

Analýza výrobních technologií v polovodičovém průmyslu

Analysis of manufacturing technology in the semiconductor industry

Bc. Eva Johanidesová

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. Eva Johanidesová**
Osobní číslo: **A11421**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Analýza výrobních technologií v polovodičovém průmyslu**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principem funkce, základními vlastnostmi a omezeními mikroskopu atomárních sil (AFM) Agilent 5420.
2. Provedte srovnání metod dostupných na zařízení Agilent 5420 s vybranými konkurenčními metodami používanými v polovodičovém průmyslu pro analýzu geometrie a koncentračních profilů v polovodičových strukturách.
3. Na vybraných vzorcích, obsahujících vhodně zvolené geometrie a koncentrační profily, proveďte analýzu pomocí metod dostupných na zvoleném AFM zařízení a srovnajte dosažené výsledky se zaměřením na prostorové rozlišení. U metod umožňujících zviditelnění oblastí s různým elektrickým nábojem (např. vlivem elektricky aktivních příměsí v polovodiči) proveďte vyhodnocení dosaženého rozsahu a citlivosti použitých metod v závislosti na typu a koncentraci příměsí.
4. Provedte srovnání dosažených výsledků v bodě 3 s výsledky dosaženými pomocí běžně používaných metod.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. PLOOG, K. Physics and technology of semiconductor quantum devices. New York: Springer Verlag, 1993, 212 s. ISBN 35-405-6989-8.
2. GROVE, [by] A.S. Physics and technology of semiconductor devices. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons, 1967. ISBN 978-047-1329-985.
3. 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.
4. WU, Shijie a Theresa HOPSON. SMM Imaging of Dopant Structures of Semiconductor Devices. In: Application note [online]. USA: ? Agilent Technologies, 2012 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-0562EN.pdf>
5. KALININ, S a A GRUVERMAN. Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale. New York: Springer, c2007, 2 v. (xx, 980 p., [8] p. of plates). ISBN 03872866752-.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje AFM, SMM mikroskopii, jejich funkce a konkurenční mikroskopii SEM. V této práci jsou ukázky a analýzy křemíkových desek, které jsou dodány od firmy ON SEMICONDUCTOR. Tato práce se zabývá koncentracemi příměsí dopantů a porovnáním výsledků s konkurenčními metodami měření.

Klíčová slova: AFM, SMM, P-N přechod, křemíkové desky

ABSTRACT

This Diploma thesis describes AFM, SMM microscopy, their function and competitive microscopy SEM. In this work are illustrations and analysis of silicon wafers, which are supplied by the company ON Semiconductor. This work deals with the dopant concentrations and compares the results with competing methods of measurement.

Keywords: AFM, SMM, P-N junction, silicon wafer

Ráda bych poděkovala za odbornou pomoc, vynaložený čas a věcné rady panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc., Ing. Milanu Navrátilovi. Ph.D a firmě ON Semiconductor za zprostředkované vzorky. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Moto:

Jak vzniká vynález? To všichni vědí, že je něco nemožné, a pak se objeví nějaký blázen, který neví, že je to nemožné, a udělá vynález.

Albert Einstein

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk 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 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 bakalářské práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků budu uvedena jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SPM MIKROSKOP AGILENT 5420	11
1.1 ROZDĚLENÍ.....	11
2 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL - AFM	12
2.1 PRINCIP METODY	13
2.2 SOFTWARE PRO AFM	16
3 SKENOVACÍ MIKROVLNNÁ MIKROSKOPIE – SMM	17
4 VELIČINY MĚŘENÉ POMOCÍ AFM, SMM	18
5 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP - SEM	19
5.1 PRINCIP METODY	19
6 KŘEMÍKOVÁ DESKA	20
6.1 KŘEMÍK.....	20
6.2 TECHNOLOGIE VÝROBY KŘEMÍKU.....	20
7 EPITAXNÍ VRSTVA	22
7.1 EPITAXE	22
7.2 EPITAXE Z PLYNNÉ FÁZE.....	22
7.2.1 Karuselový reaktor	22
7.2.2 Jednodeskový reaktor	24
8 ŘEZ DESKOU	25
8.1 CROSS	25
8.2 SRP.....	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
9 KŘEMÍKOVÉ DESKY S RŮZNÝMI KONCENTRACEMI	27
9.1 VÝROBA VZORKOVÝCH KŘEMÍKOVÝCH DESEK.....	27
9.2 ÚPRAVA PRO MĚŘENÍ	27
9.3 LEPTÁNÍ	28
9.4 NASTAVENÍ SW PRO MĚŘENÍ NA AFM.....	28
9.5 KŘEMÍKOVÁ DESKA BEZ PASIVACE.....	28
9.5.1 Cross bez naleptání	29
9.5.2 Cross s naleptáním	30
9.5.3 SRP.....	33
9.5.4 SEM.....	34
9.6 KŘEMÍKOVÁ DESKA S PASIVACÍ.....	35
9.6.1 Cross bez naleptání	35

9.6.2	Cross s naleptáním	36
9.6.3	SRP.....	38
9.6.4	SEM.....	39
9.7	KŘEMÍKOVÁ DESKA S VÍCE P-N PŘECHODY	40
9.7.1	Výroba	40
9.7.2	Zadaná data před výrobou	40
9.7.3	Cross bez naleptání	40
9.7.4	Cross s naleptáním	44
9.7.5	SRP Belgie	44
ZÁVĚR		46
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....		48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		53
SEZNAM OBRÁZKŮ		54
SEZNAM TABULEK.....		56
SEZNAM PŘÍLOH.....		57

ÚVOD

Cílem diplomové práce je stanovení základních vlastností a charakteristik použitého mikroskopu Agilent 5420 AFM/SPM v různých operačních režimech a jeho srovnání s konkurenčními metodami používanými v polovodičovém průmyslu. Tato práce se zabývá měřením koncentrací dopantů pro různé typy křemíkových desek.

Diplomová práce je zaměřena na měřicí režim AFM, SMM. V první části teorie jsou popsány funkce, principy, výhody i omezení jednotlivých metod. Pro praktické měření byly zvoleny polovodičové struktury s P-N přechody na křemíkových deskách. Tyto desky byly dodány firmou ON Semiconductor a výsledné snímky byly porovnány s konkurenční mikroskopií SEM, která je taktéž v teoretické části uvedena.

Druhá část teorie je úzce věnována křemíku. Je zde uvedena výroba křemíkové desky, a to od výroby křemíku až po samotné čipy na desce. Dále je zde uveden růst epitaxních vrstev na křemíkové desce. Na mikroskopu AFM, SMM i SEM je měření jednotlivých koncentrací prováděno v řezu, tomuto řezu je část teorie taktéž věnována.

Pro praktickou část jsou dodány tři typy křemíkových desek o různých koncentracích příměsí dopantů. Koncentrace příměsí byly na deskách epitaxně narosteny a každá křemíková deska je svými koncentracemi odlišná.

Jedním z cílů bylo zjistit, jakou nejnižší koncentraci příměsí AFM detekuje na leptané i neleptané desce. Výsledky budou porovnány se snímky z mikroskopu SEM a s grafem ze SRPu pořízené firmou ON Semiconductor.

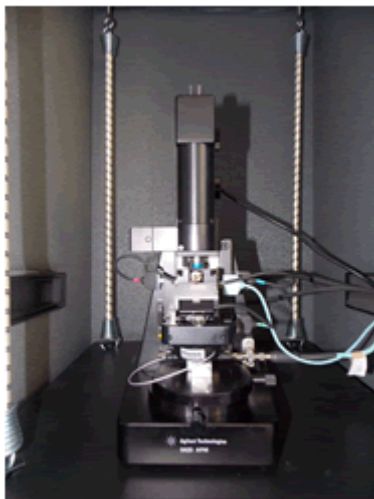
Další úkol v praktické části je zaměřen na vzniklé odchylky při výrobě od původně zadaných parametrů. Pro zjištění těchto odchylek je využito měření v režimu SMM. Srovnání výsledků z mikroskopu Agilent 5420 AFM/SPM je provedeno taktéž firmou ON Semiconductor a laboratoří TACL v Belgii.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SPM MIKROSKOP AGILENT 5420

Mikroskopie používající skenující sondu neboli SPM (Scanning Probe Microscopy) byla vynalezena v roce 1981 v laboratořích IBM v Curychu a dnes je dále vyvíjena např. firmou Agilent. SPM technika je rozdělena na různé měřicí režimy, které využívají těsné přiblížení mezi sondou (hrotem) a vzorkem. [13]

AFM mikroskop Agilent 5420 AFM/SPM je vhodný jak pro výzkum, tak i pro vzdělávací účely. Pomocí vhodného softwaru lze vytvářet 3D snímky a animace. Automatickou kontrolu všech snímaných parametrů lze zajistit pomocí skriptů, např. v C++ nebo LabVIEW. Na Obr.1 je ukázka Agilent 5420 AFM/SPM. [16]



Obrázek 1 Agilent 5420 AFM/SPM

1.1 Rozdělení

STM (Scanning tunneling microscopy – skenovací tunelovací mikroskopie)

AFM (Mikroskopie atomárních sil)

SMM (Skenovací mikrovlnná mikroskopie)

KFM (Kelvin force microscopy)

EFM (Electric force microscopy – elektrická silová mikroskopie)

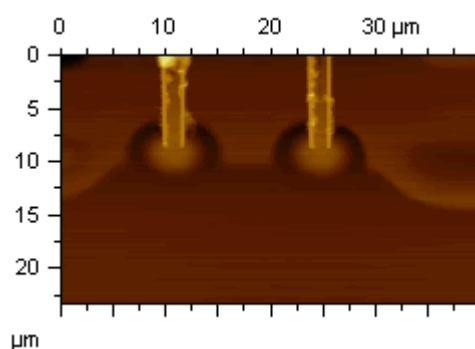
PFM (Piezo force microscopy)

MFM (Magnetic force microscopy)

2 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL - AFM

Mikroskopie atomárních sil – Atomic Force Microscopy neboli AFM se od klasické optické mikroskopie liší svým skenovacím (rastrovaným) charakterem. Výsledný obraz nezískáváme najednou, ale při měření je skenován každý bod nad povrchem vzorku pomocí pevné ostré sondy neboli hrotu a následně je automaticky ukládán do paměťového zařízení. Mohlo by se říci, že na rozdíl od ostatních mikroskopů je AFM „nevidomý mikroskop“, který v podstatě používá hrot pro zobrazení povrchu. Tento hrot je přitahován pomocí Van der Waalsových sil nebo odpuzován na základě Pauliho vylučovacího principu. Jedná se o přitažlivé a odpuzivé síly mezi atomy. Síla hrotu je pohybována nad nepohyblivým vzorkem. AFM mikroskop vytváří 2 i 3 dimenzionální detail v nanometrovém rozlišení, dále umožňuje měřit všechny materiály – tvrdé, měkké, syntetické, nebo přírodní (včetně biologické struktury, jako jsou buňky a biomolekuly) – bez ohledu na vodivost. Vzorek je obvykle umístěn na pevné podložce, ale může být umístěn i v kapalném prostředí nebo ve vakuu. Doba měření jednoho vzorku se odvíjí od předem definovaných parametrů, jedná se o desítky minut až několik hodin. [1] [13] [14]

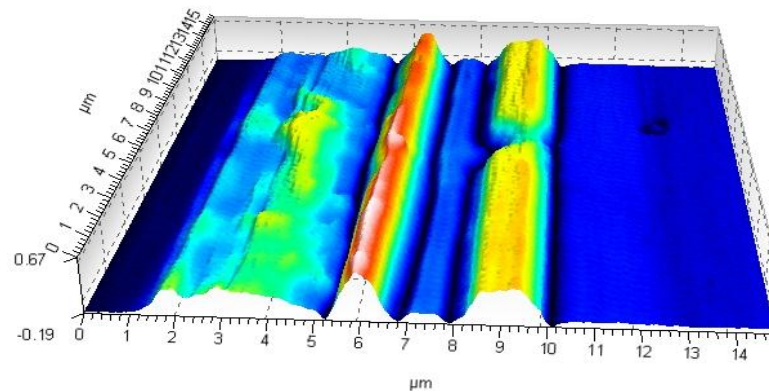
Naměřený vzorek lze zobrazit pomocí SW (PicoView) v PC. Jakákoli zaznamenaná měřená veličina povrchu vzorku je na snímku barevně odlišena. Např. u topografie jsou tmavě vyznačena nízká místa a světle vyšší místa vzorku. [1]



Obrázek 2 Topografie P-N přechodu

Na Obr. 2 je vidět topografie P-N přechodu. Měřený rozsah vzorku je 40x25 μm. Výškový rozdíl od nejnižšího bodu po nejvyšší bod činí 200 nm.

Další výhodou AFM mikroskopu je vytvoření barevného 3D snímku z měřeného vzorku. Pomocí 3D obrazu lze vygenerovat animaci.



Obrázek 3 Zobrazení 3D snímku

Obr. 3 zobrazuje koncentraci příměsí dopantů v P-N přechodech pomocí 3D snímku.

Ve starší měřící metodě STM (Scanning Tunneling Microscopy) docházelo k parazitním silám mezi hrotem a vzorkem, které ovlivňovaly odpudivou nebo přitažlivou sílu. Tato nežádoucí síla mohla způsobit chybně naměřenou vzdálenost mezi hrotem a vzorkem. V roce 1986 německý fyzik Gerd Binnig a Heinrich Rohrer uplatnili tuto parazitní vlastnost pro AFM metodu. Později získali Nobelovu cenu. [14]

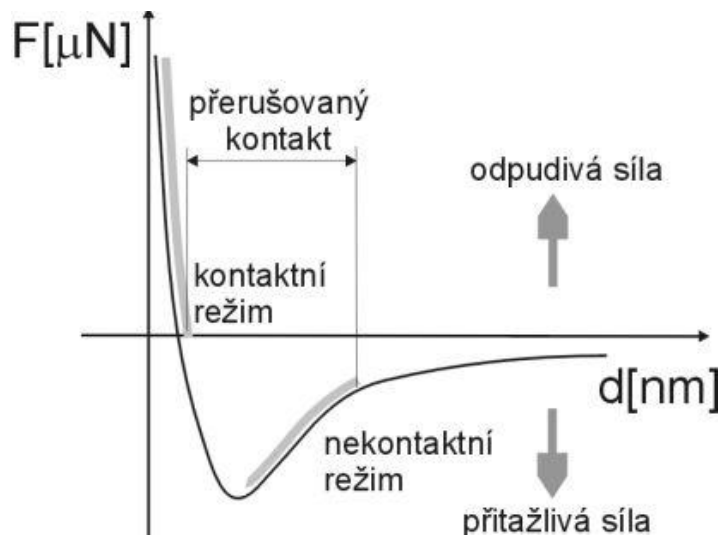
2.1 Princip metody

Jak vlastně AFM určuje topografii povrchu? Za potřebí je posun a dotyk ostrého hrotu. Dotyk není zcela přesné označení, i když v mnoha případech se mluví o „kontaktním módu“, tak ve skutečnosti se hrot pohybuje v těsné blízkosti nad povrchem vzorku. Tato vzdálenost je však zanedbatelná, a proto se nazývá *kontaktní mód*. U tohoto módu je hrot odtlačován silami na základě Pauliho vylučovacího principu. Tento mód je vhodný pouze pro tvrdé vzorky, protože měkké (např. biologické) mohou v tak blízkém prostoru poškodit hrot. Konstantní síla je $F \sim 10^{-7}$ N a vzdálenost mezi hrotem a vzorkem je $d \sim 0,1$ nm. [1]

Další mód je nazýván jako *nekontaktní mód*, zde je mezera mezi hrotem a vzorkem o něco větší, než tomu bylo v předchozím případě, ale stále se jedná o vzdálenost mezery v nm. Zde působí Van der Waalovy přitažlivé síly a hrot je přitahován ke vzorku. Tento mód je vhodný pro měření měkkých, např. biologických vzorků. Z důvodu lepšího poměru signálu k šumu se tento režim zpravidla realizuje jako střídavé měření, při němž je nosník rozkmitáván s danou amplitudou poblíž své rezonanční frekvence a měří se změna

amplitudy. Konstantní síla je $F \sim 10^{-12}$ N, vzdálenost mezi hrotem a vzorkem je $d \sim 100$ nm, frekvence nosníku $f \sim 200$ kHz.

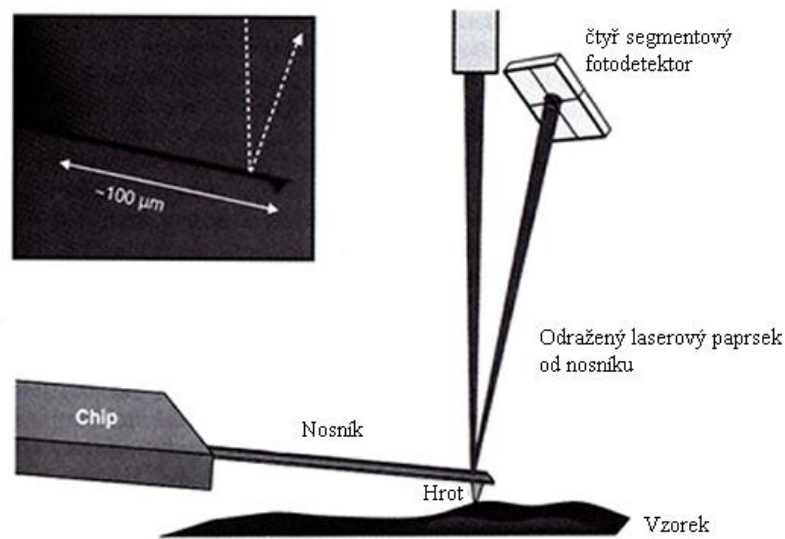
Mezi těmito dvěma módy nastává rovnovážný stav, který je nazýván jako *pokleповý mód*, někdy je označován i jako *přerušovaný kontakt*. [1] [13] [15]



Obrázek 4 Působení sil mezi hrotem a vzorkem

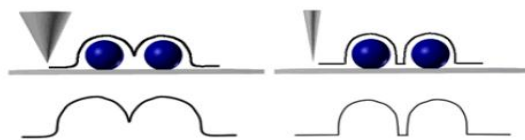
Na obr. 4 [15] je znázorněn princip přitažlivých a odpuzivých sil mezi hrotem a vzorkem.

Ostrý hrot je připojen na pružný nosník – v podstatě to může připomínat „mikroskopický skokanský můstek“, který se ohýbá pod vlivem sil. Princip je takový, že nosník má funkci pružiny, který se ohýbá nahoru a dolů. Tzn. hrot i nosník je vychýlen z rovnovážné polohy a tím také dochází k deformaci nosníku. Ohýbání nosníku se obvykle měří odraženým laserovým paprskem na fotodiody, která je rozdělena na čtyři segmenty. V počátku měření je laser zaměřen do středu kříže tvořící 4 segmenty a podle vychýlení nosníku od počáteční polohy dopadá odražený laserový paprsek nerovnoměrně do jednotlivých segmentů fotodetektoru. Poměry intenzit světelného svazku v různých kvadrantech jsou zdrojem údajů o vychýlení nosníku. Citlivost detekce ohybu nosníku je řádově 10^{-2} nm. Tento princip je znázorněn na Obr. 5 [1]. [1] [14]



Obrázek 5 Odražení laserového paprsku od nosníku

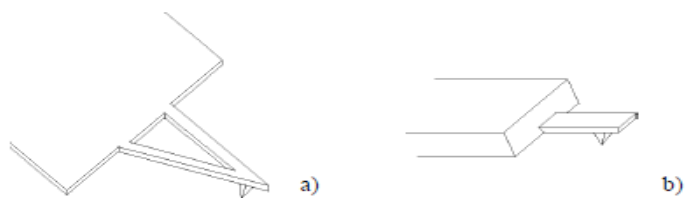
Délka nosníku je cca 100 μm a velikost hrotu 1 μm . Typ hrotu je dán poloměrem zakřivení $R_c=10\text{-}50$ nm. Pro atomární aplikace se používá $R_c<10$ nm. Má-li konec hrotu velký poloměr zakřivení R_c , dochází k ořezání detailu obrazu. Naopak, když konec hrotu má malý poloměr zakřivení R_c , hrot se dostane hlouběji do zářezu a nedochází k ořezání. Na Obr. 6 [14] je ukázka pro velké a malé R_c . [14]



Obrázek 6 Porovnání poloměru zakřivení konce hrotu

Typy nosníků:

- spojení dvou plochých kvádrů do písmene „V“
- plochý kvádr

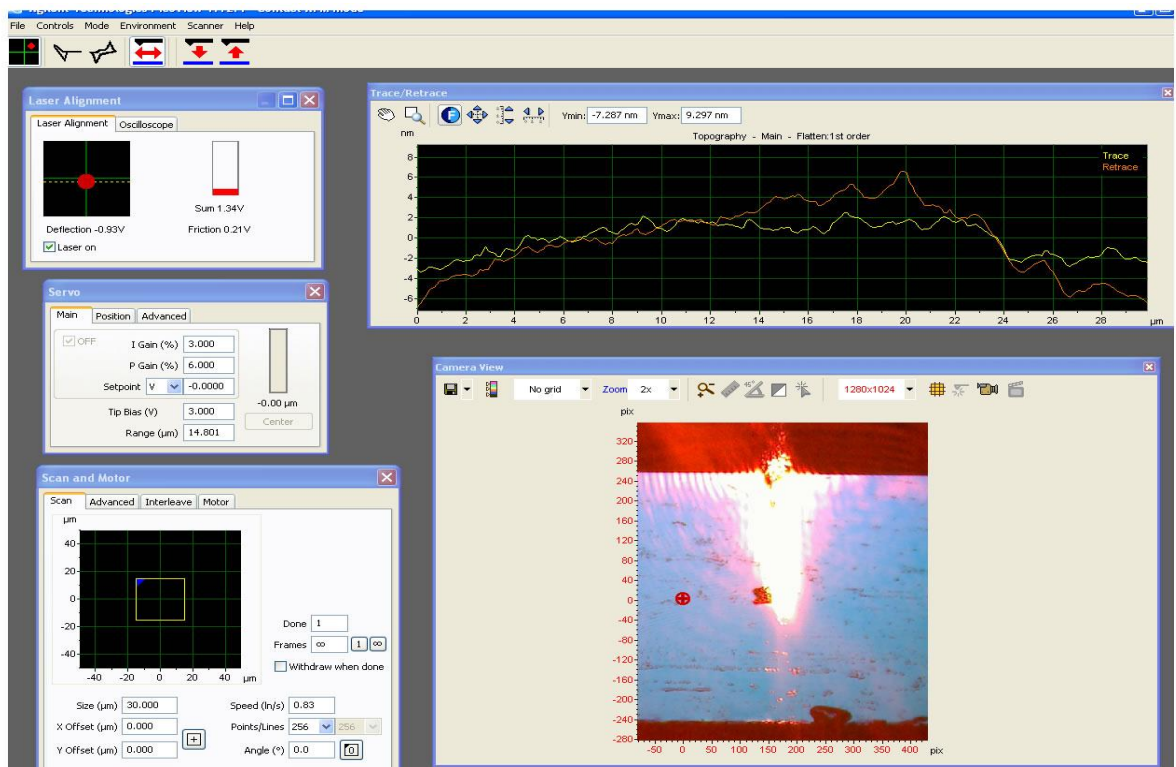


Obrázek 7 Typy nosníku a) „V“ b) plochý kvádr

Na Obr. 7 [14] jsou znázorněny oba typy nosníků. [14]

2.2 Software pro AFM

Pro zahájení měření na AFM mikroskopu je potřeba software. V našem případě se jedná o SW PicoView, ve kterém se nastavuje oblast skenování a danou oblast lze vidět pomocí videokamery. Dále je zapotřebí posunout laser na střed mezi čtyři segmenty a zvolit velikost přiváděného napětí na hrot. V sekci AC mode lze nastavit různé parametry pro různá měření.

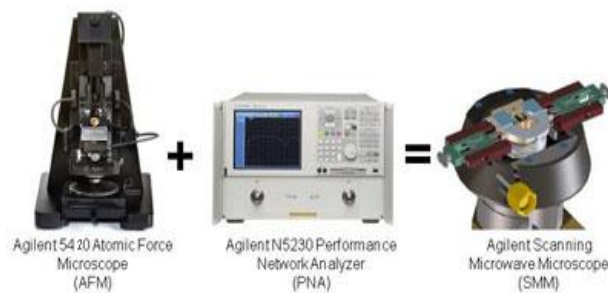


Obrázek 8 SW PicoView

Na Obr. 8 lze vidět pomocí videokamery řez křemíkovou deskou.

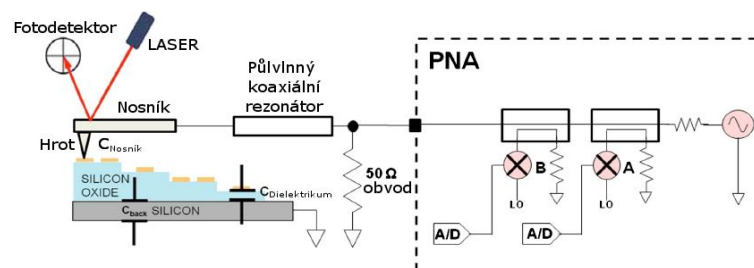
3 SKENOVACÍ MIKROVLNNÁ MIKROSKOPIE – SMM

SMM je další měřicí režim mikroskopu Agilent 5420. Pomocí tohoto modulu je možno měřit dC/dV, změnu kapacity, změnu amplitudy, změnu fáze. Na Obr. 9 jsou znázorněny jednotlivé komponenty potřebné k měření SMM. Jedná se modul vložený do mikroskopu Agilent 5420 AFM/SPM a propojený pomocí koaxiálního kabelu s PNA analyzátelem. PNA je zkratka pro výkonový síťový analyzátor. [2] [17] [19]



Obrázek 9 SMM modul [17]

Spojením AFM platformy PNA analyzátelem dosáhneme další rozmanitosti při měření.



Obrázek 10 elektronika SMM

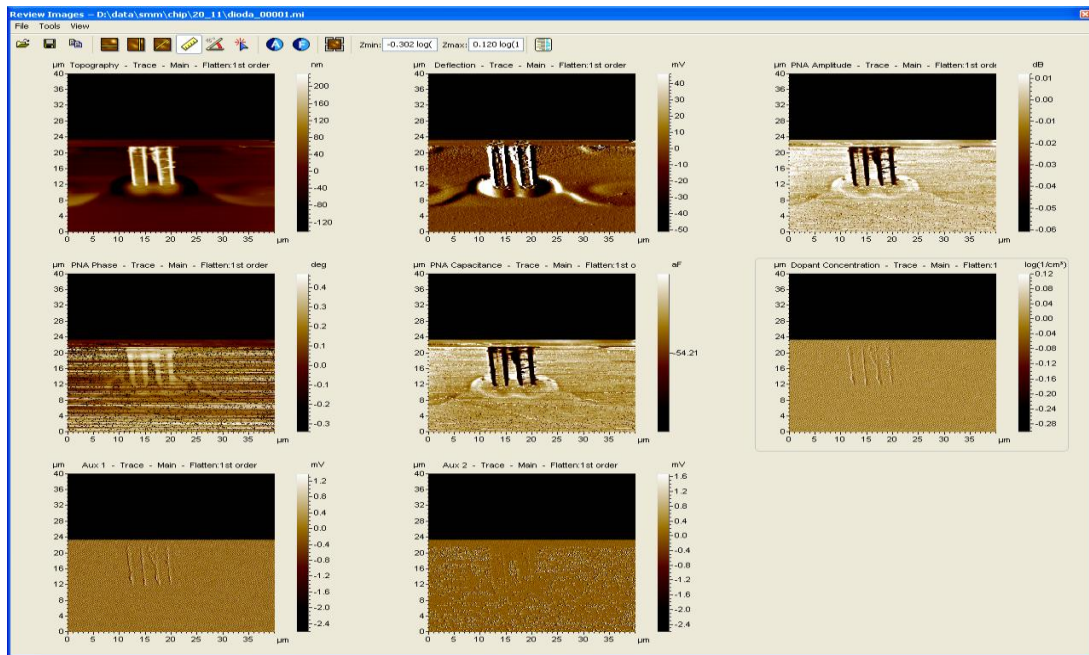
Na Obr. 10 [21] znázorněn princip SMM. V pravé části je PNA analyzátor, který je napojen na AFM platformu přes koaxiální kabel s impedancí 50 Ohm. SMM používá frekvenci v rozsahu od 1 do 6 GHz. PNA analyzátor využívá rádiových frekvencí RF. Mikrovlnný signál generovaný PNA je aplikovaný do DUT (device under test) Obr. 11. [19] Rozsah signálu odraženého z DUT je závislý na neshodě DUT impedance a impedance přenosového kabelu. [2] [19]



Obrázek 11 DTU

4 VELIČINY MĚŘENÉ POMOCÍ AFM, SMM

V softwaru PicoView jsou zobrazeny jednotlivé veličiny naměřené pomocí AFM a SMM. Tyto veličiny jsou naměřeny současně. Na obr. 12 jsou první dva horní snímky pořízené pomocí AFM (topografie a deflektce), zbylé jsou naměřeny pomocí SMM (změna fáze, změna amplitudy, dC/dV, koncentrace).



Obrázek 12 Naměřené výsledky AFM, SMM

Zde jsou zobrazeny snímky pro různé metody měření. Tyto metody jsou měřeny současně, ale pro každou metodu je vhodné jiné nastavení vstupních parametrů v softwaru. Na Obr. 12 je znázorněn řez deskou s přechodem P-N a difúzí. Nejlépe viditelné snímky jsou pro topografii a deflektci.

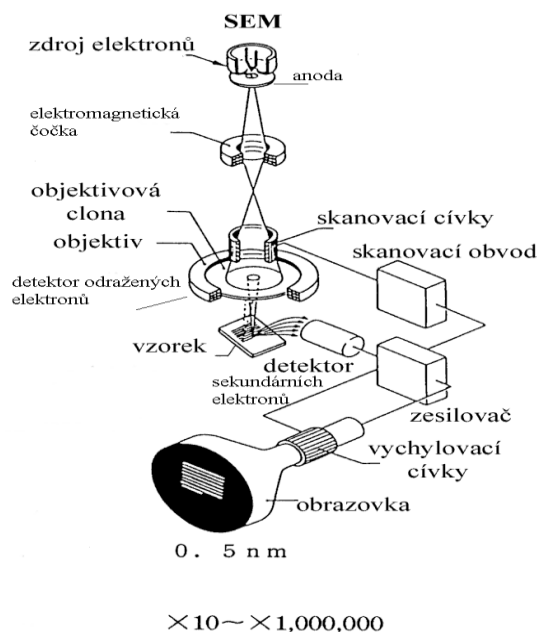
5 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP - SEM

Scanning Electron Microscopy označován jako SEM patří mezi skenovací neboli rastrovací mikroskopy, kde obraz ze vzorku je snímán po řádcích stejně, jak je tomu u AFM mikroskopu. Naskenovaný snímek vzniká pomocí zaměřeného elektronového svazku na vzorek. Tyto elektrony interagují s atomy ve vzorku a zpětně je zjištěna topografie nebo různé vlastnosti vzorku. [10]

5.1 Princip metody

Na zkoumaný vzorek dopadá svazek primárních elektronů. Elektrony jsou urychleny potenciálem mezi katodou a anodou. Průměr elektronového svazku by měl být velmi malý, což je ovlivněno průměrem katody. Vychylovací cívky před dopadem na povrch vzorku rozpožhují svazek primárních elektronů, tak že pokryjí řádky malou plochou. [11]

Jakmile svazek primárních elektronů dopadne na vzorek, tak jsou elektrony odraženy do detektoru. Těmto odraženým elektronům se říká svazek sekundárních elektronů. Detektor přešle na obrazovku získané informace o topografii a různých vlastnostech vzorku. [12]



Obrázek 13 Konstrukce SEM

Na obr. 13 [11] lze vidět konstrukci skenovacího elektronového mikroskopu, kde je znázorněn dopadající svazek primárních elektronů a svazek sekundárních elektronů odražených do detektoru. [11]

6 KŘEMÍKOVÁ DESKA

6.1 Křemík

Jedná se o polokovový prvek používající se v mikroelektronice, medicíně i každodenní potravě. Křemík tvoří základ pro polovodičové součástky, jedná se o čtyřmocný atom, ke kterému jsou následně dopovány 3-mocné a 5-mocné atomy. V periodické tabulce prvků je označován zkratkou Si.

6.2 Technologie výroby křemíku

Pro výrobu křemíkových desek je potřeba chemických i strojírenských operací, jedná se o složité procesy [3]. Při výrobě musí být zachována maximální čistota a přesnost. Typická třída prašnosti výrobních prostor je menší než 100 částic větších než půl mikrometru v krychlové stopě. Ve vyšším počtu mohou být desky zaneseny nečistotou a tato nečistota může způsobit vyrobení nekvalitního výrobku. Pro příklad na operačním sále v nemocnici je čistota 1000 částic větších než půl mikrometru v krychlové stopě a v normálním prostředí, ve kterém se běžně pohybujeme, je čistota cca 1 000 000 částic větších než půl mikrometru v krychlové stopě. Před vstupem do výroby je zapotřebí obléknutí kombinézy, návleků na boty, roušky, rukavic a projítí komory se vzduchovou sprchou.

Výroba monokrystalického křemíku je v současné době rozdělena na dvě technologie:

- a) Czochralskiho tažení z taveniny CZ
- b) Metoda zonální tavby FZ (Floating Zone)

Dnes je z 95 % využívána technologie Czochralskiho tažení z taveniny, a to z důvodu výrazného zvýšení dosažitelného průměru krystalu. Objev této výroby byl náhodný. Czochralski si dělal poznámky a omylem ponořil své pero místo do kalamáře do kelímku s roztaveným kovem, jehož krystalizaci právě sledoval. Při vytáhnutí si všiml tenkého drátku na špičce pera a po jeho analýze zjistil, že tenký drátek je monokrystalický.

Počáteční operací je růst monokrystalu. Vstupní polykrystalický křemík s přídavkem malého množství dopantu je roztaven v křemenném kelímku a do taveniny je ponořen monokrystalický zárodek. Monokrystalický zárodek je ve tvaru válce v průměru nad 1 cm a délky nad 10 cm. Zařízení, ve kterém probíhá tato technologie, se nazývá „tažička“.

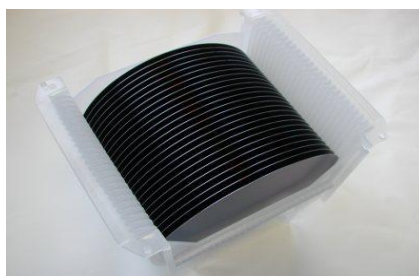
Výsledný monokrystal o požadovaném průměru a vlastnostech je dán regulací rychlosti tažení, otáček, teploty taveniny a dalších technologických parametrů. [3]



Obrázek 14 Monokrystal po vytáhnutí z tažičky

Na Obr. 14 [3] je znázorněn monokrystal po vytáhnutí z tažičky [8]. Po vyrobení tohoto monokrystalu jsou následně odřezány začátky a konce krystalu. Části krystalu splňující specifikaci se obrousí na požadovaný průměr.

Výsledný monokrystal je nařezán pomocí drátových řezaček, nebo pil s vnitřním pořezem. [3] Před řezáním je nutné vybrousit hlavní fazetu, která určuje krystalografickou orientaci v rovině desky a zároveň umožňuje polohování desek při výrobě integrovaných obvodů.



Obrázek 15 Nařezané desky

Na Obr. 15 [3] lze vidět několik nařezaných křemíkových desek [3], na kterých se z jedné strany provádí leštění. Leštěná strana bývá označována jako přední strana, na které se následně provádí další operace, např. narostení epitaxe.

Po vhodně narostených epitaxních vrstvách, aplikaci dopantů, metalů a dalších operacích vznikají na desce el. obvody, které tvoří čipy. Na jedné desce může být typicky okolo 15 000 čipů. Desky jsou následně nařezány na jednotlivé čipy.

7 EPITAXNÍ VRSTVA

7.1 Epitaxe

Jedná se o proces, kde tenká krystalická vrstva roste na povrchu desky (substrátu). Nově vznikající vrstva krystalické mřížky navazuje bezprostředně na krystalickou mřížku substrátu. [4]

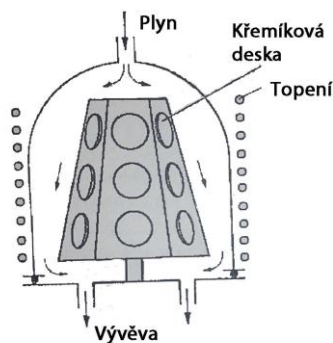
Metody pro epitaxní růst jsou následující:

- Epitaxe z plynné fáze
- Epitaxe z kapalné fáze
- Epitaxe z molekulárních svazků

Pro diplomovou práci byly na křemíkové desce nanášeny vrstvy s určitou koncentrací pomocí metody *epitaxe z plynné fáze*.

7.2 Epitaxe z plynné fáze

7.2.1 Karuselový reaktor



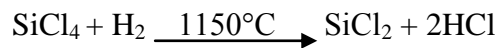
Obrázek 16 reaktor - Karuselový typ

Na počátku výroby jsou v reaktoru umístěny jednotlivé křemíkové desky, na které budou v průběhu reakcí narůstat epitaxní vrstvy. Do vyhřívaného reaktoru Obr. 16 [5] jsou ze shora vpuštěny plyny, které se usazují na povrch Si desky, a přebytečné plyny jsou odvedeny pomocí vývěvy pryč z reaktoru. V reaktoru probíhají následující 3 procesy: [5]

- Proces 1:

Na počátku reakce plynu SiCl_4 (Tetrachlorisilanu) jsou odbourány ve vysokých teplotách submolekulární složky včetně SiCl_2 . [5]

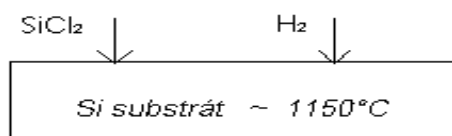
Rovnice 1 Pro proces 1



- Proces 2:

SiCl_2 s vodíkem jsou adsorbovány na horkém povrchu křemíkové desky (včetně substrátu).

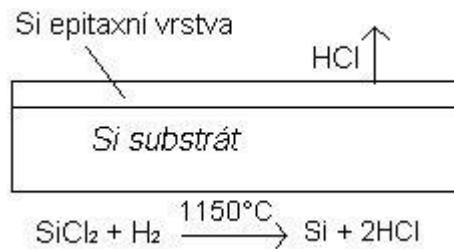
Viz na Obr 17. [5]



Obrázek 17 Proces 2

- Proces 3:

K výrobě Si a HCl je využita reakce SiCl_2 s H_2 . Atom z křemíku zůstane na povrchu a spojí se s krystalickou mřížkou na monokrystalickém Si substrátu. Vzniklý plyn HCl je odveden pomocí vývěvy pryč z reaktoru. Proces 3 je ukázán na Obr. 18. [5]



Obrázek 18 Proces 3

Ke správnému narostení epitaxních vrstev je důležitá znalost průtoku plynu, který je potřebný pro reakci povrchu. Zde platí difúzní zákon Rovnice. 1. [5]

Rovnice 2 Difúzní zákon

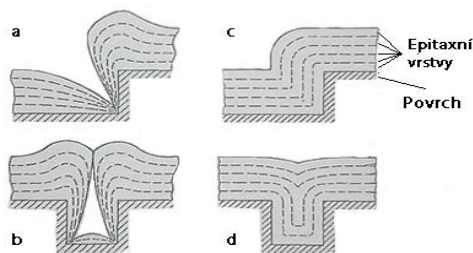
$$j \sim D \frac{dc}{dz}$$

j – průtok plynu, D – difúzní koeficient, $\frac{dc}{dz}$ - koncentrační gradient

Jestliže je poměr $\frac{j}{D}$ malý (pro rychlosti reakce a dlouhé difúzní konstanty), pak malý koncentrační gradient $\frac{dc}{dz}$ je dostačující k udržení požadovaného průtoku plynu.

Koncentrace plynu na povrchu desky je pak o něco nižší než koncentrace plynné směsi v reaktoru. V tomto případě je proces označován jako *reakčně - řízený procese*.

Reakčně – řízený proces má několik výhod. Jedna z hlavních výhod je ta, že jednotně nanese epitaxní vrstvu po celém povrchu desky včetně ostrých hran (viz obr.). [5]

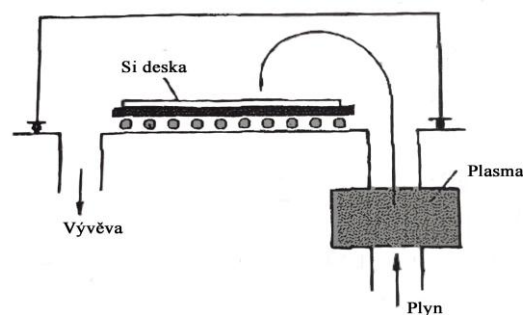


Obrázek 19 procesy

Na Obr. 19 [5] jsou zobrazeny narostené epitaxní vrstvy na povrchu křemíkové desky. Typ „c“ a „d“ znázorňuje *reakčně – řízený proces*. Typ „a“ a „b“ znázorňuje další typ procesu. Při srovnání lze vidět, že u reakčně – řízeného procesu jsou epitaxní vrstvy rovnoměrně nanášeny po celém povrchu desky, a to i v okrajích, kdežto u druhého typu procesu dochází k nerovnoměrnému nanesení. [5]

7.2.2 Jednodeskový reaktor

Jednodeskový reaktor pracuje na podobném principu jako výše uvedený karuselový reaktor s tou výjimkou že u tohoto typu mohou epitaxní vrstvy narůstat při nižší teplotě. [5]



Obrázek 20 Jednodeskový reaktor

Na Obr. 20 [5] je znázorněno nanášení epitaxních vrstev v jednodeskovém reaktoru.

8 ŘEZ DESKOU

K měření správnosti a ověření jednotlivých nanesených vrstev po výrobě je používán řez deskou. Lámání křemíkové desky se provádí pomocí diamantového pera, které zajistí rovné zlomení desky bez narušení krystalické mřížky.

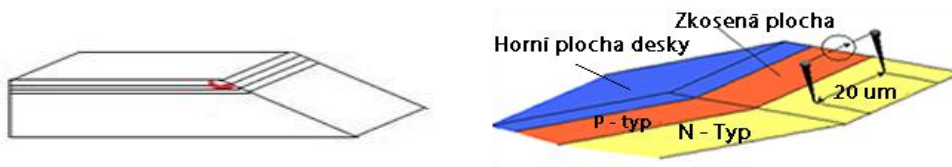
V praktické části bude využíván pro měření Cross nebo SRP.

8.1 Cross

Crossem je nazýván řez deskou pod kolmým úhlem. V diplomové práci byl tento řez použit na AFM mikroskopu pro měření koncentrací dopantů.

8.2 SRP

SRP je označení pro Spreading Resistance Profiling, neboli rozšířený odporový profil. Pomocí něhož se měří odpor proti hloubce. Jedná se o řez deskou pod velmi malým úhlem α a při takto zkoseném řezu nastává větší plocha pro měření el. odporu.



Obrázek 21 znázorněný SRP

Rovnice 3

$$R = \frac{\rho}{2\alpha}$$

R – měřený odpor, ρ - měrný odpor desky, α – poloměr styčné plochy

Rovnice 2 znázorňuje přepočtení měrného odporu desky ku úhlu α na el. odpor. Měření SRPu probíhá pomocí dvou kovových jehel, které jsou od sebe vzdáleny asi 20 μm a tlačí silou proti povrchu polovodiče. Odpor mezi těmito jehlami je měřen Obr. 21 [7]. [1][6] [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 KŘEMÍKOVÉ DESKY S RŮZNÝMI KONCENTRACEMI

9.1 Výroba vzorkových křemíkových desek

Pro diplomovou práci byly vyrobené tři typy křemíkových desek s různými koncentracemi příměsí donorů a akceptorů. První dva typy desek byly vloženy do karuselového reaktoru (kap. 7.2.1), v němž byly za vysokých teplot narosteny jednotlivé epitaxní vrstvy. V první fázi byla narostena jedna epitaxní vrstva a po určitém časovém intervalu další vrstva. Teplota pro jednotlivé vrstvy se může v reaktoru měnit. Poslední typ křemíkové desky byl vložen do jednodeskového reaktoru.

U první desky byly epitaxním růstem vytvořeny vrstvy od nejnižší po nejvyšší koncentraci. Nejvyšší koncentrace je na povrchu desky a její velikost je rovna $C=1e16 \text{ cm}^{-3}$, celkem je na desce 10 vrstev s různou koncentrací. Deska při nejvyšší koncentraci difundovala při teplotě $T=1210^\circ\text{C}$. V opačném procesu (od nejvyšší po nejnižší) hrozí rozdifundování jednotlivých koncentrací do sebe, což je způsobeno díky vyšší teplotě u vyšších koncentrací [18]. Na desce se nachází jeden P-N přechod.

Druhý typ desky byl vyroben stejným způsobem jako předešlá deska, ale na povrch desky byla dodána pasivace nitridu pro ochranu vrstvy koncentrace při leptu. Pasivace dále chrání hrot mikroskopu AFM před vyjetím z desky do prostoru. V tomto typu je také jeden P-N přechod. [18]

Koncentrace příměsí poslední desky byly epitaxně narosteny od nejvyšší po nejnižší. Nejvyšší koncentrace se nachází v hloubce 10 um. Difúze probíhala při nižší teplotě než v předešlém případě, a to za teploty $T=1000^\circ\text{C}$, což nezpůsobilo rozdifundování jednotlivých koncentrací vzájemně do sebe. Tento typ desky byl z důvodu nižší teploty vložen do jednodeskového reaktoru (kap 7.2.2). Dále jsou na této desce P-N přechody v jednotlivých vrstvách. [18]

9.2 Úprava pro měření

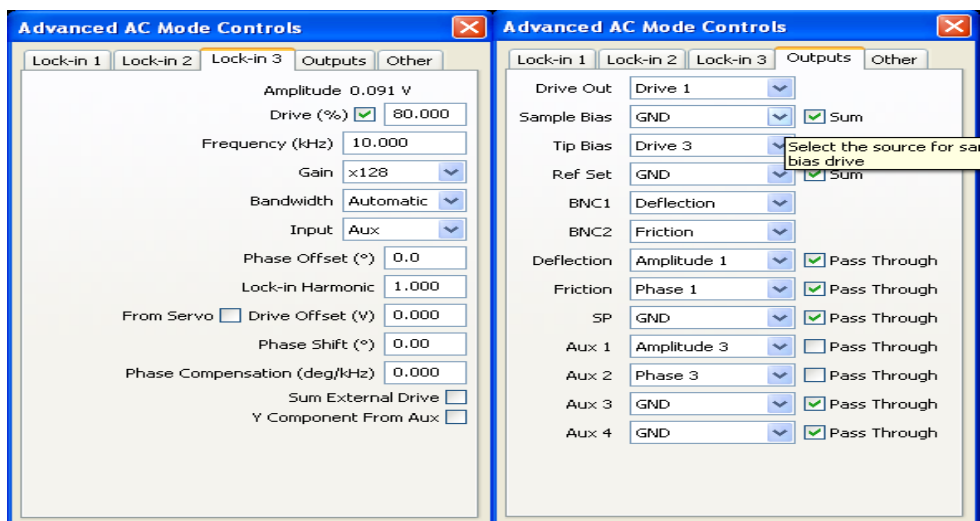
Pro měření na AFM byly z vyrobené desky použity dva řezy typu Cross. Jeden Cross byl selektivně naleptaný leptadlem, jehož leptací rychlost je koncentračně závislá a druhý zůstal neleptaný. Další díl Si desky byl vybroušen pod malým úhlem pro měření SRP (Spreading Resistance Profiling), toto měření neprobíhalo na AFM.

9.3 Leptání

Řez Si deskou byl vložen do leptadla na 10 s v poměru 20:1. Jedná se o leptadlo složené z 69% kyseliny dusičné HNO_3 a 50% fluorovodíku HF. Na závěr se deska vložila pod proud tekoucí vody za účelem zbavení nečistot. Leptadlo je použito z důvodu viditelnějšího zobrazení koncentrací v mikroskopu, kde je schopnost vidět nižší koncentrace C cm^{-3} než v případě neleptaného řezu. [18]

9.4 Nastavení SW pro měření na AFM

Pro měření na AFM mikroskopu byl použit software PicoView. Pro získání kvalitních výsledků je zapotřebí nastavit parametry v AC modu, dále zvolit vhodné napětí přiváděné na hrot (tip Bias) a frekvenci.

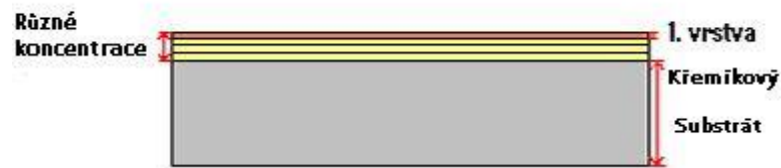


Obrázek 22 Nastavení parametru pro režim AC

AC mode byl nastaven pro všechny měření stejným způsobem, jak je vidět na Obr. 22. Ostatní parametry byly měněny pro každý vzorek zvlášť.

9.5 Křemíková deska bez pasivace

První typ desky byl vyroben bez pasivace nitridu neboli ochranné vrstvy. Při takovéto výrobě byla první vrstva koncentrace ze shora částečně odleptána. Níže jsou ukázané výsledky z AFM a SRPu, kde jedna vrstva částečně chybí.



Obrázek 23 Křemíková deska bez ochranné vrstvy nitridu

Na Obr. 23 je znázorněn Cross danou deskou. Celkem je na křemíkové desce 10 vrstev koncentrací po 3 μm , ve zbylé části řezu je Si substrát. Na tento křemíkový substrát jsou epitaxně narosteny jednotlivé koncentrace, silně legovaná vrstva leží na povrchu desky.

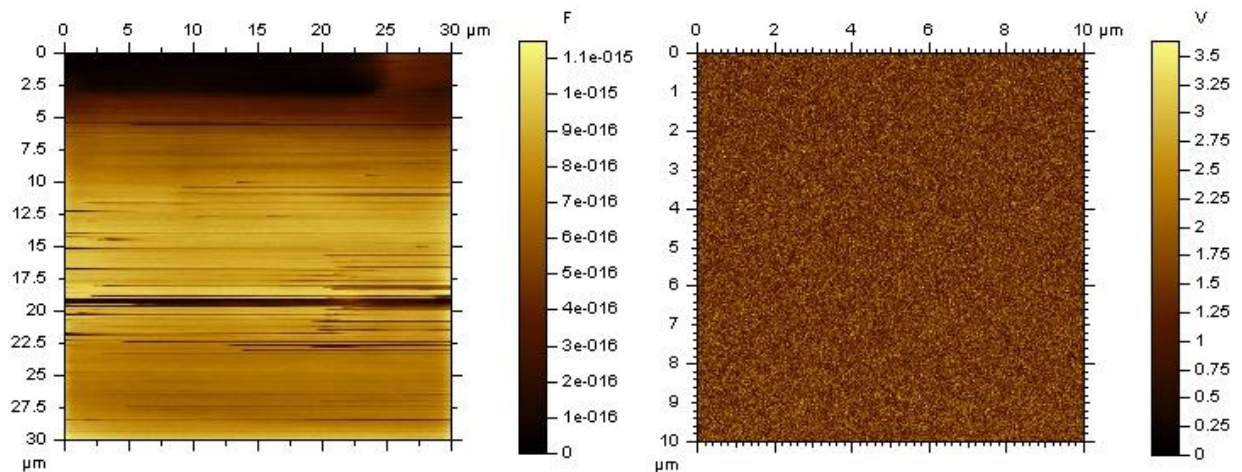
9.5.1 Cross bez naleptání

Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

Přivedené napětí na hrot: $U = -2\text{V}$

PNA frekvence: $f = 2,473038\text{ GHz}$

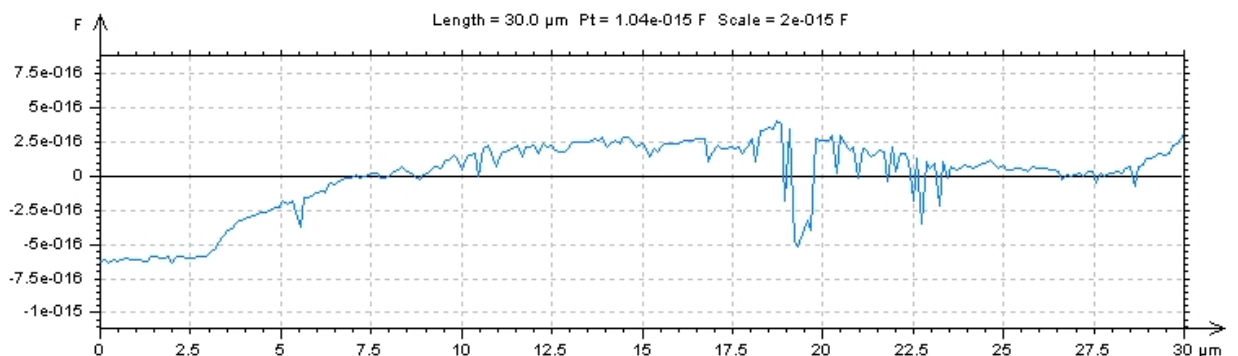
Počet bodů na řádek: 512



Obrázek 24 Cross bez naleptání

V levé části Obr. 24 je naměřena PNA_kapacitance a v pravé části PNA_amplituda. Z důvodu nízkých koncentrací příměsí a neleptané křemíkové desky nebyly zaznamenány přechody jednotlivých koncentrací. Nejvyšší koncentrace $C=1\text{e}16\text{ cm}^{-3}$ je na povrchu desky, ale dosahuje hloubky 1 μm od povrchu desky. Taková vzdálenost od okraje je pro měření na AFM velmi riziková a z tohoto důvodu koncentrace nebyla na AFM záměrně

měřena. Další koncentrace bez naleptání desky pro toto nastavení parametrů nejsou pro AFM rozeznatelné.



Obrázek 25 vertikální řez PNA_Kapacitance

Na Obr. 25 lze potvrdit, že žádné koncentrace nelze rozeznat. V hloubce 20 μm se jedná o nežádoucí šum.

9.5.2 Cross s naleptáním

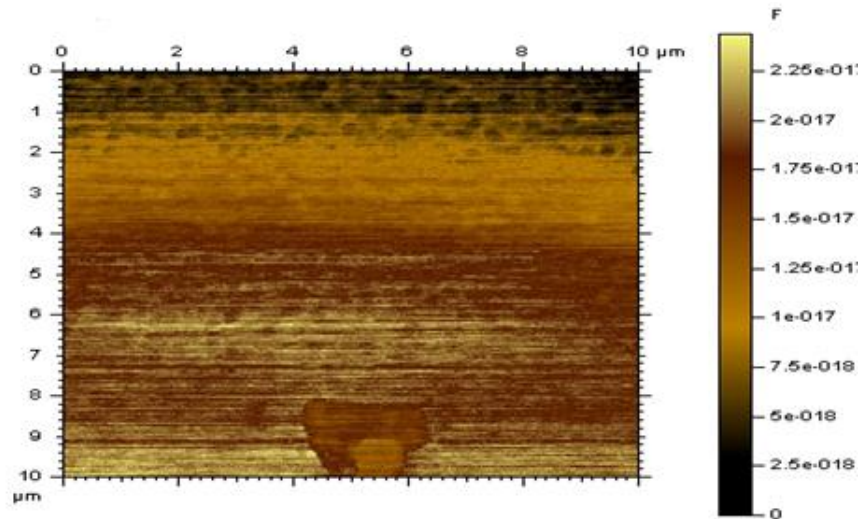
V této části byl z vyrobené desky udělán Cross pomocí diamantového pera. Následně byla deska vložena do leptadla (kap 9.3).

Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

Přivedené napětí na hrot: $U = -2 \text{ V}$,

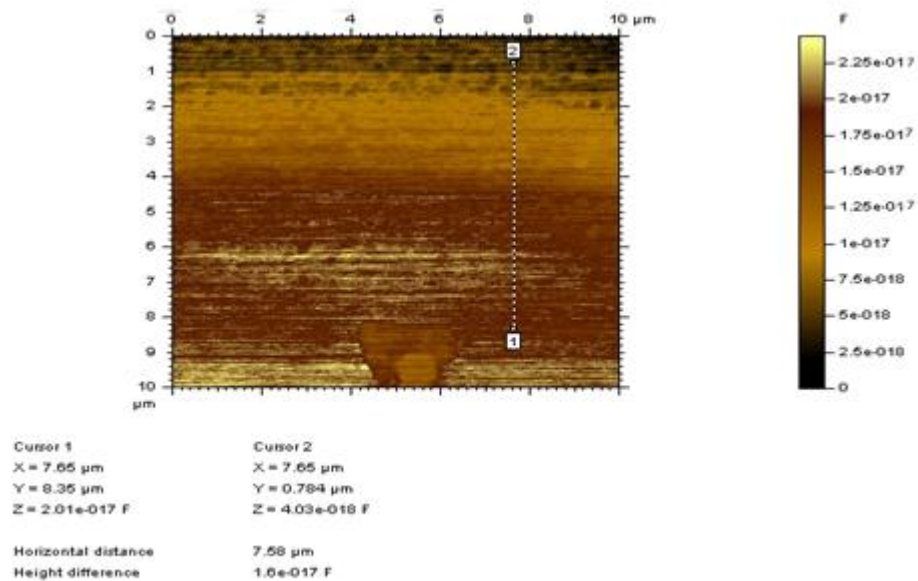
PNA frekvence: $f = 2,387 \text{ GHz}$,

Počet bodů na řádek: 512

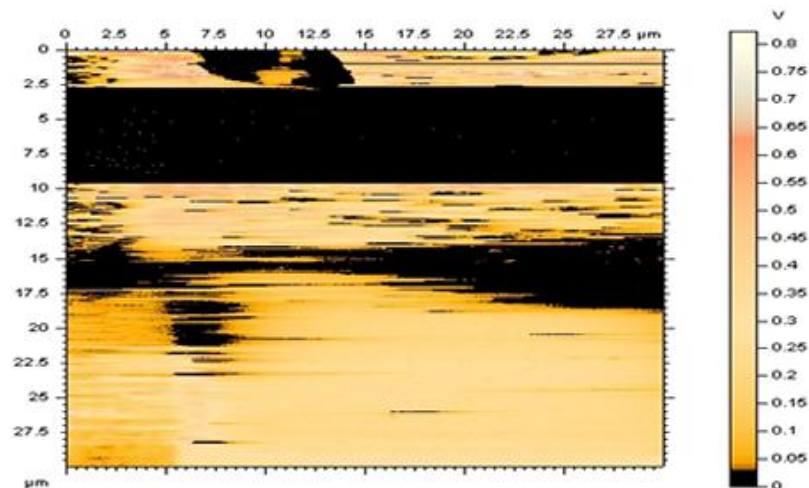


Obrázek 26 PNA_Kapacitance

Na Obr. 26 je zobrazena kapacita dané desky, u jednotlivých koncentrací lze vidět změnu C [F]. Deska byla měřena na vzdálenosti $10 \times 10 \mu\text{m}$. V následujícím kroku bude zjišťována daná kapacitance v určitém bodě.

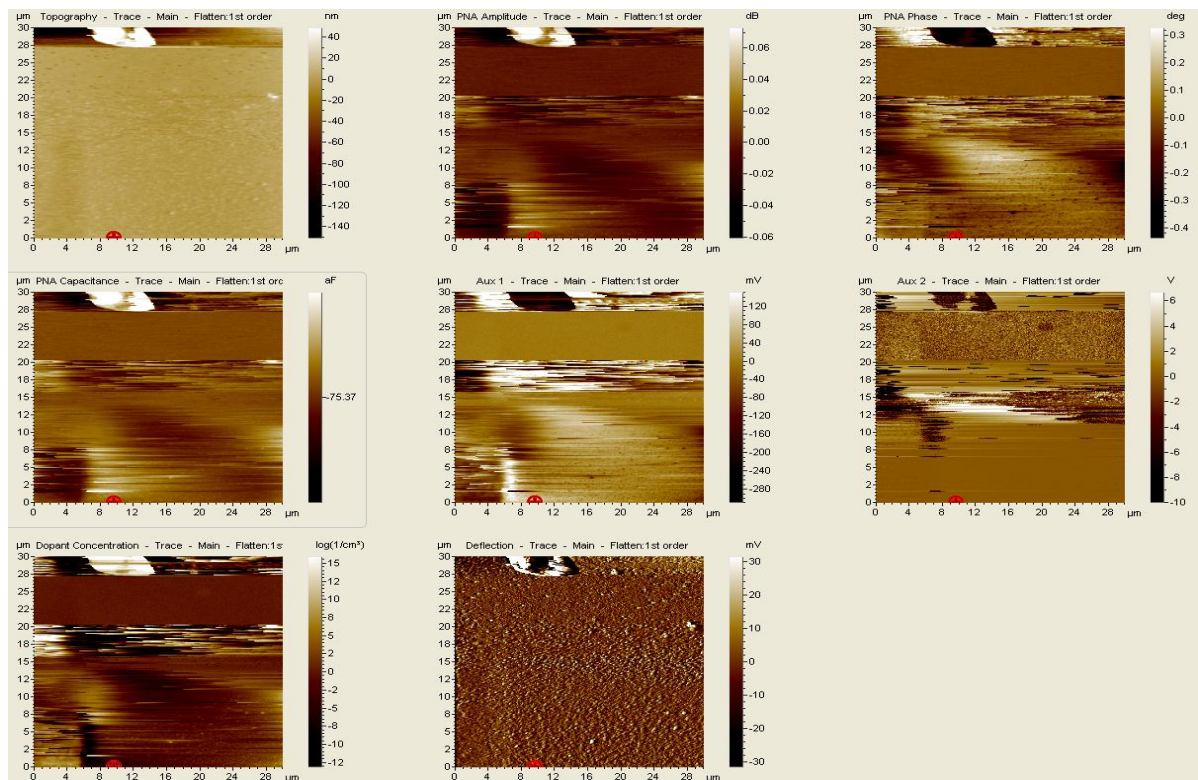
Obrázek 27 PNA_Capacitance – zobrazení C [F] ve dvou bodech

Obr. 26 je upraven na Obr. 27, na kterém jsou zobrazeny 2 kursory. Tyto kursory jsou níže popsány osou X , Y a Z . Pomocí kursorů lze zjistit, jaká je kapacita v daném místě. V $8,5 \mu\text{m}$ byla naměřena kapacitance $2,01 \times 10^{-17} \text{ F}$.



Obrázek 28 Aux_1 - PNA amplituda

Na Obr. 28 je použita metoda PNA_amplituda. U jednotlivých koncentrací lze zjistit jejich napětí U [V]. V hloubce Si desky 2,5 μm - 10 μm v ose Y je vidět změna koncentrace, na které se naměřilo nulové napětí. Obr. 28 lze porovnat s Obr. 30 SRPu, kde lze také zpozorovat změnu velikosti koncentrace C [cm^{-3}].



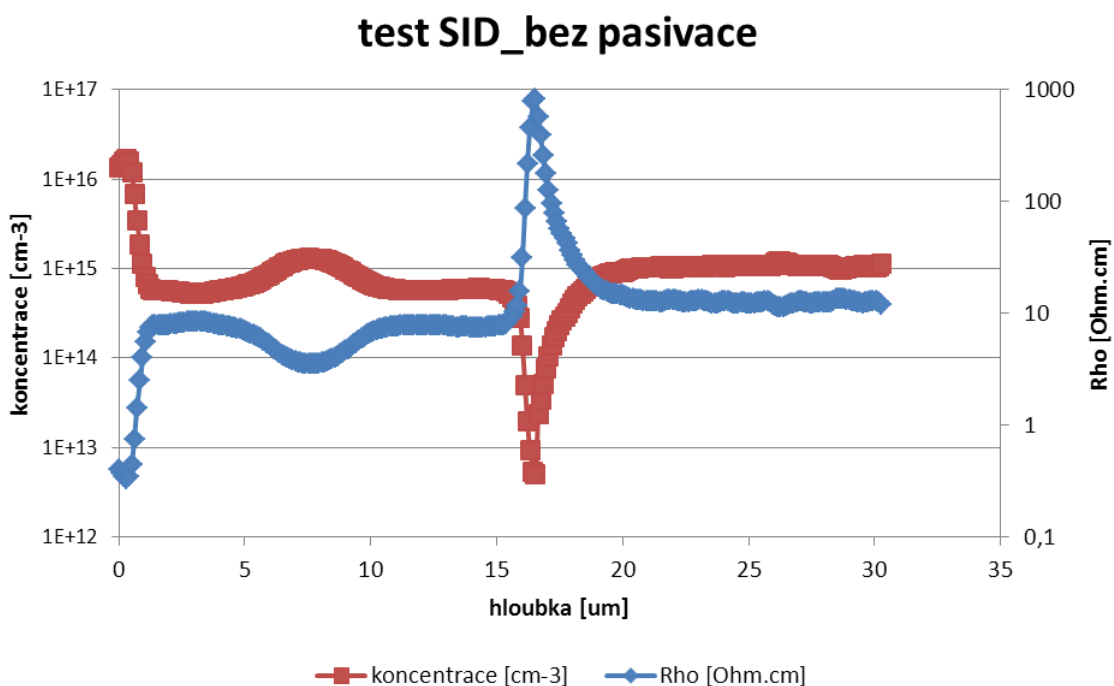
Obrázek 29 Zobrazení všech měření

U Obr. 29 jsou zobrazeny všechny metody měření. V horním levém rohu je zobrazena Topografie, která zobrazuje deformaci povrchu v ose Z. Na tomto Obr. 29 lze vidět

nečistotu (bílá skvrna v horní části). S touto nečistotou se deska záměrně měřila kvůli lepší orientaci při měření a ujištění, že se deska po několika hodinách měření neposunula o pár mikrometrů. Na většině měřících metod jsou zobrazeny různé koncentrace příměsí donoru a akceptoru. Každá metoda měří jinou Z-tovou veličinu. U metody Topografie a Deflekce není zobrazena koncentrace z důvodu, že tato metoda měří nerovnost povrchu. Tyto dvě metody bývají využívány pro jiné měřící účely.

9.5.3 SRP

Pro ověření správnosti a porovnání naměřených dat na AFM mikroskopu je naměřen graf pomocí Rozšířeného Odporového Profilu (SRP) (kap 8.2), na kterém vidíme hodnoty rezistivity ρ Ohm.cm a koncentrace C cm⁻³.



Obrázek 30 SRP – Si deska bez pasivace

Na Obr. 30 lze vidět průběh narostlých koncentrací v křemíkové desce. Tento graf platí jak pro leptanou, tak i neleptanou desku. Od povrchu desky do hloubky 1 um je koncentrace o velikosti $C=1e16$ cm⁻³, poté se její velikost snižuje na $C=5e14$ cm⁻³. Tato koncentrace není ani v jednom případě zaznamenána na AFM (leptaná/neleptaná deska). V oblasti 5-10 um je zaznamenána koncentrace na mikroskopu AFM, a to v případě leptané desky.

V hloubce 15 μm - 17 μm od povrchu desky vzniká PN přechod. Rezistivita Rho [Ohm] (modrá křivka) narůstá do maximálních hodnot a koncentrace C cm^{-3} (červená křivka) klesá k nejnižším hodnotám.

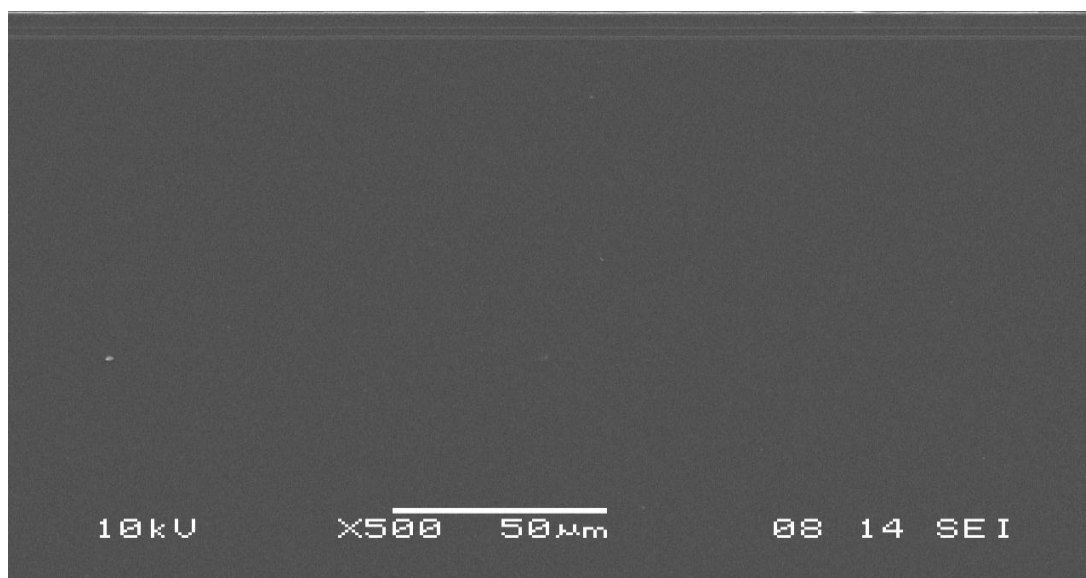
Tabulka 1 naměřená data ze SRPu

Body	Hloubka	log Rm	log Rho	log CC	Rho [Ohm.cm]	koncentrace [cm^{-3}]
...
118	8,1679	2,4506	-1,1491	17,122	0,07094144	1,32434E+17
119	8,2377	2,4875	-1,1017	17,0475	0,0791225	1,11558E+17
120	8,3075	2,5318	-1,039	16,9519	0,091411324	8,95159E+16
121	8,3773	2,5845	-0,9636	16,8416	0,108742672	6,94384E+16
...

Tabulka 1: ukázka naměřených hodnot ze SRPu, ze kterých je vytvořen graf (hloubka [μm] v závislosti na měrném odporu [Ohm.cm] a koncentraci [cm^{-3}]).

9.5.4 SEM

Další porovnání proběhlo pomocí skenovacího elektronového mikroskopu, více o mikroskopu SEM je uvedeno v (kap 5).



Obrázek 31 SEM

Na Obr. 31 lze v horní části vidět ochuzenou oblast P-N přechodu.

9.6 Křemíková deska s pasivací

Na tomto typu desky byla přidána pasivační vrstva nitridu. S touto ochrannou vrstvou se vrchní vrstva koncentrace nepoškodí při leptání. Dále je pasivace vhodná pro větší bezpečnost AFM hrotu a dosažení kvalitnějších výsledků. Tloušťka pasivace činí 800 nm. [18]



Obrázek 32 Křemíková deska s ochrannou vrstvou nitridu

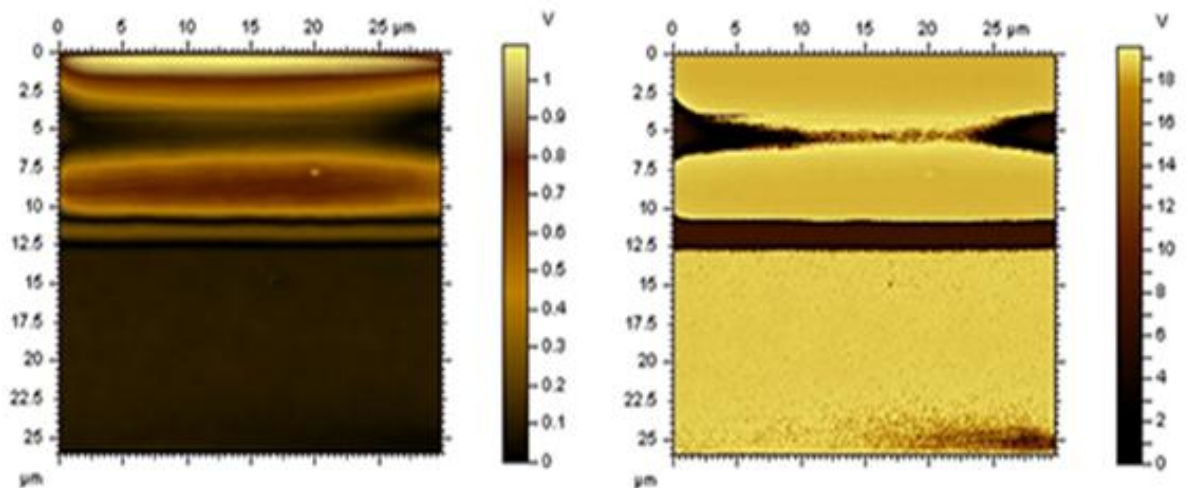
Na Obr. 32 lze vidět Cross Si deskou. V horní části se nachází pasivace, pod kterou jsou epitaxně narostené jednotlivé koncentrace. Ve zbylé části řezu je křemíkový substrát. [18]

9.6.1 Cross bez naleptání

V této části bylo opět zkoumáno, jakou nejnižší koncentraci AFM rozpozná, jedná se o Si desku bez naleptání. Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

Přivedené napětí na hrot:

- $U = 3V$
- PNA frekvence: $f = 2,4678 \text{ GHz}$
- Počet bodů na řádek: 512



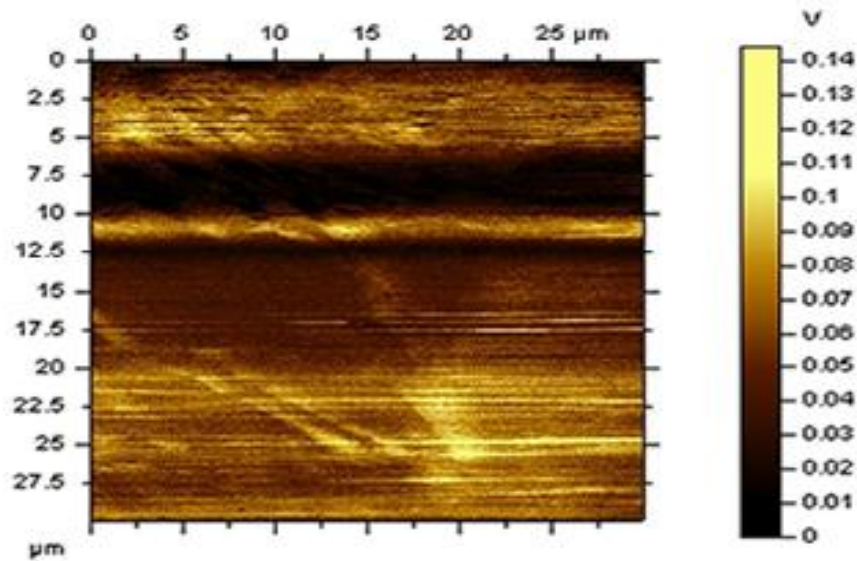
Obrázek 33 PNA – amplituda, fáze

Na Obr. 33 si lze všimnout jednotlivých koncentrací. Bez naleptání lze vidět koncentrace do hloubky 12,5 μm . Nejnižší viditelná koncentrace rozpoznaná pomocí SMM je $C=1\text{e}14 \text{ cm}^{-3}$. [18]

9.6.2 Cross s naleptáním

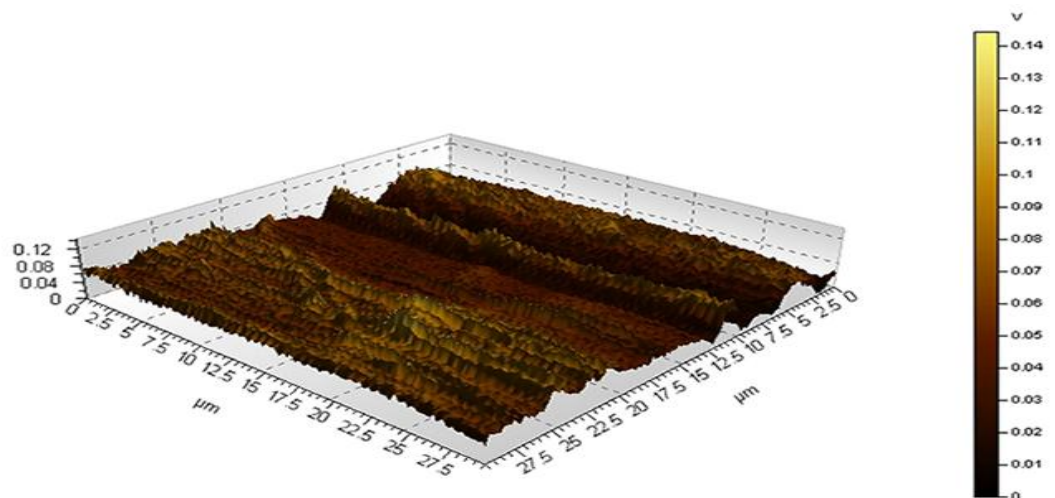
Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

- Přivedené napětí na hrot: $U = -3\text{V}$
- PNA frekvence: $f = 2,474705 \text{ GHz}$,
- Počet bodů na řádek: 512



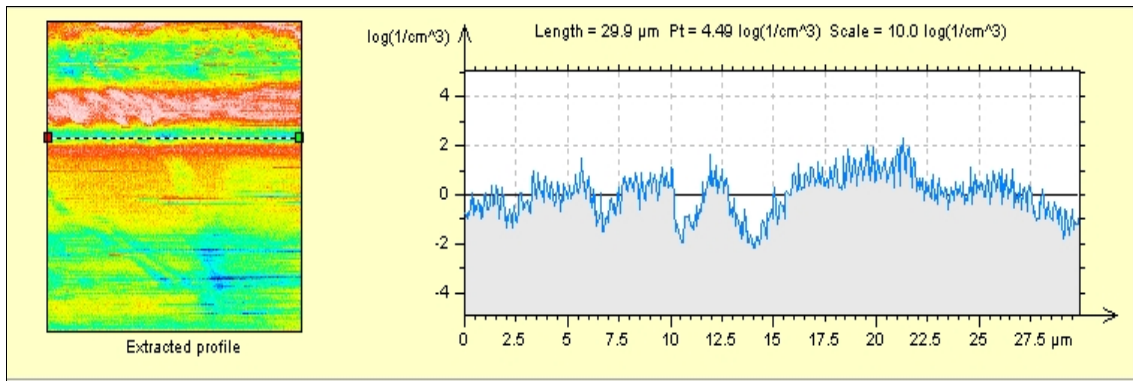
Obrázek 34 PNA amplituda naleptané desky

Při leptané desce jde vidět koncentraci do hloubky 20 μm - Obr 34. Ve srovnání se snímkem z předešlého měření (neleptaná Si deska) jsou zde rozeznat nižší koncentrace.

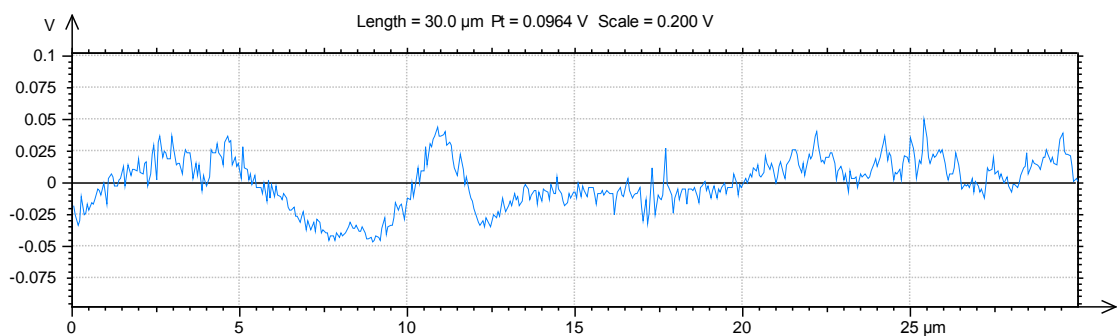


Obrázek 35 PNA amplituda naleptané Si desky ve 3D

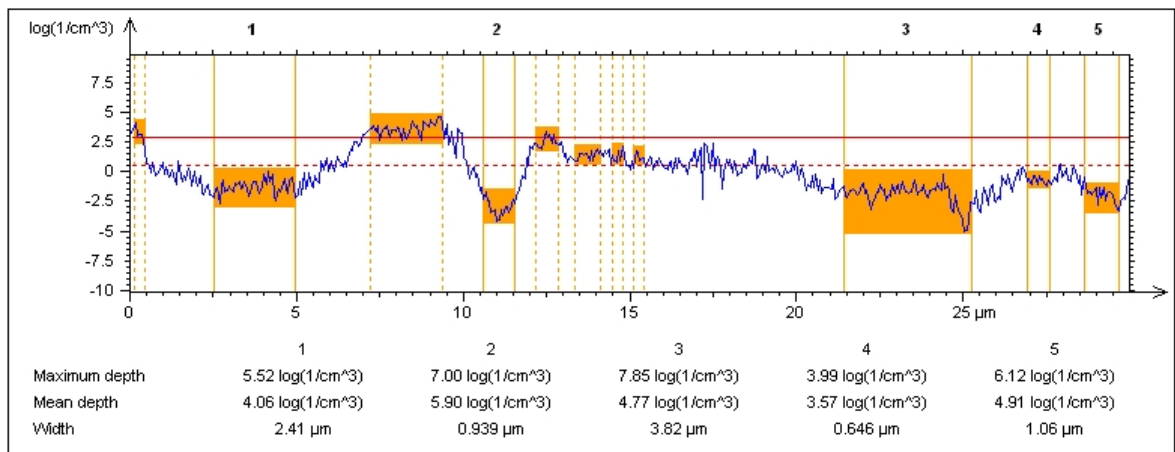
Z Obr. 35 byl udělán 3D obraz. X-ová souřadnice znázorňuje šířku [μm], Y-ová hloubku [μm] Si desky a Z-ová osa el. napětí [V]. V hloubce 12,5 μm – 20 μm lze vidět ochuzenou oblast P-N přechodu, kde je nulové el. napětí. Tato ochuzená oblast je porovnána s výsledky z grafu SRP. [18]



Obrázek 36 Dopant Concentration - horizontal



Obrázek 37 vertikální řez z naměřeného snímku z SMM

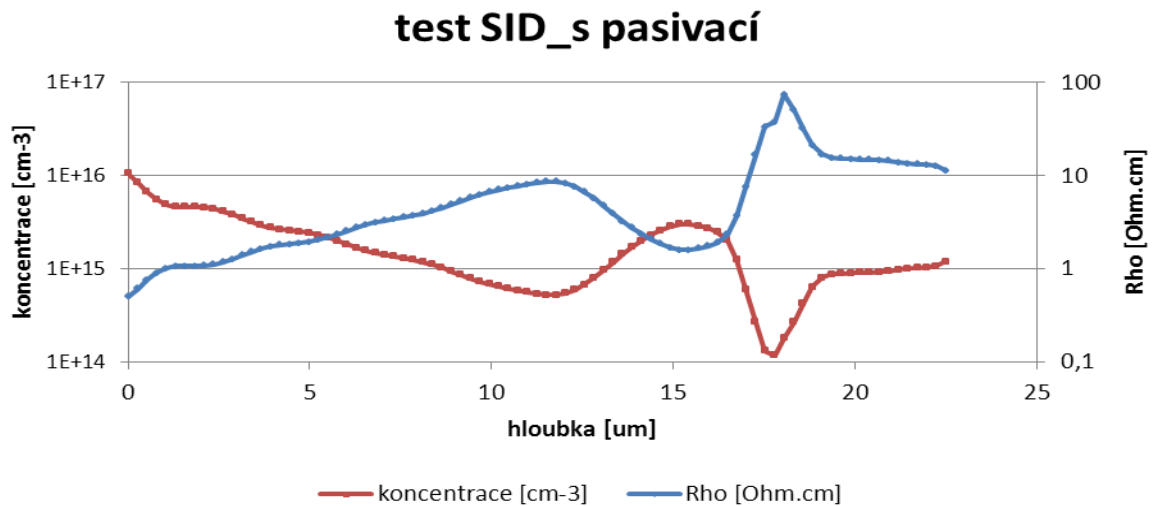


Obrázek 38 Dopant Concentration 2 – vertical

Obr. 36-38 jsou vertikální a horizontální řezy naměřeným snímkem.

9.6.3 SRP

Ve firmě ON Semiconductor byl naměřen SRP (Spreading Resistance Profiling -Rozšířený Odporový Profil). Tento graf platí jak pro naleptanou Si desku, tak i neleptanou Si desku.

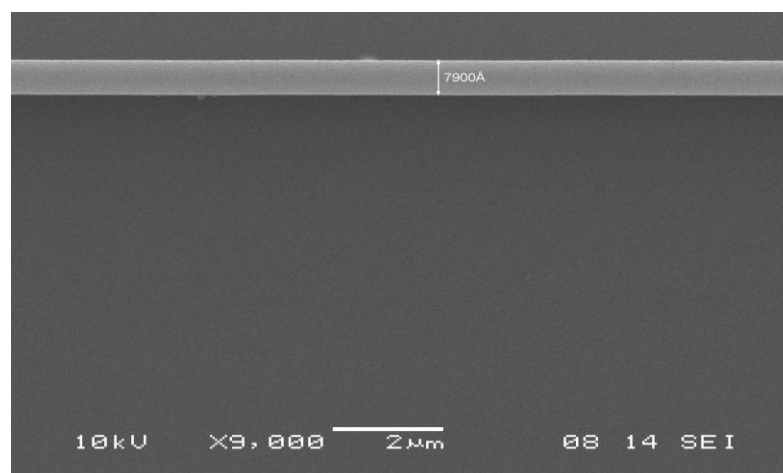


Obrázek 39 SRP - Si deska s pasivací

Na Obr. 39 je znázorněn graf s koncentrací C cm^{-3} a rezistivitou Rho [Ohm.cm]. Modrá křivka znázorňuje rezistivitu a červená křivka koncentraci. V hloubce 15 μm – 20 μm je vidět ochuzená oblast P–N přechodu, kde rezistivita dosahuje maximálních hodnot a koncentrace nejnižších hodnot. Tato ochuzená oblast byla naměřena i pomocí SMM, lze ji vidět na 3D snímku (Obrázek 355). [18]

9.6.4 SEM

Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) byl naměřen taktéž firmou ON Semiconductor.



Obrázek 40 Snímek ze SEM

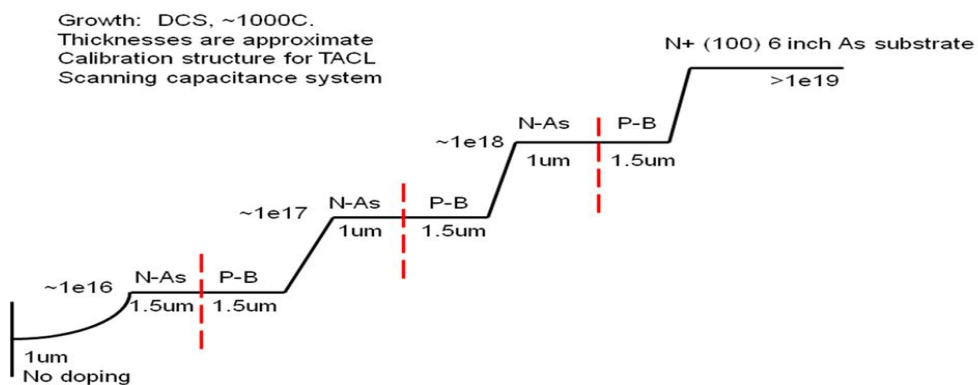
V porovnání se snímky pořízené z AFM lze vidět pouze vrstvu pasivace na okraji Si desky o tloušťce 800 nm. [18]

9.7 Křemíková deska s více P-N přechody

9.7.1 Výroba

Tento typ byl vyroben podobně jako předešlé desky. Při výrobě byly epitaxní vrstvy nanášeny od nejvyšší koncentrace po nejnižší koncentraci. Nejnižší koncentrace je na povrchu desky. Difúze probíhala při nižší teplotě než u první desky, a to za teploty $T=1000^{\circ}\text{C}$, což nezpůsobilo slítní jednotlivých koncentrací do sebe. Dále jsou na této desce P-N přechody v jednotlivých vrstvách. [18]

9.7.2 Zadaná data před výrobou



Obrázek 41 Zadané parametry před výrobou Si desky TACL

Obr. 41 znázorňuje nedefinovaná data pro výrobu Si desky. Od povrchu desky po 1 μm je deska bez dopingu. V hloubce 1 μm je nejnižší koncentrace $C=1e16 \text{ cm}^{-3}$. Nejvyšší koncentrace se nachází v hloubce 10 μm a její velikost činí $C=1e19 \text{ cm}^{-3}$. Jedná se o koncentraci příměsí donorů a akceptorů v P-N přechodech, tyto přechody jsou v každém schodu N-As a P-B. Pomocí SMM se zjišťovalo, zdali tyto koncentrace odpovídají vyrobené desce, nebo jestli došlo při výrobě k odchylce od návrhu. Dále tento typ desky byl zaslán do laboratoře TACL v Belgii. V laboratoři TACL byl vyhotoven SRP a zaslán zpět pro porovnání výsledků z AFM mikroskopu. Zkratka TACL znamená Technology Assessment and Characterization Laboratory. [18]

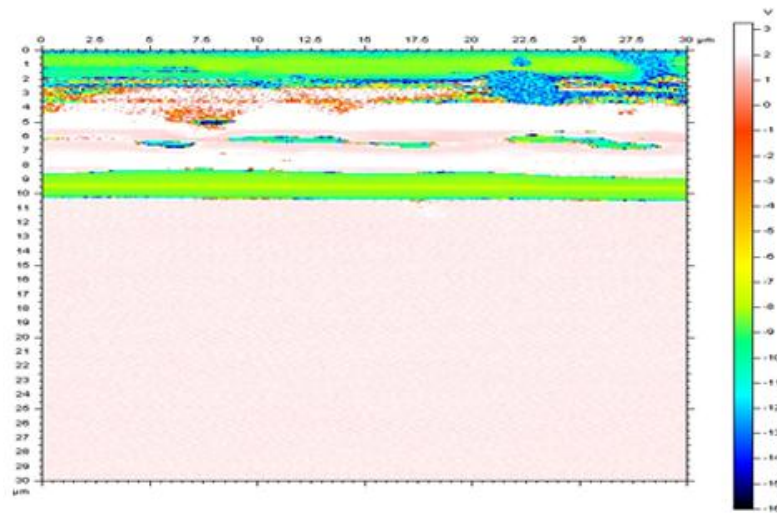
9.7.3 Cross bez naleptání

Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

Přivedené napětí na hrot: $U = -3\text{V}$,

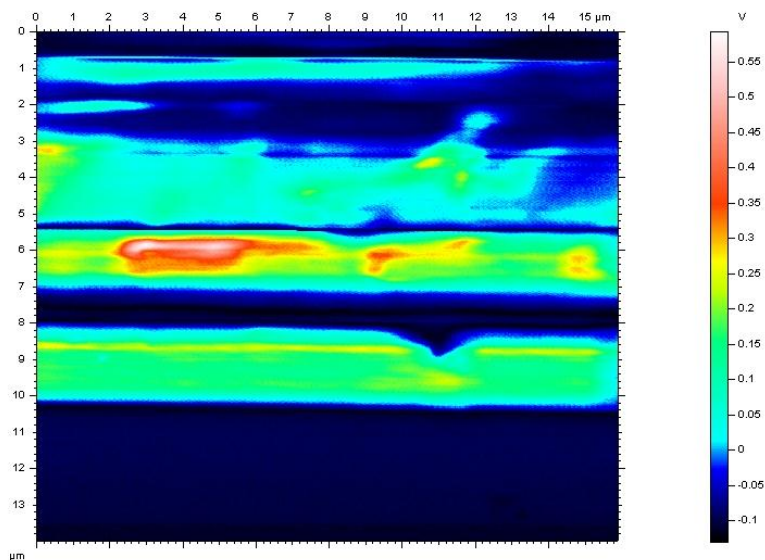
PNA frekvence: $f = 2,468808$ GHz,

Počet bodů na řádek: 512



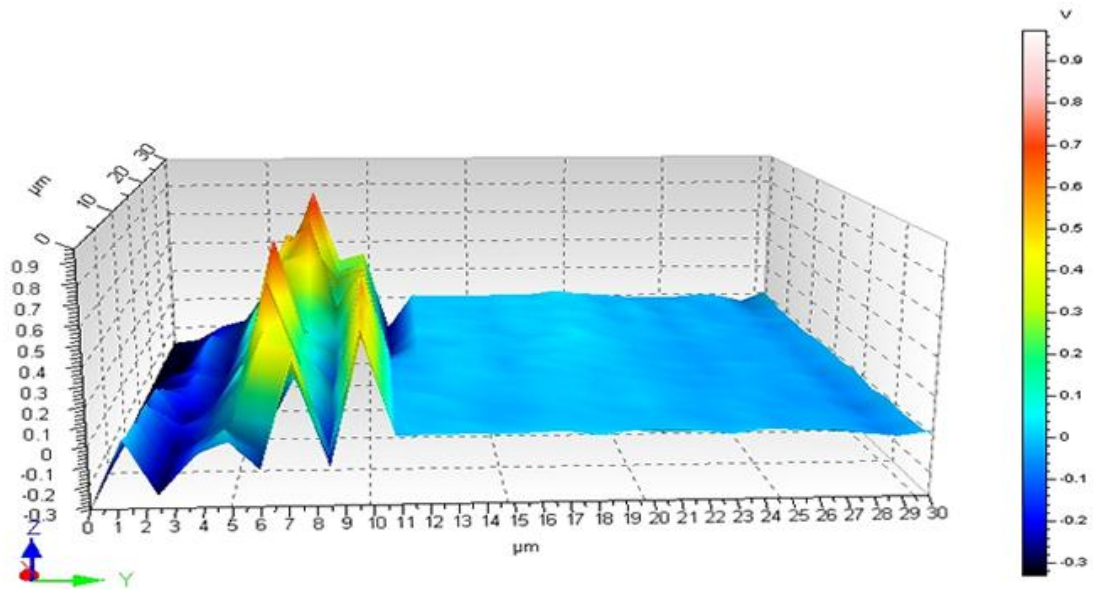
Obrázek 42 PNA fáze

Na obr. 42 je znázorněn snímek PNA se změnou fáze. Osa Y udává hloubku v řezu, osa X šířku a Z osa (barevná struktura) el. napětí [V]. [18]



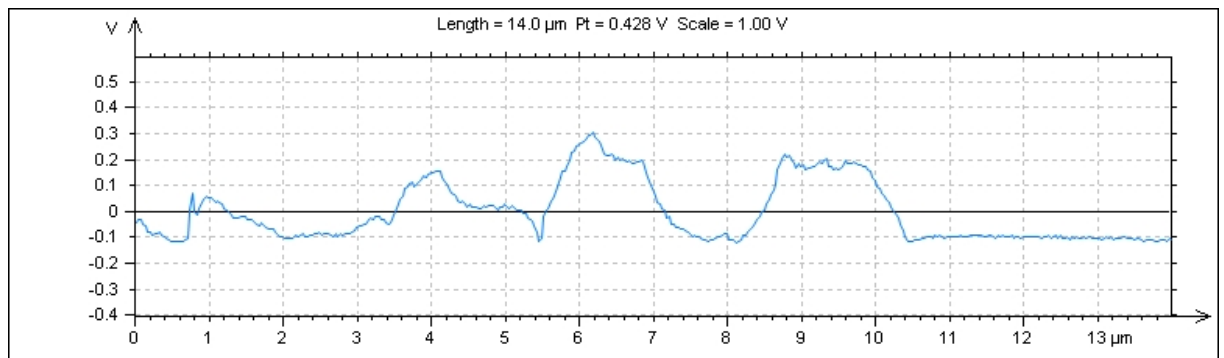
Obrázek 43 SMM zobrazení křemíkové desky TAOL

Na Obr. 43 je znázorněn snímek SMM zobrazení křemíkové desky. Osa Y udává hloubku v řezu, osa X šířku a Z osa el. napětí [V]. Na AFM jsou již vidět veškeré koncentrace i bez naleptání, a to z důvodu, že jsou zde narosteny vyšší koncentrace než u předešlých typů křemíkových desek s pasivací/bez pasivace. [18]



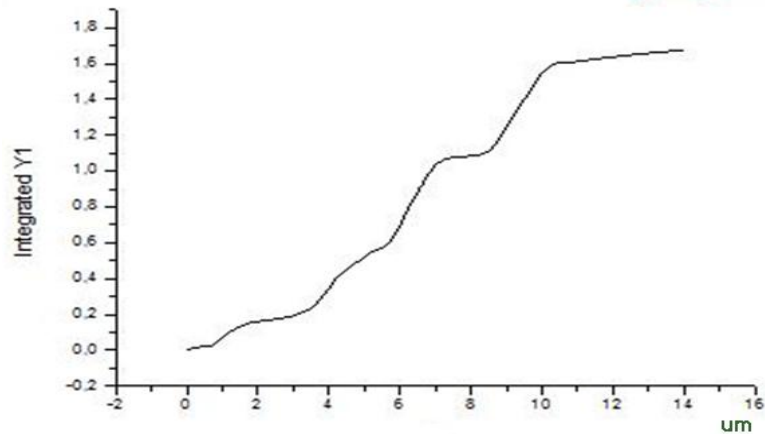
Obrázek 44 3D zobrazení křemíkové desky TACL

Obr. 44 znázorňuje 3D zobrazení PNA amplitudy. Na ose Y je znázorněna hloubka, v X-ové ose šířka a v Z-ové ose el. napětí [V]. [18]



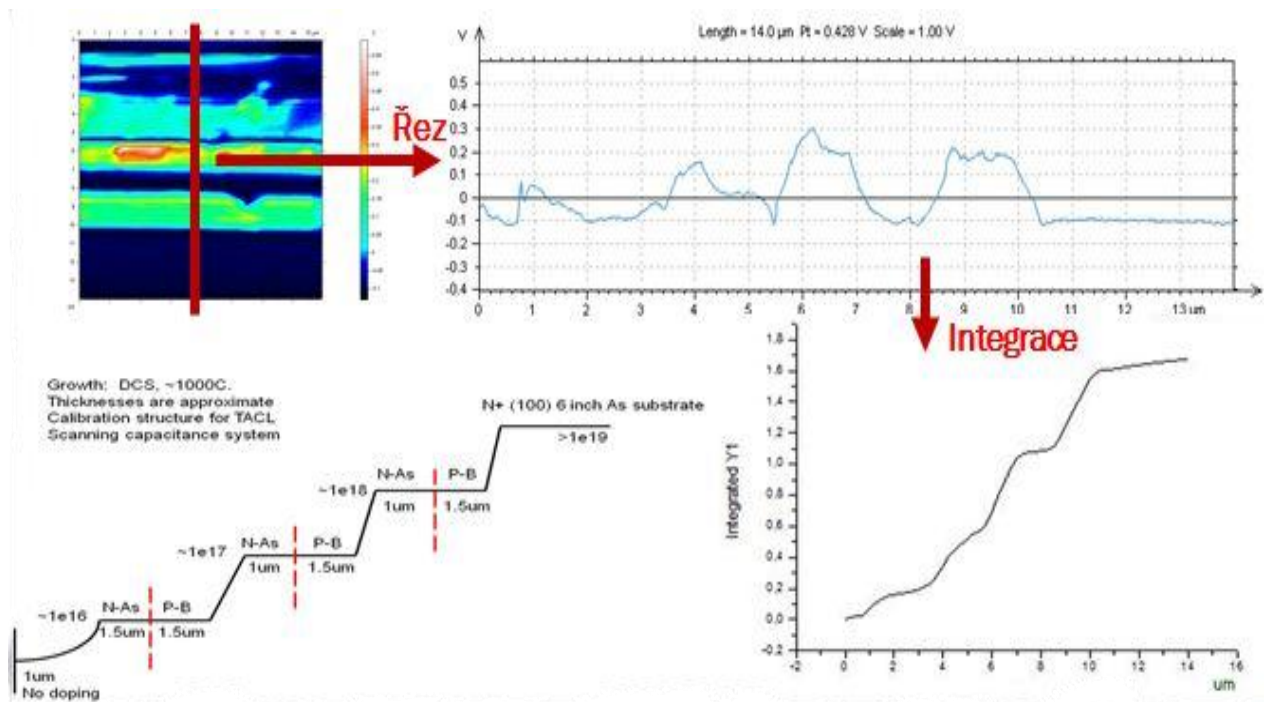
Obrázek 45 Vertikální řez z naměřeného snímku z SMM

Z výsledků byl pomocí SW „PICO VIEW“ udělán vertikální řez. Při srovnání výsledku se zadáním pro výrobu lze vidět na Obr. 45, že hodnoty jsou zderivované a pro dosažení žádoucích výsledků je nutno surová data naměřená SMM integrovat viz následující Obr. 45. V kladné polorovině osy X je P-oblast a v záporné polorovině leží N-oblast. [18]



Obrázek 46 Zintegrovaná data řezu deskou

Pomocí vertikálního řezu byla data zintegrovaná a následně byl vytvořen graf v softwaru Origin. Na ose X je znázorněna hloubka v [um] Si desky a na ose Y je integrace z U [V]. Při srovnání výsledného grafu se zadáním lze říci, že jednotlivé koncentrace se nachází ve správné hloubce Si desky. Tento krok slouží pro ověření správnosti zadaných parametrů. [18]



Obrázek 47 Znázornění postupu

Obr. 47 znázorňuje celý postup práce. V levém dolním rohu je snímek pořízený před výrobou, nad ním je ukázka z SMM, v pravém horním rohu je vertikální řez z předešlého snímku a poslední snímek znázorňuje integraci. [18]

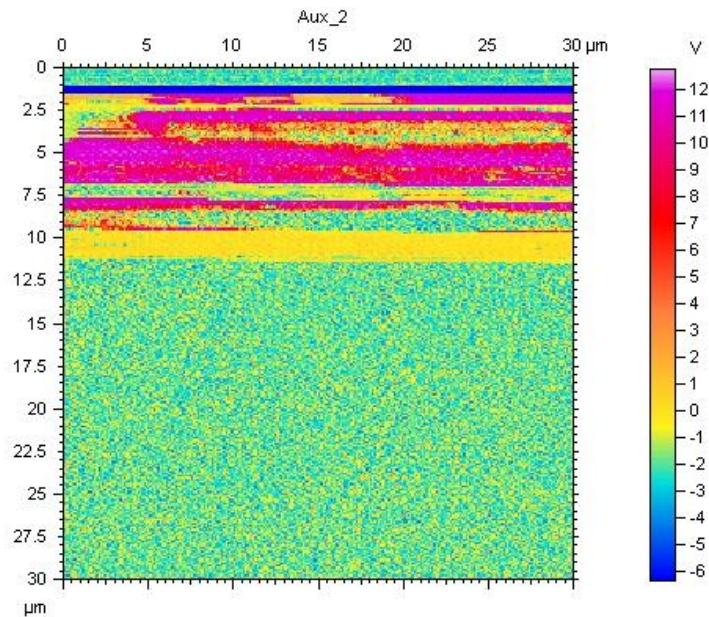
9.7.4 Cross s naleptáním

Dosažené výsledky byly naměřeny za těchto nastavených podmínek v SW pro AFM:

Přivedené napětí na hrot: $U = -3 \text{ V}$,

PNA frekvence: $f = 2,474705 \text{ GHz}$,

Počet bodů na řádek: 512



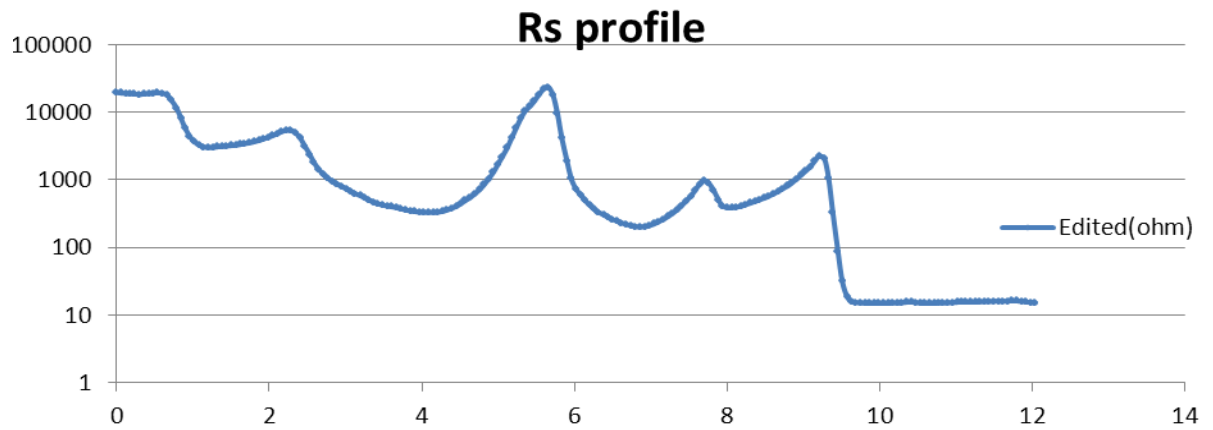
Obrázek 48 SMM zobrazení křemíkové desky TACL

Na Obr. 48 se opět potvrdilo, že na naleptané desce jsou jednotlivé koncentrace lépe viditelné. I když u této desky leptání nebylo nutné, veškeré koncentrace jsou viditelné i na neleptané desce. [18]

Tento snímek byl pořízen na ploše 30x30 μm, proto se může zdát, že snímky z neleptaného vzorku jsou lépe viditelné.

9.7.5 SRP Belgie

V laboratoři TACL byl naměřen SRP (Spreading Resistance Profiling - Rozšířený odporový Profil).



Obrázek 49 SRP křemíkové desky TACL

Pro tento typ desky byl naměřen SRP v laboratoři TACL Obr. 49. V porovnání se zintegrováním snímek lze vidět, že v hloubce 10 um, kde koncentrace nabývá nejvyšších hodnot, rezistivita nabývá hodnot nejnižších. [18]

ZÁVĚR

V teoretické části je vysvětlen princip měření Agilent 5420 AFM/SPM, jeho různé režimy, jako je např. AFM a SMM, jejich názorná ukázka ve 2D i ve 3D zobrazení. Dále je popsán princip metody konkurenčního mikroskopu SEM.

Ve druhé části teorie je popsán křemík, technologie výroby křemíku a následné nařezání na jednotlivé desky, které jsou dále nachystané pro výrobu čipů. Také je vysvětlen růst epitaxních vrstev se zaměřením na karuselový a jednodeskový reaktor. Tyto reaktory byly využity pro nanesení epitaxních vrstev pro praktickou část diplomové práce, a proto jim je zde věnována pozornost.

V praktické části byly měřeny koncentrace příměsí dopantů v křemíkových deskách pomocí režimů SMM a AFM. Na desce byly epitaxně narosteny koncentrace o různých velikostech. Tyto koncentrace dosahovaly hloubky 10-30 um. Jedním z úkolů bylo stanovit, jakou lze vidět nejnižší možnou koncentraci pomocí režimu SMM jak pro leptanou, tak i neleptanou desku. Jsou zde zobrazeny jednotlivé naměřené snímky různých metod, jako jsou např. změna amplitudy, změna fáze, PNA kapacitance. Aby se ověřilo, zda jsou naměřené údaje pravdivé, jsou tyto snímky následně porovnány s grafem ze SRPu a snímkem ze SEM. Dalším úkolem bylo zjišťovat pomocí SMM, jestli dochází při výrobě k odchylce od původně zadaných parametrů. Výsledky z SMM byly opět porovnávány s konkurenčními metodami. Tento typ desky byl pro porovnání výsledků zaslán do laboratoře TACL v Belgii.

Měření pomocí SMM je velice rozmanité a velice záleží na předem nastavených parametrech, jako je přiváděné napětí na hrot, zvolená frekvence PNA a nastavení AC modu v softwaru PicoView. Nastavení správných parametrů vychází většinou na základě heuristiky, z tohoto důvodu je práce SMM při nízkých koncentracích velice obtížná a časově náročná. Samotná délka měření na SMM je ovlivněna kvalitou měření a může se pohybovat od desítky minut až po několik hodin.

Koncentrace příměsí dopantů jsou v porovnání jednotlivých mikroskopií v metodě SMM lépe viditelné, zejména v oblasti nižších koncentrací ($<1e+17 \text{ cm}^{-3}$), a proto může být použití SMM metody pro nižší koncentrace příměsí vhodnější než použití SEM. Pro střední a vyšší koncentrace příměsí je citlivost obou metod srovnatelná. Výhodou metod pracujících s atomárními silami může být obecně vyšší dosažitelné rozlišení než u běžných

mikroskopů typu SEM. Další výhodou měření pomocí Agilent 5420 AFM/SPM je vytvoření barevného 3D obrazu nebo 3D animace. Za obecnou nevýhodu měření pomocí AFM mikroskopu lze považovat vysokou časovou náročnost snímání vzorku, která mnohonásobně převyšuje typické snímací časy elektronových mikroskopů.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In the theoretical part is explained the principle measurement Agilent 5420 AFM / SPM, its various modes, such as AFM and SMM, their demonstration in 2D and 3D. Moreover there is described the principle of competitive method microscope SEM.

In the second part of the theory are described silicon, silicon technology and afterwards incision on wafers, which are prepared for further production of chips. There is explained a growth of epitaxial layers with a concentrate on the carousel and singlewafer reactor. These reactors were used for the deposition of epitaxial layers for the practical part of the diploma thesis, and therefore it is mentioned here.

In the practical part, the concentrations were measured dopant concentration in silicon wafers with a mode of SMM and AFM. On wafer, the concentration of various sizes, were epitaxially grown. These concentrations achieved a depth of 10-30um. One of the tasks was to determine what is the lowest possible concentration of SMM mode as etched, and non-etched wafers. In this work are shown measured images various method, for example PNA amplitude, PNA phase, PNA capacitance. To verify that the measured data are true, images are compared with the graph of SRP and image from SEM. The next task was finding out by using SMM, if there is a departure from the originally specified parameters. Results of SMM were again compared with competing methods. This type of wafer was sent to a laboratory TACL in Belgium in a case of comparing the results.

Measurement by the SMM is very diverse and highly depends on the preset parameters, such as the applied voltage to the tip, the selected frequency PNA and setting AC mode in software PicoView. The setting of right parameters originally come from heuristic, therefore working on SMM with using low confrontation is really difficult and time consuming. The length of measurement SMM is influenced by quality of measurement and it takes different time- sometimes ten minutes, on the other hand it can also take many hours.

Dopand concentration is better seen in SMM method then in other microscopic methods. Especially in lower concentrations ($<1e+17 \text{ cm}^{-3}$) is better to use SMM method then SEM. For middle and higher dopand concentration it is quite similar.

The advantage of methods, which works with atomic force, can be higher distinction, then with a normal microscope SEM. Other advantage of measuring by Agilent 5420

AFM/SPM is creation of colorful 3D picture and animation. The main disadvantage of AFM microscope is high time consuming, when the pictures are taken. This time is extremely long, comparing typical time taken with electronic microscopes.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*. Kanada: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-63882-8.
- [2] AGILENT TECHNOLOGIES. *Calibrated nanoscale capacitance measurements using a scanning microwave microscope*. Linz, 2010.
- [3] Technologie výroby křemíku. *On Semiconductor: výroba křemíku* [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z:
<http://www.onsemi.com/PowerSolutions/content.do?id=15031>
- [4] Epitaxe. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe>
- [5] *Technology of Integrated Circuits*. Germany: Springer, 2000. ISBN 3-54066199-9.
- [6] Spreading resistance profiling. *Lamp* [online]. 2005 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z:
<http://lamp.tu-graz.ac.at/~hadley/sem/srp/srp.php>
- [7] The Effect of Carrier Spilling on SRP Accuracy: SRP Measurements. SILVACO, Inc. [Http://www.silvaco.com/](http://www.silvaco.com/) [online]. 2013 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z:
http://www.silvaco.com/tech_lib_TCAD/simulationstandard/2003/aug/a1/a1.html
- [8] Monokrystal. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-24]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Monokrystal>
- [9] Slovník. [Http://www.person.vsb.cz/](http://www.person.vsb.cz/) [online]. 2010 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z:
http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/video/2_EPITAXE/Epi_slov.pdf
- [10] Scanning electron microscope. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-26]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope

- [11] Elektronová mikroskopie pro biology: Kapitola 7.1 - Konstrukce mikroskopu. *Http://www.paru.cas.cz/* [online]. 2001 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.1.html>
- [12] Elektronová mikroskopie pro biology: Kapitola 7.2 - Tvorba obrazu. *Http://www.paru.cas.cz/* [online]. 2001 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.2.html>
- [13] Mikroskopie atomárních sil (AFM): praktické měření. *Laboratoř mikroskopie atomárních sil* [online]. 2004 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/afm.pdf>
- [14] Studium biologických vzorků metodou AFM. *Laboratoř mikroskopie atomárních sil* [online]. 2004 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://atmilab.upol.cz/texty/dipl_bio.pdf
- [15] KUBÍNEK, Roman, Hana KOLÁŘOVÁ a Renata HOLUBOVÁ. *Využití mikroskopie atomárních sil v biologických oborech* [online]. Olomouc, 2012 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/afmbio.pdf>. Prezentace. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [16] AFM mikroskopie. *Htest* [online]. 2012 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.htest.cz/index.php?produkt=552>
- [17] Frontiers of Electronic Measurement. *Agilent Technologies* [online]. 2009 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.agilent.com/labs/features/2009_electronics.html
- [18] JOHANIDESOVÁ, Eva, Josef KUDĚLKA a Tomáš MARTÍNEK. *APLIKACE MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL (AFM) A SKENOVACÍ MIKROVLNNÉ MIKROSKOPIE (SMM) PŘI STUDIU PN PŘECHODŮ*. Zlín, 2013. Studentská tvůrčí a odborná činnost STOČ. UTB Zlín.
- [19] FENNER, Mathias. AGILENT TECHNOLOGIES. *Scanning Microwave Microscopy: Introduction - Training*. Linz, 2011.
- [20] TECHNOLOGIE RŮSTU MONOKRYSTALŮ KŘEMÍKU CZOCHRALSKIHO METODOU. LORENC, ŠIK a VÁLEK. *Silicon*[online]. 2004 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf

- [211] KUDĚLKA a MARTÍNEK. *MIKROVLNNÁ SKENOVACÍ MIKROSKOPIE*. Zlín, 2012. Dostupné z: <http://akce.fs.vsb.cz/2012/stoc2012/soutezni prace/kudelka-martinek.pdf>. STOČ. UTB.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFM	mikroskopie atomárních sil
C	koncentrace příměsí
D	difúzní koeficient
DUT	Device Under Test
j	průtok plynu
nm	nanometr
PNA	výkonový síťový analyzátor
Rc	poloměr zakřivení
RF	rádiové frekvence
Rho	rezistivita
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
Si	křemík
SID	křemíková deska
SMM	skenovací mikrovlnná mikroskopie
SPM	mikroskopie skenující sondy
SRP	rozšířený odporový profil
SW	software
um	mikrometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Agilent 5420 AFM/SPM	11
Obrázek 2 Topografie P-N přechodu	12
Obrázek 3 Zobrazení 3D snímku	13
Obrázek 4 Působení sil mezi hrotem a vzorkem.....	14
Obrázek 5 Odražení laserového paprsku od nosníku.....	15
Obrázek 6 Porovnání poloměru zakřivení konce hrotu	15
Obrázek 7 Typy nosníku a) „V“ b) plochý kvádr	15
Obrázek 8 SW PicoView	16
Obrázek 9 SMM modul [17].....	17
Obrázek 10 elektronika SMM.....	17
Obrázek 11 DTU.....	17
Obrázek 12 Naměřené výsledky AFM, SMM	18
Obrázek 13 Konstrukce SEM	19
Obrázek 14 Růst monokrystalu.....	21
Obrázek 15 Nařezané desky.....	21
Obrázek 16 reaktor - Karuselový typ	22
Obrázek 17 Proces 2	23
Obrázek 18 Proces 3	23
Obrázek 19 procesy.....	24
Obrázek 20 Jednodeskový reaktor	24
Obrázek 21 znázorněný SRP	25
Obrázek 22 AC mode	28
Obrázek 23 Křemíková deska bez ochranné vrstvy nitridu	29
Obrázek 24 Cross bez naleptání.....	29
Obrázek 25 vertikální řez PNA_Kapacitance	30
Obrázek 26 PNA_Kapacitance	31
Obrázek 27 PNA_Capacitance – zobrazení C [F] ve dvou bodech.....	31
Obrázek 28 Aux_1 - PNA amplituda.....	32
Obrázek 29 Zobrazení všech měření.....	32
Obrázek 30 SRP – Si deska bez pasivace	33
Obrázek 31 SEM.....	34

Obrázek 32 Křemíková deska s ochrannou vrstvou nitridu.....	35
Obrázek 33 PNA – amplituda, fáze	36
Obrázek 34 PNA amplituda naleptané desky	37
Obrázek 35 PNA amplituda naleptané Si desky ve 3D	37
Obrázek 36 Dopant Concentration - horizontal	38
Obrázek 37 vertikální řez z naměřeného snímku z SMM	38
Obrázek 38 Dopant Concentration 2 – vertical.....	38
Obrázek 39 SRP - Si deska s pasivací	39
Obrázek 40 Snímek ze SEM.....	39
Obrázek 41 Zadané parametry před výrobou Si desky TACL.....	40
Obrázek 42 PNA fáze	41
Obrázek 43 SMM zobrazení křemíkové desky TACL	41
Obrázek 44 3D zobrazení křemíkové desky TACL.....	42
Obrázek 45 Vertikální řez z naměřeného snímku z SMM.....	42
Obrázek 46 Zintegrovaná data řezu deskou	43
Obrázek 47 Znázornění postupu	43
Obrázek 48 SMM zobrazení křemíkové desky TACL	44
Obrázek 49 SRP křemíkové desky TACL	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 naměřená data ze SRPu.....	34
--------------------------------------	----

SEZNAM PŘÍLOH

PI SRP bez pasivace

PII SRP s pasivací