



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

# IN-SITU CHARAKTERIZACE POLOVODIČŮ POMOCÍ TECHNIK RASTRUJÍCÍ SONDOVÉ MIKROSKOPIE

IN-SITU CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTORS USING SCANNING PROBE MICROSCOPY  
TECHNIQUES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ADAM OČKOVIČ

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVERA, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství  
Student: **Bc. Adam Očkovič**  
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Pavera, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **In–situ charakterizace polovodičů pomocí technik rastrující sondové mikroskopie**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Polovodiče jsou základním stavebním kamenem moderní elektroniky a informačních technologií. Jejich unikátní elektrické vlastnosti jsou klíčové pro vývoj efektivních a výkonných elektronických součástek. Vzhledem k rostoucím nárokům na miniaturizaci a efektivitu elektronických zařízení je nezbytná důkladná znalost a detailní charakterizace vlastností polovodičových materiálů. Techniky rastrující sondové mikroskopie (SPM) nabízí možnosti detailního zkoumání například povrchových, nebo elektrických vlastností polovodičů na nanometrové úrovni. Tyto techniky umožňují nejenom vizualizaci mikro a nanostruktur, ale také měření elektrických vlastností, jako jsou například lokální vodivost, kapacita, povrchový potenciál a jiné, což je zásadní pro optimalizaci výrobních procesů a zvyšování výkonu polovodičových součástek. Zaměřením této práce bude ověření a vývoj metod měření pro charakterizaci polovodičových struktur a komponent za použití in–situ technik SPM v kombinaci s elektronovým mikroskopem. Vypracované metody poskytnou možnost identifikovat prostorově specifické příčiny selhání polovodičových součástek, což může přispět k optimalizaci výrobních procesů. Práce vyžaduje nejen znalosti specifických měřících technik a analýzu získaných dat, ale také porozumění širšímu kontextu využití polovodičů a jejich výrobních procesů. Práce by měla kombinovat teoretické poznatky s praktickými experimenty a nabízet ucelený pohled na možnosti a výzvy spojené s charakterizací polovodičů pomocí SPM.

**Cíle diplomové práce:**

- 1) Proveďte rešerši současných metod a přístupů v oblasti měření a charakterizace polovodičů.
- 2) Navrhněte a realizujte experimenty zaměřené na charakterizaci polovodičů s použitím technik in-situ SPM.
- 3) Analyzujte získaná data a vyhodnoťte možnosti využití zjištěných informací při analýze příčin selhání polovodičových součástek.

**Seznam doporučené literatury:**

MEYER, Ernst, Hans Josef HUG a Roland BENNEWITZ. Scanning probe microscopy: the lab on a tip. Berlin: Springer, c2004. Advanced texts in physics. ISBN 35-404-3180-2.

VŮJTEK, Milan, Roman KUBÍNEK a Miroslav MAŠLÁŇ. Nanoskopie. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.

NEAMEN, Donald A. Semiconductor physics and Devices Basic Principles. McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0073529585.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zaměřuje na analýzu polovodičových součástí pomocí rastrovací sondové mikroskopie. V první části jsou krystalické látky rozděleny dle elektrických vlastností. Poté je uvedena teorie vlastních a nevlastních polovodičů, PN přechod a nakonec jsou představeny základní typy a funkce tranzistorů. Ve druhé kapitole jsou uvedeny techniky SPM a jejich principy fungování, které jsou vhodné pro poruchovou analýzu polovodičových součástí. Ve třetí kapitole je představena měřicí sestava, která se skládá z rastrovacího elektronového mikroskopu MIRA a rastrovacího sondového mikroskopu LiteScope, který využívá samosnímací sondy. Ve čtvrté kapitole jsou představeny polovodičové vzorky, kterými byly wolframové prokovy v řezu CMOS čipu, řez bipolárním tranzistorem a lamela unipolárního tranzistoru MOSFET. Na těchto vzorcích byla v poslední kapitole provedena analýza technikami AFM, CAFM, EFM, KPFM a SSRM. U každé techniky a vzorku byla provedena analýza změřených dat. Společně s technikami byly představeny základní omezení a zajímavé výstupy pro poruchovou analýzu.

## **Summary**

The thesis focuses on the analysis of semiconductor components using scanning probe microscopy. In the first part, crystalline substances are classified according to their electrical properties. Then, the theory of intrinsic and extrinsic semiconductors, PN transitions and finally the basic types and functions of transistors are introduced. In the second section, SPM techniques and their principles of operation are presented, which are suitable for failure analysis of semiconductor devices. The third chapter introduces the measurement setup, which consists of a scanning electron microscope MIRA and a scanning probe microscope LiteScope, which uses self-sensing probes. In the fourth chapter, the semiconductor samples analyzed were tungsten plugs in a cross-section of CMOS chip, a cross-section of bipolar transistor, and a lamella of unipolar MOSFET transistor. Analysis of these samples was performed using AFM, CAFM, EFM, KPFM and SSRM techniques in the last chapter. For each technique and sample, an analysis of the measured data was performed. Together with the techniques, the basic limitations and interesting outputs for failure analysis were presented.

## **Klíčová slova**

Poruchová analýza, polovodiče, CMOS, bipolární tranzistor, MOSFET, SPM-SEM, AFM, CAFM, EFM, KPFM, SSRM, samosnímací sondy

## **Keywords**

Failure analysis, semiconductors, CMOS, bipolar transistor, MOSFET, SPM-SEM, AFM, CAFM, EFM, KPFM, SSRM, self-sensing probes

OČKOVIČ, A. *In-situ charakterizace polovodičů pomocí technik rastrující sondové mikroskopie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pavera, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *In-situ charakterizace polovodičů pomocí technik rastrující sondové mikroskopie* vypracoval sám s odborným vedením mého vedoucího, a že veškerá použitá literatura je uvedena v seznamu citací.

Bc. Adam Očkovič





Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu doktoru Ing. Michalu Paverovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Také bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Novotnému za jeho užitečné rady během měření a analýzy. Dále bych rád poděkoval firmě NenoVision, která mi umožnila provádět měření na jejich mikroskopu LiteScope, infrastruktúře CEITEC, díky které jsou mohl využívat přístroje a čisté prostory k provádění analýzy. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za podporu během studia.

Bc. Adam Očkovič



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>1 Polovodiče a polovodičové součástky</b>	<b>5</b>
1.1 Elektrická vodivost krystalických látek . . . . .	5
1.2 Polovodiče . . . . .	9
1.2.1 Polovodič typu N . . . . .	10
1.2.2 Polovodič typu P . . . . .	11
1.2.3 PN přechod . . . . .	12
1.3 Polovodičové součástky . . . . .	14
1.3.1 Bipolární tranzistor . . . . .	15
1.3.2 Unipolární tranzistor . . . . .	16
1.3.3 Kombinovaný tranzistor . . . . .	18
<b>2 Charakterizace polovodičových součástek metodami SPM</b>	<b>19</b>
2.1 Mikroskopie atomárních sil . . . . .	20
2.2 Mikroskopie lokální vodivosti . . . . .	21
2.3 Mikroskopie elektrostatických sil . . . . .	22
2.4 Rastrovací Kelvinova mikroskopie . . . . .	23
2.5 Rastrovací mikroskopie šířícího se odporu . . . . .	25
2.6 Rastrovací kapacitní mikroskopie . . . . .	27
<b>3 Měřicí sestava pro SPM-SEM analýzu</b>	<b>29</b>
3.1 Rastrovací elektronový mikroskop . . . . .	30
3.2 SPM mikroskop LiteScope . . . . .	31
3.2.1 Sondy se samosnímacím senzorem . . . . .	32
3.3 Navigace sondy na vzorek . . . . .	34
<b>4 Polovodičové vzorky</b>	<b>37</b>
4.1 Wolframové prokvy v čipu typu CMOS . . . . .	37
4.2 Bipolární tranzistor . . . . .	39
4.3 Unipolární tranzistor MOSFET . . . . .	40
4.4 P dopovaný referenční vzorek pro techniku SSRM . . . . .	42
<b>5 Analýza polovodičových vzorků</b>	<b>43</b>
5.1 Mikroskopie atomárních sil . . . . .	43
5.2 Mikroskopie lokální vodivosti . . . . .	45
5.3 Mikroskopie elektrostatických sil . . . . .	51
5.4 Rastrovací Kelvinova mikroskopie . . . . .	55
5.5 Rastrovací mikroskopie šířícího se odporu . . . . .	60
<b>Závěr</b>	<b>67</b>
<b>Literatura</b>	<b>69</b>



# Úvod

Polovodičový průmysl je jeden z nejrychleji se rozvíjejících odvětví průmyslu. Jeho původ sahá do poloviny devatenáctého století a během této doby prošel dramatickým vývojem [1]. Od původních tranzistorů, které dokázaly spínat a zesilovat proud, vznikly složité integrované obvody a výkonné čipy, které zpracovávají signály a provádějí nejrůznější logické operace. Polovodičové součástky jsou dnes již součástí téměř každého elektronického zařízení jako jsou počítače, automobily, mobilní telefony a telekomunikační zařízení [2]. Vývoj tohoto průmyslu vedl ke zmenšování součástek, a tím zvyšování výkonosti čipů, což je cílem všech polovodičových společností. Výkonnost čipů ale nemůže růst do nekonečna a existuje limit, který vývoj zastaví. Tímto limitem je velikost kritických rozměrů v polovodičové součástce, která dosáhne atomární úrovně [3]. V takovém případě už nebude možné zvyšovat počet takovýchto součástek na ploše čipu a výkonnost tak zmenšováním součástek neporoste. Nicméně v současné době je k tomuto limitu stále ještě daleko.

Výroba čipů se skládá z mnoha chemických a fyzikálních procesů, které jako celek tvoří velmi komplexní výrobní proces. Během výroby jsou využívány litografické, depoziční, leptací a implantační metody. Pro to, aby se vývoj a zmenšování součástek mohl posouvat kupředu, je potřeba neustále upravovat a zdokonalovat všechny tyto procesy, které občas čelí velkým výzvám.

Nedokonalost některého z procesu může vést k nefunkčnosti celého čipu, což může mít dopad v kritických aplikacích jako jsou lékařská zařízení nebo právě automobily. Je velmi důležité důvod nefunkčnosti najít, analyzovat a upravit výrobní proces tak, aby k těmto poruchám nedocházelo. Takovéto analýze se říká poruchová analýza (FA, *Failure Analysis*) a je důležitou součástí výzkumných a vývojových oddělení v polovodičových společnostech. Během této analýzy jsou měřeny nejrůznější parametry, jako je například tloušťka oxidových vrstev, správný typ a oblast dopování, geometrická pravidelnost, drsnost a čistota povrchu, čistota materiálu a správnost kontaktů metalizace [4].

Vyrobít součástku s limitními rozměry daného procesu je jedna věc. Nicméně analyzovat tuto součástku je věc druhá, a v tomto případě je nezbytné dosahovat vyššího rozlišení než má daný výrobní proces, aby byly jednotlivé části součástky rozlišitelné. Díky takovým technikám lze součástku analyzovat, a tím upravovat a zlepšovat daný výrobní proces. Běžně se k této analýze používá rentgenová tomografie či elektronová mikroskopie. Nicméně velmi užitečnou je také rastrovací sondová mikroskopie (SPM, *Scanning Probe Microscopy*), která dosahuje svým rozlišením subnanometrové úrovně. Současně lze pomocí této skupiny technik provádět velké množství podrobné analýzy jako je měření topografických, mechanických, elektrických a magnetických vlastností [5]. Polovodiče jsou především významné díky svým elektrickým vlastnostem, a proto je důležité analyzovat především jejich elektrické vlastnosti.

Bohužel s miniaturizací součástek se váže také problém s navigací SPM sondy, která má dané místo analyzovat. U běžných SPM mikroskopů je tato navigace umožněna pomocí optického mikroskopu, který ovšem nedosahuje dostatečného rozlišení pro přesnou navigaci. Mnohem zajímavější by bylo využít SPM mikroskop s rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM, *Scanning Electron Microscopy*). Ten dosahuje výrazně větších rozlišení a navigace sondy na místo zájmu by tak byla velmi přesná. Nicméně této kombinaci SPM-SEM překáží detekční systém, který zabírá veškerý prostor nad sondou a navigace elektronovým mikroskopem by tak byla znemožněna. Existují ovšem sondy, které nepo-

## ÚVOD

třebují optickou detekci, a jsou vhodné k tomu, aby kombinací SPM-SEM umožnily velmi přesnou navigaci.

Budoucnost této kombinace nakonec nespočívá jen v přesné navigaci SPM sondy na místo zájmu a následné analýze touto technikou. Ale jednotlivé mikroskopické techniky lze mezi sebou kombinovat a korelovat a tím získávat cenné informace, které by za běžných podmínek pomocí samotného SPM mikroskopu nebyly dosažitelné. Kombinace SPM-SEM otevírá cestu ke korelativní analýze polovodičových součástek, která může poskytovat důležité informace v poruchové analýze.

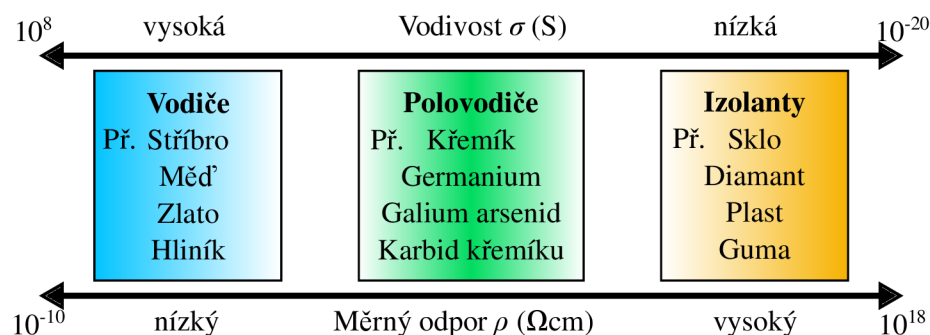
# 1. Polovodiče a polovodičové součástky

V této kapitole je pojednáváno o elektrických vlastnostech krystalických látek a jejich využitím v polovodičových součástkách. Elektrické vlastnosti krystalů jsou klíčové pro porozumění chování polovodičů a jejich schopnost vedení elektrického proudu. Postupně je provedeno rozdělení podle měrného odporu, pásové struktury či chemické vazby. Dále je popsáno vedení elektrického proudu v polovodičích a vytváření elektrostatických polí v PN přechodech. Tyto pojmy jsou nezbytné pro pochopení fungování polovodičových součástek, jako jsou diody, tranzistory a integrované obvody, které tvoří základ moderní elektroniky. Před zkoumáním funkce základních součástek v integrovaném obvodu je důležité pochopit základní elektrické vlastnosti polovodičů a jejich krystalické struktury.

## 1.1. Elektrická vodivost krystalických látek

Krystalické látky lze rozdělit podle elektrických vlastností do tří základních kategorií - vodiče, polovodiče a izolanty. Vodiče jsou takové látky, které při přiložení vnějšího elektrického napětí vedou elektrický proud. Polovodiče jsou látky, které proud vedou jen za určitých podmínek. A izolant je taková látka, která nevede elektrický proud. První způsob rozdělení, jak poznat zda je látka vodič, polovodič či izolant, je rozdělení podle měrného elektrického odporu  $\rho$  (převrácená hodnota měrné elektrické vodivosti  $\sigma = \rho^{-1}$ ). U vodičů se měrný odpor pohybuje v intervalu od  $1 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$  do  $1 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ . Pro polovodiče platí, že měrný odpor je typicky v intervalu od  $1 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$  do  $1 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$ . A pro izolanty je typické, že je jejich odpor větší jak  $1 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$ . Nejlepším vodičem je stříbro s měrným elektrickým odporem  $1,6 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$  a nejlepším izolantem je diamant, který má měrný odpor  $3 \times 10^{18} \Omega \text{ cm}$  (obrázek 1.1)[6].

Druhým kritériem pro rozdělení je podle závislosti měrného odporu na teplotě. U vodičů s rostoucí teplotou roste měrný odpor (klesá vodivost), naopak u polovodičů a izolantů měrný odpor klesá (roste vodivost). Za dostatečně vysoké teploty lze z polovodiče či izolantu udělat dobrý vodič. Nicméně u izolantu tomu brání materiálové vlastnosti a při vysokých teplotách dochází k tání krystalické látky. Tento způsob rozdělení ovšem bere v úvahu pouze makroskopické vlastnosti látek [7].



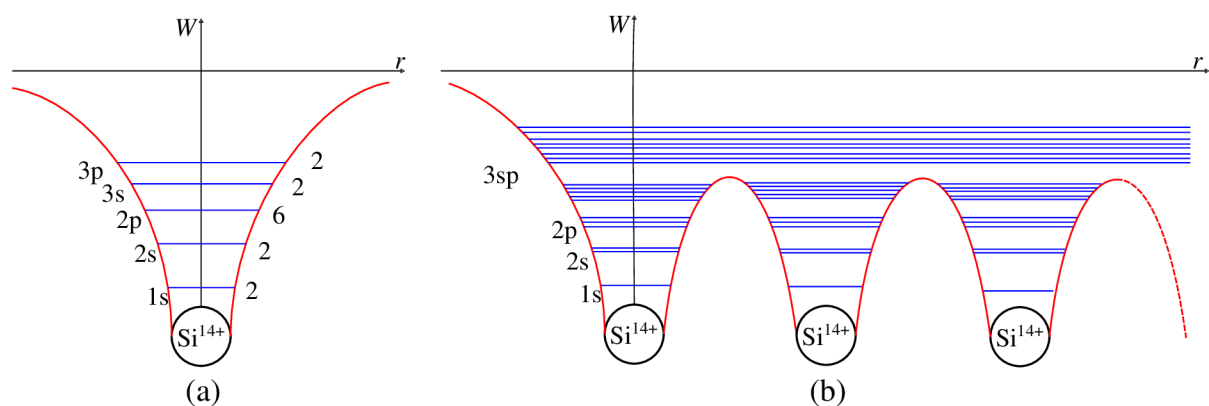
Obrázek 1.1: Schéma rozdělení vodičů, polovodičů a izolantů podle měrné elektrické vodivosti a měrného odporu.

## 1.1. ELEKTRICKÁ VODIVOST KRYSTALICKÝCH LÁTEK

Z mikroskopického hlediska lze elektrickou vodivost, případně měrný odpor, krystalické látky předpovídat podle typu vazby, kterou jsou atomy v látce vázány, a druhů atomů, které krystalickou látku tvoří. Určitý druh vazby může vzniknout pro některé druhy atomů a pro jiné to není možné. Elektrická vodivost je převážně určena druhem vazby. Častěji se tyto látky rozlišují podle pásové struktury, která je typickou charakteristikou krystalických látek.

Atomy se skládají z kladného jádra a záporného elektronového obalu. Jádro atomu tvoří kladné protony a neutrální neutrony. Elektronový obal je prostor kolem jádra, kde se nacházejí elektrony. Atom je jako celek neutrální a je tedy tvořen stejným počtem protonů a elektronů. Elektrony se v elektronovém obalu mohou dle výpočtů a experimentů z kvantové teorie nacházet jen v určitých stavech. Tyto stavy se nazývají energetické hladiny atomu, protože atom vytváří pro elektrony potenciálovou díru, ve které elektrony obsazují jen dovolené stavy s určitou energií. Takovýchto hladin má atom nespočetně a každá hladina má svou energii. Elektrony nacházející se nejbližší jádra obsazují hladiny, které mají nejnižší potenciální energii (elektrony nejsilněji vázány k jádru) a naopak elektrony vzdálené od jádra obsazují hladiny energetičtější (elektrony méně vázané k jádru). Elektrony v atomu obsazují vždy hladiny od nejnižší potenciální energie a počet obsazených hladin je vždy roven počtu elektronů v atomu. Pro křemíkový atom, který má čtrnáct elektronů, budou obsazené hladiny 1s 2s 2p 3s a hladina 3p bude zaplněna pouze částečně (obrázek 1.2a). Nejenenergetičtější elektron (elektrony nejdále od jádra) se nazývají elektrony valenční [8].

Začnou-li se atomy (potenciálové jámy) k sobě přibližovat a skládat do krystalové mřížky, bude docházet k překrývání elektronových obalů (hladin) jednotlivých atomů. Kvůli kvantovému principu označovanému jako Pauliho vylučovací princip, který říká, že dva elektrony v celém krystalu nesmějí obsazovat stejný stav, dojde k rozštěpení energetických hladin a k vytvoření energetických pásem (obrázek 1.2b). Pásky se skládají z diskretních hladin, nicméně počet těchto hladin v pásmu je dán počtem atomů v krystalu a lze tedy tento pás považovat za spojitý. Pás je tím větší, čím je hladina energetičtější (větší vzájemné ovlivňování). Pro hladiny nejbližší k jádru k rozštěpení prakticky nedochází, protože se tyto



Obrázek 1.2: Schématické znázornění energetických hladin a pásem. (a) Energetické hladiny (stavy) atomu křemíku. Čísla vpravo vyjadřují počet elektronů na určité hladině a v levé části jsou označeny názvy slupek – hladin. (b) Pásová struktura vzniklá přibližováním atomů křemíku k sobě.  $W$  označuje potenciální energii a  $r$  vzdálenost od středu atomu. V levé části jsou opět názvy slupek.



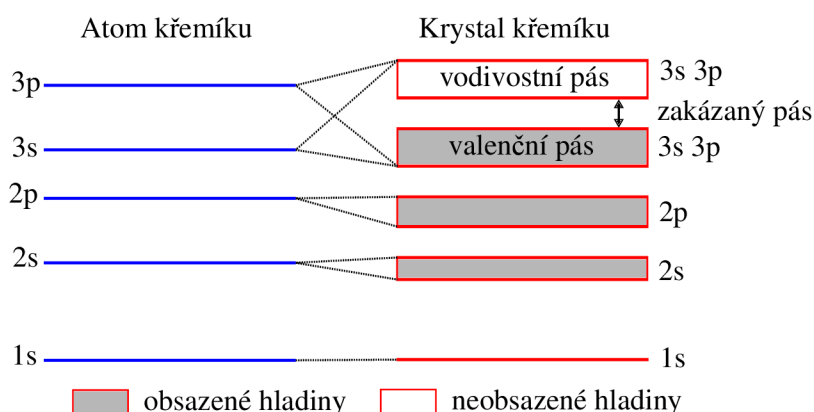
## 1. POLOVODIČE A POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY

slupky elektronového obalu nepřekrývají a hladiny se tak vzájemně neovlivňují. Každá krystalická látka má svou určitou pásovou strukturu, která je pro ni charakteristická.

Každá pásová struktura obsahuje valenční a vodivostní pás. Valenční pás je soubor hladin, které jsou v krystalu obsazeny valenčními elektrony, při absolutní nule (0 K). Jsou to tedy elektrony, které obsazují nejenergetičtější hladiny v krystalu. Elektron ve valenčním pásu je vázán k atomu a nemůže se v krystalu pohybovat volně. Vodivostní pás začíná první neobsazenou hladinou v krystalu (obrázek 1.3)[2].

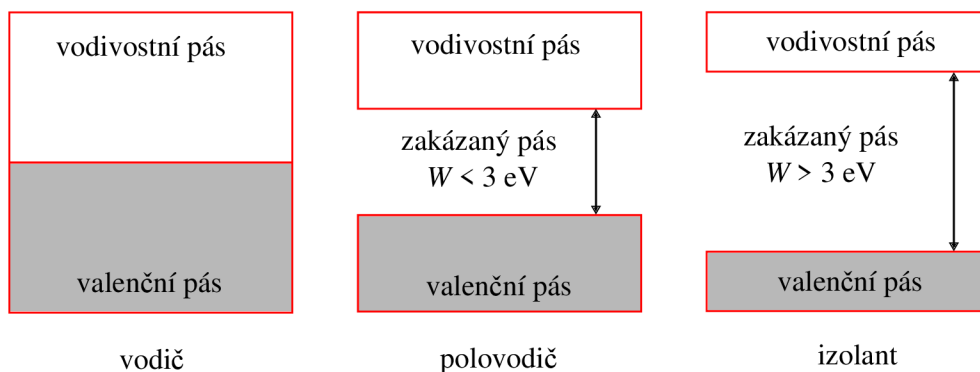
Elektron, který se nachází ve vodivostním pásu, se stává volným nosičem náboje v krystalu a přispívá k elektrické vodivosti. Takovýto elektron se v krystalu pohybuje snáz jak elektron ve valenčním pásu, protože nemusí překonávat potenciálové bariéry jednotlivých atomů. Při absolutní nule jsou všechny valenční elektrony ve valenčním pásu a žádný elektron není v pásu vodivostním. Při vyšších teplotách dochází k excitacím valenčních elektronů do vodivostního pásu a krystal může vést elektrický proud. Mezi vodivostním pásem a pásem valenčním může vzniknout zakázaný pás energií, který je potřeba překonat, aby se elektron stal volným nosičem náboje. Podle šířky zakázaného pásu lze rozlišit polovodiče či izolanty. Pro vodiče se běžně nedefinuje valenční a vodivostní pás, protože oba tyto pásy jsou součástí jednoho pásu. Šířka zakázaného pásu u vodičů by tedy byla nulová a vodivostní pás by tak navazoval na pás valenční. K excitaci elektronu z pásu valenčního do vodivostního jsou potřeba jen malé termální energie. Pro polovodiče a izolanty vzniká mezi valenčním a vodivostním pásem zakázaný pás energií, kde se pro elektrony žádné stavy nevyskytují. Rozdíl mezi polovodičem a izolantem je ve velikosti tohoto zakázaného pásu. Pro polovodiče je šířka zakázaného pásu běžně do tří elektronvoltů. U izolantů je šířka zakázaného pásu více jak tři elektronvolty (obrázek 1.4)[6]. Existují ovšem výjimky jako je například karbid křemíku (SiC), který má šířku zakázaného pásu větší jak tři elektronvolty, a přesto je polovodičem. Takovéto látky jsou poté využívány ve vysokonapětových součástkách pro jejich vysoké průrazné napětí.

Dalším způsobem rozdělení je podle druhu vazby. Mezi základní vazby patří iontová, kovalentní a kovová vazba. Iontová vazba vzniká mezi kladně nabitým iontem (atomu chybí jeden elektron v elektronovém obalu) a záporně nabitým iontem (atom má jeden elektron v elektronovém obalu navíc). Převážně se takto vážou atomy, které rády odevzdávají elektron, a atomy, které elektron rády přijmou. Atomy, které rády elektron odevzdají,



Obrázek 1.3: Schématické znázornění diskrétních energiových hladin atomu křemíku (vlevo), které se při přibližování atomů k sobě rozštěpí a vzniknou energiové pásy krystalu (vpravo).

## 1.1. ELEKTRICKÁ VODIVOST KRYSTALICKÝCH LÁTEK



Obrázek 1.4: Schématické rozdělení vodičů, polovodičů a izolantů podle pásové struktury (šířky zakázaného pásu). Vodiče mají nulový zakázaný pás, polovodiče mají šířku zakázaného pásu nižší než 3 eV a izolanty mají šířku zakázaného pásu větší jak 3 eV.

jsou atomy z prvního sloupce periodické tabulky prvků (alkalické kovy – Li, Na, K). Takovéto atomy mají pouze jeden valenční elektron ve vnější slupce, který není silně vázán k jádru. A atomy, které rády elektron přijmou, jsou atomy z předposledního sloupce periodické tabulky prvků (halogeny – F, Cl, Br). Těmto atomům chybí jeden elektron k zaplnění vnější slupky. Kladně a záporně nabitě ionty se přitahují elektrostatickou silou až do chvíle, kdy jsou u sebe tak blízko, že dojde k překrývání elektronových obalů. V tu chvíli dochází k odpuzování iontů od sebe důsledkem Pauliho vylučovacího principu. Existuje ovšem rovnováha mezi přitažlivou elektrostatickou silou a odpudivou silou způsobenou Pauliho vylučovacím principem. V této rovnováze jsou atomy k sobě svázány iontovou vazbou. Hustota náboje mezi atomy je nulová, elektrony jsou vázány k atomům, a tedy nevzniká zde žádný volný náboj, který by se mohl v krystalu pohybovat. Krystaly, které drží pohromadě iontovou vazbou, jsou izolanty. Typickým příkladem je krystal soli kamenné (NaCl) [9].

Druhým typem vazby je kovalentní vazba, která vzniká svázáním elektronů s navzájem opačným spinem. Atom se k dalšímu atomu váže pomocí valenčních elektronů. Spárování elektronů s opačným spinem je přitažlivá interakce a odpudivá interakce je opět síla založená na Pauliho vylučovacím principu. Kovalentní vazba může vzniknout pouze svázáním elektronů s opačným spinem. Mají-li elektrony stejný spin, k vytvoření vazby nedojde. Hustota náboje mezi vázanými atomy není nulová, náboj je lokalizovaný mezi atomy. Elektron se v důsledku tepelné energie může uvolnit a přispět k vodivosti krystalu, což je příčinou zvýšené vodivosti při vyšší teplotě. Při takovémto uvolnění elektronu, který se stává volným nosičem náboje, dochází k vytvoření díry (volný stav ve valenčním pásu) v místě, kde se elektron původně nacházel. Takováto díra je místo v krystalu, kde chybí elektron v původní kovalentní vazbě. Do tohoto místa může přeskočit valenční elektron, který tvoří kovalentní vazbu blízko díry. Přeskočí-li elektron do díry, tak tuto díru zaplní, ale zanechá na svém původním místě novou díru. Tímto mechanismem dochází v krystalu k zdánlivému pohybu díry. Díra stejně jako elektrony ve vodivostním pásu přispívají k elektrické vodivosti ve valenčním pásu. Kovalentní vazba je typickým příkladem vazby u polovodičů. Příkladem atomů, které se vážou kovalentní vazbou a je polovodičem, jsou prvky druhé p skupiny, jako je křemík (Si), který má čtyři valenční elektrony. Takovýto atom může na sebe navázat pomocí čtyř kovalentních vazeb další čtyři atomy křemíku. Nicméně existují také izolanty, které se vážou kovalentní vazbou a typickým příkladem toho je diamant, který je složen z atomů uhlíku (C). U kovalentní vazby je důležitá vzdá-

lenost mezi jednotlivými vázanými atomy. Menší poloměr vázaných atomů způsobí větší šířku zakázaného pásu, což je zapříčiněno překrýváním energiových hladin, které jsou od sebe více vzdálené (nízkoenergiové hladiny)[10].

Poslední typ vazby je vazba kovová. Tato vazba vzniká mezi kovovými prvky, tedy atomy d skupiny. Kladné atomy bez valenčních elektronů vytvářejí mřížku kladných iontů a valenční elektrony tvoří elektronový plyn. Valenční elektrony jsou k atomům vázány slabě a mohou se v krystalu téměř volně pohybovat a přispívají k vodivosti krystalu. V případě zvyšování teploty dochází jak k excitacím elektronů z valenčního do vodivostního pásu, tak ke kmitům kladných iontů. Elektrony excitované do vodivostního pásu přispívající k vodivosti, avšak jsou rozptylovány o rozkmitané ionty. Tento efekt, který rozptyluje elektrony ve vodivostním pásu, způsobuje snížení elektrické vodivosti. V důsledky zvyšování teploty dochází tedy ke snižování elektrické vodivosti. Tento typ vazby je typický pro vodiče, protože se zde nachází velké množství volných elektronů. Příklady vodičů s kovovou vazbou je mnoho – hliník, měď, stříbro [2].

Vodiče jsou takové látky, které mají vysokou vodivost, nízký měrný odpor, nulový zakázaný pás, atomy vázané kovovou vazbou a jejich měrný odpor se zvyšující se teplotou roste. Polovodiče jsou látky s nižší vodivostí jak vodiče, mají vyšší měrný odpor oproti vodičům, šířka jejich zakázaného pásu je do tří elektronvoltů, atomy jsou vázány kovalentní vazbou a jejich měrný odpor se zvyšující se teplotou klesá. A nakonec izolanty jsou látky nevodivé s velmi malou vodivostí a obrovským měrným odporem, jejich šířka zakázaného pásu je větší jak tři elektronvolty a atomy jsou v látce vázány pomocí iontové či kovalentní vazby.

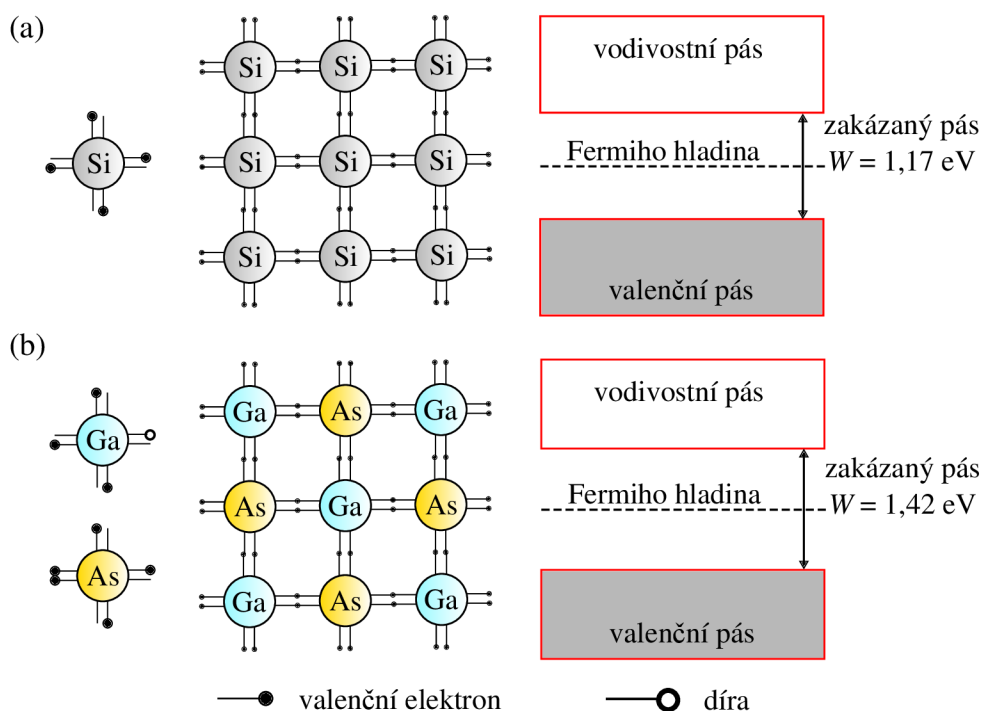
## 1.2. Polovodiče

Polovodiče jsou látky, které mají vlastnosti mezi vodičem a izolantem. Elektrony ve vodiči se snadno pohybují, zatímco v izolantu je tomuto pohybu bráněno. Polovodiče se vyznačují tím, že lze měnit jejich vodivost přidáváním příměsí do jejich krystalické struktury, což je důležité pro výrobu elektronických součástek. Polovodiče mají vysoký význam v elektronice a informatice, protože umožňují vytvářet mikročipy a další zařízení, která jsou základem moderních elektronických systémů [11].

Polovodiče bez dopování se nazývají intrinsické, vlastní nebo čisté polovodiče. Tento typ polovodiče má přirozeně stejný počet elektronů a děr. To znamená, že do krystalické struktury nejsou přidány žádné příměsí nebo dotující prvky. Vlastnosti čistých polovodičů jsou určeny teplotou, kdy při vyšších teplotách dochází k excitaci elektronů z valenčního pásu do vodivostního, čímž se zvyšuje koncentrace volných nosičů náboje (jak elektronů, tak děr). Tato vodivost se nazývá vlastní. Polovodiče mohou být složené buďto z jednoho nebo z různých typů atomů. Mezi typické čisté polovodiče s jedním druhem atomu patří křemík (Si) a germanium (Ge), což jsou atomy ze čtvrté p skupiny periodické tabulky prvků (obrázek 1.5a). U polovodičů složených z různých typů atomů (obrázek 1.5b) je polovodič tvořen buďto atomy ze čtvrté skupiny - silikon karbid (SiC), nebo kombinací atomů ze třetí a páté skupiny - gálium arsenid (GaAs), gálium nitrid (GaN), nebo atomy ze druhé a šesté skupiny - selenid zinečnatý (ZnSe), telurid kadmia (CdTe) [12].

U vodičů a polovodičů bývá zvykem zavádět Fermiho hladinu. Tato energetická hladina představuje hranici mezi obsazenými a neobsazenými elektronovými stavy v materiálu při teplotě absolutní nuly (0 K). Tato hladina se nachází v pásové struktuře materiálu a je dů-

## 1.2. POLOVODIČE



Obrázek 1.5: Intrinsické polovodiče. (a) Samotný atom křemíku se čtyřmi vazebními elektrony. Schéma křemíkového krystalu, kde se atomy křemíku vážou kovalentní vazbou. Schéma pásové struktury takového krystalu, který má šířku zakázaného pásu 1,17 eV [13]. Fermiho hladina se nachází uprostřed zakázaného pásu. (b) Intrinsický polovodič tvořený dvěma různými atomy. Atom gália se třemi vazebními elektrony a arsen s pěti vazebními elektrony. Schéma pásové struktury polovodiče tvořeného různými atomy. Schéma pásové struktury takového krystalu, který má šířku zakázaného pásu 1,42 eV [3]. Fermiho hladina je opět uprostřed zakázaného pásu.

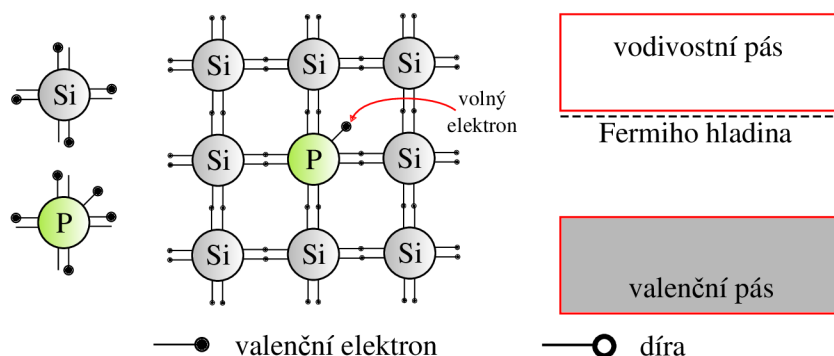
ležitým parametrem ve fyzice pevných látek při popisu elektrických vlastností materiálu. V kovech a jiných vodičích, kde je vysoká koncentrace volných nosičů náboje, Fermiho hladina leží blízko vrcholu energetického pásového diagramu (valenčního pásu). U intrinsického polovodiče je Fermiho hladina uprostřed zakázaného pásu, což je způsobeno vyváženým počtem elektronů ve vodivostním pásu a děr v pásu valenčním [3].

Největší výhoda polovodičů a také důvod jejich velkého výzkumu je to, že polovodiče lze dopovat. Dopováním polovodičů lze kontrolovaně řídit jejich vodivost. Dopování je záměrné přidávání takových atomů, které do polovodiče přispívají volnými elektrony nebo dírami. Dopování lze provádět pomocí přidávání vhodné sloučeniny při růstu krystalu, depozicí vrstev na polovodič a následným zahříváním vedoucí k difuzi nebo implantací iontů do substrátu polovodiče. Existují dva typy dopovaného polovodiče – polovodič typu N a polovodič typu P [14].

### 1.2.1. Polovodič typu N

Polovodič typu N je polovodič, který byl negativně dopován, což znamená, že do jeho krystalové struktury byly přidány donorové prvky s nadbytečnými elektrony, tedy prvky, které mají více valenčních elektronů než původní čistý polovodičový materiál. Tyto nadbytečné elektronové nosiče náboje způsobují vodivé vlastnosti v materiálu. Pro vytvoření

## 1. POLOVODIČE A POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY



Obrázek 1.6: Polovodič typu N. Do krystalové mřížky je přidán atom s pěti vazebnými elektrony. Takovýto atom přidává do polovodiče volný elektron – nosič náboje. V pásové struktuře dojde k posunutí Fermiho hladiny, která je nyní velmi blízko vodivostnímu pásu.

polovodiče typu N je k čistému polovodiči přidán malý podíl donorového prvku. Takovému typu polovodiče se říká extrinsický nebo nevlastní [2].

Přidáním donoru do krystalové mřížky způsobí to, že vzniknou dovolené stavy v zakázaném pásu pásové struktury polovodiče. Tím dojde také k posunutí Fermiho hladiny. Fermiho hladina v polovodiči typu N se nachází blízko vodivostního pásu, mezi vodivostním pásem a nově vzniklou hladinou v zakázaném pásu. To umožňuje elektronům snadný přechod z této hladiny do vodivostního pásu. Takové elektrony přispívají k vysoké elektrické vodivosti materiálu (obrázek 1.6)[3].

Typickými příklady polovodičů typu N je křemík dopovaný fosforem (P) či arsenem (As), které mají o jeden valenční elektron více oproti křemíku. U polovodiče tvořeného různými druhy atomů může k dopování docházet stejně jako u křemíku v případě polovodiče tvořeného atomy ze čtvrté skupiny. U polovodiče tvořeného z atomů třetí a páté nebo druhé a šesté skupiny lze také dopování provádět různým poměrem jednotlivých atomů. Typicky například v polovodiči galia arsenidu mít více atomů arsenu jak galia [1].

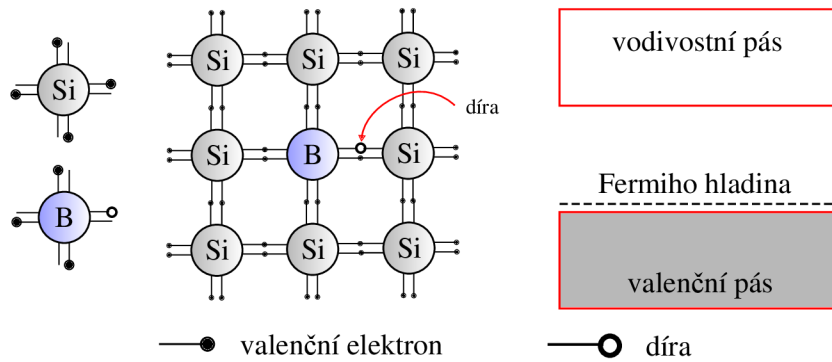
U polovodiče typu N jsou majoritními nosiči náboje elektrony. Minoritními nosiči náboje jsou díry, které vznikají při vyšších teplotách, kdy dochází k excitaci elektronu z valenčního pásu do vodivostního. Počet majoritních nosičů při nízké teplotě je konstantní. Vodivost způsobená majoritními nosiči náboje je nazývána nevlastní [10]. Při vyšších teplotách začínají vznikat minoritní nosiče náboje, které přispívají k vodivosti a s rostoucí teplotou roste jejich počet. Vodivost způsobená minoritními nosiči náboje je nazývána vlastní vodivost a často se jedná o nežádoucí jev [2].

### 1.2.2. Polovodič typu P

Polovodič typu P je polovodič, který byl pozitivně dopován, což znamená, že do jeho krystalové struktury byly přidány akceptorové prvky s méně elektrony, než je běžné pro daný polovodičový materiál. Tyto prvky jsou zodpovědné za nedostatek valenčních elektronů pro vytváření vazby. Tím vzniká v krystalické struktuře díra, která je zodpovědná za vytváření vodivých vlastností v materiálu. Pro vytvoření polovodiče typu P je k čistému polovodiči přidán malý podíl akceptorového prvku [2].

Přidáním akceptoru do krystalové mřížky způsobí to, že vzniknou dovolené stavy v zakázaném pásu pásové struktury polovodiče. Tím dojde také k posunutí Fermiho hladiny. Fermiho hladina v polovodiči typu P se nachází blízko valenčního pásu, což umožňuje

## 1.2. POLOVODIČE



Obrázek 1.7: Polovodič typu P. Do krystalové mřížky je přidán atom s třemi vazebnými elektrony. Takovýto atom přidává do polovodiče díru – nosič náboje. V pásové struktuře dojde k posunutí Fermiho hladiny, která je nyní velmi blízko valenčnímu pásu.

elektronům z valenčního pásu snadný přechod na tuto hladinu. Toto vede k vytvoření děr v pásu valenčním, které přispívají k vysoké elektrické vodivosti materiálu (obrázek 1.7)[3].

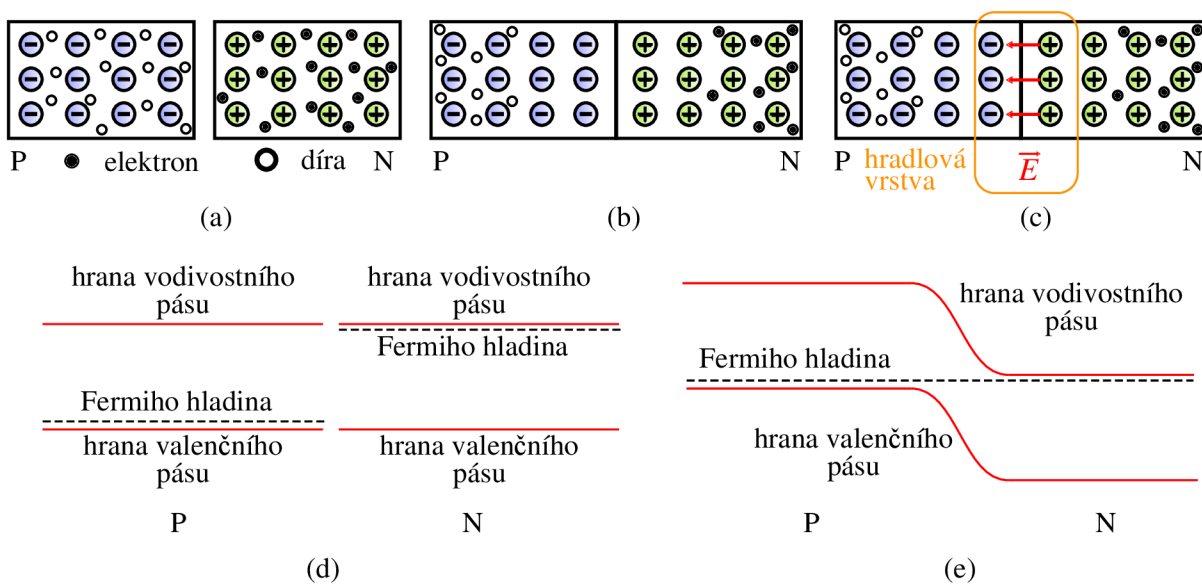
Typickými příklady polovodičů typu P je křemík dopovaný hliníkem (Al) nebo bórem (B), které mají o jeden valenční elektron méně jak křemík. U polovodiče tvořeného různými druhy atomů může k dopování docházet stejně jako u křemíku v případě polovodiče tvořeného atomy ze čtvrté skupiny. U polovodiče tvořeného z atomů třetí a páté nebo druhé a šesté skupiny lze také dopování provádět různým poměrem jednotlivých atomů. Typicky například v polovodiči galia arsenidu mít více atomů galia jak arsenu [1].

U polovodiče typu P jsou majoritními nosiči náboje díry. Minoritními nosiči náboje jsou elektrony, které vznikají při vyšších teplotách, kdy dochází k excitaci elektronu z valenčního pásu do vodivostního. Vlastní a nevlastní vodivost je analogická jako v případě polovodiče typu N. Nevlastní vodivost je způsobena děrovou vodivostí ve valenčním pásu [10].

### 1.2.3. PN přechod

Dalším důvodem, proč jsou polovodiče tak důležité, je vznik PN přechodu. Tento přechod hraje klíčovou roli v mnoha elektronických součástkách, jako jsou diody a tranzistory. PN přechod je hraniční oblast mezi polovodičem typu P a typu N v polovodičovém zařízení (obrázek 1.8a). Pro vytvoření PN přechodu musí dojít ke spojení obou polovodičů na mikroskopické úrovni [15].

V místě spojení začnou interagovat nosiče náboje (díry a elektrony) a vytváří se oblast, kde dochází ke změnám elektrických vlastností. Nejprve elektrony a díry začnou difundovat přes rozhraní kvůli rozdílu koncentrací a chaotickému pohybu. Elektrony z polovodiče typu N difundují do polovodiče typu P a díry z polovodiče typu P difundují do polovodiče typu N. Ionty z krystalové mřížky jsou pevně vázané a k jejich pohybu nedochází, protože jsou výrazně těžší jak elektrony, a pohybují se pouze nosiče náboje. V oblasti přechodu dochází k rekombinaci elektronů a děr, což znamená, že elektrony obsazují volné stavy (díry) ve valenčním pásu a uvolňují tak energii. V polovodiči typu N rekombinují díry s elektrony a v blízkosti rozhraní vznikají kladné nevykompenzované ionty. V polovodiči typu P rekombinují elektrony s dírami a v blízkosti rozhraní vznikají záporné nevykompenzované ionty (obrázek 1.8b)[16]. V důsledku difúze a rekombinace se vytvoří oblast bez nosičů náboje, nazývána jako hradlová vrstva. Tato vrstva má nulovou koncen-



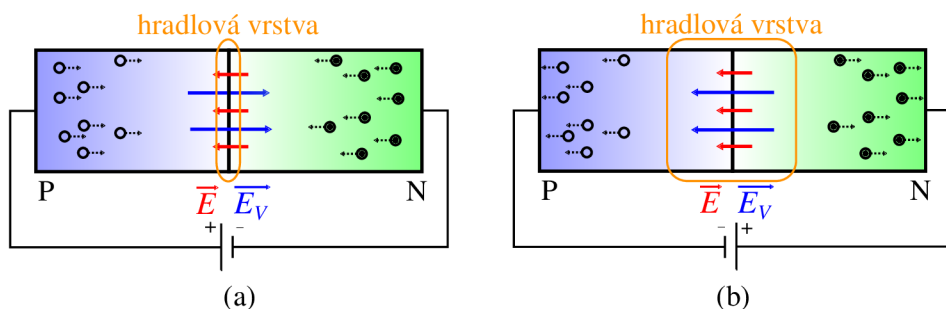
Obrázek 1.8: PN přechod. (a) Dva samostatné polovodiče typu P a N. Polovodič typu N má volné nosiče náboje elektrony a polovodič typu P má volné nosiče náboje díry. (b) Spojení polovodiče P a N na mikroskopické úrovni vede k difuzi děr a elektronů a následné rekombinaci v oblasti spoje. (c) Vlivem difuze a rekombinace dochází k vytvoření PN přechodu – hradlové vrstvy. Hradlová vrstva neobsahuje žádné nosiče náboje a vzniká elektrické pole směřující od N oblasti k P oblasti. Kvůli elektrickému poli je pro elektrony (díry) energeticky nevýhodné přejít do P (N) polovodiče. (d) Pásová struktura samostatných P a N polovodičů. (e) Při spojení polovodičů P a N dojde k ohybům hran valenčního a vodivostního pásu z důvodu vyrovnání Fermiho hladin obou materiálů. Elektrony a díry musejí překonat potenciálovou bariéru, aby pronikly přes PN přechod.

traci nosičů a vytváří izolující oblast mezi oblastmi typu P a typu N. Na PN přechodu vzniká elektrické pole způsobené nevykompenzovanými ionty v blízkosti rozhraní obou typů polovodičů, které brání difuzi majoritních nosičů náboje. Elektrické pole má směr od polovodiče typu N k typu P (obrázek 1.8c)[15]. Pro minoritní nosiče náboje je situace opačná. Jejich difuze skrze PN přechod je elektrickým polem podporována. Jedná se o nežádoucí jev, který způsobuje šum v polovodičových součástkách. Je žádoucí, aby po vzniku hradlové vrstvy nedocházelo k pohybu nosičů náboje skrze rozhraní. Z tohoto důvodu jsou součástky chlazeny, čímž je eliminován průchod minoritních nosičů náboje a snížena vlastní vodivost polovodičů [2].

Z pohledu pásové struktury lze na PN přechod nahlížet jako na potenciálovou bariéru, která vzniká v oblasti hradlové vrstvy. Tato bariéra brání další difuzi nosičů náboje skrz PN přechod. Vznik bariéry je způsoben spojením dvou materiálů s rozdílnou pásovou strukturou. Při spojení dochází k vyrovnání Fermiho hladiny obou materiálů a současnému ohybu valenčního a vodivostního pásu v oblasti hradlové vrstvy (obrázek 1.8e). Tato bariéra poté brání majoritním nosičům náboje difundovat skrze hradlovou vrstvu. Naopak pro minoritní nosiče je energetově výhodnější přejít přes hradlovou vrstvu a snížit tak svou potenciální energii [17].

Velmi důležitý objev v polovodičovém průmyslu bylo zjištění, že pomocí vnějšího napětí na PN přechodu lze měnit šířku hradlové vrstvy a tím kontrolovaně řídit tok proudu skrze PN přechod. Součástka, která obsahuje pouze jeden PN přechod, se nazývá dioda

### 1.3. POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY



Obrázek 1.9: Vliv přiloženého napětí na PN přechod. (a) Propustný směr. Přiložením elektrického napětí tak, že kladné napětí bude na P oblasti a záporné na N oblasti, dojde ke zmenšování hradlové vrstvy. Elektronů a děr jsou odpuzovány od hrany s elektrickými kontakty. (b) Závěrný směr. Přiložením elektrického napětí tak, že kladné napětí bude na N oblasti a záporné na P oblasti, dojde k rozšiřování hradlové vrstvy. Elektronů a děr jsou přitahovány ke hraně s elektrickými kontakty.

a je to nejjednodušší typ aktivní polovodičové součástky. Při přiložení vnějšího napětí se PN přechod chová různými způsoby v závislosti na polaritě a velikosti tohoto napětí. Při připojení diody k vnějšímu napětí tak, aby byl kladný pól na straně typu P a záporný pól na straně typu N se potenciálová bariéra snižuje. To umožňuje elektronům z oblasti typu N a dírák z oblasti typu P lépe překonat potenciálovou bariéru, což způsobuje elektrický proud (obrázek 1.9a). V tomto stavu dioda funguje jako vodič s nízkým odporem a takové zapojení se nazývá zapojení PN přechodu v propustném směru. Při připojení diody v opačném směru (závěrný směr) se potenciálová bariéra zvětšuje. To brání volným nosičům náboje překonat bariéru, a tím dioda v závěrném směru brání průchodu elektrického proudu. V tomto stavu dioda funguje jako izolátor s vysokým odporem a toto zapojení je nazýváno zapojení PN přechodu v závěrném směru (obrázek 1.9b)[18, 19].

Chování PN přechodu s přiloženým vnějším napětím je zásadní pro polovodičový průmysl a lze tímto vytvářet spínače, zesilovače, usměrňovače proudu až samotné integrované obvody [2].

## 1.3. Polovodičové součástky

Polovodičové součástky lze rozdělit na pasivní a aktivní. Součástky pasivní jsou prvky, které mají pevné fyzikální vlastnosti a nelze tyto vlastnosti měnit vnějšími vlivy. Mezi takovéto součástky patří rezistor, induktor a kapacitor [2]. Součástky aktivní jsou prvky, které lze pomocí vnějších vlivů řídit jejich chování. Nejjednodušší aktivní součástkou v polovodičovém průmyslu je součástka obsahující pouze jeden PN přechod. Takovéto součástce se říká dioda. Často se využívá jako ochrana proti opačné polaritě napájení, které by mohlo poničit citlivé komponenty v obvodu. Také bývá využívána v usměrňovačích při převodu střídavého napětí na napětí stejnosměrné. Dalšími aktivními součástkami jsou tranzistory, které obsahují dva PN přechody. Tranzistory dělíme na bipolární, unipolární a kombinované. Bipolární tranzistory využívají ke své činnosti jak elektrony, tak díry. Zatímco unipolární tranzistory využívají pouze majoritní nosiče náboje, minoritní nosiče jsou parazitní. Pomocí tranzistorů lze řízeně spínat či zesilovat proud či napětí. Skládáním a propojováním jednotlivých součástek jsou tvořeny základní integrované obvody [20].

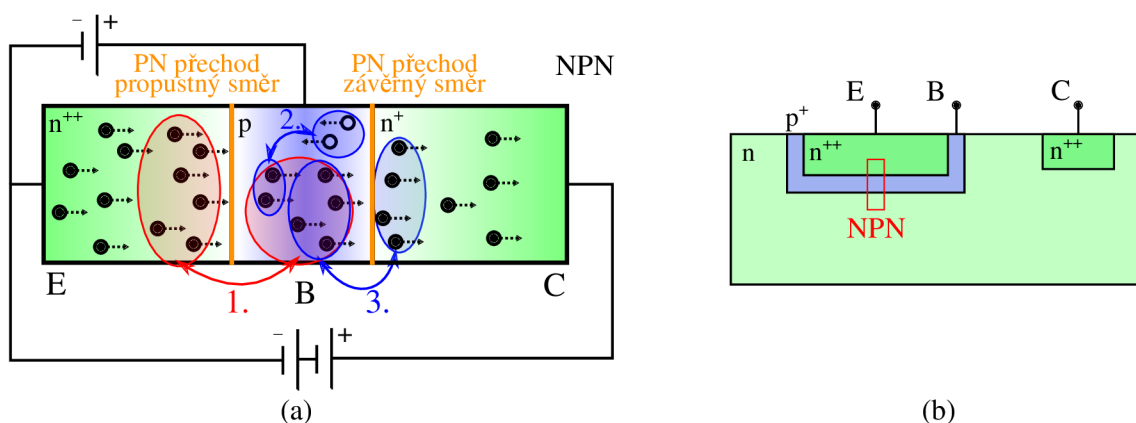


### 1.3.1. Bipolární tranzistor

Prvním druhem a historicky nejstaršími tranzistory jsou bipolární tranzistory, které dělíme na dvě základní skupiny NPN a PNP. Jedná se o třívrstvý polovodičový systém se dvěma PN přechody. Každý bipolární tranzistor se skládá ze tří základních částí - emitor (E), báze (B) a kolektor (C). NPN tranzistor má emitor a kolektor tvořený z polovodiče typu N a bázi, která odděluje kolektor a emitor, z polovodiče typu P. U tranzistoru PNP je tomu přesně naopak jak u NPN tranzistoru. Každá část tranzistoru má jinou vodivost určenou koncentrací dopantů. Emitor má největší elektrickou vodivost (největší dopování). Báze je dopována nejméně a tato oblast je velice tenká. A kolektor je dopován středně [21].

Bipolární tranzistor NPN funguje na základě principu řízení proudu mezi emitorem a kolektorem pomocí malého signálu přivedeného na bázi. Na emitor a kolektor je přivedeno napětí. Když není na bázi přivedeno žádné napětí, elektrony z emitoru difundují směrem ke kolektoru, to je způsobené díky tenkosti báze. V bázové oblasti, která má nižší koncentraci nosičů, jen velmi málo elektronů rekombinuje s děrami. Vzniká jen velmi malý proud mezi emitorem a kolektorem [20].

Když je na bázi přivedeno kladné napětí a na emitor napětí záporné je PN přechod mezi emitorem a bázi zapojen v propustném směru. Elektrostatické pole vytvořené napětím umožní snazší průchod elektronů z emitoru do báze (snižuje se potenciálová bariéra mezi emitorem a bázi). Tento proces se nazývá injekce nosičů. Elektrony, které dosáhnou báze, rekombinují s děrami. Rekombinovat může jen určitý počet elektronů injektovaných z emitoru do báze, což je dáno dopováním bázové oblasti. PN přechod mezi bázi a kolektorem je zapojen v závěrném směru. Elektrické pole míří z kolektoru do báze. V bázi se vytváří záporně nabitá oblast v důsledku injekce elektronů, což vytváří zesílené elektrické pole mezi kolektorem a bázi. Volné elektrony, které nerekombinovaly jsou elektrickým



Obrázek 1.10: Bipolární tranzistor. (a) Princip funkce bipolárního tranzistoru NPN. Tranzistor se skládá ze tří částí - emitor E (N polovodič, nejvíce dopovaný), báze B (P polovodič, nejméně dopovaný, velmi tenký) a kolektor C (N polovodič, středně dopovaný). Mezi každou částí vzniká PN přechod. Emitor a báze je zapojena v propustném směru a báze a kolektor v závěrném směru. V prvním kroku přejdou elektrony z emitoru do báze (propustný směr). Malá část elektronů rekombinuje s dírami (dáno koncentrací dopování). Nakonec zbylé elektrony přecházejí z báze do kolektoru, protože jim k tomu pomáhá elektrické pole PN přechodu mezi bázi a kolektorem. (b) Schématické znázornění bipolárního tranzistoru v praxi.

### 1.3. POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY

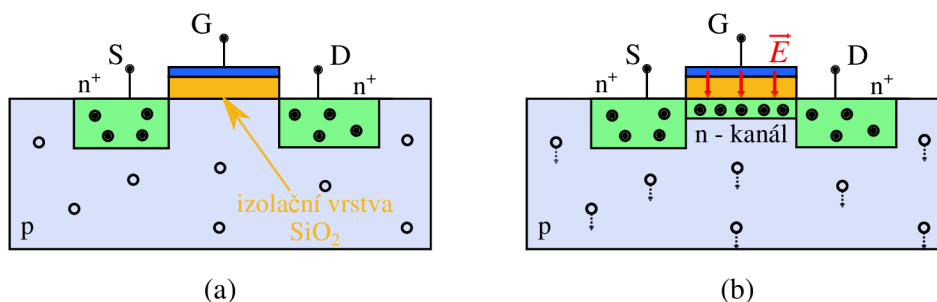
polem přitahovány do kolektoru. Zesílené elektrické pole v bázové oblasti usměrňuje elektrony, které difundují z emitoru směrem k bázi, tak že větší podíl elektronů proudí do kolektoru. Tímto způsobem malý proud přivedený na bázi (ovládací proud) může řídit mnohem větší proud mezi kolektorem a emitorem. Zvýšení napětí na bázi způsobuje další injekci elektronů z emitoru do báze, což dále zvyšuje proud do kolektoru. To znamená, že tranzistor může být použit jako zesilovač, který může zvětšit malý signál na vstupu na mnohem větší signál na výstupu (obrázek 1.10). Princip fungování PNP bipolárního tranzistoru je analogický NPN tranzistoru v tom rozdílu, že místo elektronů jsou nosiči náboje díry [21].

Bipolární tranzistory jsou často využívány v integrovaných obvodech, kde je potřeba přenášet velké proudy. Spínání bipolárního tranzistorů je však velmi pomalé a není vhodný pro vysokofrekvenční aplikace [2].

#### 1.3.2. Unipolární tranzistor

Druhou skupinou tranzistorů jsou tranzistory unipolární. Unipolární tranzistor je typ polovodičové součástky, která funguje na základě pohybu jednoho typu nosiče náboje (buď elektronů nebo děr). Existují dva hlavní typy unipolárních tranzistorů: MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) a JFET (*Junction Field-Effect Transistor*) [2].

MOSFET se skládá ze tří hlavních částí: *source* (S), *drain* (D) a *gate* (G). *Source* a *drain* jsou dopované oblasti v opačném typu dopovaného substrátu. Nad substrátem mezi *source* a *drain* se nachází oxidová vrstva a kovová vrstva zvaná *gate*. Koncentrace dopantů v *source* a *drain* je větší jak koncentrace dopantů v substrátu. MOSFET funguje na základě principu řízení proudu pomocí elektrického pole vytvořeného v izolační oxidové vrstvě mezi *gate* a polovodičovým substrátem. Mezi *source* a *drain* je přivedeno napětí, nicméně proud tranzistorem nemůže protékat, neboť jsou tyto oblasti od sebe izolovány dvěma PN přechody (obrázek 1.11a) [22]. Navíc tato potenciálová bariéra vytvořená PN přechody je širší jak u tranzistoru bipolárního, což je dáno vzdáleností *source* a *drain*. Při



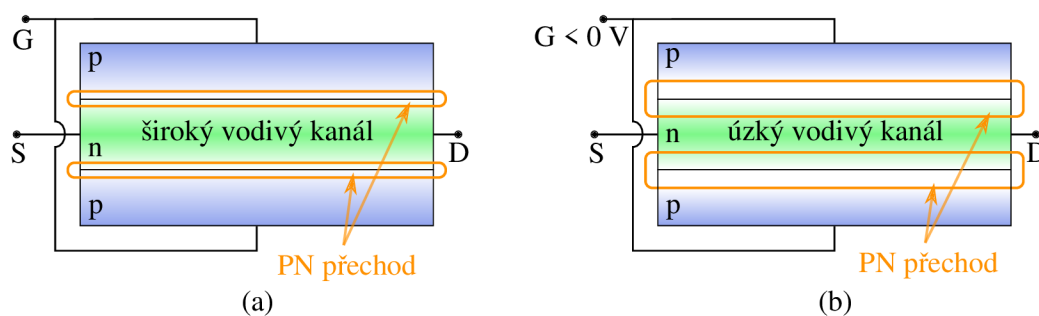
Obrázek 1.11: Tranzistor MOSFET. (a) MOSFET v nezapnutém stavu. V tranzistoru neprochází proud. Tranzistor se skládá z *source* S (N polovodič, silně dopovaný), *drain* D (N polovodič, silně dopovaný), *gate* G a substrátu (P polovodič, slabě dopovaný). *Gate* obsahuje oxidovou izolační vrstvu, která odděluje vodivý kontakt *gate* od substrátu. (b) MOSFET v sepnutém stavu. Přivedením napětí na *gate* dojde k vytvoření vodivého kanálu pod oxidovou vrstvou. Tato vrstva vzniká díky oxidové vrstvě, která se chová jako kondenzátor s dielektrikem. Vodivý kanál je tenká vrstva polovodiče typu N (inverzní vrstva), která spojuje *source* a *drain* a dochází k vedení proudu.

## 1. POLOVODIČE A POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY

přivedení napětí na *gate* se vytváří elektrické pole v oxidové vrstvě, která se chová jako kondenzátor s dielektrikem. Elektrické pole ovlivňuje distribuci nosičů náboje v substrátu pod oxidovou vrstvou. Při zvýšeném napětí na *gate* se vytváří v substrátu oblast s vysokou koncentrací nosičů (buď elektronů nebo děr, v závislosti na typu MOSFETu), které jsou přitaženy k oxidové vrstvě. Tato oblast s vysokou koncentrací nosičů se nazývá inverzní vrstva a funguje jako vodivostní kanál (obrázek 1.11b). Pokud je napětí na *gate* dostatečně vysoké, vodivostní kanál propojí *source* a *drain*, což umožní průchod elektrického proudu. Napětí na *gate* slouží jako ovládací signál, který reguluje průchod proudu mezi *source* a *drain*. Existují různé typy MOSFETů, včetně NMOS (n-kanál MOSFET) a PMOS (p-kanál MOSFET), které se liší typem kanálu a potřebnou polaritou napětí na *gate*. NMOS má kanál tvořený elektrony, zatímco PMOS má kanál tvořený děrami [23].

Při kombinaci více MOSFET tranzistorů různých typů, ať už sériově či paralelně, lze vytvářet různé logické operátory. Nejzákladnějším logickým operátorem je invertor, který invertuje vstupní hodnotu na hodnotu opačnou (při vstupním napětí 1 V je výstupní napětí 0 V a naopak při vstupním napětí 0 V je výstupní napětí 1 V). Takovýto operátor využívá jednoho tranzistoru typu NMOS a jednoho typu PMOS. Další operátory už využívají čtyři tranzistory a uvažují dvě vstupní hodnoty. Takto lze vytvořit operátor NAND a NOR. Takovéto polovodičové součástky jsou nazývány CMOS (*Complementary MOSFET*). Polovodičové součástky CMOS typu jsou dnes často využívány jako optické detektory [20].

Naopak u tranzistoru JFET je efekt opačný, kdy zvyšováním napětí na *gate* se snižuje šířka vodivostního kanálu a tím se snižuje protékající proud. JFET tranzistor má opět tři základní části. Mezi *source* a *drain* je přivedeno napětí, které způsobuje vedení proudu v tranzistoru. Tentokrát je *source* a *drain* spojeno jedním typem dopovaného polovodiče. Tento typ polovodiče je poté z obou stran obložen opačným typem dopovaného polovodiče, tím vznikají v tranzistoru dva PN přechody. Krajiní oblasti jsou připojené na stejné napětí a chovají se jako *gate* v MOSFET jen s opačným účinkem. V tranzistoru při nulovém napětí na *gate* teče proud skrze vodivý kanál, protože mezi *source* a *drain* není žádný PN přechod, který by bránil průchodu proudu (obrázek 1.12a). Při zvyšování napětí na



Obrázek 1.12: Tranzistor JFET. (a) Tranzistor JFET bez napětí na *gate*. Tranzistor se skládá ze tří částí - N polovodič obložený dvěma P polovodiči. Mezi každou částí vzniká PN přechod. Krajiní P oblasti jsou připojené na *gate*. Bez napětí na *gate* prochází proud polovodičem typu N. Vodivý kanál, kterým prochází proud je poměrně široký. (b) Tranzistor JFET s napětím na *gate*. Je-li přivedeno záporné napětí na *gate* jsou PN přechody zapojené v závěrném směru a PN přechod se rozšiřuje. Vodivý kanál se zmenšuje a proud vedený N oblasti je menší.

### 1.3. POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY

*gate* dochází k rozšiřování PN přechodu a snižování šířky vodivého kanálu. Takovýmto způsobem lze snižovat vstupní proud (obrázek 1.12b)[24].

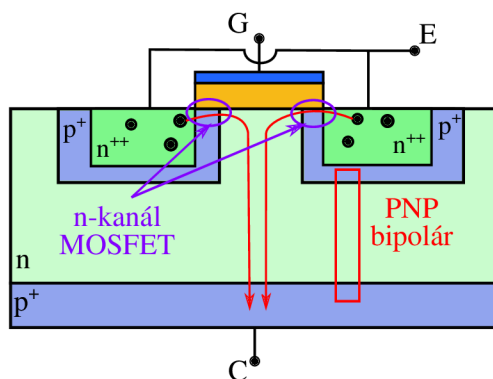
Unipolární tranzistory jsou hojně využívány jako spínací zařízení. Jejich velkou výhodou je ovládání pomocí napětí na *gate*. Lze tyto součástky využít pro vysokofrekvenční aplikace jako jsou CMOS kamery, u kterých je potřeba co největší vyčítací rychlost [2].

#### 1.3.3. Kombinovaný tranzistor

Třetí skupinou jsou tranzistory kombinující vlastnosti bipolárních a unipolárních tranzistorů. Takový typ tranzistorů se nazývá IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Jedná se o velmi výkonný a efektivní polovodičový spínač používaný v široké škále aplikací, které vyžadují řízení vysokých proudů a napětí [11].

IGBT kombinuje bipolární tranzistor (konkrétně NPN nebo PNP přechod) s prvkem spínání jako u MOSFET. Skládá se ze tří hlavních částí: emitor, *gate* a kolektor. *Gate* je oddělen izolační oxidovou vrstvou od kanálu pod ním, podobně jako u MOSFET (obrázek 1.13). Když je na *gate* přivedeno kladné napětí, vytváří se elektrické pole v prostoru mezi *gate* a kanálem pod ním. Toto elektrické pole umožňuje průchod elektronů z emitoru do kolektoru, což je typické pro bipolární tranzistor. Tímto způsobem IGBT dosahuje vysokého zesílení proudu jako u bipolárního tranzistoru. Když je na *gate* přivedeno záporné napětí nebo je *gate* neaktivní, zmenší se průchodnost kanálu a elektrický proud mezi emitemorem a kolektorem se zastaví, což je typické pro MOSFET. To znamená, že IGBT má nízkou spotřebu energie ve vypnutém stavu, což je jedna ze zásadních výhod [25].

IGBT je široce využíván v různých aplikacích, jako jsou například měniče frekvence (invertory), spínače pro vysoké napětí a proudy. Hlavní výhody IGBT jsou vysoká spolehlivost, nízká spotřeba energie ve vypnutém stavu, vysoká rychlost spínání a široký rozsah teplotních provozů [2].



Obrázek 1.13: Kombinovaný tranzistor IGBT. Tranzistor kombinuje výhody obou druhů tranzistorů (bipolární a MOSFET). Tranzistor obsahuje PNP přechod jako v případě bipolárního tranzistoru (červená oblast). Pomocí napětí na *gate* jsou indukovány vodivé kanály a tranzistor je spínán (fialové oblasti). Červenými šipkami je znázorněná trajektorie elektronů.

## 2. Charakterizace polovodičových součástek metodami SPM

Polovodičové součástky jsou standardně vyráběny na polovodičovém substrátu. Takovému substrátu se říká *wafel*, který je poté rozdělen na menší části, které jsou označovány jako čipy. Na tomto čipu se v současné době nachází přibližně padesát miliard tranzistorů [26]. Běžně při výrobě, která obsahuje depoziční, leptací, implantační a litografické kroky, dochází k chybám a některé tranzistory či jiné polovodičové součástky nemusí být správně vyrobeny a stávají se tak nefunkční. To může v důsledky způsobit nefunkčnost celého čipu. Při výrobním procesu dochází běžně ke kontrole kvality jednotlivých výrobních kroků a kontroluje se, zda proces proběhl správně. Kontroluje se například čistota povrchu, tloušťka nanášených vrstev a mnoho dalšího. Díky této kontrole lze upravovat výrobní procesy a zvyšovat tak kvalitu výroby. Na konci výroby je prováděna kontrola funkce jednotlivých čipů a v případě, že čip nefunguje správně, je označen jako nefunkční. Běžně se uvádí procento výtěžnosti čipu, které uvádí, kolik čipů na *wafelu* je funkčních vůči celkovému počtu čipů na *wafelu*. Tento údaj potom udává, jak kvalitně celý proces výroby proběhl. Cílem všech polovodičových firem je dosahovat stoprocentní výtěžnosti. K tomu je ovšem potřeba zvládnout perfektně jednotlivé procesy výroby. V případě vzniku závady během výroby je potřeba tyto problémy zkoumat a zjišťovat jejich příčinu. Po zjištění příčiny je potřeba upravit výrobní proces a zamezit tak vzniku předešlých chyb [27]. Často těmito chybami jsou například špatná koncentrace či typ dopantů, vzdálenosti různých částí, tloušťky izolačních vrstev a správnost metalizace, která propojuje jednotlivé součástky. Všechny tyto a další problémy je potřeba měřit a analyzovat. Taková analýza je nazývána jako poruchová analýza (FA, *Failure Analysis*) [4].

K analýze je potřeba takových technik, které mají subnanometrové rozlišení a dokáží měřit různé elektrické vlastnosti. Vhodnou skupinou charakterizačních technik je rastrovací sondová mikroskopie (SPM, *Scanning Probe Microscopy*). Velké množství SPM technik poskytuje pro analýzu polovodičů velké množství informací, které lze mezi sebou korelovat [28]. SPM techniky umožňují zobrazovat povrch polovodičů s vysokým rozlišením, v řádech nanometrů a dokonce atomů. To umožňuje detailní zkoumání povrchové topografie, morfologie, struktury polovodičů, elektrické a magnetické vlastnosti a identifikaci mikroskopických defektů a nehomogenit [5].

SPM využívá ostrý hrot, který se pohybuje nad povrchem vzorku. Pohyb, který vykonává hrot nad povrchem je označován jako rastrování. Rastrování je systematický pohyb, který řádek po řádku vyplňuje prostor určený k měření. Existují dvě možnosti rastrování: vzorkem, kde se pohybuje vzorek a hrot je nehybný, (2) hrotem, kde se pohybuje hrot a vzorek je nehybný. Hrot je připevněn k raménku, které se v důsledku silového působení mezi hrotem a vzorkem ohýbá. Raménko s hrotem je nazýváno jako sonda. Pro měření ohybu je využíván laser, který osvětluje vysoce odrazivou vrstvu horní strany sondy. Laser se odráží do detektoru, který zaznamenává pohyb a míru vychýlení sondy (obrázek 2.1). Signál z detektoru je dále zaznamenáván a zobrazován jako pixelový obrázek [5, 28].

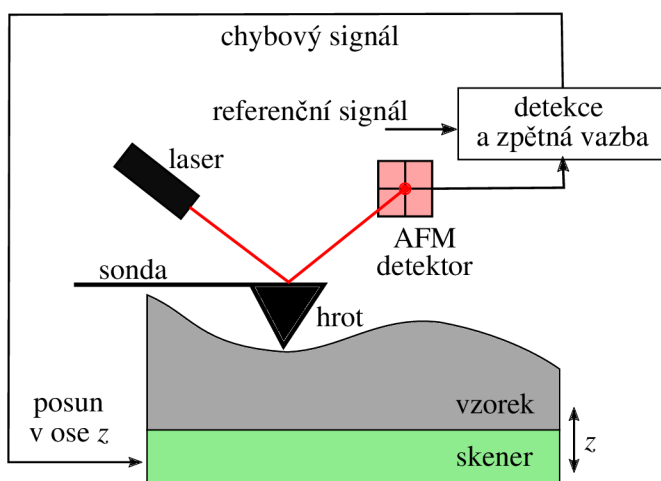
Následující část zmiňuje validní SPM techniky použitelné pro polovodičovou analýzu. Uvádí základní principy a fungování jednotlivých technik, základní výstupy z měření a zajímavé výstupy pro poruchovou analýzu v polovodičovém průmyslu. Zmíněné jsou především techniky pro měření elektrických vlastností polovodičových součástek, kterými

## 2.1. MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL

jsou mikroskopie lokální vodivosti, mikroskopie elektrostatických sil, rastrovací Kelvinová mikroskopie, rastrovací mikroskopie šířícího se odporu a rastrovací kapacitní mikroskopie.

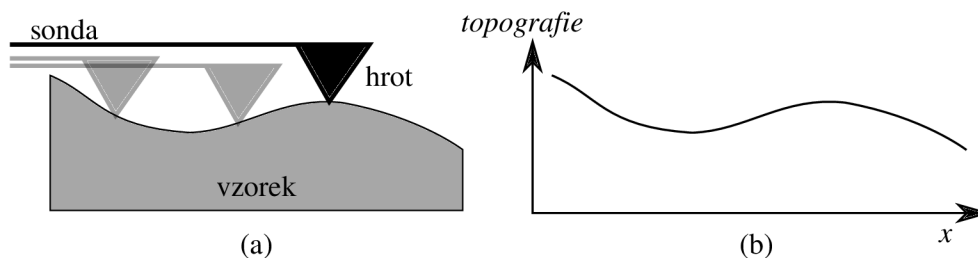
### 2.1. Mikroskopie atomárních sil

První technikou je mikroskopie atomárních sil (AFM, *Atomic Force Microscopy*). Díky této technice lze získávat informace o topografii vzorků. Hrot rastrující po povrchu je vychylován v důsledku topografických změn povrchu. Pomocí detektoru je měřena míra ohybu sondy, která je zaznamenávána, a pomocí zpětnovazebního systému je udržována iteračně konstantní síla mezi hrotem a vzorkem (obrázek 2.1). Konstantní síla je udržována pomocí kontroleru skeneru, který upravuje vzdálenost mezi hrotem a vzorkem (osa  $z$ ). Udržováním konstantní síly je dosahováno toho, že sonda s hrotem kopíruje topografii povrchu a zároveň jsou zaznamenávány posuvy skeneru v ose  $z$ , které dávají kvantitativní informaci o topografii  $z(x, y)$  (obrázek 2.2) [5, 28].



Obrázek 2.1: Schéma AFM s iteračním posouváním skeneru (vzorku) v ose  $z$  pro udržení referenční hodnoty síly.

V polovodičovém průmyslu lze pomocí této techniky kontrolovat kritické rozměry jednotlivých částí v součástce. Konkrétně se jedná o to, zda jsou jednotlivé části dostatečně blízko či daleko od sebe. Je možné také kontrolovat správné tvary kontaktních ploch u metalizace čipu. V případě kontroly rozměrů částí schovaných pod povrchem desky je potřeba svrchní vrstvy odleptat či odprášit iontovým svazkem. V důsledku toho že vrstvy nejsou ze stejného materiálu, ale liší se, je každý materiál leptán či oprašován jinou rychlostí. Dochází k tomu, že povrch není rovný. Pomocí AFM lze zjistit, zda se v nějakém materiálu nenachází defekt, který se leptá či odprašuje rychleji či pomaleji, což by se projevilo v rozdílné topografii v okolí defektu. Defekty mohou způsobovat problematické chování součástky, které může ovlivnit funkci celého čipu. Dále lze kontrolovat drsnost různých povrchů na čipu. Vysoká drsnost může způsobit koncentraci náboje, protože náboj se koncentruje v místech s malým poloměrem zakřivení. Tento náboj generuje silné elektrické pole, které může ovlivnit chování různých tranzistorů či jiných součástek [4, 29, 30].



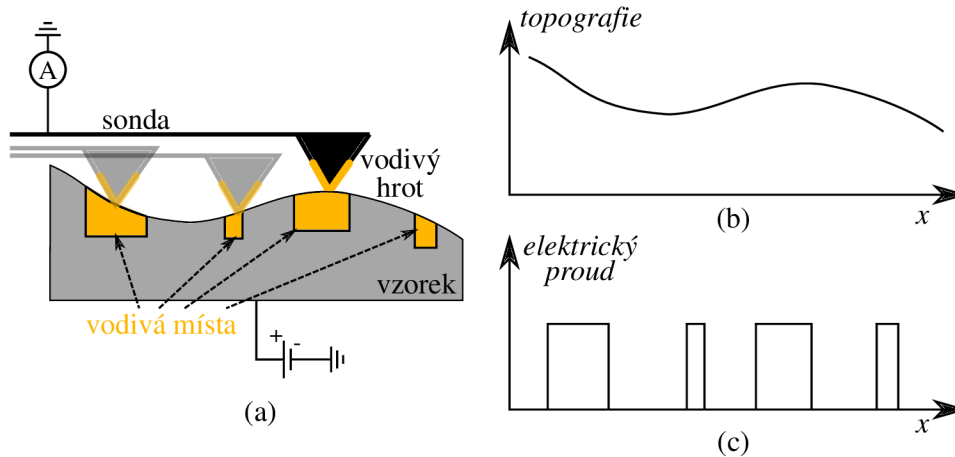
Obrázek 2.2: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření AFM. Sonda s hrotem přejíždí po vzorku a získává informaci o topografii. (b) Výstup z měření AFM je topografie. Signál z AFM kopíruje profil povrchu vzorku.

## 2.2. Mikroskopie lokální vodivosti

Druhou technikou je mikroskopie lokální vodivosti (CAFM, *Conductive Atomic Force Microscopy*). Tato technika umožňuje získávat informaci o lokální vodivosti vzorku. Technika funguje principiálně stejně jako technika AFM, kdy hrot rastruje po vzorku a získává informaci o topografii. U této techniky je navíc získávána informace o proudu, který protéká mezi hrotem a vzorkem. Měření se ve většině případu provádí s přiváděním elektrické napětí na vzorek a pomocí vodivého hrotu a sondy je měřen elektrický proud. Existuje i konfigurace, kdy je elektrické napětí přiváděno na hrot a elektrický proud je měřen vzorkem. Během jednoho rastrování je získána informace o topografii vzorku  $z(x, y)$  a o elektrickém proudu protékajícím mezi hrotem a vzorkem  $I(x, y)$ . Pomocí měřeného proudu lze poté kvalitativně rozeznávat vodivé nebo nevodivé oblasti na vzorku (obrázek 2.3). Také lze rozlišovat vodivé oblasti s rozdílnou vodivostí a trasovat vodivé cesty či vrstvy v materiálu, což je užitečné pokud je součástka neznámého původu [5, 31]. Tato technika umožňuje získávat cennou informaci navíc (měřený proud), která může být velmi užitečná pro poruchovou analýzu polovodičů.

V poruchové analýze je tato technika často využívána ke kontrole tloušťky oxidové vrstvy, zda nedochází k toku proudu skrz oxidovou vrstvu [30]. Izolanty jsou charakteristické svou dielektrickou pevností. Tato pevnost udává, jak velké elektrické napětí lze přiložit na materiál o určité tloušťce, aby nedošlo k vedení elektrického proudu skrze materiál. Dielektrická pevnost závisí jak na velikosti elektrického napětí přiloženého na materiál, tak na tloušťce materiálu, se kterou pevnost roste. V případě polovodičových součástek je kontrolována tloušťka izolační vrstvy, která brání vlivu okolního rušení součástky. Také je kontrolována oxidová vrstva mezi *gate* a substrátem. Kdyby tato vrstva nebyla dostatečně tlustá mohlo by docházet ke zkratu součástky. Takové měření probíhá rastrováním po izolační vrstvě, kdy po každém měření je změněno napětí mezi vzorkem a hrotem. Tato změna napětí většinou probíhá po určitých krocích v kladné i záporné polaritě napětí, a to až do potřebné kritické hodnoty. Dojde-li k naměření proudu před dosažením kritické hodnoty elektrického napětí, znamená to, že se jedná o defektní místo. Tento defekt může být způsoben jak nedostatečnou tloušťkou vrstvy v tomto místě, nebo přítomnými nehomogenitami vrstvy, které způsobí tok proudu skrze vrstvu. Takovouto oxidovou vrstvu s defektem není možné v součástce použít, protože její elektrická pevnost není dostatečná k udržení potřebného elektrického napětí a může součástku zkratovat [4, 29, 30].

### 2.3. MIKROSKOPIE ELEKTROSTATICKÝCH SIL



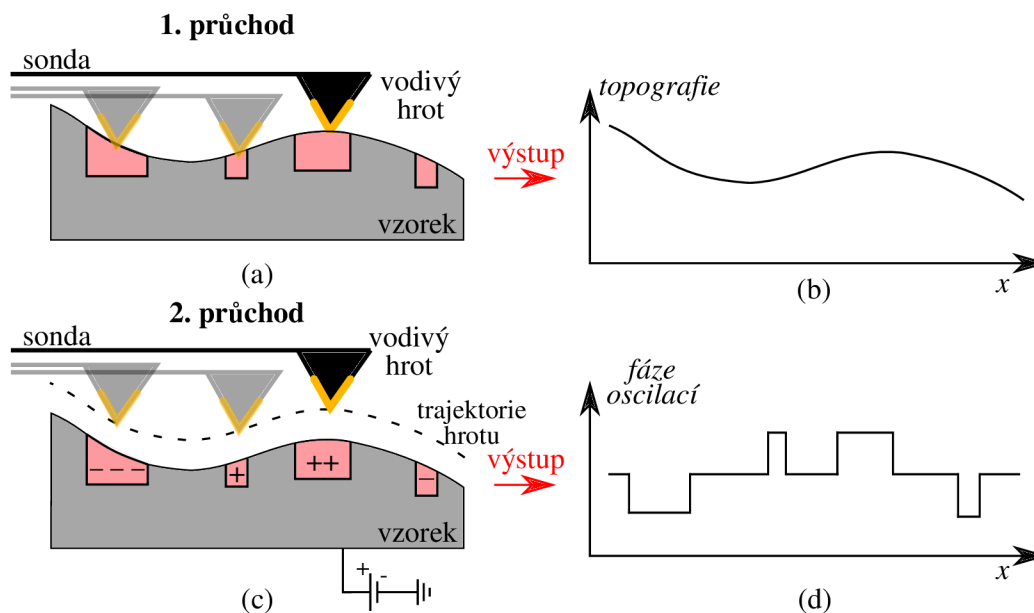
Obrázek 2.3: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření CAFM. Sonda s vodivým hrotem rastruje po vzorku, který obsahuje vodivá místa. Vzorek je připojený ke zdroji elektrického napětí - *bias*. (b) Topografický signál získaný během měření CAFM. (c) Měřený proud získaný během měření CAFM. Proud je naměřen pouze na vodivých místech.

### 2.3. Mikroskopie elektrostatických sil

Další vhodnou SPM technikou je mikroskopie elektrostatických sil (EFM, *Electrostatic Force Microscopy*). Tato technika je ze skupiny dvouprůchodových technik, které stejné místo zájmu rastrují dvakrát. V prvním průchodu je změřena topografie a v druhém průchodu elektrostatické pole nad danou oblastí. Kvůli tepelnému driftu při rastrování není nejdříve změřena pouze topografie a v následujícím kroku elektrostatické pole. Ale měření probíhá řádek po řádku, kdy je nejdříve změřena topografie jednoho řádku vzorku a poté elektrostatické pole nad tímto řádkem. Dvojitý průchod nad jedním místem na vzorku má za následek dvojnásobný čas měření a tyto techniky jsou časově náročné. Měření topografie v prvním průchodu probíhá jako běžné měření techniky AFM, kdy je získána informace o profilu vzorku  $z(x, y)$ . Pro měření elektrostatického pole je na vzorek potřeba v prvním kroku přivést elektrické napětí, které při měření topografie není aplikováno. Elektrické napětí přivedené na vzorek způsobí přeuspořádání náboje na povrchu vzorku, který vytváří elektrostatické pole nad povrchem. Měření elektrostatického pole probíhá ve větší vzdálenosti než měření topografie v prvním průchodu, sonda je nadzvednuta a rastruje ve vzdálenosti, kde nepůsobí krátkodosahová van der-Waalsova interakce. Tato vzdálenost je nazývána jako *offset*. Ve větší vzdálenosti převládá dalekodosahové elektrostatické interakce, které ovlivňují hrot sondy. Sonda v druhém průchodu nad vzorkem mechanicky osciluje na své rezonanční frekvenci a tyto oscilace umožňují získat informaci o elektrostatickém poli vzorku. Silovým působením na sondu od elektrostatického pole dochází k přitahování či odpuzování v závislosti na směru gradientu elektrostatického pole, které ovlivňuje mechanické oscilace (amplitudu, fázi, frekvenci). V praktické části je využita amplitudová modulace, při které je měřena změna amplitudy a zároveň zaznamenáván posun fáze vůči budícím kmitům  $\varphi_2(x, y)$  (obrázek 2.4) [32, 33].

U amplitudové modulace je laterální rozlišení ovlivněno několika faktory, včetně velikostí amplitudy oscilací, geometrií hrotu a použitého *offset*. Je důležité volit co nejmenší amplitudu kmitů a *offset* pro vysoké laterální rozlišení. V opačném případě dochází k zachytávání signálu nejen samotnou špičkou hrotu, ale také jeho stranami a dokonce ramén-





Obrázek 2.4: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření EFM v prvním průchodu, kdy je získávána informace o topografii. Vodivá sonda rastruje po povrchu vzorku, bez připojeného elektrického napětí na vzorku. (b) Topografický signál získaný během měření EFM v prvním průchodu. (c) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření EFM v druhém průchodu, kdy je získávána informace o elektrostatickém poli nad vzorkem. Vodivá sonda rastruje nadzvednutá nad vzorkem, na který je přivedeno konstantní elektrické napětí. Dochází k přerozdělení náboje na povrchu vzorku, který vytváří elektrostatické pole. (d) Měřený fázový posun, který je úměrný gradientu elektrostatického pole, získaný během měření EFM v druhém průjezdu.

kem, které hrot drží [34]. To vede k průměrování signálu z velké oblasti vzorku [35]. Tyto faktory jsou klíčové pro dosažení optimálního rozlišení a citlivosti při měření technikou EFM.

Tato technika umožňuje v polovodičovém průmyslu kontrolovat sycení polovodičových tranzistorů, což je stav, kdy se tranzistor nachází v maximálním možném provozním režimu. Zvětšení vstupního signálu již nezpůsobí zvýšení výstupního signálu, což znamená, že tranzistor dosáhl svého maximálního výkonu a není schopen poskytnout vyšší výstupní signál, než je ten aktuální. Pokud je kanál tranzistoru nedostatečně izolován nebo pokud jsou přítomny poruchy v izolační vrstvě, může se elektrické pole v určitých oblastech koncentrovat. To může vést k vybuzení elektrických proudů nebo přeuspořádání náboje, což je nežádoucí jev. To dále ovlivňuje funkčnost, provozní stabilitu nebo spolehlivost zařízení. Pomocí techniky EFM lze takové sycení tranzistorů pozorovat a zároveň kontrolovat správnou tloušťku oxidových vrstev [30].

## 2.4. Rastrovací Kelvinova mikroskopie

Další použitelnou SPM technikou pro měření elektrických vlastností polovodičů je rastrovací Kelvinova mikroskopie (KPFM, *Kelvin Probe Force Microscopy*). Tato technika patří také do skupiny dvouprůchodových, kdy je každý řádek měřen dvakrát. V prvním průchodu je měřena topografie vzorku  $z(x, y)$ . V průchodu druhém je sonda s hrotem nad-

## 2.4. RASTROVACÍ KELVINOVA MIKROSKOPIE

zvednutá do vzdálenosti, kde převládají dalekodosahové interakce a je získávána informace o kontaktním potenciálu mezi hrotem sondy a vzorkem [36]. Kontaktní potenciál je potenciálový rozdíl mezi dvěma materiály, které mají rozdílnou výstupní práci. Výstupní práce je energiová bariéra, kterou musí překonat elektron na Fermiho hladině, aby unikl z povrchu materiálu do vakua. V případě, že sonda se vzorkem není v kontaktu mají Fermiho hladiny obou materiálů různou energii. Zároveň energiová hladina vakua je u obou materiálů vyrovnaná. Jsou-li oba materiály v blízkém kontaktu dochází k přechodu elektronů z jednoho materiálu do druhého (protéká proud), a tím se vyrovnávají Fermiho hladiny obou materiálů. Při vyrovnání hladin dochází ke koncentraci náboje na vzorku a hrotu, která vytváří elektrostatickou sílu. Cílem techniky KPFM je tuto sílu měřit a nulovat, což je prováděno pomocí přikládání napětí na vzorek, aby došlo opět k vyrovnání energiových hladin vakua.

Ve druhém průchodu jsou na sondu přiváděny elektrické oscilace a síla působící na hrot má tvar

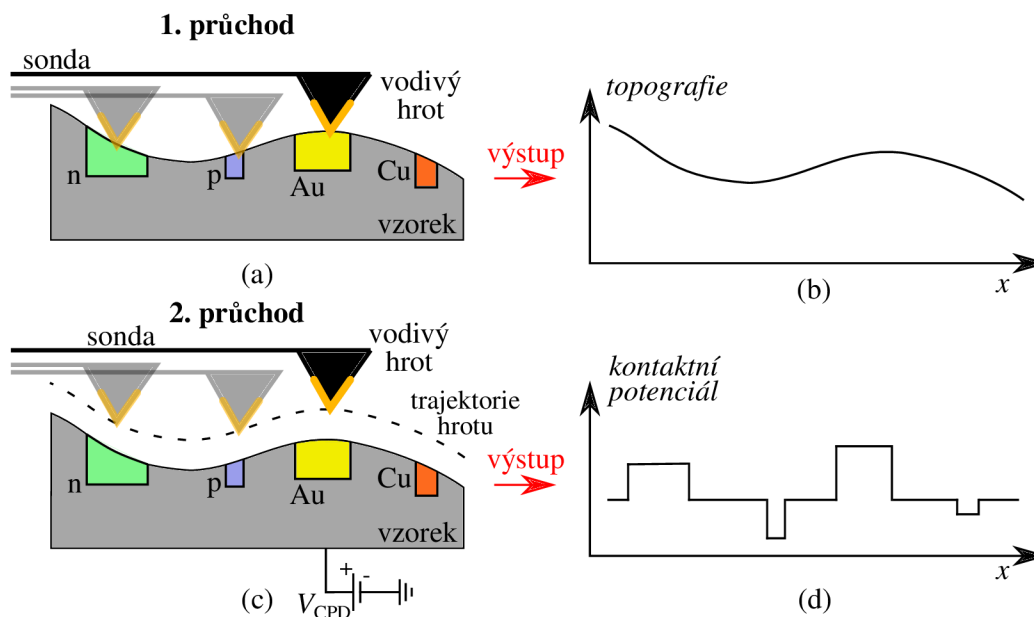
$$F_{el} = \frac{\partial C}{\partial d} (V_{DC} - V_S) [V_{AC} \sin(\omega_t t)], \quad (2.1)$$

kde  $C$  je kapacita mezi hrotem a vzorkem,  $d$  je velikost *offsetu*,  $V_S$  je povrchový potenciál oblasti na vzorku,  $V_{AC}$  je amplituda elektrických oscilací sondy,  $\omega_t$  je frekvence oscilací a  $V_{DC}$  je stejnosměrné napětí přiváděné na vzorek [5]. Ze vztahu je viditelné, že pro to, aby síla byla nulová, musí být přiložené takové stejnosměrné napětí  $V_{DC}$ , které má stejnou hodnotu jako povrchový potenciál vzorku. Během druhého průchodu je udržována nulová elektrická síla pomocí stejnosměrného napětí  $V_{DC}$ , které je zaznamenáváno a označováno jako kontaktní potenciál  $V_{CPD}(x, y)$  (obrázek 2.5)[5, 37].

Výstupní práce materiálu na vzorku je poté možné dopočítat ze vztahu  $\phi_s = \phi_t + eV_{CPD}$ , kde  $\phi_s$  je výstupní práce vzorku,  $\phi_t$  je výstupní práce hrotu,  $e$  je elementární náboj a  $V_{CPD}$  je změřený kontaktní povrchový potenciál.

Tato technika je poté v praktické části využívána v amplitudové modulaci. Podobně jako u EFM je laterální rozlišení ovlivněno velikostí amplitudy elektrických oscilací a použitého *offsetu*. Zároveň dochází k průměrování povrchového potenciálu oblastmi na vzorku, kdy je signál zachytáván nejen špičkou hrotu, ale také stranami hrotu, a dokonce raménkem sondy [34].

Pro analýzu polovodičů je technika KPFM vhodná pro zkoumání defektů. Defekty mohou vzniknout mechanickým či tepelným namáháním. Takovéto namáhání může způsobit praskliny v materiálu, které nejsou pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu nebo mikroskopu atomárních sil viditelné. V případě těchto defektů může dojít ke změně krystalické struktury, což vede ke změně pásové struktury materiálu a tedy ke změně výstupní práce v místě defektu [4, 30]. Další možným využitím techniky KPFM je rozlišení materiálů, ze kterých se polovodičová součástka skládá. Technika KPFM umožňuje rozlišit typ polovodiče N a P na základě jejich rozdílných výstupních prací [38, 39]. Rozdíl výstupní práce mezi N a P dopovaným polovodičem závisí na koncentraci dopantů. Ve slabě dopovaných oblastech (do  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) je výstupní práce podobná intrinsickému polovodiči. U vyšších koncentrací (nad  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) je rozdíl výstupních prací měřitelný, avšak i tak se pohybuje jen v řádu 100 meV [38, 40]. To je způsobené tím, že akceptory a donory jsou pravděpodobněji lokalizovány uvnitř vzorku než u jeho povrchu.

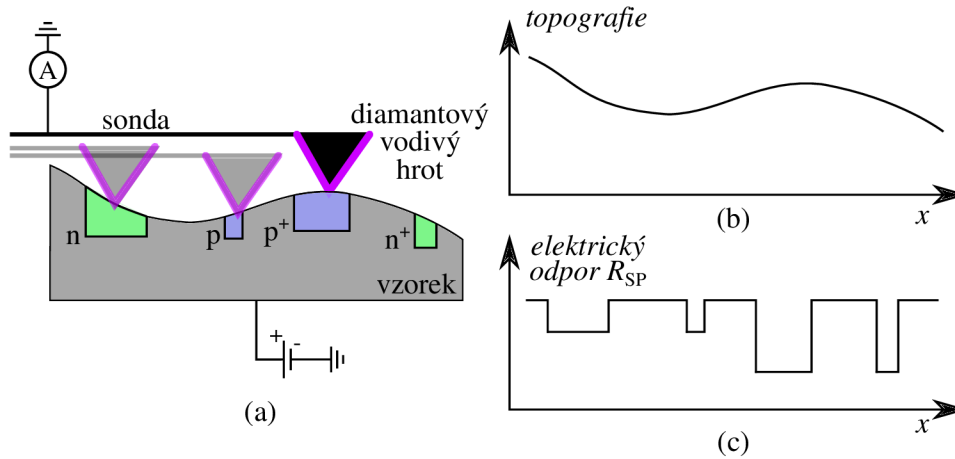


Obrázek 2.5: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření KPFM v prvním průchodu, kdy je získávána informace o topografii. Vodivá sonda rastruje po povrchu vzorku, bez připojeného elektrického napětí na vzorku. (b) Topografický signál získaný během měření KPFM v prvním průjezdu. (c) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření KPFM v druhém průchodu, kdy je získávána informace o kontaktním potenciálu  $V_{CPD}$  mezi hrotem sondy a vzorkem. Vodivá sonda rastruje nadzvednutá nad vzorkem, na který je přivedeno elektrické napětí, které nuluje elektrostatickou sílu mezi hrotem a vzorkem. (d) Měřený kontaktní potenciál  $V_{CPD}$ , ze kterého lze dále dopočítat výstupní práci materiálu vzorku.

## 2.5. Rastrovací mikroskopie šířícího se odporu

Další SPM technikou je rastrovací mikroskopie šířícího se odporu (SSRM, *Scanning Spreading Resistance Microscopy*). SSRM je velmi užitečnou technikou pro měření koncentrace dopantů v dopovaném polovodiči. Během rastrování je získávána informace o topografii  $z(x, y)$  a zároveň je měřen elektrický proud, který protéká mezi hrotem a vzorkem. Elektrický proud se poté přepočítává na elektrický odpor ze znalosti elektrického napětí, které je přivedeno na vzorek. Při měření je hrotem sondy tlačeno velkou silou do vzorku. Běžně se tyto síly pohybují v jednotkách mikronevtonů ( $\mu\text{N}$ ), na rozdíl od ostatních technik, kde jsou interakční síly v jednotkách nanonewtonů ( $\text{nN}$ ) [5], čímž dochází k postupnému ničení vzorku. Takto vysoké přitlačné síly jsou potřeba pro dosažení  $\beta$ -Sn (beta cín) fázového přechodu polovodiče, který vzniká při vysokém tlaku, kterým prochází krystalická struktura. Při tomto fázovém přechodu přechází polovodič z jeho běžného polokovového stavu s diamantovou strukturou do struktury podobné struktuře  $\beta$ -Sn. Takováto struktura beta cínu je jedna ze dvou struktur, ve kterých krystalizuje cín, a pro tuto strukturu je typická vysoká elektrická vodivost. Při tomto přechodu vzniká charakteristický šířící se odpor závislý na dopování v polovodiči  $R_{SP}$  (*spreading resistance*) [41, 42]. Při kontaktu sondy se vzorkem vzniká elektrický obvod, ve kterém jsou sériově zapojeny elektrické odpory: (1) kontaktní odpor  $R_C$ , (2) šířící se odpor  $R_{SP}$  a (3) konstantní odpor  $R_{const}$ , ve kterém je zahrnut odpor hrotu, odpor kontaktu mezi vzorkem a držákem vzorku a objemový odpor vzorku. Při měření je důležité minimalizovat kontaktní odpor  $R_C$ , který ovlivňuje mě-

## 2.5. RASTROVACÍ MIKROSKOPIE ŠÍŘÍČÍHO SE ODPORU



Obrázek 2.6: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření SSRM. Sonda s dopovaným diamantovým hrotem rastruje po vzorku, který obsahuje různě dopované oblasti. Vzorek je připojený ke zdroji elektrického napětí. (b) Topografický signál získaný během měření SSRM. (c) Měřený odpor  $R_{SP}$  získaný během měření SSRM. Tento odpor dává informaci o koncentraci dopantů v polovodiči. Oblasti s vyšší koncentrací mají nižší elektrický odpor jak oblasti s nižší koncentrací. Pomocí SSRM nelze rozpoznat polovodič typu P a N.

ření, aby odpor  $R_{SP}$  byl dominantní. Toto je zajištěno velkou přitlačnou silou a stabilním kontaktem mezi vzorkem a hrotem. Z důvodu vysokých přitlačných sil je také důležité použít vhodné sondy, které musí být jak elektricky vodivé, tak mechanicky velmi odolné. Běžně jsou používány sondy s dopovaným diamantovým hrotem. Diamant zaručuje velmi dobrou mechanickou odolnost a dopováním je zajištěna elektrická vodivost. Během měření je zaznamenáván  $R_{SP}(x, y)$  (obrázek 2.6)[42, 43].

Z naměřeného odporu  $R_{SP}$  lze dopočítat měrný odpor pomocí vztahu

$$R_{SP} = \rho/4a, \quad (2.2)$$

kde  $\rho$  je lokální měrný odpor a  $a$  je poloměr hrotu [43]. Tento vztah je pouze aproximativní a je možné pomocí něj stanovit základní odhady měrného odporu. Z měrného odporu lze dopočítat koncentraci volných nosičů náboje ze vztahu

$$\rho = (\mu ne)^{-1}, \quad (2.3)$$

kde  $\mu$  je pohyblivost elektronů nebo děr,  $n$  je koncentrace volných nosičů náboje a  $e$  je elementární náboj [2]. Při nízkých teplotách je koncentrace volných nosičů náboje rovna koncentraci dopantů. Z posledního vztahu vyplývá, že pro dopočtení správné koncentrace dopantů je potřeba znát, zda jde o polovodič typu N či P. Bez této znalosti není výpočet koncentrace možný, protože pohyblivost elektronů a děr v určitém materiálu se liší [5, 44, 45].

V praxi se tohoto přepočtu nevyužívá, protože dopočtené hodnoty se často liší o několik řádů. K tomu aby se dalo měření dělat kvantitativně je potřeba mít k reálným vzorkům také vzorky referenční, které obsahují oblasti s různou, ale známou koncentrací dopování. Ve většině případu je tak potřeba jeden vzorek pro každý typ dopování. Referenční vzorky jsou změřeny současně se zkoumanými vzorky a následně při vyhodnocování dat jsou zkoumanému vzorku přiřazovány hodnoty koncentrace dopování na základě změřených

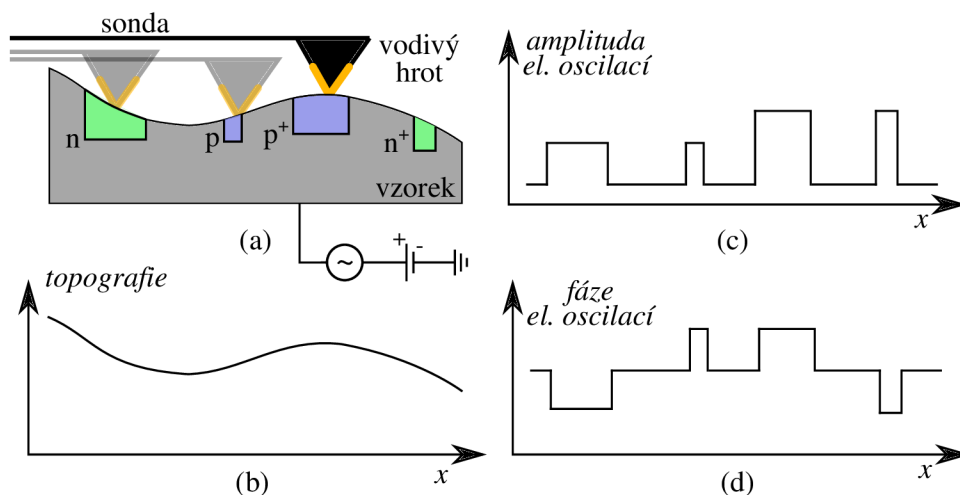
## 2. CHARAKTERIZACE POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK METODAMI SPM

referenčních vzorků. Tento postup je upřednostňován před počítáním koncentrací pomocí vztahu (2.2) a (2.3).

Tato technika je velmi užitečná pro zjišťování koncentrace dopantů v polovodiči. Správná koncentrace je velmi důležitá pro správnou funkci polovodičové součástky. Například v případě bipolárního tranzistoru, kdyby báze byla dopována více jak emitor, tak by docházelo k velké rekombinaci elektronů a děr. Následně by málo elektronů procházelo do kolektorové části. Takový případ by mohl vést k velmi slabému zesilování signálu. Také u MOSFET tranzistorů je klíčové správné dopování. Je potřeba aby dopování bylo provedeno na správném místě. V případě implantace dopantů do oblasti vodivého kanálu může dojít k tomu, že skrz tranzistor poteče proud i při nulovém napětí na hradle. Tím by tranzistor MOSFET ztratil veškeré své kladné vlastnosti. Také velmi vysoká koncentrace dopantů by mohla vést k amorfizaci vzorku a polovodič by již neměl krystalické vlastnosti [4, 30, 39, 46].

### 2.6. Rastrovací kapacitní mikroskopie

Poslední zde zmíněnou SPM technikou hojně využívanou v polovodičovém průmyslu je rastrovací kapacitní mikroskopie (SCM, *Scanning Capacitance Microscopy*). Standardně je získávána informace o topografii  $z(x, y)$ . SCM je založeno na měření změn kapacity mezi vodivým hrotem sondy a povrchem vzorku během rastrování. Když je hrot sondy umístěn nad povrchem vzorku, vytváří se elektrostatické pole mezi hrotem a povrchem. Toto pole proniká do materiálu vzorku a interaguje s náboji na povrchu a v jeho blízkosti. Přítomnost náboje na povrchu vzorku ovlivňuje kapacitní vlastnosti tohoto pole. Během měření je přiloženo napětí na vzorek, které je jak stejnosměrné, tak střídavé. Zároveň tak



Obrázek 2.7: (a) Schéma jednoho rastrovacího řádku měření SCM. Sonda s vodivým hrotem rastruje po vzorku, který obsahuje různě dopované oblasti. Vzorek je připojený ke zdroji elektrického napětí. (b) Topografický signál získaný během měření SCM. (c) Měřená amplituda elektrických oscilací sondy, reagující na změnu kapacity. Amplituda dává informaci o koncentraci dopantů v polovodiči. Větší koncentrace znamená větší signál. (d) Měřená fáze elektrických oscilací sondy, reagující na změnu kapacity. Fáze dává informaci o typu polovodiče. V tomto případě mají N oblasti záporný signál a P oblasti signál kladný.

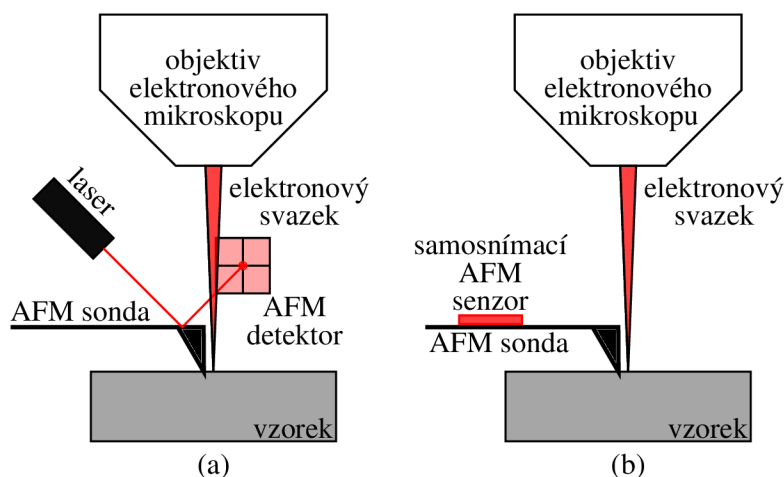
## 2.6. RASTROVACÍ KAPACITNÍ MIKROSKOPIE

vzniká buzený RLC obvod, který je buzený právě tímto napětím. Ze znalosti parametrů tohoto obvodu jsou měřeny změny kapacity, které jsou způsobeny rozdíly v rozložení nábojů na povrchu vzorku [42]. Když je hrot přesunut nad různé části povrchu vzorku, dochází k změnám kapacitního signálu v závislosti na distribuci nábojů v daných oblastech. Například oblasti s vyšší koncentrací nábojů budou mít vyšší kapacitní signál a naopak. Během rastrování je zaznamenávána amplituda  $A(x, y)$  a fáze  $\varphi(x, y)$  oscilací RLC obvodu a výsledný obraz zobrazuje distribuci kapacitního signálu na povrchu vzorku (obrázek 2.7)[5, 47, 48].

V polovodičovém průmyslu je tato technika velmi využívána, protože dokáže měřit jak koncentraci dopantů tak typ polovodiče [29]. Informace o koncentraci dopantů je ukryta v měřené amplitudě kapacitního signálu (čím větší amplituda tím větší koncentrace) a informace o typu polovodiče je skryta v měřené fázi kapacitního signálu [4, 30]. Pro stejnou informaci bychom museli proměřit jak techniku SSRM, tak KPFM, abychom získali koncentraci dopantů a typ polovodiče. Technika SCM tyto informace získá během jednoho měření, je tedy mnohem rychlejší a šetří čas.

### 3. Měřicí sestava pro SPM-SEM analýzu

SPM techniky jsou velice užitečné k analýze z důvodů množství technik, kterými lze polovodičové součástky analyzovat. Velkou nevýhodou běžných SPM mikroskopů je nepřesná navigace na místo zájmu. Běžný SPM mikroskop využívá navigace pomocí optického mikroskopu. Rozlišení a potřebné zvětšení optického mikroskopu ovlivňují přesnou navigaci, která je potřebná nejen pro úsporu času, který je již u SPM měření poměrně dlouhý, tak pro zachování životnosti sondy, která se při rastrování opotřebovává a SPM mikroskop tím ztrácí laterální rozlišení. Znatelnější je tento jev u sond, které mají na hrotu deponované vodivé vrstvy, které se opotřebovávají daleko rychleji jak běžné křemíkové hroty. Výhodné se ukazuje použití kombinace SPM s rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM, *Scanning Electron Microscopy*), pomocí kterého je dosahováno většího rozlišení a zvětšení jak u mikroskopu optického. Pomocí elektronového svazku lze snadno nalézt místo zájmu na vzorku a následně lze velice přesně navést sondu na toto místo. Bohužel taková kombinace sebou nese problémy a nevýhody. Běžný SPM mikroskop společně s elektronovým mikroskopem je obtížné použít, neboť u běžných SPM mikroskopů je využívána optická detekce, která zabírá veškerý prostor nad sondou. Navigace pomocí elektronového svazku je tím znemožněna, protože na sondu přes detekční sestavu jde velice obtížně vidět (obrázek 3.1a). Existují ovšem SPM mikroskopy využívající sondy se samosnímacím senzorem, které nepotřebují optickou detekční sestavu. Senzor je součástí sondy a díky němu je možné snímat ohyb sondy způsobený interakcí se vzorkem. Takové sondy už poté lze použít i v mikroskopech, které obsahují iontové svazky, kterými lze polovodičové vzorky vyrábět. Použití takovýchto sond sice umožní SPM analýzu v kombinaci se SEM, nicméně jsou svázané dalšími nevýhodami, které znesnadňují měření. Důvodem je značně složitější výroba takových sond, která obsahuje více výrobních kroků a sondy jsou



Obrázek 3.1: (a) Sestava běžného SPM mikroskopu s optickou detekcí v kombinaci s elektronovým mikroskopem. Elektronů velmi špatně dosahují vzorku, neboť jim v cestě brání detekční sestava SPM mikroskopu. (b) Sestava SPM mikroskopu se samosnímacími sondami v kombinaci s elektronovým mikroskopem. Elektron mohou velmi jednoduše dosahovat vzorku, nic jim po cestě nebrání v průchodu. Výsledně lze korelovat informace z obou mikroskopů.

### 3.1. RASTROVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP

také cenově nákladnější. I přesto je SPM mikroskop se samosnímacími sondami v kombinaci s rastrovacím elektronovým mikroskopem ideálním a velmi vhodným nástrojem pro analýzu polovodičových součástek (obrázek 3.1b)[4].

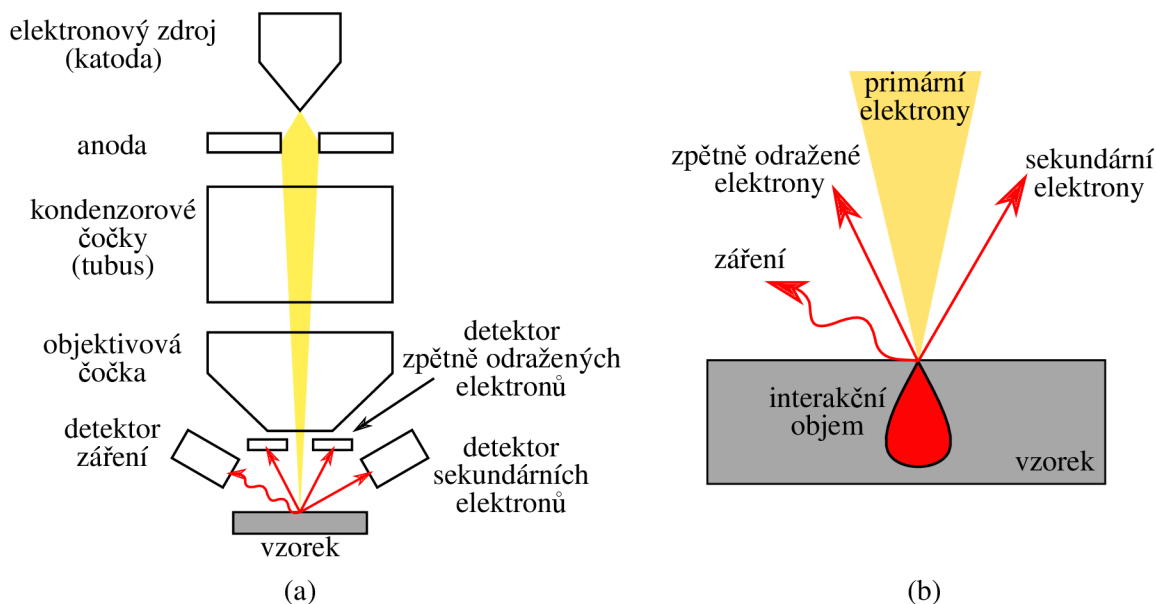
V této kapitole bude představena měřicí sestava SPM-SEM použitá dále v experimentální části. Součástí sestavy je rastrovací elektronový mikroskop MIRA od společnosti TESCAN [49] a SPM mikroskop LiteScope od společnosti NenoVision [50] využívající samosnímací sondy.

## 3.1. Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM) slouží pro zobrazování a analýzu povrchu vzorku s vysokým rozlišením. Princip fungování SEM spočívá v tom, že elektrony jsou emitovány z elektronového děla a následně ve formě svazku zaostřeny na malou oblast vzorku. Při dopadu elektronů na povrch vzorku dochází k emisi elektronů a elektromagnetickému záření. Tyto interakce jsou zachyceny detektory a transformovány do obrazu [51].

SEM umožňuje získání podrobných informací o morfologii, topografii a složení povrchu vzorku. Jeho schopnost dosahovat subnanometrového rozlišení a zobrazovat vzorky ve velkých zvětšeních umožňuje studium nanostruktur polovodičových materiálů a součástek [51].

Princip fungování SEMu je založen na interakci urychlených elektronů s povrchem vzorku. Elektrony jsou emitovány z katody v elektronovém dělu pomocí termální emise nebo emise pomocí elektrického pole (autoemise). Emitované elektrony jsou urychleny v elektrickém poli na požadovanou energii a poté zaostřeny elektromagnetickými čočkami na malou oblast povrchu vzorku (obrázek 3.2a). Tyto elektrony jsou nazývány jako primární elektrony. Když primární elektrony dopadnou na povrch vzorku, dochází k různým interakcím. Tyto interakce způsobují vyražení elektronů z povrchu (sekundární elektrony), zpětně odražené primární elektrony, rentgenové záření a různé druhy elastického či nee-



Obrázek 3.2: (a) Rastrovací elektronový mikroskop. Popis částí a detektorů mikroskopu. (b) Interakce elektronu se vzorkem za vzniku nových částic a záření.



### 3. MĚŘÍCÍ SESTAVA PRO SPM-SEM ANALÝZU

lastického rozptylu (obrázek 3.2b). Elektronové nebo elektromagnetické záření, které vzniká při interakci se vzorkem, je zachytáváno detektory. Signály z detektorů jsou zpracovány a zobrazeny jako obraz. Celý proces je řízen počítačem, který rastruje elektronovým svazkem po povrchu vzorku [51].

Nejvyužívanějšími signály v této práci jsou signály od sekundárních elektronů (SE, *Secondary Electron*) a zpětně odražených elektronů (BSE, *Back-Scattered Electron*). Pomocí sekundárních elektronů a zpětně odražených elektronů lze pozorovat vlastnosti povrchu vzorku a získat informace o jeho struktuře a složení. Sekundární elektrony jsou elektrony emitované z povrchových atomů vzorku v důsledku excitace primárními elektrony. Pomocí sekundárních elektronů lze získat informace o topografii povrchu vzorku a jeho struktuře. SEM obraz získaný pomocí sekundárních elektronů umožňuje detailní zkoumání hrubosti povrchu, mikrostruktur a morfologie vzorku [52]. Zpětně odražené elektrony jsou primární elektrony emitované z povrchu vzorku, které prošly hlubšími vrstvami materiálu a odrazily se zpět. Zpětně odražené elektrony mají vyšší energii než sekundární elektrony a jsou citlivější na změny v atomovém čísle a hustotě materiálu vzorku. Pomocí zpětně odražených elektronů lze získat informace o chemickém složení vzorku, rozdílech v krystalické struktuře a kontrastu mezi různými materiály vzorku [53].

V této práci byl využit rastrovací elektronový mikroskop MIRA od společnosti TESCAN (obrázek 3.3)[49].

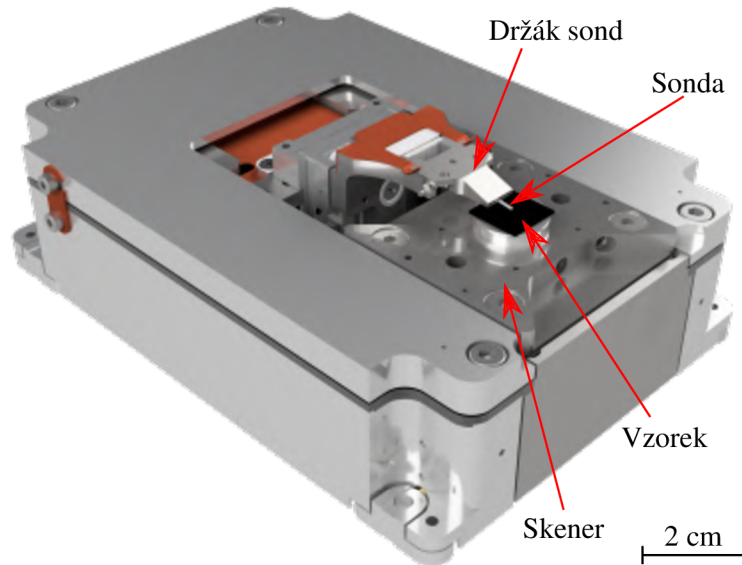


Obrázek 3.3: Elektronový mikroskop MIRA se znázorněnými částmi. Převzato a upraveno z [49].

## 3.2. SPM mikroskop LiteScope

Mikroskop LiteScope je rastrovací sondový mikroskop, který je možné použít v kombinaci s rastrovacím elektronovým mikroskopem. Mikroskop lze rozdělit na dvě základní části –

### 3.2. SPM MIKROSKOP LITESCOPE



Obrázek 3.4: SPM mikroskop LiteScope se znázorněnými částmi. Převzato a upraveno z [50].

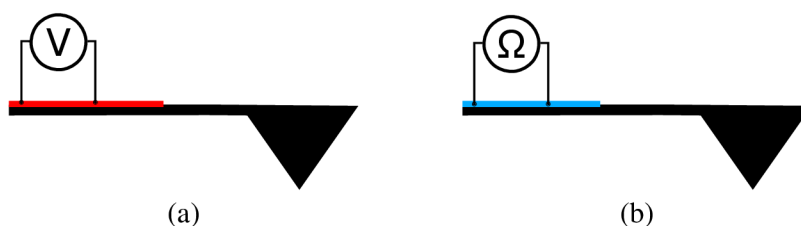
hlava mikroskopu a řídicí elektronika. Hlava mikroskopu je umístěna do vakuové komory a přes průchodky propojená s řídicí elektronikou. Hlava mikroskopu se skládá ze skeneru, ve kterém je umístěn vzorek, a držáku sond, ve kterém je umístěna sonda (obrázek 3.4). Držákem sondy je pohybováno pomocí makromotorů, které na hrubo přibližují sondu ke vzorku. Řídicí elektronika řídí pohyb skeneru, zpracovává signál získaný během měření a ukládá ho. Rozdíl oproti běžnému SPM mikroskopu je ve způsobu rastrování. LiteScope využívá rastrování vzorkem, kdy hrot je nehybný. Tento přístup zároveň umožňuje na jednom místě provádět SPM analýzu a v těsné blízkosti hrotu svítit s elektronovým svazkem. Jednotlivé signály lze následně přes sebe překládat a korelovat tak informace z obou mikroskopů [54].

#### 3.2.1. Sondy se samosnímacím senzorem

Sondy se samosnímacím senzorem pro SPM jsou klíčovou součástí mikroskopu LiteScope. Tyto sondy jsou speciálně navrženy tak, aby byly citlivé na malé změny v blízkosti povrchu vzorku a zároveň umožnily propagaci mechanických oscilací potřebných pro některé techniky.

V této práci jsou využity dva základní módy měření: kontaktní a pokleповý. V kontaktním módu sonda nekmitá, ale pouze se ohýbá v důsledku odpuzivých sil mezi hrotem a vzorkem, které jsou zaznamenávány vychylováním raménka. V pokleповém módu sonda osciluje nad vzorkem na své rezonanční frekvenci. V důsledku přitažlivých a odpuzivých interakcí mezi sondou vzorkem dochází ke změně amplitudy a rezonanční frekvence, které jsou měřeny. Tím se rozlišují dvě základní modulační moduly pokleповého módu: amplitudová a frekvenční.

Hrot a raménko samosnímací sondy jsou obvykle vyrobeny z křemíku. Tento hrot má ostrý konec a je citlivý na malé síly a interakce v okolí povrchu. Pro měření elektrických vlastností bývá hrot povrstven vodivou vrstvou, která poté interaguje s povrchem vzorku. Samosnímací senzor je umístěn na samotném konci sondy a je vyroben z tenké vrstvy

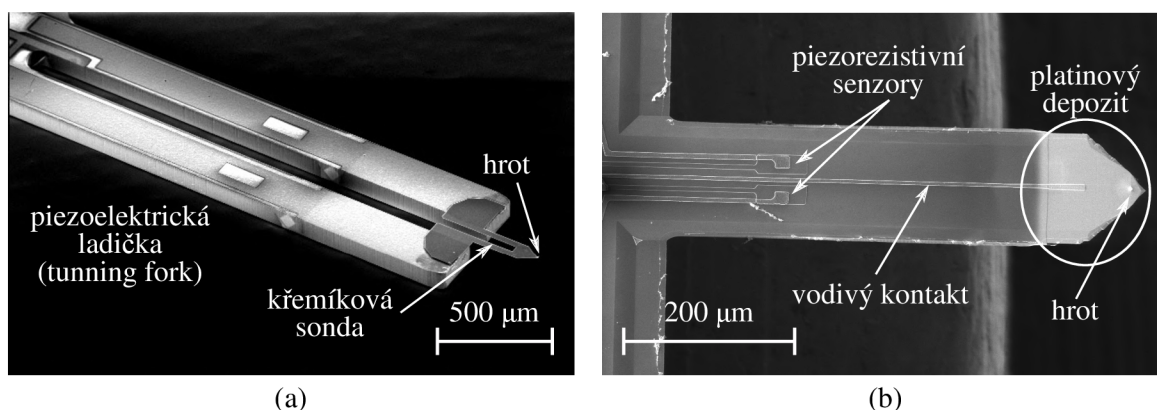


Obrázek 3.5: Detekční senzory pro měření vychýlení raménka. (a) Detekce pomocí piezoelektrického jevu a (b) detekce pomocí piezorezistivního materiálu. Převzato a upraveno z [5].

buďto piezoelektrického [55] nebo piezorezistivního [56] materiálu. Když je hrot sondy blíže k povrchu vzorku, dochází k malému ohnutí a deformaci senzoru umístěného na raménku sondy. Tato deformace způsobuje změnu v elektrickém napětí piezoelektrického materiálu (obrázek 3.5a) nebo změnu elektrického odporu piezorezistivního materiálu (obrázek 3.5b). Tyto změny jsou detekovány a měřeny. Pro co největší citlivost jsou senzory umístěny na sondě, kde dochází k největším mechanickým napětím [5].

V této práci jsou použity dva typy sond se samosnímacím senzorem. První je Akiyama sonda určená pro měření topografie (AFM). Tato sonda nemá na svém hrotu žádnou vodivou vrstvu. Její sensor je vyroben z piezoelektrického materiálu (obrázek 3.6a). U této sondy je využit piezoelektrický *tuning fork* sensor (laděný vidličkový sensor), pomocí kterého jsou generovány vysokofrekvenční vibrace. Tato sonda je charakteristická úzkým rezonančním píkem a je vhodná pro frekvenční modulaci poklepového módu. Změny oscilací sondy jsou měřeny pomocí kontaktů na ladičce, které měří elektrické napětí piezoelektrického materiálu způsobené ohybem [57].

Druhým typem sondy je sonda NenoProbe, která je určená pro veškerá měření elektrických vlastností (CAFM, EFM, KPFM). Na hrotu sondy je nanasena platinová vodivá vrstva. Sensor této sondy je vyroben z piezorezistivního materiálu (obrázek 3.6b), který jsou zapojeny do obvodu Wheatstoneova můstku. Výstupním napětím na můstku je měřen ohyb sondy. Tato sonda je využívána jak pro kontaktní mód tak pro poklepový. Při



Obrázek 3.6: SPM sondy se samosnímacím senzorem použité v této práci. Pohled na sondy je zespodu, kdy hrot směřuje vzhůru. (a) Akiyama sonda využívající *tuning fork* senzoru z piezoelektrického materiálu. Tento typ sondy je využit pro měření techniky AFM. (b) NenoProbe sonda využívající piezorezistivního senzoru. Tento typ sondy je použit pro měření technik CAFM, EFM, KPFM.

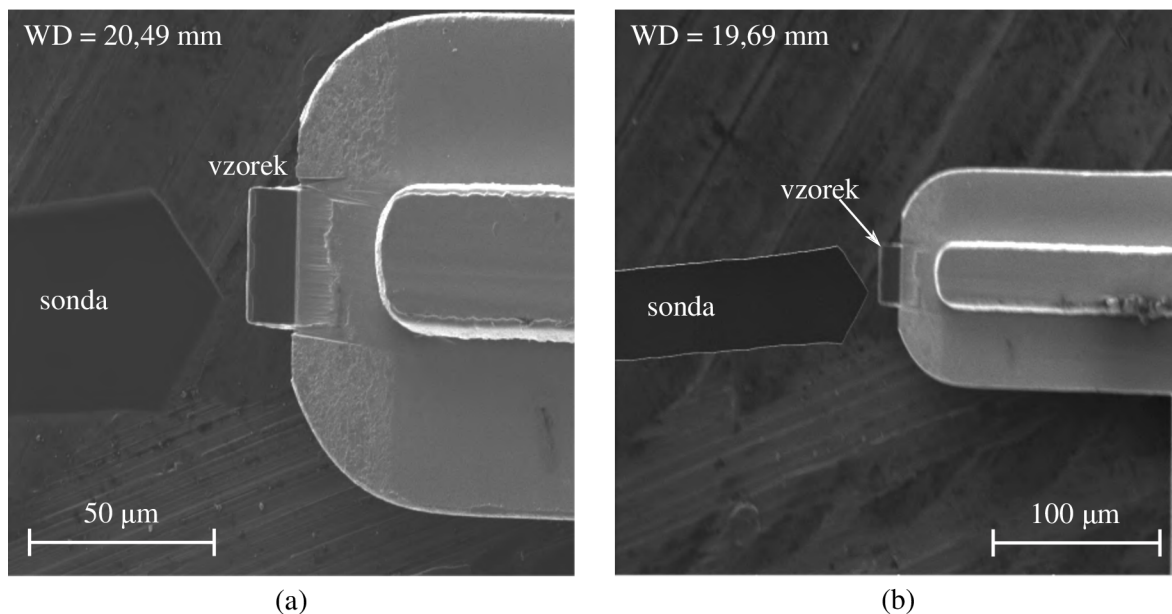
### 3.3. NAVIGACE SONDY NA VZOREK

pokleповém módu je sonda v kontaktu s piezoelektrickým materiálem, kterým jsou propagovány mechanické oscilace na sondu. Tato sonda je charakteristická širokým rezonančním pásmem a je využívána pro amplitudové modulace.

Pro měření techniky SSRM zatím neexistuje komerčně dostupná sonda se samosnímacím senzorem.

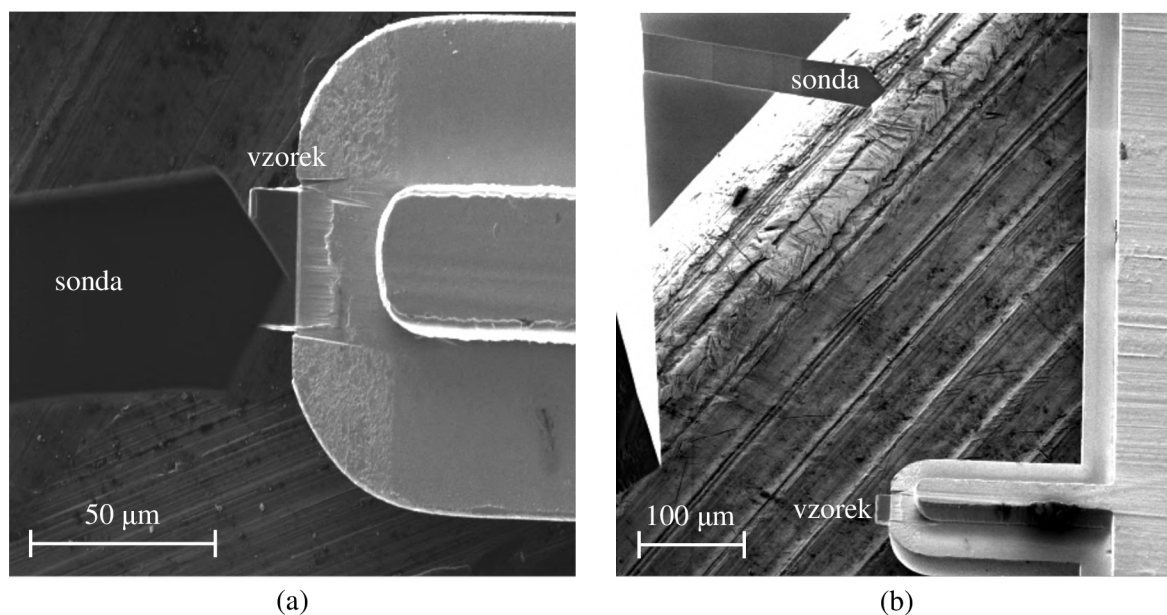
### 3.3. Navigace sondy na vzorek

Před každým měřením je potřeba navigovat sondu na vzorek. Díky SEMu je tato navigace mnohem jednodušší a přesnější jak s optickým mikroskopem. Po vyčerpání komory elektronového mikroskopu, kde se nachází LiteScope se sondou a vzorkem, je pomocí elektronového svazku nalezeno místo zájmu na vzorku. Na toto místo je svazek zaostřen (obrázek 3.7a). Díky zaostření je v uživatelském rozhraní elektronového mikroskopu dopočítaná pracovní vzdálenost (WD, *Working Distance*) mezi objektivem elektronového mikroskopu a povrchem vzorku. Tento proces ostření je poté proveden také na sondě se samosnímacím senzorem (obrázek 3.7b). V prvním kroku je důležité zajistit, aby pracovní vzdálenost sondy byla menší jak pracovní vzdálenost vzorku. To způsobí, že při přijždění sondy na místo zájmu na vzorku bude sonda výše jak vzorek a nedojde k nárazu do vzorku a zničení sondy či vzorku.



Obrázek 3.7: Navigace sondy na vzorek před přijetím do kontaktu. (a) Zaostření na vzorek, kterým je v tomto případě lamela na držáku pro transmisní elektronový mikroskop. Pracovní vzdálenost (WD, *working distance*) mezi objektivem elektronového mikroskopu a vzorkem je 20,49 mm. (b) Zaostření na sondu, kdy je pracovní vzdálenost mezi objektivem elektronového mikroskopu a vzorkem 19,69 mm. Vzdálenost mezi vzorkem a objektivem je větší než vzdálenost mezi objektivem a sondou. Sonda je tedy výše jak vzorek a lze se sondou přijet nad vzorek.

V druhém kroku je sonda pomocí makromotorů navedena nad místo zájmu, které je sondou překryto (obrázek 3.8). Z rozdílu pracovních vzdáleností sondy a vzorku lze

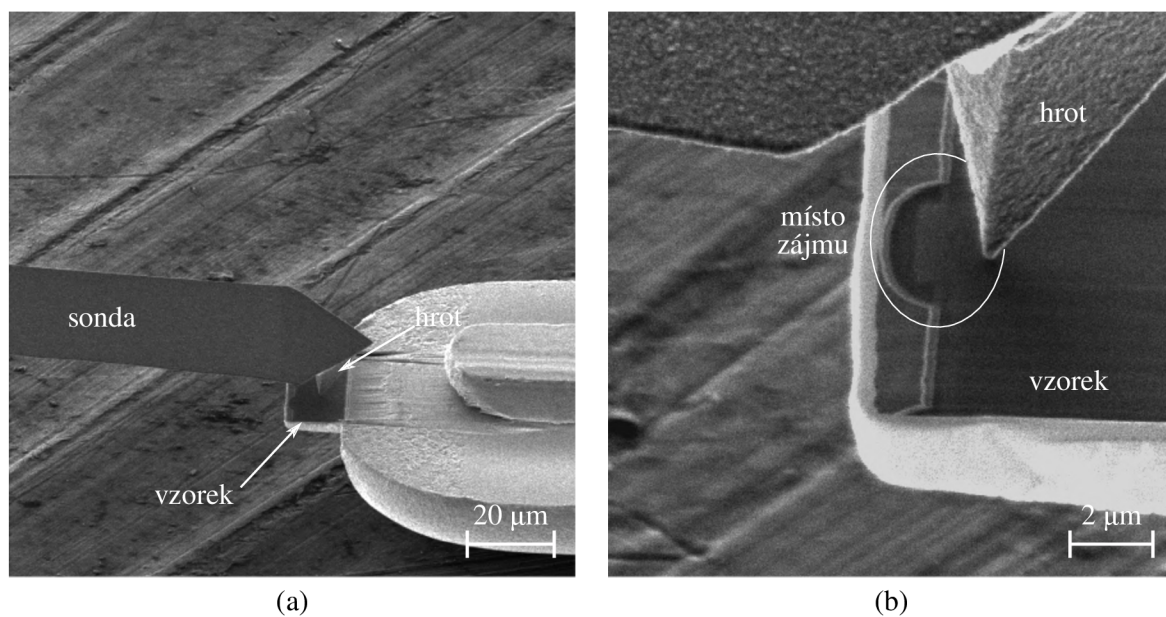


Obrázek 3.8: Sonda nad vzorkem v bezpečné vzdálenosti. (a) Sonda překrývá vzorek a lze spustit automatické příjždění ke vzorku, kdy hrot sondy automaticky přijede do kontaktu se vzorkem. Pohled shora na sondu a vzorek. (b) Pohled pod úhlem před spuštěním automatického příjždění.

zjistit vzdálenost mezi hrotem a vzorkem. Pokud je vzdálenost velká (1 mm), je možné tuto vzdálenost zmenšit pomocí posuvu makromotorů v ose  $z$ . Je důležité, aby nedošlo k zmenšení vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem pomocí makromotorů tak, že hrot narazí do vzorku, což by vedlo ke zničení hrotu sondy. Je-li vzdálenost mezi sondou a vzorkem v řádu stovek mikrometrů je bezpečnější nechat mikroskop automaticky přijet sondou ke vzorku. Před spuštěním přijetí je potřeba nastavit referenční hodnotu, při které dojde k zastavení příjždění. Tato hodnota udává jakou silou bude hrot do vzorku tlačěn.

Následně je potřeba dostat hrot přesně na místo, kde má být prováděno měření. Ve většině případech není hrot umístěn na úplném konci sondy a nejde na něj elektronovým svazkem shora vidět. Je potřeba provést naklonění stolku elektronového mikroskopu, čímž je možné vzorek pozorovat pod úhlem a zároveň lze sledovat polohu hrotu sondy. Náklon stolku je prováděn podle druhu sondy, tak aby šlo vidět na hrot. Běžně se náklon pohybuje okolo  $50^\circ$  (obrázek 3.9a). Hrot je poté naveden na místo zájmu pomocí posuvu skeneru v osách  $x$  a  $y$ , čímž je dosaženo velice přesně výchozího místa pro rastrování (obrázek 3.9b).

### 3.3. NAVIGACE SONDY NA VZOREK



Obrázek 3.9: Pohled na sondu v kontaktu se vzorkem pod úhlem 50°. (a) Hrot v kontaktu se vzorkem po přijetí. Hrot je sice v kontaktu, nicméně na nezajímavém místě. (b) Pohybem skeneru je dosaženo místo zájmu pro analýzu.

## 4. Polovodičové vzorky

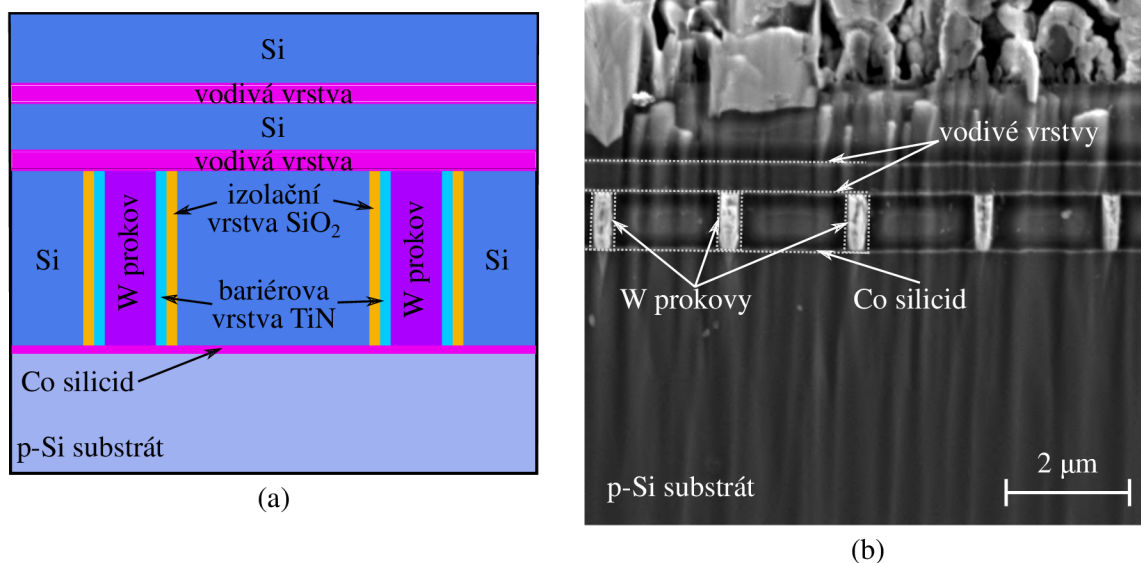
V této kapitole budou představeny vzorky, které budou předmětem analýzy. Prvním z nich je CMOS čip, který je klíčovou součástí moderní mikroelektroniky. Tento integrovaný obvod kombinuje komplexní struktury a funkčnost, která ovlivňuje výkon digitálních zařízení. Konkrétně budou analyzována wolframová propojení, která jsou zásadní vodivé spojení různých částí CMOS čipů a umožňují přenos signálů mezi různými oblastmi. Bipolární tranzistor, další důležitá součástka, bude analyzován jako další. Nakonec bude představen a zkoumán MOSFET z karbidu křemíku, který je klíčovým prvkem výkonných elektronických zařízení díky svým odolným vlastnostem. Jednotlivé součástky jsou představeny z důvodu pochopení funkce a materiálového složení. To usnadní analýzu jednotlivých součástek, umožní zjistit možnosti jednotlivých technik a pochopit chování technik na polovodičových vzorcích, což bude velmi užitečné pro měření neznámých polovodičových vzorků. V polovodičovém průmyslu je běžné, že je dodán vzorek bez podrobných informací. To je způsobeno tím, že se firmy obávají vyzrazení tajemství nákladného technologického procesu, či důležitého *know-how*.

Pro posouvání technologických procesů nebo hledání příčin nefunkčnosti součástky je potřeba tyto místa připravit. Ve většině případu se jedná o příčné řezy součástkou nebo lamely. Řezy jsou prováděny buďto pomocí laseru [58] nebo iontového svazku [59]. Ionty ostřelují vzorek a atomy vzorku jsou odprašovány. Tímto způsobem je vzorek ostřelován do doby, kdy dojde k nalezení potřebného místa. Lamely jsou vytvářeny iontovým svazkem, kdy iontový svazek odprašuje oblasti okolo místa zájmu (okolo tranzistoru). Poté je neodprašená oblast vytažena pomocí nanomanipulátoru a přenesena na držák lamel. Pomocí iontového svazku lze také vzorky leštit a docílit tak co nejrovnějšího povrchu vzorku [59]. Během odprašování a leštění iontovým svazkem je běžné, že na povrchu se vytvářejí závěsy (*curtains*), čímž je označována topografie povrchu, která svým tvarem připomíná závěsy. Tyto závěsy jsou způsobeny odprašováním různých materiálů v součástce, kdy se jeden materiál odprašuje rychleji a jiný pomaleji [60]. Také tyto závěsy mohou být způsobeny použitím vysokých proudů iontového svazku [61, 62].

### 4.1. Wolframové prokvy v čipu typu CMOS

Prvním vzorkem, který byl použit k měření v této práci, je CMOS čip (obrázek 4.1). Konkrétně se jedná o příčný řez součástkou vytvořený pomocí iontového svazku. Řez byl proveden na místě, ve kterém byly v procesu výroby vytvořeny wolframové prokvy. Takovéto prokvy spojují vodivé substrát s horními vrstvami, které pak dále vedou signál skrze čip. V řezu je viditelný substrát, kterým je dopovaný křemík typu P. Poté je viditelná silicidová vrstva, což je vrstva kovu (v tomto případě se jedná o vrstvu kobaltu, Co), která byla deponována na substrát a dále pomocí žhání smíchaná s křemíkem. Takováto operace je prováděná k vytvoření kvalitního vodivého spojení mezi polovodičem a kovem. Nad vrstvou silicidu už jsou viditelné wolframové propojení. Takové prokvy jsou vytvářeny tak, že na silicidovou vrstvu je nanášena vrstva křemíku, do které jsou poté vyleptány díry. Po stranách děr je nejdříve deponována izolační vrstva poté bariérová vrstva, která brání difuzi iontů a snižuje chemickou interakci mezi izolační vrstvou a kovem. Nakonec je díra vyplněna vodivým materiálem. V tomto případě je izolační vrstva tvořena oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2$ ), bariérová vrstva je tvořena nitridem titanu ( $\text{TiN}$ ) a kov vyplňující

#### 4.1. WOLFRAMOVÉ PROKOVY V ČIPU TYPU CMOS

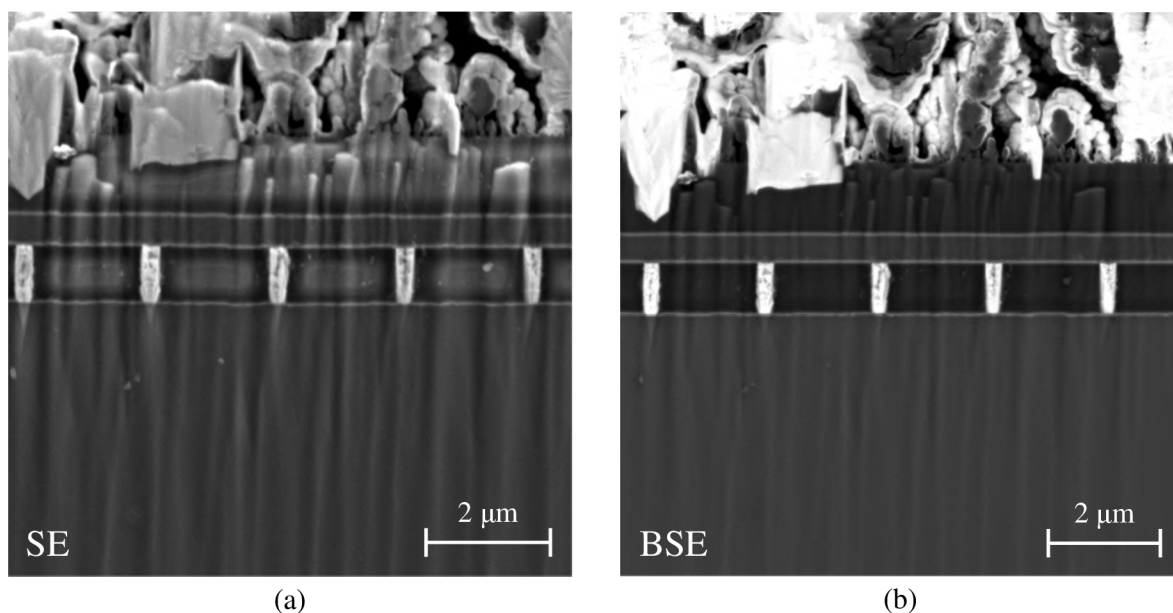


Obrázek 4.1: Wolframové prokovy v čipu typu CMOS. (a) Schéma řezu součástkou. Wolframové prokovy spojující P dopovaný substrát pomocí kobaltového silicidu a dvě vodivé vrstvy vedoucí signál dále součástkou. Prokovy jsou obklopeny bariérovou a izolační vrstvou. (b) Obraz z rastrovacího elektronového mikroskopu s vyznačenými jednotlivými oblastmi ze schématu.

díru je wolfram (W). Nakonec jsou tyto prokovy spojeny s dvěma vodivými vrstvami oddělené vrstvou křemíku. Nad těmito vrstvami se nachází další vrstva křemíku. Při obdržení vzorku od polovodičové firmy nebyla poskytnuta téměř žádná informace o vzorku. Poskytnuta byla pouze informace o materiálech prokovu a substrátu. To, k čemu oblast slouží a z čeho jsou vodivé vrstvy nad prokovy, nebylo sděleno. U prokovů je obecně důležité, aby díry byly kovem co nejlépe zaplněny a byla tak jejich účinnost vedení signálu co největší.

Před samotným měřením byly pořízeny obrázky z rastrovacího elektronového mikroskopu. Měřen byl jak signál od sekundárních elektronů (SE) tak od elektronů zpětně odražených (BSE). Pro pořízení obou signálů byl použit elektronový svazek o energii 5 keV. V signálu od sekundárních elektronů je možné rozlišit jednotlivé oblasti popsané v schématu. Lze pozorovat, že během vytváření řezu, došlo ke vzniku závěsů. To lze pozorovat především v signálu od sekundárních elektronů, protože jsou tyto elektrony citlivé na topografii vzorku. U wolframových prokovů to je způsobené tím, že se wolfram odprašoval hůř a je vyšší jak zbytek povrchu. Také lze pozorovat, že jednotlivé vodivé oblasti jsou světlejší jak oblasti polovodičové. Pomocí sekundárních elektronů lze pozorovat rozdíl v kontrastu mezi P a N dopovaným polovodičem. Polovodič typu P je běžně světlejší jak polovodič typu N [63, 64, 65, 66]. Substrát je P dopovaný polovodič, ale jelikož není známo, zda se na vzorku nachází nějaký přechod mezi P a N oblastí, nelze tento fakt potvrdit. Kolem vodivých oblastí se vytváří tmavý stín, který je spojen s přechodem různých materiálů. Elektrony vyražené v těsné blízkosti jsou tak vodivou vrstvou ovlivněny (obrázek 4.2a). V signálu od zpětně odražených elektronů pozorujeme materiálové kontrasty. Je zřejmé, že oblasti obsahující atomy s vyšším atomovým číslem budou na obrázku světlejší. To lze pozorovat u wolframového materiálu, který je světlejší jak křemíkový materiál. Také





Obrázek 4.2: Obraz řezu wolframovými prokvy v CMOS čipu vytvořený pomocí (a) sekundárních elektronů (SE) a (b) zpětně odražených elektronů (BSE). Použitá energie elektronového svazku je 5 keV.

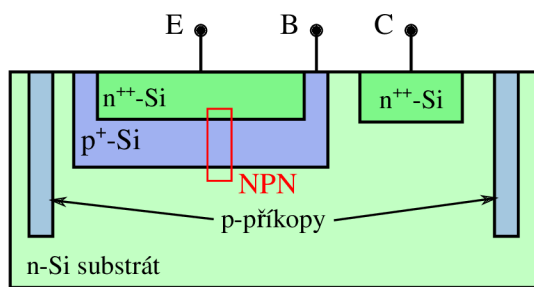
vodivé vrstvy jsou světlé. Oblast substrátu je světlejší jak nedopovaná křemíková oblast, což by mohlo být zapříčiněno akceptorovými prvky v polovodiči (obrázek 4.2b).

## 4.2. Bipolární tranzistor

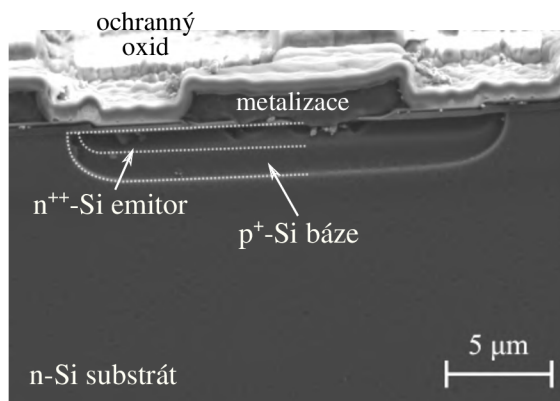
Druhou součástí vybranou pro SPM analýzu je řez bipolárním tranzistorem (obrázek 4.3). Tento řez byl vytvořen pomocí laseru, kdy bylo nalezeno předpokládané místo zájmu, a poté následovalo chemické leptání. Chemické leptání bylo provedeno kvůli snazšímu hledání oblasti bipolárního tranzistoru, kdy se jednotlivé oblasti leptají s různou rychlostí [67]. Lze tak snadněji identifikovat místa zájmu, protože tyto místa mají rozdíly topografií. Běžný bipolární tranzistor obsahuje emitor, bázi a kolektor. Standardně jsou tyto aktivní oblasti po obou stranách izolovány příkopy. Tyto příkopy jsou vytvořeny pomocí dopování, které je stejného typu jako dopování báze (je-li báze P dopovaná tak příkopy jsou také P dopované). Tím je v substrátu vytvořen PN přechod, protože substrát je tvořen polovodičem opačného dopování. Takovéto příkopy jsou vytvářeny iontovou implantací a brání elektronům se rozptýlovat do míst, kde není možné je zachytit kolektorem. Díky těmto příkopům měla být jasně dána oblast bipolárního tranzistoru. Bohužel takovéto příkopy nebyly v řezu pomocí elektronového mikroskopu viditelné. Nakonec byla vybrána oblast, která svým tvarem bipolární tranzistor připomíná.

V řezu lze pozorovat ze signálu od sekundárních elektronů výrazně světlé oblasti v horní části. Tento silný signál je způsoben izolací čipu, která je z nevodivého materiálu a nabíjí se. Dále jsou viditelné dvě hrany (světlý signál) již přímo v oblasti bipolárního tranzistoru. Tyto hrany jsou vytvořené díky chemickému leptání a je tedy viditelný topografický kontrast [67]. Opět v signálu od sekundárních elektronů není viditelný kontrast od různých typů dopování, které by se zde měly nacházet (obrázek 4.4a). Ze signálu od

### 4.3. UNIPOLÁRNÍ TRANZISTOR MOSFET



(a)



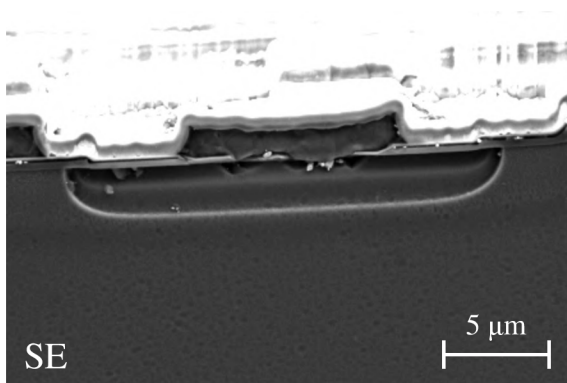
(b)

Obrázek 4.3: Bipolární tranzistor. (a) Schéma řezu bipolárním tranzistorem s jeho oblastmi – emitor, báze, kolektor a izolační příkopy. (b) Obraz z rastrovacího elektronového mikroskopu s vyznačenými jednotlivými oblastmi ze schématu.

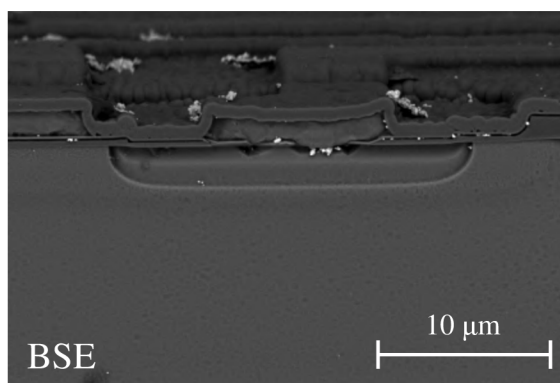
zpětně odražených elektronů lze pozorovat zvýšenou intenzitu od nečistot. Žádný výrazný materiálový kontrast, který by vytvářely těžší prvky, zde není viditelný (obrázek 4.4b).

### 4.3. Unipolární tranzistor MOSFET

Dalším vzorkem je unipolární tranzistor MOSFET. Jedná se o planární MOSFET typu D, také nazýván jako D-MOS. Tento vzorek byl pomocí iontového svazku odprášen z čipu jako lamela. Následně byl také iontovým svazkem leštěn pro zajištění co nejrovnějšího povrchu. D-MOS tranzistor má lehce odlišnou strukturu od klasického MOSFET tranzistoru. Tento typ je využíván u výkonnostních silikon-karbidových tranzistorů. Dle schématu se na spodní straně nachází kovový kontakt (*drain*), který je spojený se substrátem z N dopovaného karbidu křemíku (SiC) (obrázek 4.5). Na tento substrát je poté narostlá N dopovaná epitaxní vrstva. Do epitaxní vrstvy jsou vytvořeny P dopované oblasti a následně N dopované oblasti, které jsou ve stejném místě, ale jsou implantovány s nižší



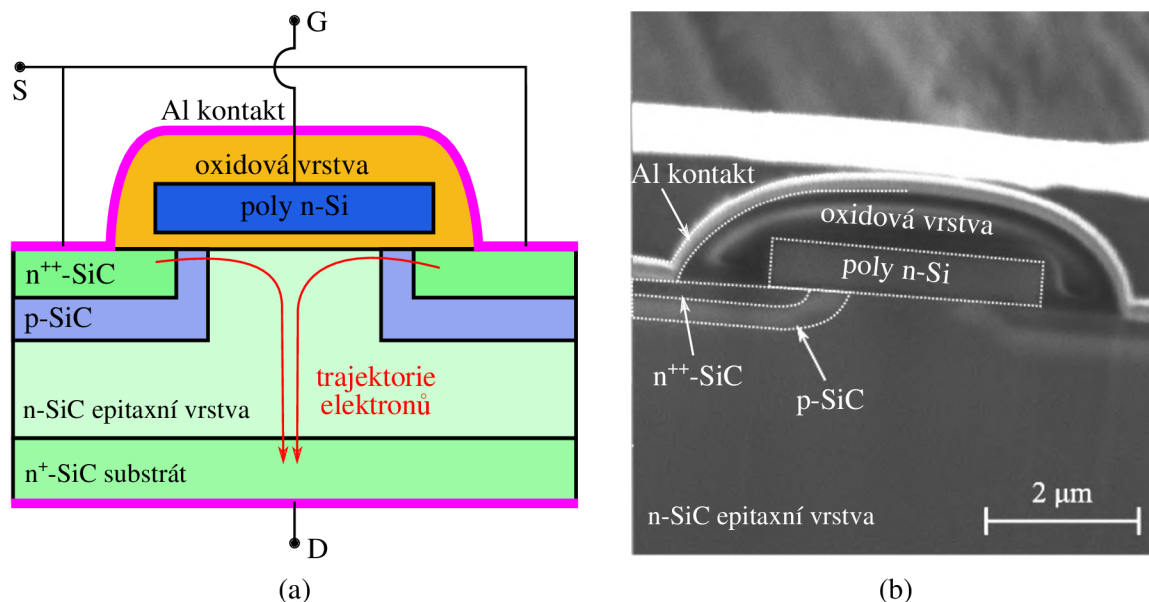
(a)



(b)

Obrázek 4.4: Obraz řezu bipolárním tranzistorem vytvořený pomocí (a) sekundárních elektronů (SE) a (b) zpětně odražených elektronů (BSE). Použitá energie elektronového svazku je 5 keV.

implantační hloubkou. Na povrch je dále deponována oxidová izolační vrstva, nad kterou je poté vytvořen *gate* z N dopovaného polykrystalického křemíku. *Gate* je dále izolován opět oxidovou vrstvou. Nakonec je oxid povrstven hliníkem a v místech s dopováním typu N je vytvořeno vodivé spojení. Hliníková vrstva spojena s N dopovanou oblastí je v tomto tranzistoru *source*. U této součástky bylo dostupných daleko více informací, ale přesnější informace o koncentraci dopování či typu dopantů dostupné bohužel nebyly.

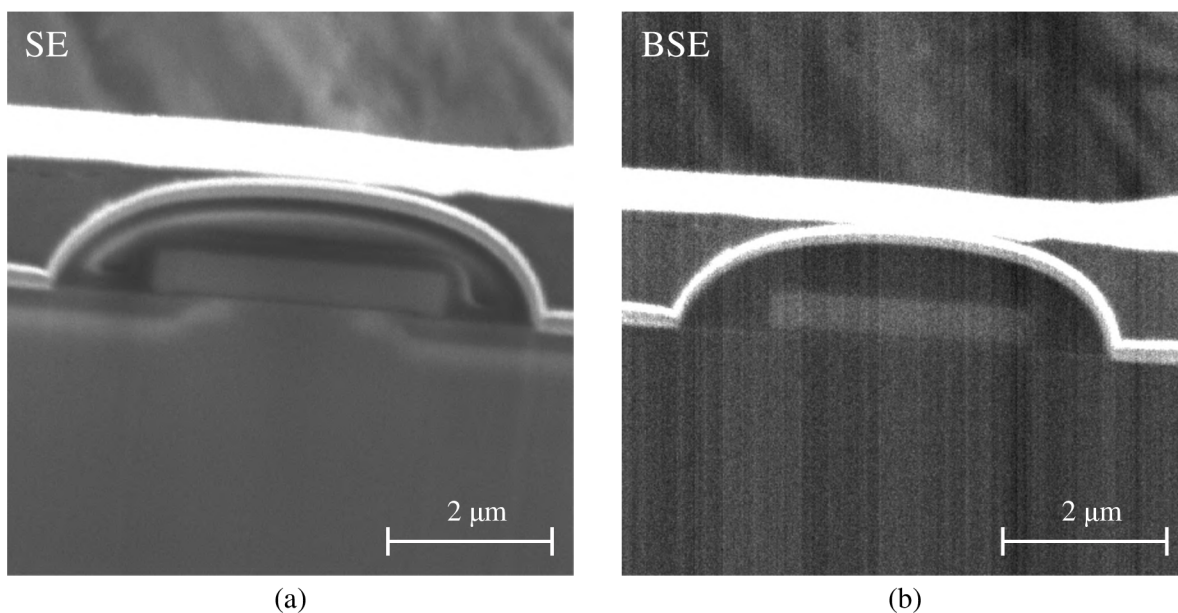


Obrázek 4.5: Unipolární tranzistor MOSFET, typ D-MOS. Schéma řezu tranzistorem D-MOS. Dvě implantované oblasti typu N a P v substrátu s dopováním typu N. Proud tranzistorem je ovládán polykrystalickým křemíkovým hradlem, které je obklopené izolační oxidovou vrstvou. (b) Obrázek z rastrovacího elektronového mikroskopu s vyznačenými jednotlivými oblastmi ze schématu.

Funkce tohoto typu se liší tím, že elektrony nedriftují podél *gate* od *source* do *drain* jako je běžné u základního typu MOSFET. V tomto typu dochází k driftování elektronu od N dopované oblasti přes P dopovanou oblast, ve které se pomocí napětí na *gate* vytváří vodivý kanál, do epitaxní vrstvy a substrátu. Takový typ součástky je využíván pro vysokonapěťové aplikace, protože tloušťkou epitaxní vrstvy lze nastavovat velikost průrazného napětí součástky.

Na obrázcích z rastrovacího elektronového mikroskopu nelze pozorovat výrazné topografické artefakty, díky tomu, že je lamela téměř rovná. Ze signálu sekundárních elektronů lze vidět světlý hliníkový *source* ve tvaru D. Co je zde viditelné velice pěkně je kontrast mezi P a N dopovanou oblastí. Dle předpokladu je oblast s dopováním typu P světlejší oproti oblasti s dopováním typu N. Také lze pozorovat velmi úzký tmavý pruh mezi hradlem a substrátem, což odpovídá oxidové izolační vrstvě (obrázek 4.6a). Na obrázku ze zpětně odražených elektronů lze velice zřetelně rozeznat hliníkový kontakt. Také lze vidět, že hradlo z polykrystalického křemíku vytváří mnohem větší signál jak krystalický karbid křemíku. To je způsobeno tím, že v polykrystalickém křemíku jsou zrna různě natočená a tím odrážejí daleko více elektronů, jak látka krystalická (obrázek 4.6b).

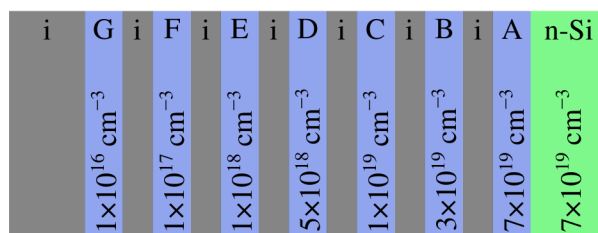
#### 4.4. P DOPOVANÝ REFERENČNÍ VZOREK PRO TECHNIKU SSRM



Obrázek 4.6: Obraz řezu tranzistorem D-MOS vytvořený pomocí (a) sekundárních elektronů (SE) a (b) zpětně odražených elektronů (BSE). Použitá energie elektronového svazku je 5 keV.

#### 4.4. P dopovaný referenční vzorek pro techniku SSRM

Posledním vzorkem je referenční vzorek pro techniku SSRM (obrázek 4.7)[68]. Vzorek je tvořen N dopovaným křemíkovým substrátem, který je dopován antimonem. Na substrátu jsou postupně epitaxně narostlé P dopované vrstvy s různou koncentrací dopantů. Tyto vrstvy jsou dopované bórem. Jednotlivé P dopované vrstvy jsou odděleny intrinsickým křemíkem. Pro lepší orientaci v naměřených datech jsou jednotlivé P dopované vrstvy označeny písmeny A-G, přičemž A označuje nejvíce dopovanou vrstvu a G nejméně dopovanou. Tento vzorek je určený pro techniku SSRM a lze pomocí něj pozorovat chování této techniky pro různé parametry měření.



Obrázek 4.7: Schéma referenčního křemíkového vzorku s P dopovanými vrstvami, které mají různou koncentraci dopantů. Vrstvy jsou značeny písmeny od A do G, které značí různou koncentrací. Jednotlivé dopované vrstvy jsou odděleny vrstvami intrinsického křemíku. Na pravé straně vzorku se nachází N dopovaná oblast. Převzato a upraveno z [68].

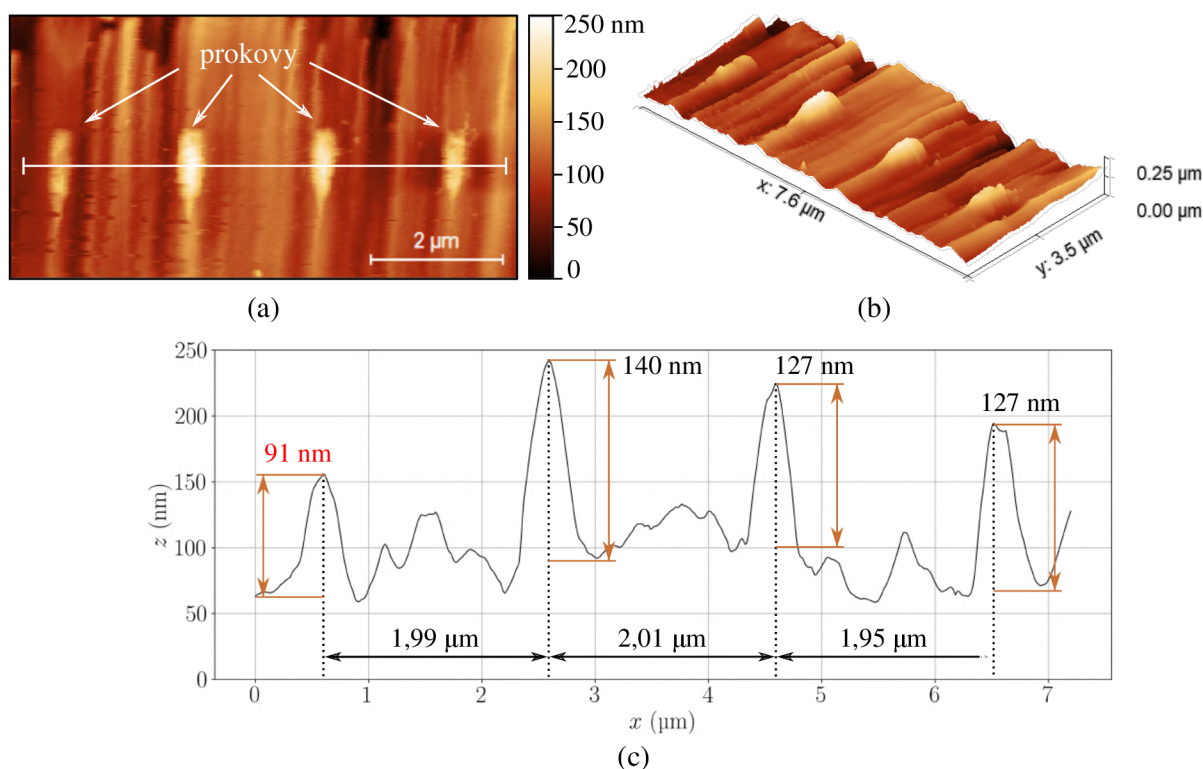
## 5. Analýza polovodičových vzorků

V této kapitole jsou představeny výsledky měření jednotlivých technik na polovodičových vzorcích. Cílem měření je pozorovat výstupy zajímavé pro poruchovou analýzu polovodičových součástek, které jsou zmíněny v kapitole 2. Zároveň jsou pozorovány detekční limity mikroskopu LiteScope u jednotlivých technik.

### 5.1. Mikroskopie atomárních sil

Technikou AFM je zajímavé sledovat drsnost povrchu vzorku, která je ovlivněna přípravou, a periodicitu struktur.

Jako první byla měřena topografie wolframových prokůvů (obrázek 5.1a, b). Na obrázku jsou vidět čtyři prokůvy, které tvoří nejvyšší body na měřené oblasti. Tento jev je výsledkem procesu přípravy vzorku, kdy se lehčí křemíkové atomy odprašují rychleji než ty těžší wolframové. Dále lze pozorovat na obrázku charakteristické závěsy, nerovnosti povrchu, které jsou způsobeny přípravou vzorku iontovým svazkem s vysokými proudy svazku. Během měření AFM nebyly pozorovány žádné topografické rozdíly v oblasti vodičových vrstev či oblasti silicidu. Tyto oblasti se tedy odprašovaly stejně rychle jako okolní křemík. U tohoto vzorku je možné kontrolovat periodicitu a pravidelnost struktur (obrázek 5.1c). Je možné kontrolovat jak vzdálenost jednotlivých struktur tak jejich výšku. Vzdálenosti jednotlivých prokůvů se pohybují v rozmezí od 1,95  $\mu\text{m}$  do 2,01  $\mu\text{m}$ . Tyto

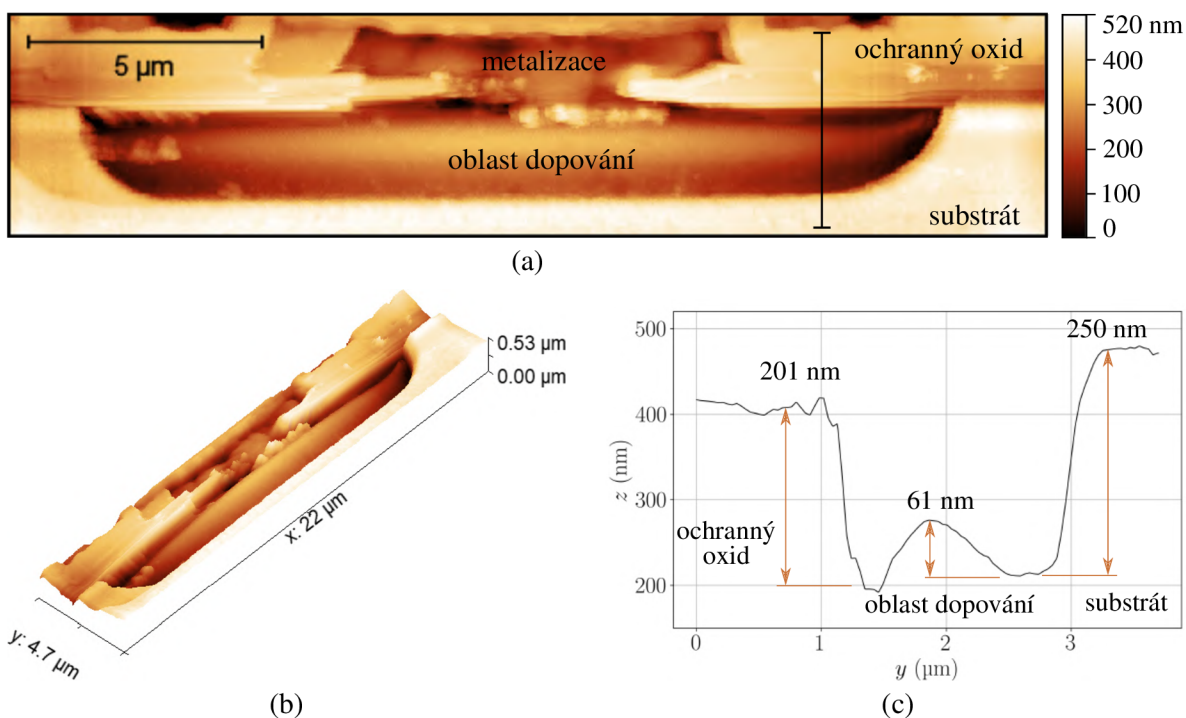


Obrázek 5.1: AFM měření wolframových prokůvů CMOS čipu. (a) Topografie prokůvů CMOS čipu. (b) 3D náhled topografie prokůvů CMOS čipu. (c) Topografický profil podél úsečky z obrázku (a). Červeně je vyznačena výška nejnižšího prokůvu, u kterého lze očekávat rozdílné vlastnosti.

## 5.1. MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL

vzdálenosti lze považovat za pravidelné a rozdíly mohou být způsobeny pouze nekvalitní přípravou. Alarmující by byly rozdíly v řádech stovek nanometrů. Výšky jednotlivých prokův se pohybují od 91 nm do 140 nm, přičemž jeden z prokův je podstatně nižší jak zbylé tři. Při přípravě vzorku je řez prováděn s určitou pravidelností a odchylky ve výšce jednotlivých prokův jsou očekávatelné. Pokud se však výška výrazně liší, je velmi pravděpodobné, že tento prokův nebyl správně vyroben, což mohlo být způsobeno nedostatečným vyplněním díry wolframem.

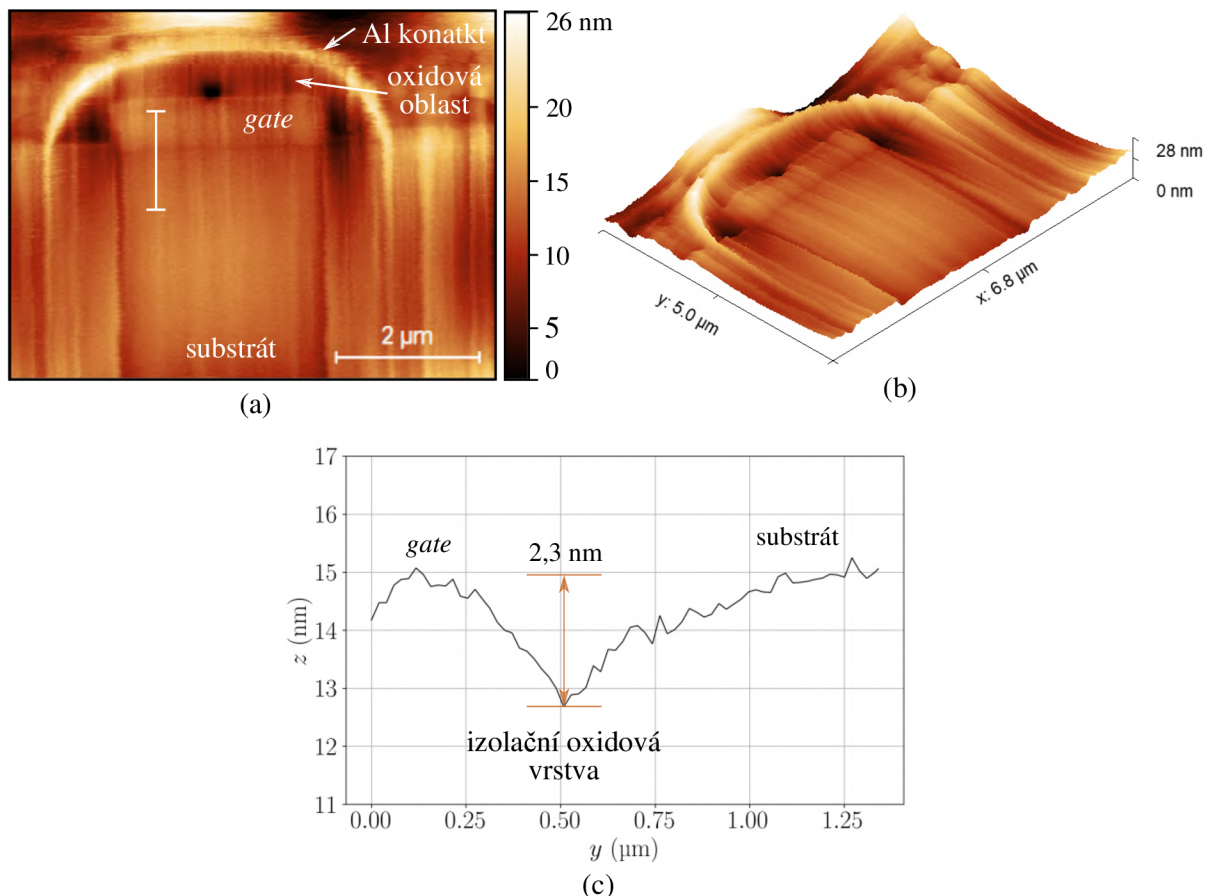
Druhým analyzovaným vzorkem je bipolární tranzistor (obrázek 5.2a, b). Při analýze topografie je zřejmé, že v oblasti emitoru a báze byla vyleptaná díra. Nejpomalejší leptání probíhalo na substrátu, který je nejvyšší oblasti na vzorku. V oblasti ochranné oxidové vrstvy je výška o něco nižší, což bylo zapříčiněno leptáním této oblasti s vyšší rychlostí. Naopak v oblastech s dopováním a metalizace docházelo k výrazně většímu leptání a tyto oblasti vzorku jsou nejnižší. V oblasti s dopováním je také viditelný hrb, což indikuje nehomogenitu v leptání, která může být způsobena PN přechodem (obrázek 5.2c). PN přechod má v porovnání s dopovanými oblastmi rozdílné chemické vlastnosti a leptá se s rozdílnou rychlostí [67].



Obrázek 5.2: AFM měření řezu bipolárního tranzistoru. (a) Topografie řezu bipolárního tranzistoru. (b) 3D náhled topografie bipolárního tranzistoru. (c) Topografický profil podél úsečky z obrázku (a). V díře mezi ochranným oxidem a substrátem vznikl hrb, který je způsoben PN přechodem, u kterého dochází k pomalejšímu leptání jak u dopovaných oblastí.

Posledním analyzovaným vzorkem je lamela MOSFET tranzistoru (obrázek 5.3a, b). V tomto případě byl vzorek po odprašování navíc leštěn iontovým svazkem a jeho topografie je relativně rovná. Maximální výšky struktur se pohybují do 30 nm. Na tomto vzorku jsou opět viditelné závěsy způsobené přípravou iontovým vzorkem. Vlivem odprašování různých materiálů s různou rychlostí dochází ke zvýraznění těchto oblastí v topografii a snadno lze jednotlivé oblasti identifikovat. Hliníkový kontakt se odprašoval nejpomaleji

a je tedy nejvyšší oblastí na vzorku. Křemíkový *gate* a karbid křemíkový substrát byly odprašovány s podobnou rychlostí. Oxidová oblast ohraničující *gate* byla odprašována nejrychleji. Díky tomu lze lokalizovat izolační oxidovou vrstvu MOSFET tranzistoru. Tento topografický rozdíl lze pozorovat na profilu podél úsečky, kde je izolační oxidová vrstva nižší o 2,3 nm v porovnání se substrátem a *gate* (obrázek 5.3c).



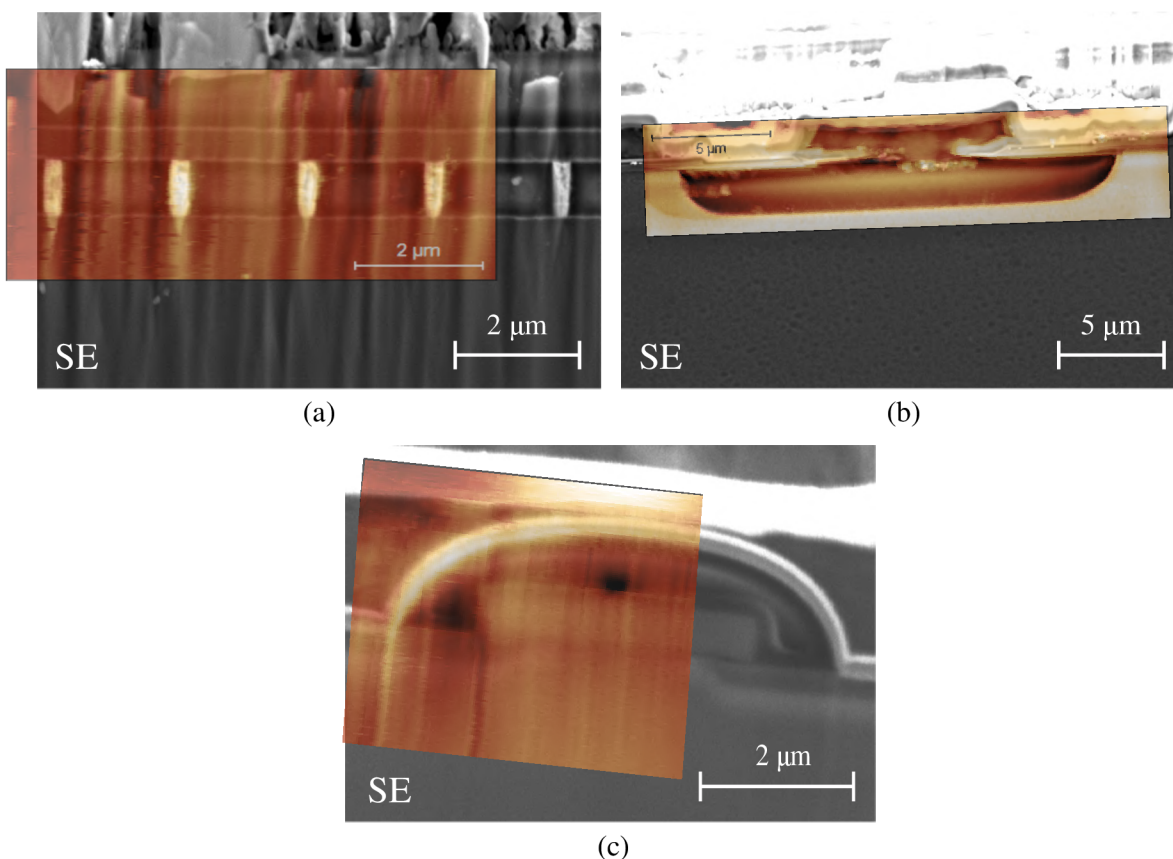
Obrázek 5.3: AFM měření lamely unipolárního tranzistoru MOSFET. (a) Topografie unipolárního tranzistoru. (b) 3D náhled topografie unipolárního tranzistoru. (c) Topografický profil podél úsečky z obrázku (a). Je zřejmý rozdíl v topografii v oblasti izolační oxidové vrstvy a tento rozdíl v porovnání se substrátem a *gate* činí 2,3 nm.

Jednotlivá měření je důležité korelovat (překládat) s obrazy získanými pomocí elektronového mikroskopu. AFM data jsou velmi často podobná datům ze sekundárních elektronů, protože obě techniky jsou citlivé na topografii. Tato korelace umožňuje identifikovat zda se jedná o SEMový kontrast způsobený topografií či nikoliv (obrázek 5.4). Například u vzorku CMOS je viditelné, že vodivé vrstvy nejsou v topografii viditelné, a signál od sekundárních elektronů tak není způsoben topografií.

## 5.2. Mikroskopie lokální vodivosti

Technikou CAFM je běžně kontrolována uniformita tlouštěk oxidových vrstev a lokální vodivost oblastí vzorku. Během měření je voleno elektrické napětí, které způsobuje elek-

## 5.2. MIKROSKOPIE LOKÁLNÍ VODIVOSTI

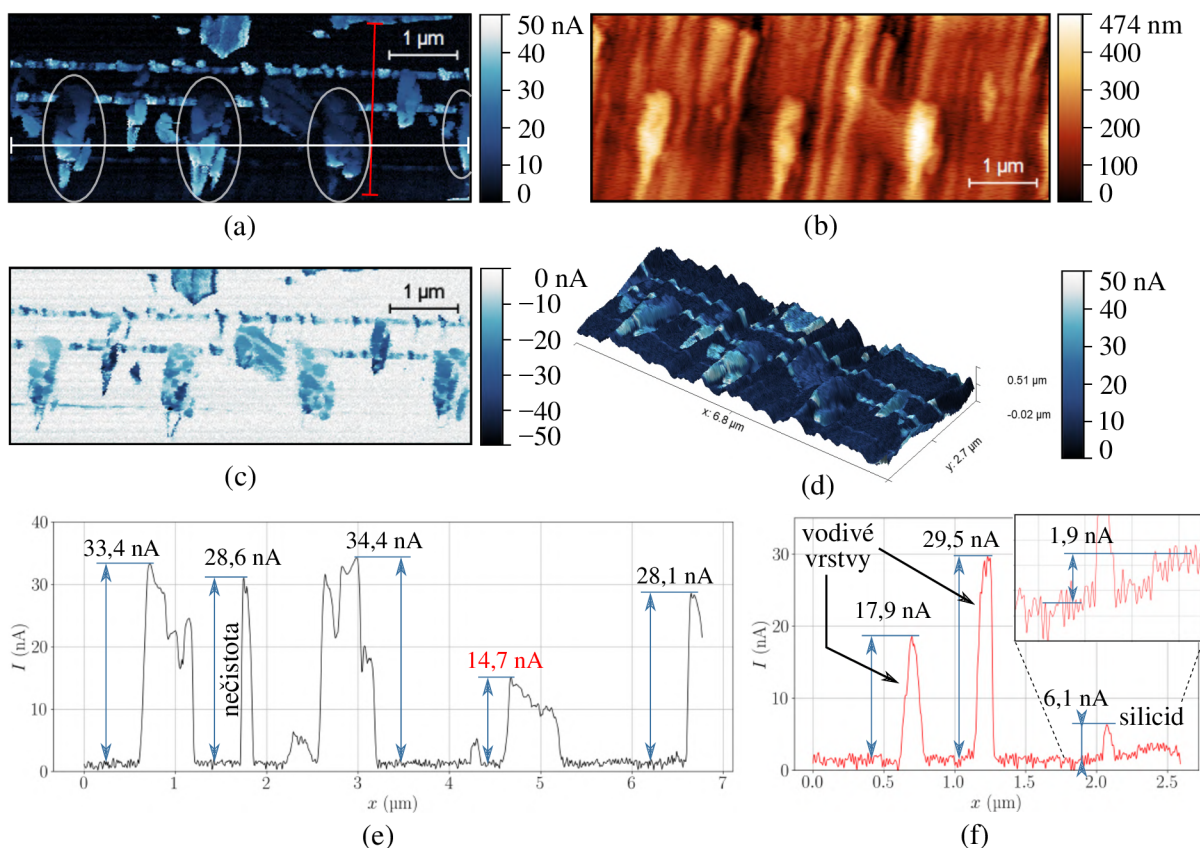


Obrázek 5.4: AFM měření korelované se SEM obrazem. (a) Wolframové prokovy CMOS čipu. (b) Bipolární tranzistor. (c) Unipolární tranzistor MOSFET.

trický proud, který je měřen zesilovačem proudu. Toto napětí je voleno tak, aby byl využit celý rozsah zesilovače proudu, který je  $\pm 50$  nA.

Prvním zkoumaným vzorkem byl CMOS čip (obrázek 5.5a, b). Při měření proudu bylo použito kladné napětí 6 V. Ze změřených dat je zřejmé, že k vedení proudu docházelo v oblasti prokovů (označeno kroužky), na obou vodivých vrstvách, na silicidové vrstvě, a také na různých nečistotách vzorku. Nečistoty jsou vodivé materiály, které vznikly redepozicí při přípravě vzorku. U prokovů během přípravy došlo k vytvoření wolframového ocásku, který se nachází pod prokovem a zasahuje do substrátu. Tento vzorek byl dále také změřen se záporným napětím  $-6$  V (obrázek 5.5c). U tohoto měření došlo pouze k překlopení kontrastu. U technik, při kterých je měřeno více signálů, je běžné, že se jednotlivé signály přes sebe překládají a získává se tak korelace topografie s měřeným proudem (obrázek 5.5d). Lze pozorovat jak měřený proud překrývá vystouplé prokovy. U tohoto vzorku lze opět kontrolovat periodicitu měřeného proudu na jednotlivých prokovech (obrázek 5.5e). U měření CAFM je vynesena závislost proudu na poloze. V tomto profilu byla naměřená zvýšená vodivost v pěti místech, z toho čtyři místa odpovídají prokovům a jedno místo je vodivá nečistota, která má úzký profil v porovnání s prokovy. U jednoho z prokovů byl naměřen nižší proud (vyznačeno červeně). Snížená vodivost může být způsobena rozdílnými materiálovými vlastnostmi, nedokonalým vyplněním díry wolframem nebo špatným vodivým spojením prokovu. Na tomto vzorku je také důležitá silicidová vrstva. Za tímto účelem byl vynesena profil, který vede od vodivých vrstev do substrátu (obrázek 5.5f). V profilu jsou viditelné tři píky, kdy dva jsou způsobené vodivými vrstvami a jeden sil-



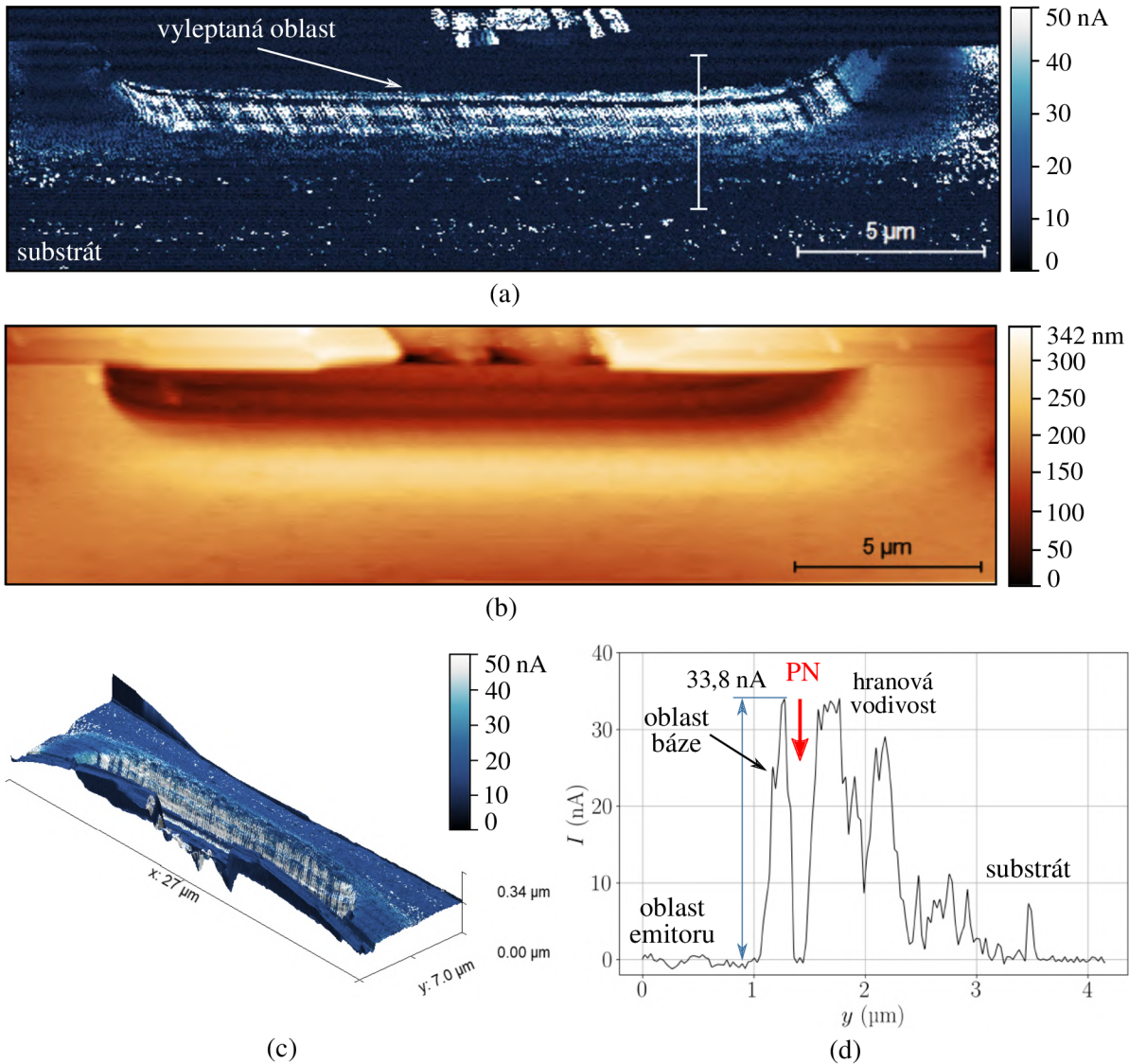


Obrázek 5.5: CAFM měření wolframových proků CMOS čipu. (a) Měřený proud s kladným napětím 6 V. Jsou zakroužkovány oblasti proků. (b) Topografie proků CMOS čipu měřená v kontaktním módu. (c) Měřený proud se záporným napětím  $-6$  V (d) 3D náhled topografie proků CMOS čipu přeložený měřeným proudem. (e) Závislost proudu podél bílé úsečky z obrázku (a). Červeně je vyznačený maximální proud pravděpodobně rozdílného proku, u kterého lze očekávat rozdílné vlastnosti. (f) Závislost proudu podél červené úsečky z obrázku (a). Na profilu jsou viditelné dvě vodivé vrstvy, vodivost v oblasti silicidu a také zvýšená vodivost v oblasti P dopovaného substrátu.

cidovou vrstvou. Ve stejném profilu je zaznamenána zvýšená vodivost od P dopovaného substrátu, na kterém byl naměřen proud 1,9 nA.

Druhým měřeným vzorkem byl bipolární tranzistor (obrázek 5.6a, b). Při měření proudu bylo použito napětí 3,5 V. K naměření proudu došlo ve vyleptané oblasti, v oblasti metalizace a také v oblasti substrátu. V horní části vyleptané oblasti není veden proud, ačkoli by se mělo jednat o emitorovou oblast, která je vysoce dopovaná a tedy vodivá. Pod emitorovou oblastí, kde se nachází oblast báze, byl naměřen proud. Nicméně část těchto dat je ovlivněna hranovou vodivostí, která vzniká při dotyku strany hrotu sondy s vyvýšenými místy na vzorku. Tento jev je také dobře viditelný na korelaci 3D topografického profilu s měřeným proudem, kdy na hraně mezi vyleptanou oblastí a substrátem je měřen právě proud (obrázek 5.6c). Dále je naměřen proud v oblasti substrátu, kde je signál velice řídký a dochází k vedení na nečistotách vzorku. Pro poruchovou analýzu je důležité hledat PN přechody. Ve vynesném profilu závislosti proudu na poloze jsou viditelné tři oblasti (obrázek 5.6d). První z oblastí je proud způsobený oblastí báze. Druhá oblast je proud způsobený hranovou vodivostí, která je velmi výrazná a poměrně široká. Mezi těmito ob-

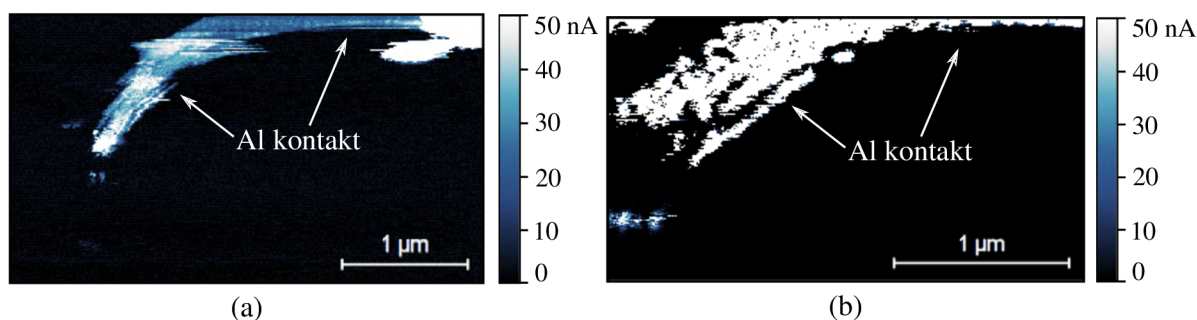
## 5.2. MIKROSKOPIE LOKÁLNÍ VODIVOSTI



Obrázek 5.6: CAFM měření řezu bipolárním tranzistorem. (a) Měřený proud s kladným napětím 3,5 V. (b) Topografie řezu bipolárním tranzistorem měřená v kontaktním módu. (c) 3D náhled topografie řezu bipolárním tranzistorem přeložený měřeným proudem, kde lze pozorovat korelaci hrany s hranovou vodivostí. (d) Závislost proudu podél bílé křivky z obrázku (a). Zde je viditelná vodivost od dopované báze oblasti, PN přechod označen červenou šipkou, kde dochází k poklesu proudu, a oblast hranové vodivosti.

lastmi se nachází třetí oblast, kde dochází k poklesu proudu (označen červenou šipkou). Tato oblast je s největší pravděpodobností PN přechodem, ve kterém se nenachází volné nosiče náboje, a tato oblast se chová jako izolační vrstva.

Měření CAFM na polovodičových vzorcích je běžně ztíženo dvěma problémy: vytváření nativní oxidové vrstvy na polovodičovém materiálu a opotřebení vodivé vrstvy hrotu. První problém způsobuje, že hrot sondy měří proud skrze nativní oxidovou vrstvu, což snižuje hodnoty měřeného proudu. Tento jev je patrný na CAFM datech vzorku s MOSFET tranzistorem, kdy byly provedeno první měření na tomto vzorku s použitým napětím 3 V (obrázek 5.7a). Na datech je viditelná pouze oblast hliníkového kontaktu tranzistoru. Ve



Obrázek 5.7: CAFM měření unipolárního MOSFET tranzistoru. (a) První rastrování po vzorku, kdy nedochází k vedení proudu v oblasti dopovaných oblastí z důvodu nativní oxidové vrstvy. Hliníkový kontakt není příliš roztahán po vzorku. (b) Poslední rastrování po vzorku, kdy dochází k měření vysokého proudu v oblasti hliníku, který je nyní již roztahán po vzorku. Během několika skenů přes vzorek došlo jak k odstranění nativní oxidové vrstvy, tak platinové vrstvy na samotné špičce hrotu.

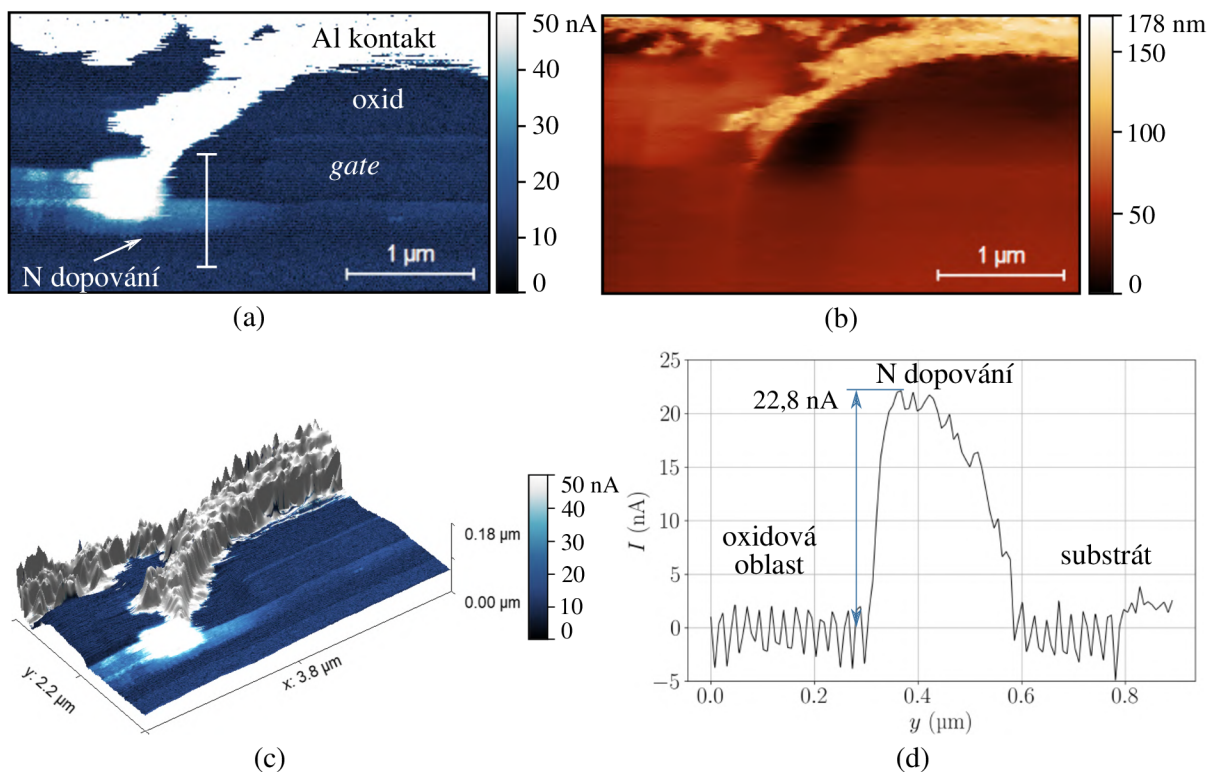
zbylých částech proud nebyl naměřen. Tento problém lze částečně řešit zvýšením napětí nebo opakovaným rastrováním, které částečně odstraní nativní oxid.

Druhým problémem je opotřebení platinové vrstvy na hrotu sondy, což je způsobeno opakovaným měřením, které je potřeba provádět pro zredukování oxidové vrstvy. To také může způsobit poničení vzorku, což se projevilo v případě měření opět na MOSFET tranzistoru, kde hrot roztahal měkký hliník po vzorku (obrázek 5.7b). V oblasti hliníkového kontaktu byl také zaznamenán vyšší proud, protože se hrot dotýkal také svou hranou. Zároveň vodivá oblast okolo hliníkového kontaktu se jeho roztaháním zvětšila.

I přes výše zmíněné problémy je možné získat zajímavé výsledky měření MOSFET tranzistoru (obrázek 5.8a, b). Toto měření bylo provedeno v čase, kdy byla nativní oxidová vrstva již zredukována a před tím, než došlo k úplnému opotřebení platinové vrstvy na hrotu. Pro měření bylo použito napětí 4 V, které způsobilo saturaci zesilovače v oblasti hliníkového kontaktu, ale pomohlo k naměření proudu v N dopované oblasti. Velmi slabě je také viditelný *gate*, který je izolován po stranách izolační oblastí, která brání vedení proudu skrze vzorek do místa, kde je vzorek nakontaktován. P dopovaná oblast se ve vodivosti neprojevila, protože její dopování je nižší. Zároveň karbid křemíku má široký zakázaný pás a pro měření proudu málo dopovaných oblastí by bylo potřeba velkého napětí, které je u LiteScopu omezeno na  $\pm 10$  V. Na 3D profilu topografie přeloženého měření proudu je dobře vidět souvislost mezi měřeným proudem a jednotlivými oblastmi (obrázek 5.8c), kdy vystouplé oblasti odpovídají vysokému proudu. Vynesení závislosti proudu podél profilu, který vede od izolační oblasti přes N dopovanou oblast do substrátu, lze vidět, že proud ze strany od oxidu téměř skokově narůstá a směrem do substrátu postupně klesá až na nulu (obrázek 5.8d). Tímto způsobem lze pomocí CAFM kontrolovat profil a hloubku implantace dopování, která byla naměřena kolem  $0,3 \mu\text{m}$ .

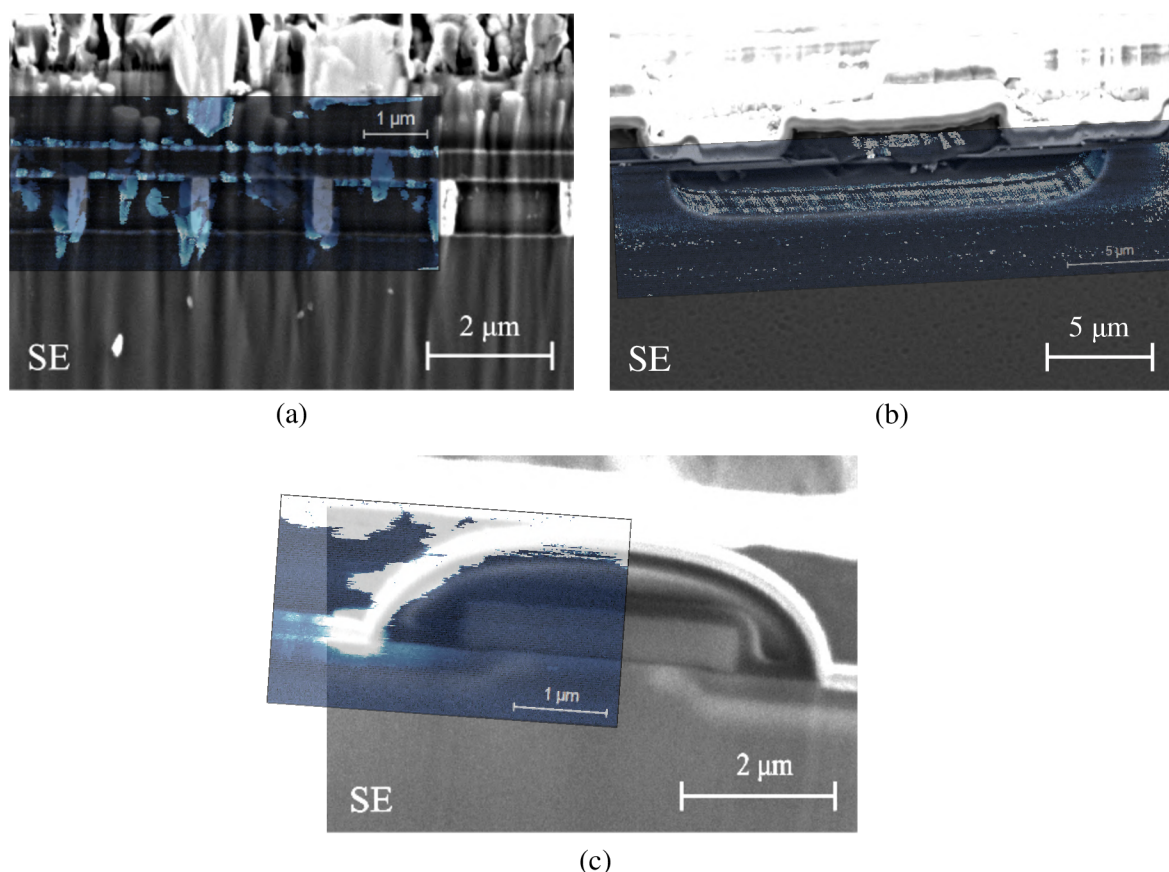
Dalším krokem byla korelace CAFM měření s obrazy ze SEM (obrázek 5.9). Na korelaci vzorku CMOS čipu je viditelné, že oblast měřeného proudu je větší jak samotný prokov, což je způsobeno hranovou vodivostí, která rozšiřuje oblast, kde dochází k elektrickému kontaktu. U bipolárního tranzistoru se zdá, že celá oblast naměřeného proudu, je oblastí báze. Nicméně z korelace s topografií je zřejmé, že docházelo k hranové vodivosti. U tranzistoru MOSFET je patrné, že naměřený proud v oblasti dopování opravdu

## 5.2. MIKROSKOPIE LOKÁLNÍ VODIVOSTI



Obrázek 5.8: CAFM měření lamely unipolárního tranzistoru MOSFET. (a) Měřený proud s kladným napětím 4 V. (b) Topografie lamely unipolárního tranzistoru MOSFET v kontaktním módu. (c) 3D náhled topografie lamely unipolárního tranzistoru přeložený měřeným proudem, kde lze pozorovat korelaci měřeného proudu s topografií. (d) Závislost proudu podél bílé úsečky z obrázku (a). Zde je viditelný naměřený proud v N dopované oblasti, který téměř skokově narůstá ze strany od oxidové vrstvy a směrem do substrátu proud klesá na nulu.

odpovídá N dopované oblasti, protože oblast, kde byl naměřen proud odpovídá kontrastu od N dopované oblasti.



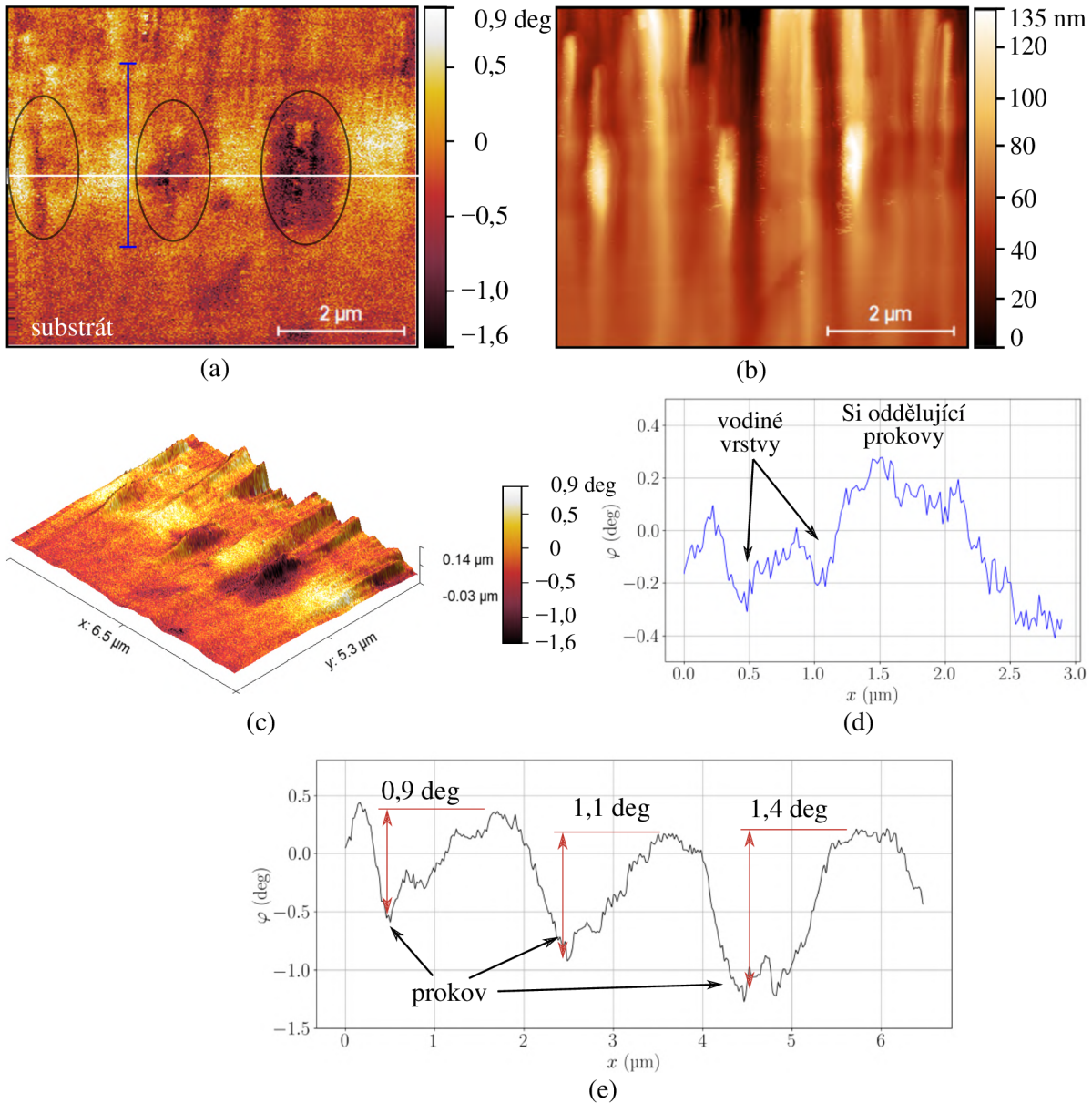
Obrázek 5.9: CAFM měření korelované se SEM obrazem. (a) Wolframové prokovy CMOS čipu. (b) Bipolární tranzistor. (c) Unipolární tranzistor MOSFET.

### 5.3. Mikroskopie elektrostatických sil

Pomocí techniky EFM je měřeno elektrostatické pole vytvořené přeuspořádáním náboje na vzorku. Pomocí této techniky tak lze kontrolovat zda se někde nevytváří silné, elektrostatické pole, které by mohlo ovlivňovat chod součástky.

Prvním vzorkem byly wolframové prokovy (obrázek 5.10a, b). Při měření v druhém průchodu bylo použito napětí 1,5 V, amplituda kmitů 5 mV a *offset* 80 nm. Fázový posun během druhého průchodu ukazuje změny v oblasti prokovů (označeno kroužky), kde se fáze zpožďuje, zatímco v okolí, kde je křemík, fáze předbíhá budící kmitů. Na vodivých místech dochází k přitažlivé síle, zatímco na křemíku k síle odpudivé. Tmavé oblasti v EFM signálu odpovídají vodivým místům, což je viditelné v okolí dvou vodivých vrstev nad prokovy. V okolí silicidové vrstvy pod prokovy tento efekt nebyl zachycen. Signál v oblasti substrátu je téměř homogenní, mění se pouze na hranách nerovností, kde se koncentruje náboj. Přeložením EFM signálu přes 3D profil topografie lze vidět, že oblasti prokovů v EFM signálu jsou větší než v topografii, protože hrot interaguje nejen špičkou, ale i svými stranami. Profil procházející od vodivých vrstev přes křemík do substrátu ukazuje detailní průběh fáze přes různé oblasti: pokles fáze v oblasti vodivých vrstev, nárůst v oblasti křemíku oddělujícího prokovy a opětovný pokles v oblasti P dopovaného substrátu (obrázek 5.10d). Druhý profil, který je veden přes prokovy (obrázek 5.10e), ukazuje poklesy fáze na prokovech. Největší pokles je zaznamenán na pravém prokovu, kde se nejvíce koncentroval náboj. Naopak pole zbylých dvou prokovů je ovlivněno topografií

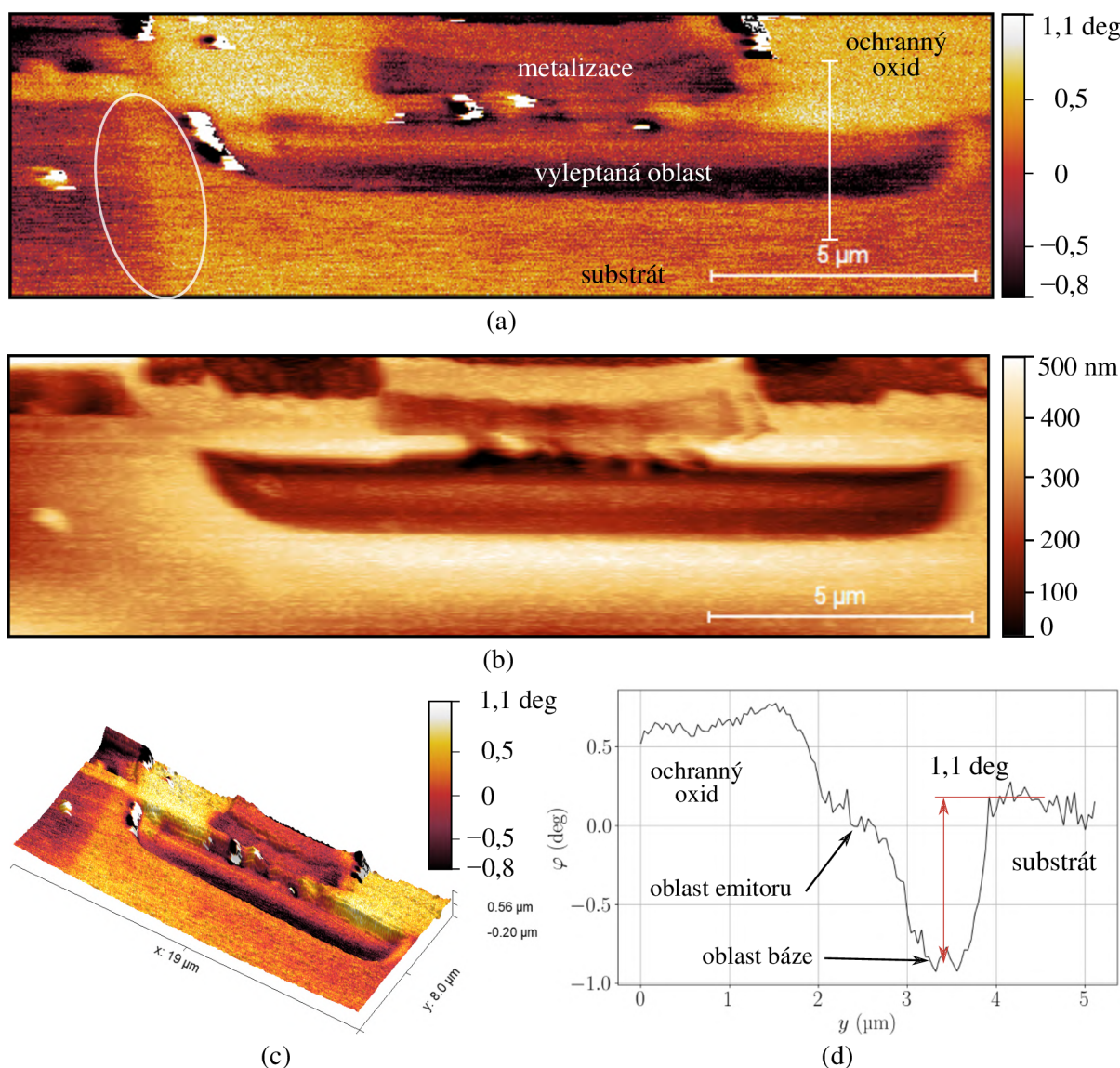
### 5.3. MIKROSKOPIE ELEKTROSTATICKÝCH SIL



Obrázek 5.10: EFM měření wolframových prokův CMOS čipu. (a) Měřený fázový posun vůči budícím kmitům při použitím napětí 1,5 V. Jsou zakroužkovány oblasti prokův. (b) Topografie prokův CMOS čipu měřená v poklepovém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie prokův CMOS čipu přeložený měřeným posunem fáze. (d) Závislost fázového posunu podél modré úsečky z obrázku (a). Jsou zde viditelné dvě vodivé vrstvy a zvýšený signál v oblasti křemíku oddělovacího prokovy. (e) Závislost fázového posunu podél bílé úsečky z obrázku (a). Na profilu jsou viditelné tři prokovy, u kterých signál klesá. Signál u jednotlivých prokův je ovlivněn topografií okolo.

okolo, protože je zde okolní topografie křemíku vystouplá a prokov tak není nejvyšším bodem jako v případě prokovu vpravo.

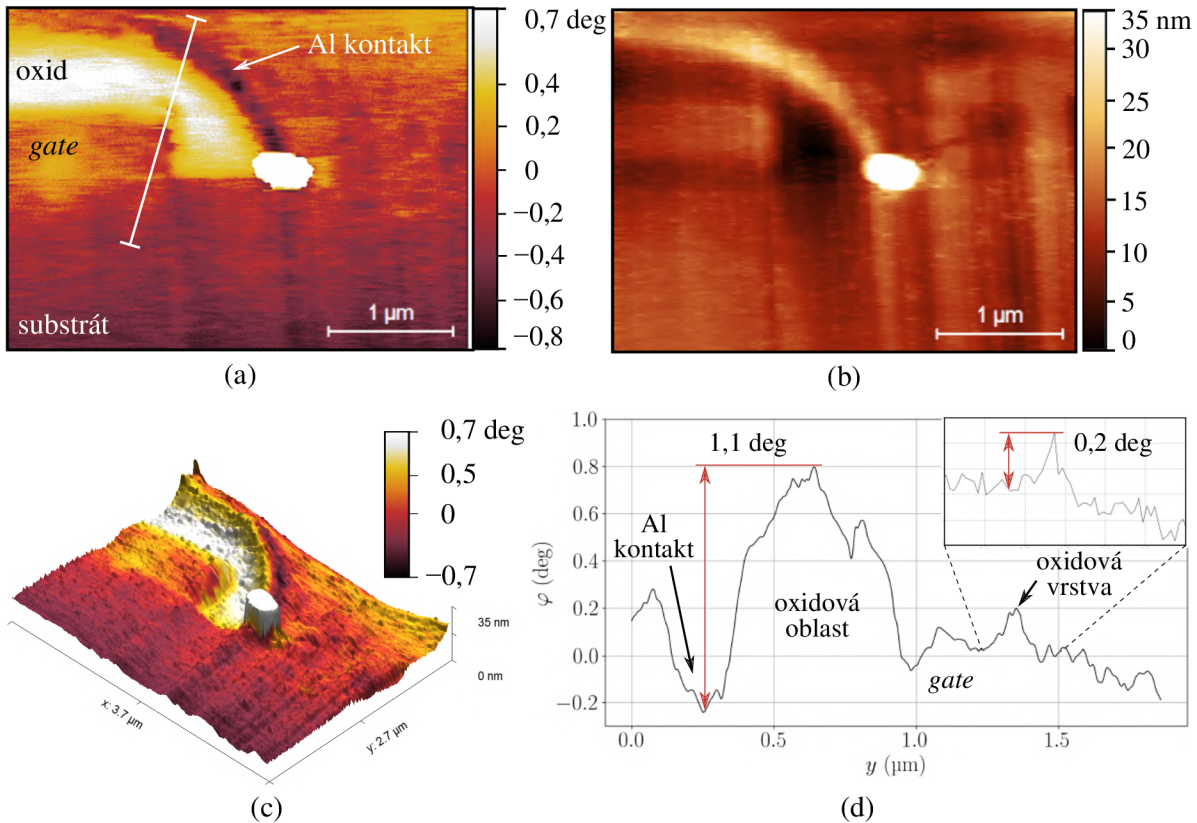
Druhým analyzovaným vzorkem je řez bipolárním tranzistorem (obrázek 5.11a, b). V druhém průchodu bylo použito napětí 1,3 V, amplituda kmitů 40 mV a *offset* 90 nm. V EFM signálu jsou dobře rozlišitelné základní oblasti na vzorku. K předbíhání fáze dochází v oblasti ochranné oxidové vrstvy a v oblasti metalizace dochází k poklesu fáze.



Obrázek 5.11: EFM měření řezu bipolárním tranzistorem. (a) Měřený fázový posun vůči budícím kmitům při použitém napětí 1,3 V. Zakroužkována oblast přechodu substrátu a izolačního příkopu. (b) Topografie řezu bipolárním tranzistorem měřená v poklepovém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie řezu bipolárním tranzistorem přeložený měřeným fázovým posunem. (d) Závislost fázového posunu podél bílé úsečky z obrázku (a). Je zde viditelný zvýšený signál v oblasti ochranné oxidové vrstvy součástky a výrazný pokles ve spodní části vyleptané oblasti.

V oblasti báze se fáze výrazně zpožďuje. Tento pokles fáze naznačuje vodivou oblast, ale je obtížné určit, zda je tato oblast vodivá nebo se jedná o ovlivnění od hrany, na které se koncentruje náboj a působí tak na stranu hrotu. Elektrostatické pole substrátu je homogenní. Na vzorku se občas objevují skoky způsobené nečistotami nebo hranami, kde sonda naráží do vzorku. V levé části EFM signálu je viditelný přechod z tmavé do světlé oblasti (označeno kroužkem), tento přechod není viditelný v topografii a tedy není jí ovlivněn. Tento přechod může být přechodem mezi substrátem a izolačním příkopem bipolárního tranzistoru. Přeložením EFM signálu přes topografii lze sledovat, jak jednotlivé oblasti

### 5.3. MIKROSKOPIE ELEKTROSTATICKÝCH SIL

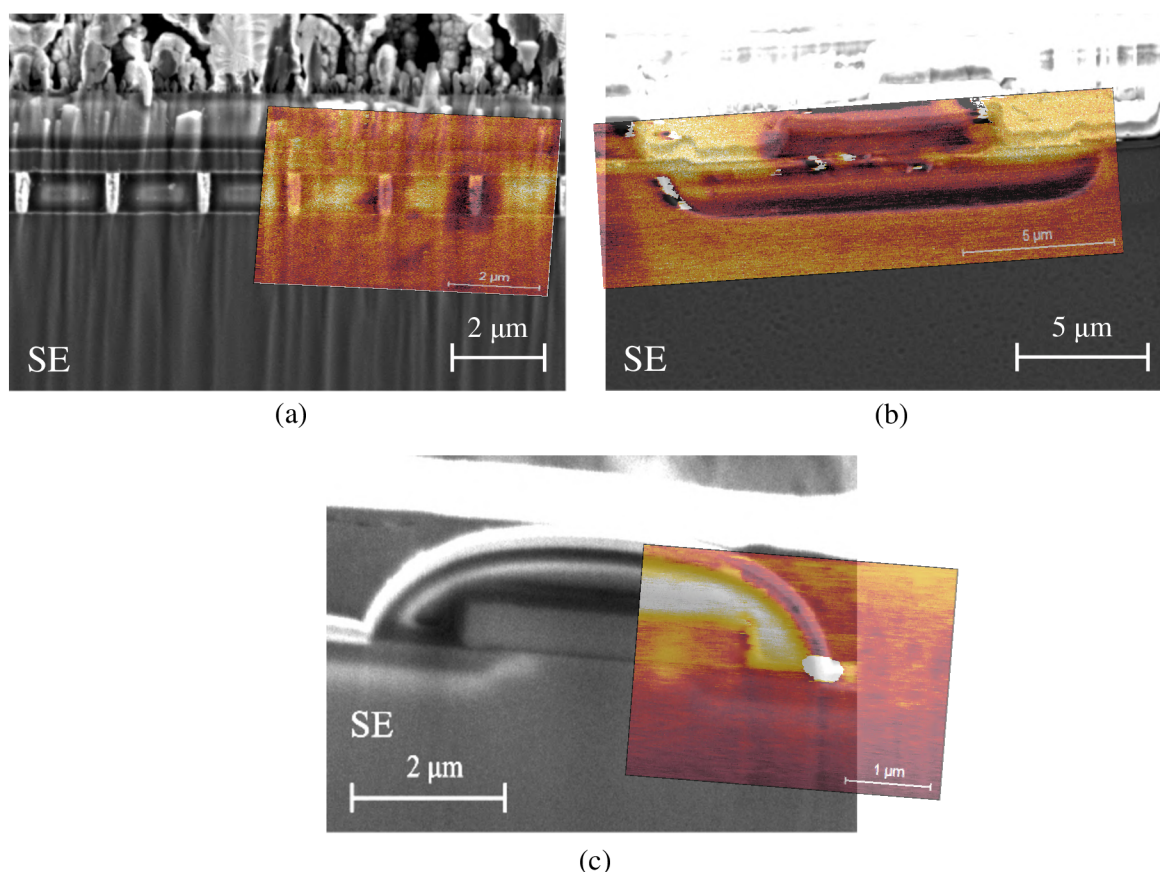


Obrázek 5.12: EFM měření lamely unipolárního tranzistoru MOSFET. (a) Měřený posun fáze při použitím napětí 1,4 V. (b) Topografie lamely unipolárního tranzistoru MOSFET v pokleповém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie lamely unipolárního tranzistoru přeložený měřeným posunem fáze. (d) Závislost proudu podél bílé křivky z obrázku (a). Jsou zde viditelné oblasti oxidu, kde dochází ke zvýšení signálu a oblast hliníku, kdy je výrazný pokles signálu.

spolu korelují (obrázek 5.11c). Analýza profilu, který vede od ochranné oxidové vrstvy přes dopované oblasti až do substrátu, ukazuje, že signál na oxidové vrstvě je vysoký, v oblasti dopování klesá na úroveň substrátu, a poté v oblasti báze výrazně klesá (obrázek 5.11d). Tento profil naznačuje, že substrát vytváří podobné elektrostatické pole jako horní část vyleptané oblasti.

Poslední analyzovanou součástí je MOSFET tranzistor (obrázek 5.12a, b). Pro měření posunu fáze ve druhém průchodu bylo použito napětí 1,4 V, amplituda kmitů 70 mV a *offset* 22 nm. Velmi výrazný signál pochází od oxidové vrstvy, která obklopuje křemíkový *gate*. Okolo oxidové oblasti je viditelné zpoždění fáze od hliníkového kontaktu. V oblasti substrátu k žádným výrazným změnám nedochází. Zajímavé je, že se podařilo zachytit kontrast od oxidové vrstvy oddělující substrát a *gate*. Jak v topografii, tak měřené fázi je viditelná jedna nečistota, na které dochází k výrazné koncentraci náboje. Pro lepší korelaci s 3D daty topografie byla výška této struktury oříznuta (obrázek 5.12c). Pro větší detaily byl opět vytažen profil, který vede od hliníkového kontaktu přes oxidovou oblast *gate*, oxidovou vrstvu až do substrátu (obrázek 5.12d). Na vodivém hliníkovém kontaktu dochází k poklesu fáze a v oblasti s oxidem je signál vyšší kvůli odpudivé interakci. Je zde také viditelný pík od izolační oxidové vrstvy, což indikuje že lze detekovat i tyto malé oblasti.





Obrázek 5.13: EFM měření korelované se SEM obrazem. (a) Wolframové prokovy CMOS čipu. (b) Bipolární tranzistor. (c) Unipolární tranzistor MOSFET.

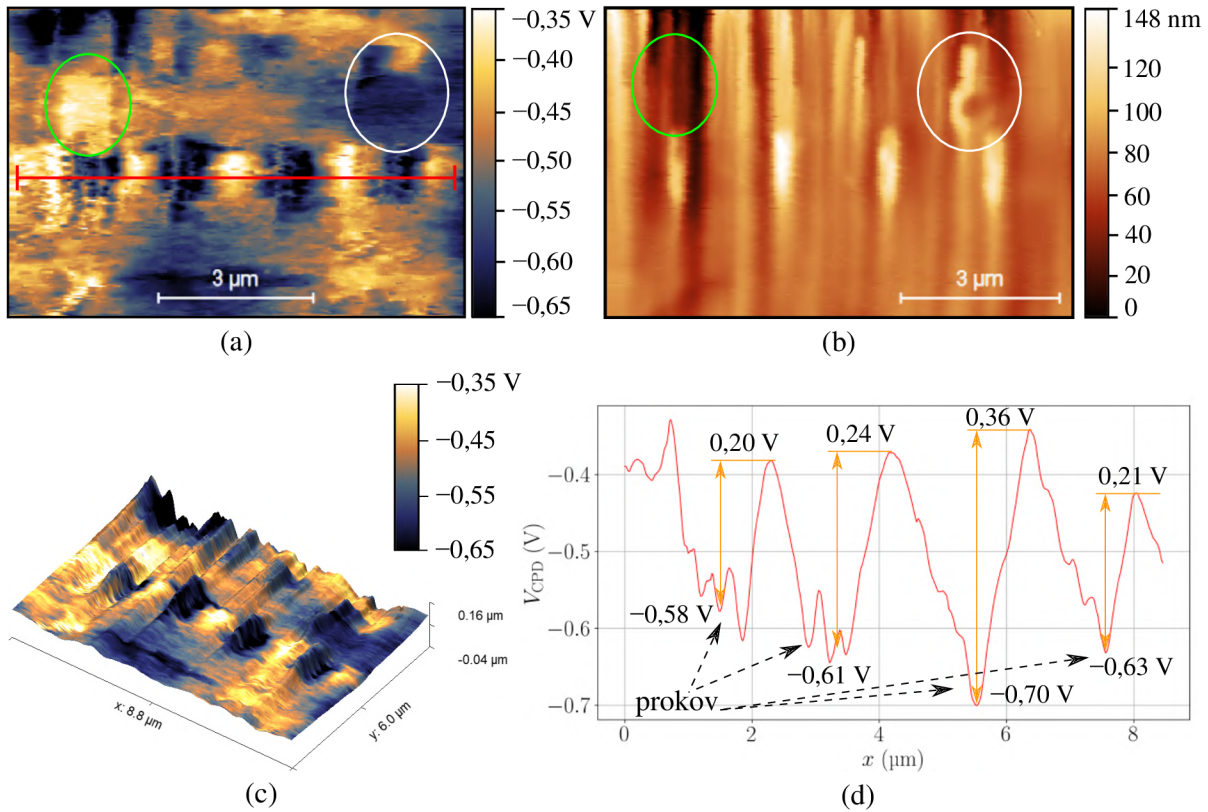
Na závěr jsou jednotlivá EFM měření přeložena přes obrázky ze SEM. U CMOS čipu je zřejmé, že pokles fáze je spojený s prokovem, a naopak zvýšení signálu je spojeno s křemíkovou oblastí oddělující prokovy (obrázek 5.13a). U bipolárního tranzistoru je viditelný pokles fáze ve vyleptané bázevské oblasti. Také je zde viditelný přechod, který by se mohl týkat izolačního příkopu, nicméně na obrazu ze SEM není patrný (obrázek 5.13b). Nakonec u tranzistoru MOSFET oblasti korelují s obrazem ze SEM a jsou zde viditelné oblasti oxidu a hliníkového kontaktu (obrázek 5.13c).

## 5.4. Rastrovací Kelvinova mikroskopie

Technikou KPFM lze měřit povrchový potenciál, který je spjatý s výstupní prací materiálu. U polovodičových vzorků je zajímavé pozorovat rozdíl výstupních prací pro P a N dopovaný polovodič. Dále lze touto technikou detekovat defekty nebo materiálové složení součástky.

Jako první byl technikou KPFM analyzován CMOS čip s wolframovými prokovy (obrázek 5.14a, b). Pro měření byla použita v druhém průchodu amplituda elektrických oscilací 490 mV a *offset* 40 nm. Identifikovatelné jsou prokovy spolu s křemíkem, který je odděluje. Tmavší místa značí prokovy, zatímco ty světlejší jsou křemíkové oblasti. V pravé části (označeno bílým kroužkem) byla pozorována tmavá oblast, která korespondovala s vystouplým místem v topografii. Tato oblast má podobný povrchový potenciál

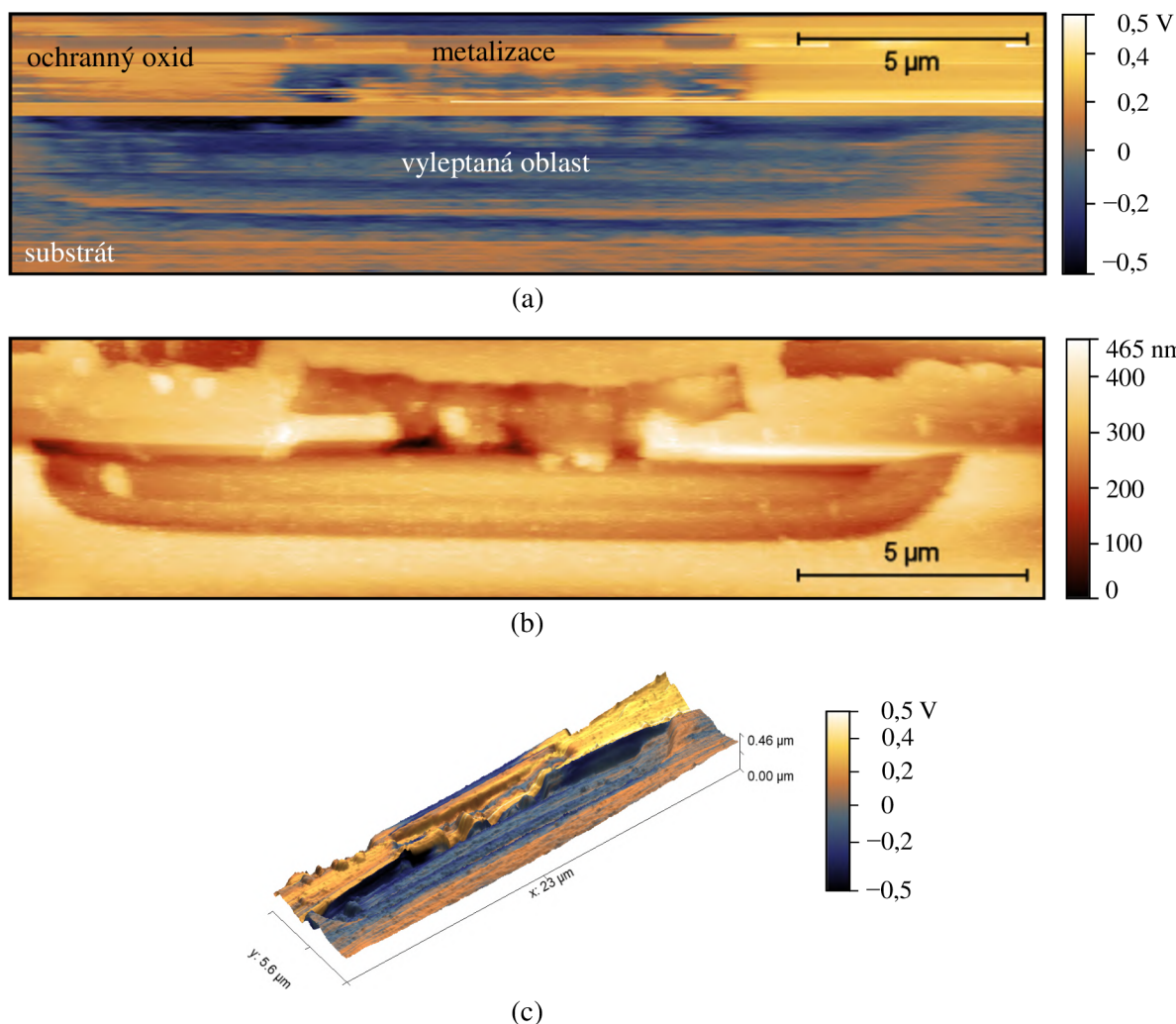
## 5.4. RASTROVACÍ KELVINOVA MIKROSKOPIE



Obrázek 5.14: KPFM měření wolframových prokův CMOS čipu. (a) Měřený kontaktní potenciál  $V_{CPD}$ . (b) Topografie prokův CMOS čipu měřená v pokleповém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie prokův CMOS čipu přeložený měřeným kontaktním potenciálem  $V_{CPD}$ . (d) Závislost potenciálu podél červené úsečky z obrázku (a). Na profilu jsou viditelné čtyři prokovy oddělené křemíkovými oblastmi. Výstupní práce wolframu je nižší jak křemíkových oblastí a tyto rozdíly kopírují teorii.

jako wolframové prokovy. Toto místo mohlo vzniknout redepozicí wolframu během přípravy vzorku. Dále lze pozorovat výrazné světlé místo v levé části (označeno zeleným kroužkem), ve které došlo k ovlivnění topografickými hranami. Přeložením měřeného povrchového potenciálu přes topografii bylo potvrzeno, že wolframové prokovy odpovídají tmavým místům (obrázek 5.14c). Profil vedoucí přes prokovy ukazuje pravidelnost povrchového potenciálu (obrázek 5.14d). Povrchový potenciál křemíkových oblastí se pohybuje od  $-0,42 \text{ eV}$  do  $-0,34 \text{ eV}$ . Teoretická výstupní práce polykrystalické platiny, kterou je hrot sondy povrstven, je  $5,64 \text{ eV}$  [69], zatímco výstupní práce polykrystalického křemíku je  $4,85 \text{ eV}$  [40], což dává relativní teoretický hodnotu  $-0,79 \text{ eV}$ . Naměřené hodnoty se však liší, což může být způsobeno tím, že hrot sondy obsahuje kromě platiny i křemík, což posouvá výstupní práci k nižším hodnotám. A zároveň dochází k průměrování od okolních oblastí kvůli amplitudové modulaci KPFM. Kontaktní potenciál wolframových prokův se pohybuje od  $-0,70 \text{ eV}$  do  $-0,58 \text{ eV}$ . Teoretická výstupní práce polykrystalického wolframu je  $4,56 \text{ eV}$  [69], což odpovídá relativní hodnotě potenciálu  $-1,08 \text{ eV}$ . I když se tyto hodnoty liší od naměřených hodnot, teoretický rozdíl mezi výstupní prací wolframu a křemíku je  $0,29 \text{ eV}$ , což naměřeným hodnotám odpovídá. Měření KPFM dává rozumné výsledky co se relativních rozdílů mezi jednotlivými materiály týče. Kvantitativní měření absolutních

hodnot výstupních prací není tak triviální a bylo by potřeba provádět složitou kalibraci techniky.

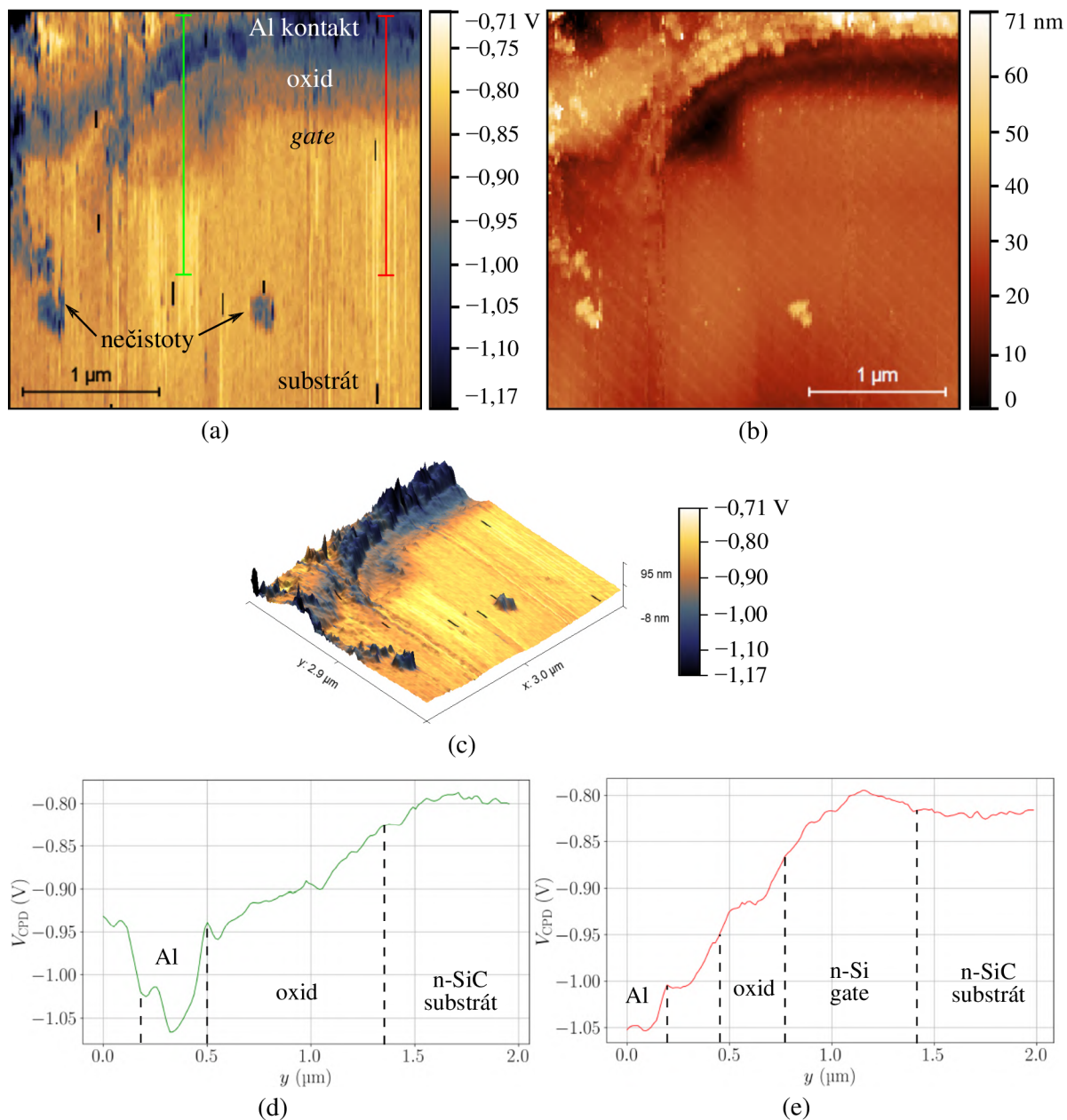


Obrázek 5.15: KPFM měření řezu bipolárním tranzistorem. (a) Měřený kontaktní potenciál  $V_{CPD}$ . (b) Topografie řezu bipolárním tranzistorem měřená v poklepovém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie řezu bipolárním tranzistorem přeložený měřeným kontaktním potenciálem  $V_{CPD}$ . (d) Závislost potenciálu podél bílé úsečky z obrázku (a). Je zde viditelný zvýšený signál v oblasti ochranné oxidové vrstvy součástky a výrazný pokles ve spodní části vyleptané oblasti.

Druhým analyzovaným vzorkem byl bipolární tranzistor (obrázek 5.15a, b). Pro měření byla použita amplituda elektrických oscilací 300 mV a *offset* 42 nm. Měření povrchového potenciálu nebylo příliš úspěšné. Hodnoty povrchového potenciálu se pohybovaly od kladných po záporné hodnoty. V oblastech metalizace a ochranné oxidové vrstvy byl povrchový potenciál kladný, což by naznačovalo vyšší výstupní práci, než má platina, jejíž výstupní práce patří mezi nejvyšší. Tyto anomální hodnoty mohly být způsobeny kontaktem hrotu se vzorkem. Naopak ve vyleptaných oblastech byly naměřeny záporné hodnoty, které by mohly odpovídat výstupní práci křemíku. V substrátu byl naměřen vyšší povrchový potenciál ve srovnání s vyleptanými oblastmi. Hodnoty se však pohybují kolem nulového povrchového potenciálu, což by naznačovalo výstupní práci podobnou pla-

#### 5.4. RASTROVACÍ KELVINOVA MIKROSKOPIE

tině. Celkově je tento vzorek nevhodný pro měření KPFM kvůli své topografii a nepřesné znalosti součástky.



Obrázek 5.16: KPFM měření lamely unipolárního tranzistoru MOSFET. (a) Měřený kontaktní potenciál  $V_{CPD}$ . (b) Topografie lamely unipolárního tranzistoru MOSFET v polepovém módu v amplitudové modulaci. (c) 3D náhled topografie lamely unipolárního tranzistoru přeložený měřeným kontaktním potenciálem  $V_{CPD}$ . (d) Závislost potenciálu podél zelené úsečky z obrázku (a). Jsou zde viditelné oblasti substrátu, oxidu a hliníkového kontaktu. Průběh změřených hodnot kopíruje průběh hodnot teoretických. (e) Závislost potenciálu podél červené úsečky z obrázku (a). Jsou zde viditelné oblasti substrátu, *gate*, oxidu a hliníkového kontaktu. Průběh změřených hodnot kopíruje průběh hodnot teoretických.

## 5. ANALÝZA POLOVODIČOVÝCH VZORKŮ

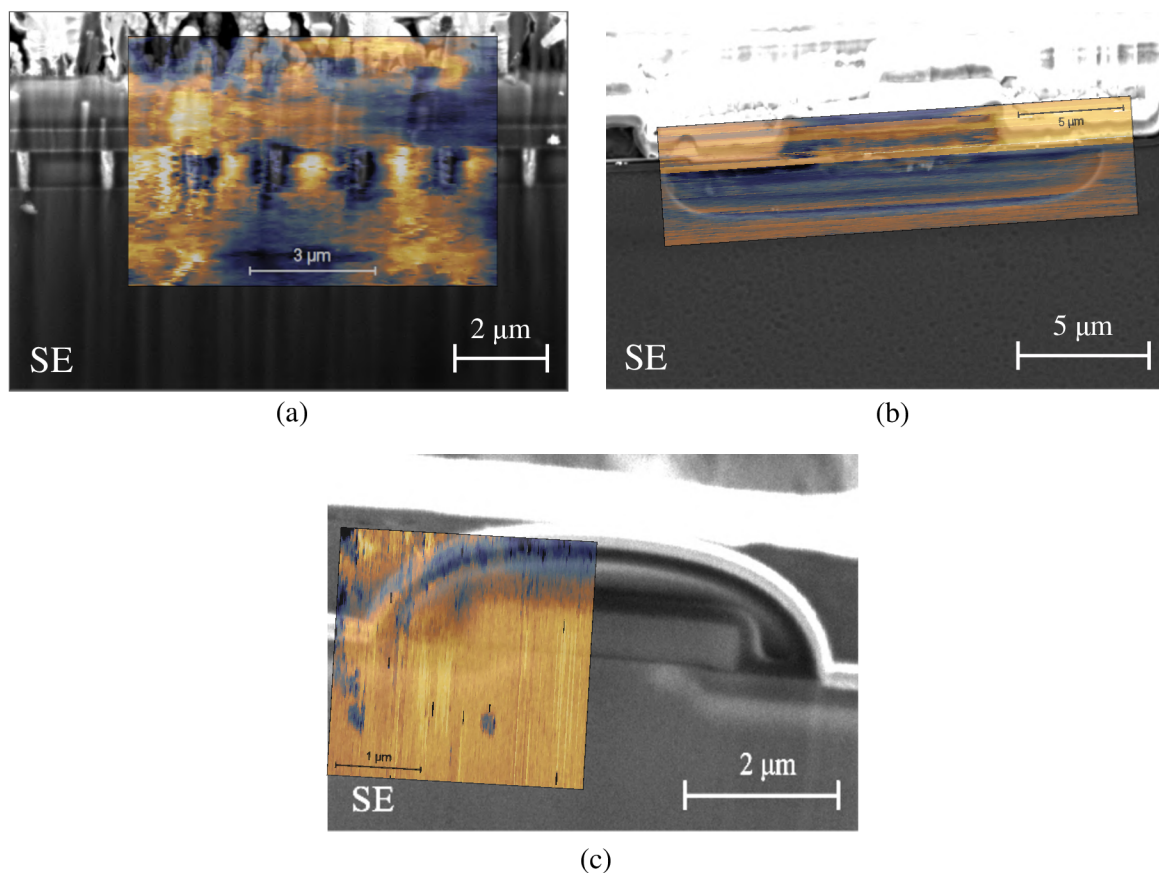
Jako poslední byl analyzován unipolární tranzistor MOSFET (obrázek 5.16a, b). Byla použita amplituda elektrických oscilací 270 mV a *offset* 3 nm. Z naměřených dat povrchového potenciálu jsou patrné jednotlivé oblasti tranzistoru. Viditelný je substrát karbidu křemíku s podobnou hodnotou povrchového potenciálu jako křemíkový *gate*. V oblastech oxidové vrstvy a hliníkového kontaktu dochází k poklesu povrchového potenciálu. Změny povrchového potenciálu jsou způsobeny nečistotami na vzorku, které jsou viditelné také v topografii a lze to pozorovat i korelací potenciálu přes 3D profil topografie (obrázek 5.16c). Měření bylo prováděno s co nejmenší amplitudou oscilací sondy pro zajištění co největšího laterálního rozlišení, s cílem pozorovat rozdíl v P a N dopovaných oblastech. Nicméně šum z napájení mikroskopu, viditelný jako diagonální čáry v topografii, mohl ovlivnit i měření povrchového potenciálu, což zabránilo získání kontrastu v dopovaných oblastech. Pro podrobnější analýzu byly vyneseny dva profily. První profil vede od hliníkového kontaktu přes oxidovou oblast do substrátu (obrázek 5.16d). Tento profil ukazuje, že hliníkový kontakt má naměřený povrchový potenciál  $-1,07$  eV, oxidová vrstva má povrchový potenciál mezi  $-0,95$  eV a  $-0,83$  eV a N dopovaný substrát karbidu křemíku má hodnotu  $-0,82$  eV. Druhý profil vede od hliníkového kontaktu přes oxidovou oblast, *gate* až do substrátu (obrázek 5.16e). Je vidět, že výstupní práce karbidu křemíku je nižší než u křemíku, což odpovídá teorii. Jednotlivé relativní hodnoty kopírují průběh relativních teoretických hodnot. Všechny hodnoty výstupní práce zmíněných materiálů jsou uvedeny v tabulce 5.1 pro lepší porovnání.

Tabulka 5.1: Výstupní práce materiálů, které se nacházejí na MOSFET tranzistoru. Uvedeny jsou jak teoretické hodnoty, tak hodnoty změřené. Současně jsou uvedeny relativní hodnoty vůči platinovému hrotu pro snadnější porovnání.

Hodnoty		Výstupní práce $\phi_s$ (eV)				
		Pt	Al	n-Si	n-SiC	oxid
Teorie	absolutní	5,64 [69]	4,28 [69]	4,85 [40]	4,75 [70]	neznámo
	relativní	0	-1,36	-0,79	-0,89	neznámo
Měření	absolutní	-	4,57	4,84	4,82	4,69–4,81
	relativní	-	-1,07	-0,80	-0,82	-(0,95–0,83)

Nakonec byla veškerá měření KPFM přeložena přes obrázky ze SEM. U CMOS čipu je patrné, že tmavé oblasti opravdu odpovídají prokovům, zatímco světlé oblasti křemíkovým místům (obrázek 5.17a). U tranzistoru bipolárního lze pozorovat jisté obrysy vyleptaných oblastí, nicméně měření bylo ovlivněno topografií vzorku (obrázek 5.17b). U tranzistoru MOSFET KPFM data korelují s oblastmi na vzorku, bohužel bez viditelného rozdílu v P a N dopování (obrázek 5.17c).

## 5.5. RASTROVACÍ MIKROSKOPIE ŠÍŘÍČÍHO SE ODPORU



Obrázek 5.17: KPFM měření korelované se SEM obrazem. (a) Wolframové prokovy CMOS čipu. (b) Bipolární tranzistor. (c) Unipolární tranzistor MOSFET.

## 5.5. Rastrovací mikroskopie šířícího se odporu

Technikou SSRM lze kontrolovat koncentraci dopování a to jak kvalitativně tak kvantitativně. Kvantitativní analýza je velmi obtížná a vyžaduje referenční vzorky, které se poté porovnávají se vzorkem zkoumaným. Častěji se využívá pro mapování dopovaných oblastí a kvalitativní analýze.

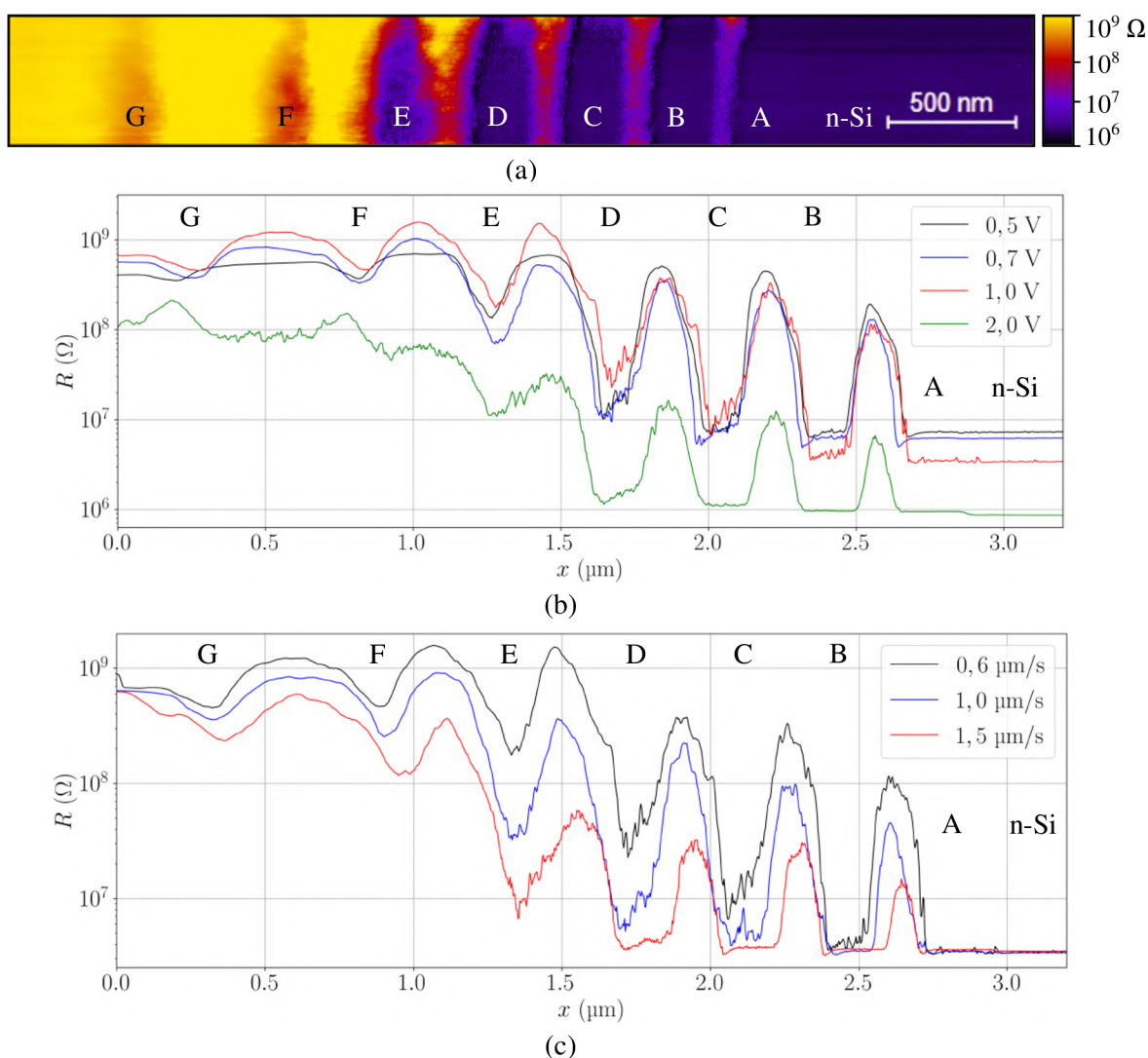
Na rozdíl od předchozích technik nejsou pro SSRM dostupné komerční sondy se samosnímacím senzorem. Lze však použít sondy pro optickou detekci a konkrétně typ CDT-FMR od firmy NANOSENSORS [71], který má hrot z vysoce N dopovaného diamantu. Tyto sondy lze použít tak, že je po povrchu vzorku rastrováno bez topografické zpětné vazby a sonda měří pouze elektrický odpor. Jedním z problémů je dosažení kontaktu se vzorkem, protože sonda nemá senzor na měření průhybu. Tento problém lze vyřešit podobně jako u rastrovacího tunelovacího mikroskopu (STM, *Scanning Tunneling Microscopy*), kde se měří tunelovací elektrický proud mezi hrotem a vzorkem. Dalším problémem je kontrola přitlačné síly sondy, která je klíčová pro SSRM. Přitlačnou sílu lze manuálně upravovat posuvem skeneru v ose  $z$ . Správný tlak závisí na poloměru hrotu, tuhosti sondy a materiálu vzorku. Potřebný posun skeneru v ose  $z$  lze přibližně dopočítat ze vztahu

$$z = \frac{p\pi r^2}{k}, \quad (5.1)$$

## 5. ANALÝZA POLOVODIČOVÝCH VZORKŮ

kde  $p$  je potřebný tlak pro dosažení  $\beta$ -Sn fáze materiálu,  $r$  je poloměr kontaktní plochy hrotu, který výrobce udává na svých stránkách jako 10 nm a  $k$  je tuhost použité sondy. SSRM se měří s logaritmickým zesilovačem proudu kvůli vysokým rozsahům měřených proudů.

Pro ověření kvality a vlastností techniky SSRM bylo provedeno první měření na referenčním SSRM vzorku [68]. Při měření bylo rastrováno přes všechny dopované vrstvy. Je potřeba dosáhnout tlaku 13 GPa [41] pro přechod křemíku do  $\beta$ -Sn fáze. Ze vzorce (5.1) je dopočítán posun skeneru o 1,24  $\mu\text{m}$  při tuhosti sondy  $3,3 \text{ N m}^{-1}$ . V prvním kroku bylo na vzorku provedeno několik měření pro odstranění nativní oxidové vrstvy pro snadnější analýzu. Poté bylo provedeno první měření s použitým napětím 0,7 V (obrázek 5.18a). Z naměřených dat je patrné, že dopované oblasti mají elektrický odpor daleko menší než oblasti intrinsického křemíku. Všech sedm dopovaných vrstev je rozeznatelných, přičemž



Obrázek 5.18: SSRM měření referenčního vzorku s P dopováním. (a) Měřený elektrický odpor přes dopované vrstvy s použitým napětím 0,7 V. (b) Závislost měřeného odporu přes dopované vrstvy pro různé napětí s konstantní rychlostí  $0,6 \mu\text{m s}^{-1}$ . (c) Závislost měřeného odporu přes dopované vrstvy pro různé rychlosti rastrování s konstantním napětím 1 V.

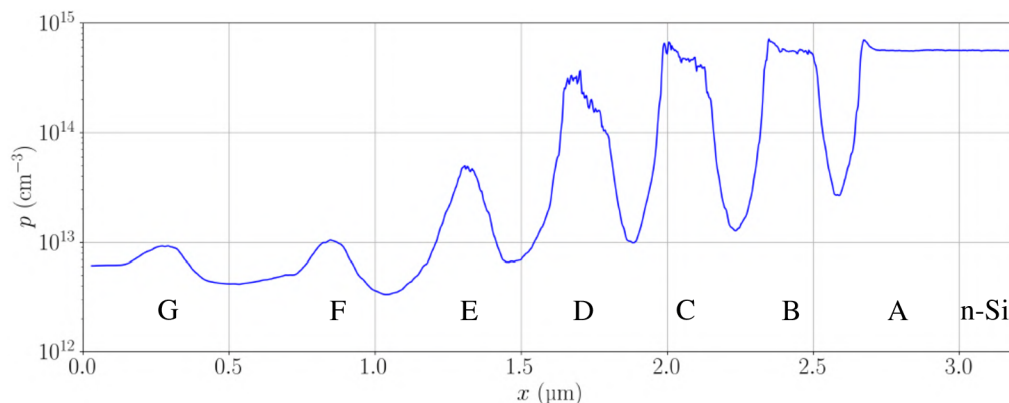
## 5.5. RASTROVACÍ MIKROSKOPIE ŠÍŘÍCÍHO SE ODPORU

u vrstev silně dopovaných je přechod mezi intrinsickým polovodičem a dopovanou vrstvou mnohem výraznější než u vrstev slabě dopovaných, kde je přechod méně výrazný.

Následně bylo provedeno měření s konstantní rychlostí a bylo postupně po krocích zvyšováno napětí. Zároveň byly vyneseny profily závislosti odporu přes dopované vrstvy pro každé napětí (obrázek 5.18b). Jako první je viditelné, že na pravé straně grafu (oblast N dopovaného substrátu) nejsou pro různá napětí odpory stejné. Tento jev je způsoben změnou objemového odporu vzorku v důsledku vyšších napětí. To lze vysvětlit tím, že při vyšších napětích dochází ke zvětšování průřezu, kterým je v místě kontaktu se sondou veden elektrický proud. Tento jev je dobře viditelný také ve vzorci pro měrný odpor  $\rho = RS/L$  [2], kde  $R$  je objemový odpor,  $S$  je obsah průřezu, kterým proud prochází a  $L$  je délka, kterou elektrony driftují.  $L$  a  $\rho$  jsou konstantní, protože se se změnou napětí nemění. A pokud dochází k zmenšení odporu  $R$ , tak je nutné, aby se  $S$  zvětšovalo a měrný odpor  $\rho$  tak zůstal konstantní, protože se jedná o materiálovou charakteristiku, která je neměnná. Druhým faktorem, který ovlivňuje tento jev, je opotřebení hrotu a to lze pozorovat ze vztahu (2.2) pro šířící se odpor. Pokud se hrot opotřebovává, roste  $a$ , a aby  $\rho$  zůstalo konstantní, musí se šířený odpor  $R_{SP}$  zmenšovat. Dále lze na grafu pozorovat, že hodnoty odporu intrinsického křemíku nejsou všude stejné. Tento jev je způsoben kondenzátory v logaritmickém zesilovači mikroskopu LiteScope. Kondenzátory potřebují určitou dobu na vybití, a proto u míst, kde dochází k velkým rozdílům v měřeném odporu, jsou tyto hodnoty nižší. To také způsobuje to, že v profilu pro 2 V jsou jednotlivé skoky méně výraznější. Zároveň u méně dopovaných vrstev s tímto napětím dochází k zašumění signálu (vrstvy E-G), což u nižších napětích není problém. Z těchto profilů vyplývá, že je vhodné využívat nízká napětí pro co nejlepší citlivost.

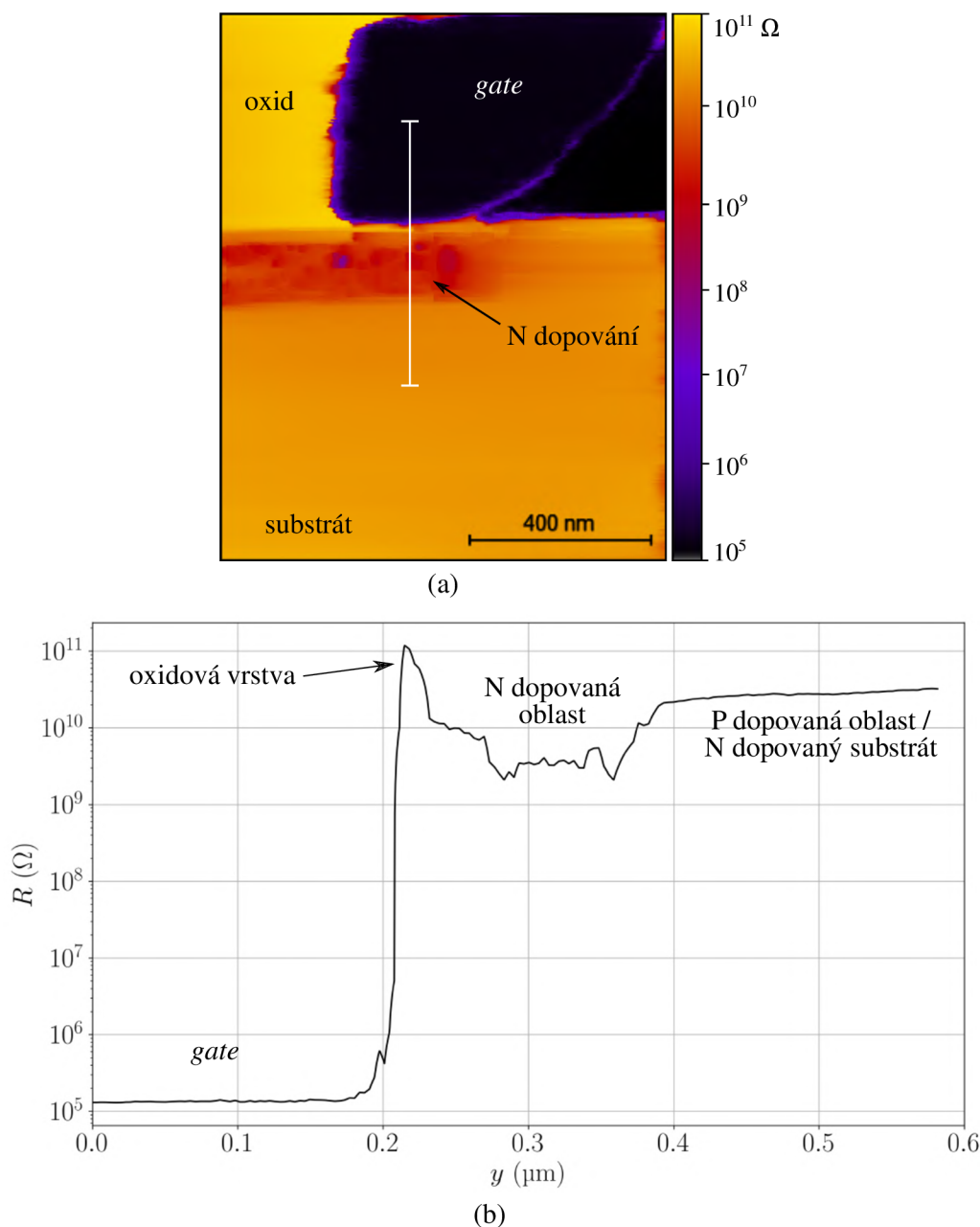
Dále byla vynesena také závislost měřeného odporu pro různé rychlosti rastrování při konstantním elektrickém napětí 1 V (obrázek 5.18c). Z naměřených dat je zřejmé, že při nižší rastrovací rychlosti je možné měřit větší rozdíly mezi dopovanou a nedopovanou vrstvou. Tento efekt je způsoben v důsledku vybíjení kondenzátoru v logaritmickém zesilovači proudu. To zároveň způsobuje to, že jednotlivé intrinsické vrstvy křemíku jsou také užší. Toto měření naznačuje, že pro dosažení co největších rozdílů a potlačení zužování jednotlivých oblastí je vhodné měřit s nízkými rychlostmi.

Pro dopočítání koncentrace dopantů v dopovaných vrstvách byl proveden výpočet. Nejdříve byl dopočítán měrný odpor ze vztahu (2.2) a následně dopočtena koncentrace



Obrázek 5.19: Profil dopočtených koncentrací z měření P dopovaného referenčního vzorku. Výpočet byl proveden pro profil, který byl naměřen s napětím 1 V a rychlostí rastrování  $0,6 \mu\text{m s}^{-1}$ .





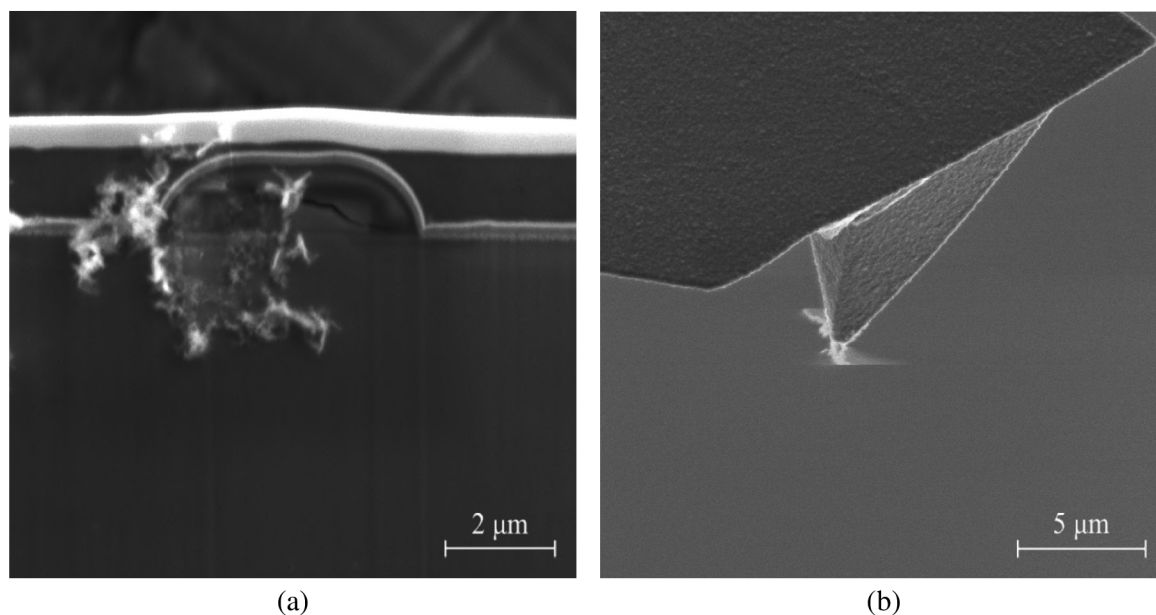
Obrázek 5.20: SSRM měření lamely unipolárního tranzistoru MOSFET. (a) Měřený elektrický odpor při použitím napětí 0,6 V. (b) Závislost elektrického odporu podél bílé úsečky z obrázku (a). Jsou zde viditelné oblasti *gate* s nízkým elektrickým odporem, izolační oxidová vrstva s vysokým odporem, oblast N dopování a oblast substrátu (P dopování).

P dopantů ze vztahu (2.3), kdy je uvažována pohyblivost děr v křemíku  $450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Tento výpočet byl proveden pro ukázkou pro data měřená s napětím 1 V a rychlostí rastrování  $0,6 \mu\text{m s}^{-1}$  (obrázek 5.19). Z dopočítaných hodnot je zřejmé, že se výrazně liší od předpokládaných hodnot, které jsou v rozmezí od  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  do  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Naměřené hodnoty jsou v rozmezí od  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  do  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . To znamená, že tento jednoduchý přepočítání dle předpokladů nemá smysl provádět, protože dopočtené hodnoty jsou rozdílné od tabulovaných hodnot.

## 5.5. RASTROVACÍ MIKROSKOPIE ŠÍŘÍCÍHO SE ODPORU

Jediným vhodným vzorkem k SSRM měření ze zde zmíněných je tranzistor MOSFET, a to díky své relativně rovné topografii. Pro měření byla využita sonda s tuhostí  $3,4 \text{ N m}^{-1}$ . Pro dosažení  $\beta$ -Sn fáze karbidu křemíku je potřeba vytvořit tlak  $64 \text{ GPa}$  [72], což znamená přijetí skenerem o  $5,91 \mu\text{m}$ . Tento přitlak způsobuje, že sonda se během příjždění skeneru posunuje po vzorku vlivem ohybu, což způsobuje problematictější navigaci sondy na vzorku. Je měřen elektrický odpor s použitým napětím  $0,6 \text{ V}$  (obrázek 5.20a). Rastrována byla oblast, kde dochází ke změnám koncentrace dopování a rezistivity vzorku. Na výsledných datech lze identifikovat čtyři základní oblasti: vysoce vodivý *gate*, nevodivou oxidovou oblast, oblast s N dopováním a P dopovaná oblast nebo substrát. Oxidová oblast a *gate* nejsou z pohledu koncentrace zajímavé. Zajímavý je kontrast odporu v oblasti N dopování, který značí rozdílnou koncentraci vůči substrátu. Nicméně není zde viditelná oblast P dopování, která se má nacházet okolo N dopované oblasti. Existují tři možná vysvětlení: (1) nebyla použita dostatečná přitlačná síla, která by způsobila přechod SiC do  $\beta$ -Sn fáze, (2) koncentrace dopantů v substrátu je podobná a tím by naměřený odpor obou oblastí byl také podobný, (3) mezi hrotem a vzorkem je PN přechod v závěrném směru. První z důvodů může být způsoben větším rozměrem diamantového zrna na konci hrotu než bylo předpokládáno. Tento efekt je možné kompenzovat pohybem skeneru, nicméně rozsah skeneru je  $20 \mu\text{m}$  a neumožňuje příliš prostoru ke kompenzaci. Příjždění makromotorama sondou je nebezpečné a hrozí poškození hrotu. Druhý důvod je způsoben neschopností techniky SSRM rozeznávat typ dopování, zejména pokud by se rozdíl koncentrací kompenzoval rozdílem v pohyblivosti elektronů a děr v karbidu křemíku. Bohužel toto nelze jednoznačně potvrdit, protože koncentrace dopování nejsou známé. A poslední důvod je ten, že mezi hrotem, který je N dopovaný, a oblastí s P dopováním se vytvoří PN přechod. U měření SSRM bylo během měření přivedeno kladné napětí na hrot a záporné napětí na vzorek, což odpovídá závěrnému směru PN přechodu. Nicméně vzorek je kontaktován přes horní hliníkový kontakt a přes substrát. Takže ve výsledku mezi hrotem a nakontaktovaným místem vzniká NPN přechod, který měření v P oblasti může znemožňovat.

Pro detailnější analýzu jednotlivých koncentrací je potřeba opět vytáhnout profil, který vede od *gate* přes dopované oblasti až do substrátu (obrázek 5.20c). Na tomto profilu lze identifikovat významné oblasti: vysoce vodivý *gate*, izolační oxidovou oblast s vysokým odporem, N dopovanou oblast a oblast substrátu nebo P dopování. Důležité je, že se povedlo zaznamenat zvýšený odpor v oblasti oxidové izolační vrstvy a lze tedy detekovat i tak malé oblasti. V n dopované oblasti hodnota naměřeného odporu dosahuje přibližně  $2 \times 10^9 \Omega$ . Takovýto odpor by v karbidu křemíku, který má pohyblivost elektronů  $880 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [73], znamenal koncentraci dopantů  $8,9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  vypočtenou pomocí vztahů (2.2) a (2.3). Běžně tyto oblasti bývají vysoce dopované v řádech  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Odpor oblast substrátu či P dopovaná oblast není příliš rozdílný od odporu oxidové vrstvy. To není překvapivé, protože měrný odpor karbidu křemíku je spíše typický pro izolanty jak pro polovodiče. V případě výpočtu koncentrace dopantů pro P dopovanou oblast by koncentrace byla  $6,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , při pohyblivosti děr  $117 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [73], a pro N dopovaný substrát  $8,9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Technika SSRM dokáže měřit koncentrace vyšší jak  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  [30], což znamená, že dopočtené hodnoty jsou vyšší. Trend hodnot je správný a N dopovaná oblast má nejvyšší koncentraci dopování a N dopovaný substrát koncentraci dopování nejnižší.

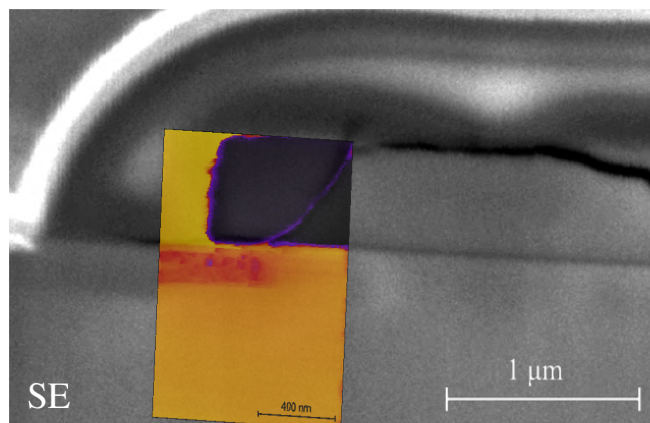


Obrázek 5.21: Vzorek a hrot po měření SSRM. (a) Na vzorku se v důsledku vysokých přitlačných sil vytvářejí rezidua materiálu vzorku okolo měřené oblasti. (b) Hrot po měření SSRM, kdy se některá rezidua zachytila na hrotu.

Během měření v důsledku vysoké přitlačné síly dochází k opotřebování hrotu a vzorku, a zároveň k vytváření reziduí vzniklých škrábáním materiálu vzorku (obrázek 5.21). Škrábáním dochází ke zničení vzorku a ten je pro další analýzy téměř nepoužitelný.

U mikroskopu LiteScope je SSRM analýza poměrně obtížná, protože nelze zcela přesně ovládat přitlačnou sílu horu, která je stěžejní pro měření, a tím dodržet stejné podmínky pro měření reference a součástky. Zároveň je také obtížné takové reference sehnat či obstarat. Co se týče poruchové analýzy, tak ve většině případech je koncentrace dopování známa a je zajímavější jaké tvary dopovaná oblast má a kde je dopování provedeno.

Na závěr byla opět provedena korelace změřených dat přes SEM obraz (obrázek 5.22). Jsou viditelné jednotlivé oblasti jako *gate*, oxidová oblast, N dopovaná oblast. Bohužel není viditelný kontrast v oblasti P dopování.



Obrázek 5.22: SSRM měření MOSFET tranzistoru korelované se SEM obrazem.



# Závěr

V úvodní kapitole této práce byly krystalické látky rozděleny podle jejich elektrických vlastností, a to konkrétně podle makroskopických vlastností, jako je měrný odpor a měrná vodivost, a dále podle pásové struktury a typu vazby. Toto rozdělení umožnilo látky rozřadit na tři základní skupiny: vodiče, polovodiče a izolanty. V následné části byly představeny základní vlastnosti a typy polovodičů. Při spojení polovodiče typu N a P vzniká PN přechod, který je základním stavebním kamenem všech aktivních polovodičových součástek. V závěru kapitoly byly představeny základní typy tranzistorů, jejich složení a princip fungování.

Druhá kapitola této práce byla zaměřena na využití SPM technik v poruchové analýze polovodičových součástek. Jako první byla představena mikroskopie atomárních sil (AFM), která je základem dalších technik. Pomocí této techniky lze získávat informaci o topografii vzorku, kontrolovat periodicitu struktur či analyzovat drsnost povrchu. Poté byla představena mikroskopie lokální vodivosti (CAFM), kterou lze měřit lokální proud na vzorku. Tato technika je důležitá pro kontrolu tloušťek oxidových vrstev nebo například trasování různých kontaktů na vzorku. Dále byly představeny techniky dvouprůchodové, kterými jsou mikroskopie elektrostatických sil (EFM) a rastrovací Kelvinová mikroskopie (KPFM). Mikroskopii elektrostatických sil je měřeno elektrostatické pole nad vzorkem a lze získávat informaci o koncentraci náboje na vzorku nebo kontrolovat sycení tranzistorů. Rastrovací Kelvinovou mikroskopii je měřen kontaktní povrchový potenciál a v poruchové analýze je využívána pro hledání defektů, měření povrchového potenciálu oblastí na vzorku nebo rozlišování P či N dopování polovodiče. Na závěr kapitoly byly představeny techniky pro měření koncentrace dopantů v polovodiči, kterými jsou mikroskopie šířícího se odporu (SSRM) a rastrovací kapacitní mikroskopie (SCM). Rastrovací mikroskopie šířícího se odporu SSRM využívá vysokých přitlačných sil k měření koncentrace dopantů prostřednictvím vytvoření  $\beta$ -Sn fáze v oblasti kontaktu, zatímco rastrovací kapacitní mikroskopie měří změny kapacity a tím určuje koncentraci dopantů a dokáže navíc rozlišovat typ dopování.

Ve třetí kapitole je představena měřicí sestava, která se skládá z rastrovacího elektronového mikroskopu MIRA od společnosti TESCAN a rastrovacího sondového mikroskopu LiteScope od společnosti NenoVision. Tato sestava je výjimečná tím, že využívá vysokého rozlišení elektronového mikroskopu, což umožňuje velmi přesnou navigaci na místo zájmu vzorku. Mikroskop LiteScope využívá sondy se samosnímacím senzorem, což přináší limity, které znemožňují plnohodnotné měření technik SSRM a SCM.

Ve čtvrté kapitole byly představeny vzorky použité k SPM analýze. Prvním vzorkem jsou wolframové prokovy v řezu CMOS čipu. Druhým vzorkem je řez bipolárním tranzistorem a posledním vzorkem je lamela MOSFET tranzistoru z karbidu křemíku. Jednotlivé vzorky byly postupně měřeny technikami AFM, CAFM, EFM a KPFM.

U techniky AFM lze kontrolovat kvalitu přípravy vzorku a pozorovat topografii, která může ovlivňovat kvalitu dat získaných pokročilejšími technikami. AFM umožňuje identifikovat podezřelá místa, která se svou neperiodicitou liší, a tím je u nich možné předpokládat rozdílné vlastnosti.

Technikou CAFM lze kvalitativně měřit lokální vodivost vzorku. Například u vzorku CMOS je viditelný pokles proudu na jednom prokovu, což může indikovat defektní prokov. U této techniky se projevuje jev hranové vodivosti, který ovlivňuje měření na topografických hranách vzorku, kde hrot sondy vede nejen samotnou špičkou, ale také svou stranou.

Druhým problémem u této techniky je vytváření nativní oxidové vrstvy na polovodičovém vzorku, kterou je potřeba zredukovat několika rastrováními. U MOSFET vzorku byl naměřen elektrický proud v N dopované oblasti a lze sledovat hloubku N dopování v součástce.

Technika EFM zobrazuje elektrostatické pole nad vzorkem, které vzniká koncentrací náboje v různých oblastech vzorku. Pomocí EFM byla na CMOS vzorku kontrolována periodicitu elektrostatického pole nad prokovo. Zároveň bylo změřeno rozdílné elektrostatické pole nad oblastmi tvořené izolačním, polovodičovým a kovovým materiálem. U vzorku MOSFET bylo zachyceno elektrostatické pole vytvořené tenkou oxidovou vrstvou mezi substrátem a *gate*, což značí, že technika dokáže rozlišovat i tyto malé oblasti. Omezením této techniky je koncentrace náboje na hranách vzorku, která může zkreslovat měřená data.

Technikou KPFM lze rozlišovat dva různé materiály na vzorku a u polovodičů by mělo být možné rozlišovat polovodič typu N a P. Rozdíly ve výstupních pracích obou typů jsou však velmi malé a k jejich rozlišení je potřeba vysoké přesnosti a citlivosti. Technika KPFM u mikroskopu LiteScope využívá amplitudovou modulaci, při které dochází k zachytávání signálu nejen špičkou hrotu, ale také jeho stranami, a dokonce raménkem sondy, což vede k průměrování změřených dat od velké oblasti, což může způsobit nepřesné výsledky. I přesto se při měření na CMOS vzorku povedlo zaznamenat poklesy výstupních prací v oblastech wolframu, který je oddělen křemíkem s vyšší výstupní prací. Změřené rozdíly téměř přesně kopírovaly teoretické hodnoty rozdílu. U tranzistoru MOSFET se podařilo zaznamenat rozdíly v povrchovém potenciálu na oblastech substrátu, oxidové oblasti, křemíkového *gate* a také na hliníkovém kontaktu. I když hodnoty zcela přesně neodpovídají teoretickým hodnotám, trend byl zřejmý. Bohužel nebyl pozorován kontrast v N a P dopované oblasti.

Jako poslední byla měřena technika SSRM, která se oproti předchozím technikám liší tím, že dosud neexistují komerčně dostupné sondy, které by měly samosnímací senzor, a umožnily tak plnohodnotné měření. Nicméně byly použity sondy, které se využívají pro optickou detekci, což komplikuje příjždění ke vzorku, kontrolu přítlačné síly a měření topografie. Během rastrování je měřen pouze elektrický odpor. Pro měření byla vhodná pouze lamela MOSFET tranzistoru, na které byly rozpoznány základní oblasti jako křemíkový *gate*, oxidová oblast, N dopovaná oblast a oblast substrátu či P dopované oblasti. Nebyl pozorován kontrast v oblasti P dopování, což může být způsobeno podobnou koncentrací dopování jako v substrátu nebo vzniku PN přechodu mezi hrotem a vzorkem, který je zapojen v závěrném směru. Během měření byl pozorován zvýšený odpor v oblasti oxidové izolační vrstvy mezi *gate* a substrátem, což značí, že lze dosahovat vysokého laterálního rozlišení touto technikou.

Závěrem lze konstatovat, že SPM analýza polovodičových součástek je komplexní proces ovlivněný mnoha faktory, které mohou ovlivnit výsledky měření. Nejdůležitější je již samotná příprava vzorku, která výrazně usnadní následnou analýzu, což bylo evidentní na vzorku MOSFET, který je poměrně rovný a téměř všechna měření byla provedena bez větších obtíží. Kvalitnější výsledky lze také obdržet pokročilejšími variantami jednotlivých technik jako je například frekvenční modulace EFM a KPFM, nebo použití techniky SCM. Bohužel v současné době tyto varianty technik nejsou implementované do mikroskopu LiteScope, což je jeho velkou limitací. Kombinace SPM-SEM umožňuje detailně zkoumaní polovodičových součástek a poskytuje cenné informace nezbytné pro poruchovou analýzu a pochopení selhávání součástek.

# Literatura

- [1] GRUNDMANN, M. *Physics of semiconductors*. Sv. 11. Springer, 2010. ISBN 978-3-319-23880-7.
- [2] VOBECKÝ, J.; ZÁHLAVA, V. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. Grada Publishing, spol. sro, 2001. ISBN 978-80-271-4631-4.
- [3] SZE, S. M.; LI, Y.; NG, K. K. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons, 2021. ISBN 978-0-471-14323-9.
- [4] GANDHI, T. *Microelectronics Failure Analysis Desk Reference*. ASM International, 2019. ISBN 978-1627082457.
- [5] MEYER, E.; HUG, H. J.; BENNEWITZ, R. et al. *Scanning probe microscopy: the lab on a tip*. Sv. 4. Springer, 2003. ISBN 978-3540431800.
- [6] JILES, D. C. *Introduction to the electronic properties of materials*. CRC Press, 2017. ISBN 978-0748760428.
- [7] BUTERA, R. A.; WALDECK, D. H. The dependence of resistance on temperature for metals, semiconductors and superconductors. *Journal of chemical education*. 1997, roč. 74, č. 9, s. 1090. Dostupné z DOI: [10.1021/ed074p1090](https://doi.org/10.1021/ed074p1090).
- [8] LANGMUIR, I. The arrangement of electrons in atoms and molecules. *Journal of the American Chemical Society*. 1919, roč. 41, č. 6, s. 868–934. Dostupné z DOI: [10.4159/harvard.9780674366701.c44](https://doi.org/10.4159/harvard.9780674366701.c44).
- [9] SOUBUSTA, J. *Fyzika pevných látek SLO*. PL, 2012. ISBN 978-80-244-3095-9.
- [10] KITTEL, C. *Introduction to solid state physics*. John Wiley & sons, inc, 2005. ISBN 978-0471415268.
- [11] NEAMEN, D. A. *Semiconductor physics and devices: basic principles*. McGraw-Hill, 2003. ISBN 978-0073529585.
- [12] BALKANSKI, M.; WALLIS, R. F. *Semiconductor physics and applications*. Sv. 8. Oxford University Press, 2000. ISBN 978-0198517405.
- [13] O'DONNELL, K. P.; CHEN, X. Temperature dependence of semiconductor band gaps. *Applied physics letters*. 1991, roč. 58, č. 25, s. 2924–2926. Dostupné z DOI: [10.1063/1.104723](https://doi.org/10.1063/1.104723).
- [14] CHEN, W.; QI, D.; GAO, X.; WEE, A. T. S. Surface transfer doping of semiconductors. *Progress in Surface Science*. 2009, roč. 84, č. 9-10, s. 279–321. Dostupné z DOI: [10.1016/j.progsurf.2009.06.002](https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2009.06.002).
- [15] SHOCKLEY, W. The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *Bell system technical journal*. 1949, roč. 28, č. 3, s. 435–489. Dostupné z DOI: [10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x).
- [16] ŠNEJDAR Václav a FRANK, H. *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. Teoretická knihovna inženýra.
- [17] YUAN, J. S.; LIOU, J. J. *Semiconductor device physics and simulation*. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 978-0306457241.
- [18] PETER, Y.; CARDONA, M. *Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties*. Springer Science & Business Media, 2010. ISBN 978-3642007095.

## LITERATURA

- [19] ROULSTON, D. J. *An Introduction to the Physics of Semiconductor Devices*. Oxford University Press, 1999. Oxford series in electrical and computer engineering. ISBN 978-0195114775.
- [20] SEDRA, A.; SMITH, K. C.; CARUSONE, T. C.; GAUDET, V. *Microelectronic circuits 8th edition*. Sv. 14. 2020. ISBN 978-0190853464.
- [21] BLICHER, A. *Field-effect and bipolar power transistor physics*. Elsevier, 2012. ISBN 978-0124317321.
- [22] LIOU, J. J.; ORTIZ-CONDE, A.; GARCIA-SANCHEZ, F. MOSFET physics and modeling. *Analysis and Design of Mosfets: Modeling, Simulation and Parameter Extraction*. 1998, s. 1–108. Dostupné z DOI: [10.1007/978-1-4615-5415-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5415-8_1).
- [23] REN, Z. *Nanoscale MOSFETs: Physics, simulation and design*. 2001. Dis. pr. Purdue University.
- [24] PLATANIA, E.; CHEN, Z.; CHIMENTO, F.; GREKOV, A. E.; FU, R. et al. A physics-based model for a SiC JFET accounting for electric-field-dependent mobility. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010, roč. 47, č. 1, s. 199–211. Dostupné z DOI: [10.1109/TIA.2010.2090843](https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2090843).
- [25] BALIGA, B. J. *The IGBT device: physics, design and applications of the insulated gate bipolar transistor*. William Andrew, 2015. ISBN 978-1455731435.
- [26] SPECTRUM, I. *IBM Introduces the World's First 2-nm Node Chip* [online]. Dostupné také z: <https://spectrum.ieee.org/ibm-introduces-the-worlds-first-2nm-node-chip>.
- [27] BECK, F. *Integrated circuit failure analysis: a guide to preparation techniques*. John Wiley & Sons, 1998. ISBN 978-0-471-97401-7.
- [28] VŮJTEK, M.; KUBÍNEK, R.; MAŠLÁŇ, M. *Nanoskopie*. Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.
- [29] EBERSBERGER, B.; OLBRICH, A.; BOIT, C. Scanning probe microscopy in semiconductor failure analysis. *Microelectronics Reliability*. 2001, roč. 41, č. 8, s. 1231–1236. Dostupné z DOI: [10.1016/S0026-2714\(01\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(01)00109-3).
- [30] DE WOLF, P. Failure Analysis of Semiconductors using Scanning Probe Microscopy (SPM). In: Tutorial ESREF, 2004. Dostupné také z: <https://www.thierry-lequeu.fr/data/ESREF/2004/Tut3.pdf>.
- [31] LANZA, M. *Conductive atomic force microscopy: applications in nanomaterials*. John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-3527340910.
- [32] GIRARD, P. Electrostatic force microscopy: principles and some applications to semiconductors. *Nanotechnology*. 2001, roč. 12, č. 4, s. 485. Dostupné z DOI: [10.1088/0957-4484/12/4/321](https://doi.org/10.1088/0957-4484/12/4/321).
- [33] LEI, C.; DAS, A.; ELLIOTT, M.; MACDONALD, J. E. Quantitative electrostatic force microscopy-phase measurements. *Nanotechnology*. 2004, roč. 15, č. 5, s. 627. Dostupné z DOI: [10.1088/0957-4484/15/5/038](https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/5/038).
- [34] WAGNER, T.; BEYER, H.; REISSNER, P.; MENSCH, P.; RIEL, H. et al. Kelvin probe force microscopy for local characterisation of active nanoelectronic devices. *Beilstein journal of nanotechnology*. 2015, roč. 6, č. 1, s. 2193–2206. Dostupné z DOI: [10.3762/bjnano.6.225](https://doi.org/10.3762/bjnano.6.225).



- [35] SHEN, Y.; LEE, M.; LEE, W.; BARNETT, D. M.; PINSKY, P. M. et al. A resolution study for electrostatic force microscopy on bimetallic samples using the boundary element method. *Nanotechnology*. 2007, roč. 19, č. 3, s. 035710. Dostupné z DOI: [10.1088/0957-4484/19/03/035710](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/03/035710).
- [36] NONNENMACHER, M.; O'BOYLE, M. P.; WICKRAMASINGHE, H. K. Kelvin probe force microscopy. *Applied physics letters*. 1991, roč. 58, č. 25, s. 2921–2923. Dostupné z DOI: [10.1063/1.105227](https://doi.org/10.1063/1.105227).
- [37] SADEWASSER, S.; GLATZEL, T. *Kelvin probe force microscopy*. Sv. 48. Springer, 2012. ISBN 978-3319756868.
- [38] IZUMI, R.; LI, Y. J.; NAITOH, Y.; SUGAWARA, Y. Study of high–low KPFM on a pn-patterned Si surface. *Microscopy*. 2022, roč. 71, č. 2, s. 98–103. Dostupné z DOI: [10.1093/jmicro/dfab055](https://doi.org/10.1093/jmicro/dfab055).
- [39] SUN, W. Developments in SPM technologies for semiconductor failure analysis. 2016, s. 356–359. Dostupné z DOI: [10.1109/IPFA.2016.7564316](https://doi.org/10.1109/IPFA.2016.7564316).
- [40] SHAO, G. Work function and electron affinity of semiconductors: Doping effect and complication due to fermi level pinning. *Energy & Environmental Materials*. 2021, roč. 4, č. 3, s. 273–276. Dostupné z DOI: [10.1002/eem2.12218](https://doi.org/10.1002/eem2.12218).
- [41] DURANDURDU, M. Diamond to  $\beta$ -Sn phase transition of silicon under hydrostatic and nonhydrostatic compressions. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008, roč. 20, č. 32, s. 325232. Dostupné z DOI: [10.1088/0953-8984/20/32/325232](https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/32/325232).
- [42] GERMANICUS, R. C.; LALLEMAND, F.; CHATEIGNER, D.; JOUHA, W.; MOULTIF, N. et al. Dopant activity for highly in-situ doped polycrystalline silicon: hall, XRD, scanning capacitance microscopy (SCM) and scanning spreading resistance microscopy (SSRM). *Nano Express*. 2021, roč. 2, č. 1, s. 010037. Dostupné z DOI: [10.1088/2632-959X/abcd3e](https://doi.org/10.1088/2632-959X/abcd3e).
- [43] ALVAREZ, D. *Scanning Spreading Resistance Microscopy for the characterization of advanced silicon devices*. 2007. Dizertační práce.
- [44] EYBEN, P.; JANSSENS, T.; VANDERVORST, W. Scanning spreading resistance microscopy (SSRM) 2d carrier profiling for ultra-shallow junction characterization in deep-submicron technologies. *Materials Science and Engineering: B*. 2005, roč. 124, s. 45–53. Dostupné z DOI: [10.1016/j.mseb.2005.08.049](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.08.049).
- [45] DE WOLF, P.; CLARYSSE, T.; VANDERVORST, W.; SNAUWAERT, J.; HELLEMANS, L. One-and two-dimensional carrier profiling in semiconductors by nanospreading resistance profiling. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1996, roč. 14, č. 1, s. 380–385. Dostupné z DOI: [10.1116/1.588478](https://doi.org/10.1116/1.588478).
- [46] PRÜSSING, J. K.; BÖCKENDORF, T.; HAMDANA, G.; PEINER, E.; BRACHT, H. Defect Distribution in Doped Silicon Nanostructures Characterized By Means of Scanning Spreading Resistance Microscopy. 2021, č. 34, s. 1097–1097. Dostupné z DOI: [10.1149/MA2021-01341097mtgabs](https://doi.org/10.1149/MA2021-01341097mtgabs).
- [47] LI, J. V.; FERRARI, G. *Capacitance spectroscopy of semiconductors*. CRC Press, 2018. ISBN 978-1351368452.

## LITERATURA

- [48] BHUSHAN, B.; FUCHS, H.; TOMITORI, M. *Applied scanning probe methods VIII: Scanning probe microscopy techniques*. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 978-3540740803.
- [49] TESCAN. *TESCAN MIRA* [online]. Dostupné také z: <https://www.tescan.com/product/sem-for-materials-science-tescan-mira/>.
- [50] NENOVISION. *NenoVision* [online]. Dostupné také z: <https://www.nenovision.com>.
- [51] ZHOU, W.; APKARIAN, R.; WANG, Z. L.; JOY, D. Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning microscopy for nanotechnology: techniques and applications*. 2007, s. 1–40. Dostupné z DOI: [10.1007/978-0-387-39620-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1).
- [52] VERNON-PARRY, K. D. Scanning electron microscopy: an introduction. *III-Vs review*. 2000, roč. 13, č. 4, s. 40–44. Dostupné z DOI: [10.1016/S0961-1290\(00\)80006-X](https://doi.org/10.1016/S0961-1290(00)80006-X).
- [53] GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; MICHAEL, J. R.; RITCHIE, N. W. M.; SCOTT, J. H. J. et al. Backscattered electrons. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. 2018, s. 15–28. Dostupné z DOI: [10.1007/978-1-4939-6676-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9_2).
- [54] NOVOTNA, V.; HORAK, J.; KONECNY, M.; HEGROVA, V.; NOVOTNY, O. et al. AFM-in-SEM as a tool for comprehensive sample surface analysis. *Microscopy Today*. 2020, roč. 28, č. 3, s. 38–46. Dostupné z DOI: [10.1017/S1551929520000875](https://doi.org/10.1017/S1551929520000875).
- [55] ROGERS, B.; MANNING, L.; SULCHEK, T.; ADAMS, J. D. Improving tapping mode atomic force microscopy with piezoelectric cantilevers. *Ultramicroscopy*. 2004, roč. 100, č. 3-4, s. 267–276. Dostupné z DOI: [10.1016/j.ultramicro.2004.01.016](https://doi.org/10.1016/j.ultramicro.2004.01.016).
- [56] DUKIC, M.; ADAMS, J. D.; FANTNER, G. E. Piezoresistive AFM cantilevers surpassing standard optical beam deflection in low noise topography imaging. *Scientific reports*. 2015, roč. 5, č. 1, s. 16393. Dostupné z DOI: [10.1038/srep16393](https://doi.org/10.1038/srep16393).
- [57] STUCKLIN, S.; GULLO, M. R.; AKIYAMA, T.; SCHEIDIGER, M. Atomic force microscopy for industry with the akiyama-probe sensor. In: *2008 International Conference on Nanoscience and Nanotechnology*. IEEE, 2008, s. 79–82. Dostupné z DOI: [10.1109/ICNN.2008.4639250](https://doi.org/10.1109/ICNN.2008.4639250).
- [58] SIBAILLY, O.; RICHERZHAGEN, B. Laser dicing of silicon and composite semiconductor materials. In: *Photon Processing in Microelectronics and Photonics III*. SPIE, 2004, sv. 5339, s. 394–397. Dostupné z DOI: [10.1117/12.529038](https://doi.org/10.1117/12.529038).
- [59] COOPER, D.; BEN ASSAYAG, G. Specimen preparation for semiconductor analysis. *Transmission Electron Microscopy in Micro-Nanoelectronics*. 2012, s. 219–236. Dostupné z DOI: [10.1002/9781118579022.ch9](https://doi.org/10.1002/9781118579022.ch9).
- [60] SCHWARZ, S. M.; KEMPSHALL, B. W.; GIANNUZZI, L. A.; MCCARTNEY, M. R. Avoiding the curtaining effect: backside milling by FIB INLO. *Microscopy and Microanalysis*. 2003, roč. 9, č. S02, s. 116–117. Dostupné z DOI: [10.1017/S1431927603441044](https://doi.org/10.1017/S1431927603441044).

- [61] LOEBER, T. H.; LAEGEL, B.; WOLFF, S.; SCHUFF, S.; BALLE, F. et al. Reducing curtaining effects in FIB/SEM applications by a goniometer stage and an image processing method. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2017, roč. 35, č. 6. Dostupné z DOI: [10.1116/1.4991638](https://doi.org/10.1116/1.4991638).
- [62] FITSCHEN, J. H.; MA, J.; SCHUFF, S. Removal of curtaining effects by a variational model with directional forward differences. *Computer Vision and Image Understanding*. 2017, roč. 155, s. 24–32. Dostupné z DOI: [10.1016/j.cviu.2016.12.008](https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.12.008).
- [63] TSURUMI, D.; HAMADA, K. Dopant mapping of semiconductors with scanning electron microscopy. *SEI Technical Review*. 2013, roč. 1, s. 141–146.
- [64] FRANK, L.; HOVORKA, M.; EL-GOMATI, M. M.; MÜLLEROVÁ, I.; MIKA, F. et al. Acquisition of the dopant contrast in semiconductors with slow electrons. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2020, roč. 241, s. 146836. Dostupné z DOI: [10.1016/j.elspec.2019.03.004](https://doi.org/10.1016/j.elspec.2019.03.004).
- [65] SEKIGUCHI, T.; KIMURA, T.; IWAI, H. SEM observation of pn junction in semiconductors using fountain secondary electron detector. *Superlattices and Microstructures*. 2016, roč. 99, s. 165–168. Dostupné z DOI: [10.1016/j.spmi.2016.03.020](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.03.020).
- [66] CHEE, A. K. W. Enhancing doping contrast and optimising quantification in the scanning electron microscope by surface treatment and Fermi level pinning. *Scientific reports*. 2018, roč. 8, č. 1, s. 5247. Dostupné z DOI: [10.1038/s41598-018-22909-2](https://doi.org/10.1038/s41598-018-22909-2).
- [67] KERN, W. et al. Chemical etching of silicon, germanium, gallium arsenide, and gallium phosphide. *RCA Rev*. 1978, roč. 39, č. 2, s. 278–308.
- [68] DRUCKMÜLLEROVÁ, Z.; KOLÍBAL, M.; VYSTAVĚL, T.; ŠIKOLA, T. Toward site-specific dopant contrast in scanning electron microscopy. *Microscopy and Microanalysis*. 2014, roč. 20, č. 4, s. 1312–1317. Dostupné z DOI: [10.1017/S1431927614000968](https://doi.org/10.1017/S1431927614000968).
- [69] HÖLZL, J.; SCHULTE, F. K. Work function of metals. *Solid surface physics*. 2006, s. 1–150. Dostupné z DOI: [10.1007/BFb0048919](https://doi.org/10.1007/BFb0048919).
- [70] PELLETIER, J.; GERVAIS, D.; POMOT, C. Application of wide-gap semiconductors to surface ionization: work functions of AlN and SiC single crystals. *Journal of applied physics*. 1984, roč. 55, č. 4, s. 994–1002. Dostupné z DOI: [10.1063/1.333156](https://doi.org/10.1063/1.333156).
- [71] NANOSENZORS. *Conductive Diamond Coated Tip - Force Modulation Mode - Reflex Coating* [online]. Dostupné také z: <https://www.nanosensors.com/conductive-diamond-coated-tip-force-modulation-mode-reflex-coating-afm-tip-CDT-FMR>.
- [72] MIZUSHIMA, K.; TANG, M.; YIP, S. Toward multiscale modelling: the role of atomistic simulations in the analysis of Si and SiC under hydrostatic compression. *Journal of alloys and compounds*. 1998, roč. 279, č. 1, s. 70–74. Dostupné z DOI: [10.1016/S0925-8388\(98\)00614-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00614-8).

## LITERATURA

- [73] MNATSAKANOV, T. T.; LEVINSHTEIN, M. E.; POMORTSEVA, L. I.; YURKOV, S. N. Carrier mobility model for simulation of SiC-based electronic devices. *Semiconductor science and technology*. 2002, roč. 17, č. 9, s. 974. Dostupné z DOI: [10.1088/0268-1242/17/9/313](https://doi.org/10.1088/0268-1242/17/9/313).