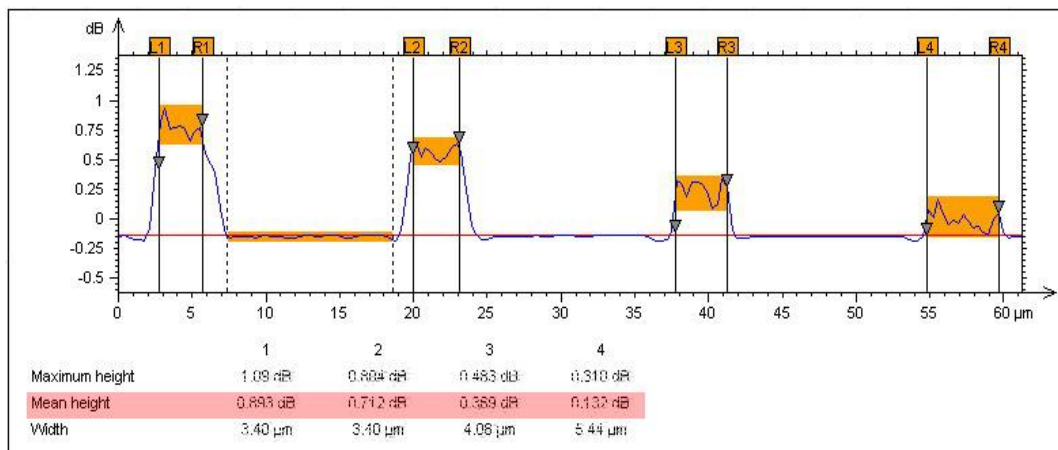
4. Otevření výsledků v programu Pico Image Basic.
5. Vyřiznutí nejvhodnější řady čepiček operátorem Zoom.

Pozn.: K výběru nejvhodnější řady poslouží operátor Profile Extraction.



Obr. 39. Zoom

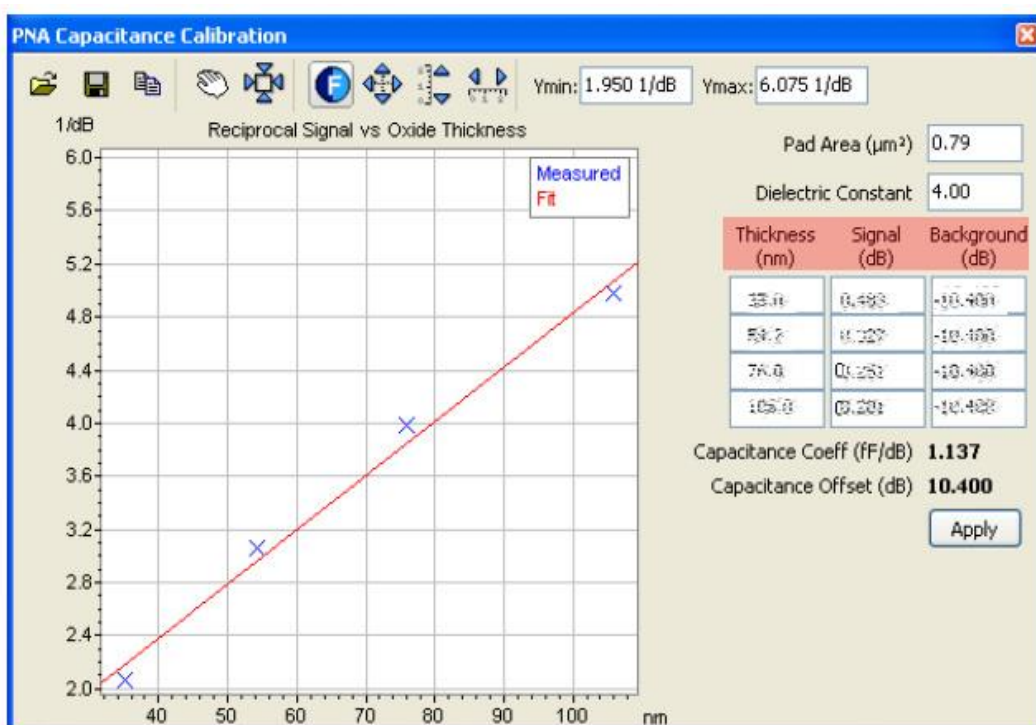
6. Aplikace operátoru Levelling (nivelace) a extrakce profilů operátorem Profile Extraction.
7. Použití operátoru Step Height Measurement (krokové měření výšky) na extrahovaná data.



Obr. 40. Step Height Measurement – PNA amplituda

Pozn.: Funkce Step Height Measurement je automatická, lze ji ale přepnout (např. v nabídce vyvolané po kliku pravým tlačítkem myši na graf) i do manuálního módu, který je v tomto případě přesnější.

8. Přepis vypočítaných hodnot z funkce Step Height Measurement do okna PNA Capacitance Calibration v programu Pico View (okno se vyvolá tlačítkem Capacitance Calibration v okně PNA Sweep).



Obr. 41. PNA Capacitance Calibration

Pole Thickness (nm) – střední hodnoty výšek jednotlivých čepiček z topografie.

Pole Signal (dB) – střední hodnoty výšek jednotlivých čepiček z PNA amplitudy.

Pole Background (dB) – hodnota základní hladiny z PNA amplitudy.

10. Systém je zkalibrován pro měření kapacity.

Pozn.: Kalibrační údaje je vhodné uložit. Dokud není změněna frekvence (nejčastěji při výměně sondy), mohou být použity i při dalších měřeních.

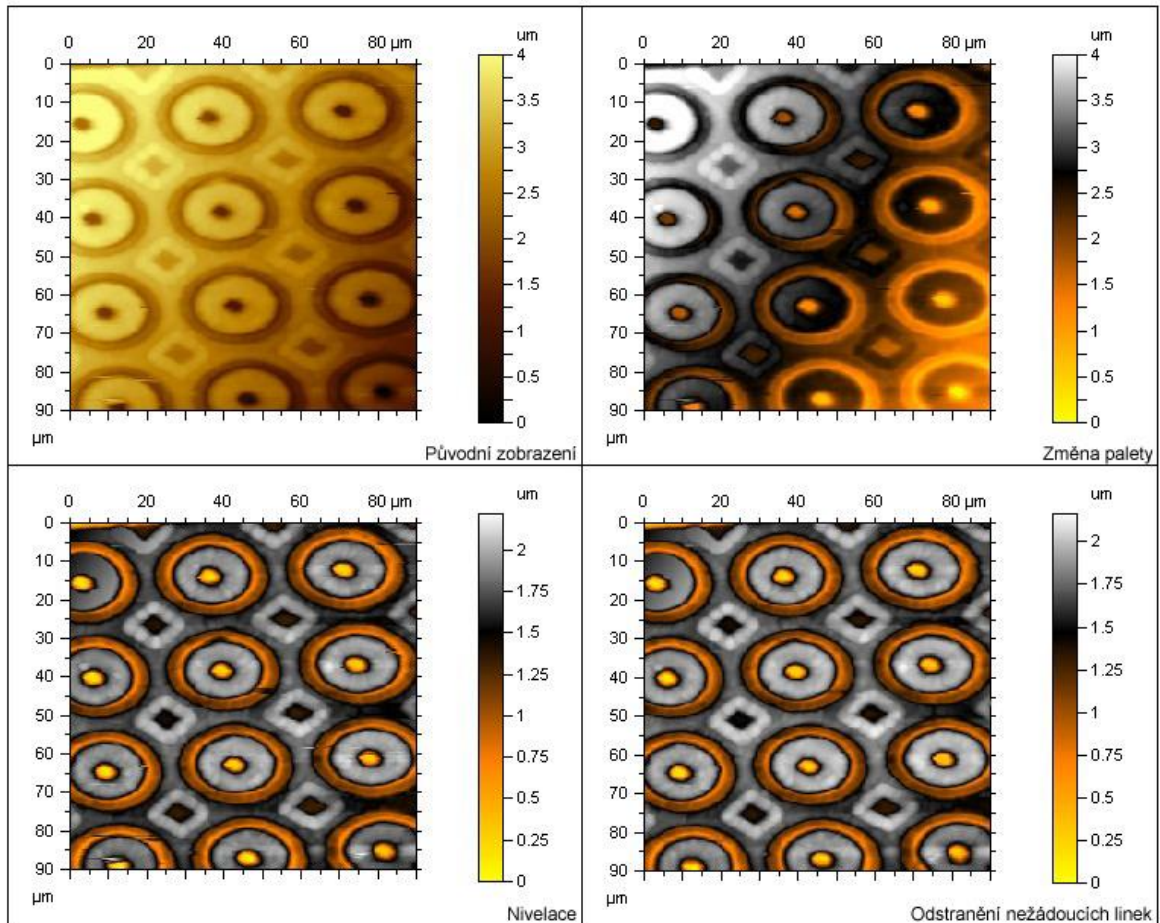
### 3.3 Měření vybrané polovodičové struktury

Při měření samotném byl použit obdobný postup a nastavení systému jako při výše popsaných měřeních.

1. Umístění zkoumaného vzorku na stolek.
2. Kontrola, jestli je laser zaměřen na střed detektoru.
3. Hrubé přiblížení ke vzorku a výběr požadované oblasti.
4. Kontrola měřicích parametrů.
5. Nastavení ukládání signálů.
6. Kliknutí na tlačítko Approach a vyčkání na přiblížení.
7. Start skenování.
8. Sledování vyobrazených signálů a úprava měřicích parametrů za účelem získání co nejlepších výsledků.

### 3.4 Vizualizace naměřených dat

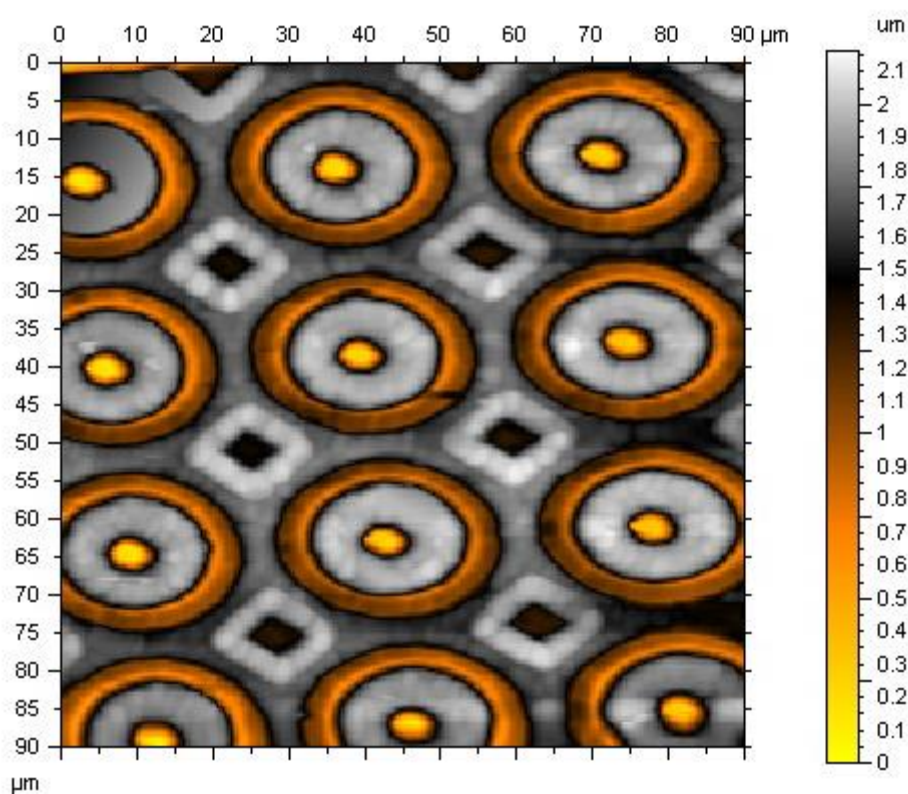
Naměřená data byla vizualizována v programu Pico Image Basic. Program je uživatelsky přívětivý a jeho ovládání je intuitivní.



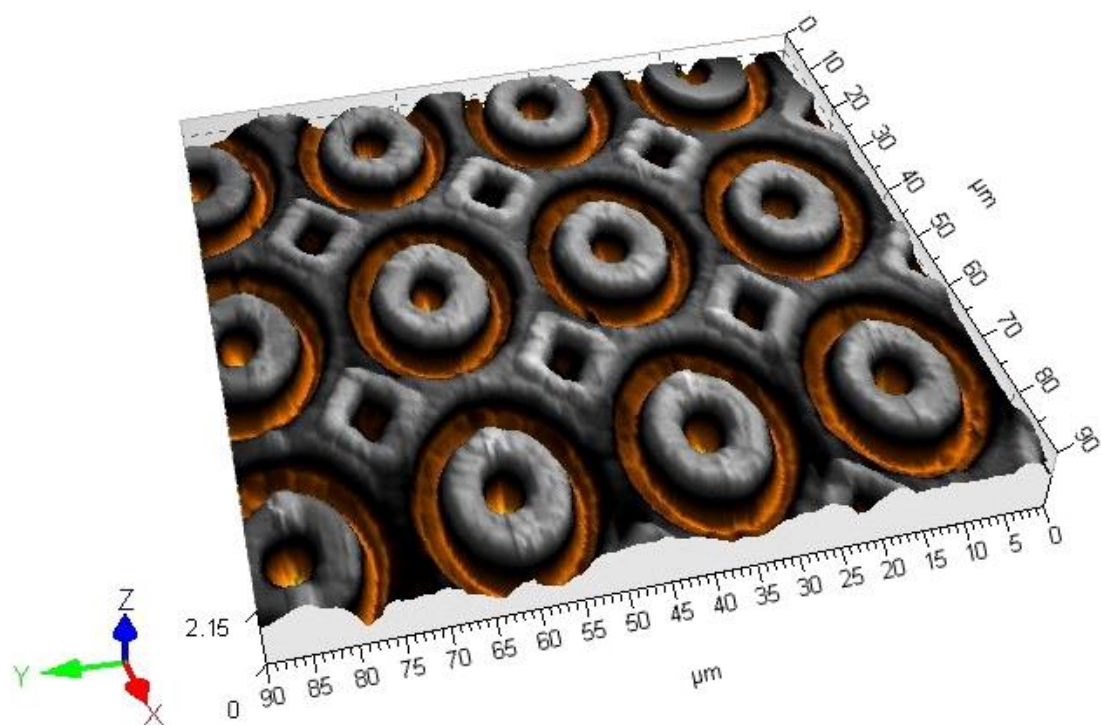
Obr. 42. Vizualizace

U výsledků byla změněna paleta a byly aplikovány následující operátory: Surface Extraction (extrakce povrchu), Levelling (nivelace) a Line Removal (odstranění linek).

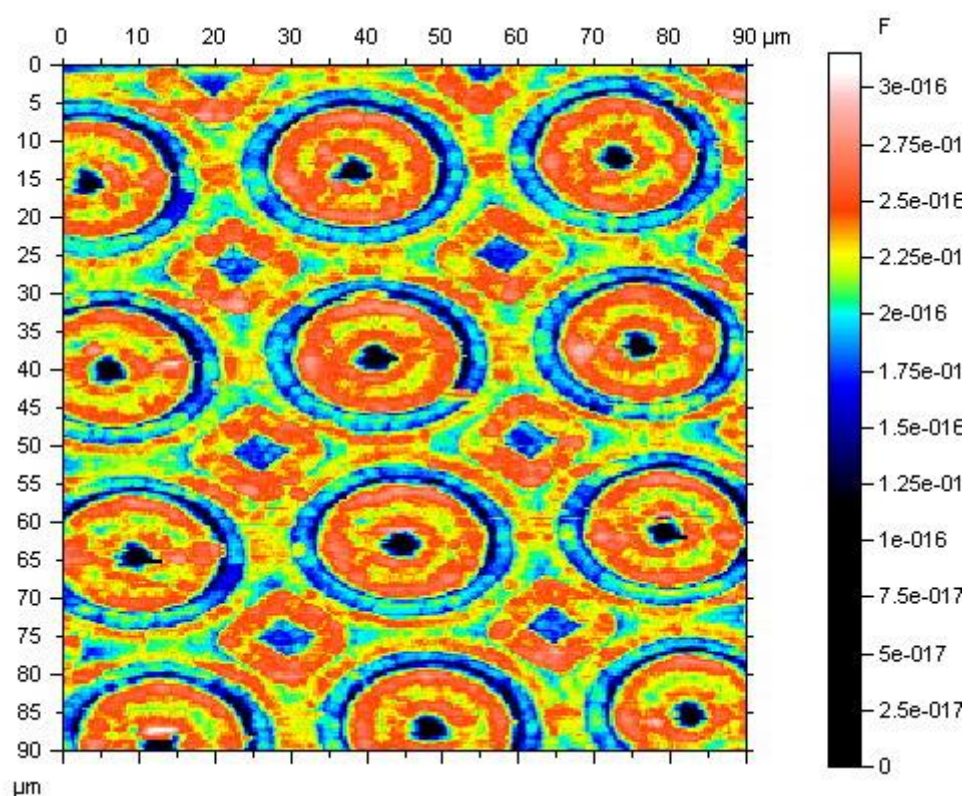
Níže jsou uvedeny výsledné vizualizace.



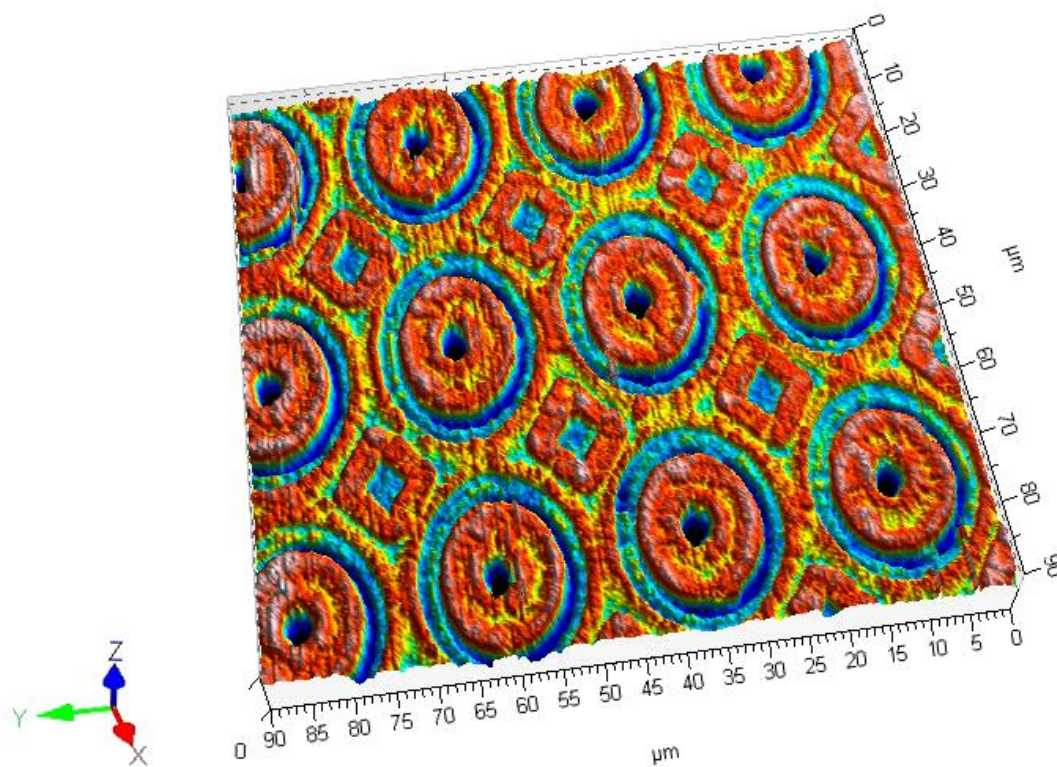
Obr. 43: Výsledná vizualizace topografie



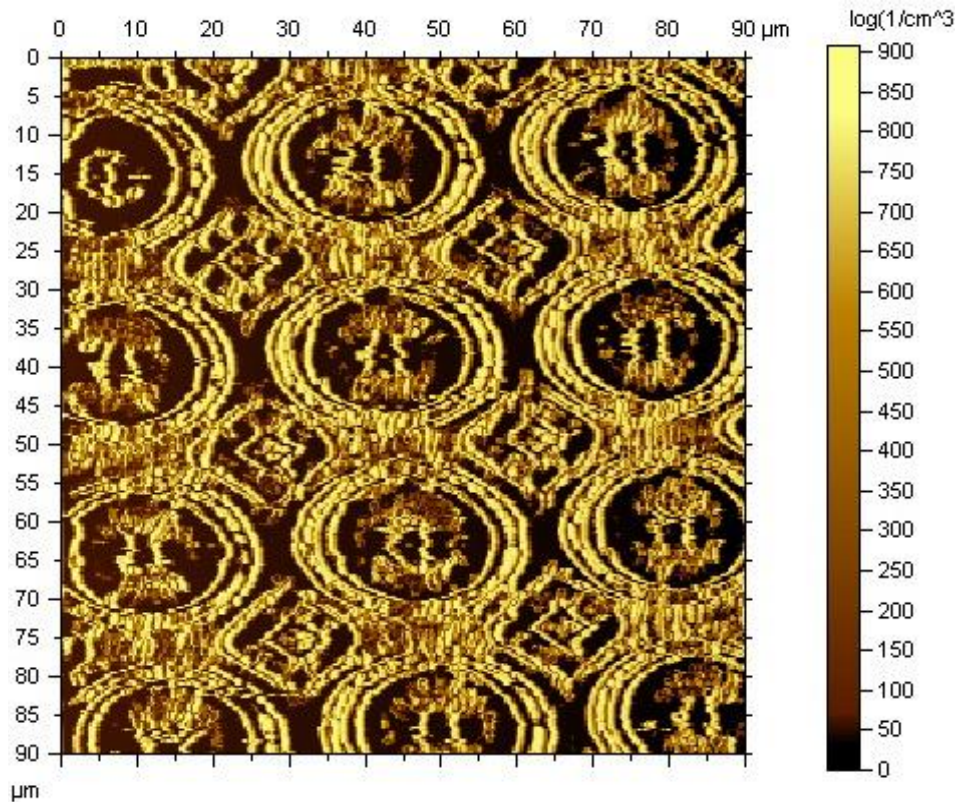
Obr. 44: Výsledná 3D vizualizace topografie



Obr. 45: Výsledná vizualizace kapacitance



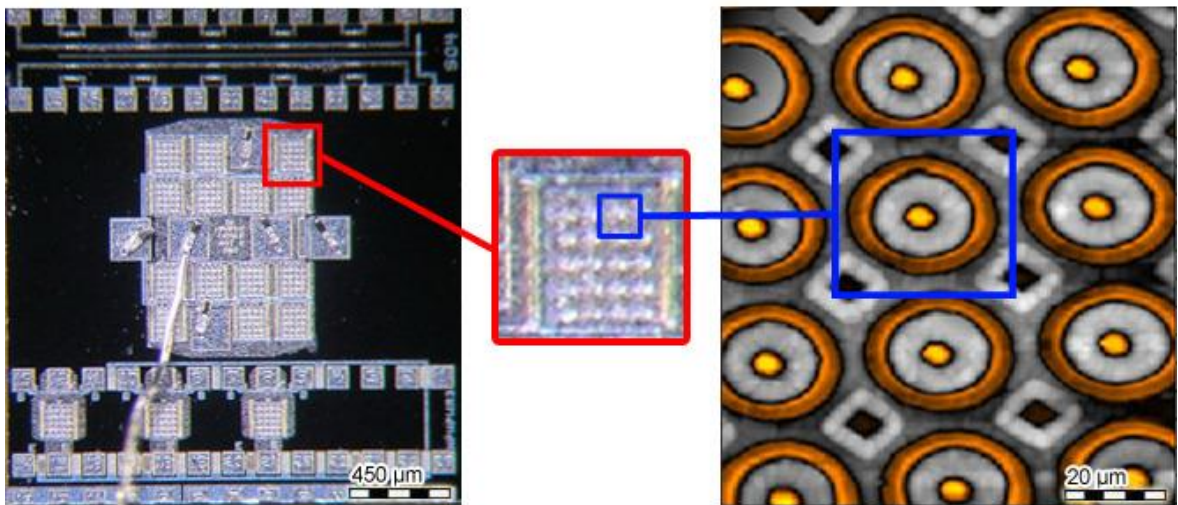
Obr. 46: Výsledná 3D vizualizace kapacitance



Obr. 47. Výsledná vizualizace koncentrace dopantů

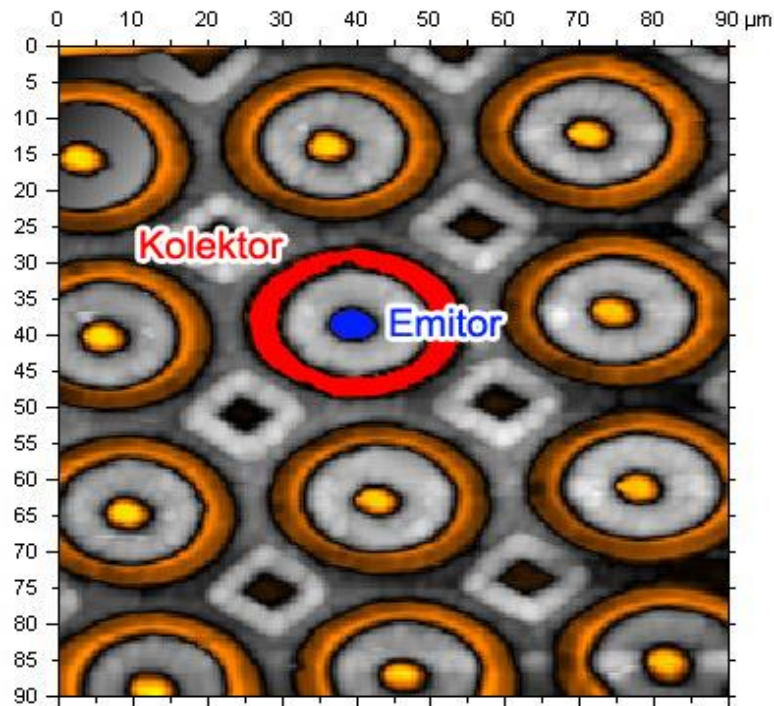
### 3.5 Analýza vizualizovaných dat

Obr. 48 znázorňuje předpokládaný výskyt naměřené oblasti (vpravo) na snímku z optického mikroskopu (vlevo) při zvětšení 22,4. Orientační měřítko u optického snímku bylo odvozeno od přiloženého objektivového mikrometru firmy L.E.T. optomechanika.



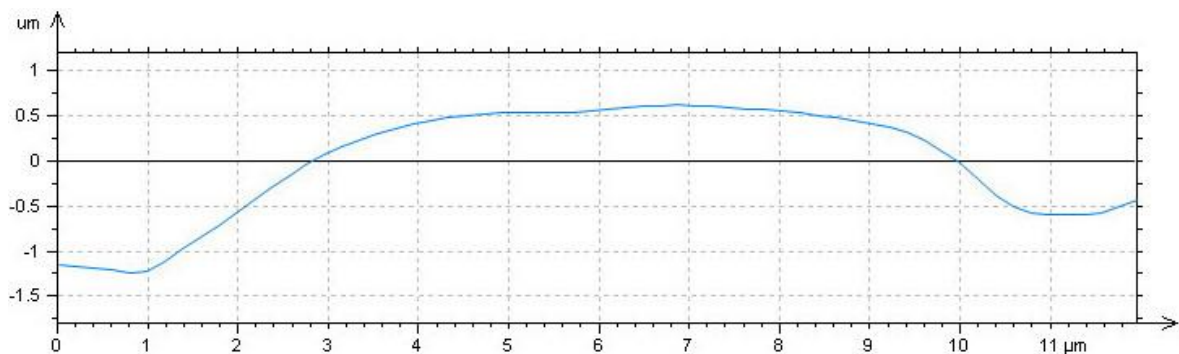
Obr. 48. Znázornění naměřené oblasti na snímku z optické mikroskopu

Na topografickém zobrazení (Obr. 49) je označen emitor a kolektor, který je tvořen kruhem nacházejícím se okolo emitoru. Báze na zobrazení není vidět, protože je v epitaxní vrstvě pod povrchem. Kosočtverce mezi jednotlivými kolektorovými kruhy jsou vývody emitoru.

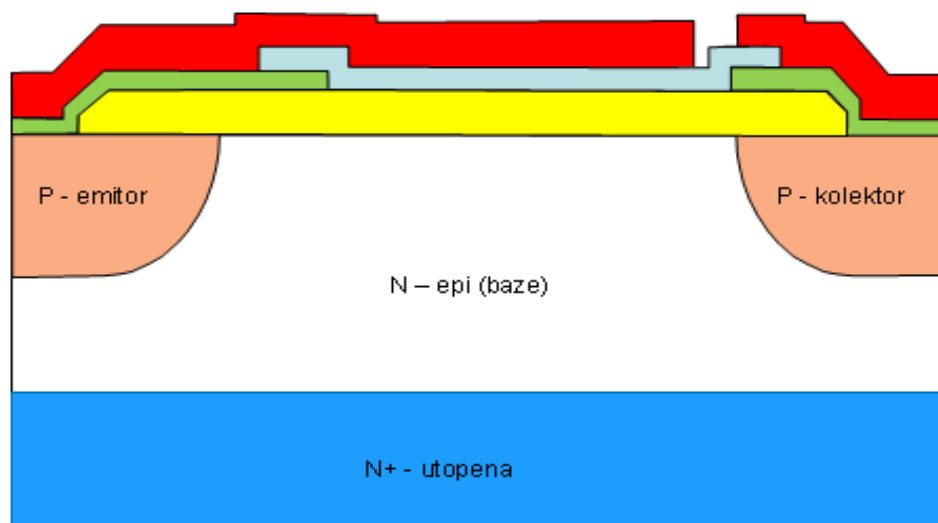


Obr. 49. Označení kolektoru a emitoru

Z topografického zobrazení byl extrahován profil (operátor Proxile Extraction) z poloviny emitoru do poloviny kolektoru a ten byl porovnán s teoretickým schematickým průřezem bipolárního PNP tranzistoru (Obr. 51).



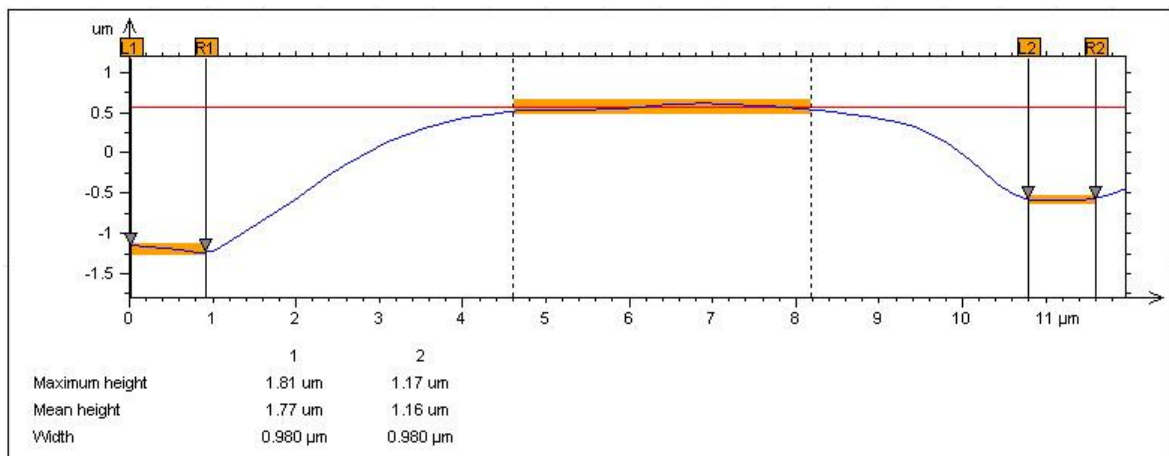
Obr. 50. Extrahovaný profil z poloviny emitoru do poloviny kolektoru



Obr. 51. Schematický průřez PNP tranzistorem

Jak vyplývá z uvedených obrázků (Obr. 50 a Obr. 51) extrahovaný profil přibližně odpovídá obecnému schématu.

Posléze byly změřeny hloubky prohlubní v oblasti emitoru a kolektoru (operátor Step Height Measurement) oproti základní hladině.



Obr. 52. Měření velikostí prohlubní v oblasti emitoru a kolektoru

Hloubka prohlubně v oblasti emitoru činí 1,77  $\mu\text{m}$ .

Hloubka prohlubně v oblasti kolektoru činí 1,16  $\mu\text{m}$ .

## 4 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU PŘI VYUŽITÍ DANÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Pro další práci se systémem je v plánu využít Breakout Box pro snadnější přístup k jednotlivým signálům a příslušenství PicoLITH sloužící k nanolitografii s cílem vytvořit struktury vhodné k metrologii.

### 4.1 Breakout Box

Breakout Box je elektrické zařízení poskytující jednoduchý přístup k důležitým vstupním a výstupním kanálům mikroskopu Agilent 5420 SPM/AFM.

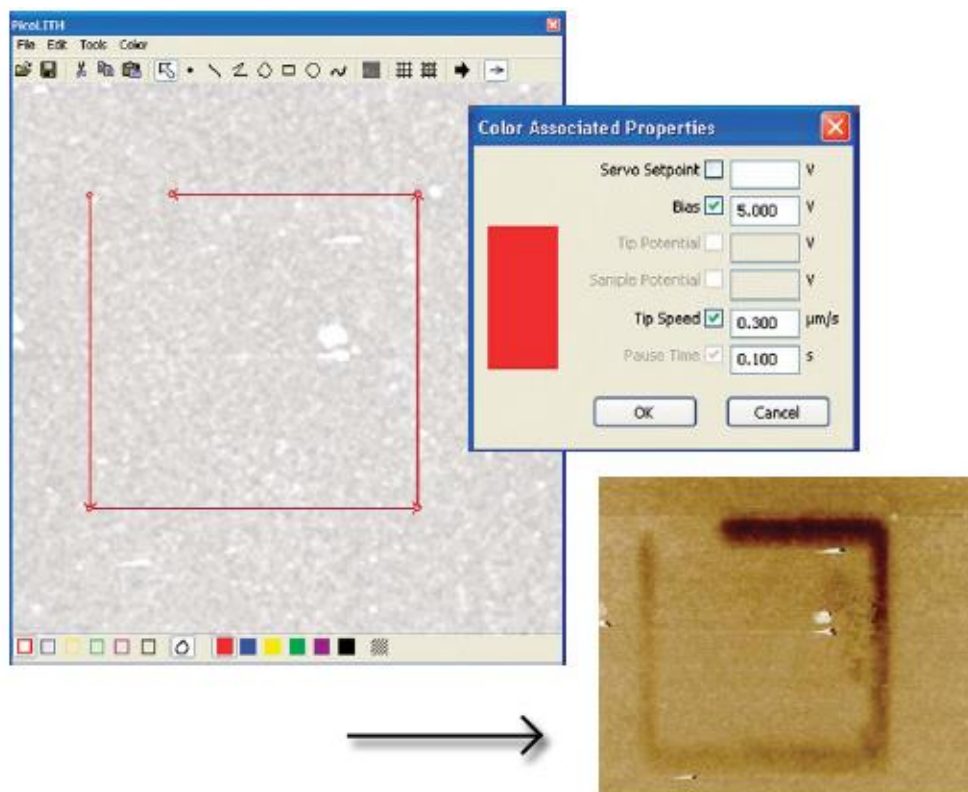


Obr. 53. Breakout Box [2]

Přes BNC konektory na zařízení lze nejen monitorovat jednotlivé kanály a provádět diagnózu poruch, ale také do nich dodávat libovolný signál. [22]

### 4.2 PicoLITH

PicoLITH je příslušenství pro nanolitografii skládající se ze sond vhodných k rytí a softwaru PicoLITH (integrován v softwaru PicoView). Příslušenství umožňuje navrhnout nejrůznější obrazce (předdefinované i vlastní) a poté je vyrýt na vzorek, přičemž u každého z nich mohou být nastaveny vlastní parametry (např. síla a rychlost). Obrazce se stejnými parametry jsou označeny barevně pro lepší přehlednost. [23]



Obr. 54. PicoLITH [23]

V levé části Obr. 54 je znázorněno kreslení a nastavování parametrů v softwaru PicoLITH. V pravé části je vytvořený obrazec o rozměru 14 μm x 14 μm naskenovaný mikroskopickou metodou elektrostatických sil. [23]

## ZÁVĚR

První kapitola teoretické části vysvětluje princip mikroskopie atomárních sil (AFM) a principy nejznámějších variací, které jsou na této metodě založeny. Největší prostor mezi jednotlivými variacemi byl věnován poměrně nové metodě skenovací mikrovlnné mikroskopie, jež slibuje velký potenciál zejména při měření fyzikálních vlastností materiálů.

Druhá kapitola seznamuje s použitým měřicím systémem Agilent 5420 SPM, jeho komponenty a jejich zapojením. Všechny komponenty byly součástí laboratoře na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Praktická část se věnuje především realizovanému měření vybrané polovodičové struktury - chipu s bipolárními PNP tranzistory, vizualizaci a analýze výsledků. Systém byl nejprve nastaven, poté zkalibrován a nakonec bylo uskutečněno samotné měření chipu (tento celý proces byl krok po kroku popsán). Získaná data byla následně vizualizována a upravena v dodaném software, kde byla rovněž provedena jejich analýza. Vizualizovaná data byla porovnána se snímkem z optického mikroskopu a s teoretickým schematickým průřezem bipolárním tranzistorem.

Pořízené výsledky potvrdily potenciál měřicího systému Agilent 5420 SPM, mikroskopie atomárních sil a skenovací mikrovlnné mikroskopie. Je patrné, že jejich vypovídací hodnota je mnohem vyšší, než u snímků z optického mikroskopu. Výhodou je zejména možnost paralelního pořizování více signálů, čímž jsou získány komplexnější informace o zkoumaném vzorku. Vedle topografických informací systém totiž umožňuje souběžně měřit i fyzikální vlastnosti jako jsou kapacitance nebo koncentrace dopantů. Další výhodou byla i možnost pozdější manipulace s daty v dodaném softwaru Pico Image Basic, v němž byla vhodnými operátory docílena možnost jejich lepší interpretace.

Při porovnávání profilu extrahovaného z topografického zobrazení s teoretickým schematickým průřezem bipolárního PNP tranzistoru bylo zjištěno, že naměřená data odpovídají schématu.

V závěru praktické části byl navržen další postup při práci na daném systému: Využití Breakout boxu, pro lepší přístup k dílčím signálům, a nanolitografického příslušenství PicoLITH. Pomocí nanolitograficky vytvořené mřížky (jejíž parametry by byly ověřeny objektivovým mikrometrem) by mohl být systém v budoucnu metrologicky testován.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The first chapter of this thesis explains the principle of atomic force microscopy (AFM) and the principles of the best known variations that are based on this method. The main focus is on the relatively new method of scanning microwave microscopy, which has great potential, especially in the measurement of physical properties of materials.

The second chapter introduces the measuring system used, Agilent 5420 SPM, its components and wiring diagram. All components were available in the laboratory at the Faculty of Applied Informatics at Tomas Bata University in Zlín.

The practical section is devoted primarily to the realized measurement of selected semiconductor structure (PNP bipolar transistors on a chip), visualization and analysis. After the system had been set up and calibrated, the chip was measured (this whole process was described step by step). The measured data was then visualized and adjusted using the provided software, which was also used for the analysis. Finally, the visualized data was compared to an image from the optical microscope, and to a theoretical schematic cross section of a PNP bipolar transistor.

The results confirmed the potential of the microscopy system Agilent 5420 SPM, atomic force microscopy and scanning microwave microscopy. It is obvious that their information value is much higher than the value of images from the optical microscope. The main advantage is the possibility of parallel acquisition of multiple signals, and thus obtaining more comprehensive information about the sample (besides the topography, the system can simultaneously measure additional physical properties such as capacitance and dopant concentration). Another advantage was the possibility of subsequent data manipulation in the supplied software Pico Image Basic.

When comparing the profile extracted from the topography to the theoretical cross section of the PNP bipolar transistor, it was found that the measured data corresponded to the diagram.

At the end of practical section of this thesis, the next steps in this research were suggested: The use of a Breakout box (for better access to signals) and lithographic equipment PicoLITH. By using a nanolithographically formed grid (whose parameters would be verified by stage micrometer) the system could be in the future metrologically tested.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KUBÍNEK, Roman, Milan VŮJTEK a Miroslav MAŠLÁŇ. *Mikroskopie skenující sondou*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2003. ISBN 80-244-0602-0.
- [2] AGILENT TECHNOLOGIES. *5420 Scanning Probe Microscope: Users guide* [online]. USA, 2012 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: [http://nano.tm.agilent.com/PDFs/5420\\_User\\_Guide\\_Revision\\_D.pdf](http://nano.tm.agilent.com/PDFs/5420_User_Guide_Revision_D.pdf)
- [3] WILSON, Robert a Heather BULLEN. *Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM): Basic Theory, Atomic Force Microscopy (AFM)*. [online]. Department of Chemistry, Northern Kentucky University, 2006, s. 8 [cit. 2013-02-11]. Dostupné z: [http://asdlb.org/onlineArticles/ecourseware/Bullen/SPMModule\\_BasicTheoryAFM.pdf](http://asdlb.org/onlineArticles/ecourseware/Bullen/SPMModule_BasicTheoryAFM.pdf)
- [4] Atomic Force Microscopy (AFM). NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. *WolfWikis* [online]. 2011 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: [http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Atomic\\_Force\\_Microscopy\\_%28AFM%29](http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Atomic_Force_Microscopy_%28AFM%29)
- [5] HAUGSTAD, Greg a John C SPENCE. *Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2012, xxii, 464 p. ISBN 978-047-0638-828.
- [6] AGILENT TECHNOLOGIES. *Scanning Microwave Microscopy Mode: Users guide* [online]. Revision B-2. USA, 2011 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: [http://nano.tm.agilent.com/PDFs/SMM\\_Mode\\_User\\_Guide\\_Rev\\_B-2.pdf](http://nano.tm.agilent.com/PDFs/SMM_Mode_User_Guide_Rev_B-2.pdf)
- [7] 5420 AFM/SPM - N9498S. *H test* [online]. 2011 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.htest.cz/index.php?produkt=552>
- [8] HAN, Wenhai. AGILENT TECHNOLOGIES. *Introduction to Scanning Microwave Microscopy Mode: Application Note* [online]. Rev C. USA, 2009 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8881EN.pdf>
- [9] AGILENT TECHNOLOGIES. *Network Analyzer Basics* [online]. USA, 2004 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7917E.pdf>

- [10] WU, Shijie a Theresa HOPSON. AGILENT TECHNOLOGIES. *SMM Imaging of Dopant Structures of Semiconductor Devices: Application Note* [online]. USA, 2012 [cit. 2013-03-15]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-0562EN.pdf>
- [11] AGILENT TECHNOLOGIES. *SMM Capacitance Calibration in PicoView 1.9 (up)*. V1.1. 2010.
- [12] AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. *Review of scientific instruments: Calibrated nanoscale capacitance measurements using a scanning microwave microscope*. USA, 2010. ISBN 0034-6748.
- [13] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent PicoView Software Enhanced Imaging and Analysis Package for Agilent AFM Systems: Data Sheet*. USA, 2012.
- [14] KUBÍNEK, Roman, Milan VŮJTEK a Renata HOLUBOVÁ. Mikroskopie atomárních sil. *Matematika, fyzika, informatika: časopis pro výuku na základních a středních školách*. Praha: Prometheus, 2001, 9, 10, s. 8. ISSN 1210-1761. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/mfi.pdf>
- [15] KUBÍNEK, Roman. *Jak měřit „NANO“: Nástroje pro měření a vyhodnocování nanostruktur* [online]. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011 [cit. 2013-03-11]. ISBN 978-80-244-2689-1. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/merit\\_nano.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/merit_nano.pdf)
- [16] HAWKES, Peter a John C. SPENCE. *Science of microscopy*. New York: Springer, c2007, 2 v. (xviii, 1265, 126 p.). ISBN 03-872-5296-7.
- [17] PARK SYSTEMS. Lateral Force Microscopy (LFM). *Park Systems – Nanotechnology Solutions Partner*. s. 1. Dostupné z: [http://www.nanowerk.com/nanobusiness/showroom/Park\\_Systems/downloads/Lateral\\_Force\\_Microscopy.pdf](http://www.nanowerk.com/nanobusiness/showroom/Park_Systems/downloads/Lateral_Force_Microscopy.pdf)
- [18] Rastrovací termální mikroskopie. ODDĚLENÍ NANOMETROLOGIE - ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Nanometrologie* [online]. 2012 [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: [http://www.nanometrologie.cz/cz/techs\\_sthm.php](http://www.nanometrologie.cz/cz/techs_sthm.php)
- [19] GROVE, A.S. *Physics and technology of semiconductor devices*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, 1967. ISBN 978-047-1329-985.

- [20] AGILENT TECHNOLOGIES. *SMM capacitance calibration*. Linz, Feb 2010, 10 s.
- [21] WU, Shijie a Jing-Jiang YU. AGILENT TECHNOLOGIES. *Attofarad Capacitance Measurement with Scanning Microwave Microscopy: Application Note*. USA, 2010.
- [22] N9447A Break-Out Box. *Agilent Technologies* [online]. 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.home.agilent.com/en/pd-1709731-pn-N9447A/break-out-box>
- [23] AGILENT TECHNOLOGIES. *PicoLITH, Agilent Lithography and Nanomanipulation Package: Data Sheet* [online]. USA, 2009 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-6004EN.pdf>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AAC	Acoustic AC
AC	Intermittent Contact AFM
AFM	Atomic Force Microscopy
BNC	Bayonet Neill–Concelman
CSAFM	Current Sensing AFM
DLFM	Dynamic Lateral Force Microscopy
DPMM	Dopant Profile Measurement Module
FMM	Force Modulation Microscopy
HEB	Head Electronics Box
KFM	Kelvin Force Microscopy
LFM	Lateral Force Microscopy
LO	Local Oscillator Signal
MAC	Magnetic AC
MFM	Magnetic Force Microscopy
PC	Personal Computer
PDM	Phase Detection Microscopy
PNA	Performance Network Analyzer
PSV	Poměr stojatých vln
RF	Radiofrekvenční
SCM	Scanning Capacitance Microscopy
SMM	Scanning Microwave Microscopy
SPM	Scanning Probe Microscopy
SSRM	Scanning Spreading Resistance Microscopy
SThM	Scanning Thermal Microscopy

STM	Scanning Tunneling Microscopy
TDFM	Transverse Dynamic Force Microscopy
UFM	Ultrasonic Force Microscopy
USB	Universal Serial Bus
VNA	Vector Network Analyzer

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Princip AFM [2]</i> .....	12
<i>Obr. 2. Síly ohýbající raménko [3]</i> .....	13
<i>Obr. 3. Režimy AFM [4]</i> .....	15
<i>Obr. 4: Optická analogie k SMM [8]</i> .....	16
<i>Obr. 5. Odrazové a přenosové parametry [9]</i> .....	17
<i>Obr. 6. Smithův diagram [9]</i> .....	18
<i>Obr. 7. SMM – Měření kapacity a koncentrace dopantů [10]</i> .....	19
<i>Obr. 8. EFM [15]</i> .....	20
<i>Obr. 9. FMM [2]</i> .....	20
<i>Obr. 10. LFM [15]</i> .....	21
<i>Obr. 11. Srovnání LFM a AFM [17]</i> .....	22
<i>Obr. 12. MFM [15]</i> .....	22
<i>Obr. 13. SThM - vedení tepla [18]</i> .....	23
<i>Obr. 14. Měřicí systém</i> .....	24
<i>Obr. 15. Schéma zapojení</i> .....	25
<i>Obr. 16. Mikroskop - Agilent 5420 SPM/AFM [2]</i> .....	26
<i>Obr. 17. Trojúhelníkový nosník s hrotem [6x]</i> .....	27
<i>Obr. 18. Nose cone, ve směru hodinových ručiček z horní levé části: Top MAC, CSAFM, AFM kontaktní mód, AAC, STM [2]</i> .....	28
<i>Obr. 19. Skener [2]</i> .....	29
<i>Obr. 20. Detektor [2]</i> .....	30
<i>Obr. 21. HEB [2]</i> .....	31
<i>Obr. 22. AFM kontrolér [2]</i> .....	31
<i>Obr. 23. Antivibrační izolační komora [2]</i> .....	32
<i>Obr. 24. VNA (vlevo) a SMM nose cone [6]</i> .....	33
<i>Obr. 25. dC/dV kontrolér (vlevo) a napájecí zdroj [6]</i> .....	33
<i>Obr. 26: Vzorková deska [2]</i> .....	34
<i>Obr. 27. Pico View</i> .....	34
<i>Obr. 28. Chip</i> .....	36
<i>Obr. 29. SMM nose cone na skeneru [6]</i> .....	37
<i>Obr. 30. Zasunutí SMM sondy [6]</i> .....	37

<i>Obr. 31. Vložení skeneru do mikroskopu [2]</i> .....	38
<i>Obr. 32. Zaměřený laser [2]</i> .....	38
<i>Obr. 33. Zaměření</i> .....	39
<i>Obr. 34. Výběr požadované oblasti</i> .....	39
<i>Obr. 35. PNA Sweep</i> .....	40
<i>Obr. 36. Advanced AC Mode Controls [6]</i> .....	41
<i>Obr. 37. Kalibrační kapacitanci standard [11]</i> .....	42
<i>Obr. 38. Výběr požadované oblasti na kapacitanci standardu [11]</i> .....	42
<i>Obr. 39. Zoom</i> .....	43
<i>Obr. 40. Step Height Measurement – PNA amplituda</i> .....	43
<i>Obr. 41. PNA Capacitance Calibration</i> .....	44
<i>Obr. 42. Vizualizace</i> .....	46
<i>Obr. 43: Výsledná vizualizace topografie</i> .....	47
<i>Obr. 44. Výsledná 3D vizualizace topografie</i> .....	47
<i>Obr. 45: Výsledná vizualizace kapacitance</i> .....	48
<i>Obr. 46. Výsledná 3D vizualizace kapacitance</i> .....	48
<i>Obr. 47. Výsledná vizualizace koncentrace dopantů</i> .....	49
<i>Obr. 48. Znáznornění naměřené oblasti na snímku z optické mikroskopu</i> .....	49
<i>Obr. 49. Označení kolektoru a emitoru</i> .....	50
<i>Obr. 50. Extrahovaný profil z poloviny emitoru do poloviny kolektoru</i> .....	50
<i>Obr. 51. Schematický průřez PNP tranzistorem</i> .....	51
<i>Obr. 52. Měření velikostí prohlubní v oblasti emitoru a kolektoru</i> .....	51
<i>Obr. 53. Breakout Box [2]</i> .....	52
<i>Obr. 54. PicoLITH [23]</i> .....	53

## SEZNAM PŘÍLOH

P I Soubory s naměřenými daty na přiloženém CD-ROM.

P II Video 3D vizualizace topografie na přiloženém CD-ROM.