

# **Zobrazování struktur elektronických systémů užitím skenovací mikrovlnné mikroskopie**

Projection of Structures of Electronic Systems Using Scanning  
Microwave Microscopy

Bc. Tomáš Martínek

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2012/2013

# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš MARTÍNEK**  
Osobní číslo: **A11292**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Zobrazování struktur elektronických systémů užitím  
skenovací mikrovlnné mikroskopie**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami mikroskopie skenující sondou.
2. Popište použitý měřicí systém.
3. Provedte měření vybrané struktury.
4. Vizualizujte naměřenou strukturu.
5. Navrhněte možnost aplikace této metody v oblasti bezpečnosti.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **HAWKES, P a John C SPENCE.** Science of microscopy. New York: Springer, c2007, 2 v. [xviii, 1265, 126 p.]. ISBN 03-872-5296-7.
2. **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)
3. **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)
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>

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 zobrazovacími metodami mikroskopie se skenující sondou a skenovacím systémem Agilent 5420 SPM/AFM od společnosti Agilent Technologies. Možnosti tohoto systému jsou zanalyzovány a demonstrovány na několika praktických aplikacích.

Klíčová slova: Mikroskopie atomárních sil, Skenovací mikrovlnná mikroskopie, metrologie, vizualizace

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deal with imaging methods of Scanning Probe Microscopy and scanning system Agilent 5420 SPM/AFM from Agilent Technologies. Possibilities of this system are analyzed and demonstrated by several practical applications.

Keywords: Atomic Force Microscopy, Scanning Microwave Microscopy, Metrology, Visualization

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanovi Navrátilovi Ph.D. a panu docentovi RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, CSc. za odborné a inspirativní konzultace, kolegiální a optimistický přístup a pomoc při psaní této práce. Také bych rád poděkoval mé rodině a blízkým za veškerou podporu po celou dobu mého studia.

**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>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>9</b>
<b>1 MIKROSKOPIE SKENUJÍCÍ SONDOU.....</b>	<b>10</b>
1.1 SKENOVACÍ TUNELOVACÍ MIKROSKOPIE .....	10
1.2 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL .....	12
1.2.1 Kontaktní mód mikroskopie atomárních sil .....	14
1.2.2 Přerušovaný kontaktní mód mikroskopie atomárních sil .....	14
1.3 SKENOVACÍ MIKROVLNNÁ MIKROSKOPIE.....	17
1.3.1 Měření kapacity .....	19
1.3.2 Měření koncentrace dopantů u polovodičů .....	20
<b>2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MĚŘÍCÍ TECHNIKA.....</b>	<b>22</b>
2.1 AGILENT 5420 SPM/AFM .....	22
2.2 AGILENT PNA N5230A .....	29
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
<b>3 PŘÍPRAVA SYSTÉMU K MĚŘENÍ .....</b>	<b>31</b>
<b>4 MĚŘENÍ VYBRANÉ STRUKTURY.....</b>	<b>35</b>
4.1 VIZUALIZACE A DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	41
<b>5 APLIKACE METOD SPM V OBLASTI BEZPEČNOSTI .....</b>	<b>44</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>49</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>57</b>

## ÚVOD

Téma mé diplomové práce jsem si vybral zejména z důvodu, že se skenovací mikroskopii věnuji již čtvrtým rokem, z toho dva roky na systému Agilent 5420 SPM/AFM, a také z důvodu, že v nanotechnologiích vidím velice aktuální a perspektivní obor, jenž se brzy začne významně podepisovat i na bezpečnostních technologiích.

Cílem mé práce je provedení měření na vybrané sktruktuře využitím skenovací mikrovlnné mikroskopie, vizualizace naměřených dat a návrh možnosti aplikace těchto metod v oblasti bezpečnosti.

V teoretické části je čtenář seznámen s mikroskopií skenující sondou (SPM) a jejími základními principy. Dále jsou v práci popsány další metody mikroskopie se skenující sondou a to mikroskopie atomárních sil (AFM) a její skenovací módy – kontaktní mód a mód přerušovaného kontaktu. V práci je také část věnovaná velice aktuální problematice – skenovací mikrovlnné mikroskopii (SMM) a problematice s ní související a to kalibraci naměřené kapacitance a koncentrace nosičů náboje pomocí kalibračních standardů.

Druhá kapitola popisuje použitý skenovací systém Agilent 5420 SPM/AFM od společnosti Agilent Technologies a jeho moduly potřebné pro skenování pomocí mikroskopie atomárních sil a skenovací mikrovlnné mikroskopie. Také je zde popsán obvodový analyzátor PNA N5230A opět od společnosti Agilent Technologies.

V praktické části je popsán kalibrační proces pro kalibraci kapacitance. Vlastní ukázka měření je provedena na klopném obvodu vytvořeném pomocí CMOS technologie na křemíkovém substrátu. Výsledky topografie, kapacitance a koncentrace dopantů získané pomocí AFM a SMM jsou vizualizovány pomocí programu Pico Image Basic 6.2.

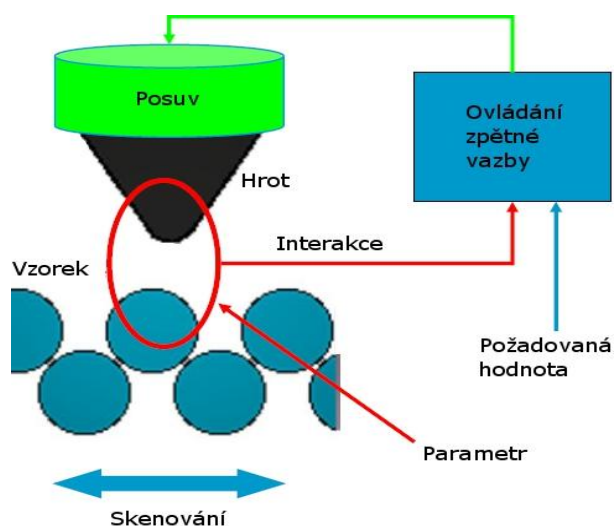
V poslední kapitole jsou nastíněny příklady analyticko-bezpečnostních aplikací. První příklad popisuje možnost využití systému při odhalování padělaných elektronických součástek pomocí markantů daných výrobní technologií na mikroprocesoru. Druhý příklad popisuje možnost skenování datového záznamu na poničeném magnetickém disku.



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MIKROSKOPIE SKENUJÍCÍ SONDOU

Mikroskopie skenující sondou (Scanning Probe Microscopy, některé zdroje mluví o mikroskopii rastrující sondou) je souhrnné označení pro měřicí metody, které jsou založeny na pohybu sondy v těsné blízkosti, nebo dokonce v dotyku, s povrchem měřeného vzorku a na měření interakce mezi touto sondou a vzorkem.

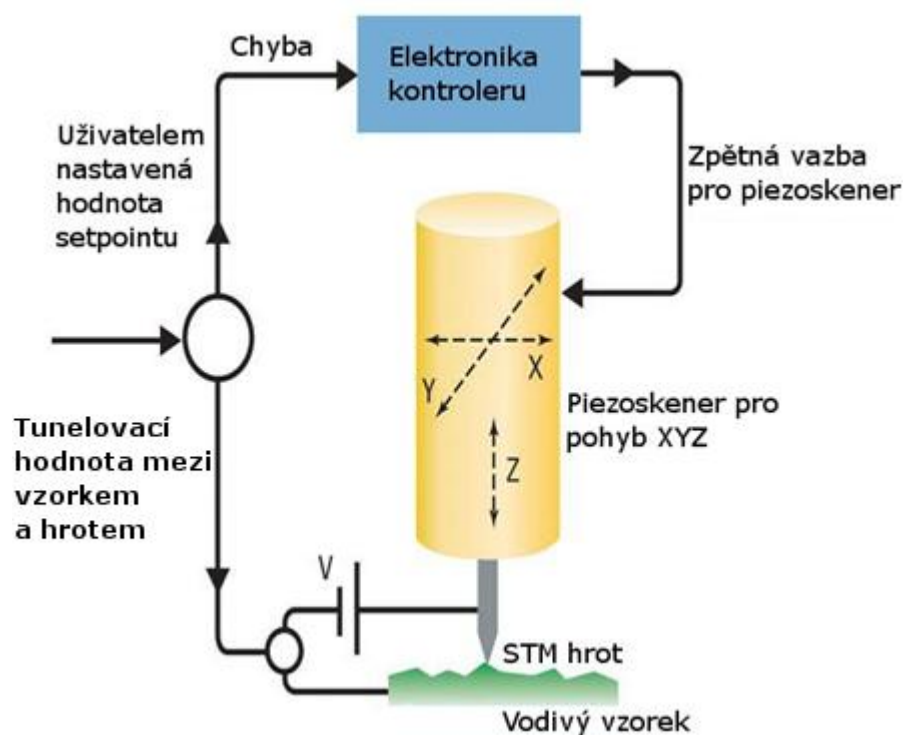


Obrázek 1.: Základní princip mikroskopie skenující sondou. [6]

První z těchto metod, skenovací tunelovací mikroskopie, byla vynalezena v roce 1981 ve výzkumné laboratoři IBM v Curychu ve Švýcarsku dvojicí Dr. Binning a Dr. Rohrer. V roce 1982 bylo demonstrováno atomární rozlišení na monokrystalu křemíku. V roce 1985 byla vyvinuta mikroskopie atomárních sil a následující rok byla tato dvojice oceněna Nobelovou cenou za fyziku. Během následujících let se začaly objevovat další a další měřicí metody a výzkum a vývoj v této oblasti pokračuje dodnes.

### 1.1 Skenovací tunelovací mikroskopie

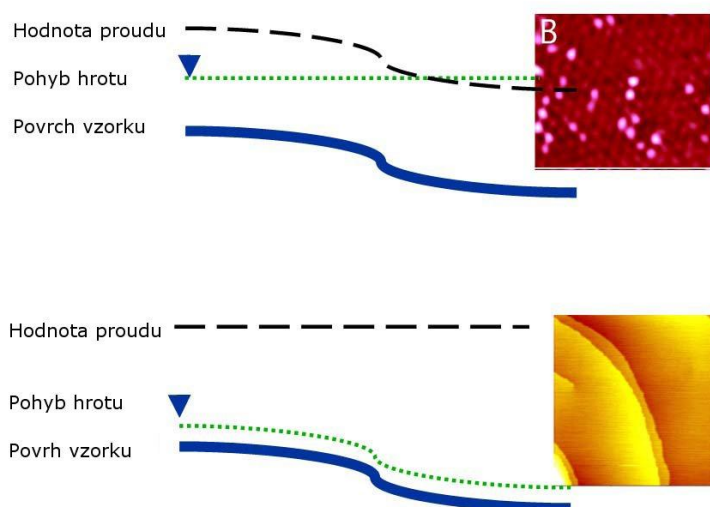
Nejstarší měřicí metodou spadající do SPM je skenovací tunelovací mikroskopie (STM). Tato metoda je založena na měření tunelovacího proudu mezi vodivým hrotem sondy a vodivým vzorkem. Mezi oběma existuje energetická bariéra, závislá na jejich vzájemné vzdálenosti, kterou elektrony nemohou proniknout. Z hlediska kvantové mechaniky však pravděpodobnost průchodu touto bariérou není nulová, ale znatelných hodnot nabývá pro velice malé vzdálenosti (do 3 nm).



Obrázek 2.: Základní schéma STM. [1]

Rozlišení této metody závisí převážně na mechanické stabilitě vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem, na velikosti skenovacího hrotu sondy, na přesnosti měření tunelovacího proudu a také na počtu měřených bodů a vzdálenosti mezi nimi.

STM může pracovat ve dvou měřicích režimech - konstantní výška nebo konstantní proud (viz obrázek 3.).



Obrázek 3.: Režim konstantní výšky (nahore) a režim konstantního proudu. [1]

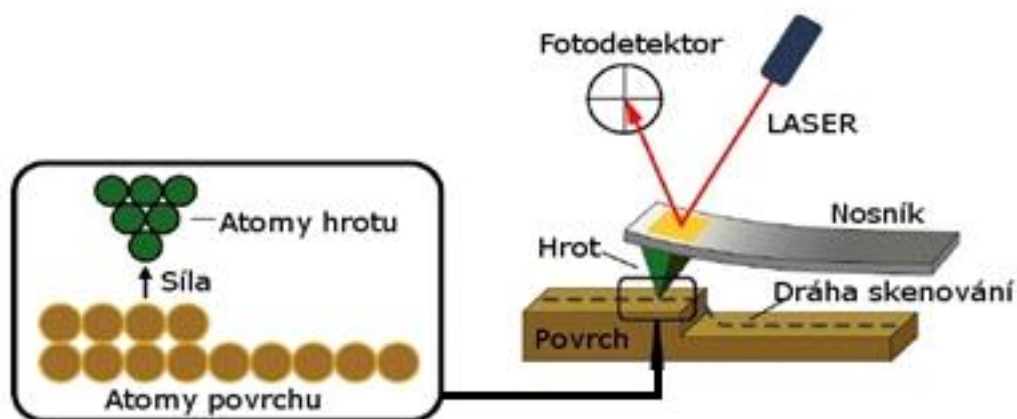
V režimu konstantní výšky se udržuje hrot v konstantní hladině od povrchu vzorku a velikost tunelovacího proudu se mění v závislosti na topografii a lokálních vlastnostech vzorku. Tunelovací proud měřený na jednotlivých místech vzorku tvoří jeho obraz, nicméně povrch vzorku musí být relativně hladký, aby měřicí systém získal použitelné informace. Tento měřicí režim je také rychlejší oproti režimu konstantní síly.[1]

V režimu konstantního proudu je využita zpětná vazba pro upravení výšky hrotu, aby se hodnota tunelovacího proudu udržela na hodnotě požadované uživatelem (setpoint). Vzdálenost hrotu od vzorku v každém místě měření je následně použita k vytvoření obrazu topografie měřeného vzorku. Tento měřicí režim je pomalejší než měřicí režim s konstantní výškou, jelikož obvody zpětné vazby pracují s určitým zpožděním. Tento režim se dá použít i na vzorky s většími výškovými rozdíly. [1]

Aby mohlo dojít k tunelovacímu jevu, musí být vzorek a hrot vodivý nebo polovodivý. Nemožnost využití STM na nevodivé materiály je hlavní nevýhodou, jež vedla k vývoji mikroskopie atomárních sil. [1]

## 1.2 Mikroskopie atomárních sil

Mikroskopie atomárních sil může být použita na měření vodivých i nevodivých materiálů, poskytuje vysoké rozlišení a tří-dimenzionální informaci o vzorku. Tato metoda nevyžaduje náročnou přípravu vzorků. Měření může být prováděno i v kapalinách i za různé kontrolovatelné teploty. Potenciál AFM se dá využít v přírodních vědách, biofyzice, nanotechnologiích, biotechnologiích, elektrochemii a ve studiu polymerů a materiálů obecně. [1]



Obrázek 4.: Základní princip AFM. [1]

AFM funguje na principu vychýlení nosníku vlivem síly působící mezi atomy hrotu a atomy povrchu měřeného vzorku. Je-li přiveden hrot k povrchu vzorku, začne na něj působit přitažlivá či odpudivá síla v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti. Touto silou je nosník vychylován a tím je vychýlen i LASERový paprsek, jenž je v klidu zaměřen do středu čtyřsegmentového fotodiodového detektoru.



Obrázek 5.: Zóny síly interakce v závislosti na vzdálenosti hrotu a vzorku

Na Obrázku 5 jsou zobrazeny interakční síly v závislosti na vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem. Na pravé části křivky jsou hrot a vzorek odděleny velkou vzdáleností. Jak se přibližují, začne působit nejdříve slabá přitažlivá síla. Tato zóna interakce je známá jako bezkontaktní režim. Při dalším přibližování začnou postupně dominovat odpudivé van der Waalsovy síly. Když je vzdálenost mezi hrotem a vzorkem jen pár desetin nanometru, síly jsou v rovnováze a jsou rovny nule - jsme v oblasti přerušovaného kontaktu. Když začnou převažovat odpudivé síly, atomy jsou v kontaktním režimu. [1]

Interakce mezi hrotem a vzorkem komplikují i další síly, včetně kapilárních, adhezních a Pauliho sil. Kapilární síly vznikají v případě, kdy je hrot ponořen v kapalině, molekuly kapaliny obklopují hrot, jenž je v kontaktu s povrchem vzorku. Kapilární síly jsou prakticky konstantní, protože kapalina kolem hrotu a vzorku je nestlačitelná. Celková síla působící na hrot je součtem kapilárních, adhezních a van der Waalsových sil. Van der Waalsovy síly působí proti každé síle, která se snaží atomy hrotu a vzorku více přiblížit, což vede k většímu vychýlení nosníku, nikoliv k jejich přiblížení. Proto se dá výchylka nosníku použít jako spolehlivý indikátor topografie povrchu. [1]

### 1.2.1 Kontaktní mód mikroskopie atomárních sil

Při měření v kontaktním módu AFM je hrot připojen na konci nosníku o nízké tuhosti (obvykle  $1 \text{ pN}\cdot\text{nm}^{-1}$  až  $5 \text{ nN}\cdot\text{nm}^{-1}$ ). Hrot je v jemném kontaktu se vzorkem projevující se silou  $0.1 \text{ nN}$  až  $1 \text{ }\mu\text{N}$ . [1]

AFM může pracovat, obdobně jako STM, v režimu s konstantní výškou nebo konstantní silou.

V režimu s konstantní výškou je výška skeneru pevná. Pro malé nosníky ( $< 500 \text{ nm}$ ) u hladkých povrchů je využíván chybový signál, jenž je citlivý na malé změny topografie, k vytvoření obrazu vzorku. Chybový signál je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a hodnotou požadovanou uživatelem (Setpoint). Skutečná informace o topografii se vlastně nezískává. Tento režim je často používán na ploché povrchy, kde působí na nosník malé síly, pro vytvoření obrazu s atomárním rozlišením. Je také používán k měření na měnící se struktuře vzorku v reálném čase, kdy je potřebná velká rychlost skenování. [1]

V režimu konstantní síly je chybový signál používán jako vstup do obvodů zpětné vazby, jenž se po zesílení používá k ovládání výškové souřadnice (osa Z) piezoskeneru. Zpětnovazební obvod reaguje na změny v topografii vzorku a udržuje vychýlení nosníku konstantní, tudíž i síla působící mezi hrotem nosníku a vzorkem je konstantní. Výstup obvodu zpětné vazby je použit k získání obrazu topografie. Tento režim se většinou používá pro snímání vzorků s velkými výchylkami ve výšce jejich struktury. Rychlost skenování v tomto režimu je limitována rychlostí obvodů zpětné vazby. Rozlišení je při skenování v režimu s konstantní silou menší z důvodu šumů zpětnovazebních obvodů. [1]

### 1.2.2 Přerušovaný kontaktní mód mikroskopie atomárních sil

Přerušovaný kontaktní mód AFM společnost Agilent označuje jako AC mód (Alternating Contact).

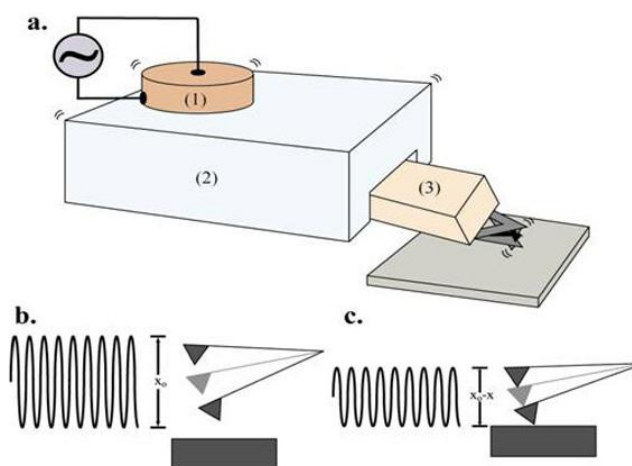
V AC módu nosník harmonicky osciluje na jedné ze svých rezonančních frekvencí nebo v jejich blízkosti. Když se nosník přiblíží ke vzorku během oscilačního cyklu, působí na něj přitažlivé a, v bezprostřední blízkosti vzorku, odpudivé složky síly, což se projevuje změnou amplitudy, fáze a frekvence oscilujícího nosníku. Změna fáze a amplitudy zvýrazňují fyzikální vlastnosti vzorku, jež nejsou rozpoznatelné z obrazu topografie. [1]

Zpětnovazební obvody se využívají k udržení oscilační amplitudy na žádané hodnotě (Setpoint). Rozdíl mezi amplitudou a setpointem je chybový signál, jenž se využívá jako vstup do zpětnovazebních obvodů. Výstup těchto obvodů je zesílen a použit k úpravě Z souřadnice piezoskeneru. Obraz vytvořený pomocí výstupního signálu obvodů zpětné vazby se nazývá amplitudový obraz. Obraz topografie je vykreslen podle velikosti napětí přivedeného na piezoskener používaného pro udržení konstantní hodnoty oscilační amplitudy, vynásobeného citlivostí piezoskeneru v jednotkách  $\text{nm} \cdot \text{V}^{-1}$ . [1]

Používají se dvě metody pro vytvoření oscilace nosníku:

- Nepřímo, pomocí akustických vibrací - Akustický mód (AAC Mode)
- Přímě, pomocí vytvoření proměnlivého magnetického pole - Magnetický mód (MAC Mode)

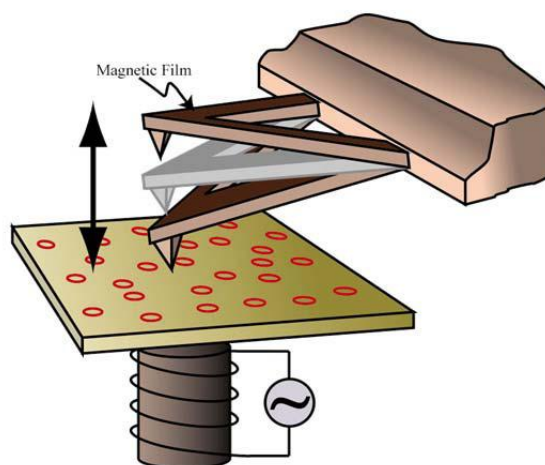
Při měření pomocí **AAC módu** AFM (obrázek 6.) je držák (a2) nosníku (a3) rozvibrován na rezonanční frekvenci, nebo jí blízkou (typicky 100 - 400 kHz), pomocí piezoelektrického měniče (a1). Nosník začne oscilovat (b) nad vzorkem a po jeho přiblížení je snížena amplituda oscilace vzájemnou interakcí (c). Tato změna se využívá jako vstup do zpětnovazebních obvodů k udržení konstantní amplitudy oscilačního pohybu nosníku. [1]



Obrázek 6.: AAC mód. [1]

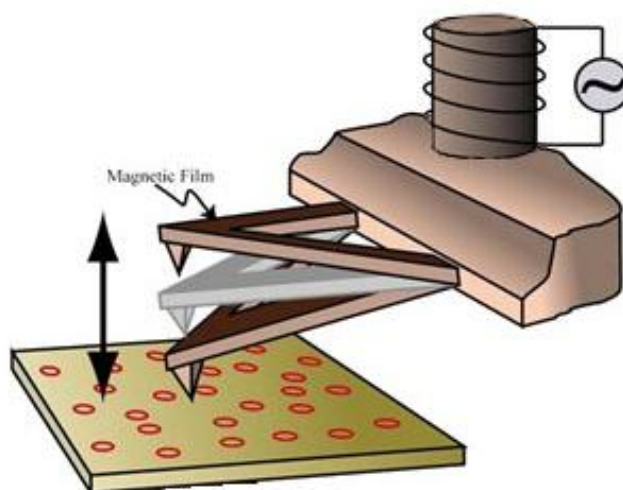
Při měření pomocí **MAC módu** AFM je zadní strana nosníku potažena filmem magnetického materiálu. Solenoid vytvoří proměnné magnetické pole, které se využívá k oscilaci nosníku. Tento režim je obvykle čistější o šumové signály ze zpětnovazebních

obvodů užívaných v AAC módu. Výhody tohoto módu se projevují zejména při měření v kapalinách. [1]



Obrázek 7.: MAC mód [1]

Ve standardním MAC módu je solenoid umístěn pod vzorkovou deskou, na které je umístěn samotný vzorek. Varianta MAC módu s umístěným solenoidem nad nosníkem se nazývá **Top MAC mód**. Tato varianta umožňuje využití tohoto měřicího módu i bez vzorkové desky. To je vhodné pro větší vzorky a také pro vzorky, které mají tendenci rozptylovat magnetické pole takovým způsobem, jenž ovlivňuje rozlišovací schopnosti běžného MAC módu. [1]



Obrázek 8.: Top MAC mód. [1]

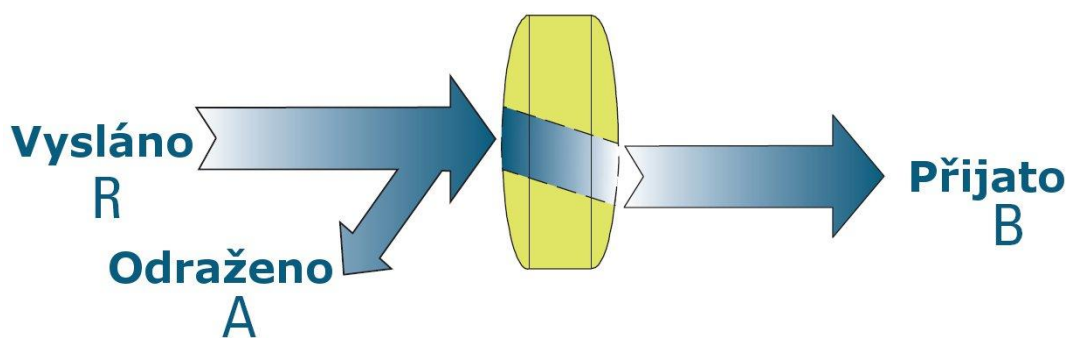


### 1.3 Skenovací mikrovlnná mikroskopie

Skenovací mikrovlnná mikroskopie (SMM) je speciální měřicí technika kombinující elektromagnetické měřicí schopnosti vektorového obvodového analyzátoru (VNA) s prostorovým rozlišením AFM.

Mapování fyzikálních vlastností materiálů při atomárním rozlišení, jakými jsou například impedance, kapacitance, dielektrické konstanty či hustota dopantů, je velmi zajímavé pro materiálový a polovodičový průmysl. Toto mapování je na rozdíl od zobrazování topografie materiálů velmi složité, protože tyto vlastnosti jsou mnohdy spojeny se strukturami, které se nacházejí pod povrchovými vrstvami měřeného vzorku. Pro nedestruktivní měření podpovrchových vlastností s dostatečným rozlišením a citlivostí je třeba inovativní přístup. SMM ukázala největší potenciál v oblasti vědeckého výzkumu a průmyslových aplikacích. [2]

VNA měří vysílaný, odražený a přijatý signál v analyzovaném obvodu. Užitím optické analogie se světlo vyzářené na optickou čočku (vysílaný signál) odráží od jeho povrchu (odražený signál), nicméně naprostá většina světla čočkou projde (přijatý signál). Má-li čočka reflexní povrch, projde jí žádné nebo jen málo světla. Princip je u analýzy obvodu pomocí VNA stejný, jen vlnová délka záření je jiná.



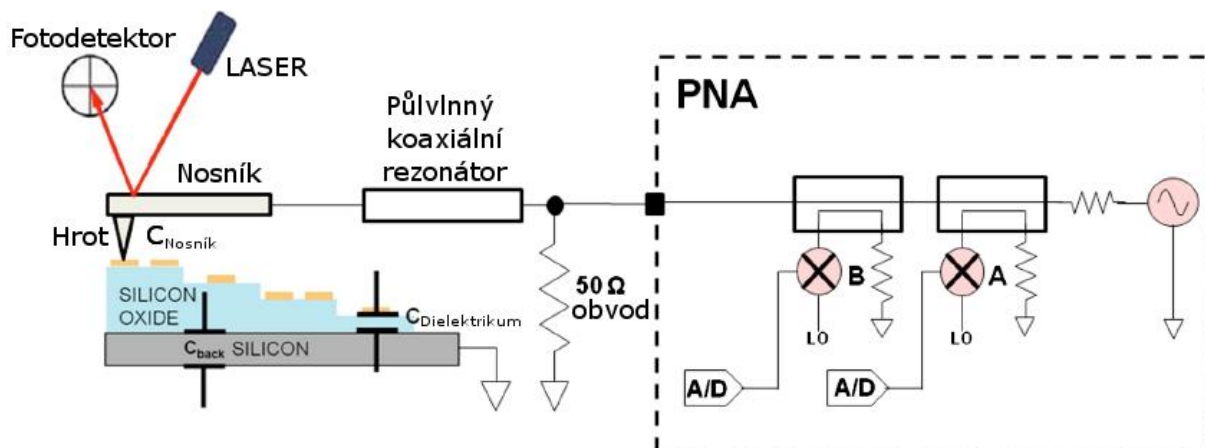
Obrázek 9.: Optická analogie k SMM. [8]

Vysílaný signál z VNA je odeslán přes vodivou AFM sondu, která je při měření v kontaktu s povrchem vzorku - zátěží. Sonda slouží také jako přijímač odraženého mikrovlnného signálu z kontaktního bodu mezi hrotem a vzorkem. [2]



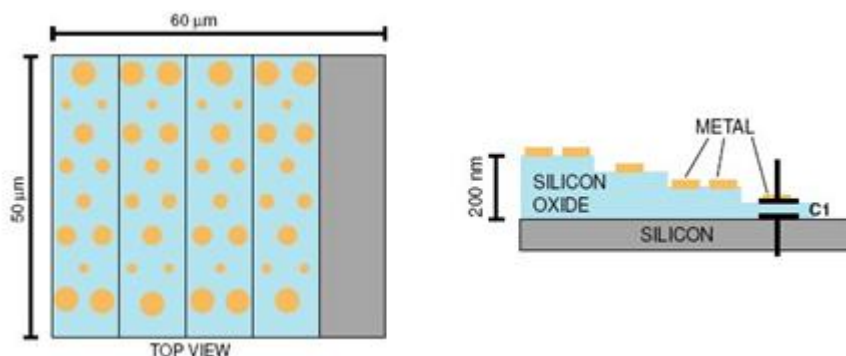
### 1.3.1 Měření kapacitance

Připojíme-li VNA k vodivému hrotu sondy, jenž tvoří se vzorkem kondenzátor, můžeme změřit jeho impedanci, respektive kapacitanci. Ta se pohybuje řádově v  $k\Omega$  až  $M\Omega$ , což znemožňuje přesné měření i pro dnešní VNA na vysokých frekvencích.



Obrázek 12.: Využití půlvlnného koaxiálního rezonátoru k měření kapacitance.[2]

Pro přesné měření můžeme použít půlvlnný koaxiální rezonátor. Rezonanční frekvence je vybudena frekvenčním generátorem ve VNA a přivedena na vstup koaxiálního rezonátoru. V závislosti na permitivitě dielektrika mezi hrotem a vodivými částmi vzorku se mění množství energie absorbované vzorkem a tím i rezonanční frekvence a činitel jakosti koaxiálního rezonátoru.



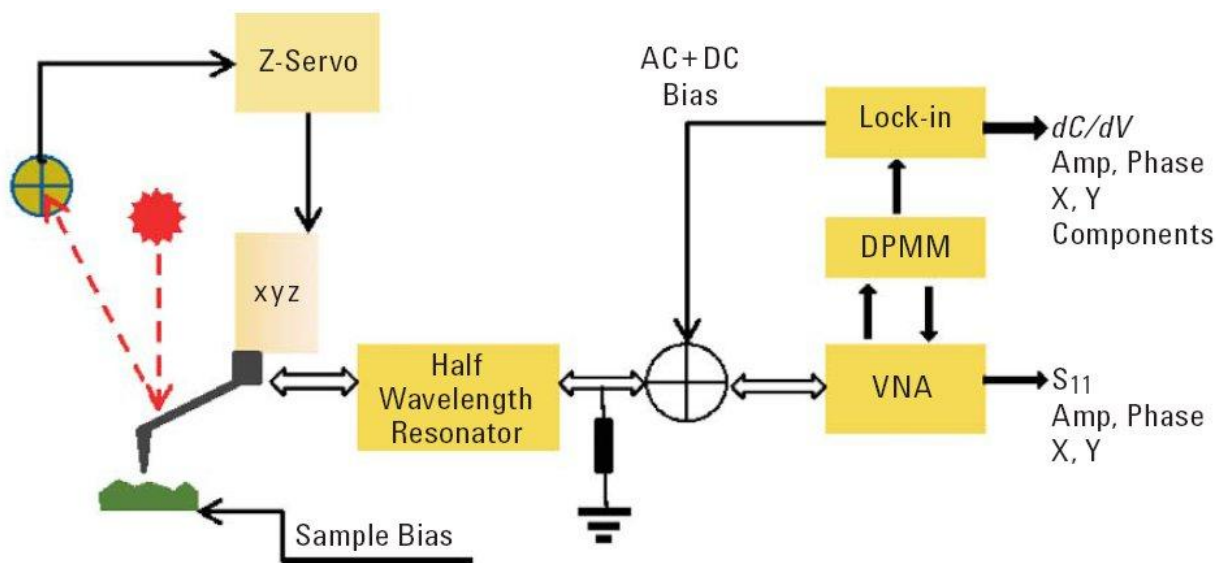
Obrázek 13.: Kalibrační standard pro určení kapacitance. [7]

Srovnáním výstupního signálu z koaxiálního rezonátoru a signálu z frekvenčního generátoru určíme mapu parametrů  $S_{11}$ . Pro přepočítání na absolutní hodnoty kapacitance musíme použít kalibrační standard – zlaté čepičky na schodovitých vrstvách oxidu křemičitého na křemíkovém substrátu.

### 1.3.2 Měření koncentrace dopantů u polovodičů

SMM mód umožňuje mimo mapování impedance a kapacity také mapování koncentrace dopantů u polovodičů (dC/dV) využitím DPMM (Dopant Profile Measurement Module). Mikrovlnný signál z VNA je rozdělen na dvě části. První část je zesílena a použita jako signál lokální oscilace pro dC/dV směšovač. Druhá část je zesílena a poslána na hrot sondy. Mezi sondou a vzorek je současně aplikován externí radiofrekvenční signál z MAC mód kontroleru. [6]

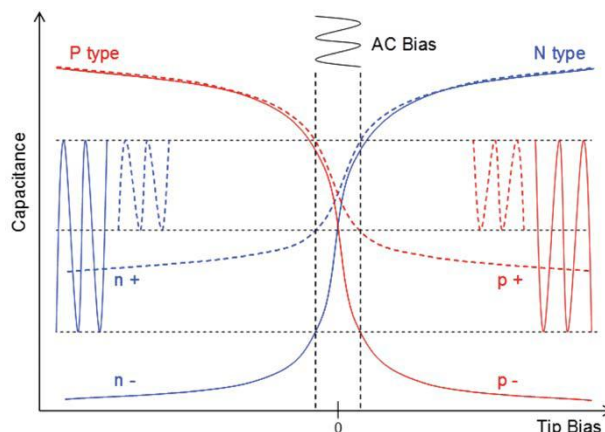
Vzhledem ke změnám kapacity vzorku vyvolaných externím radiofrekvenčním signálem se mikrovlnný signál odráží a moduluje v závislosti na něm. Odražený a namodulovaný signál je rozdělen také na dvě části. První část odraženého signálu je zesílena a poslána do vnitřního směšovače DPMM, kde dojde po smíšení se signálem lokální oscilace k demodulaci. Tento demodulovaný signál je zpracován lock-in zesilovačem k získání amplitudového a fázového dC/dV signálu. Druhá část odraženého signálu je zesílena a poslána do VNA k získání informace o kapacitanci vzorku. [6]



Obrázek 14.: Zjednodušený blokový diagram pro měření kapacity a koncentrace dopantů. [6]

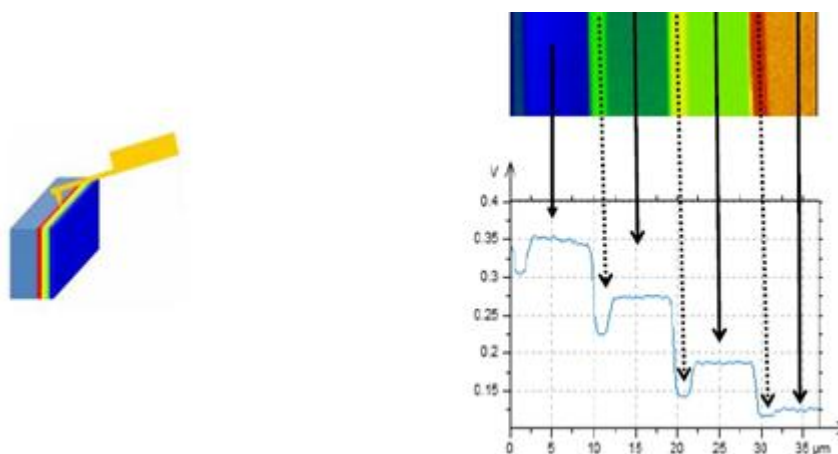
Takto hrot, v závislosti na polaritě přiloženého napětí, přitahuje nebo odpuzuje volné nosiče náboje v polovodiči, které ovlivňují kapacitanci vzorku. Čím je koncentrace nosičů náboje v polovodiči větší, tím je oblast ovlivněná přiloženým napětím menší. [6]

Přiložíme-li mezi hrot a vzorek střídavé napětí, tak je změna kapacity  $dC$  závislá na velikosti změny napětí  $dV$  a na typu polovodiče N nebo P. Většinou je třeba přiložit současně střídavé i stejnosměrné napětí, abychom se na křivce závislosti kapacity na napětí dostali do oblasti, kde je křivka nejstrmější.



Obrázek 15.: Graf závislosti kapacity na přiloženém napětí na hrotu pro polovodiče typu N (modrá) a P (červená). [6]

Jak můžeme vidět na Obrázku 15, tak vyšší hodnota  $dC/dV$  koresponduje s menším množstvím nosičů náboje a menší hodnota  $dC/dV$  odpovídá větší koncentraci nosičů náboje.



Obrázek 16.: Měření jednotlivých vrstev kalibračního standardu. [2,7]

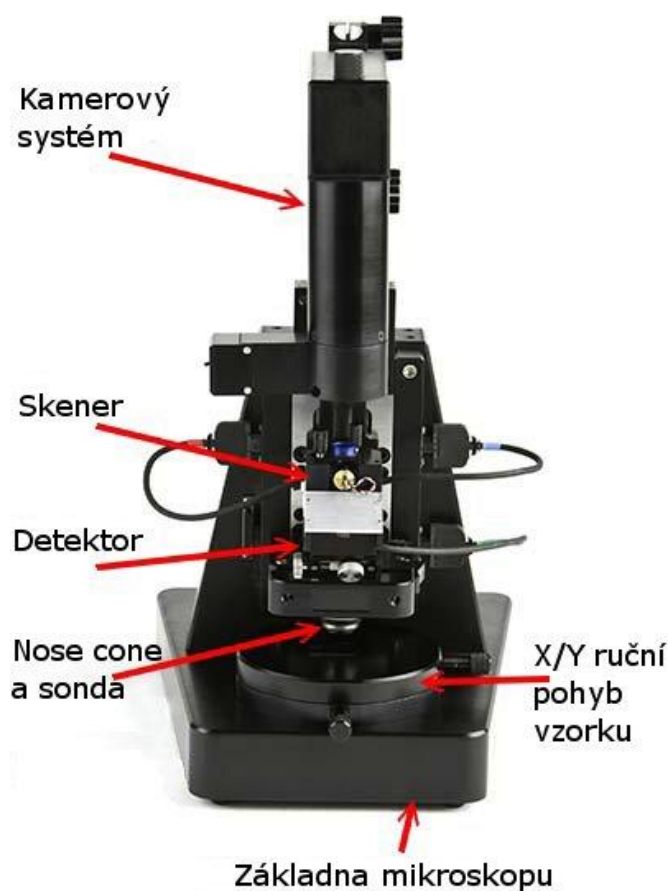
Pro přesné měření koncentrace dopantů je třeba systém zkalibrovat pomocí kalibračních standardů pro P typ a N typ. Obsahuje-li vzorek oba druhy nosičů, musíme použít pro kalibraci oba kalibrační standardy. Tyto kalibrační standardy mají na sobě napařeny jednotlivé vrstvy s různou koncentrací dopantů. [2]

## 2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MĚŘÍCÍ TECHNIKA

Při realizaci této práce byly použity následující přístroje a vybavení.

### 2.1 Agilent 5420 SPM/AFM

Agilent 5420 Scanning Probe Microscope/Atomic Force Microscope je modulární měřicí přístroj určený pro vzdělávání a výzkum.



Obrázek 17.: Mikroskop Agilent 5420 SPM/AFM. [1]

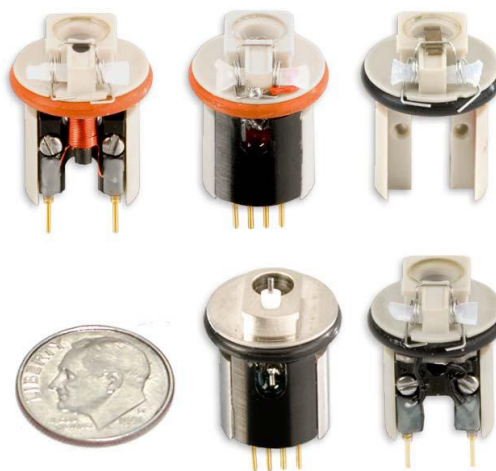
Tento přístroj dokáže pracovat v následujících zobrazovacích režimech:

- Kontaktní mód AFM, AC mód, AAC mód, MAC, STM, LFM, EFM, KFM, MFM, SMM, fázové zobrazování, modulace síly, snímání vodivosti

Základna mikroskopu obsahuje stojan, uchycení pro skener, uchycení pro vzorkovou desku, kamerový systém, hrubý posuv v ose Z a konektory pro připojení elektroniky.



Kónické zakončení (nose cone) uchycuje nosník sondy a zároveň mu umožňuje pohyb. Klip pružiny na kónickém zakončení drží sondu na svém místě. Samotné kónické zakončení je připojeno ke skeneru. [1]



*Obrázek 18.: Zleva nahoře kónické zakončení pro Top MAC, CSAFM, Kontaktní mód, mince 1\$, STM a AAC. [1]*

Skener obsahuje několik elementů vytvořených z piezokeramiky. Pokud je na ně aplikováno elektrické pole, tak se prodlouží nebo zkrátí. Pohyb hrotu v ose Z a pohyb v rastru v osách X a Y je zajišťován aplikováním vysokých napětí na piezoelementy skeneru. Dále tento skener obsahuje uchopení pro kónické zakončení, místo pro ukotvení fotodetektoru a konektory pro připojení k dalším částem měřicího systému. Skenery umožňují připojení různých kónických zakončení v závislosti na zvolené měřicí metodě. [1]



*Obrázek 19.: Typ B skenovacího modulu určený pro Agilent 5420 SPM. [1]*

Skenovací modul typu B je určen pro mikroskop Agilent 5420 SPM. Existují 4 typy B.

- Malý víceúčelový skener obsahující 4 piezopláty (2 pro osu X a 2 pro osu Y) a jednu piezotrubičku (pro osu Z). Umožňuje měření ve skenovací oblasti  $10 \cdot 10 \mu\text{m}$  a je schopný dosáhnout atomárního rozlišení. [1]
- Velký víceúčelový skener obsahující 4 piezoelementy pro osu X a 4 pro osu Y, které umožňují měření ve skenovací oblasti  $90 \cdot 90 \mu\text{m}$ . Obsahuje 2 piezotrubičky pro pohyb v ose Z. Poskytuje vysoké rozlišení a rychlost pro většinu aplikací. [1]
- Velký víceúčelový skener s pozicováním closed-loop, jenž umožňuje pomocí velmi přesných pozičních senzorů měření vzdáleností v jednotlivých osách. [1]
- STM skener pro skenovací tunelovací mikroskopii. [1]

Čtyřsegmentový fotodiodový detektor snímá odražený LASERový paprsek. Horní a dolní části slouží k měření prohnutí nosníku (signál deflekce - pro AFM měření). Levé a pravé části slouží k měření zkroucení nosníku (signál frikce - pro LFM měření).



*Obrázek 20.: Modul čtyřsegmentového fotodiodového detektoru. [1]*



Standardní vzorková deska umožňuje hrubý ruční pohyb vzorku v osách X a Y. Další vzorkové desky umožňují uchycení vzorku a jeho měření například v kapalinách, při různých teplotách atd. Vzorkové desky se upevňují do držáku připevněného k základně mikroskopu.



*Obrázek 21.: Držák vzorkových desek (vlevo) a vzorkové desky pro MAC mód, pro měření v kapalinách a vzorková deska s Petriho miskou. [1]*

Kamerový systém integrovaný do základny mikroskopu umožňuje zaměření LASERového paprsku na hrot sondy. Tento kamerový systém je připojen přes USB do PC.



*Obrázek 22.: Head Electronic Box. [1]*

Head Electronic Box vyhodnocuje signál z detektoru, zobrazuje celkový signál ze všech čtyř jeho segmentů a signál deflekce nebo frikce. Také umožňuje hrubé přiblížení v ose Z. HEB také generuje oscilační napětí pro AC mód.

AFM kontroler generuje vysoké napětí pro piezoelementy a ostatní ovládací funkce systému. Model N9610A je kompatibilní s režimem closed-loop pro přesné polohování.



Obrázek 23.: AFM kontroler model N9610A. [1]

Ke kontroleru je možné připojit breakout box pro vyvedení surových signálů do externích měřících přístrojů.



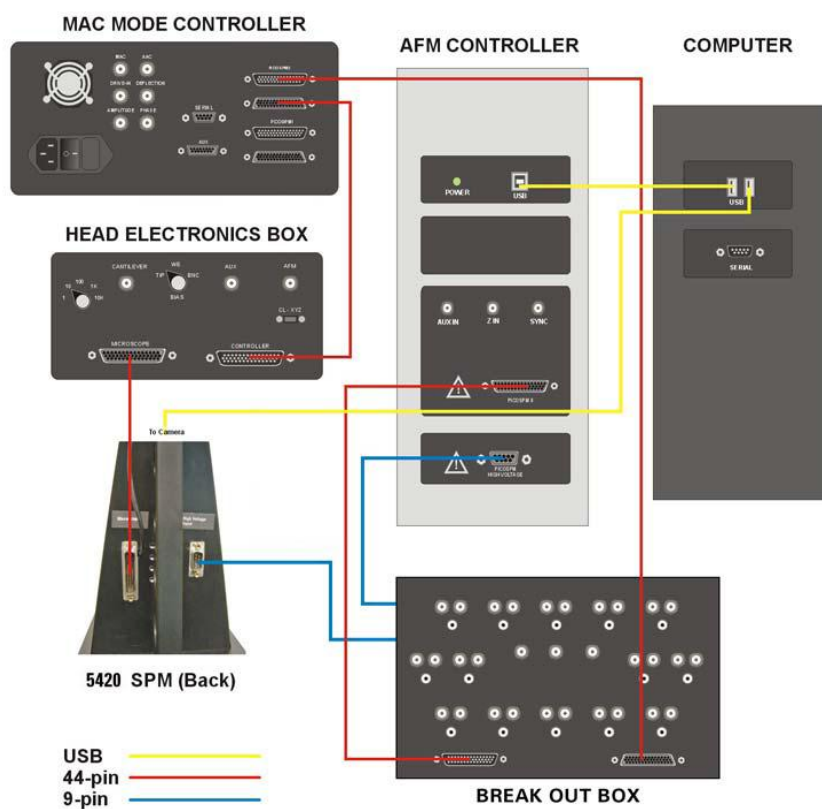
Obrázek 24.: Breakout Box. [1]

MAC mód kontroler obsahuje hardware potřebný pro měření pomocí MAC módu, jenž je vhodný zejména pro měření vzorků v kapalinách a pro měření magnetických vlastností vzorků.



Obrázek 25.: MAC mód kontroler. [1]

Veškeré komponenty jsou propojeny podle schématu na Obrázku 26.



Obrázek 26.: Schéma zapojení celého systému. [1]

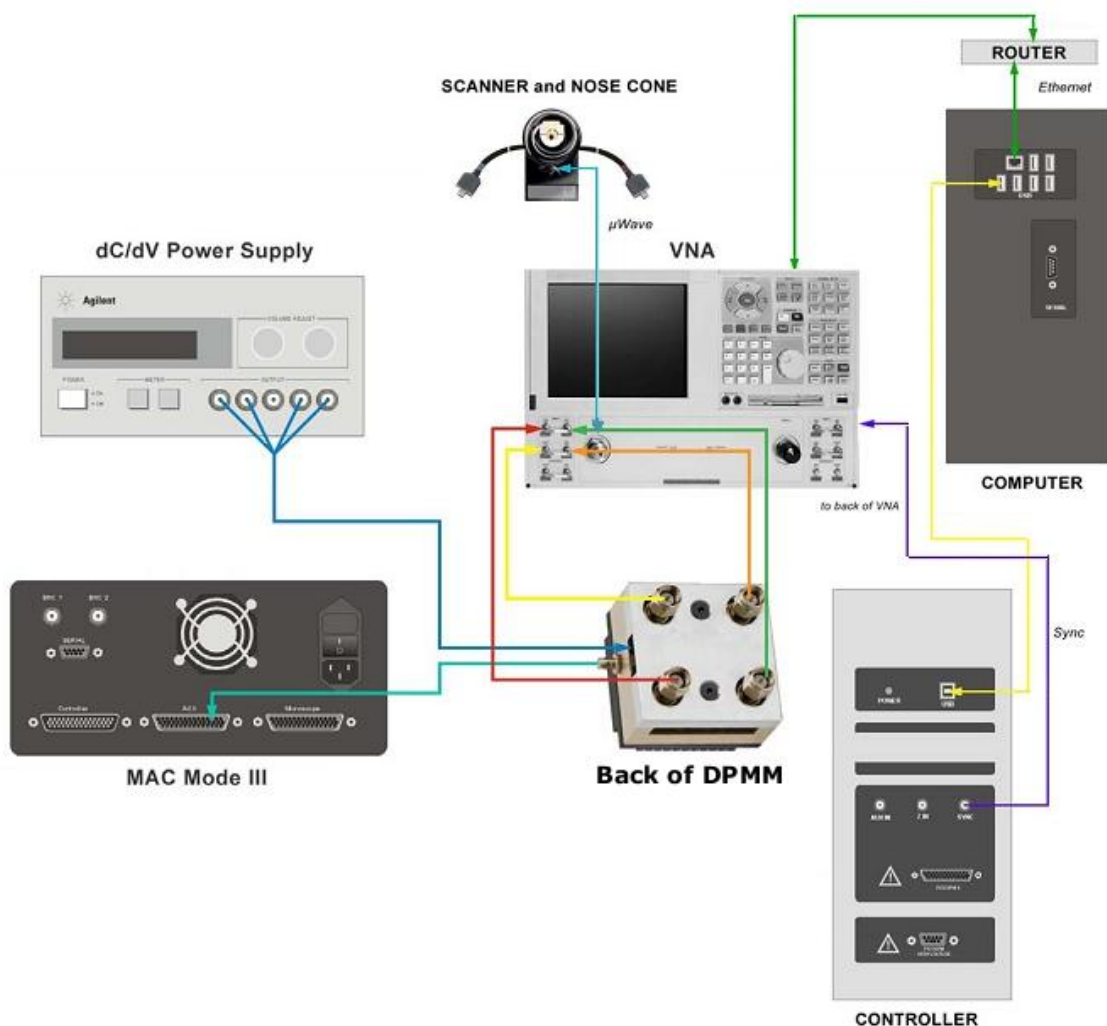
Samotný mikroskop je umístěn v antivibrační izolační komoře, která jej chrání proti vibracím, vzdušným turbulencím a akustickému hluku, jež mohou negativně ovlivnit měření. Tato komora také pomáhá při udržování kontrolované teploty. [1]



*Obrázek 27.: Antivibrační izolační komora. [1]*

## 2.2 Agilent PNA N5230A

SMM mód vyžaduje VNA nebo PNA k měření elektromagnetických vlastností vzorku.



Obrázek 28.: Schéma zapojení VNA a DPMM [2]

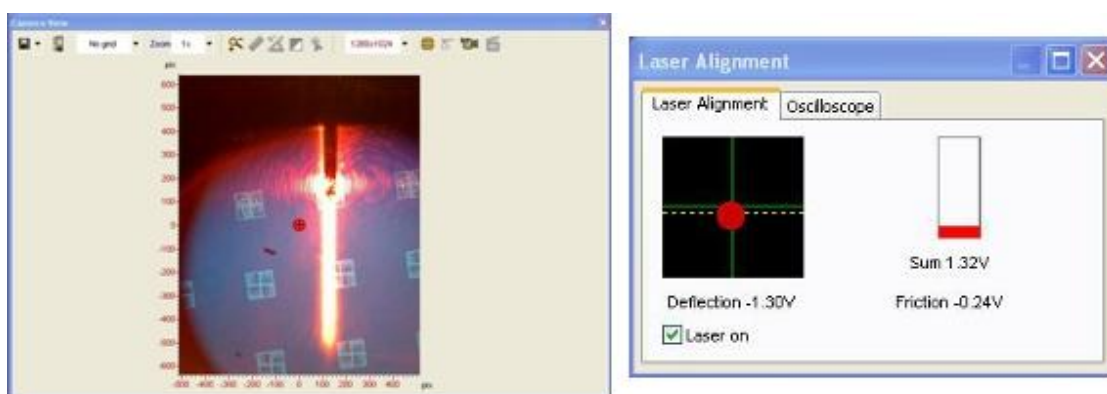
Použitý přístroj PNA N5230A má následující vlastnosti:

- šířka pásma od 300 kHz do 6 GHz (dle konfigurace přístroje až do 50 GHz)
- rozlišení 1 Hz
- 2 porty
- šum <0,006 dB
- rychlost měření <9  $\mu$ s na bod

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 PŘÍPRAVA SYSTÉMU K MĚŘENÍ

Před samotným zobrazením vzorku musí být k měřicímu systému připojeny všechny moduly potřebné k SMM. Nejprve se připevní SMM hrot k SMM kónickému zakončení, které se namontuje ke skeneru. Skener se připevní k základně mikroskopu a zapojí se veškerá kabeláž. Poté se zaměří LASER na hrot tak, aby se odrážel do stínítka na skeneru. Fotodetektor se vloží do skeneru a vycentruje se do místa, kam dopadá LASERové záření.



Obrázek 29.: Zaměřování LASERu na hrot nad kalibračním standardem pro kapacitanci a centralizace fotodetektoru

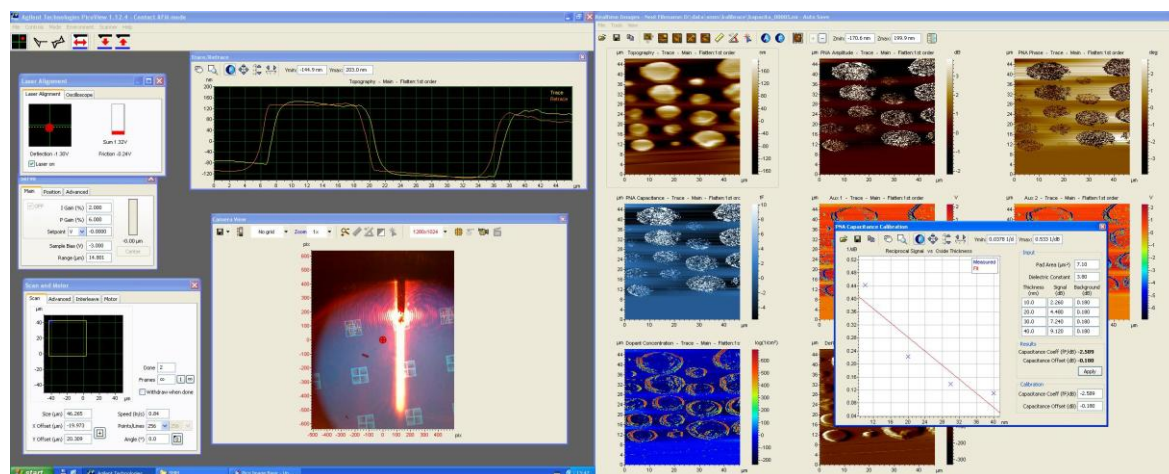
Kalibrační standard pro kapacitanci se vloží na vzorkovou desku, nastaví se veškeré parametry měřicího systému pro vyhodnocení kontaktu a provede se přiblížení hrotu ke vzorku. Následně se nastaví měřicí frekvence a také veškeré parametry VNA.



Obrázek 30.: Nastavení pracovní frekvence VNA na 2,5 GHz

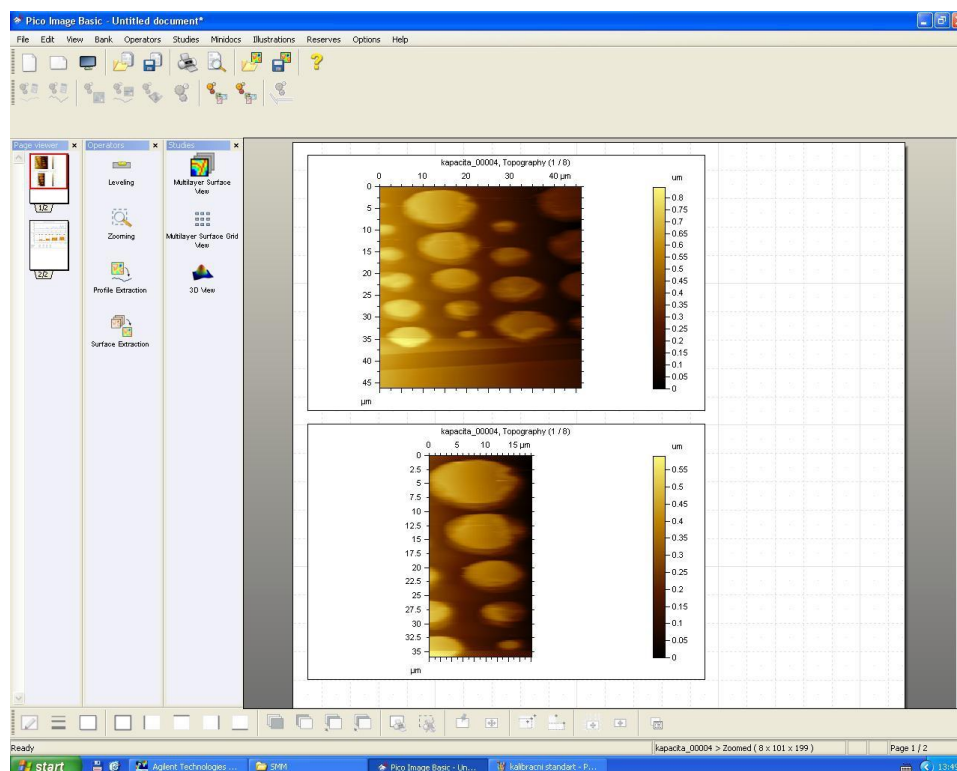


Provede se zobrazení topografie a VNA amplitudy kalibračního standardu.



Obrázek 31.: Změřený kalibrační standard v PicoView

Po naměření standardu se provede extrakce dat v programu Pico Image Basic. Zvolí se nejlépe změřená oblast standardu, která se vyřízne pro usnadnění dalšího zpracování.

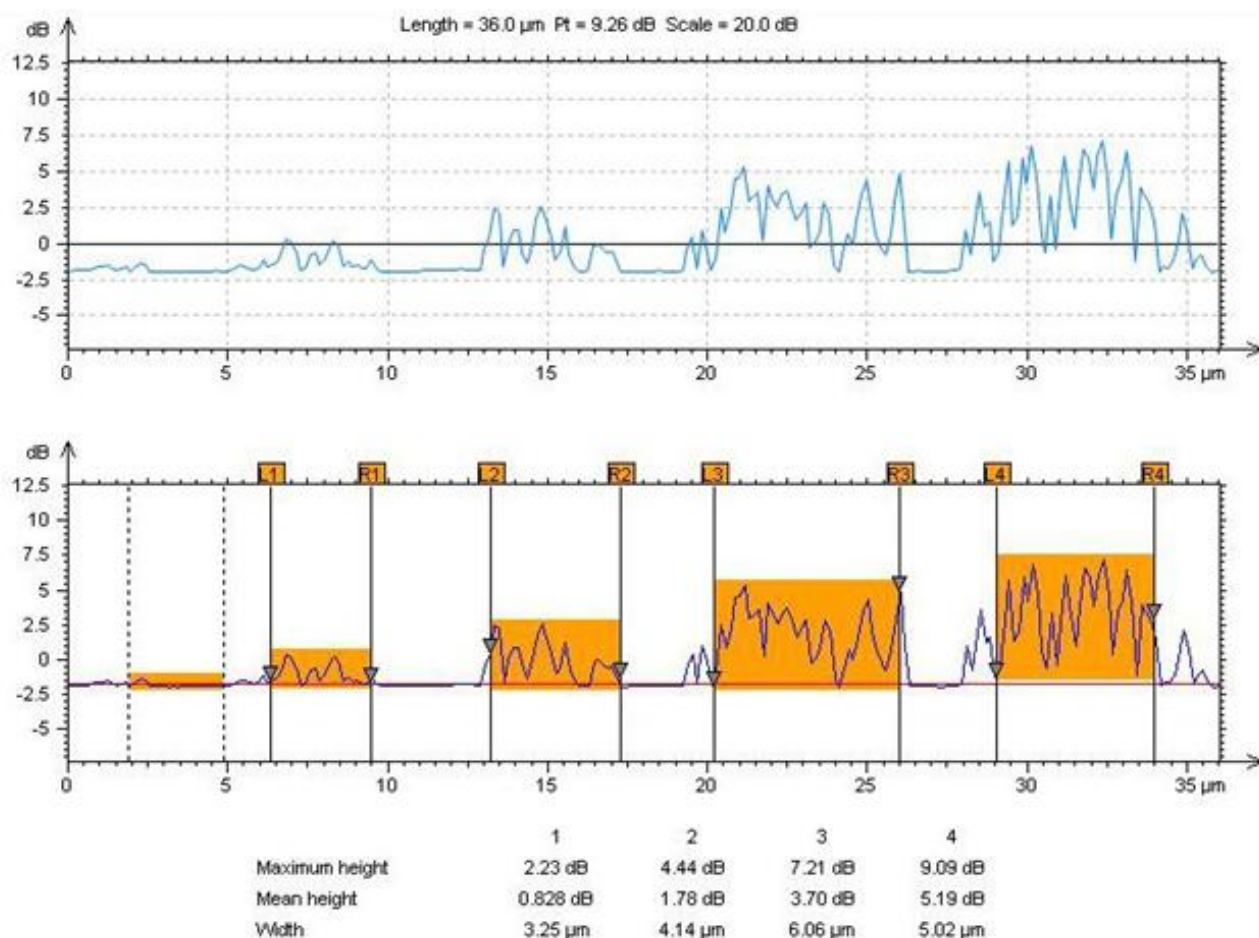


Obrázek 32.: Extrakce naměřených dat v PicoImage

Pomocí funkce Step Height Measurement v programu PicoImage se provede řez naměřeným obrazem pro získání informace o útlumu signálu mezi jednotlivými zlatými

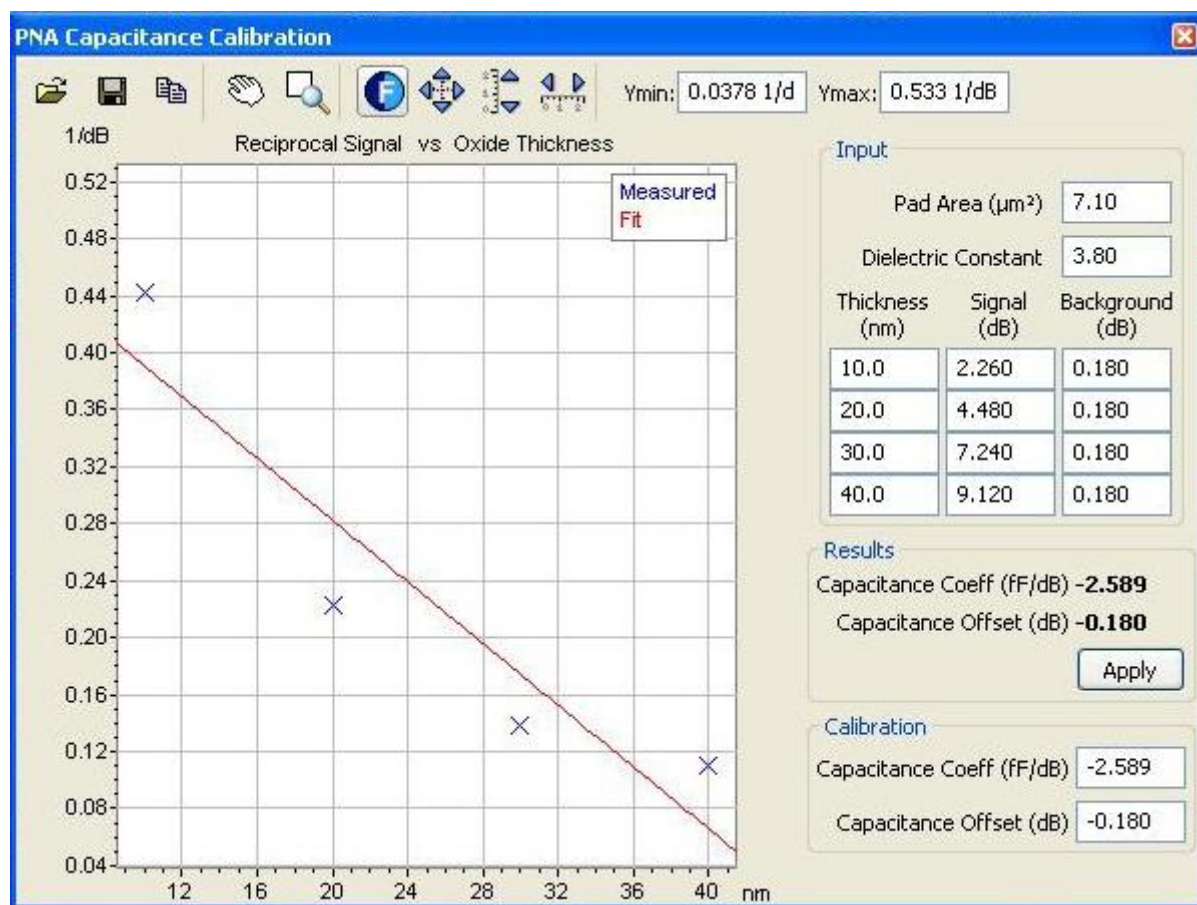


čepičkami standardu. Zvolí se hladiny pro každou z naměřených zlatých čepiček a pro dielektrickou základní vrstvu kalibračního standardu.



Obrázek 33.: Stanovení hladin útlumu signálu v PicoImage

Takto získané informace o útlumu signálu se následně přenesou spolu s údaji o výšce těchto zlatých čepiček z mapy topografie zpět do programu PicoView k provedení kalibrace systému pro danou měřicí frekvenci.

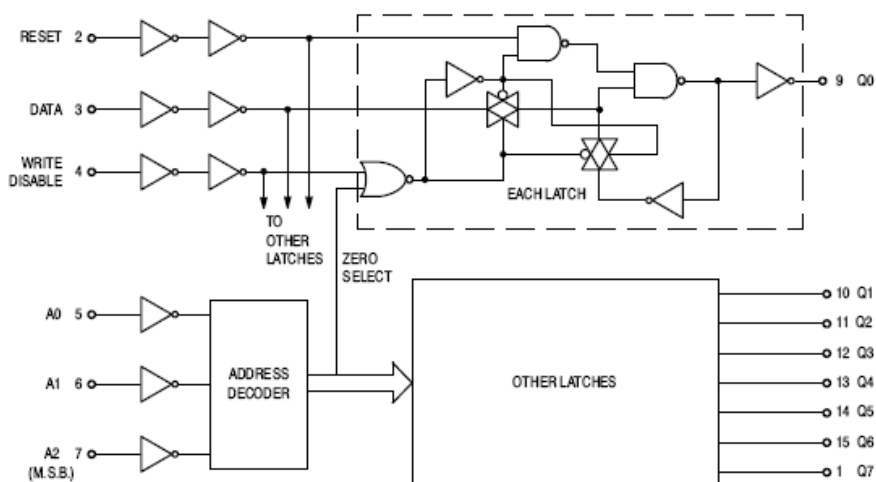


Obrázek 34.: Vložení dat do PicoView pro zkalirování systému

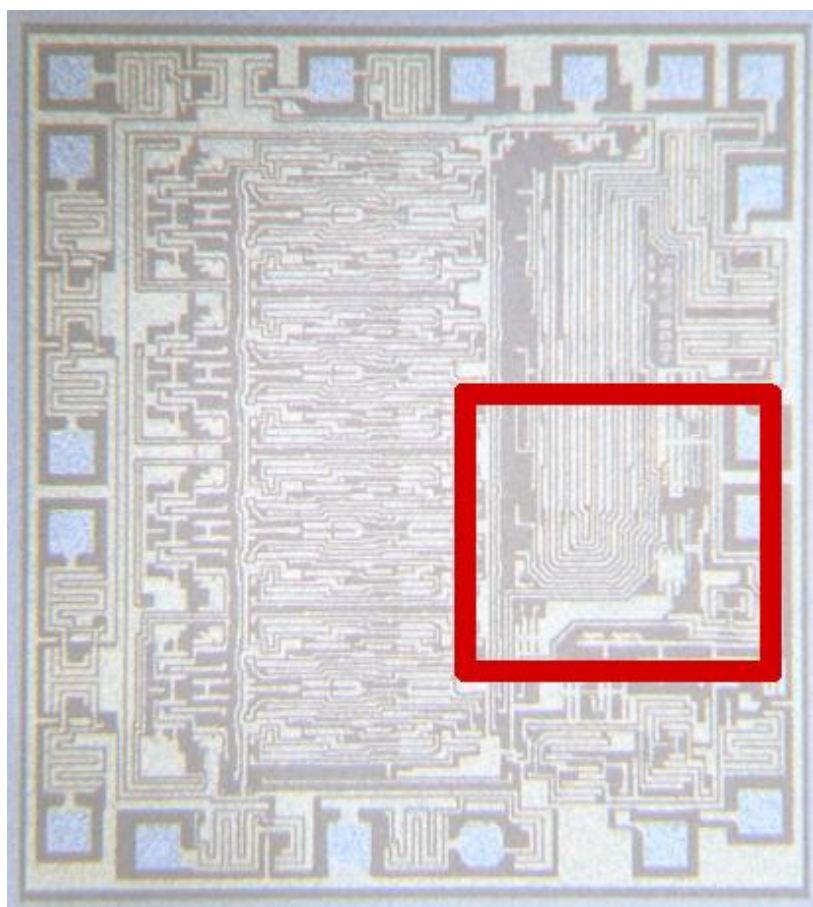
Po zkalirování systému může být provedeno vlastní měření vzorku na dané měřicí frekvenci. V případě potřeby změny měřicí frekvence je třeba celý proces kalibrace provést znovu.

## 4 MĚŘENÍ VYBRANÉ STRUKTURY

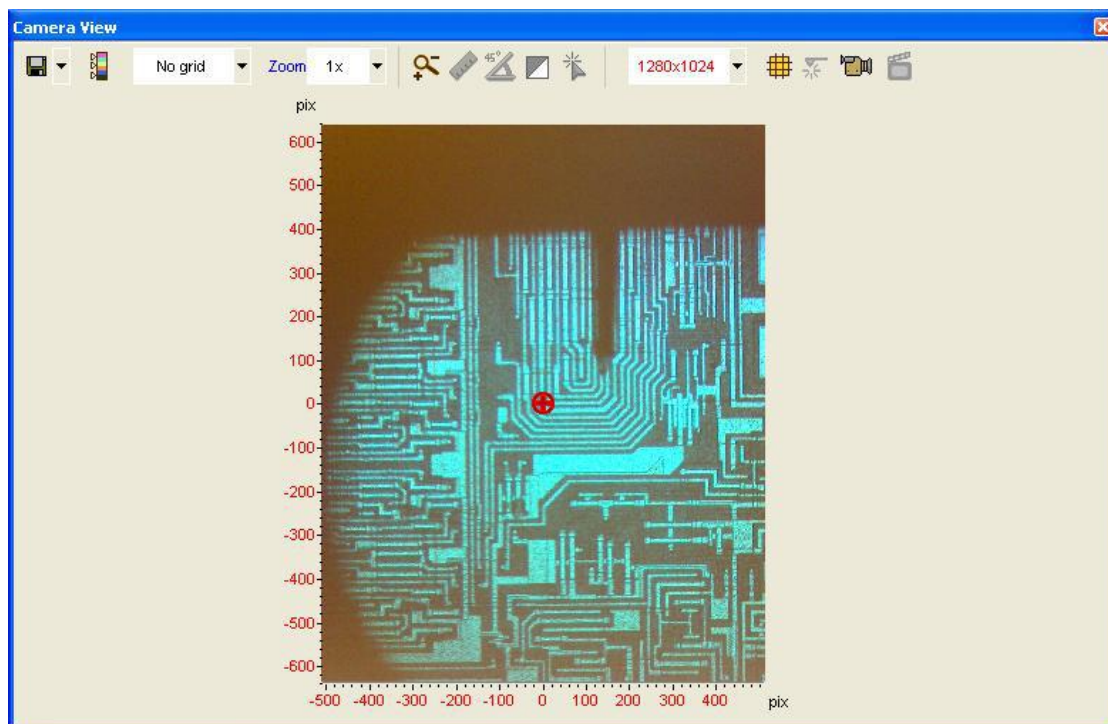
Pro vlastní měření byl zvolen integrovaný obvod vytvořený CMOS technologií na křemíkovém substrátu. Jedná se o 8-bitový klopný obvod MC14099B od společnosti ON Semiconductor.



Obrázek 35.: Blokové schéma MC14099B [9]

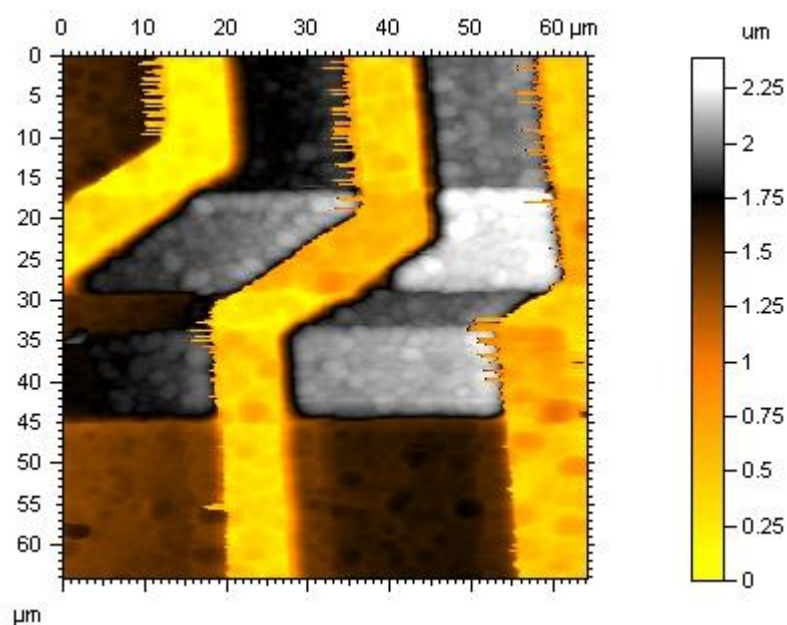


Obrázek 36.: Zobrazení MC14099B pomocí optického mikroskopu při zvětšení 22,4x



*Obrázek 37.: Zobrazení vybrané oblasti a skenovacího nosníku s hrotem pomocí kamerového systému integrovaného do mikroskopu*

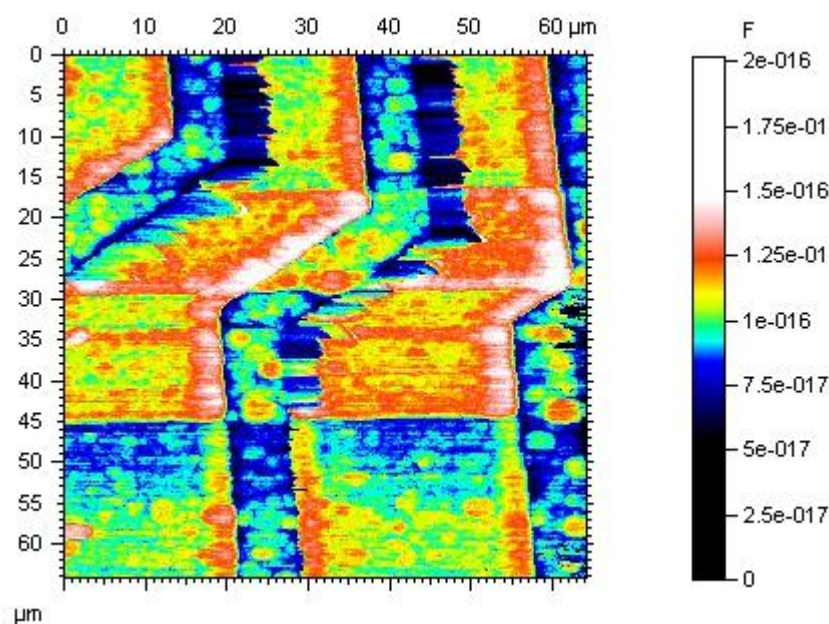
Nejprve bylo provedeno zobrazení mapy topografie vybraného vzorku.



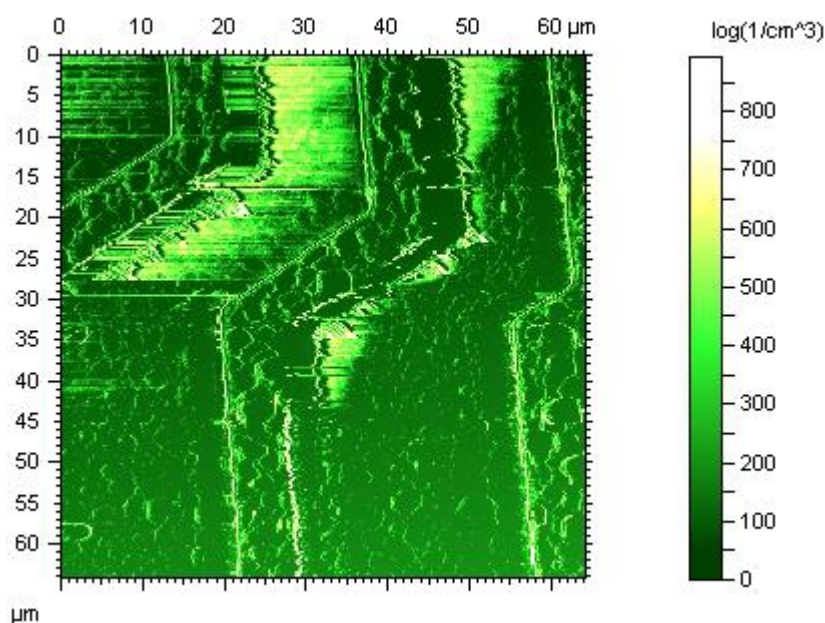
*Obrázek 38.: Topografie vybrané oblasti*



Následovalo změření kapacitance a koncentrace dopantů na vzorku při pracovní frekvenci 2,5 GHz.



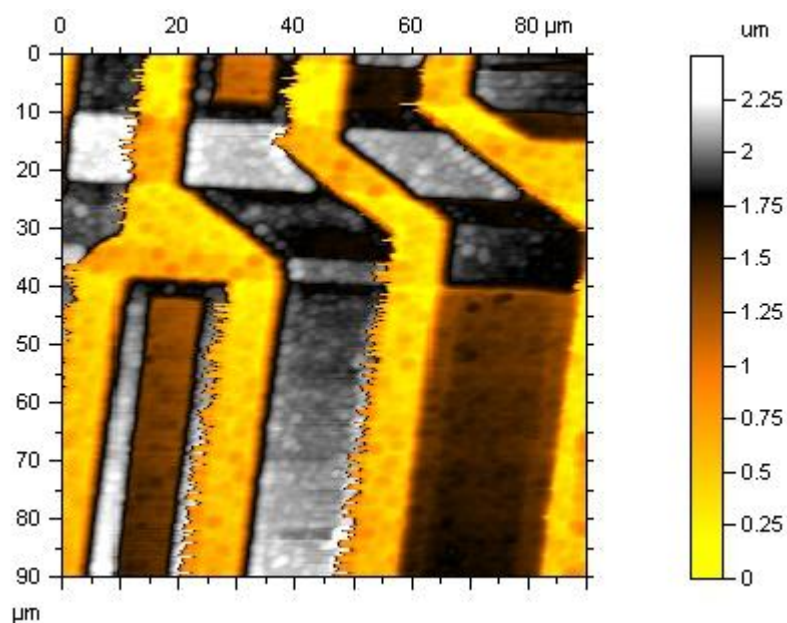
Obrázek 39.: Nekalibrovaná kapacitance vybrané oblasti



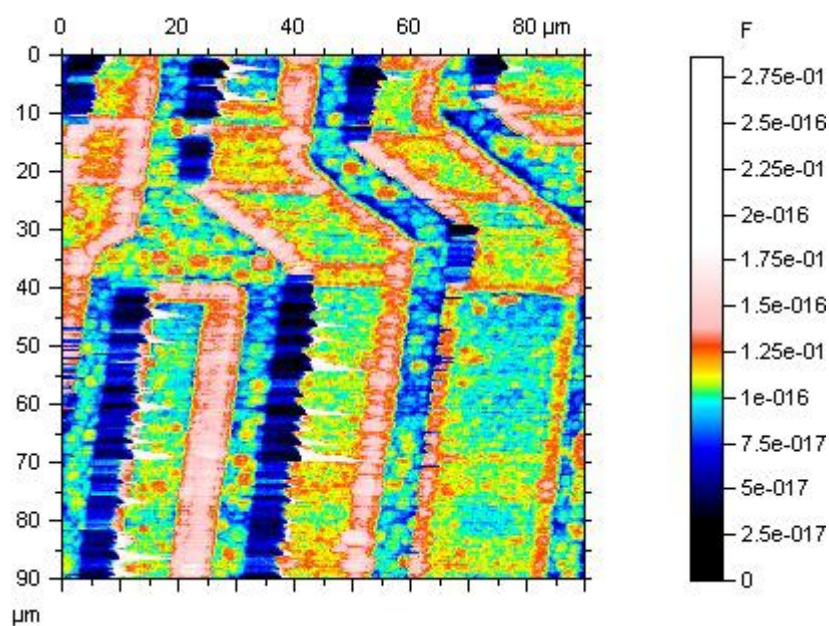
Obrázek 40.: Nekalibrovaná koncentrace dopantů

Naměřené hodnoty na mapě kapacitance jsou pouze relativní, proto je nutné provést kalibraci.

Po provedení kalibrace bylo provedeno nové měření, na které byla vybrána téměř totožná oblast vzorku.



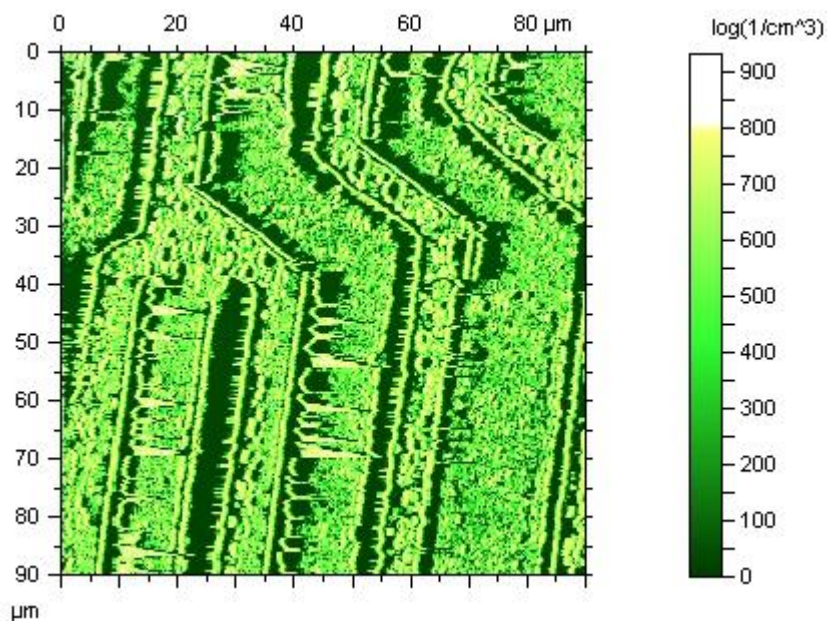
Obrázek 41.: Topografie vybrané oblasti po zkalibrování systému



Obrázek 42.: Zkalibrovaná kapacitance

Zkalibrovaná mapa kapacitance zobrazuje absolutní hodnoty kapacitance vzorku.

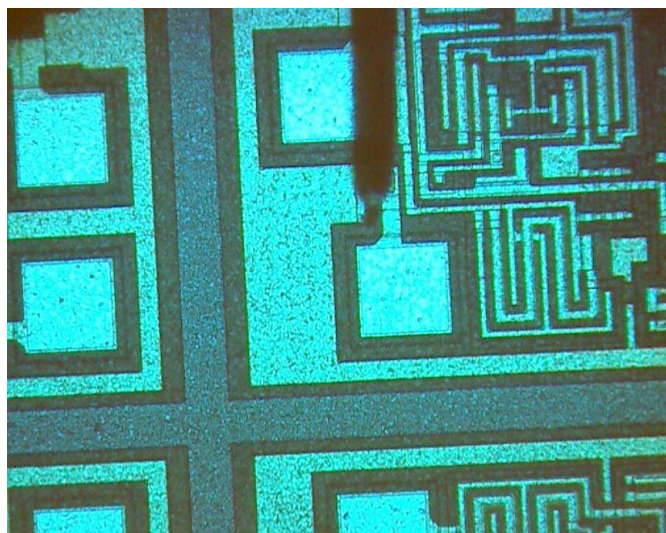




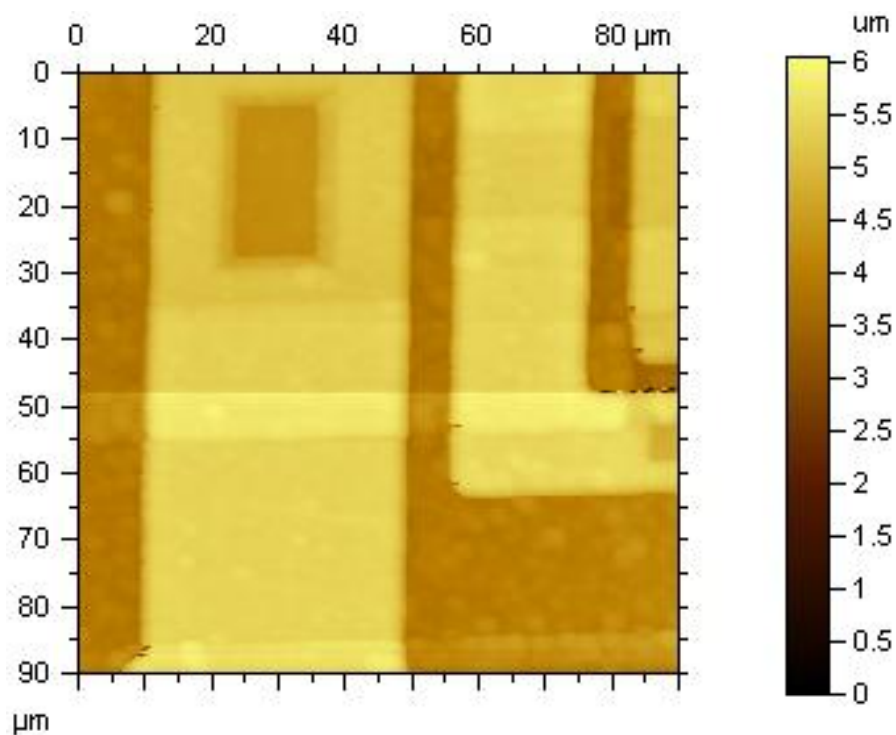
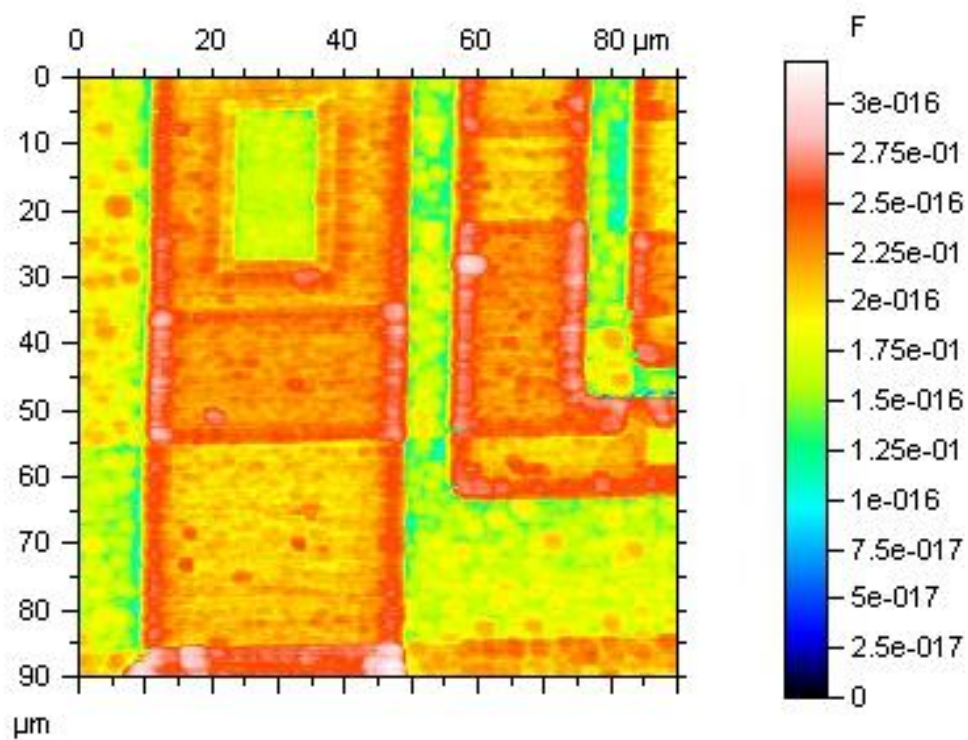
Obrázek 43.: Koncentrace dopantů

Dalším krokem by mělo být zkalibrování koncentrace dopantů. Bohužel ve vybavení laboratoře chybí kalibrační standard pro tuto aplikaci, jehož cena se pohybuje kolem 100 tisíc Kč. Stále však lze na mapě koncentrace dopantů pozorovat rozdíly mezi jednotlivými oblastmi o různých koncentracích.

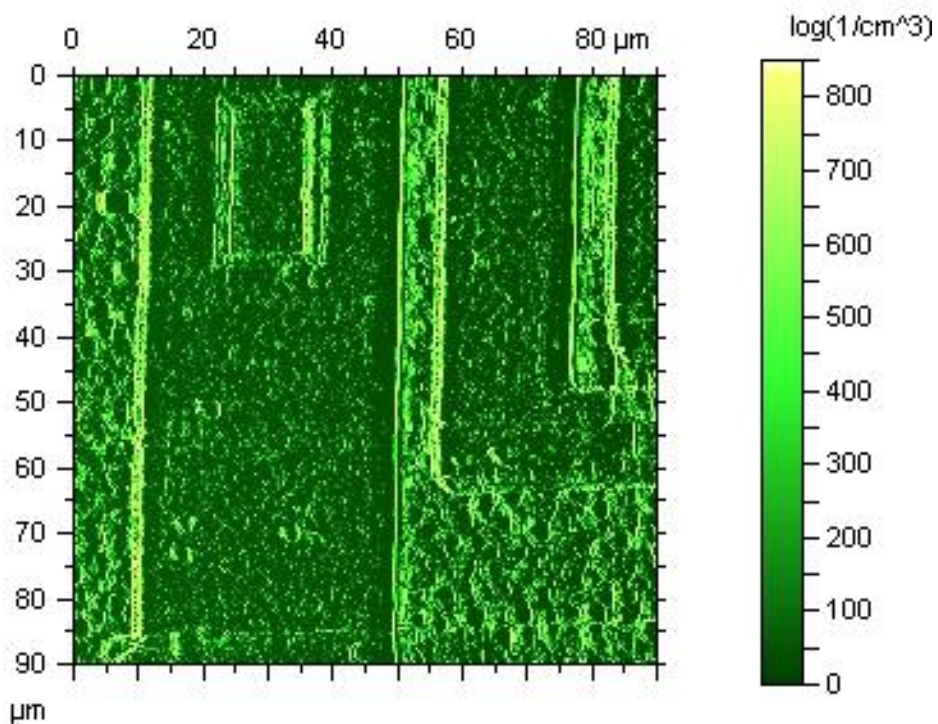
Pro další měření byla vybrána jiná oblast na zkoumaném vzorku.



Obrázek 44.: Zobrazení vybrané oblasti na CMOS pomocí integrovaného kamerového systému

*Obrázek 45.: Topografie CMOS**Obrázek 46.: Kapacitance CMOS*

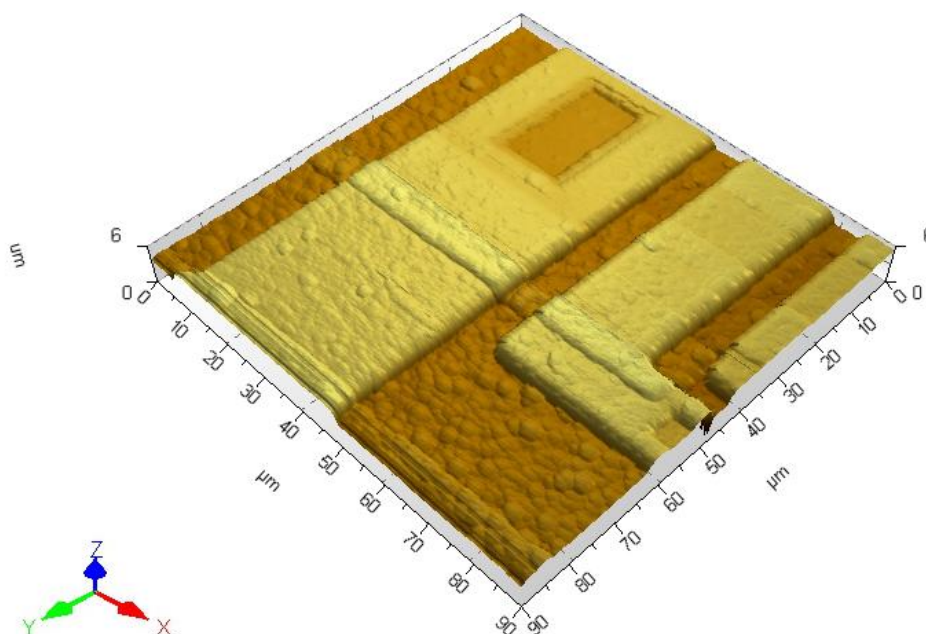




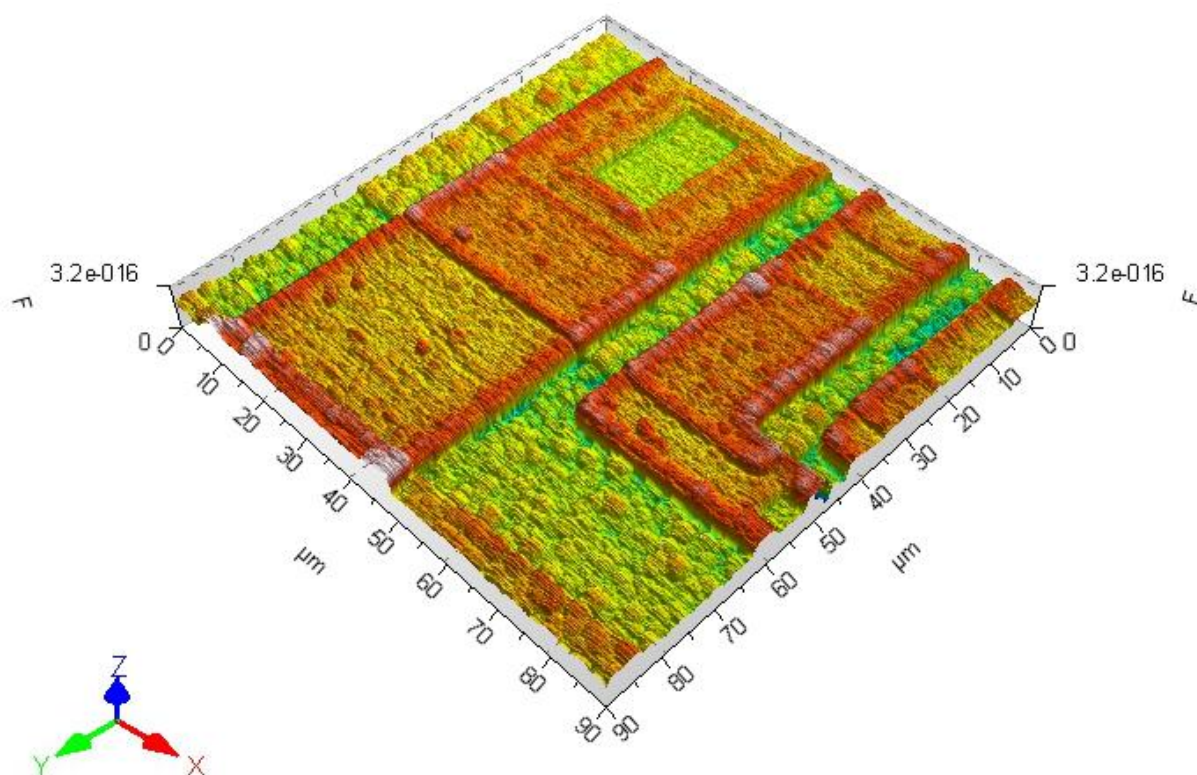
Obrázek 47.: Koncentrace dopantů na CMOS

#### 4.1 Vizualizace a diskuze výsledků

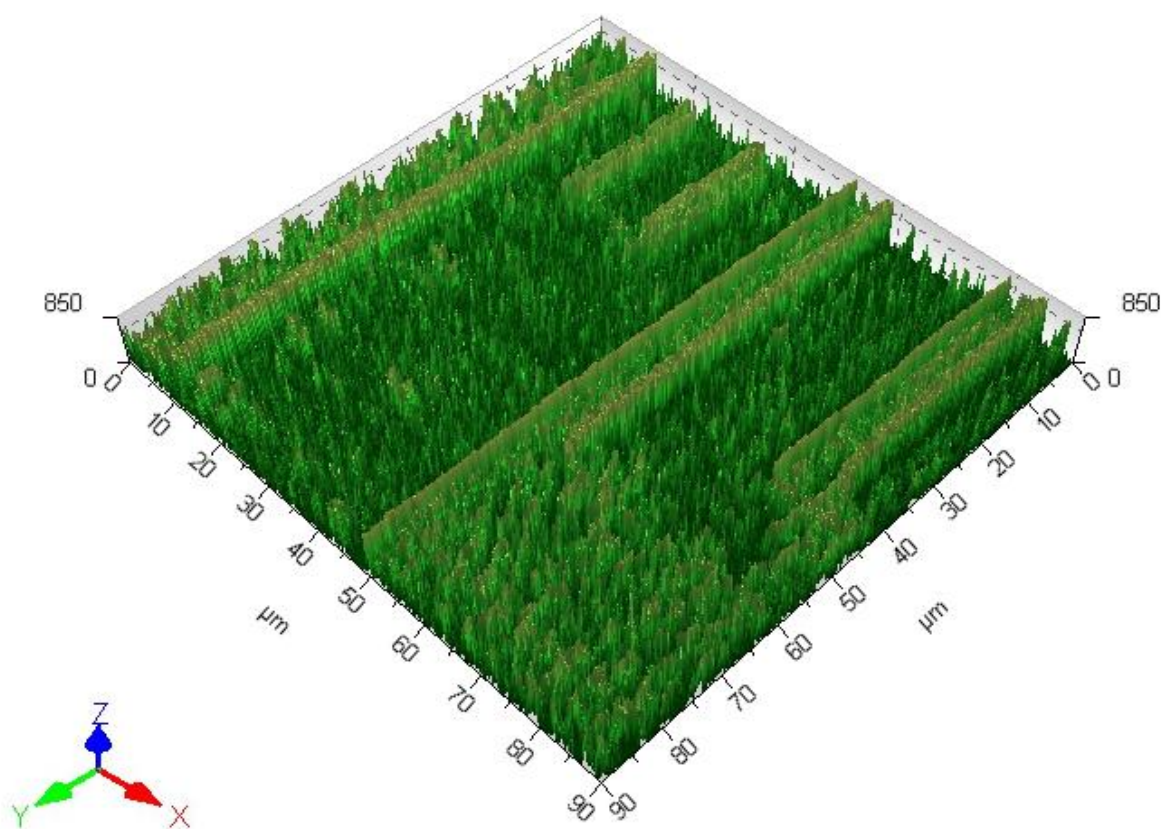
Získané výsledky byly vizualizovány pomocí SW Pico Image Basic 6.2.



Obrázek 48.: 3D vizualizace topografie CMOS



Obrázek 49.: 3D vizualizace kapacitance CMOS



Obrázek 50.: 3D vizualizace koncentrace dopantů na CMOS

Naměřené výsledky ukázaly hlavní výhodu skenovací mikrovlnné mikroskopie a to možnost získávání více druhů signálů o materiálových charakteristikách současně a tím i komplexnější informace o zkoumaném vzorku.

Mapa topografie na Obrázku 48 o velikosti 90 x 90  $\mu\text{m}$  zobrazuje velice detailní strukturu povrchu zkoumaného vzorku. Tato mapa má rozlišení 256 x 256 bodů. Lze tedy rozlišit struktury do velikosti  $\approx 352 \text{ nm}$ . V případě potřeby lze zvýšit rozlišení mapy nebo zmenšit skenovanou oblast a tím získat informace o menších strukturách až s atomárním rozlišením.

Mapa kapacitance na Obrázku 49 změřená na frekvenci 2,5 GHz koresponduje s mapou topografie. Na mapě koncentrace dopantů na Obrázku 50 lze pozorovat poměrně výrazný šum, nicméně jednotlivé části vzorku o různé koncentraci dopantů, které odpovídají krajním místům struktur na mapě topografie a kapacitance, jsou jasně viditelné. Šum lze vysvětlit velkým zesílením signálu pomocí lock-in zesilovače o poměrně malém poměru SNR.

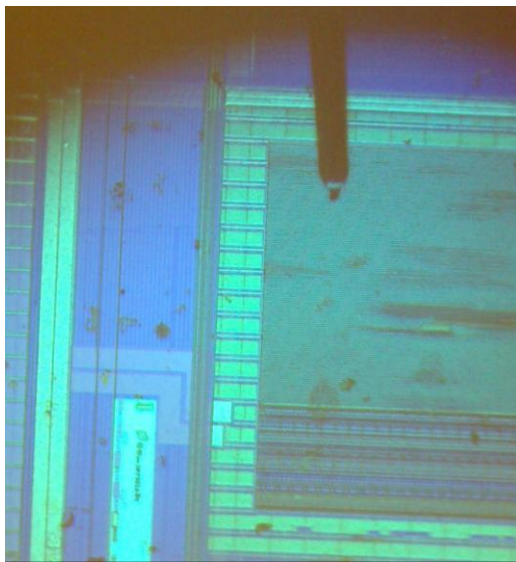
Na předchozích měřeních na obrázcích číslo 38 až 43 lze pozorovat artefakty měření. Tyto artefakty jsou dány tím, že hrot přesně nekopíroval povrch vzorku při skenování z důvodu nastavení nižšího zesílení signálu na obvodech zpětné vazby. Zvýšení intenzity zpětnovazebních signálů vedlo k oscilaci hrotu, proto nebylo možné vzorek změřit pomocí daného hrotu lépe. Po výměně hrotu se problém vyřešil.



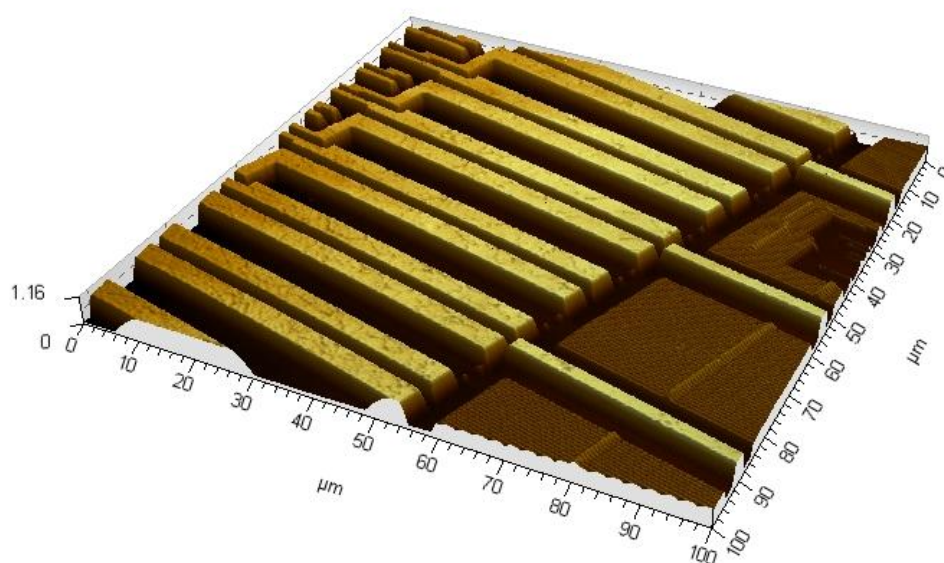
## 5 APLIKACE METOD SPM V OBLASTI BEZPEČNOSTI

Veškeré výše uvedené metody mohou nalézt uplatnění v mnoha analyticko-bezpečnostních aplikacích.

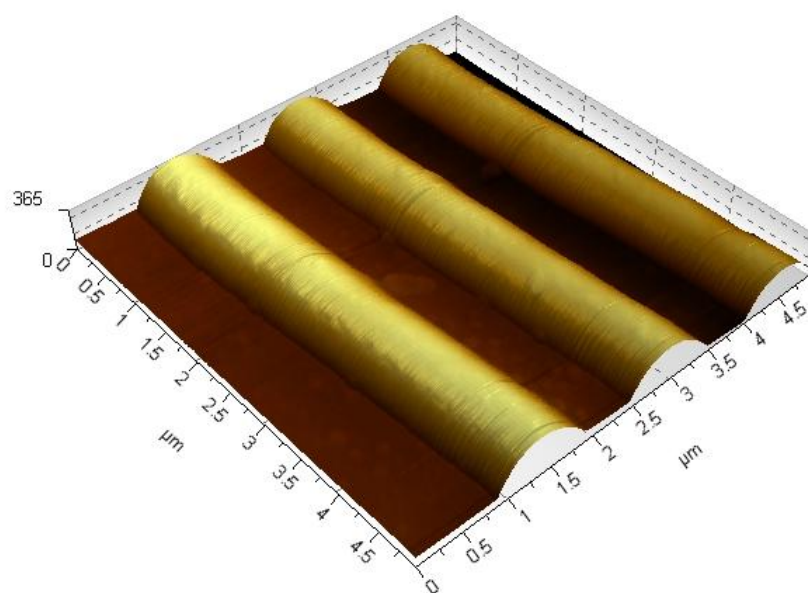
Příkladem může být zjišťování pravosti elektronických systémů a součástek pomocí markantů daných zvolenou výrobní technologií.



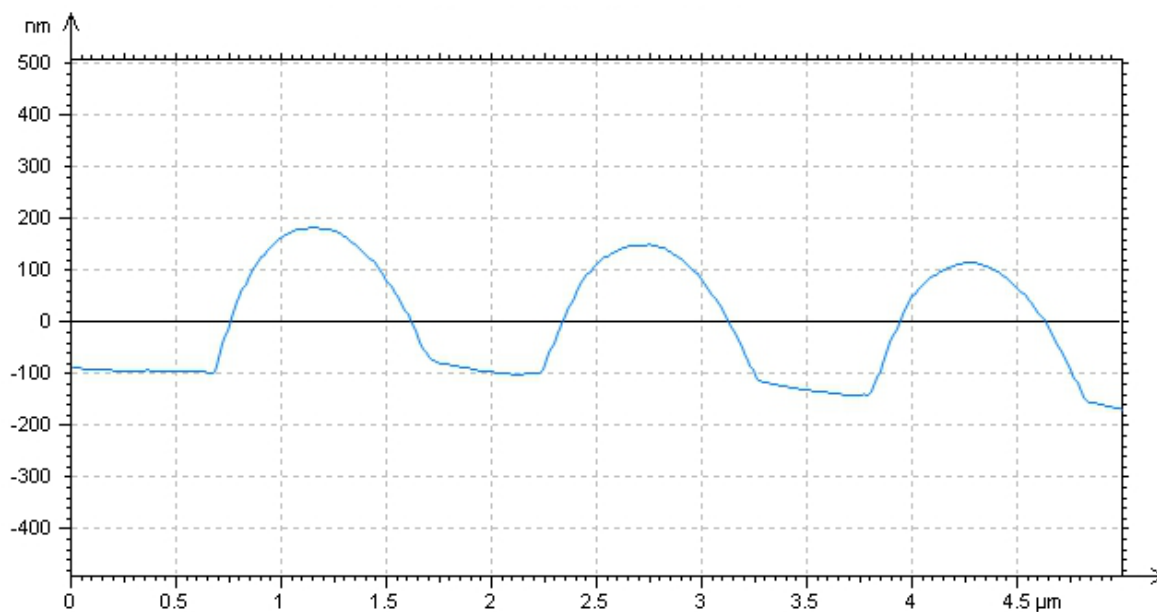
*Obrázek 51.: Obnažená část mikroprocesoru zobrazená pomocí integrovaného kamerového systému [10]*



*Obrázek 52.: Část mikroprocesoru zobrazená pomocí AFM [10]*

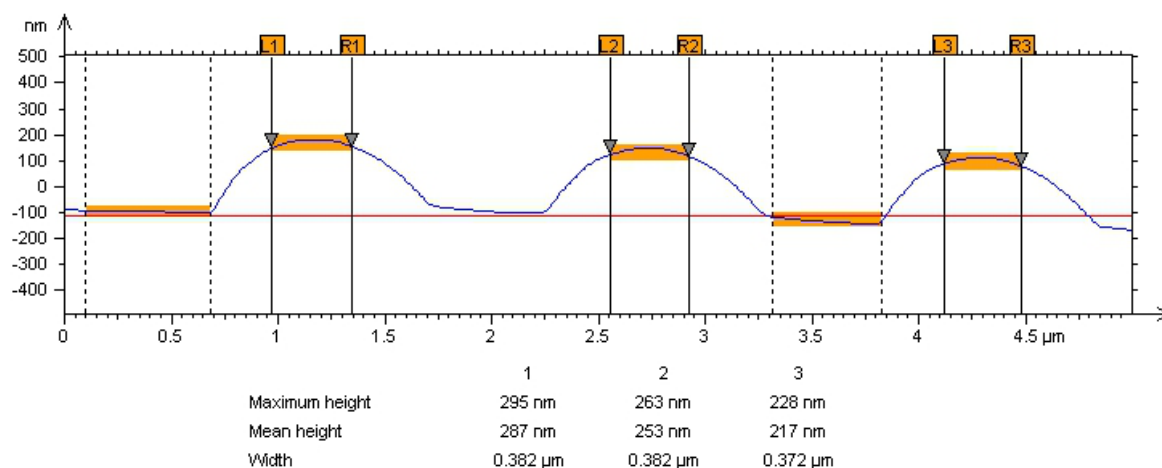


Obrázek 53.: Detail mikroprocesoru  $5 \times 5 \mu\text{m}$  zobrazený pomocí AFM [10]



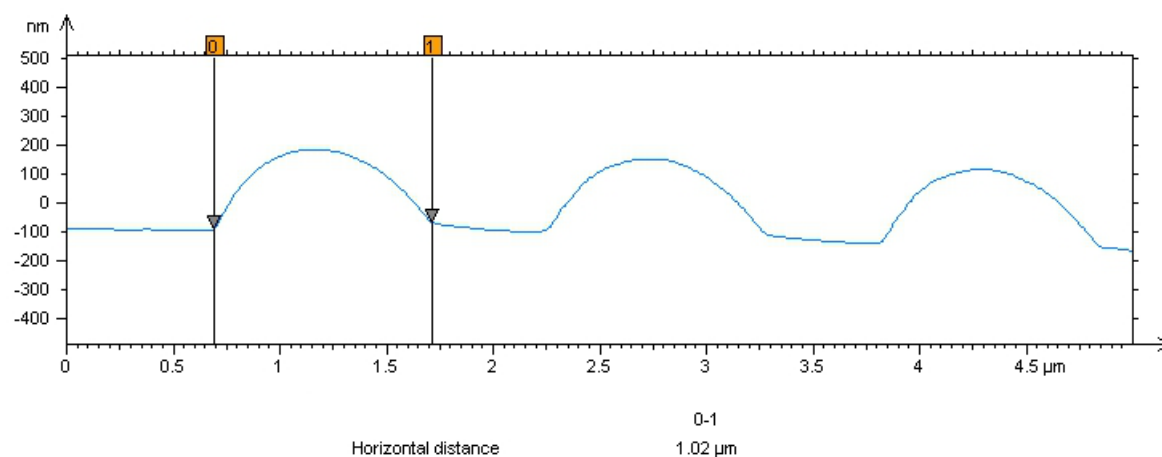
Obrázek 54.: Operátor Profile Extraction

Provedeme-li pomocí operátoru Profile Extraction řez naměřenými daty, můžeme přesně změřit velikosti naskenovaných struktur – markantů výrobních technologií.



Obrázek 55.: Operátor Step Height Measurement

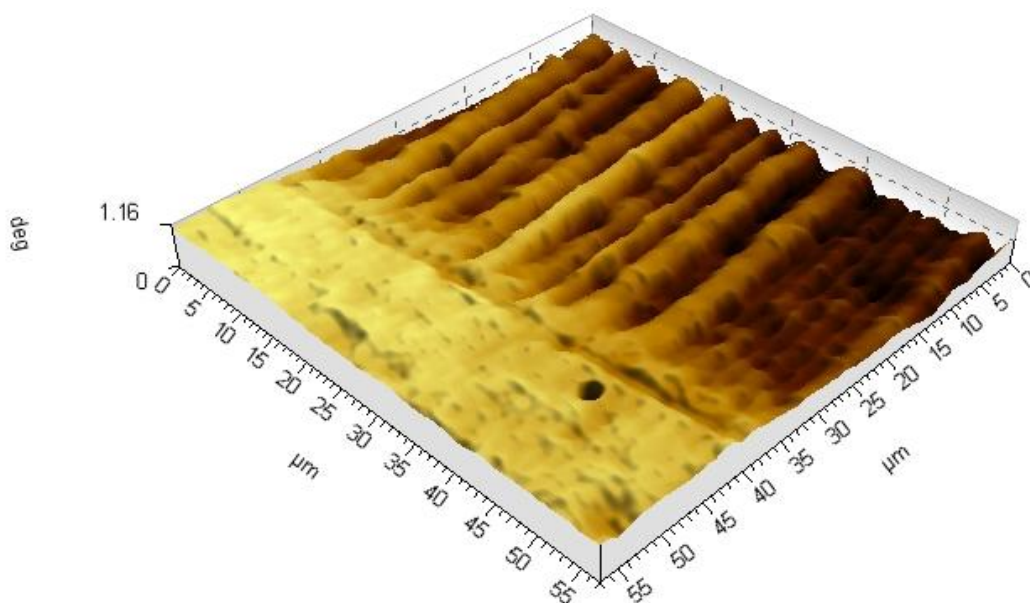
Následně může být změřena výška těchto struktur pomocí operátoru Step Height Measurement. Naměřená struktura je vysoká, zprůměrujeme-li naměřené hodnoty, 262 nm.



Obrázek 56.: Operátor Distance Measurement

Podobně může být změřena šířka této struktury pomocí operátoru Distance Measurement. V tomto případě je šířka měřené struktury 1,02 μm.

Dalším příkladem může být analýza dat uložených na datových médiích. Pro názornou ukázkou byl zvolen magnetický kotouč z 3,5“ diskety.



*Obrázek 57.: Datový záznam na 3,5“ disketě zobrazený pomocí Top MAC [10]*

Na obrázku 3,5“ diskety získaného pomocí Top MAC módu lze pozorovat vyvýšená a širší místa, představující logickou 1, a místa ostatní, představující logickou 0.

Z výše uvedených příkladů vyplývá, že veškeré metody SPM mohou nalézt uplatnění téměř v jakékoliv analyticko-bezpečnostní aplikaci. Stačí vhodně zvolit zobrazovací mód a jeho parametry.

## ZÁVĚR

Tato práce popisuje metody mikroskopie skenující sondou. Je zde popsána mikroskopie atomárních sil a její skenovací módy. Další část se zaměřuje na skenovací mikrovlnnou mikroskopii a problematiku s ní související. Dále je zde popsán skenovací systém Agilent 5420 SPM/AFM, jeho komponenty a problematika kalibrace tohoto skenovacího systému.

Veškerá měření probíhala na půdě Fakulty aplikované informatiky při Univerzitě Tomáš Bati ve Zlíně, respektive na půdě Regionálního výzkumného centra CEBIA-Tech.

Pro vlastní měření byl zvolen klopný obvod vytvořený CMOS technologií na křemíkovém substrátu. Bylo provedeno měření topografie, kalibrované kapacitance a koncentrace dopantů na tomto elektronickém systému.

Při měření se objevovaly problémy s oscilací hrotu a problémy s artefakty měření kvůli nízké intenzitě signálu ze zpětnovazebných obvodů. Řešením byla výměna skenovací sondy.

Výsledky měření byly vizualizovány pomocí programu Pico Image Basic 6.2.

Následně byly navrženy analyticko-bezpečnostní aplikace těchto metod. První ukázka popisuje možnost využití skenovacího systému při odhalování padělků elektronických součástek na mikroprocesoru. Na tomto čipu je změřena jedna ze struktur vysoká 262 nm a široká 1,02  $\mu\text{m}$ .

Druhá ukázka popisuje možnost skenování uložených dat na poničeném datovém nosiči – magnetickém kotouči. Je naměřená část magnetické informace uložená na tomto magnetickém kotouči.

Hlavní výhodou skenovací mikrovlnné mikroskopie je to, že během měření je možné získávat různé druhy signálů o materiálových charakteristikách současně a tím i komplexnější informace o zkoumaném vzorku. Další výhodou je možnost využití skenovací mikrovlnné mikroskopie na téměř jakýkoliv vzorek bez jeho náročné přípravy.

Naměřené výsledky a ukázky aplikace potvrdily univerzálnost skenovacího systému a jeho uplatnitelnost v oblasti vědeckého výzkumu i v praxi.



## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This thesis describes methods of Scanning Probe Microscopy. The first chapter explains Atomic Force Microscopy and its scanning modes. Next chapter is focused on Scanning Microwave Microscopy and related problematics followed by description of the Agilent 5420 SPM/AFM scanning system its components and calibration problematics of this scanning system.

All measurement were made on ground of Faculty of Applied Informatics at Tomas Bata University in Zlín respectively on ground of Regional Research Center CEBIA-Tech.

For own measurement was chosen 8-bit adresable latch created by CMOS technology on silicon substrate. Topography, calibrated capacitance and dopant density measurement was done on this electronic system.

The problems with tip oscillation and with measurement artifact were discovered during the measurement due to the low intensity of a feedback signal. The problems were resolved by replacing the probe.

The results were visualized using Pico Image Basic 6.2.

Analytical-safety applications of these methods were suggested. The first example describes counterfeit detection possibilities of an electronical components shown on the microprocessor chip. One structure on this chip was measured. Measured height was 262 nm and measured width was 1,02  $\mu\text{m}$ .

The second example describes scanning possibilities of this system on destroyed data store – magnetic disk. Part of the magnetic information recorded on this magnetic disk is measured.

The main advantage of Scanning Microwave Microscopy is a possibility to get more types of a different signals about a sample material characteristics and complex information. Next advantage is usage of Scanning Microwave Microscopy for measuring of almost any sample without complicated preparation.

The measured results and the examples of applications confirm universality of the scanning systems and its applicability in practise.

## SEZNAM POUŽITÉ 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] HAWKES, P a John C SPENCE. Science of microscopy. New York: Springer, c2007, 2 v. [xviii, 1265, 126 p.]. ISBN 03-872-5296-7.
- [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] OH, Yoo Jin, Hans-Peter HUBER, Markus HOCHLEITNER, Memed DUMAN, Bianca BOZNA, Markus KASTNER, Ferry KIENBERGER a Peter HINTERDORFER. High-frequency electromagnetic dynamics properties of THP1 cells using scanning microwave microscopy. Ultramicroscopy: a journal committed to the advancement of new methods, tools and theories in microscopy [online]. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2011, roč. 111, č. 11, s. 1625-1629 [cit. 2013-02-05]. ISSN 03043991. DOI: 10.1016/j.ultramic.2011.09.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304399111002233>.
- [6] 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>
- [7] FENNER, Matthias A. AGILENT TECHNOLOGIES. *Scanning Microwave Microscopy: Introduction*. 1/20/2011.
- [8] AGILENT TECHNOLOGIES. *Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis: Application Note*. (c) Agilent Technologies, Inc. 2012, Published in USA, December 12, 2012

- [9] ON Semiconductor. *MC1409B 8-Bit Addressable Latches*, Semiconductor Components Industries, LLC, 2011, MC14099B/D, June 2011, s.8
- [10] KUDĚLKA, Josef; MARTÍNEK, Tomáš. *Mikrovlánná skenovací mikroskopie*. Studentská tvůrčí a odborná činnost. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2012. s. 12.
- [11] MALACHA, Libor, et al. *Mikroskopie skenující sondou* [online]. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, 2003 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/mss/index.html>>.
- [12] KUBÍNEK, Roman. *Mikroskopie skenující sondou*. 1. vyd. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2003, 145 s. ISBN 80-244-0602-0.
- [13] KUBÍNEK, Roman. Jak měřit „NANO“: Nástroje pro měření a vyhodnocování nanostruktur. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011-05-04. ISBN 978-80-244-2689-1. Dostupné z WWW: <[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)>.
- [14] KUBÍNEK, Roman. *Nanotechnologie a jejich aplikace*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010-13-12. Dostupné z WWW: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/nano\\_aplikace.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/nano_aplikace.pdf)
- [15] POOLE, Charles P a Frank J OWENS. *Introduction to nanotechnology*. Hoboken: John Wiley, 2003, 388 s. ISBN 04-710-7935-9.
- [16] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent PicoView Software: Enhanced Imaging and Analysis Package for Agilent AFM Systems*. USA: Agilent Technologies, December 18, 2012. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-1175EN.pdf>>.
- [17] AGILENT TECHNOLOGIES. *Post Processing Pico Image Software for Agilent AFM Systems*. USA: Agilent Technologies, October 5, 2011. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-7596EN.pdf>>.
- [18] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent AFM: Graphene Studies: Utilization of Atomic Force Microscopy for Nanoscale Investigations of Graphene*. USA: Agilent Technologies, March 4, 2013. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-2068EN.pdf>>.

- [19] HAN, Wenhai a F. Michael SERRY. AGILENT TECHNOLOGIES. Force Spectroscopy with the Atomic Force Microscope. USA: Agilent Technologies, March 25, 2008. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8215EN.pdf>>.
- [20] AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent MAC Mode: Magnetic AC Mode – The Gentle Touch for AFM. USA: Agilent Technologies, December 21, 2006. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5912EN.pdf>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

SPM	Scanning Probe Microscopy
STM	Scanning Tunneling Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
MFM	Magnetic Force Microscopy
LFM	Lateral Force Microscopy
FMM	Force Modulation Microscopy
PDM	Phase Detection Microscopy
EFM	Electrostatic Force Microscopy
KFM	Kelvin Force Microscopy
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
SMM	Scanning Microwave Microscopy
VNA	Vector Network Analyzer
PNA	Performance Network Analyzer
LO	Local Oscillator
A/D	Analog-to-Digital
AC	Alter Current
AAC	Acoustic Alter Current
MAC	Magnetic Alter Current
DPMM	Dopant Profile Measurement Module
PC	Personal Computer
SW	Software
HEB	Head Electronic Box
USB	Universal Serial Bus
SNR	Signal to Noise Ration

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.: Základní princip mikroskopie skenující sondou. [6]</i>	10
<i>Obrázek 2.: Základní schéma STM. [1]</i>	11
<i>Obrázek 3.: Režim konstantní výšky (nahore) a režim konstantního proudu. [1]</i>	11
<i>Obrázek 4.: Základní princip AFM. [1]</i>	12
<i>Obrázek 5.: Zóny síly interakce v závislosti na vzdálenosti hrotu a vzorku</i>	13
<i>Obrázek 6.: AAC mód. [1]</i>	15
<i>Obrázek 7.: MAC mód [1]</i>	16
<i>Obrázek 8.: Top MAC mód. [1]</i>	16
<i>Obrázek 9.: Optická analogie k SMM. [8]</i>	17
<i>Obrázek 10.: Měření S parametrů. [8]</i>	18
<i>Obrázek 11.: VNA měřící kapacitanci mezi hrotem sondy a vzorkem. [7]</i>	18
<i>Obrázek 12.: Využití půlvlnného koaxiálního rezonátoru k měření kapacitance. [2]</i>	19
<i>Obrázek 13.: Kalibrační standard pro určení kapacitance. [7]</i>	19
<i>Obrázek 14.: Zjednodušený blokový diagram pro měření kapacitance a koncentrace dopantů. [6]</i>	20
<i>Obrázek 15.: Graf závislosti kapacitance na přiloženém napětí na hrotu pro polovodiče typu N (modrá) a P (červená). [6]</i>	21
<i>Obrázek 16.: Měření jednotlivých vrstev kalibračního standardu. [2,7]</i>	21
<i>Obrázek 17.: Mikroskop Agilent 5420 SPM/AFM. [1]</i>	22
<i>Obrázek 18.: Zleva nahore kónické zakončení pro Top MAC, CSAFM, Kontaktní mód, mince 1\$, STM a AAC. [1]</i>	23
<i>Obrázek 19.: Typ B skenovacího modulu určený pro Agilent 5420 SPM. [1]</i>	23
<i>Obrázek 20.: Modul čtyřsegmentového fotodiodového detektoru. [1]</i>	24
<i>Obrázek 21.: Držák vzorkových desek (vlevo) a vzorkové desky pro MAC mód, pro měření v kapalinách a vzorková deska s Petriho miskou. [1]</i>	25
<i>Obrázek 22.: Head Electronic Box. [1]</i>	25
<i>Obrázek 23.: AFM kontroler model N9610A. [1]</i>	26
<i>Obrázek 24.: Breakout Box. [1]</i>	26
<i>Obrázek 25.: MAC mód kontroler. [1]</i>	27
<i>Obrázek 26.: Schéma zapojení celého systému. [1]</i>	27
<i>Obrázek 27.: Antivibrační izolační komora. [1]</i>	28

<i>Obrázek 28.: Schéma zapojení VNA a DPMM [2]</i> .....	29
<i>Obrázek 29.: Zaměřování LASERu na hrot nad kalibračním standardem pro kapacitanci a centralizace fotodetektoru</i> .....	31
<i>Obrázek 30.: Nastavení pracovní frekvence VNA na 2,5 GHz</i> .....	31
<i>Obrázek 31.: Změřený kalibrační standard v PicoView</i> .....	32
<i>Obrázek 32.: Extrakce naměřených dat v PicoImage</i> .....	32
<i>Obrázek 33.: Stanovení hladin útlumu signálu v PicoImage</i> .....	33
<i>Obrázek 34.: Vložení dat do PicoView pro zkalibrování systému</i> .....	34
<i>Obrázek 35.: Blokové schéma MC14099B [9]</i> .....	35
<i>Obrázek 36.: Zobrazení MC14099B pomocí optického mikroskopu při zvětšení 22,4x</i> .....	35
<i>Obrázek 37.: Zobrazení vybrané oblasti a skenovacího nosníku s hrotem pomocí kamerového systému integrovaného do mikroskopu</i> .....	36
<i>Obrázek 38.: Topografie vybrané oblasti</i> .....	36
<i>Obrázek 39.: Nekalibrovaná kapacitance vybrané oblasti</i> .....	37
<i>Obrázek 40.: Nekalibrovaná koncentrace dopantů</i> .....	37
<i>Obrázek 41.: Topografie vybrané oblasti po zkalibrování systému</i> .....	38
<i>Obrázek 42.: Zkalibrovaná kapacitance</i> .....	38
<i>Obrázek 43.: Koncentrace dopantů</i> .....	39
<i>Obrázek 44.: Zobrazení vybrané oblasti na CMOS pomocí integrovaného kamerového systému</i> .....	39
<i>Obrázek 45.: Topografie CMOS</i> .....	40
<i>Obrázek 46.: Kapacitance CMOS</i> .....	40
<i>Obrázek 47.: Koncentrace dopantů na CMOS</i> .....	41
<i>Obrázek 48.: 3D vizualizace topografie CMOS</i> .....	41
<i>Obrázek 49.: 3D vizualizace kapacitance CMOS</i> .....	42
<i>Obrázek 50.: 3D vizualizace koncentrace dopantů na CMOS</i> .....	42
<i>Obrázek 51.: Obnažená část mikroprocesoru zobrazená pomocí integrovaného kamerového systému [10]</i> .....	44
<i>Obrázek 52.: Část mikroprocesoru zobrazená pomocí AFM [10]</i> .....	44
<i>Obrázek 53.: Detail mikroprocesoru 5x5 <math>\mu\text{m}</math> zobrazený pomocí AFM [10]</i> .....	45
<i>Obrázek 54.: Operátor Profile Extraction</i> .....	45
<i>Obrázek 55.: Operátor Step Height Measurement</i> .....	46
<i>Obrázek 56.: Operátor Distance Measurement</i> .....	46

---

*Obrázek 57.: Datový záznam na 3,5“ disketě zobrazený pomocí Top MAC [10] ..... 47*



## SEZNAM PŘÍLOH

P I Soubory s výsledky měření na přiloženém CD-ROM:

CMOS\_00005.mi

CMOS\_00010.mi

CMOS\_00016.mi

Disketa\_00007.mi

Mikroprocesor\_00006.mi

Mikroprocesor\_00007.mi

P II Video soubor s vizualizací na přiloženém CD-ROM:

3D\_CMOS.wmv