



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ANALÝZA BIPOLÁRNÍCH TRANZISTORŮ S IZOLOVANÝM HRADLEM

ANALYSIS OF TRENCH INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Karlovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bábor, Ph.D.

KONZULTANT

CONSULTANT

Ing. Adam Klimsza, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Juraj Karlovský**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bábor, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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 bakalářské práce:

Analýza bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem TIGBT (Trench Insulated Gate Bipolar Transistor) je součástka primárně určená pro spínání ve velkém rozsahu výkonů. Je tvořena dvěma paralelně zapojenými strukturami - MOS tranzistor a bipolární tranzistor. Součástka dosahuje výrazně vyšší spínací rychlosti ve srovnání s tyristorem, a vyšších závěrných napětí ve srovnání se součástkami MOS FET. Obsahem práce je vytvořit analytické postupy s využitím infrastruktury výzkumného centra CEITEC pro analýzu bipolárních tranzistorů s izolovaným hradlem (TIGBT – Trench Insulated Gate Bipolar Transistors) v rámci spolupráce Ústavu fyzikálního inženýrství s firmou ON Semiconductor Czech Republic, s.r.o. se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešeršní studii TIGBT tranzistorů.
2. Provedte analýzu vzorků pro výrobu TIGBT tranzistorů s využitím přístrojů ve vědeckém centru CEITEC.
3. Vytvořte postupy pro optimální analýzu těchto vzorků.

Seznam literatury:

Heide, P.: Secondary ion mass spectrometry an introduction to principles and practices, John Wiley & Sons, Inc. (2014)
Cui, Z.: Nanofabrication, Principles, Capabilities and Limits, Springer (2008)
Reimer, L.: Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer (1998)

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne 29. 11. 2015

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá výberom a optimalizáciou vhodných analytických metód pre charakterizáciu TIGBT (Trench Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolárny tranzistor s izolovaným trench hradlom) štruktúr s použitím metód zobrazujúcich materiálové zloženie vzoriek. V teoretickej časti sú popísané princípy použitých analytických metód a základné princípy činnosti študovaných TIGBT tranzistorov. Praktická časť sa zaoberá metodikou merania, následným spracovaním a vyhodnotením výsledkov meraní a návrhom optimálnych postupov meraní.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

TIGBT, IGBT, SEM (skenovací elektrónový mikroskop), EBIC (Electron Beam Induced Current) TOF-SIMS (Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy), kolektor, emitor, báza, trench, zdroj, hradlo, oxid.

ABSTRACT

This thesis is focused on the selection and optimization of suitable analytical methods for study of TIGBT (Trench Insulated Gate Bipolar Transistor) structures with a use of methods, that depict material composition of the studied sample. The theoretical part contain explanations of the analytical methods used for measurements and basic principle of operation of an TIGBT transistor. The practical part contain the methodic of measurements and the evaluation of the obtained data and design of optimal procedures in done experiments.

KEYWORDS

TIGBT, IGBT, SEM (Scanning Electron Microscope), EBIC (Electrone Beam Induced Current), TOF- SIMS (Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy), collector, emitter, base, trench, gate, source, drain, oxide.

KARLOVSKÝ, J.: *Analýza biolárných tranzistorov s izolovaným hradlom*: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí práce Ing. Petr Bátor, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu s názvom **Analýza bipolárnych tranzistorov s izolovaným hradlom** vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce s použitím odbornej literatúry a ďalších zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname literatúry na konci tejto práce. Vytvorením tejto práce som neporušil cudzie autorské práva.

V Brne dňa 25.5.2016

.....
(podpis autora)

PodĎakovanie

Ďakujem Ing. Petru Báborevi, Ph.D. za vedenie tejto bakalárskej práce, konzultáciu, podporu a motiváciu pri riešení náročných problémov analýzy vzoriek. Moje poďakovanie patrí tiež Ing. Michalovi Potočkovi, Ph.D. za pomoc pri meraniach a Ing. Adamovi Klimszovi Ph.D. za odbornú konzultáciu. Ďakujem tiež mojej rodine, priateľom a všetkým ostatným, ktorí ma podporovali po celú dobu štúdia.

Analýzy vzorků byly provedeny ve Sdílené laboratoři přípravy a charakterizace nanostruktur CEITEC VUT a hrazeny z projektu CEITEC - open access LM2011020.

Juraj Karlovský

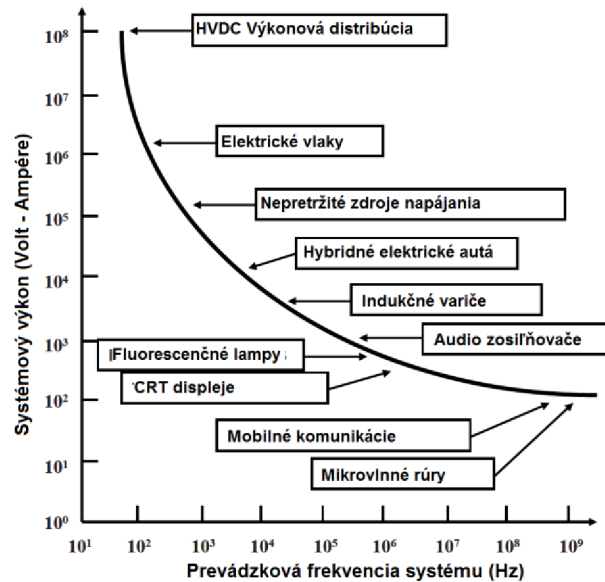
OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Súčasný stav problematiky.....	3
2.1	IGBT	3
2.1.1	Historický úvod.....	3
2.1.2	Štruktúra a činnosť IGBT.....	4
2.1.3	Statické blokovacie charakteristiky.....	6
2.1.3.1	Schopnosť blokovať v závernom smere	6
2.1.3.2	Schopnosť blokovať v priepustnom smere.....	7
2.1.4	Voltampérové charakteristiky	8
2.1.4.1	Spínacie charakteristiky IGBT	8
2.1.5	Trench hradlová IGBT štruktúra.....	10
2.2	Okrajová ukončovacia štruktúra čipov.....	12
2.2.1	Planárne ukončovacie štruktúry	12
2.3	Metalizácia prednej strany čipu.....	14
2.3.1	AlSi metalizácia	14
2.3.2	Al-Cu metalizácia.....	15
3	Analytické metódy	18
3.1	TOF- SIMS	18
3.1.1	Princíp činnosti.....	18
3.2	EBIC.....	21
3.2.1	Zobrazovanie OPN pomocou metódy EBIC.....	21
4	Experimentálna časť.....	23
4.1	Štúdium metalizácie pomocou TOF-SIMS	23
4.1.1	Príprava vzoriek	23
4.1.2	Merací proces.....	24
4.1.3	Vyhodnotenie nameraných údajov.....	24
4.1.4	Výsledky meraní	25
4.1.4.1	Výsledky meraní pre vzorky zo Splitu 1	25
4.1.4.2	Výsledky meraní pre vzorky zo Splitu 2	30
4.2	Analýza okrajovej terminácie pomocou metódy EBIC.....	36
4.2.1	Príprava vzoriek	37
4.2.2	Merací proces.....	37
4.2.3	Namerané údaje.....	38
4.2.4	Vyhodnotenie nameraných údajov.....	46
5	Záver	48
6	Literatúra.....	49
7	Zoznam skratiek.....	51

1 Úvod

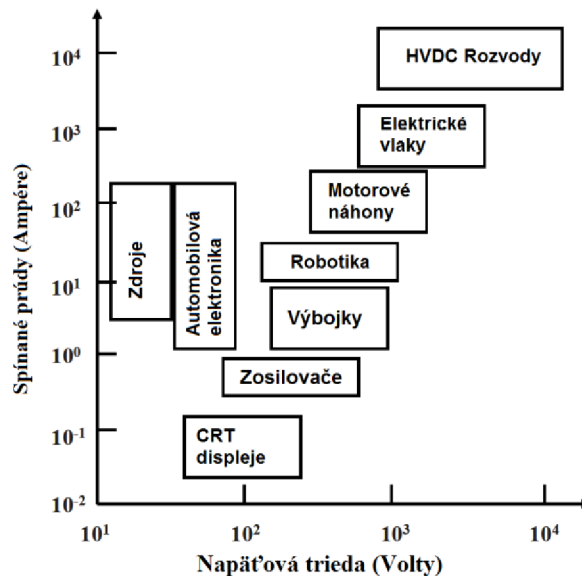
Výkonové polovodičové súčiastky majú v dnešnej dobe širokú škálu uplatnenia, z čoho vyplývajú požiadavky na ich špecifické charakteristiky. Ich základné rozdelenie možno previesť dvoma spôsobmi:

1. ako funkciu pracovnej frekvencie, alebo
2. ako závislosť spínaného prúdu na závernom napätí.



Obrázok 1: Rozdelenie výkonových prvkov v závislosti spínaného výkonu vo volt-ampéroch od prevádzkovej frekvencie [1].

Ako môžeme vidieť na obrázku 1, polovodičové výkonové prvky sú schopné spínať v rádoch 100 W pri mikrovlnných frekvenciách, až po 100 MW pri nízkych frekvenciách.



Obrázok 2: Rozdelenie výkonových prvkov podľa spínaného prúdu v závislosti na závernom napätí [1].

Na obrázku 2 vidíme veľkú diverzitu aplikácií. Prvá skupina súčiastok je zameraná na schopnosť spínať veľké prúdy pri malých napätiach. V tejto skupine sú súčiastky používané v spínaných zdrojoch a v elektrických pohonoch automobilov. Druhá vetva použitia je orientovaná v smere rastúceho spínaného prúdu (čiže postupného zvyšovania výkonu), pri súčasnom zvyšovaní záverného napätia. Do tejto skupiny patria napríklad súčiastky pre napájanie displejov; jednotiek ovládania motorov; trakčných jednotiek; až po vysokonapäťové aplikácie. Pri vysokonapäťových aplikáciách je nutné spínať prúdy v rádoch 1000 A pri napätiach presahujúcich 6000 V.

V ideálnom prípade súčiastka vykazuje nulový úbytok napätia v zopnutom stave a nulový záverný prúd vo vypnutom stave. Reálne zariadenia sa k takejto charakteristike len blížia.

Z dôvodov uplatnenia v širokej škále aplikácií, je nutné vyvíjať zariadenia, ktoré spĺňajú široké spektrum požadovaných charakteristík. Preto vzniklo viacero polovodičových súčiastok, ktoré sú špecifické ich použitím. Pre malé záverné napätia, do 500V je optimálne používať MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) štruktúru, pretože je schopná v tejto napäťovej oblasti efektívne regulovať vysoké prúdy. Jej výhodnou charakteristikou je, že na ovládanie stačí dodávať na hradlo (angl. gate) skoro nulový prúd. Tým pádom môže byť ovládanie vo veľkom množstve prípadov robené len pomocou logického obvodu, ktorý nie je navrhnutý tak, aby dodával na hradlo veľké prúdy. Pre napätia vyššie ako 500V sa používali a v niektorých oblastiach sa ešte hojne používajú tyristory a bipolárne tranzistory. Ich vlastnosti ale nevyhovujú vysokým spínacím frekvenciám. Preto bola vyvinutá štruktúra IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom). Tento tranzistor kombinuje schopnosť bipolárneho tranzistora spínať vysoké prúdy pri vysokých napätiach so schopnosťou MOSFET tranzistora pracovať pri vysokých frekvenciách [1].

2 Súčasný stav problematiky

V účastnosti je využitie IGBT tranzistorov veľmi rozšírené pre ich výhodné kombinovanie vlastností bipolárneho tranzistora s tranzistorom typu MOSFET. Pre ich široké možnosti aplikácie vznikajú čipy schopné blokovať napätia v rádoch stoviek voltov vhodné pre domáce spotrebiče ako sú práčky alebo regulátory otáčok elektromotorov v hybridných automobiloch, až po súčiastky určené pre moduly pohonov elektrických lokomotív, schopné pracovať pri záverných napätiach 6,5 kV. Z týchto aplikačných podmienok vznikajú rôzne variácie architektúry IGBT. V nasledujúcich kapitolách sa budem snažiť priblížiť základnú činnosť IGBT štruktúry, a jej základné technické vlastnosti.

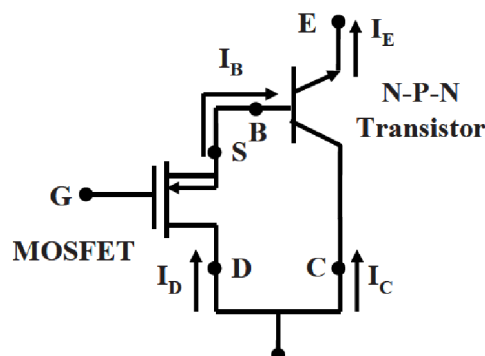
2.1 IGBT

2.1.1 Historický úvod

Koncept štruktúry IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom) bol vyvíjaný v osemdesiatych rokoch minulého storočia.

Pred použitím IGBT štruktúr boli v aplikáciách s frekvenciami nad 1 kHz často používané bipolárne tranzistory. Bipolárne tranzistory poskytujú dobré prevádzkové charakteristiky pri malých stratách napätia. Problém s touto štruktúrou nastáva pri vysokých napätiach, kde je len malý prúdový zisk. Kvôli tejto vlastnosti nemôže byť pri vysokonapäťových aplikáciách riadiaca jednotka vo forme integrovaného obvodu (MOSFET). Táto vlastnosť stimulovala vývoj MOSFET štruktúry, ktorá je riadená napäťovo, prúd pri spínaní je zanedbateľný. Preto riadiaca jednotka môže byť konštruovaná jednoducho, bez nutnosti prvkov dodávajúcich veľké riadiace prúdy, teda môže byť vo forme integrovaného obvodu. Jej nevýhodou je to, že pri konštrukcii pre vysoké napätia (už v oblasti nad 200V záverného napätia) rastie odpor v zopnutom stave nad prijateľné medze, čo znemožňuje použitie MOSFET pri vysokých napätiach. Na základe vlastností bipolárneho tranzistora a MOSFET tranzistora bolo výhodné skombinovať ich. Týmto sa využila vysoká prúdová hustota bipolárneho tranzistora a jeho nízky úbytok napätia v zopnutom stave, s jednoduchosťou ovládania hradla pomocou MOS štruktúry.

Najjednoduchšia metóda výroby takejto štruktúry je zobrať dve diskkrétne súčiastky: MOSFET tranzistor a bipolárny tranzistor a zapojiť ich v Darlingtonovej konfigurácii. Schéma takehoto zapojenia je na obrázku 3.



Obrázok 3: Schematické zapojenie tranzistorov MOSFET a NPN pre dosiahnutie MOS riadeného bipolárneho tranzistora s vyznačeným tokom prúdov, prevzaté z [2].

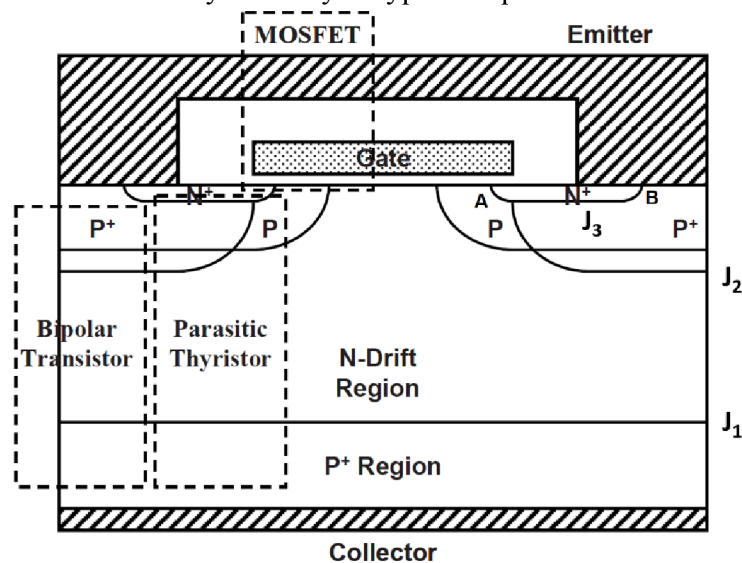
V takomto zapojení dodáva výkonový MOSFET tranzistor bázový prúd pre bipolárny tranzistor, keď je privedené napätie na hradlo MOSFET tranzistora. Z toho plynie, že

výsledné zariadenie má vysokú vstupnú impedanciu MOS štruktúry, vďaka čomu je riadiaci obvod jednoduchý. Súčasne väčšina spínaného prúdu tečie cez bipolárny tranzistor zatiaľ čo vysokonapäťový výkonový MOSFET tranzistor dodáva bázový riadiaci prúd. Pretože je tu využitá kombinácia diskretných súčiastok, výsledná prúdová hustota sa nachádza medzi prúdovou hustotou bipolárneho tranzistora (zväčša 50 Acm^{-2}) a MOSFET tranzistora (typicky 10 Acm^{-2}). Tieto diskretné súčiastky môžu byť vyrobené súčasne na jednej kremíkovej doske, čím vznikne trojterminálové zariadenie, ktoré je jednoduché na použitie. Vzhľadom na to, že táto metóda využíva len diskretné súčiastky, nebola ďalej rozvíjaná. [3]

2.1.2 Štruktúra a činnosť IGBT

Táto kapitola je venovaná popisu fyzikálnych dejov pri vedení prúdu v bipolárnych tranzistoroch a počas spínania pomocou MOS hradla.

Pri pohľade na štruktúru IGBT sa táto štruktúra podobá na MOS hradlový tyristor, ale činnosť IGBT je principiálne odlišná. Štruktúra IGBT je navrhovaná tak, aby nedochádzalo k regeneratívnemu zopnutiu, ktoré je vlastné vstavanej štvorvrstvovej tyristorovej štruktúre. Z koncepčného hľadiska bolo prelomové vo vývoji IGBT uvedomenie si, že MOS hradlo môže byť použité k vytvoreniu (inverznej vrstvy) vodivého kanála spájajúceho N^+ emitor s N oblasťou bez regeneratívneho zahľtenia tyristora. Vzhľadom na to, že spodný prechod je zapojený v priepustnom smere v zopnutom stave, môže v IGBT dochádzať k toku prúdu týmto prechodom. Toto umožňuje plne hradlovo ovládanú výstupnú charakteristiku súčiastky s núteným vypnutím pomocou hradla.

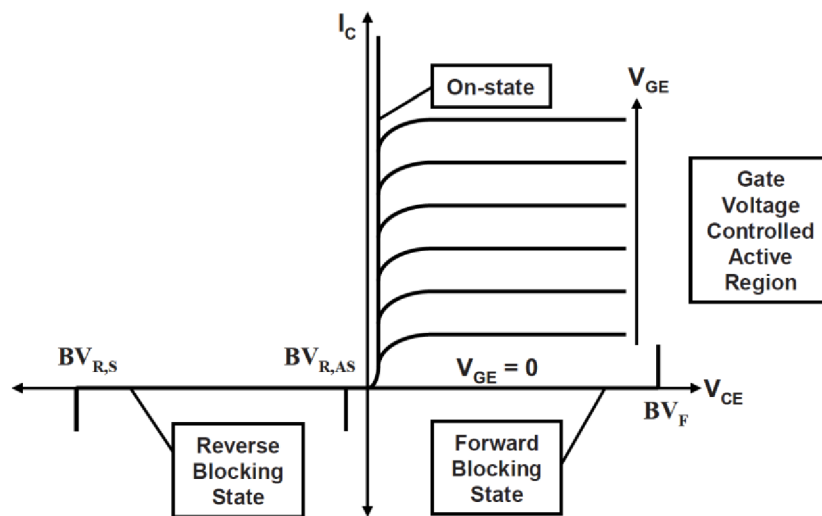


Obrázok 4: Rez štruktúrou IGBT, prevzaté z [4].

Na obrázku 4 je znázornený rez IGBT štruktúrou založenou na DMOS procese (typ štruktúry podľa tvaru a umiestenia hradla z angl. gate). V takejto štruktúre nemôže tiecť prúd, ak je na kolektor privedené záporné napätie vzhľadom k emitoru: prechod J_1 je záverne polarizovaný. Prechod J_1 dáva IGBT jeho charakteristiku v závernom smere. Pri činnosti v takomto zapojení sa ochudobnená zóna (oblasť priestorového náboja, skrátene - OPN) rozširuje do oblasti N polovodiča v objeme čipu. Ak je na kolektor privedené kladné napätie vzhľadom k emitoru a hradlo je vodivo spojené s uzemneným emitorom, potom prechod J_2 je záverne polarizovaný a IGBT blokuje v priepustnom smere. Pri tomto zapojení sa OPN z J_1 rozširuje do N driftovej oblasti v objeme čipu. Z toho vyplýva, že charakteristiky v priepustnom a závernom smere pre štruktúru IGBT z obrázku 4, sú približne rovnaké, pretože sú určené rovnakým N polovodičom v objeme čipu, a závisia

na jeho charakteristických vlastnostiach ako hrúbka a merný odpor. Táto N oblasť sa nazýva N driftová oblasť. Veľké rozdiely v blokovacích schopnostiach v priepustnom a závernom smere potom vznikajú z rozdielov v ukončovacích štruktúrach prechodov J_1 a J_2 .

Ak pri zapojení IGBT v priepustnom smere aplikujeme na hradlo kladné napätie dostatočnej veľkosti na to aby, sa v P oblasti pod hradlom na obrázku 4 vytvorila inverzná vrstva, súčiastka sa dostane do zopnutého stavu. V tomto stave elektróny putujú z N^+ časti emitora do N driftovej oblasti. Tento prúd ďalej funguje ako bázový prúd pre vnútorný vertikálne orientovaný P-N-P tranzistor. Vzhľadom na to že prechod J_1 (emitorový prechod pre tento vnútorný tranzistor) je zapojený v priepustnom smere, oblasť s P^+ dopáciou dodáva diery do N driftovej oblasti. Ak je zvýšené kladné napätie pripojené na kolektor IGBT, koncentrácia dier dodávaných do N driftovej oblasti sa bude zvyšovať, až kým nepresiahne základnú koncentráciu dopácie N driftovej oblasti. Pri takejto činnosti je charakteristika IGBT podobná charakteristike P-i-N diódy zapojenej v priepustom smere. Dôsledkom toho je, že IGBT môžu pracovať pri vysokých prúdových hustotách aj keď sú navrhované tak, aby vydržali vysoké záverné napätia.



Obrázok 5: Voltampérová charakteristika IGBT tranzistora, prevzaté z [5].

Ak je vodivosť inverznej vrstvy v P oblasti pod hradlom znížená aplikáciou nižšieho napätia na hradlo, dochádza k značnému úbytku napätia v oblasti pod hradlom kvôli tomu, že spôsob toku elektrónov v tejto oblasti je podobný toku pozorovanému v tradičných MOSFET štruktúrach. Keď úbytok napätia začne byť porovnateľný s rozdielom medzi napätím aplikovaným na hradlo a prahovým napätím (minimálne napätie aplikované na hradlo, pri ktorom dochádza k vytvoreniu inverznej vrstvy vodivého kanála v oblasti pod hradlom) dochádza k tomu, že vodivý kanál začne byť priškrtený (pinched-off). V takomto stave je elektrónový prúd týmto kanálom saturovaný, a pretože tento prúd je bázový prúd pre P-N-P tranzistor, je tiež prúd dier cez túto oblasť limitovaný. Následne IGBT pracuje s nasýteným prúdom v aktívnej oblasti s hradlovo ovládaným výstupným prúdom. Tieto charakteristiky sú zobrazené na obrázku 5.

Na to, aby sa IGBT prepol zo zopnutého stavu do vypnutého, je nutné skratovať hradlo a emitor. V takomto prípade je na hradle nulové napätie, čo spôsobí že inverzná vrstva v P dopovanej oblasti pod hradlom nemôže existovať, dochádza k zablokovaniu prísunu elektrónov z N^+ emitorovej oblasti do N driftovej oblasti, čím sa zaháji proces vypínania. Kvôli vysokej koncentrácii minoritných nosičov náboja (dier) v N driftovej oblasti, nie je vypínanie okamžité. V prvom okamihu dochádza k náhlemu poklesu spínaného prúdu, pretože je zablokovaný prúd elektrónov cez inverzný kanál, ktorý prestáva existovať. Následne dochádza k exponenciálnemu poklesu kolektorového prúdu, charakterizovaného

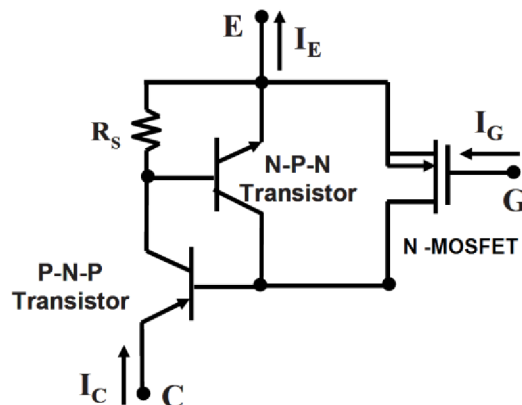
časovou konštantou, závislou na dobe života minoritných nosičov náboja v N driftovej oblasti.

Výhody bipolárneho tranzistora s izolovaným hradlom sú:

- vysoká prúdová hustota v zopnutom stave,
- nízky riadiaci príkon kvôli MOS štruktúre hradla,
- schopnosť hradlovo ovládať vypínanie tranzistora,
- plne hradlovo ovládaná výstupná charakteristika s rozsiahlou oblasťou bezpečnej činnosti a
- schopnosť blokovať vysoké napätia v závernom a priepustnom smere.

Tieto charakteristiky sa blížia charakteristikám ideálneho výkonového spínača, vhodného pre veľké množstvo výkonových obvodov v aplikáciách pre DC a AC použitie. Tieto výhody viedli k širokému použitiu IGBT vo výkonovej elektronike okamžite po komerčnom predstavení tejto štruktúry.

Vzhľadom na to, že štruktúra IGBT je podobná štruktúre MOS hradlového tyristora, obsahuje tiež parazitickú štruktúru P-N-P-N tyristora medzi kolektorom a emitorom, ako je to znázornené na obrázku 4. Ak sa tento parazitický tyristor zopne, tak prúd pretekajúci tranzistorom nie je možné ovládať pomocou hradla. Preto je dôležité navrhovať zariadenie, tak aby bol tento parazitický tyristorový jav čo najviac potlačený. Toto môže byť dosiahnuté tým, že sa počas činnosti potlačí vtekanie elektrónov z N^+ oblasti emitora do P oblasti, pomocou vhodného návrhu štruktúry. Obvod ekvivalentný IGBT s parazitickým tyristorom je zobrazený na obrázku 6.



Obrázok 6: Schéma ekvivalentná IGBT [6].

Odpor R_S reprezentuje odpor prúdu dier v P dopovanej oblasti k emitorovej elektróde. Ak je tento odpor dostatočne malý, nedôjde k zopnutiu tyristora, pretože horný N-P-N tranzistor má malý prúdový zisk [7] [8].

2.1.3 Statické blokovacie charakteristiky

Jeden z dôležitých parametrov IGBT štruktúry je schopnosť blokovať napätie v priepustnom a závernom smere pri vysokých napätiach. V praxi sa IGBT štruktúry využívajú pre aplikácie, ktoré vyžadujú zariadenia schopné blokovať napätia od 300V. Pre nižšie napätia má MOSFET lepšie spínacie charakteristiky.

2.1.3.1 Schopnosť blokovať v závernom smere

Keď je aplikované záporné napätie na kolektor vzhľadom k emitoru, je IGBT schopné udržať veľké napätie, pretože prechod J_1 (Obrázok 4) je záverne polarizovaný. Keď je

prechod J_1 záverne polarizovaný, tak sa OPN rozširuje primárne do ľahko dopovanej N driftovej oblasti (Obrázok 4). Je dôležité si uvedomiť, že prierazné napätie počas blokovania v závernom smere je určené tranzistorom s otvorenou bázou, formovaného medzi P^+ kolektorom, N driftovej oblasťou a P bázovým regiónom. Táto štruktúra je náchylná na (punch-through) prieraz ak N driftovej oblasť je príliš ľahko dopovaná. Pre dosiahnutie požadovaného prierazného napätia je nutné stanoviť optimálnu hrúbku a úroveň dopácie N driftovej oblasti. Výsledok taktiež ovplyvňuje difúzna hĺbka minoritných nosičov náboja. Všeobecné pravidlo je, že hrúbka N driftovej oblasti je zvolená tak, aby sa táto hrúbka rovnala hrúbke OPN pri maximálnom napätí plus jedna difúzna dĺžka. Pretože sa úbytok napätia v zopnutom stave zvyšuje so zvyšujúcou šírkou N driftovej oblasti, je dôležité spraviť optimalizáciu prierazného napätia s cieľom udržať hrúbku N difúznej vrstvy čo najmenšiu. Z predchádzajúcej úvahy vyplýva vzorec pre určenie minimálnej hrúbky N driftovej vrstvy ako:

$$d_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_m}{qN_D}} + L_p, \quad (1)$$

Kde d_1 je výsledná hrúbka, V_m je maximálne blokovacie napätie, N_D je koncentrácia dopantu vo vrstve a L_p je difúzna hĺbka minoritných nosičov náboja.

Na schopnosť IGBT štruktúry blokovat' napätie v závernom smere ešte výrazne vplyva voľba okrajovej ukončovacej štruktúry pre prechod J_1 .

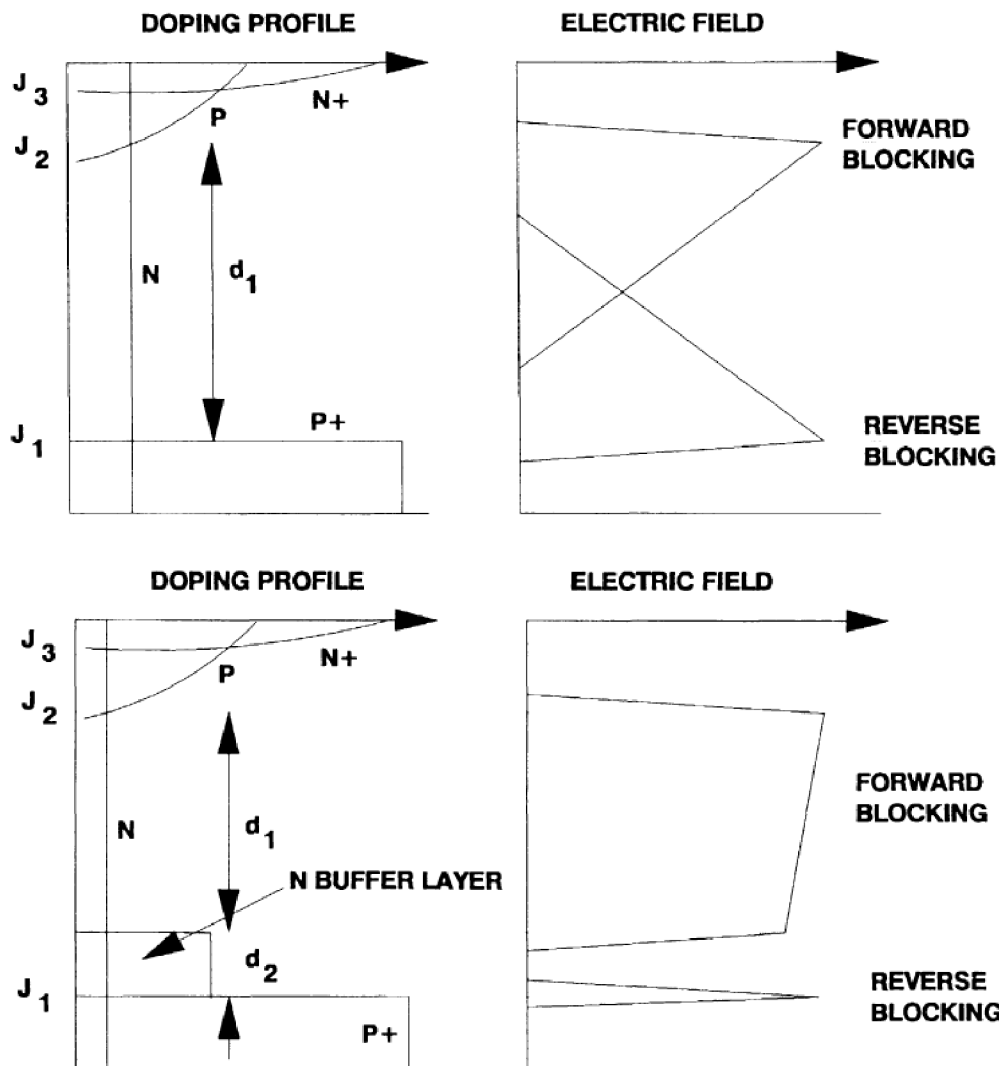
2.1.3.2 Schopnosť blokovat' v priepustnom smere

Aby IGBT štruktúra blokovala napätie v priepustnom smere je nutné, aby bolo hradlo spojené s uzemneným emitorom. Toto zabraňuje vzniku inverznej vrstvy v P bázovej vrstve pod hradlom. Keď sa aplikuje kladné napätie na kolektor, IGBT štruktúra je schopná zniesť vysoké napätie, pretože prechod J_2 medzi P bázovou oblasťou a N driftovej oblasťou je záverne polarizovaný. V tomto prípade sa OPN rozširuje na oboch stranách prechodu, teda prierazné napätie prechodu je limitované rovnakými podmienkami ako v prípade MOSFET štruktúry so zohľadnením spodného prechodu J_1 .

Pre analýzu blokovania napätia v priepustnom smere je nutné pozrieť sa najprv na profil dopácie P bázovej oblasti. Dopovací profil P bázovej oblasti musí byť nastavený s ohľadom na to, že sa požaduje isté prahové napätie pre MOS štruktúru a aby OPN z prechodu J_2 nepresiahla až do N^+ emitorovej oblasti, čím by došlo k prierazu. Toto limituje minimálnu dĺžku kanálu (minimálna hrúbka P bázovej oblasti), ktorá môže byť dosiahnutá. Ďalšími vlastnosťami, ktoré ovplyvňujú blokovaciu schopnosť, je vzdialenosť medzi jednotlivými DMOS bunkami. Keď sa zväčší rozstup jednotlivých buniek, dochádza k zníženiu prierazného napätia vplyvom zakrivenia OPN v priestore medzi bunkami.

Okrem toho je nutné pri návrhu zohľadniť prítomnosť prechodu J_1 . Prierazné napätie IGBT štruktúry môže byť výrazne znížené tým, že ochudobnená zóna z prechodu J_2 dosiahne k prechodu J_1 .

Pre zlepšenie charakteristík v priepustnom smere, konkrétne zvýšenie prierazného napätia je možné použiť takzvanú asymetrickú IGBT štruktúru. Takáto štruktúra sa vyznačuje tým, že na prechode J_1 je pridaná v N driftovej oblasti plytká oblasť so zvýšenou N dopáciou. Profily dopácie IGBT symetrickej a asymetrickej štruktúry sú znázornené na obrázku 7 [9].



Obrázok 7: Vertikálne profily dopácie pre IGBT symetrickú a asymetrickú štruktúru, prevzaté z [10].

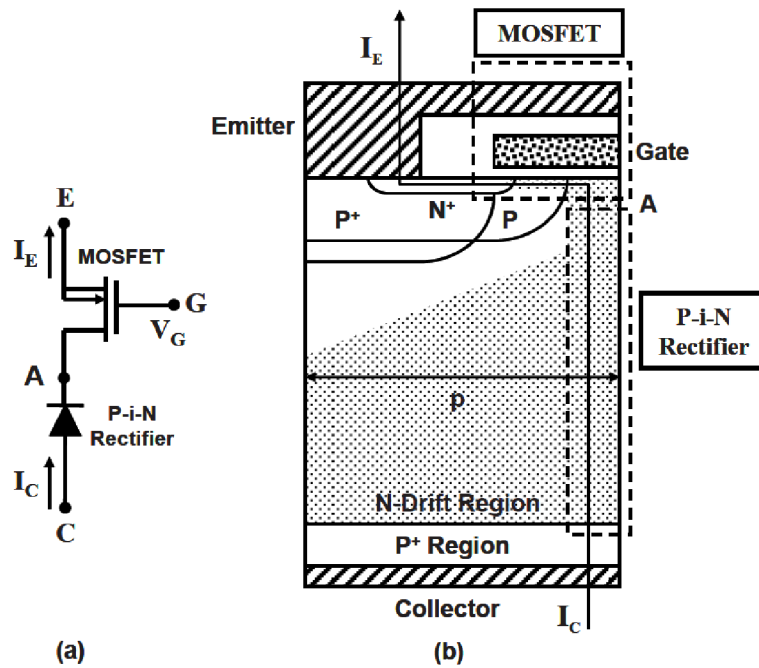
2.1.4 Voltampérové charakteristiky

IGBT spína v priepustnom smere privedením kladného napätia na MOS hradlo, čím sa vytvorí inverzná vrstva pod týmto hradlom. Týmto procesom vznikne vodivý kanál spájajúci N⁺ emitorovú oblasť s N driftovou oblasťou. Čo vedie k zníženiu odporu driftovej oblasti a toku nosičov náboja do N driftovej oblasti z P⁺ kolektorovej oblasti. Vo väčšine objemu driftovej oblasti je koncentrácia vtekajúcich nosičov náboja typicky 100 až 1000 krát vyššia ako úroveň N dopácie tejto vrstvy, čo má za následok drastický pokles sériového odporu tejto vrstvy. Táto vlastnosť umožňuje činnosť IGBT pri vysokých prúdových hustotách.

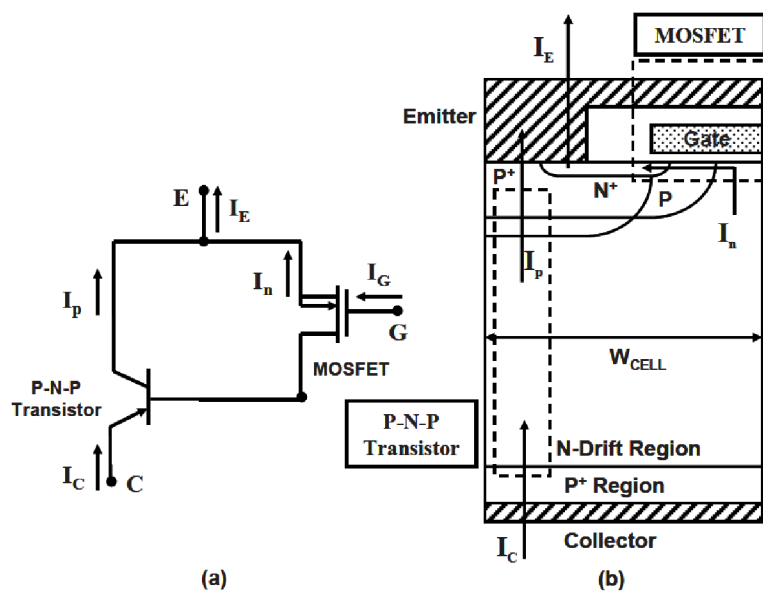
2.1.4.1 Spínacie charakteristiky IGBT

Spínacie charakteristiky IGBT sa dajú analyzovať nasledujúcim prístupom. Pre jeho pochopenie sa vychádza zo schémy pre ekvivalentnú IGBT z obrázku 6. Toto zapojenie pozostáva zo spojených P-N-P a N-P-N tranzistorov (predstavujú štvorvrstvovú tyristorovú štruktúru v IGBT), MOSFET tranzistora premostujúceho horný N-P-N tranzistor a odporu R_s medzi bázou a emitorom tohto tranzistora. Veľkosť odporu R_s je daná plošnou rezistivitou P bázeovej oblasti a vzdialenosťou medzi okrajmi N⁺ emitorovej oblasti

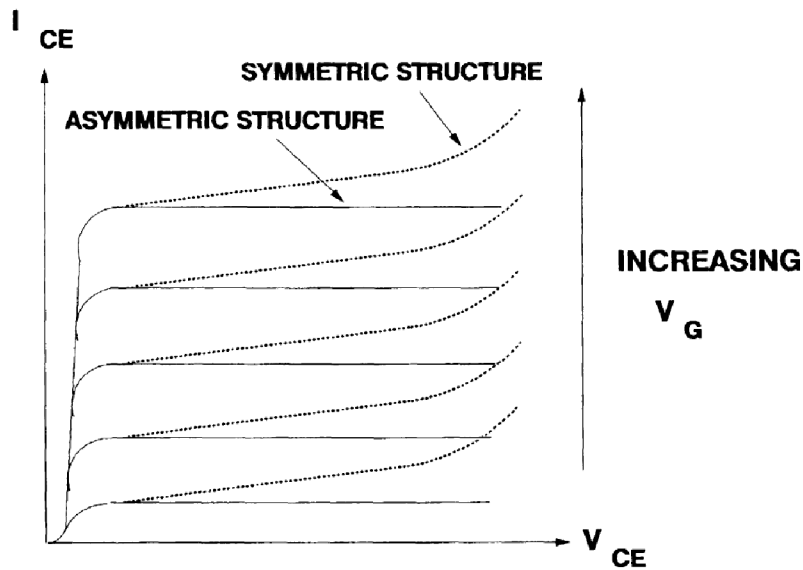
(body A a B na obrázku 4). Ak je tento odpor tak malý, že pri činnosti IGBT nevznikne na N^+ oblasti úbytok napätia 0,7 V, je horný N-P-N tranzistor nečinný a pre analýzu charakteristík sa môžu použiť nasledujúce dva zjednodušené obvody. Prvý obvod je zapojenie P-i-N diódy do série s MOSFET tranzistorom (Obrázok 8). Druhý obvod je zapojenie MOSFET a P-N-P tranzistora v darlingtonovej konfigurácii (Obrázok 9). Samozrejme treba brať do úvahy, že tieto obvody majú pomôcť pochopiť funkciu IGBT a v žiadnom prípade nemôžu byť použité na simulovanie IGBT charakteristík použitím diskretných súčiastok.



Obrázok 8: Schéma zapojenia P-i-N diódy a MOSFET (a) a vyznačenie týchto segmentov v IGBT štruktúre (b), prevzaté z [11].



Obrázok 9: Schéma zapojenia P-N-P tranzistora a MOSFET (a) a vyznačenie týchto segmentov v IGBT štruktúre (b), prevzaté z [12].



Obrázok 10: Voltampérová charakteristika IGBT, prevzaté z [13].

Pre analýzu voltampérových charakteristík IGBT sa IGBT zjednodušene považuje, že je zložené z dvoch častí, zobrazených na obrázku 8 a), respektíve 9 a). Predpokladá sa len jediná trasa po ktorej tečie prúd v zariadení a to cez diódu a MOSFET v sériovom zapojení. Následne je možné odvodiť voltampérovú charakteristiku IGBT spojením rovníc pre voltampérové charakteristiky P-i-N diódy a MOSFET tranzistora, použitím bodu A z obrázku 8 b), kde je rovnaký potenciál na oboch súčiastkach.

Z voltampérových charakteristík P-i-N diódy je známe, že úbytok napätia je závislý na prúdovej hustote ako:

$$V_{F,PiN} = \frac{2k_B T}{q} \ln \left[\frac{J_{PiN} d}{2q D_a n_i F(d/L_a)} \right], \quad (2)$$

kde J_{PiN} je prúdová hustota, D_a difúzny koeficient, n_i je koncentrácia nosičov náboja v intrinzičnom polovodiči. Pre MOSFET závisí úbytok napätia na prúde, pretekajúcom vodivostným kanálom a hradlovom napätí, ako:

$$V_{F,MOS} = \frac{I_k L_k}{\mu_{ns} C_{ox} Z (V_G - V_T)}, \quad (3)$$

kde I_k je prúd pretekajúci kanálom, L_k je dĺžka kanálu, μ_{ns} je pohyblivosť elektrónov C_{ox} je kapacita oxidovej vrstvy, Z je šírka kanála, V_G je hradlové napätie a V_T je prahové napätie. Teda výsledný úbytok napätia je rovný:

$$V_{F,PiN} = \frac{2k_B T}{q} \ln \left[\frac{J_{PiN} d}{2q D_a n_i F(d/L_a)} \right] + \frac{I_k L_k}{\mu_{ns} C_{ox} Z (V_G - V_T)}, \quad (4)$$

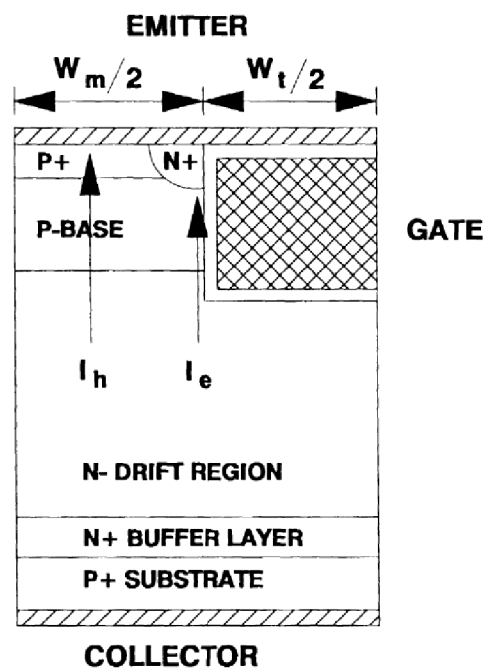
Z rovnice (4) je možné určiť voltampérovú charakteristiku v závislosti na hradlovom napätí V_G (Obrázok 10). [14]

2.1.5 Trench hradlová IGBT štruktúra

Z poznatkov z výroby a použitia MOSFET štruktúry je známe, že je možné zlepšiť činnosť MOSFET tranzistora použitím UMOS hradlovej štruktúry oproti DMOS štruktúre. Dôvodom zlepšenia je zníženie odporu v zopnutom stave, a to kvôli eliminácii JFET (z angl.: junction gate field-effect transistor) štruktúry. V prípade IGBT úbytok napätia

na MOSFET štruktúre tvorí len malé percento z celkového úbytku napätia. Väčšina úbytku je v N driftovej oblasti. V týchto zariadeniach je prúd cez bipolárny P-N-P tranzistor oveľa väčší ako cez MOS kanál kvôli veľkému prúdovému zisku bipolárneho tranzistora, ale pri zvýšení spínacej rýchlosti pomocou zníženia doby života nosičov náboja dôjde k tomu, že sa zníži prúdový zisk P-N-P bipolárneho tranzistora za súčasného zvýšenia množstva prúdu pretekajúceho MOSFET časťou IGBT. Z tohto plynie následná nutnosť zníženia odporu MOSFET časti IGBT tranzistora pre dosiahnutie nižšieho úbytku napätia v zopnutom stave. Jednou z metód je práve nahradenie DMOS štruktúry UMOS štruktúrou. Tento krok vedie k Trench IGBT (TIGBT) štruktúre.

Podobne ako v prípade MOSFET s trench hradlovou štruktúrou, tak aj v prípade IGBT musí trench hradla presahovať pod prechod medzi P bázovou oblasťou a N driftovou oblasťou pre vytvorenie vodivostného kanálu medzi N⁺ emitorovou oblasťou a N driftovou oblasťou, pri predpätí na hradle. Z trás elektrónov znázornených na obrázku 11 vidno, že v takomto usporiadaní nie je prítomná JFET štruktúra. Teda nedochádza k úbytku napätia v UMOS štruktúre. Tým sa zníži úbytok napätia na MOSFET časti IGBT. Ďalšou výhodou je, že pri UMOS štruktúre je rozstup jednotlivých buniek menší oproti DMOS štruktúre, čo umožňuje až päťnásobné zvýšenie prúdovej hustoty. Toto zlepšenie MOSFET časti pomocou UMOS štruktúry vedie k lepším spínacím charakteristikám. Pre zariadenia s dlhou dobou života nosičov náboja v N driftovej oblasti je úbytok napätia pri prúdovej hustote 200 Acm⁻² 1,2 V pre UMOS štruktúru, oproti 1,8 V pre DMOS štruktúru. Väčší rozdiel nastáva pri zvyšovaní spínacej frekvencie.



Obrázok 11: Rez štruktúrou TIGBT, prevzaté z [15].

Taktiež prúd parazitného zopnutia (latch-up) tyristora pre TIGBT štruktúru je vyšší oproti IGBT štruktúre. Toto je spôsobené zlepšeným tokom dier v prípade TIGBT. Na obrázku 11 je vidieť, že prúd dier tečie po zvislej trajektórii, zatiaľ čo v prípade DMOS štruktúry sa prúd dier vyskytuje aj pod horizontálne umiestnenou N⁺ oblasťou. Následkom toho je, že odpor prúdu dier je ovplyvnený len hĺbkou N⁺ oblasti, a plytká P⁺ vrstva môže byť použitá na zníženie tohto odporu. [16]

2.2 Okrajová ukončovacia štruktúra čipov

Analýza rovinných prechodov poskytuje informácie o hornej hranici prierného napätia pre výkonové súčiastky. Prierné napätie reálnych zariadení je limitované vysokými elektrickými poľami, vznikajúcimi v objeme čipu, alebo na jeho okrajoch. Táto kapitola sa zameriava na metódy ukončenia čipu s ohľadom na prierné napätie. V literatúre sa nachádza množstvo špecifických ukončovacích štruktúr. Všetky sa dajú rozdeliť do dvoch základných druhov:

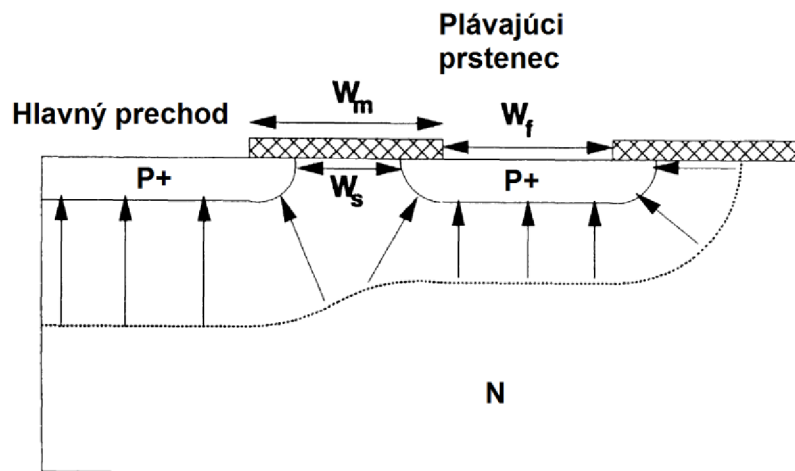
- planárne ukončovacie štruktúry, založené na implantácii dopujúcich prvkov cez masku,
- kužeľovité ukončovacie štruktúry, založené na selektívnom odstránení materiálu z okraja čipu.

Predmetom nášho štúdia sú planárne ukončovacie štruktúry.

2.2.1 Planárne ukončovacie štruktúry

Z praxe je známe, že výkonové súčiastky, ktoré používajú plytko implantované vrstvy bez okrajových ukončovacích štruktúr, trpia znížením prierného napätia. Toto zníženie prierného napätia je spôsobené zvýšením elektrického poľa na cylindrických a sférických častiach prechodov. Elegantným riešením tohto problému je umiestnenie plávajúcich prstencov do blízkosti okraja prechodu. Názov plávajúci prstenec je odvodený z neprítomnosti elektrického kontaktu na tieto prstence. Ich potenciál je určený podľa napätia aplikovaného na hlavný prechod. Keď je plávajúci prstenec umiestnený v OPN hlavného prechodu, nachádza sa hodnota jeho potenciálu medzi hodnotami aplikovaného napätia (V_a) a nulou. Cieľom je rozšíriť OPN pozdĺž povrchu a znížiť intenzitu elektrického poľa na cylindrickom prechode.

Vo všeobecnosti môže byť hĺbka plávajúcich prstencov rôzna od hĺbky hlavného prechodu, ale skoro vždy sú tieto prstence vyrobené súčasne s hlavným prechodom. Za povšimnutie stojí, že vzdialenosť týchto prstencov, W_s , od hlavného prechodu musí byť konštantná. Rez okrajom zariadenia obsahujúceho takýto plávajúci prstenec je na obrázku 12.



Obrázok 12: Rez štruktúrou obsahujúcou plávajúci prstenec ako ukončovaciu štruktúru so znázornenými elektrickými siločiarami [17].

Pre veľkosť napätia na plávajúcom prstenci sa dá odvodiť nasledujúci vzorec:

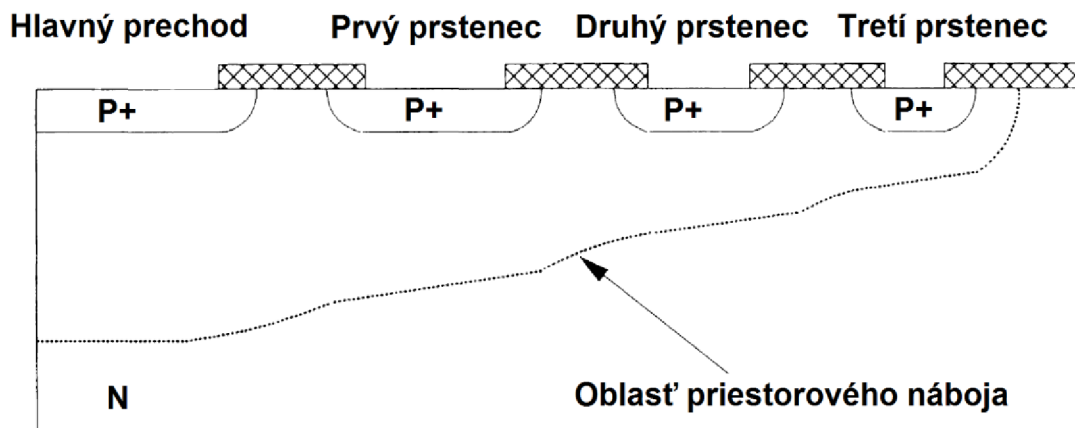
$$V_{pp} = \sqrt{\frac{2qN_A}{\epsilon_s} W_s^2 V_a + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W_s^2}, \quad (5)$$

kde W_s je vzdialenosť medzi hlavným prechodom a okrajom plávajúceho prstenca, V_a je aplikované napätie na hlavný prechod. Z tohto vzorca vidno, že napätie na plávajúcom prstenci je závislé od druhej odmocniny aplikovaného napätia.

Napriek tomu, že sa intuitívne očakáva, že takýto plávajúci prstenec zvýši prierné napätie cylindrického prechodu, jeho efektívnosť závisí na presnom umiestnení tohto prstenca. Ak je prstenec príliš ďaleko od hlavného prechodu, OPN sa nerozšíri až k tomuto prstencu a prierné napätie bude rovnaké ako v prípade bez prstenca. Ak bude prstenec umiestnený príliš blízko, bude napätie na prstenci rovnaké ako aplikované napätie, a teda prierné napätie bude znovu rovnaké ako v prípade bez prstenca. Keď sa analyzuje prierné napätie ako funkcia vzdialenosti plávajúceho prstenca od okraja hlavného prechodu, vyplynie, že táto funkcia obsahuje maximum, teda optimálnu vzdialenosť prstenca od prechodu, pri ktorom dochádza k maximalizácii prierného napätia.

Jeden plávajúci prstenec znižuje zakrivenie OPN a intenzitu elektrického poľa, čím zvyšuje prierné napätie. Ešte väčšie zlepšenie v priernom napätí možno doceliť použitím viacerých plávajúcich prstencov, pracujúcich súčasne. Ako v prípade jedného plávajúceho prstenca, je vhodné, aby boli vyrobené súčasne s hlavným prechodom.

Pri výrobe viacerých plávajúcich prstencov bývajú použité dva základné návrhy. V prvom prípade (Obrázok 13) sa vzdialenosti medzi jednotlivými prstencami a ich šírky menia. V tomto prípade sa s rastúcou vzdialenosťou od hlavného prechodu znižuje vzdialenosť medzi prstencami a klesá aj ich šírka, pretože šírka OPN postupne klesá. Priestor na okraji čipu, ktorý je zabratý takouto okrajovou ukončovacou štruktúrou je zúžený postupným zmenšovaním vzdialenosti medzi jednotlivými prstencami a zmenšovaním ich šírky.

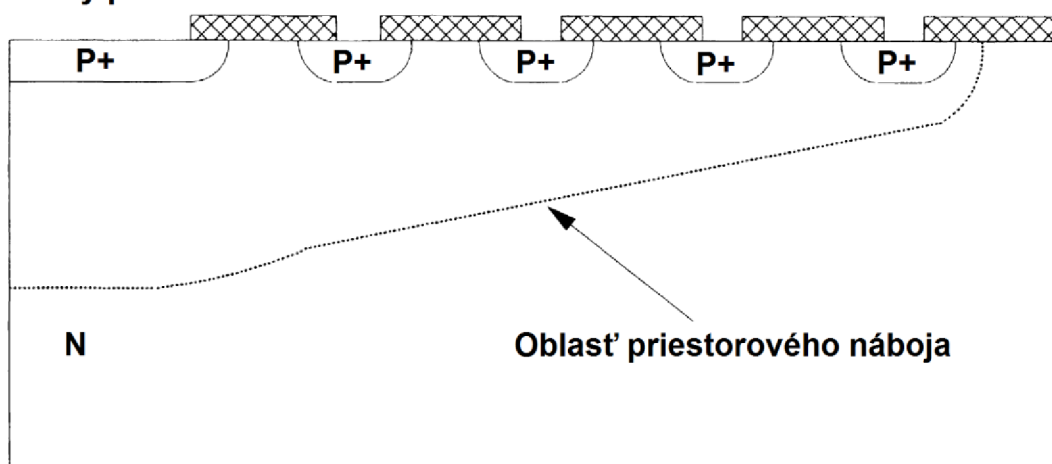


Obrázok 13: Rez okrajom čipu s viacerými plávajúcimi prstencami s meniacou sa šírkou a rozstupom [18].

Dôležitým predpokladom pri takejto štruktúre je to, že povrchový náboj je presne známy. Tento parameter potom slúži na výpočet vzdialeností medzi prstencami. Pri optimálnom dizajne je aplikované napätie rozdielne rozdistribuované po týchto prstencoch takým spôsobom, že dochádza k prerazu súčasne na vonkajších okrajoch všetkých plávajúcich prstencov.

V druhom prípade (Obrázok 14) sú všetky prstence úzke a ich vzdialenosti sú rovnaké. Menšia šírka a malá vzdialenosť, umožňuje použiť vyšší počet takýchto prstencov v danej oblasti čipu. Toto usporiadanie spôsobuje jemnejšiu zmenu v OPN na okraji čipu a je jednoduchší pri výrobe, pretože je založený na minimálnych požiadavkách. Toto usporiadanie je taktiež menej citlivé na zmeny v povrchovom náboji kvôli tomu, že vyšší počet prstencov redukuje vplyv zmien potenciálu.

Hlavný prechod



Obrázok 14: Rez čipom, ktorý používa väčšie množstvo rovnako vzdialených a užších plávajúcich prstencov [19].

Usporiadanie s vyšším počtom plávajúcich prstencov okrajovej ukončovacej štruktúry, umožňuje zvýšenie prierného napätia, až k hodnotám prierného napätia určeného z predpokladov pre rovinné prechody. Hlavným limitujúcim prvkom je priestor, ktorý zaberá okrajová ukončovacia štruktúra [20].

2.3 Metalizácia prednej strany čipu

Pri montáži polovodičových súčiastok je potrebné zabezpečiť elektrické prepojenie čipu s vonkajšími kontaktami puzdra. Navyše v prípade výroby integrovaných obvodov je potrebné zabezpečiť elektrické prepojenia jednotlivých prvkov, ktoré sú integrované na jednom čipe. Pre tieto účely sa používajú kovové vrstvy. Najčastejšie používaným (a súčasne najstarším) kovom pre výrobu metalizačných vrstiev je hliník (moderné technológie používajú Cu). Použitie hliníka je výhodné jednak z dôvodov fyzikálnych – má dosť nízky merný odpor, má dobrú adhéziu na SiO_2 (pri kontakte s SiO_2 ho čiastočne redukuje a vytvára Al_2O_3) a tvorí ohmické kontakty s p-dopovaným Si (Al je p-dopant pre Si), jednak z dôvodov technologických – depozícia Al je jednoduchá – spočiatku bolo používané naparovanie. Al je tiež možné pomerne jednoducho leptať bežnými kyselinami (pre štruktúry vyžadujúce šírku čiar metalizácie menej ako niekoľko μm je potrebné používať plazmochemické leptanie).

V súčasnosti sa nepoužívajú metalizácie s použitím čistého Al, ale jeho zliatiny s Si, Cu alebo Ti. Depozícia zliatin na čip vyžaduje zachovanie zloženia zdrojového materiálu, preto nie je možné použiť metódu naparovania. Najrozšírenejšou metódou depozície zliatin Al je magnetronové naprašovanie.

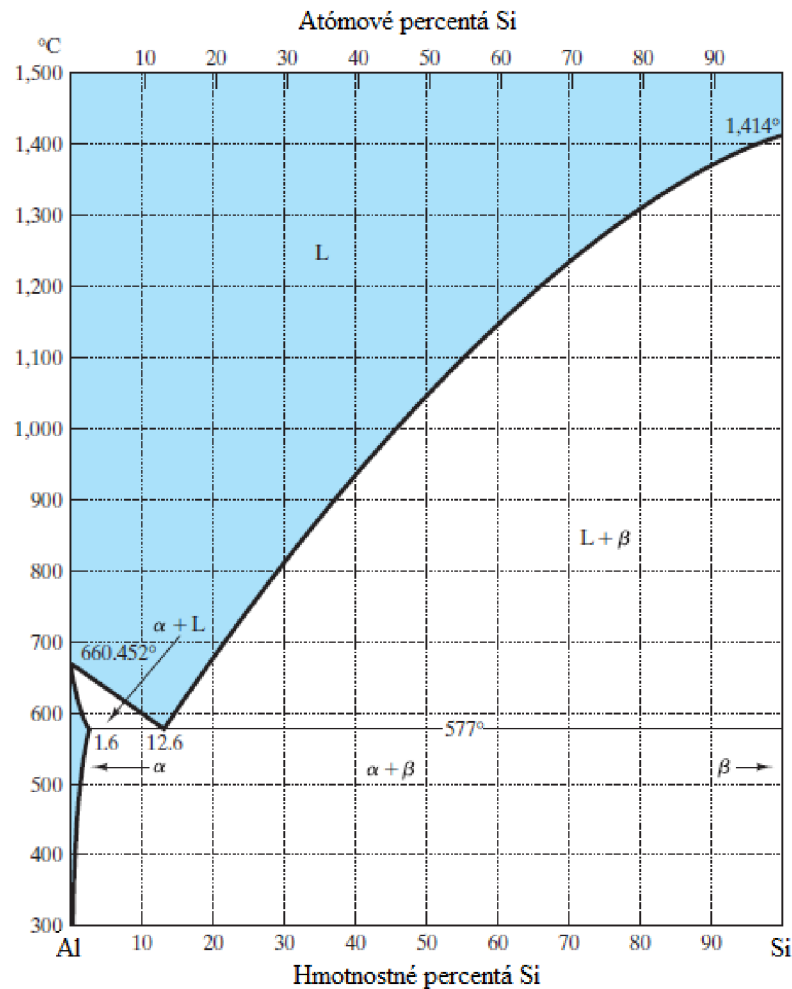
2.3.1 AlSi metalizácia

Pridávanie kremíka do Al vrstiev rieši problém, vznikajúci v dôsledku rozpustnosti kremíka v Al. Tento jav je znázornený na fázovom diagrame (Obrázok 15). Rozpustnosť kremíka v Al rastie s teplotou, pri teplote $\sim 400^\circ\text{C}$ je rozpustnosť Si v Al okolo 1%. Pri priamom kontakte Al s kremíkovou doskou sa doska stáva zdrojom kremíka, ktorý sa môže rozpustiť v Al. Dosiahnutie teplôt $\sim 400^\circ\text{C}$ je potrebné pre zabezpečenie ohmického kontaktu Al s kremíkom. Difúzia kremíka pozdĺž hraníc zŕn Al pri 400°C je pomerne vysoká. Tým dochádza k transportu kremíka z dosky a jeho prechodu do Al vrstvy. Zároveň dochádza k premiestňovaniu časti Al do vzniknutých dutín v kremíkovej doske.

Ak sa Al dostane až k hranici P-N prechodu v objeme dosky, môže dôjsť k elektrickému skratovaniu P-N prechodu (tento jav je známy pod anglickým názvom junction spiking).

Jednou z možností ako eliminovať tento jav, je použiť zliatinu Al s koncentráciou kremíka vyššou ako je rozpustnosť kremíka v Al pri maximálnej teplote vyskytujúcej sa v nasledujúcich výrobných procesoch. V tomto prípade už nie je možné, aby sa v nanosennej vrstve rozpustil ďalší kremík.

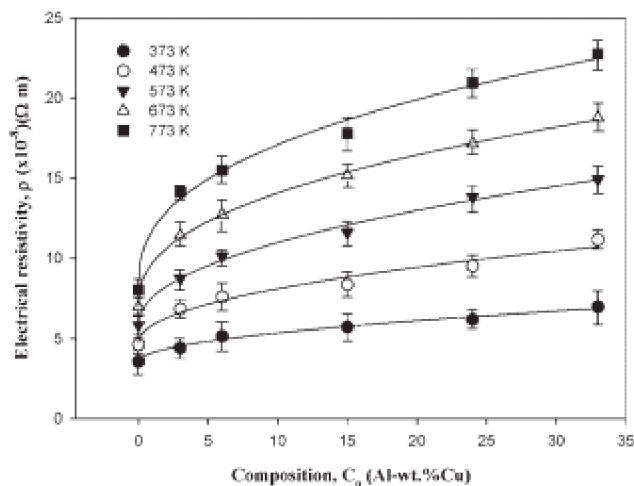
Nevýhodou takýchto zliatin je to, že pri chladnutí sa takáto vrstva stáva presýtená kremíkom, čo spôsobuje jeho precipitáciu vo vrstve. To má za následok zníženie elektromigračnej odolnosti v malých kontaktoch (menší objem Al v dôsledku precipitácie Si).



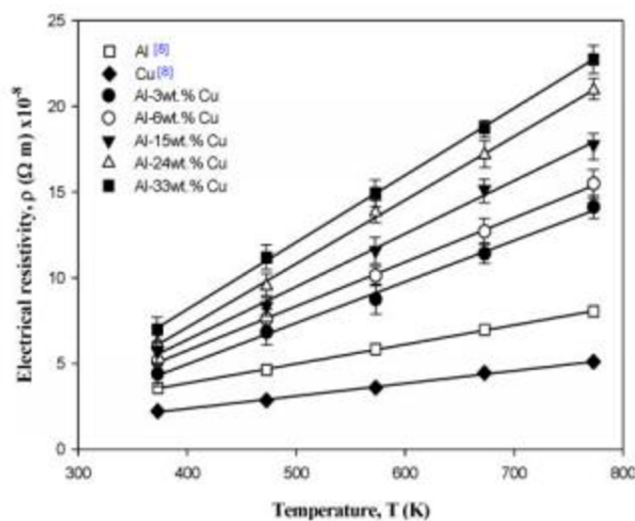
Obrázok 15: Binárny rovnovážny fázový diagram sústavy hliník – kremík [21] [22].

2.3.2 Al-Cu metalizácia

Ďalšou nevýhodou čistého Al je nízka elektromigračná odolnosť. Táto je potrebná pre úzke čiary metalizácie v integrovaných obvodoch (nakolko deponované vrstvy sú polykryštalické) a pre diskrétné súčiastky. V oboch prípadoch súčiastky pracujú s vysokými prúdovými hustotami. Pre potlačenie elektromigrácie sa pridáva do zliatiny Cu (0,5 – 4%) alebo Ti (0,1 – 0,5%). Tieto prvky sa prednostne zabudovávajú do hraníc zŕn a tým zabraňujú transportu Al strhávaného prúdom elektrónov. Taktiež sa znižuje formovanie nerovností na povrchu Al vrstvy (angl. hilocks). Nevýhodou je zvyšovanie rezistivity vzniknutej vrstvy až o 30% oproti čistému hliníku (Obrázok 16, Obrázok 17).

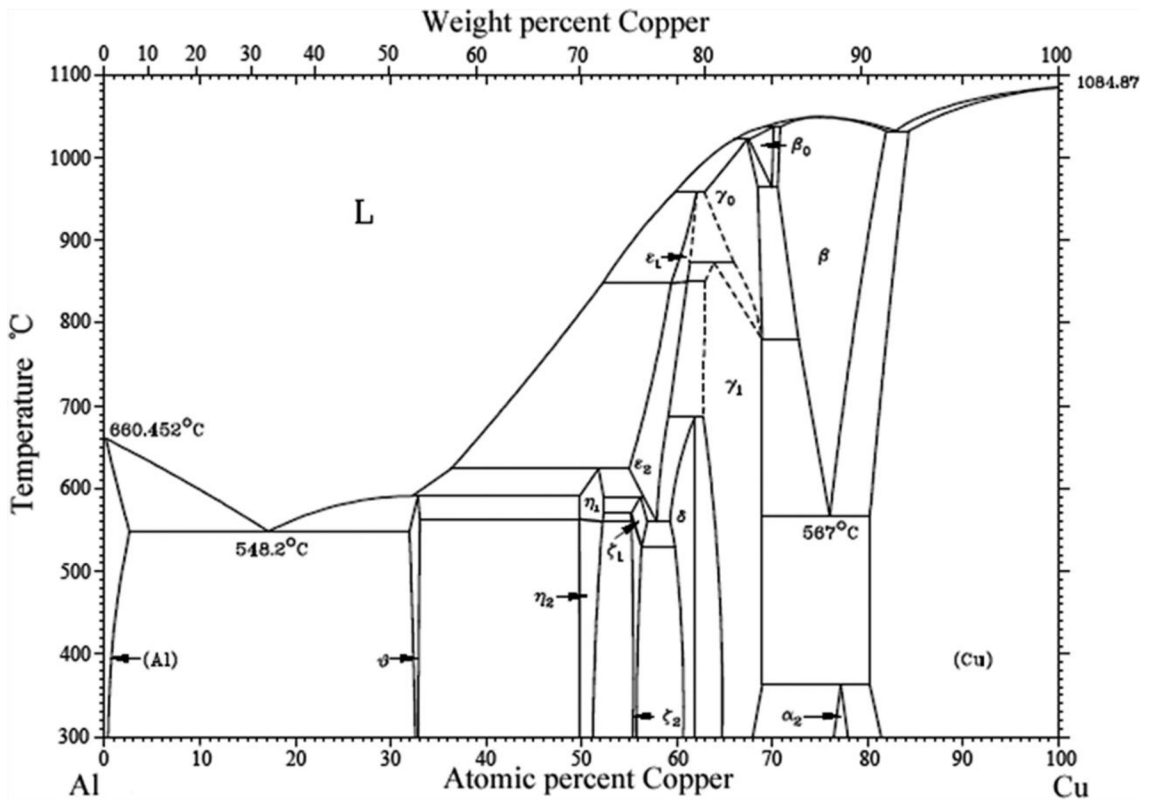


Obrázok 16: Závislosť rezistivity zliatin Al-Cu od obsahu Cu v systéme [23].

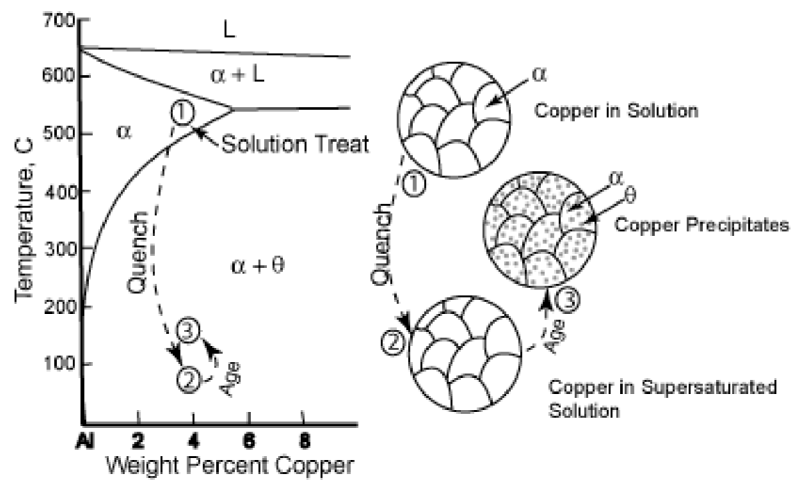


Obrázok 17: Závislosť rezistivity vrstiev Al, Cu, a zliatin Al-Cu s rôznym obsahom Cu, na teplote prevzaté z [23].

Pri použití zliatin Al je potrebné prispôbiť depozičiu, žihanie a leptanie týmto zliatinám (napr. chemické leptanie pre AlCu zliatiny môže spôsobovať problémy s galvanickou koróziou) (Obrázok 18, Obrázok 19).



Obrázok 18: Fázový diagram sústavy hliník-med [24].



Obrázok 19: Žihací proces Al-Cu, prevzaté z [25].

3 Analytické metódy

3.1 TOF- SIMS

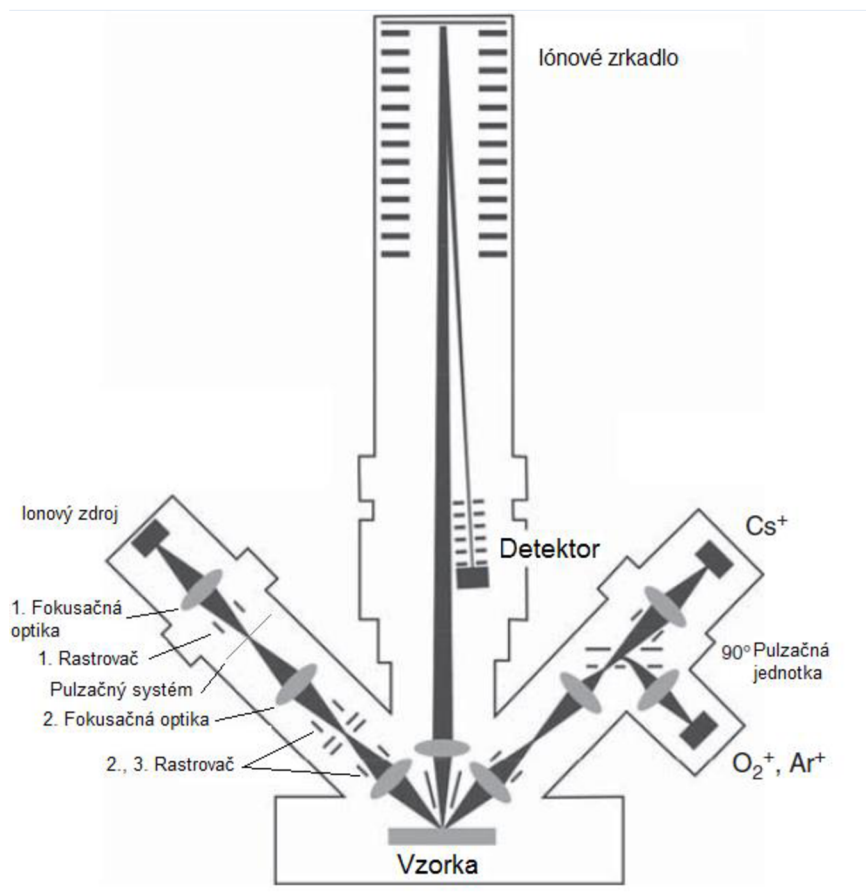
Základy metódy hmotnostnej spektroskopie sekundárnych iónov, anglicky Secondary Ion Mass Spectroscopy, skrátene SIMS, siahajú do počiatkov dvadsiateho storočia, keď boli J.J. Thomsonom experimentálne zaznamenané prvé sekundárne ióny. Prvé experimentálne použitie metódy SIMS bolo až v roku 1949. Prvé prístroje s magnetickými sektormi boli až v roku 1960. Tento vývoj je úzko spätý so schopnosťou generovať vákuum potrebné pre analýzu vzoriek, a s poznaním potenciálu tejto metódy. Veľká väčšina prvých prístrojov sa zameriavala na vývoj takzvaného dynamického módu SIMS, pre analýzu extraterestriálnych vzoriek a vzoriek pre polovodičový priemysel.

V dnešnej dobe je metóda SIMS rozšírená metóda pre určovanie izotopického, prvkového alebo molekulárneho zloženia skúmanej pevnej látky, v niektorých prípadoch je možné skúmať aj látky, ktoré sú pri izbovej teplote tekuté. Popularita metódy SIMS plynie zo:

- schopnosti detekovať všetky prvky periodickej tabuľky ako aj ich kombinácie;
- schopnosti detekovať nízke koncentrácie – nízke detekčné limity, čo môže byť v prípade SIMS až do rádov pod častíc na miliardu (parts per billion)
- schopnosti detekovať malé zmeny v koncentráciách – vysoká citlivosť;
- schopnosti merať signál v určitom rozsahu, v prípade SIMS je rozsah signálu až 10^9 – dynamický rozsah;
- schopnosti mapovať rozloženie akéhokoľvek izotopu na povrchu alebo v objeme vzorky – priestorové rozlíšenie je až 10 nm a hĺbkové je 1 nm;
- nutnosť minimálnej preparácie vzoriek pred analýzou.

3.1.1 Princíp činnosti

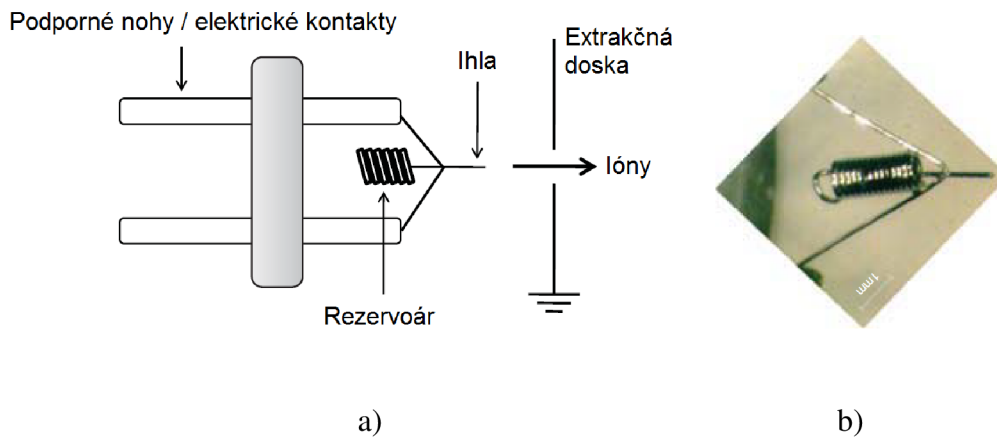
Pri experimentoch bolo použité zariadenie TOF-SIMS 5 od firmy Ion-TOF. Schematický rez je na obrázku 20.



Obrázok 20: Schematický rez zariadením TOF-SIMS 5 od firmy ion-TOF, s vyznačenými základnými prvkami [26].

Na obrázku 20 možno vidieť, že toto zariadenie používa dva iónové zdroje. Prvý v ľavej časti zariadenia slúži na generáciu sekundárnych iónov, tie sú ďalej analyzované, nazýva sa primárny zdroj. V pravej časti sa nachádza druhý iónový zdroj, ktorý sa používa v dynamickom móde na prenikanie do hĺbky, nazýva sa sekundárny zdroj. Uprostred sa nachádza hmotnostný spektrometer založený na meraní doby letu sekundárnych iónov.

Primárny zdroj v tomto zariadení je iónové delo s tekutým kovom – liquid metal ion gun (LMIG) (Obrázok 21). LMIG zdroj je charakteristický tvorbou úzkeho zväzku iónov s vysokou intenzitou. V použitom zariadení sú to ióny bizmutu (Bi). Takýto zdroj pracuje nasledovne: v zásobníku sa nachádza zliatina (v tomto prípade bizmut mangán). Zliatina je zahriata na teplotu tavenia. Do taveniny je ponorená ihla z materiálu s vysokou výstupnou prácou (z volfrámu). Pôsobením kapilárneho tlaku prechádza tavenina ihlou na jej hrot. Na hrot ihly je privádzané dostatočne vysoké napätie, následkom čoho sa tavenina premieňa na prúd iónov, kladne nabitých katiónov požadovaného kovu. Ubúdajúca kvapalina je dopĺňaná zo zásobníka s tekutým kovom. Takto vzniknutý zväzok katiónov je následne urýchlený, zaostrený a rozpulzovaný.



Obrázok 21: Schematický rez LMIG zdrojom, s vyznačenými základnými časťami (a), a fotografia reálneho zdroja (b) [27].

Sekundárny zdroj v prístroji môže využívať napríklad ióny kyslíka alebo ióny cézia. Princíp činnosti zaostrovacej, urýchľovacej a pulzovacej časti je rovnaký ako v primárnom zdroji, líšia sa jedine iónové zdroje, pretože musia byť schopné produkovať zväzok s vyšším počtom iónov. Pre kyslík je to zdroj typu duoplazmatron (Duo). Tento zdroj sa skladá z časti, kde je privedený plyn, ktorý vytvorí plazmu vo forme elektrickej iskry. V plazme existujú kladné aj záporné ióny. Pomocou vhodného napätia sú odobraté jednotlivé ióny.

Hmotnostný spektrometer na tomto prístroji je založený na meraní rozdielnej doby letu jednotlivých iónov – TOF (Time of Flight). Takýto typ spektrometra vychádza v poznatku, že nabité častice urýchlené na rovnakú energiu, majú v závislosti od ich hmotnosti rôznu rýchlosť. Túto závislosť možno vyjadriť bez relativistickej korekcie ako:

$$E = qU = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

Z rovnice (6) je možné následne určiť pomer hmotnosti a náboja, ktorý určuje o aký prvok sa jedná. Základné časti TOF-SIMS hmotnostného spektrometra sú (Obrázok 20):

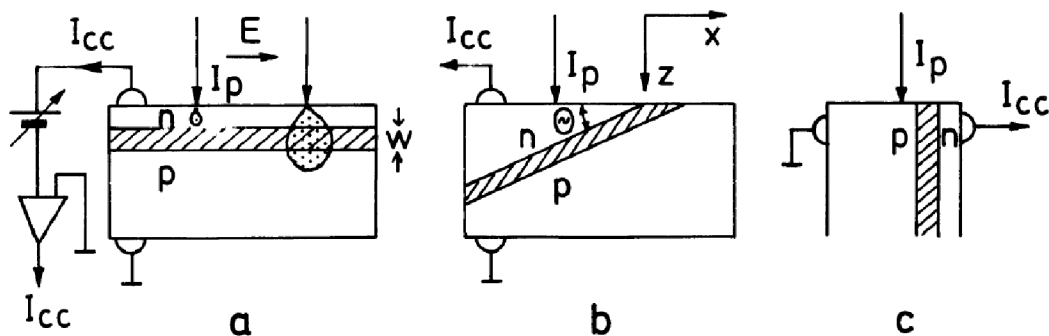
- V oblasti vzorky je extraktor sekundárnych iónov, ktorý urýchľuje všetky sekundárne ióny z okolia povrchu smerom do spektrometra.
- V dolnej časti spektrometra sa nachádza fokusačná optika.
- Väčšinu spektrometra tvorí vyvákuovaný priestor, kadiaľ letia sekundárne ióny, aby sa zväčšil rozostup medzi jednotlivými iónmi. Pre zväčšenie dráhy je na hornom konci umiestnené elektrostatické zrkadlo, ktoré odráža ióny smerom do detektora. Takéto rozloženie umožňuje takmer zdvojnásobiť dráhu letu jednotlivých iónov. V prípade zariadenia TOF-SIMS 5 je dráha letu sekundárnych iónov takmer dva metre.
- Na konci dráhy sekundárnych iónov je umiestnený detektor [26].

3.2 EBIC

Elektrónové zväzky vytvárajú páry elektrón – diera, alebo minoritné nosiče náboja v malom objeme vzorky. Preto sú optimálnym nástrojom pre meranie parametrov polovodičových súčiastok, ako je:

- difúzna dĺžka,
- povrchová rekombinačná rýchlosť,
- relaxačná doba,
- pozícia OPN,
- šírka OPN.

Meraním prúdu nosičov náboja v OPN je možné pozorovať P-N prechody v objeme materiálu. Obrázok 22 zobrazuje niekoľko usporiadaní vhodných pre meranie EBIC.

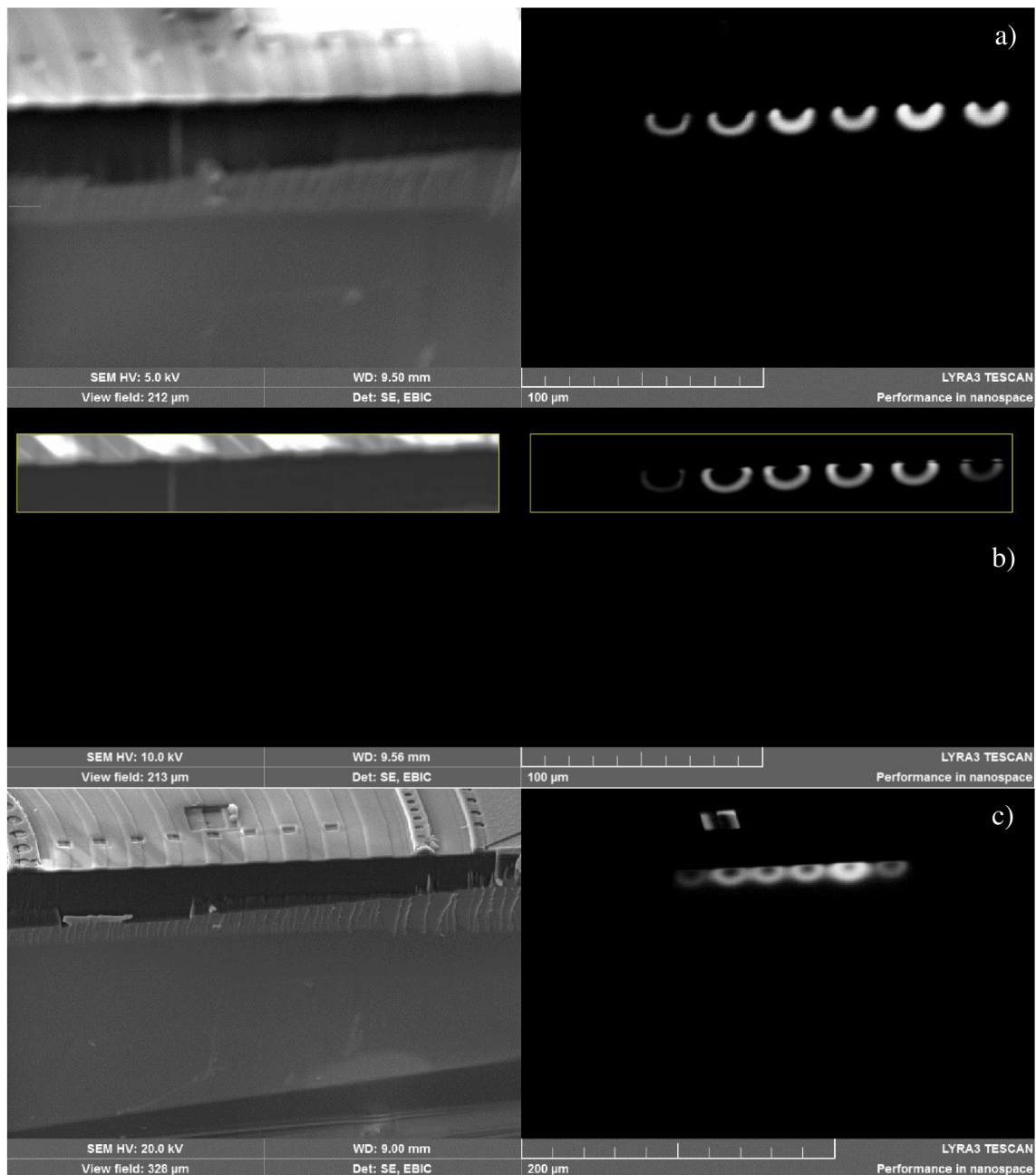


Obrázok 22: Schémy zapojení pre meranie EBIC v rôznych geometriách a zmena v ovplyvnenej zóne v závislosti na energii dopadajúcich elektrónov, prechod je situovaný v hĺbke pod povrchom (a), meranie prechodov situovaných pod uhlom k povrchu vzorky (b) a meranie prechodov kolmých k povrchu vzorky (c) [28].

Táto metóda sa zakladá na tom, že pri dopade elektrónov na povrch vzorky dochádza interakciou týchto dopadajúcich elektrónov, v objeme vzorky, k vzniku párov elektrón – diera. Tento vzniknutý náboj je možné zo vzorky extrahovať pomocou napätia na extrakčných elektródach. Takto vzniknutý prúd je možné merať pomocou pikoampérmetra. Namerané hodnoty prúdu je možné zobrazit' v závislosti na polohe elektrónového zväzku podobne ako v prípade obrazu z rastrovacieho elektrónového mikroskopu.

3.2.1 Zobrazovanie OPN pomocou metódy EBIC

Pomocou metódy EBIC je možné zobrazovať prechody medzi P-N polovodičmi. Zobrazenie týchto prechodov umožňujú práve OPN, ktoré na týchto prechodoch vznikajú. Takéto OPN sa v signáli EBIC javia ako kontrastné, čo je zapríčinené rozdielnym počtom párov elektrón – diera, vznikajúcich v takejto oblasti. Na obrázku 23 je zobrazená okrajová ukončovacia štruktúra z TIGBT, v závislosti na urýchľovacom napätí, pre tri rôzne napätia. Z týchto troch závislostí možno vidieť, že pri nízkych napätíach je problematické zaostrenie obrazu, ako je to na obrázku 23 a) pri napätí 5kV. Pri vysokých napätíach dochádza k tomu, že oblasť v ktorej interagujú elektróny je príliš veľká (elektróny prenikajú aj cez kovové prívody), a preto dochádza k rozširovaniu prechodov [29].



Obrázok 23: Zobrazenie okrajovej štruktúry TIGBT metódou EBIC pri urýchľovacích napätiach elektrónového zväzku 5kV (a), 10kV (b) a 20kV (c).

4 Experimentálna časť

4.1 Štúdium metalizácie pomocou TOF-SIMS

Podnetom našich meraní bola zmena prístroja vo výrobní linke firmy On Semiconductor v Rožnově pod Radhoštěm, ktorý sa používal pre aplikáciu kovových vrstiev.

Cieľom meraní bolo štúdium vlastností metalizácie čipov, používanej na TIGBT. Táto metalizácia sa nanáša naprašovaním vo vákuovej komore zo zliatin AlSi a/ alebo AlCu. Cieľom bolo porovnať vlastnosti naprašenej hliníkovej vrstvy, v závislosti na parametroch pri aplikácii. Študované dosky mali nanosenú metalizačnú vrstvu priamo na kremíkovom substráte. Základné procesné parametre meraných dosiek (waferov) sú zhrnuté v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Základné procesné parametre metalizácie meraných kremíkových dosiek:

Split 2					
Wfr.	AlSi		AlCu		skupina
	hrúbka	teplota	hrúbka	teplota	
1	3.9 μm	190 °C			referenčné
2	3.9 μm	440 °C			
3	1 μm	190 °C	3 μm	440 °C	Hrubšie (AlSi + AlCu)
4	1 μm	440 °C	3 μm	440 °C	
5	2 μm	190 °C	2 μm	300 °C	Hrubšie (AlSi + AlCu) nižšia teplota
6	2 μm	190 °C	2 μm	440 °C	
7	2 μm	440 °C	2 μm	300 °C	
12	2 μm	440 °C	2 μm	440 °C	
Split 1					
5			3.9 μm		
7	1.9 μm		2 μm		
11	3.2 μm		700 nm		
13	3.9 μm				

4.1.1 Príprava vzoriek

Metóda SIMS je nenáročná na prípravu vzoriek, jedinou požiadavkou je aby boli vzorky kompatibilné s vákuovými podmienkami v analytickej komore, kde sa udržiavajú podmienky ultra vysokého vákua (Ultra high Vacuum - UHV). Základný tlak v analytickej komore je $p \approx 8 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}$.

Merané vzorky metalizácie, boli doručené vo forme kremíkových dosiek, waferov o priemere šesť palcov. Takéto vzorky spĺňajú prvotnú požiadavku kompatibility s UHV, a keďže to sú vzorky metalizácie na kremíkovom substráte, tak nenastávajú problémy s vodivosťou vzorky pri meraniach.

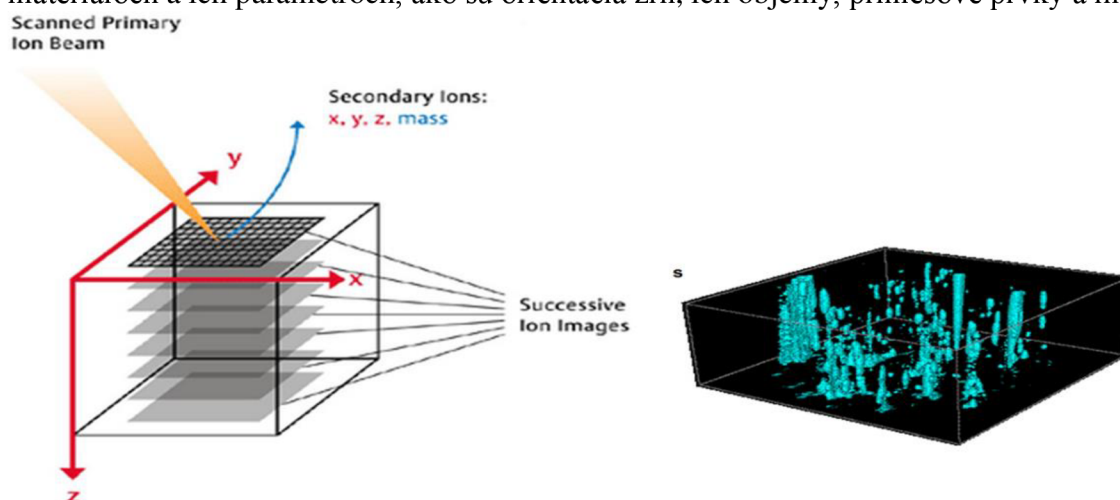
Pri príprave vzoriek je potrebné okrem samotných dosiek na meranie mať ochranné pomôcky: ochranné rukavice, oblek do čistých priestorov a pracovné prostriedky: netkaná textília ako podložka, pravítka, diamantový hrot, držiak vzorky, stlačený dusík.

Príprava vzoriek bola nasledovná:

1. Dosky boli rozlámané na primerane veľké vzorky, aby ich bolo možné upevniť do držiaka vzoriek v použítom prístroji.
2. Následne boli vzorky upevnené do držiaka vzoriek.
3. Pred založením držiaka do komory bol celý držiak očistený stlačeným dusíkom, aby sa komora zbytočne nezanášala časticami priľnutými na povrchu.
4. Očistený držiak so vzorkou bol založený do zakladacej komory prístroja.
5. Zakladacia komora so vzorkou bola vyvákuovaná.
6. Po vyčerpaní preparačnej komory bol držiak so vzorkami presunutý do hlavnej analytickej komory.
7. Bolo spustené samotné meranie.

4.1.2 Merací proces

Cieľom meraní týchto vzoriek bolo určiť priestorové rozloženie prímiesových prvkov v nanesenej zliatine hliníka a kremíka, respektíve hliníka a mede. Pri takýchto analýzach je výhodné použiť dynamický mód SIMS, pretože dochádza k zberu dát z hĺbky vzorky za pomoci sekundárneho iónového zdroja, ktorý postupne odprašuje vrstvy vzorky, na ktorých následne dochádza k zberu dát. Schéma tohto módu je na obrázku 24, s vyznačením základnej súradnicovej sústavy. Osy x a y sú definované v jednotkách nm , respektíve μm podľa veľkosti meranej plochy. Os z je často definovaná pomocou odprašovacieho času, teda v jednotkách s . Odprašovacie rýchlosti sú značne závislé na odprašovaných materiáloch a ich parametroch, ako sú orientácia zŕn, ich objemy, prímiesové prvky a iné.



Obrázok 24: Schéma dynamického módu SIMS, s výstupom dát v podobe 3D hĺbkového profilu prevzaté z [30].

Na zber analytických dát bol použitý primárny zväzok iónov bizmutu, na odprašovanie boli v sekundárnom zväzku použité ióny cézia. Základným módom zobrazenia tejto metódy je hmotnostné spektrum, kde sa zobrazuje intenzita jednotlivých hmotností, počet detegovaných iónov za dobu merania. V takomto hmotnostnom spektre je možné jednotlivým peakom priradiť prvky, ktoré tieto peaky v danej vzorke reprezentujú.

4.1.3 Vyhodnotenie nameraných údajov

Pre vyhodnotenie nameraných údajov bol použitý 3D hĺbkový profil a v niektorých prípadoch aj hĺbkový profil.

3D hĺbkový profil je zobrazenie pri ktorom sa zvolená atómová hmotnosť, prvok, ktorého rozloženie vo vzorke chceme skúmať, zobrazí do trojrozmernej oblasti, ktorá reprezentuje meranú oblasť. Body v tejto oblasti reprezentujú miesta v ktorých bola hmotnosť daného prvku detekovaná.

Hĺbkový profil je zobrazenie zmeny intenzity jednotlivých prvkov v závislosti na dobe odprašovania. V tomto zobrazovacom móde sa sčítuje intenzita prvku v jednotlivých skenovacích oknách, preto dochádza k strate priestorovej informácie v laterálnom smere.

4.1.4 Výsledky meraní

Merania boli zamerané predovšetkým na vyhodnotenie prvkov, ktoré tvoria použité zliatiny. Tieto prvky sú hliník, kremík a meď. Dodatočne bol ešte vyhodnotený kyslík, pre zistenie polohy oxidov vo vrstvách, ak/či v týchto vrstvách nejaké vznikli.

Namerané dáta sú spracované vo forme 3D hĺbkových profilov. Meracie oblasti na všetkých ôsmich vzorkách mali rozmer $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$. Hĺbku je možné určiť zo závislosti na rýchlosti odprašovania materiálu, ktorá je závislá na jeho fyzikálnych vlastnostiach. Preto je hĺbka určená len približne, pri meraniach sa hĺbka pohybovala v rozmedzí $z_{\text{max}} \approx \langle 5 \div 7 \rangle\ \mu\text{m}$. Tieto hodnoty sú hrubé odhady určené na základe známej hrúbky naprášenej metalizačnej vrstvy.

4.1.4.1 Výsledky meraní pre vzorky zo Splitu 1

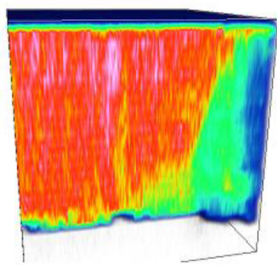
Sada týchto vzoriek bola pripravená na prístroji Varian. Sada obsahovala štyri vzorky, vzorku č: 5; 7; 11 a 13. Jednotlivé vzorky sa medzi sebou líšia zložením a hrúbkou vrstiev použitej metalizácie, vid' tabuľka 1:

- **Vzorka 5:** $3,9\ \mu\text{m AlCu}$;
- **Vzorka 7:** $1,9\ \mu\text{m AlSi} + 2,0\ \mu\text{m AlCu}$;
- **Vzorka 11:** $3,2\ \mu\text{m AlSi} + 0,7\ \mu\text{m AlCu}$;
- **Vzorka 13:** $3,9\ \mu\text{m AlSi}$.

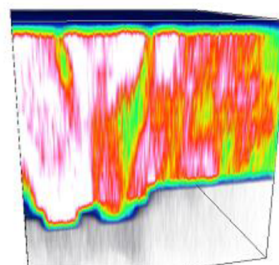
Z nameraných dát boli vyhodnotené signály pre hliník, kremík, kyslík, meď a fluór. Hliník, kremík a meď sú základné prvky naprášenej vrstvy. Kyslík bol skúmaný pre získanie informácie o tvorbe oxidov v objeme vrstvy, čo má za následok zvyšovanie rezistivity nanesej vrstvy. Fluór bol sledovaný pre štúdium kontaminácie vzorky nechtými prvkami.

4.1.4.1.1 3D hĺbkové profily **hliníka**, Split 1

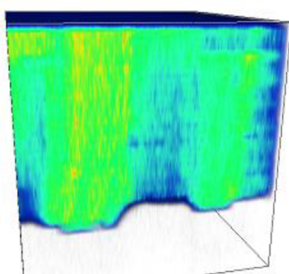
Prvá sada 3D hĺbkových profilov zobrazuje údaje pre hliník štyroch vzoriek zo Splitu 1.



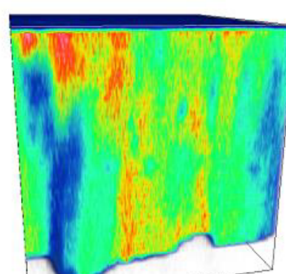
Obrázok 25: 3D hĺbkový profil Al_2 Vzorky 5 ($0,0\mu m$ AlSi + $3,9\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.



Obrázok 26: 3D hĺbkový profil Al_2 Vzorky 7 ($1,9\mu m$ AlSi + $2,0\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.



Obrázok 27: 3D hĺbkový profil Al_2 Vzorky 11 ($3,2\mu m$ AlSi + $0,7\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.

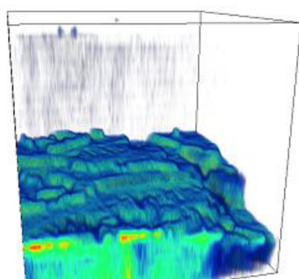


Obrázok 28: 3D hĺbkový profil Al_2 Vzorky 13 ($3,9\mu m$ AlSi + $0,0\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.

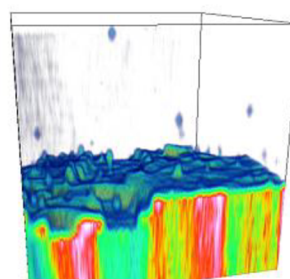
Vo vzorke 11 (Obrázok 27) možno pozorovať predelovú líniu vo vrstve hliníka, ktorá vznikla následkom menenia naprašovanej zliatiny. Z tohto podľadu je zaujímavá vzorka 7 (Obrázok 26), ktorá by tiež mala obsahovať takúto predelovú líniu, ale neobsahuje.

4.1.4.1.2 3D hĺbkové profily **kremíka**, Split 1

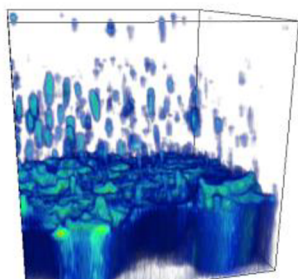
Druhá sada zobrazuje 3D hĺbkové profily rozloženia kremíka v objeme naprašenej vrstvy vzoriek zo Splitu 1.



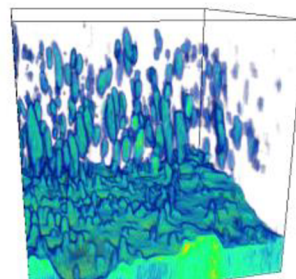
Obrázok 29: 3D hĺbkový profil Si Vzorky 5 ($0,0\mu m$ AlSi + $3,9\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.



Obrázok 30: 3D hĺbkový profil Si Vzorky 7 ($1,9\mu m$ AlSi + $2,0\mu m$ AlCu) s plochou $20\mu m \times 20\mu m$.

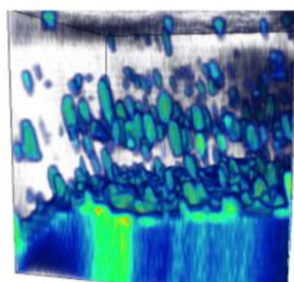


Obrázok 31: 3D hĺbkový profil Si Vzorky **11** ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

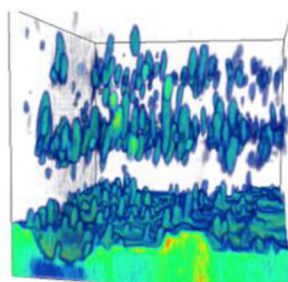


Obrázok 32: 3D hĺbkový profil Si Vzorky **13** ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

Vo vzorke 5 (Obrázok 29) je len malé množstvo kremíka mimo, ako v oblasti samotnej dosky. Vzorka 7 (Obrázok 30) vykazuje tvorbu precipitátov kremíka v nanesej vrstve AlSi. Tieto precipitáty sa nachádzajú v blízkosti povrchu kremíkoveho základu. Precipitácia kremíka je najviditeľnejšia vo vzorkách 11 (Obrázok 31) a 13 (Obrázok 32). V týchto vzorkách vytvárajú precipitáty zreteľné vrstvy. Vo vzorke 11 (Obrázok 31) sú tieto vrstvy zreteľné len čiastočne, dominuje tu skôr ich náhodné rozmiestnenie. Vrstva na vzorke 13 (Obrázok 32) je nanosená v jednom kroku, ale precipitáty vznikli v podobe dvoch pomerne jasne rozlíšiteľných vrstiev a jednej vrstvy, ktorá je spojená s povrchom kremíkoveho podkladu. Pre názornosť sú pre vzorky 11 a 13 (Obrázok 33) pridané 3D profily z rozdielneho uhla pohľadu.



a)



b)

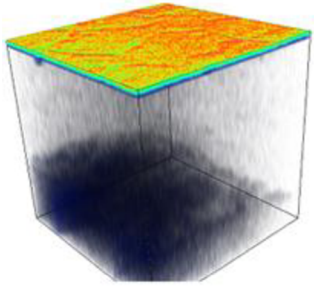
Obrázok 33: 3D hĺbkový profil Si: (a) Vzorky **11** ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$) a (b) Vzorky **13** ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$), s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

4.1.4.1.3 3D hĺbkové profily kyslíka, Split 1

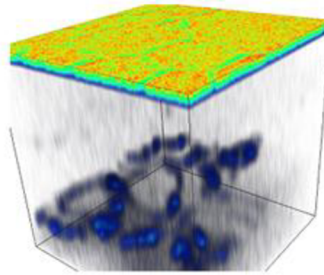
Tretia sada 3D profilov zobrazuje koncentráciu kyslíka v objeme vrstvy. Všetky vzorky majú na povrchu oxidovú vrstvu, čo je viditeľné práve v profile kyslíka.

Najhrubšia je táto oxidová vrstva na vzorke 7 (Obrázok 35). Tento fakt môže súvisieť s poréznosťou povrchu. Pri vzorke 13 (Obrázok 37) pozorujeme prienik kyslíka z povrchovej oxidovej vrstvy do objemu nanesej metalizačnej vrstvy, v ľavom okraji. Tento jav bol pravdepodobne zapríčinený lokálnym mechanickým narušením vrstvy. Vo vzorke 11 (Obrázok 36) je ďalšia oxidová vrstva v polohe, kde sa nachádza rozhranie medzi nanosenou AlSi a AlCu vrstvou v profile metalizácie. Táto vrstva vznikla pravdepodobne tým, že nanášanie AlSi a AlCu neprebíha v jednej komore, ale bolo potrebné kremíkovú dosku premiestniť medzi dvoma komorami, kde došlo ku kontaminácii kyslíkom. Vo všetkých vzorkách sa ešte vyskytujú vrstvy bohaté na kyslík aj v objeme nanesej metalizácie. Ďalej pozorujeme zvýšené množstvo kyslíka na prechode medzi kremíkovým substrátom a nanášanou vrstvou. Tento kyslík indikuje prirodzený oxid, ktorý sa tvorí na

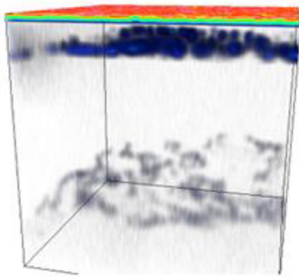
kremíku v atmosfére, čo je typický jav. Zaujímavé je, že táto vrstva nie je spojitá, ale je miestami narušená. Tieto narušenia zodpovedajú polohe precipitátov kremíka, ktoré je možné pozorovať na profiloch kremíka.



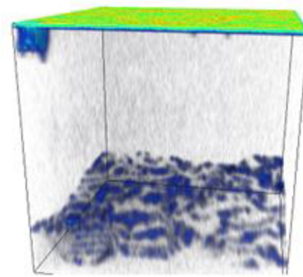
Obrázok 34: 3D hĺbkový profil **O**
Vzorky 5 ($0,0\mu\text{m AlSi} + 3,9\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 35: 3D hĺbkový profil **O**
Vzorky 7 ($1,9\mu\text{m AlSi} + 2,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



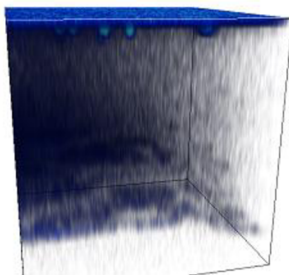
Obrázok 36: 3D hĺbkový profil **O**
Vzorky 11 ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



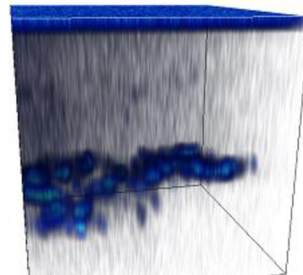
Obrázok 37: 3D hĺbkový profil **O**
Vzorky 13 ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

4.1.4.1.4 3D hĺbkové profily oxidov hliníka, Split 1

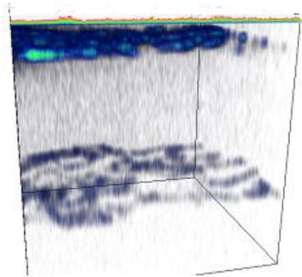
Štvrtá sada 3D profilov obsahuje údaje pre ióny oxidov hliníka, signál AlO.



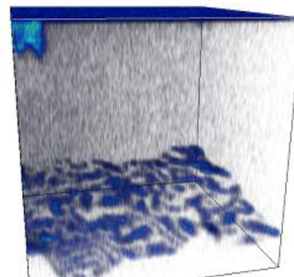
Obrázok 38: 3D hĺbkový profil **AlO**
Vzorky 5 ($0,0\mu\text{m AlSi} + 3,9\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 39: 3D hĺbkový profil **AlO**
Vzorky 7 ($1,9\mu\text{m AlSi} + 2,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 40: 3D hĺbkový profil **AlO**
Vzorky **11** ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

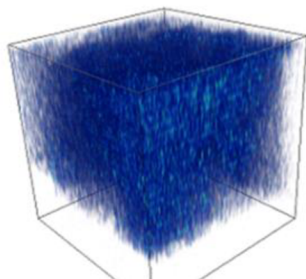


Obrázok 41: 3D hĺbkový profil **AlO**
Vzorky **13** ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

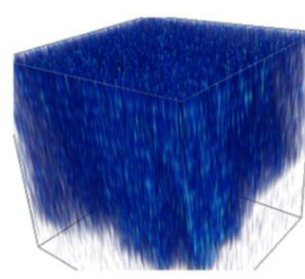
Z týchto profilov je zrejmé, že väčšina oxidov na povrchu vrstvy sú oxidy hliníka. Vrstva v objeme vzorky 11 (Obrázok 40) podporuje teóriu, že medzi aplikáciou vrstvy AlCu je nutné premiestňovať dosky medzi aplikačnými komorami, čo má za následok vznik povrchových oxidov. Tieto oxidy sa po aplikácii vrstvy AlCu presunú do objemu nanesej metalizačnej vrstvy. Signály sú ešte výrazné na prechode medzi metalizáciou a kremíkovým substrátom. Toto zvýraznenie je zapríčinené tým, že časť prirodzeného oxidu kremíka reaguje s nanesenou hliníkovou vrstvou za vzniku oxidov hliníka.

4.1.4.1.5 3D hĺbkové profily **mede**, Split 1

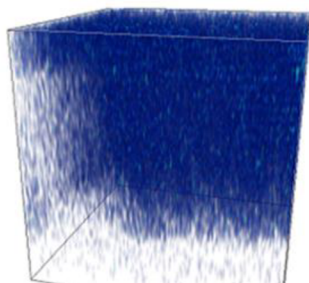
Piata sada 3D profilov zobrazuje rozloženie mede v objeme vzoriek, signál Cu. Z údajov, môžeme pozorovať, že po nanesení vrstvy obsahujúcej meď, táto meď predifunduje celým objemom metalizácie.



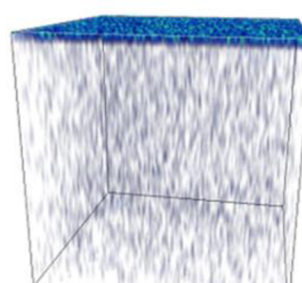
Obrázok 42: 3D hĺbkový profil **Cu**
Vzorky **5** ($0,0\mu\text{m AlSi} + 3,9\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 43: 3D hĺbkový profil **Cu**
Vzorky **7** ($1,9\mu\text{m AlSi} + 2,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 44: 3D hĺbkový profil **Cu**
Vzorky **11** ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

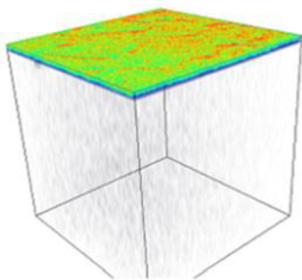


Obrázok 45: 3D hĺbkový profil **Cu**
Vzorky **13** ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$)
s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

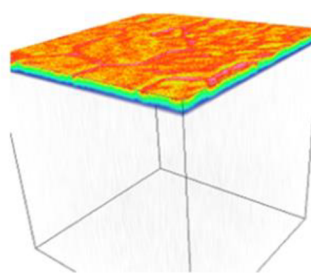
Vo vzorkách 7 (Obrázok 43) a 11 (Obrázok 44) je možné pozorovať slabú líniu, ktorá oddeľuje jednotlivé nanosené vrstvy. Vo vzorke 13 (Obrázok 45) je množstvo mede len minimálne, najviac sa nachádza na povrchu, čo môže byť spôsobené zvýšenou ionizačnou účinnosťou mede v povrchovej oxidovej vrstve, alebo segregáciou mede na povrchu.

4.1.4.1.6 3D hĺbkové profily fluóru, Split 1

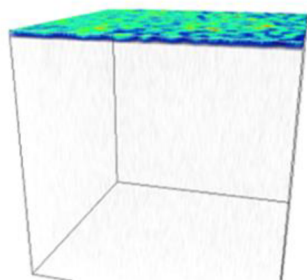
Posledná sada 3D profilov pri týchto vzorkách skúmala fluór, signál F. Z nameraných dát je zrejmé, že ku kontaminácii fluórom dochádza až po nanosení metalizačných vrstiev. Pretože jediné miesta so značným signálom fluóru sú len na povrchu vzoriek, a tesne pod ním.



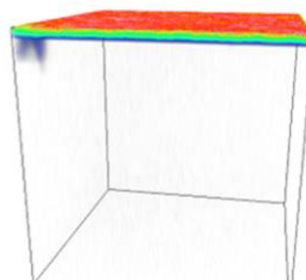
Obrázok 46: 3D hĺbkový profil **F** Vzorky 5 ($0,0\mu\text{m AlSi} + 3,9\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 47: 3D hĺbkový profil **F** Vzorky 7 ($1,9\mu\text{m AlSi} + 2,0\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 48: 3D hĺbkový profil **F** Vzorky 11 ($3,2\mu\text{m AlSi} + 0,7\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



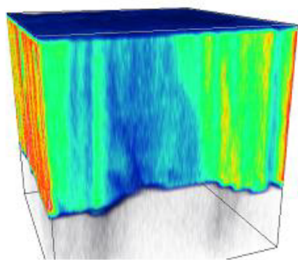
Obrázok 49: 3D hĺbkový profil **F** Vzorky 13 ($3,9\mu\text{m AlSi} + 0,0\mu\text{m AlCu}$) s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

4.1.4.2 Výsledky meraní pre vzorky zo Splitu 2

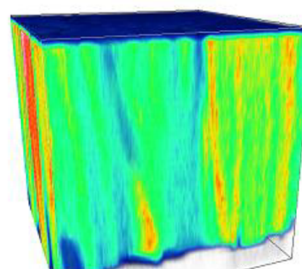
Táto sada vzoriek bola pripravená na zariadení Endura. Sada obsahovala osem vzoriek. Jednotlivé vzorky sa medzi sebou líšili zložením, hrúbkou vrstiev použitej metalizácie a teplotou pri naprašovaní, vid' Tabuľka 1.

Z nameraných dát boli rovnako ako v predchádzajúcom prípade vyhodnotené dáta základných prvkov použitých zliatin, čiže hliník, kremík, meď a dodatočne kyslík, pre analýzu vzniknutých oxidov. Cieľom bolo porovnať vlastnosti vrstiev nanosených zariadeniami Varian a Endura.

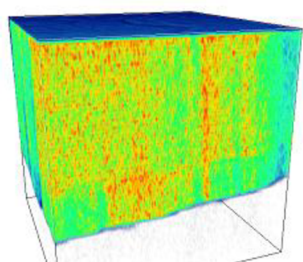
4.1.4.2.1 3D hĺbkové profily **Al₂**, Split 2



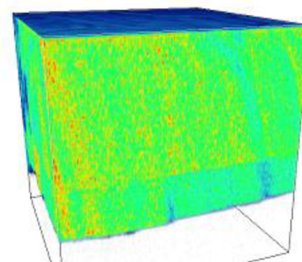
Obrázok 50: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **1** [3,9µm AlSi(190°C) + 0,0µm AlCu] s plochou 20 µm x 20 µm.



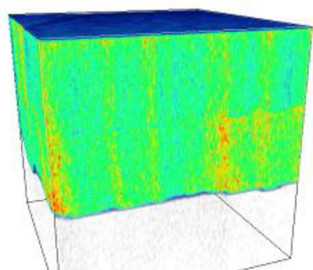
Obrázok 51: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **2** [3,9µm AlSi(440°C) + 0,0µm AlCu] s plochou 20 µm x 20 µm.



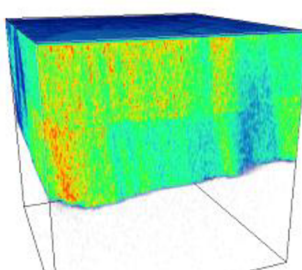
Obrázok 52: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **3** [1µm AlSi(190°C) + 3µm AlCu(440°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.



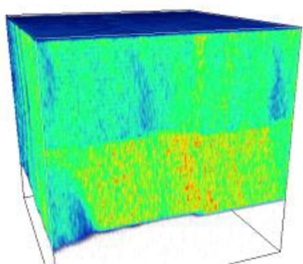
Obrázok 53: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **4** [1µm AlSi(440°C) + 3µm AlCu(440°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.



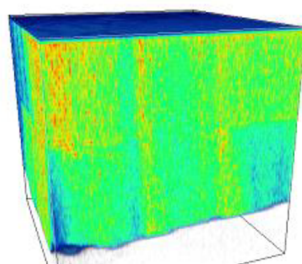
Obrázok 54: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **5** [2µm AlSi(190°C) + 2µm AlCu(300°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.



Obrázok 55: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **6** [2µm AlSi(190°C) + 2µm AlCu(440°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.



Obrázok 56: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **7** [2µm AlSi(440°C) + 2µm AlCu(300°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.

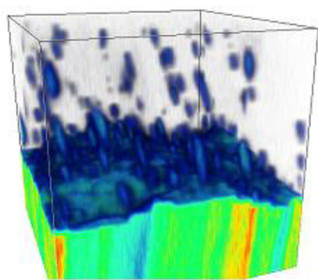


Obrázok 57: 3D hĺbkový profil **Al₂** Vzorky **12** [2µm AlSi(440°C) + 2µm AlCu(440°C)] s plochou 20 µm x 20 µm.

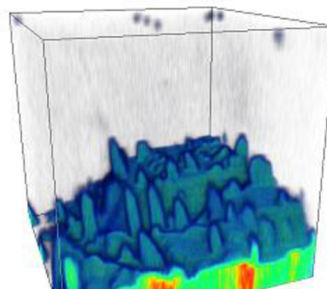
Prvá sada 3D hĺbkových profilov zobrazuje rozloženie hliníka vo vzorkách. Pri vzorkách z dosiek 1 (Obrázok 50) a 2 (Obrázok 51) pozorujeme len súvislú vrstvu hliníka. V tejto vrstve je možné pozorovať lokálne zmeny intenzity signálu, červené a modré oblasti. Tieto zmeny sú pravdepodobne zapríčinené rôznou orientáciou zŕn vo vrstve. Pri zvyšných vzorkách je jasne prítomná deliaca línia vo vrstve, ktorá poukazuje na to, že tieto vrstvy boli robené na dvakrát. Opäť je možné pozorovať oblasti s rôznou intenzitou signálu, pravdepodobne jednotlivé zrná v materiáli.

4.1.4.2.2 3D hĺbkové profily **kremíka**, Split 2

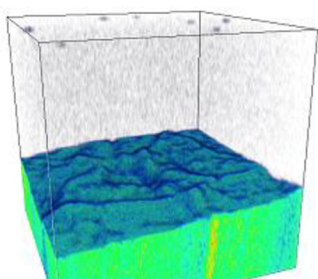
Druhá sada obsahuje 3D hĺbkové profily kremíka.



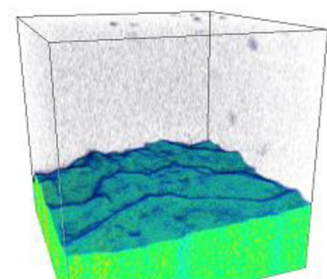
Obrázok 58: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 1 [3,9 μm AlSi(190°C) + 0,0 μm AlCu] s plochou 20 μm x 20 μm .



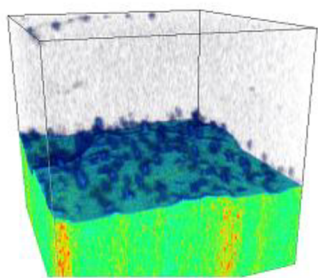
Obrázok 59: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 2 [3,9 μm AlSi(440°C) + 0,0 μm AlCu] s plochou 20 μm x 20 μm .



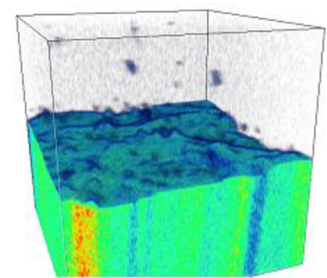
Obrázok 60: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 3 [1 μm AlSi(190°C) + 3 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



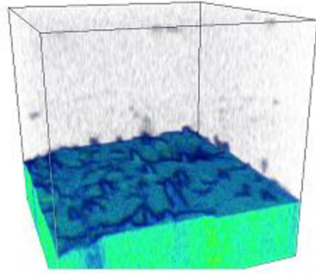
Obrázok 61: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 4 [1 μm AlSi(440°C) + 3 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



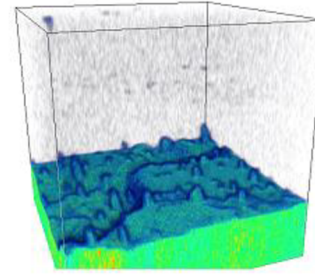
Obrázok 62: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 5 [2 μm AlSi(190°C) + 2 μm AlCu(300°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



Obrázok 63: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 6 [2 μm AlSi(190°C) + 2 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



Obrázok 64: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 7 [2 μm AlSi(440°C) + 2 μm AlCu(300°C)] s plochou 20 μm x20 μm .

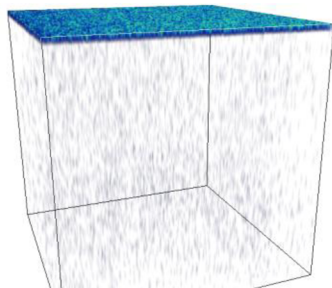


Obrázok 65: 3D hĺbkový profil Si_2 Vzorky 12 [2 μm AlSi(440°C) + 2 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x20 μm .

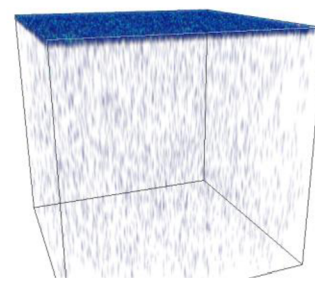
Vo vzorkách 3 (Obrázok 60) a 4 (Obrázok 61) je len malé množstvo kremíka mimo, ako v oblasti samotnej dosky. Precipitáty v blízkosti povrchu kremíkoveho základu sa nachádzajú vo vzorkách 2 (Obrázok 59), 5 (Obrázok 62), 6 (Obrázok 63), 7 (Obrázok 64) a 12 (Obrázok 65). Precipitácia kremíka je najviditeľnejšia vo vzorkách 1 (Obrázok 58) a 2 (Obrázok 59). Vo vzorke 1 (Obrázok 58), 5 (Obrázok 62) a 6 (Obrázok 63) vznikajú precipitáty kremíka v celom objeme nanesej vrstvy, dominuje tu ich náhodné rozmiesťenie. Je zjavné, že pri nízkych aplikačných teplotách vznikajú precipitáty kremíka v celom objeme nanesej vrstvy. Pri vyšších teplotách sa precipitáty nachádzajú v blízkosti povrchu kremíkoveho základu. Na rozhraní medzi nanesenou vrstvou AlSi a kremíkovým substrátom dochádza pri vysokých aplikačných teplotách k difúzií kremíka z nanesej vrstvy k tomuto rozhraniu, kde vznikajú precipitáty.

4.1.4.2.3 3D hĺbkové profily *mede*, Split 2

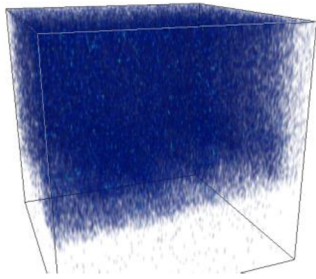
Tretia sada 3D profilov zobrazuje rozloženie mede v objeme vzoriek, signál Cu. Z údajov, môžeme pozorovať, že po nanesej vrstvy obsahujúcej meď, táto meď predifunduje celým objemom metalizácie. Vo vzorkách 1 (Obrázok 66) a 2 (Obrázok 67) je množstvo mede len minimálne, najviac sa nachádza na povrchu, čo môže byť spôsobené zvýšenou ionizačnou účinnosťou Cu v povrchovej oxidovej vrstve, alebo segregáciou Cu na povrchu. Vo vzorkách 5 (Obrázok 70), 6 (Obrázok 71), 7 (Obrázok 72) a 12 (Obrázok 73) je možné pozorovať líniu, ktorá oddeľuje jednotlivé nanesené vrstvy.



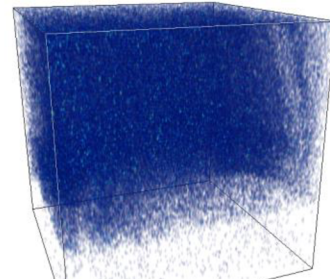
Obrázok 66: 3D hĺbkový profil Cu Vzorky 1 [3,9 μm AlSi(190°C) + 0,0 μm AlCu] s plochou 20 μm x 20 μm .



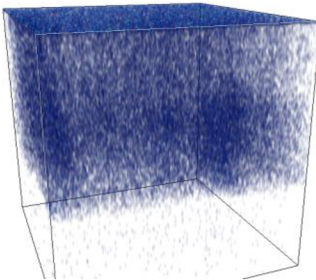
Obrázok 67: 3D hĺbkový profil Cu Vzorky 2 [3,9 μm AlSi(440°C) + 0,0 μm AlCu] s plochou 20 μm x 20 μm .



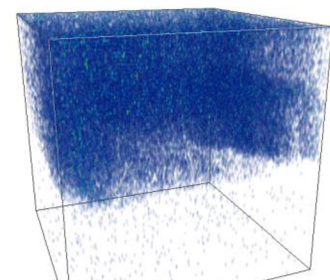
Obrázok 68: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 3 [1 μm AlSi(190°C) + 3 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



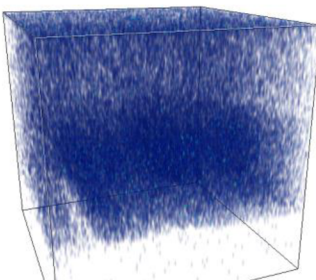
Obrázok 69: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 4 [1 μm AlSi(440°C) + 3 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



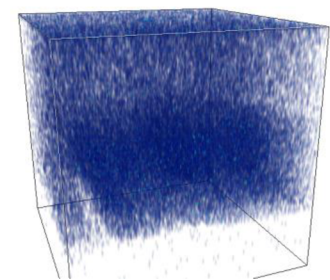
Obrázok 70: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 5 [2 μm AlSi(190°C) + 2 μm AlCu(300°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



Obrázok 71: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 6 [2 μm AlSi(190°C) + 2 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



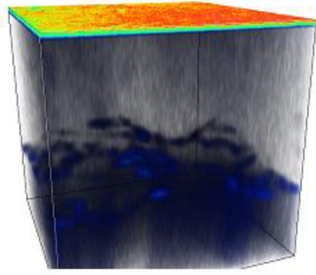
Obrázok 72: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 7 [2 μm AlSi(440°C) + 2 μm AlCu(300°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .



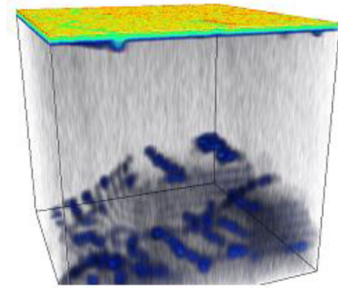
Obrázok 73: 3D hĺbkový profil **Cu** Vzorky 12 [2 μm AlSi(440°C) + 2 μm AlCu(440°C)] s plochou 20 μm x 20 μm .

4.1.4.2.4 3D hĺbkové profily kyslíka, Split 2

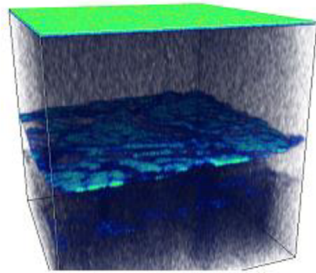
Štvrtá sada 3D profilov zobrazuje rozloženie kyslíka v objeme vzoriek. Na všetkých vzorkách sa vyskytujú povrchové oxidy na nanesej metalizácii. V objeme je možné pozorovať prirodzené oxidy kremíka na prechode medzi kremíkovým substrátom a metalizačnou vrstvou. V objeme metalizácie na vzorkách, ktoré mali nanesenú aj vrstvu AlCu, vidíme ešte oxidovú vrstvu práve na rozhraní vrstiev AlSi a AlCu. Táto oxidová vrstva vznikla pri presune medzi jednotlivými vákuovými komorami, v ktorých dochádza k nanášaniu metalizačných vrstiev.



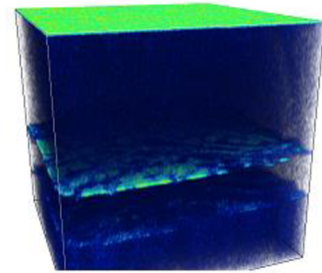
Obrázok 74: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **1** [$3,9\mu\text{m AlSi}(190^\circ\text{C}) + 0,0\mu\text{m AlCu}$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



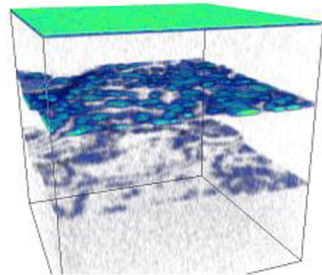
Obrázok 75: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **2** [$3,9\mu\text{m AlSi}(440^\circ\text{C}) + 0,0\mu\text{m AlCu}$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



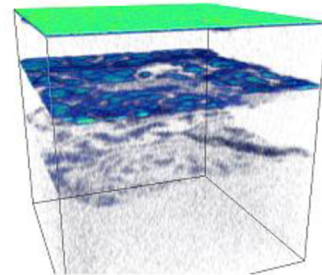
Obrázok 76: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **3** [$1\mu\text{m AlSi}(190^\circ\text{C}) + 3\mu\text{m AlCu}(440^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



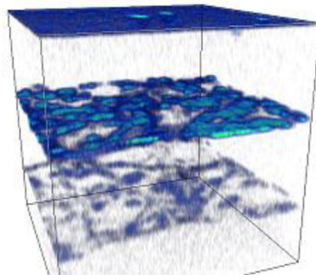
Obrázok 77: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **4** [$1\mu\text{m AlSi}(440^\circ\text{C}) + 3\mu\text{m AlCu}(440^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



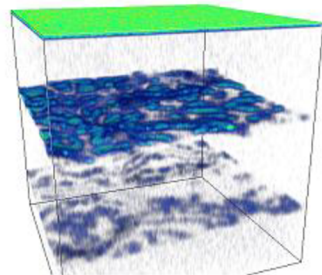
Obrázok 78: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **5** [$2\mu\text{m AlSi}(190^\circ\text{C}) + 2\mu\text{m AlCu}(300^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 79: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **6** [$2\mu\text{m AlSi}(190^\circ\text{C}) + 2\mu\text{m AlCu}(440^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 80: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **7** [$2\mu\text{m AlSi}(440^\circ\text{C}) + 2\mu\text{m AlCu}(300^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.



Obrázok 81: 3D hĺbkový profil **O** Vzorky **12** [$2\mu\text{m AlSi}(440^\circ\text{C}) + 2\mu\text{m AlCu}(440^\circ\text{C})$] s plochou $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$.

Cieľom meraní bolo porovnať vrstvy nanosené rôznymi prístrojmi pri rôznych aplikačných parametroch. Pre potrebu skúmania materiálového zloženia vzoriek bola ako analytická metóda zvolená metóda TOF- SIMS, pre jej schopnosť určovať polohy jednotlivých prvkov vo vzorke. Z nameraných dát je vidieť, že táto metóda je vhodná pre meranie takýchto štruktúr. Je vidieť, že pri zmene prístroja dochádza len minimálnej zmene v nanosenej vrstve, je teda možné z tohto ohľadu tieto prístroje vo výrobnom procese zameniť.

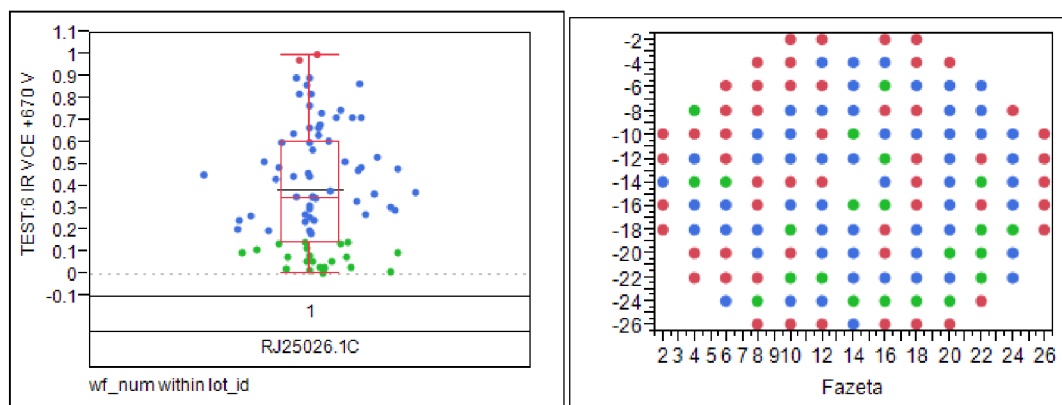
4.2 Analýza okrajovej terminácie pomocou metódy EBIC

Tieto merania študujú planárnu okrajovú ukončovaciu štruktúru, ktorá sa používa vo firme On Semiconductor pre ukončovanie čipov TIGBT tranzistorov a vysokonapäťových diód. Ich výrobné parametre sú v tabuľke 2. Tieto čipy sú postihnuté vysokým zvodovým prúdom.

Tabuľka 2: Výrobné parametre okrajových prstencov pre 600 V a 650 V diódy.

Prstenec	Šírka na maske
0	1.5 μm
1	2.5 μm
2	3 μm
3	4 μm
4	5 μm
5	29 μm

Skúmané vzorky boli 600 V a 650 V diódy. Tieto čipy majú šesť prstencov v okrajovej ukončovacej štruktúre. Tieto čipy sú postihnuté vysokým zvodovým prúdom. Cieľom pozorovaní bolo určiť rozdiel vo vlastnostiach ukončovacej štruktúry medzi čipmi s vysokým zvodovým prúdom a s normálnym zvodovým prúdom. Znázornenie hodnôt zvodového prúdu pre čipy je na obrázku 82.

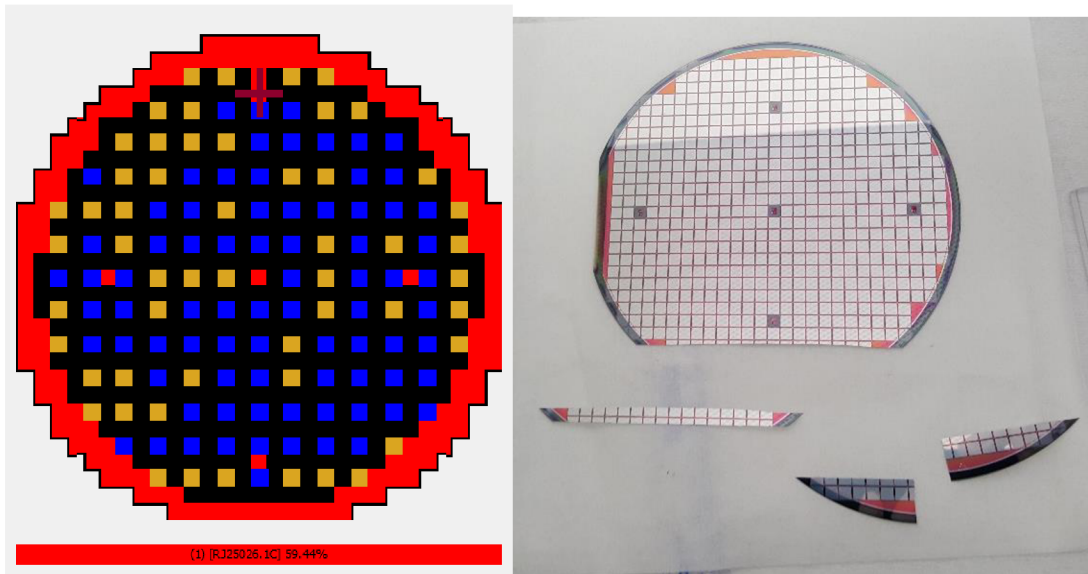


Obrázok 82: Hodnoty zvodových prúdov z dosky RJ25026.1C (vľavo) a mapa dosky RJ25026.1C s farebným označením čipov: zelená – dobré; červená – zlé a modrá – medzi dobré-zlé (vpravo).

Cieľom meraní bolo zistiť rozdiel v tvare okrajovej terminálnej štruktúry medzi dobrými čipmi (zelená farba), a zlými čipmi (červená farba). Čipy s modrým označením nemajú zmysel študovať, pretože ležia v medziach medzi dobrými a zlými.

Pri tejto doske s označením RJ25026.1C boli merané elektrické vlastnosti každého druhého čipu. Päť červených bodov na mape z obrázku 83 vľavo znázorňuje testovacie štruktúry, ktoré sú pre merania EBIC nezaujímavé, používajú sa pri výrobe na kontrolu

výrobných procesov. Podľa testovacích štruktúr a fazety sa dá na kremíkovej doske ľahko orientovať (Obrázok 83 vpravo), pretože sa už na prvý pohľad líšia od vyrábaných čipov.



Obrázok 83: Mapa (vľavo) a fotografia (vpravo) dosky RJ25026.1C, berie sa že fazeta určuje južný smer, a následne sú ostatné smery definované podľa konvencie.

4.2.1 Príprava vzoriek

Vzorky boli poskytnuté firmou On Semiconductor v podobe šesť palcovej dosky s diódovými čipmi.

Postup prípravy vzoriek:

- Doska bola nalámaná na rozmery vhodné do elektrónového mikroskopu Lyra 3 od firmy Tescan v ktorom bol EBIC meraný.
- Pre umožnenie následnej analýzy v mikroskope boli vzorky lámané cez telo čipu, čo umožňuje:
 - jednoducho pozorovať jednotlivé prstence;
 - určiť rozmery jednotlivých prstencov a ich rozostupy.

Pre prvé meranie bola odlomená východná hrana dosky (Obrázok 83, vpravo), ktorá podľa mapy (Obrázok 83, vľavo) celá neprešla testovaním.

- Nalámané vzorky boli umiestnené (nalepené) na vhodný držiak.
 - Pre nutnosť pracovať s FIB lúčom, a pre následné merania rozmerov prstencov, bolo výhodné umiestniť vzorky kolmo k elektrónovému lúču (pozoruje sa hrana obsahujúca merané prstence pri nulovom náklone).

4.2.2 Merací proces

Merania boli uskutočnené v elektrónovom mikroskope Lyra 3 od firmy Tescan. Pre meranie EBIC je nutné nakontaktovať vzorky pomocou nanomanipulátorov v elektrónovom mikroskope. Tieto nanomanipulátory sú pripojené na nanoampérmeter, pomocou ktorého je možné merať EBIC prúd. Nakontaktovanie je najzložitejšou časťou merania, pre tvorbu prirodzených oxidov na povrchu kremíka. Tieto oxidy často znemožňujú správny elektrický kontakt. Táto oxidová vrstva je obzvlášť nepríjemná pri kontaktovaní jednotlivých prstencov prechodom nanomanipulátora cez oblasť, kde sa vyskytujú.

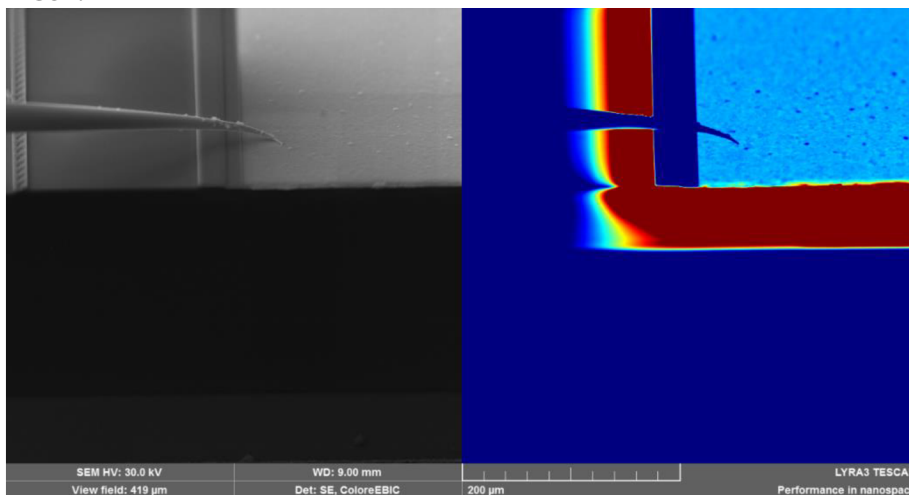
Nutnosťou pre meranie rozmerov a vzájomných polôh prstencov je ich súčasné zobrazenie pod nulovým uhlom. Pre zobrazenie všetkých prstencov súčasne je nutné ich vodivo spojiť a nakontaktovať pomocou nanomanipulátora. Pre toto vodivé spojenie sú do vrchnej pasivačnej vrstvy vyrobené kontaktné diery pomocou FIB. Následne je do týchto dier nanosená vrstva kovu, platiny, zo zariadenia GIS. Táto metóda nakontaktovania je výhodná aj z toho hľadiska, že dôjde k presunutiu Schottkyho bariéry ,pod hrotom nanomanipulátora, mimo skúmanú oblasť, do objemu materiálu.

Po nakontaktovaní sa na zlomenej hrane zobrazia OPN jednotlivých prstencov. Takto zobrazené OPN je možné zmerať ako závislosť intenzity generovaného prúdu na polohe dopadajúceho elektrónového zväzku. Z takýchto grafov sa potom dajú jednoducho určiť základné rozmery naimplantovaných prstencov.

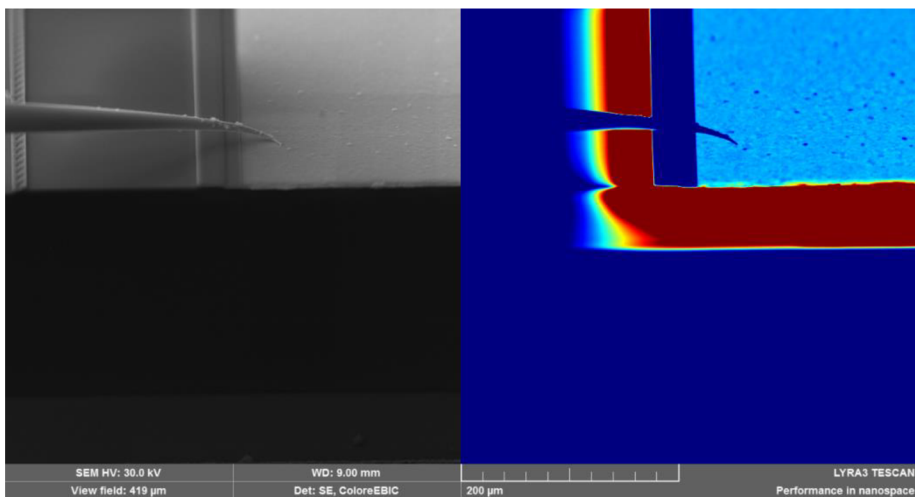
4.2.3 Namerané údaje

Namerané údaje je možné zobrazovať v čiernobielym a farebnom režime. Pre lepšiu prehľadnosť sú zaznamenané obrázky vo farebnom móde. Výber módu zobrazovania nijak neovplyvňuje meranie intenzity generovaného prúdu na polohe. Celkovo bolo meraných päť čipov z kusu kremíkovej dosky zobrazenej na obrázku 83, vpravo. Čipy sú číslované od testovacej štruktúry (číslo 1) smerom doprava.

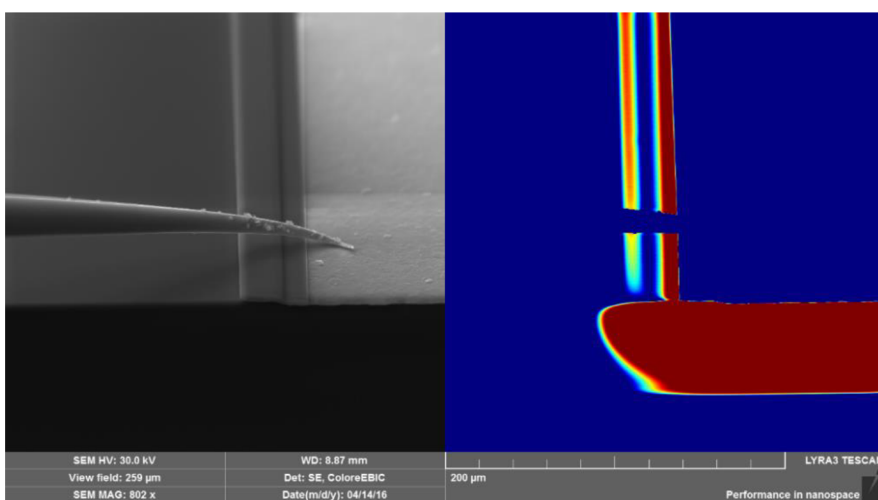
V prvom meraní bola nakontaktovaná spodná strana čipu a horná metalizácia. Predpoklad bol, že sa rozsvieti najvnútornejší prstenec, tak ako pri rovnakom kontaktovaní IGBT tranzistora. Toto zapojenie bolo použité pri meraniach zobrazených na nasledujúcich obrázkoch.



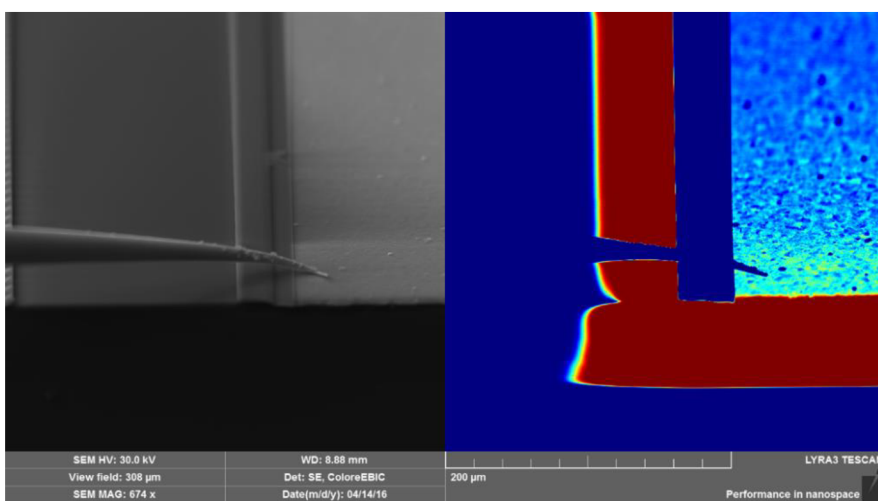
Obrázok 84: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 01, prvé meranie.



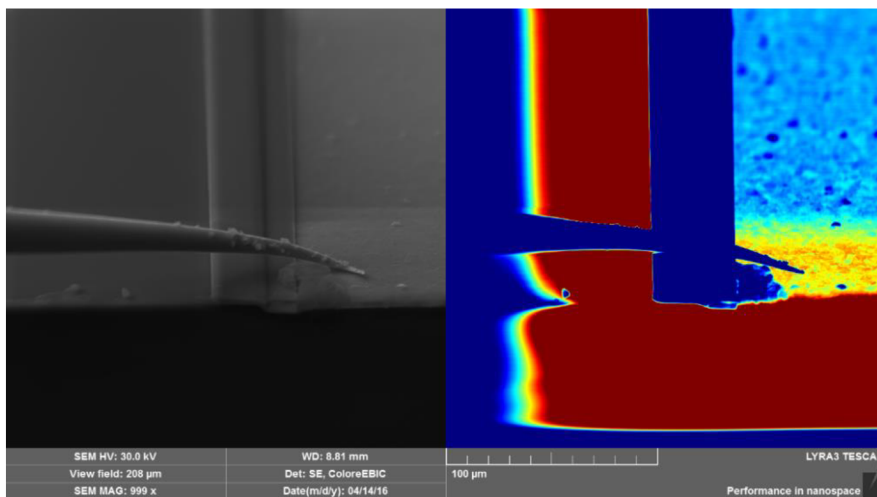
Obrázok 85: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 02, prvé meranie.



Obrázok 86: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 3, prvé meranie.

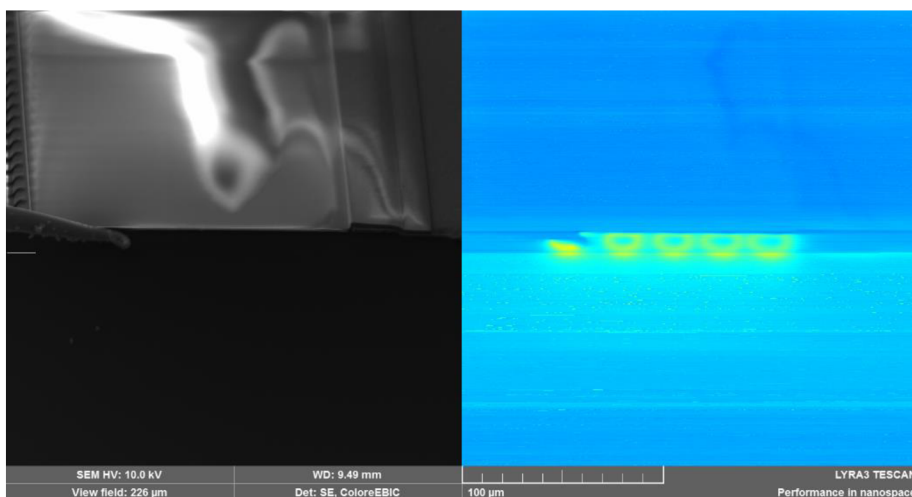


Obrázok 87: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 4, prvé meranie.

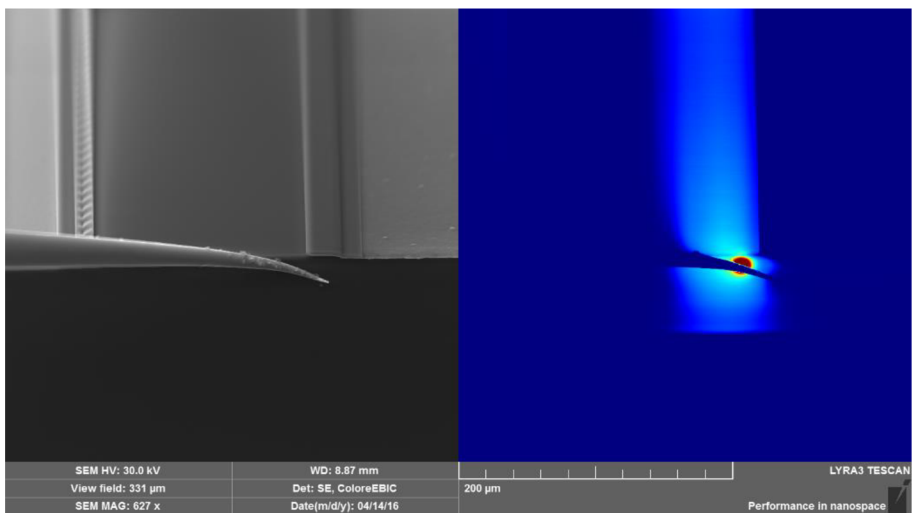


Obrázok 88: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 5, prvé meranie.

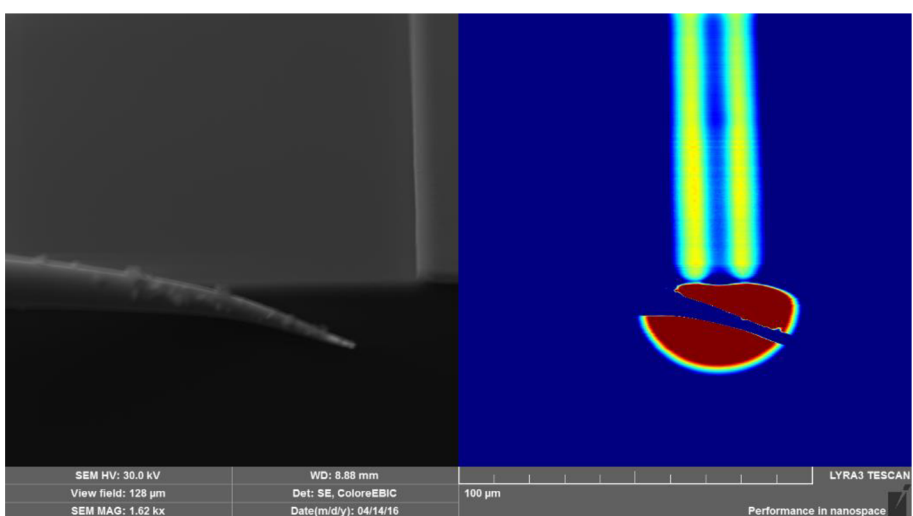
Ako možno vidieť na obrázkoch 84 až 88, tak jedine na čipe 3 sa podarilo rozjasniť vnútorný prstenec obrázok 86. Na ostatných čipoch, aj po upravovaní zobrazovacích parametrov, nebolo možné vidieť prstence pri zapojení: nakontaktovaná spodná strana čipu a horná metalizácia. Nasledujúce meranie bolo robené tak, že hrotom ktorý tvoril kontakt na hornej metalizácii sa postupne prechádzalo po prednej odlomenej hrane v miestach, kde boli prstence. Výsledky týchto meraní sú na obrázkoch 89 až 93.



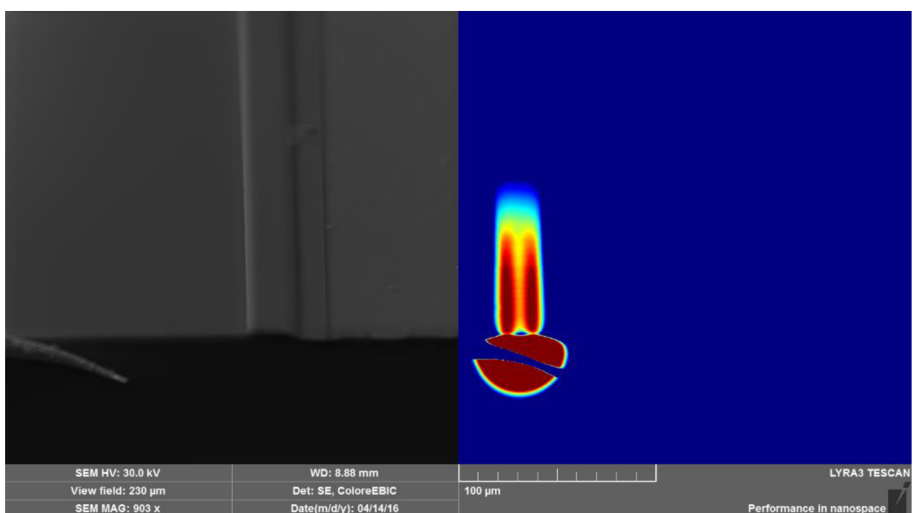
Obrázok 89: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 1, druhé meranie.



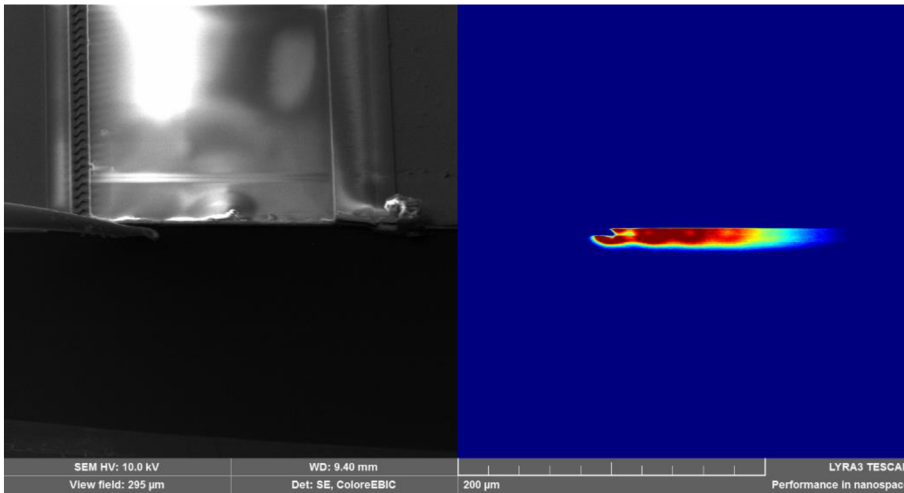
Obrázok 90: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 2, druhé meranie.



Obrázok 91: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 3, druhé meranie.



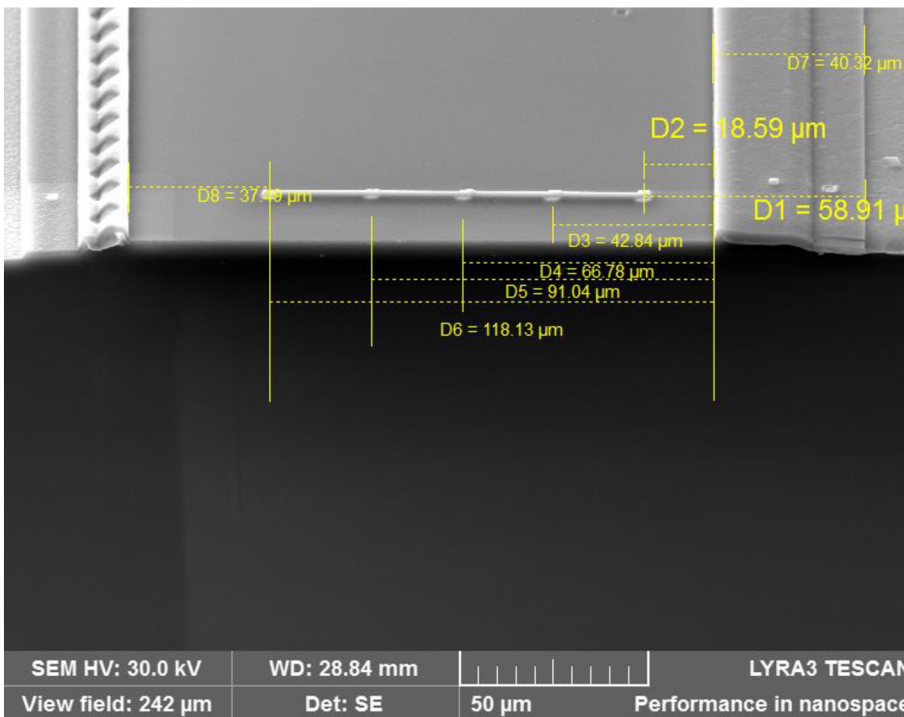
Obrázok 92: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 4, druhé meranie.



Obrázok 93: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 5, druhé meranie.

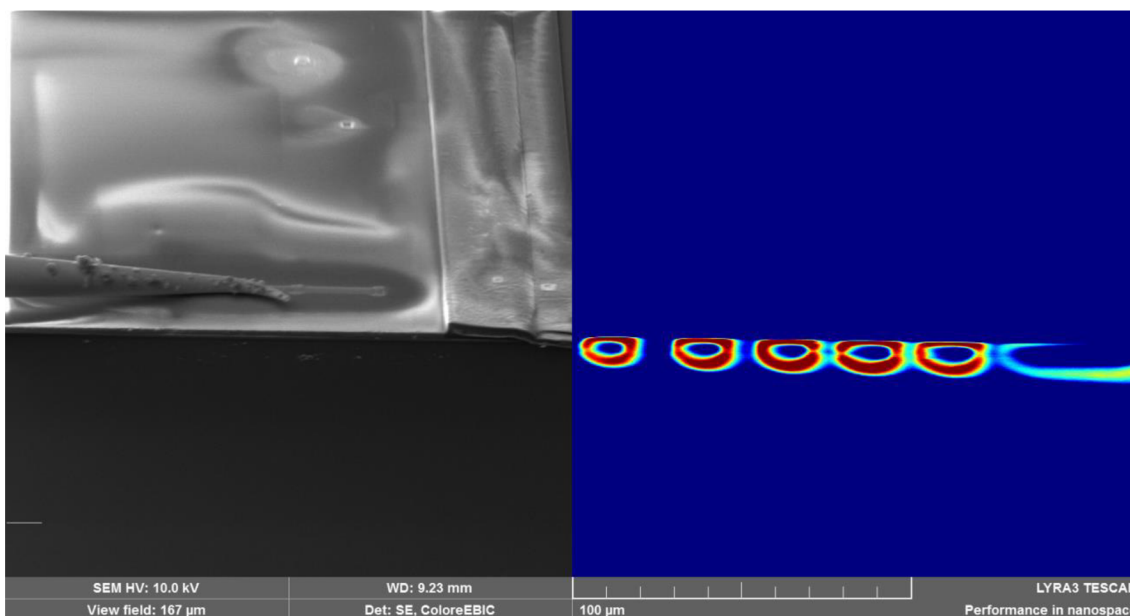
Ako možno vidieť na obrázkoch, na čipe 1 (Obrázok 89) a 5 (Obrázok 93) došlo po nakontaktovaní jedného prstencu k rozsvieteniu všetkých. Tento jav je spôsobený tým, že pri meraní zvodového prúdu došlo k prerazu, čo zapríčinilo vodivé spojenie všetkých prstencov. V čipoch 3 (Obrázok 91) a 4 (Obrázok 92) bolo možné postupne rozsvietiť jednotlivé prstence, s tým, že v prípade čipu 4 sa postupne strácali. Na čipe 2 (Obrázok 90) nebolo možné rozjasniť jednotlivé prstence.

Na čipoch 1 a 5 bolo rovno možné merať parametre prstencov, ako závislosť intenzity generovaného prúdu na polohe elektrónového zväzku. Pri čipe 3 bolo nutné spraviť krok s FIB a GIS zariadením. Výsledné vytvorené kontaktovacie metalizačné vrstvy sú na obrázku 94.



Obrázok 94: SEM zobrazenie čipu 3 s vytvorenými kontaktovacími plochami

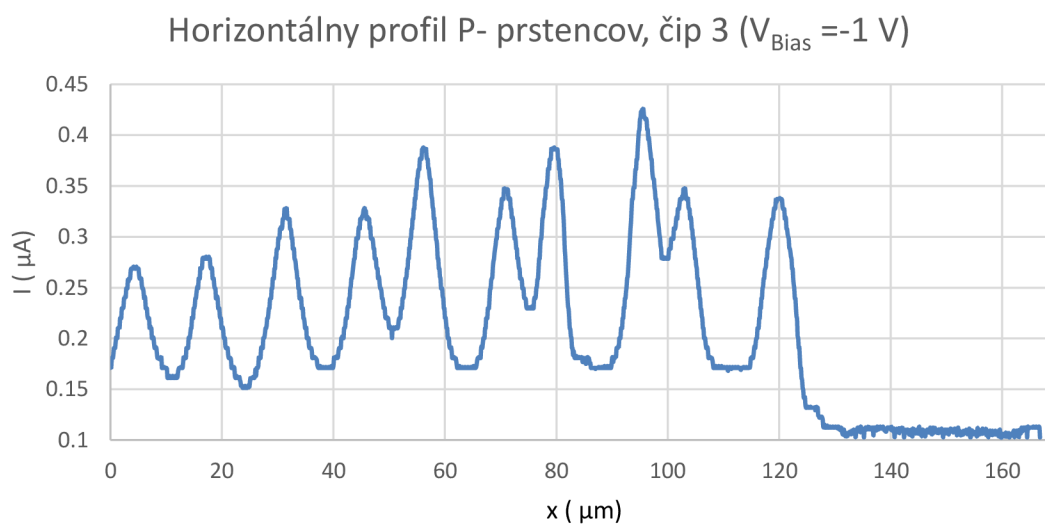
Výsledkom kontaktovania pomocou FIB a GIS na čipe 3 bolo rozsvietenie všetkých prstencov (Obrázok 95).



Obrázok 95: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 3, po kontaktovaní pomocou FIB a GIS

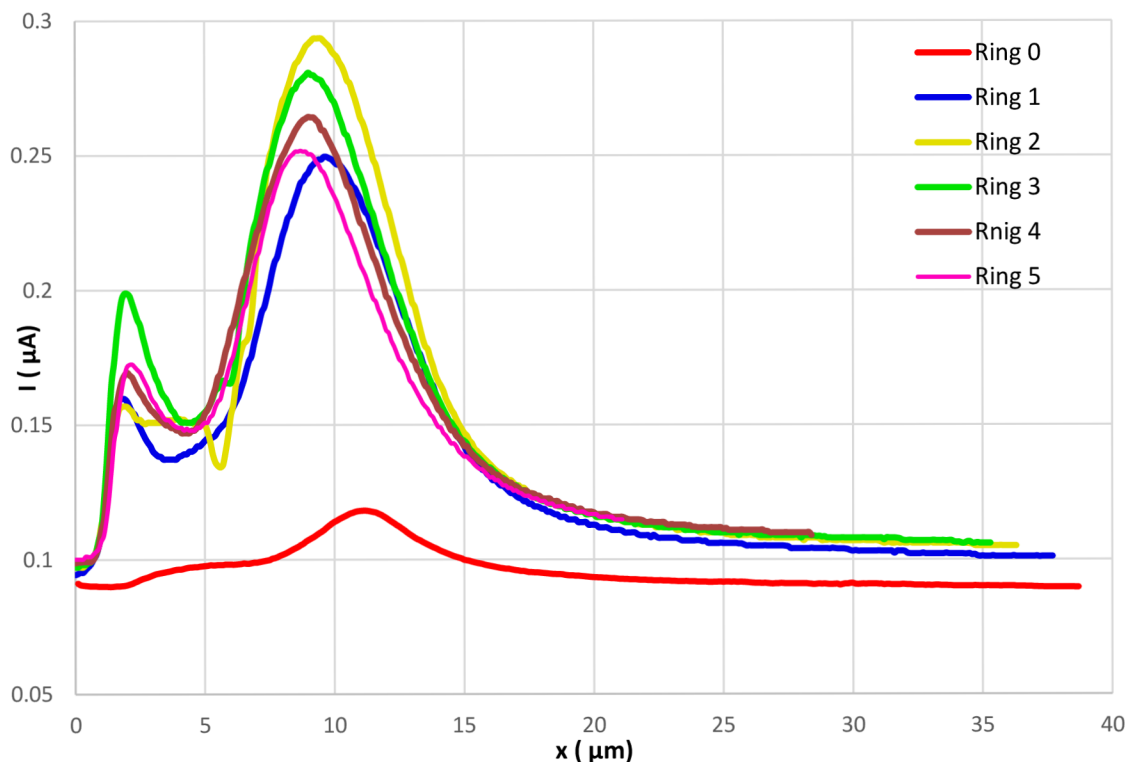
Po tomto nakontaktovaní bolo možné zmerať základné parametre čipov, na ktorých nedošlo k prirazu. Pri čipoch na ktorých došlo k prirazu nie je potrebné vytvárať takéto kontaktovacie plochy, lebo po nakontaktovaní jedného prstenca sa rozsvietia všetky prstence.

Výsledné určené rozmery sú znázornené v nasledujúcich grafoch.



Graf 1: Horizontálny profil P-prstencov, čip 03.

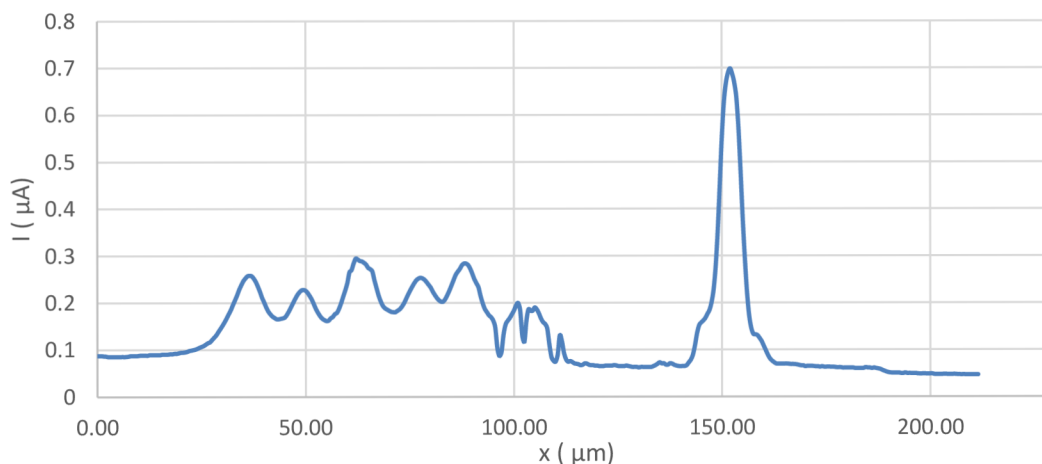
Vertikálne profily P- prstencov ($V_{\text{Bias}} = -0.6546 \text{ V}$)



Graf 2: Vertikálny profil P-prstencov, čip 03.

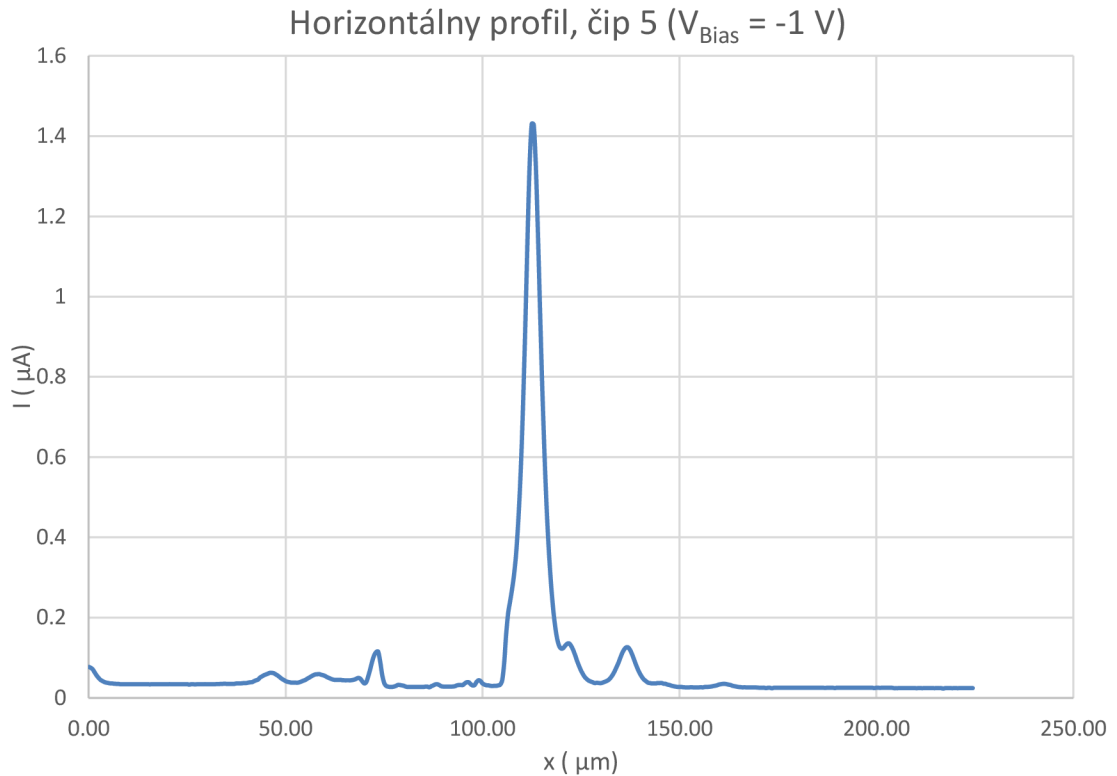
Pre čip 3, pri ktorom bola vytvorená kontaktovania metalizácia, je možno vidieť, že intenzita prúdu emitovaného prstencami sa pohybuje v rozmedzí $0,15 \mu\text{A}$ až $0,45 \mu\text{A}$, pri horizontálnom profile a pri vertikálnych profiloch je ešte menšie a to do $0,3 \mu\text{A}$. Rozdiely v intenzite závisia na dopácii vrstvy a taktiež súvisia s kontaktovaním, ako vidno na grafe 2 intenzita prstencov závisí na vzdialenosti od dotyku medzi nanomanipulátorom s kontaktovaciou vrstvou a samotným prstencom. Zaujímavé body na vertikálnom grafe sú maximá v oblasti $5 \mu\text{m}$ až $13 \mu\text{m}$. Tieto maximá reprezentujú prechod medzi P-prstencom a N substrátom. Je teda možné určiť hĺbku jednotlivých prstencov.

Horizontálny profil, čip 1 ($V_{\text{Bias}} = 0 \text{ V}$)



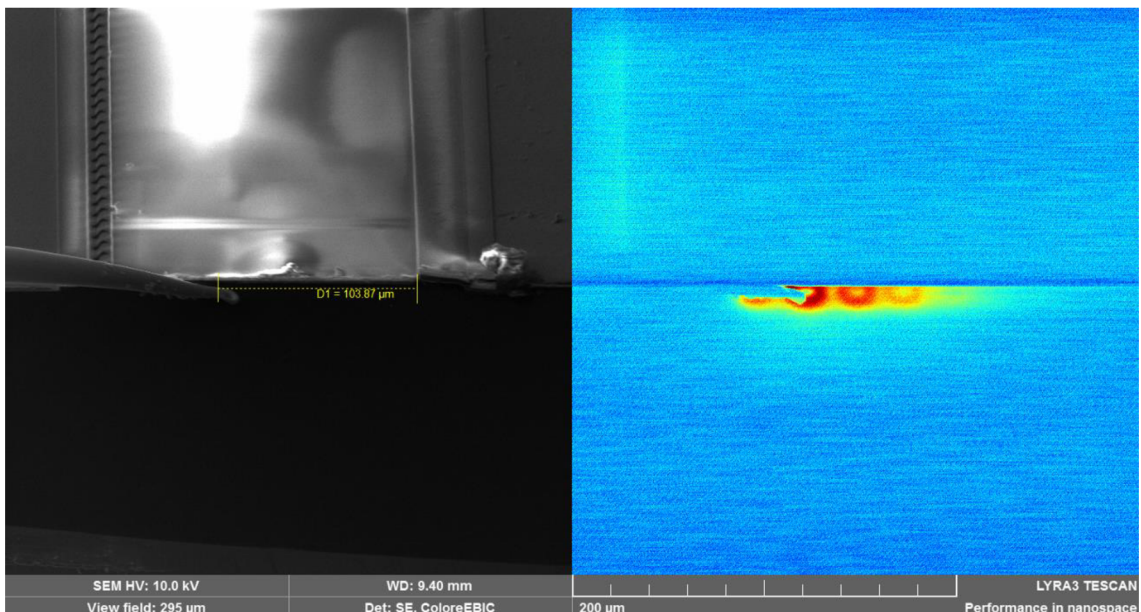
Graf 3: Horizontálny profil P-prstencov, čip 01.

Pri čipe 1 boli merané jednotlivé horizontálne profily pri kontaktovaní rôznych prstencov. Z týchto profilov bol potom vybratý najlepší (Graf 3). Tento profil je meraný bez aplikovaného napätia na stranách prechodu, pretože ak bolo aplikované napätie, dochádzalo k prekročeniu maximálneho prúdu, ktorý môže tiecť použitým ampérmetrom.



Graf 4: Horizontálny profil P-prstencov, čip 05.

Pre čip 5 už nebolo možné urobiť profil bez predpätia, preto je prsteneček, ktorý je v kontakte s nanomanipulátorom omnoho intenzívnejší (Graf 4).



Obrázok 96: SEM zobrazenie a EBIC Čipu 5, meranie s predpätím.

4.2.4 Vyhodnotenie nameraných údajov

Z takto nameraných profilov intenzity indukovaného prúdu je možné určovať základné rozmerové parametre jednotlivých prstencov po ukončení výrobného procesu. Tieto parametre sú odlišné od rozmerov na maske, cez ktorú sa tieto prstence implantujú. Implantovaním vznikajú plytké vrstvy s vysokou koncentráciou dopantov, ktoré nie sú úplne vhodné pre funkciu okrajovej terminácie. Preto po implantácii nasleduje krok žihania, pri ktorom sa kremiková doska zahreje na vysokú teplotu, aby došlo k rozdifundovaniu nainplantovaných vrstiev. Tento krok je citlivý na variácie teploty a času. Pri príliš dlhom žihaní na správnej teplote dôjde k spojeniu jednotlivých P prstencov. K spojeniu P-prstencov dôjde aj pri aplikácii príliš vysokej teploty.

Preto je dôležité poznať rozmery P prstencov po ukončení výrobného procesu. Jediný rozmer, ktorý sa po žihaní nemení je rozstup prstencov, tento rozmer sa zachováva. Z nameraných údajov bolo možné spoľahlivo určiť rozmery len pre prstence čipu 3, pretože pri čipoch 1 a 5 nie je zjavné, kde sú prechody medzi jednotlivými prstencami, poprípade sú intenzity tak slabé, že nie je možné s istotou povedať kde sa nachádzajú.

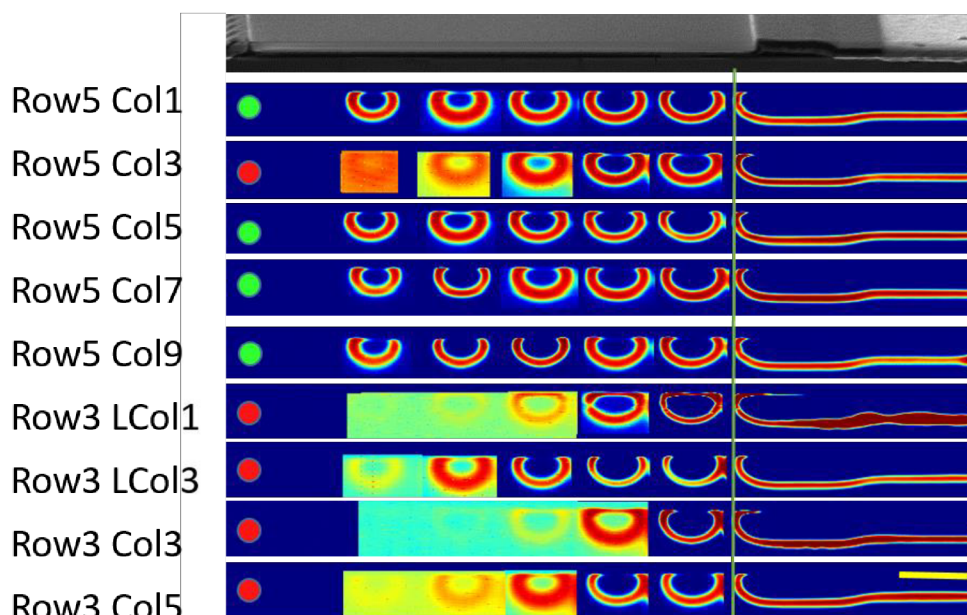
Zistené rozmery prstencov pre čip 3 sú zhrnuté v tabuľke 3.

Tabuľka 3: Parametre P prstencov čipu 03.

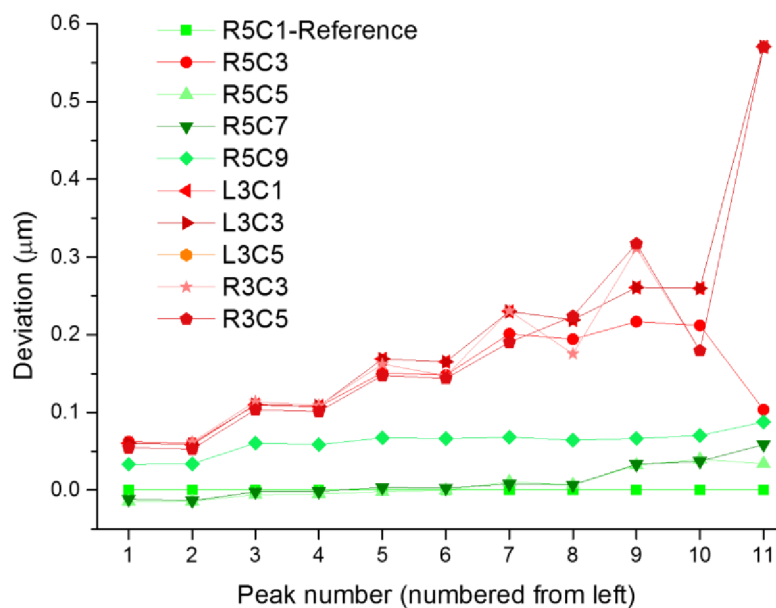
Prstenec	Zmeraná šírka	Zmeraná hĺbka
0	12.8 μm	8.9 μm
1	14.3 μm	9 μm
2	14.8 μm	9.5 μm
3	15.5 μm	9.2 μm
4	16.8 μm	9.3 μm
5		8.9 μm

Z údajov je zjavné, že hĺbka je približne konštantná pre všetky prstence. Výsledná šírka je závislá na šírke okna na maske. Zväčšenie šírky nie je konštantné pri prstencoch, z čoho sa dá vyvodiť záver, že prstence so širokým oknom na maske majú v závere procesu vyššiu koncentráciu dopácie.

Neskôr boli ešte merané čipy, ktoré sú označené zelene. Z týchto dát je sem dané len výsledné porovnanie dobrých (zelené) a zlých (červené) čipov. Ako porovnávací faktor bola zvolená odchýlka nameranej polohy od polohy na referenčnom čipe, výsledky sú v grafe 5. Z určených hodnôt odchýlky je vidieť, že odchýlka polohy pri zlých čipoch sa postupne zväčšuje, čo môže mať za následok zvyšovanie zvodového prúdu. Dáta zo signálu EBIC sú pre porovnanie zobrazené na obrázku 97.



Obrázok 97: Porovnanie signálu EBIC pre merané čipy. Kontrast jednotlivých prstencov bol lokálne optimalizovaný pri zisavani obrazu. Výsledný obraz je zložený z jednotlivých výrezov, ktorých absolútna poloha je zachovaná. Žltá úsečka v pravej strane posledného čipu je dĺžky 20 μm .



Graf 5: Porovnanie odchýlky polohy maxim signálu EBIC dobrých (zelené) a zlých (červené) čipov. Čip označený ako referenčný je použitý pre určovanie odchýlky jednotlivých prstencov pre ostatné čipy.

5 Záver

Cieľom tejto práce bolo priblížiť činnosť IGBT tranzistorov a analyzovať vybrané prvky TIGBT tranzistorov vyrábaných spoločnosťou On Semiconductor. Analyzovanými prvkami boli metalizácie a okrajová ukončovacia štruktúra. Zvolené meracie metódy sa bežne v priemysle nepoužívajú. Boli volené ako skúšanie alternatívnych metód pre pozorovanie skúmaných častí čipov.

Skúmané vzorky úzko súviseli s výrobou TIGBT čipov v On Semiconductor. V prvej rade experimentov boli skúmané metalizácie nanášané na čipy. Tieto metalizácie pochádzali z dvoch používaných strojov s použitím rozličných aplikačných parametrov. Merania boli robené pomocou metódy TOF-SIMS. Túto metódu bolo výhodné použiť z niekoľkých dôvodov, jej prednou výhodou je, že je možné pozorovať materiálové zloženie vzoriek a skúmať objem vzorky. Z nameraných údajov je možné povedať, že oba stroje dávajú pri použití rovnakých parametrov približne rovnaké vrstvy. Dobré je to vidieť na 3D hĺbkových profiloch vzoriek 7 zo splitu 1 a vzorky 5 zo splitu 2. Vo výsledku je teda možné jednotlivé stroje zameniť.

Druhá rada meraní sa týka okrajových ukončovacích štruktúr. Cieľom bolo zistiť príčinu vysokých zvodových prúdov, najpravdepodobnejším dôvodom bol práve tvar a poloha prstencov okrajovej ukončovacej štruktúry. Pre meranie bola zvolená netradičná metóda pre pozorovanie takýchto štruktúr a to metóda EBIC. Typicky sa takéto štruktúry pozorujú pomocou selektívneho leptania P a N polovodiča v kyseline, ale presnosť určenia polohy touto metódou nie je v tomto prípade dostatočná. Výsledky metódy EBIC ukazujú, že je možné túto metódu použiť pre meranie polohy prstencov okrajovej ukončovacej štruktúry. Každopádne bude potrebná optimalizácia meracieho procesu, pre dosiahnutie konzistentných výsledkov na veľkom množstve vzoriek. Jednou z nevýhod tejto metódy je problematické kontaktovanie pomocou nanomanipulátorov.

6 Literatúra

- [1] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 1-8.
- [2] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2008 ed., Springer, 2008, p. 737.
- [3] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 426- 427.
- [4] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 428.
- [5] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor devices, 2008 ed., Springer, 2008, p. 745.
- [6] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2008 ed., Springer, 2008, p. 748.
- [7] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 428-431.
- [8] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2008 ed., Springer, 2008, pp. 741-745.
- [9] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 431-434.
- [10] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 433.
- [11] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2008 ed., Springer, 2008, p. 777.
- [12] J. B. Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 2008 ed., Springer, 2008, p. 816.
- [13] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 444.
- [14] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 434-446.
- [15] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 496.
- [16] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, pp. 496-498.
- [17] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 92.
- [18] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 99.
- [19] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing Co., 1995, p. 99.
- [20] J. B. Baliga, Power Semiconductor Devices, Boston, Massachusetts: PWS Publishing, 1995, pp. 81-102.
- [21] L. Ptáček, Nauka o materiálu II, Brno: CERM, 2002, p. 396.

- [22] J. Murray a A. McAlister, „The Al-Si (Aluminium-Silicon) System,“ Springer US, National Bureau of Standards, 1984.
- [23] H. Kaya, „Dependence of electrical resistivity on temperature and composition of Al-Cu alloys,“ *Materials Research Innovations*, zv. 16, %1. vyd.3, 2012.
- [24] „Quantification of Thermal Resistance of Transient-Liquid-Phase Bonded Cu/Al/Cu Interfaces for Assembly of Cu-Based Microchannel Heat Exchangers,“ *Journal of Micro and Nano-manufacturing*, The American Society of Mechanical Engineering Digital Collection, 2013.
- [25] „Precipitation Hardening of Aluminium Alloys,“ Total Materia, 2010.
- [26] P. van der Heide, Secondary Ion Mass Spectrometry, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014, p. 302.
- [27] P. van der Heide, Secondary Ion Mass Spectrometry, Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2014, p. 167.
- [28] L. Reimer, Scanning Electron Microscopy, Second ed., H. K. V. Lotsch, Ed., Heidelberg, Germany: Springer-Verlage, 1998, p. 154.
- [29] L. Reimer, Scanning Electron Microscopy, Second ed., H. K. V. Lotsch, Ed., Heidelberg, Germany: Springer-Verlage, 1998, pp. 253-273.
- [30] „IONTOF TOF SIMS 5,“ IONTOF, 16 May 2016. [Online]. Available: https://www.iontof.com/download/IONTOF_TOF-SIMS_5_Brochure.pdf.

7 Zoznam skratiek

IGBT	insulated gate bipolar transistor- bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
EBIC	electron beam induced current- prúd indukovaný elektrónovým zväzkom
TOF- SIMS	time of flight secondary ion mass spectroscopy- hmotnostná spektroskopia sekundárnych iónov pomocou doby letu
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor-
DC	direct current- jednosmerný prúd/ napätie
AC	alternating current- striedavý prúd/ napätie
MOS	metal oxide semiconductor
DMOS	double-diffused metal-oxide-semiconductor, most power MOSFETs are made using this technology- dvojito rzodifundovaná MOS štruktúra, väčšina MOSFET tranzistorov sa vyrába touto technológiou
UMOS	MOS s hradlom v tvare písmena U, často označovaný aj ako trench MOS
OPN	Oblasť priestorového náboja
JFET	junction field effect transistor
LMIG	liquid metal ion gun
DUO	douplasmatron
UHV	ultra high vacuum- ultra vysoké vákuum
FIB	focused ion beam- fokusovaný iónový zväzok
GIS	gas injection system- systém vstrekovania plynov
SEM	scanning electron microscope- skenovanie elektrónový mikroskop
A	ampér
V	volt
W	watt
Hz	hertz
s	sekunda
Pa	pascal
nm	nanometer
μm	mikrometer
N	polovodič so slabou negatívnou dopáciou
N ⁺	polovodič so silnou negatívnou dopáciou
P	polovodič so slabou pozitívnou dopáciou
P ⁺	polovodič so silnou pozitívnou dopáciou
J _i	Junction _i - prechod _i
PNP	bipolárny tranzistor typu PNP
NPN	bipolárny tranzistor typu NPN