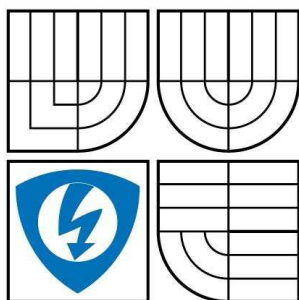


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘENÍ LOKÁLNÍCH CHARAKTERISTIK PASIVNÍCH ELEKTRICKÝCH SOUČÁSTEK

MEASUREMENT OF LOCAL CHARACTERISTICS OF PASSIVE ELECTRICAL DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

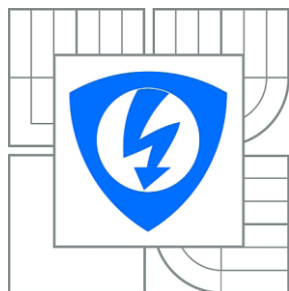
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK ŠIKULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Radek Šikula

ID: 115284

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření lokálních charakteristik pasivních elektrických součástek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Bakalářská práce bude zaměřena na studium a měření lokálních charakteristik pasivních elektrických součástek.

Základní úkoly práce jsou:

1. Vypracovat přehled existujících elektrických a optických metod lokální charakterizace součástek.
2. Popsat činnost experimentálního zařízení - sestavy pro elektrické a optické měření, zejména skenovacích sondových mikroskopů.
3. Provést prvotní elektrická a optická měření lokálních vlastností vybraných součástek.
4. Shrnout výhody a nevýhody studované metody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Metody analýzy povrchů. Iontové, sondové a speciální metody, FRANK, L., KRÁL, J., (Eds.), Academia, Praha, 2002, ISBN: 978-80-200-0594-3
- [2] GOSER, K., GLÖSEKÖTTER, P., DIENSTUHL, J., Nanoelectronics and Nanosystems, Springer-Verlag, Berlin, 2004, ISBN: 978-3-540-40443-0
- [3] TOMÁNEK, P., Nanotechnologie a optická nanometrologie, Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv.24, VUTIUM Brno, 2000, ISBN: 80-214-1589-4

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na nově koncipované lokální měření charakteristik elektrických, případně optoelektrických součástek. S tím, jak se dle Moorova zákona zmenšují rozměry aktivních součástek na čípech, existují i snahy o odpovídající zmenšování pasivních elektrických součástek, při současném zvyšování, nebo alespoň zachování jejich parametrů. Ukazuje se, že problémy zmenšování jsou spojeny s existencí fyzikálních mezí použitých materiálů a konec konců i s nemožností měření lokálních vlastností součástek pomocí klasických elektrických měřicích metod. Právě v oblasti fyzikálních mezí začínají být vážným problémem defekty v materiálech, které při malých rozměrech součástek mohou značně ovlivnit účinnost, výkon, životnost a spolehlivost zařízení.

Měření provedená na pasivních i aktivních součástkách vykazují vyšší rozlišovací schopnost defektů na povrchu vybraných součástek než umožňují stávající metody.

1) Z výsledků měření na kondenzátorech vyplývá, že existuje několik možných příčin, proč u nich dochází k průrazům, např. mechanické defekty, nebo přítomnost nečistoty či krystaly oxidu v dielektriku.

2) Měření provedená na fotodiodě umožnila zviditelnit proud minoritních nosičů a zobrazit jejich dobu života. Navíc se ukazuje, že doba života minoritních nosičů pochází hlavně z objemová rekombinace.

Klíčová slova

elektrické součástky, charakterizace, lokální měření, sondové skenovací mikroskopy

Abstract

Bachelor thesis is focused on the newly conceived local measurement of electrical or photoelectric devices characteristics. According to Moore's law dimensions of active components on the chips diminish. Therefore effort to obtain corresponding reduction of passive electrical components, while improving, or at least maintain their parameters, is also challenged. It turns out that the problems associated with device reducing are connected with existence of physical limits of materials, and ultimately with the impossibility to measure local properties of electrical components using conventional electric methods. Especially in the range of physical limits, a serious problem of defects in materials appears. Due to that the small size components can greatly affect the efficiency, performance, durability and reliability of devices.

Measurements made on the passive and active components show a higher resolution of defects on the surface of selected parts than current methods allow.

1) It follows from the results of measurement on capacitors that there are several possible reasons why breakdowns occur, e.g. mechanical defects or the presence of impurities and/ or oxide crystals in the dielectric.

2) Measurements taken at a photodiode allowed visualize minority carriers current, and view their lifetime. Moreover, they also show that the minority carrier lifetime comes mainly from bulk recombination.

Keywords

electrical components, characterization, local measurement, scanning probe microscopes

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ŠIKULA, R. *Měření lokálních charakteristik pasivních elektrických součástek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 32 s.
Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření lokálních charakteristik pasivních elektrických součástek“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2011

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. Pavlu Tománkovi, CSc. z Ústavu fyziky FEKT VUT za jeho vstřícný přístup, cenné rady a velkou ochotu konzultovat všechny mé poznatky.

Dále bych rád poděkoval Prof. RNDr. Ing. Josefu Šikulovi, DrSc. a Ing. Pavlu Škarvadovi za ochotu, s jakou mě nasměrovali do měření a interpretace výsledků.

OBSAH

Seznam obrázků a tabulek	6
Abecední seznam použitých zkratk:	7
1 ÚVOD	8
2 SPM – SKENUJÍCÍ SONDOVÉ MIKROSKOPY	10
2.1 STM – skenující tunelová mikroskopie.....	11
2.1.1 Tunelový jev.....	11
2.1.2 Princip měření	11
2.1.3 Konstrukce STM	12
2.2 AFM – MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL	13
2.2.1 Princip AFM.....	13
2.2.2 Konstrukce AFM.....	13
2.3 SNOM – optická skenovací mikroskopie v blízkém poli.....	16
2.3.1 Úvod.....	16
2.3.2 Princip SNOM.....	16
2.3.3 Popis mikroskopu.....	16
3 SVĚTLEM INDUKOVANÝ FOTOPROUD - LBIC (Light Beam Induced Current)	18
3.1 Rekombinační procesy	19
3.1.2 Měření doby života.....	20
3.1.5 Metoda měření z difúzní délky.....	20
3.1.6 Metoda fotovodivostního poklesu (PCD)	21
4 ELEKTRICKÉ SOUČÁSTKY	22
4.1 Kondenzátory	22
4.1.1 Princip kondenzátoru.....	23
4.1.2 Základní vlastnosti kondenzátoru.....	23
4.1.3 Multivrstvý keramický kondenzátor	24
4.2 Fotodiody.....	24
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	25
5.1 Kondenzátor	25
5.2 Fotodiody.....	28
6 ZÁVĚR.....	30
7 LITERATURA.....	31

Seznam obrázků a tabulek

Tab. 1.1: Porovnání a vlastnosti různých typů mikroskopů	8
Obr. 1.1: Nejlepší dosažená rozlišovací schopnost jednotlivých metod	9
Obr. 2.1: Sestava sondového mikroskopu	10
Obr. 2.2: Potenciálový val	11
Obr. 2.3: Princip skenování povrchu	13
Obr. 2.4: Rozložení sil u dotykového a bezdotykového režimu měření	13
Tab. 2.1: Provozní režimy	14
Obr. 2.5: Zobrazení hrotu v různých pracovních režimech. a) dotykový b) bezdotykový c) poklepový	14
Obr. 2.6: Měření výchylky raménka pomocí STM systému	15
Obr. 2.7: Kapacitní metoda měření výchylky	15
Obr. 2.8: Měření ohybu raménka pomocí výchylky laserového svazku	15
Obr. 2.9: Stavebnicový mikroskop	17
Obr. 3.1: Druhy signálů a jevů při dopadu světelného paprsku v LBIC metodě	18
Obr. 3.2: Základní faktory ovlivňující LBIC signál	19
Obr. 4.1: Rozdělení kondenzátorů	22
Obr. 4.2: Řez multivrstvého keramického deskového kondenzátoru	24
Obr. 5.1: Řez multivrstvým keramickým kondenzátorem (zvětšení 45×)	25
Obr. 5.2: Základní mechanismy průrazu	26
Obr. 5.3: Lokální obraz povrchu multivrstvého keramického deskového kondenzátoru a) 2D zobrazení, b) 3D zobrazení	26
Obr. 5.4: Lokální topografie řezu proraženého kondenzátoru	27
Obr. 5.5: SNOM obraz kontrastů indexů lomu z vadné oxidové vrstvy	27
Obr. 5.6: Fotodioda BPW34, fotoproud v LBIC	28
Obr. 5.7: Vizualizace doby života minoritních nosičů (fotodioda BPW34)	29

Abecední seznam použitých zkratk:

- AFM** – Atomic Force Microscopy (mikroskopie atomárních sil)
- EDS** – Energy-Dispersive Spectroscopy (spektroskopie disperzní energie)
- FESEM** – Field-Emission Scanning Electron Microscopy (studenoeemisní skenovací elektronová mikroskopie)
- EQE** – External Quantum Efficiency (vnější kvantová účinnost)
- IQE** – Internal Quantum Efficiency (vnitřní kvantová účinnost)
- LBIC** – Light Beam Induced Current (indukovaný fotoproud)
- LED** – Light-Emitting Diode
- RBS** – Rutherford Backscattering Spectroscopy (spektroskopie pomocí Rutherfordova zpětného rozptylu)
- SIMS** – Secondary Ion Mass Spectrometry (sekundární iontová hmotnostní spektrometrie)
- SNOM** – Scanning Near-field Optical Microscopy (skenování optická mikroskopie v blízkém poli)
- SPM** – Scanning Probe Microscopy (skenování sondová mikroskopie)
- STM** – Scanning Tunneling Microscopy (skenování tunelová mikroskopie)
- TEM** – Transmission Electron Microscopy (transmisní elektronová mikroskopie)
- XPS** – X-ray Photoelectron Spectroscopy (spektroskopie pomocí rentgenových fotoelektronů)

1 ÚVOD

Žijeme v 21. století, v době, která nám nabízí nejrůznější možnosti technického rozvoje od aplikací výpočetní techniky, přes moderní léčebné metody až po cestování do vesmíru. Dokonalejší a výkonnější technika se vyvíjí s tím, jak se rozšiřují hranice poznání člověka. Od poloviny 20. století se stala aktuální oblast nanotechnologií, která pracuje s nanostrukturami a snaží se sestavit zařízení na molekulární úrovni, tak jak to od pradávna dělá samotná příroda.

S tím, jak se dle Moorova zákona zmenšují rozměry aktivních součástek na čípech, existují i snahy o odpovídající zmenšování pasivních elektrických součástek, při současném zvyšování, nebo alespoň zachování jejich parametrů [1].

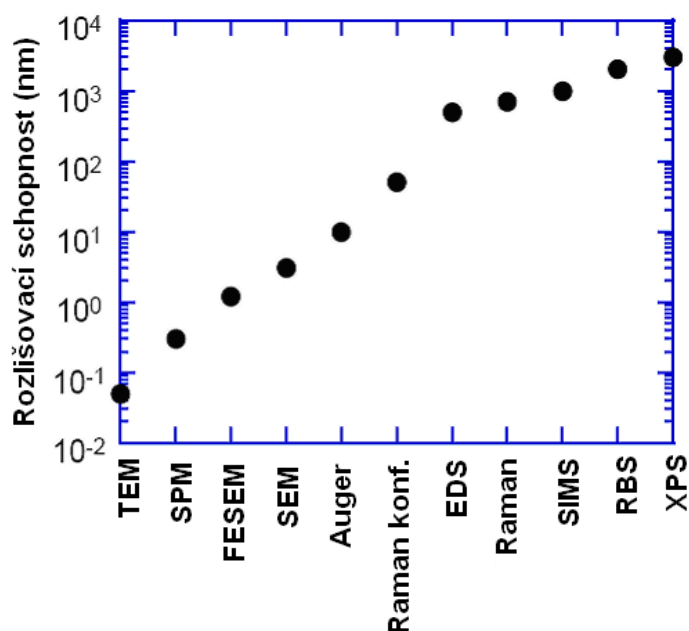
Ukazuje se, že problémy zmenšování jsou spojeny s existencí fyzikálních mezí použitých materiálů a konec konců i s nemožností měření lokálních vlastností součástek pomocí klasických elektrických měřicích metod. Právě v oblasti fyzikálních mezí začínají být vážným problémem defekty v materiálech, které při malých rozměrech součástek mohou značně ovlivnit účinnost, výkon a životnost zařízení. Proto je velmi důležité provádět lokální měření.

Mnohé z charakterizačních technik, které se vyvíjejí v posledních 30 letech, byly postupně adaptovány na malé rozměry součástek. Některé z nich, např. vysoce specializované TEM a SEM, se staly celkem běžnými nástroji v materiálovém výzkumu. Další, tj. sondové, mikroskopy využívají různých typů interakce (elektrické, silové, optické, tepelné, magnetické, atd.) mezi sondou a měřeným vzorkem k měření velmi malých veličin. Umožňují také měřit topografii povrchů ve všech třech rozměrech: X, Y a Z. X a Y topografické rozlišení pro většinu SPM, včetně AFM, je obvykle 2 až 10 nanometrů (STM rozlišení může být i 0,1 nm). Rozlišení ve směru Z je 0,1 nm jak pro AFM tak i STM [2].

Tab. 1.1: Porovnání a vlastnosti různých typů mikroskopů (podle [2])

	optický mikroskop	SEM	SPM
Prostředí kolem vzorku	vzduch, kapalina nebo vakuum	vakuum	vzduch, kapalina nebo vakuum
Hloubka pole	malá	velká	střední
Ohnisková hloubka	střední	velká	malá
Rozlišení: X, Y	200 nm	5 nm	2-10 nm u AFM 0,1 nm u STM
Rozlišení: Z	-	-	0,05 nm
Efektivní zvětšení	$1 \times - 2 \cdot 10^3 \times$	$10 \times - 10^6 \times$	$5 \cdot 10^2 \times - 10^8 \times$
Příprava vzorku	snadná, malá	nepodstatná	malá nebo žádná
Vlastnosti požadované na vzorek	Vzorek nesmí být zcela transparentní pro světlo používané vlnové délky	Povrch nesmí vytvářet povrchové náboje a musí být vhodný pro vakuum	Vzorek musí být téměř rovinný (změny výšky max 10 μm)

Příčná rozlišovací schopnost, kterou jsou schopné vybrané metody dosáhnout, je graficky znázorněna v obr. 1.1 (podle [3]).



Obr. 1.1: Nejlepší dosažená rozlišovací schopnost jednotlivých metod

Bakalářská práce je uspořádána následovně:

Kapitola 2 krátce shrnuje přehled skenovacích sondových mikroskopů a jejich pracovních režimů. Kapitola 3 se zabývá moderní metodou měření světlem indukovaných fotoproudů a teoreticky popisuje rekombinační procesy.

Kapitola 4 popisuje vlastnosti pasivních elektrických součástek (kondenzátorů) a aktivních optoelektronických součástek (fotodioda), na nichž probíhalo ověření možností měření lokálních charakteristik pomocí skenovacích sondových mikroskopů.

V kapitole 5 jsou uvedeny výsledky vlastního měření. V první části kapitoly je demonstrován potenciál měření na vzorku deskového kondenzátoru a je popsáno měření elektricky poškozeného kondenzátoru za účelem případného odhalení změny struktury dielektrika vlivem jeho proražení. V druhé části je potom provedeno měření a zviditelnění indukovaného fotoproudu ve fotodiodě a měření doby života minoritních nosičů.

Kapitola 6 přináší závěrečné zhodnocení bakalářské práce a přináší výhledy pro aplikace těchto moderních metod pro charakterizaci materiálů, struktur a součástek. V sedmé kapitole je pak uvedena použitá literatura a zdroje.

2 SPM – SKENUJÍCÍ SONDOVÉ MIKROSKOPY

K tomu, abychom mohli odpovídajícím způsobem měřit součástky v mikro či nanorozměrech, je třeba použít nové nástroje. Příkladem jsou skenovací sondové mikroskopy [2-7]. Ty slouží k zobrazení povrchu látek pomocí fyzické sondy, která se pohybuje v přímém nebo těsném (tzv. blízkém) kontaktu s povrchem měřené látky. Sonda zde vlastně svým pohybem obkresluje povrch vzorku, pro kontrolu její vzdálenosti od povrchu využívají jednotlivé typy mikroskopů různé druhy interakce sonda-vzorek. K získání charakteristiky celého povrchu je nutné touto sondou pohybovat a provádět postupně měření v jednotlivých bodech a to buď v:

- **bezkontaktním režimu**, kde je měřen proud, přitažlivá nebo odpuzivá síla, příp. posun sondy
- **kontaktním režimu**, kde raménko s hrotem je velmi malou silou přiloženo k povrchu a pohybem je snímán pohyb raménka.

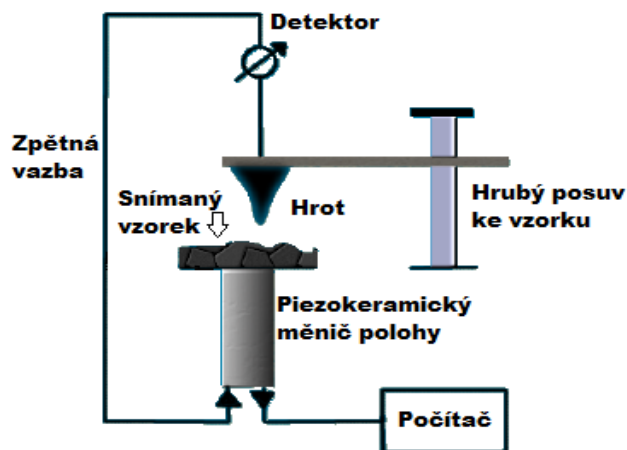
Pomocí této zdánlivě jednoduché metody, lze dosáhnout velmi vysokého rozlišení a to až na atomární úrovni. SPM dosahují zvětšení $10^8 \times$. Je to ale závislé na mnoha faktorech, které toto rozlišení určují, např. potřebujeme velmi ostrý hrot (nejlépe jeden atom na špičce hrotu), zvolit správný skenovací krok, vzdálenost sondy od vzorku a také odrušit všechny nežádoucí vibrace.

Nejčastěji používané typy SPM, které využívají tunelování nebo interakce v blízkém poli, jsou:

- STM – skenující tunelový mikroskop
- AFM – mikroskop atomárních sil
- SNOM – optický mikroskop blízkého pole.

Základní složení většiny SPM tvoří (obr. 2.1):

1. Měníč polohy- zajišťuje pohyb (v rovině xy) a vzdálenost z hrotu od povrchu vzorku. Pro posun se používají piezokeramické měniče.
2. Snímací sonda- tvořena ostrým hrotem, liší se podle typu použité mikroskopie
3. Detektor – snímá měřený proud nebo posuv, popř. odražený světelný paprsek od sondy
4. Počítač – pro analýzu a zpracování snímaného objektu.



Obr. 2.1: Sestava sondového mikroskopu

2.1 STM – skenující tunelová mikroskopie

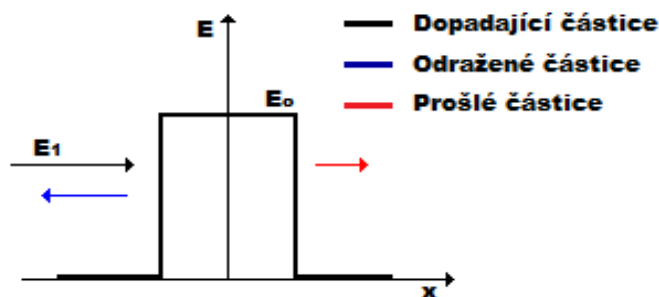
Je to metoda založená na tunelování elektronů, které se objeví mezi vodivým (kovovým) hrotem a vodivým vzorkem [2,3]. Proto je nutné přiblížit hrot k povrchu vzorku na vzdálenost několika nanometrů. Při přiblížení dochází k tunelování elektronů z měřeného povrchu do snímací sondy. Velikost tunelového proudu je dána tvarem sondy a povrchu a vzdáleností sondy od povrchu.

2.1.1 Tunelový jev

Tunelový jev je typickým příkladem vlnových vlastností částic [8]. Uvažujme částici, která má překonat nějakou překážku - dostat se např. přes svah či z nějaké (potenciálové) jámy. Z klasické fyziky víme, že je to možné pouze tehdy, pokud bude mít částice dostatečně velkou energii.

Vlny se ale na rozdíl od částic mohou dostat díky ohybu i za překážku a pokračovat v dalším šíření prostorem. Mikročástice podle zákonů kvantové fyziky mohou skutečně proniknout bariérou, aniž by k tomu měli dostatečnou energii - mohou se „protunelovat“ a najednou se ocitnout za překážkou.

Uvažujme částici s energií E_1 , která se blíží k potenciálovému valu, jehož „výška“ je E_0 , přičemž $E_0 > E_1$. To znamená, že klasicky je k překonání valu nutné, aby částice měla energii minimálně E_0 (schematicky znázorněno na obr. 2.2). Tímto potenciálovým valem ve skutečnosti je např. kovová destička, silové pole, povrch vodiče, „hranice“ atomového jádra. Většina částic s energií E_1 se od valu odrazí zpět (na obr. 2.2 je relativní množství odražených a prošlých částic znázorněno různě dlouhými šipkami). V klasické fyzice, by se do prostoru za valem nedostala žádná částice.



Obr. 2.2: Potenciálový val

V kvantové interpretaci existuje nenulová pravděpodobnost nalezení částice i za potenciálovým valem. To znamená, že částice se na druhou stranu valu dostala, přestože její energie je nižší než je energie nutná na překonání potenciálového valu. Částice se tedy na druhou stranu valu „protunelovala“.

2.1.2 Princip měření

Vlastní měření probíhá tak, že se nejprve provede hrubý posuv vzorku ke hrotu (ve směru z). Poté dojde k přiložení napětí mezi hrot a vodivý vzorek, aby mohl procházet proud a poté se jemným posuvem (pomocí piezokeramiky) přiblíží vzorek ke hrotu tak, aby procházející proud

nabyl měřitelných hodnot (řádově nA). Získání obrazu (skenování) se provádí posunem hrotu po řádcích v jednom směru.

V mikroskopu lze získat obraz povrchu dvěma způsoby:

1. Režim konstantní výšky, ve které se hrot pohybuje v rovině xy rovnoběžné s povrchem vzorku a měnicí se měřený proud vytváří výsledný obraz. Pro udržení proudu v měřitelném rozsahu, kde výška nerovností nepřesáhne určitou hranici, je tento režim vhodný jen pro velmi rovné povrchy. Proto se tento režim téměř nepoužívá a více používaným je následující druhý způsob, který tyto nevýhody odstraňuje.
2. Režim konstantního proudu, u kterého je při snímání povrchu udržován konstantní proud změnou polohy sondy ve směru z pomocí piezoelektrických měničů. Hrot při rastrování kopíruje povrch a změny řídicího napětí na piezoměniči jsou použity při zobrazení

2.1.3 Konstrukce STM

Základní částí STM je hrot, který je spojený s měničem polohy.

V minulosti se používaly hroty ustřižené z vodivého drátku, které dosahovaly rozlišení asi 1 nm. Ke zvýšení rozlišení už ale nepostačoval nesymetrický tvar, u kterého nebyla známá jeho povrchová struktura. Proto se začali připravovat hroty např. pomocí chemického leptání v různých roztocích, které ještě hrot zbavili nečistot. Nejčastěji jsou používané hroty z drátů wolframu nebo slitiny platiny a iridia. Ideální hrot by měl tedy být čistý, zakončený na špičce jedním atomem a dostatečně tuhý.

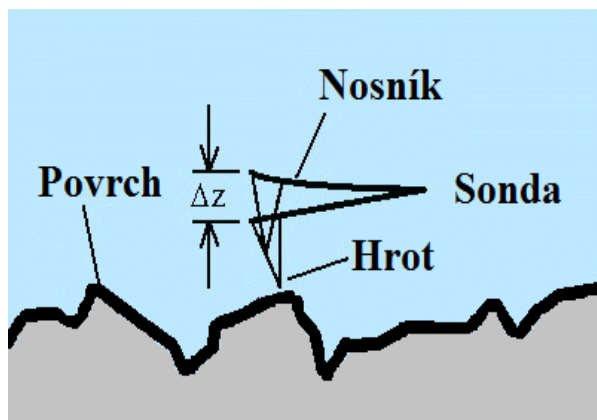
Měnič polohy je nejčastěji tvořen piezokeramickými prvky. Používané piezokeramické měniče jsou různých typů, např. trojnožka, trubkové měniče, kříž. Vzhledem ke svým vlastnostem (vysoký rezonanční kmitočet, rozsah, pevnost) jsou poměrně univerzální trubkové měniče. Jsou složeny z vnitřní elektrody a vnější elektrody, která je rozdělena na 4 symetrické části, přičemž protilehlé elektrody tvoří pár se stejným napětím. Změnou tohoto napětí dochází k ohybu měniče nebo k protažení trubičky.

2.2 AFM – MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL

Hlavní výhodou AFM oproti technice STM je, že nemusí být měřený povrch dobře vodivý, ale je tato technika vhodná i na nevodivé materiály [2,3]. Měření může probíhat ve vzduchu, kapalině či ve vakuu.

2.2.1 Princip AFM

Metoda je založena na měření sil atomárního původu, které působí mezi atomy hrotu a vzorku. Ostrý hrot je umístěn na konci pružného raménka s velmi malou tuhostí (menší než je tuhost meziatomových vazeb) a působící síly toto raménko vychylují (obr. 2.4.). Pomocí detektoru je toto vychylování zaznamenáváno a poté sestaven obraz povrchu. Pro toto měření lze použít systém STM. Síly, které raménko ohýbají, mohou být různého charakteru, nejčastěji se jedná o přitažlivou van der Waalsovu sílu, která působí ve větší vzdálenosti raménka od vzorku nebo odpudivou sílu plynoucí z Pauliho principu. Tato síla se projevuje při menších vzdálenostech.



Obr. 2.3: Princip skenování povrchu [2]



Obr. 2.4: Rozložení sil u dotykového a bezdotykového režimu měření [3]

2.2.2 Konstrukce AFM

Konstrukce je velmi podobná STM a s minimálními úpravami jsou převzata různá technická řešení pro polohování vzorku a hrotu, rastrování, zpětnou vazbu, potlačení nežádoucích vibrací a zpracování obrazu. Bylo ale nutné nově vyřešit způsob měření výchylky raménka. U AFM je pohybováno se vzorkem než mechanicky citlivým raménkem, na rozdíl od STM, kde tomu je naopak.

a) Snímací sonda

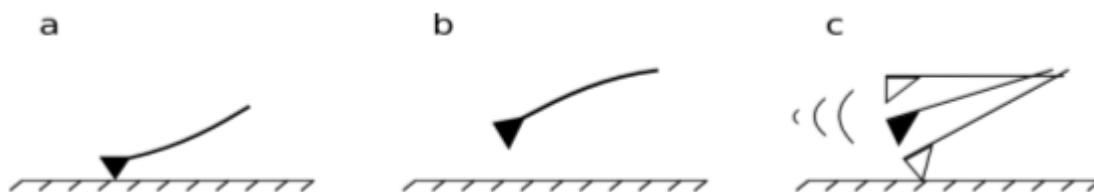
Snímací sonda je nejdůležitější součástí AFM. Specifickými vlastnostmi je, že její raménko musí mít velmi malou tuhost, aby bylo možné změřit působení atomárních sil a zároveň musí mít co největší rezonanční kmitočet (více jak 10 kHz). Rychlost sběru dat totiž úměrně závisí na tomto rezonančním kmitočtu.

Jak je uvedeno výše, musí mít raménko velmi malou tuhost a to ve směru kolmém k povrchu, naopak ve směru rovnoběžném je nutné z důvodu působících laterálních sil zajistit vysokou tuhost raménka. Velkou laterální tuhost zajistíme výběrem raménka ve tvaru „X“ a „V“.

AFM může pracovat v několika režimech, které se liší v závislosti na síle mezi hrotem a povrchem (tab.2.1 a obr.2.5.):

Tab. 2.1: Provozní režimy

<u>Provozní režim</u>	<u>Síla interakce</u>
Kontaktní režim	Silná (odpudivá) – konstantní síla nebo konstantní vzdálenost
Bezdotykový režim	Slabá (přitažlivá) – vibrační sondy
Přerušovaný kontaktní režim	Silná (odpudivá) – vibrační sondy
Boční síly	Třecí síly působí točivý moment na raménku
Magnetická síla	Zobrazení magnetického pole na povrchu
Termální skenování	Zobrazení rozložení tepelné vodivosti



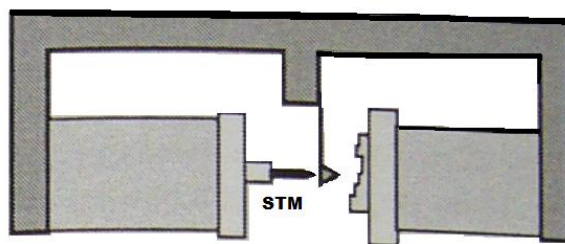
Obr. 2.5: Zobrazení hrotu v různých pracovních režimech. a) dotykový b) bezdotykový c) poklepový [4]

b) Měření výchylky raménka

Existuje několik odlišných technik měření malých výchylek raménka. Dále budou popsány 3 metody, kde ta poslední technika měření pomocí laserového paprsku je velmi jednoduchá a přesná.

1. Měření výchylky raménka pomocí STM systému

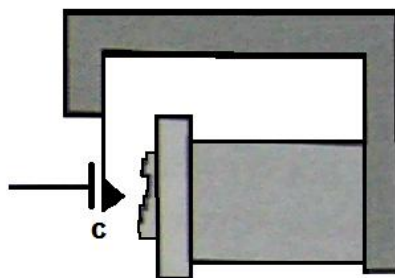
U tohoto měření se použije systém STM. Měří se tunelový proud, který protéká mezi zadní vodivou stěnou raménka a hrotem (obr. 2.6). Toto měření není ale dost přesné a závisí na drsnosti zadní strany raménka a na jeho čistotě. Je také nutné použít režim konstantního proudu, čímž odstraníme vliv silového působení hrotu na raménko.



Obr. 2.6: Měření výchylky raménka pomocí STM systému

2. Kapacitní metoda měření výchylky

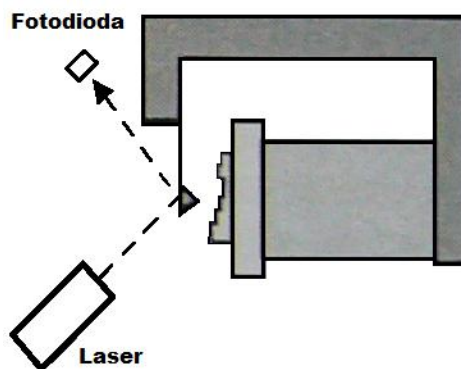
Na mikroskopu je jedna pevná elektroda, druhá je tvořena pokovením raménka a dohromady tvoří kondenzátor, jehož kapacita se mění ohnutím raménka. Piezokeramický měnič řízený zpětnovazební elektronikou udržuje zvolenou konstantní kapacitu. Řídicí signál měniče je pak úměrný působící síle a z tohoto signálu je sestaven obraz měřeného povrchu. Konstrukce je velmi jednoduchá a lze tak vytvořit velmi kompaktní zařízení (obr. 2.7).



Obr. 2.7: Kapacitní metoda měření výchylky

3. Měření ohybu raménka pomocí výchylky laserového svazku

V současnosti je to nejběžnější metoda, při které paprsek odražený od zadní stěny raménka dopadá na polohově citlivý detektor, např. dvousegmentovou fotodiodu (obr. 2.8.). Nevýhodou této metody je, že velikost raménka je omezena vlnovou délkou použitého světla.



Obr. 2.8: Měření ohybu raménka pomocí výchylky laserového svazku

Provozní režim je vybrán na základě charakteristiky povrchu a na tvrdosti nebo lepivosti vzorku.

2.3 SNOM – optická skenovací mikroskopie v blízkém poli

2.3.1 Úvod

SNOM (Scanning Near-field Optical Microscope) je skenovací optický mikroskop s lokální sondou, pracující v blízkém poli. Patří do skupiny moderních rastrovacích sondových mikroskopů, jako jsou rastrovací tunelovací mikroskop (STM) nebo mikroskop atomárních sil (AFM), které jsou všechny založeny na pohybu velmi jemné sondy v těsné blízkosti povrchu vzorku (pomocí piezoelektrických krystalů) [4,6,7]. SNOM musí osvětlovat vzorek ze vzdálenosti menší než je vlnová délka použitého světla, a to optickým vláknem zakončeným otvorem, opět menším než vlnová délka (velikost otvoru určuje maximální možné rozlišení, obvykle má průměr 0,05 – 0,15 mikrometru). Detekovat pak můžeme světlo prošlé vzorkem, rozptýlené či sledovat fluorescenci vyvolanou osvětlením v blízkém poli (pojem blízké pole označuje elektromagnetické pole ve vzdálenosti od zdroje menší, než je vlnová délka vlnění, kde se ještě neuplatní rozptyl). A toto je právě největší výhoda mikroskopu SNOM. Dává nejenom obraz vzorku, ale v každém bodě zároveň umožňuje měřit různá optická spektra nesoucí v sobě velké množství dalších informací, např. o energetické struktuře a vzájemném ovlivňování přítomných molekul.

2.3.2 Princip SNOM

Optický mikroskop, pracující v blízkém poli, se podobá STM. Velmi malý hrot z dielektrického materiálu snímá povrch osvětleného povrchu pomocí piezoelektrického měniče.

Struktura mikroskopu v blízkém poli je jasná: vypadá jako STM, kde je místo ostrého kovového hrotu použit specifický hrot schopný vyzařovat nebo přijímat světlo. Prvotní funkcí hrotu sondy je jeho schopnost difragovat světelný svazek (tato vlastnost je snadno splněna). V závislosti na použité technice může sloužit k přenosu fotonů ke vzdálenému detektoru. Obraz je potom generován pohybem hrotu ve směrech x, y nad povrchem předmětu. Toto skenování je zajištěno pomocí piezoelementů řízených počítačem. K omezení šumu je dopadající laserový světelný svazek často časově modulován. Synchronní zesilovač pouze zesiluje výstupní signál, který je modulován stejnou frekvencí jako laser. Tato procedura umožňuje snížit podstatně šum. Naneštěstí, na druhou stranu značně prodlužuje detekci.

2.3.3 Popis mikroskopu

a) Sonda

Základní součástí mikroskopu je sonda. V optické mikroskopii v blízkém poli se používají 3 typy sond: optická sonda, SFM hrot a neprůhledný hrot.

1. Optická sonda

Je vyrobena buď z křemenné reformy, mikropipety, mnohovidového nebo jednovidového vlákna. Nejčastěji se používá jednovidové optické vlákno. Sonda může být pokovená nebo nepokovená. Kuželovitý tvar se dosáhne např. chemickým leptáním nebo ohřevem a tažením. Nejjednodušším řešením k dosažení tohoto tvaru je chemické leptání v roztoku kyseliny fluorovodíkové.

2. SFM hrot

Tento hrot se používá v AFM mikroskopech. Po několika pokusech byl tento hrot implementován do systému mikroskopu v blízkém poli. Nyní se tato technika používá velmi často.

3. Neprůhledný hrot

Neprůhledný kovový hrot byl navržen mnohem později než dva předchozí typy. Začíná se používat k detekci povrchových plazmonů.

b) Princip rastrování

Jedním z hlavních, a dosud ne zcela vyřešeným problémů, je způsob rastrování předmětu sondou. Pohyb sondy nad předmětem je zajišťován pomocí piezoelektrických manipulací.

V optické mikroskopii s lokální sondou se používají 3 režimy rastrování:

1. Režim konstantní výšky

Při tomto režimu je udržována konstantní výška od povrchu vzorku. Sonda detekuje rozložení intenzity světla v konstantní vztažné rovině nad povrchem vzorku.

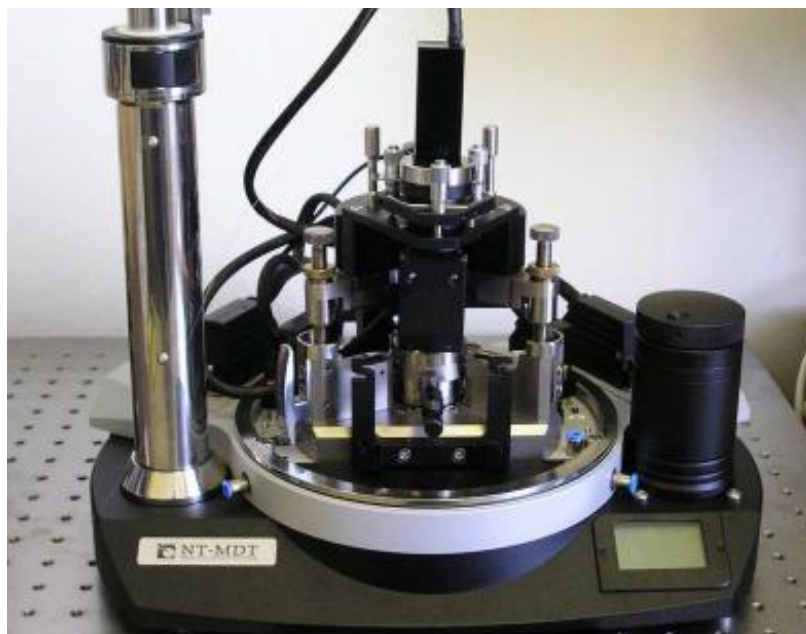
2. Režim konstantní vzdálenosti

Režim spočívá v nastavení hrotu sondy v konstantní vzdálenosti od povrchu vzorku. Výsledkem tohoto způsobu detekce je topografie čar stejné intenzity světla nad povrchem vzorku.

3. Režim konstantní intenzity

Také v tomto případě je udržována konstantní výška. Hrot kopíruje topografické změny povrchu, přičemž se mění souřadnice z detekčního zařízení.

Na následujícím obrázku je stavebnicový mikroskop, který se nachází v laboratoři na Ústavu fyziky. Vhodnou volbou měřicí hlavy je s ním možné pracovat ve všech třech výše popsaných režimech (STM, AFM a SNOM).



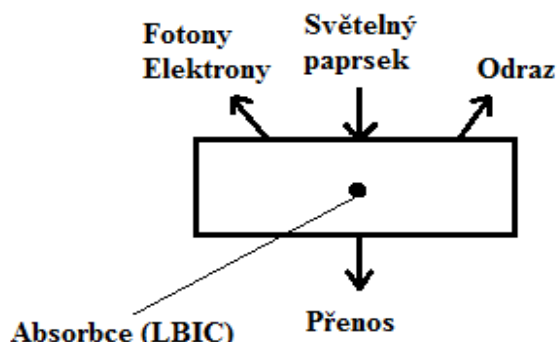
Obr. 2.9: Stavebnicový mikroskop

3 SVĚTLEM INDUKOVANÝ FOTOPROUD - LBIC (Light Beam Induced Current)

Tato metoda je založena na indukování fotoproudu v součástkách pracujících na fotoelektrickém jevu. Techniky LBIC (Light Beam Induced Current) [9,10] a její nanometrická verze NOBIC (Near-field Optical Beam Induced Current) [11] se používají ke studiu aktivních oblastí v polovodičích. V těchto oblastech jsou většinou přítomny různé vady, které se ovlivňují funkcí polovodičů.

Postupným osvětlováním povrchu vzorku při skenování bod po bodu získáme proudovou mapu měřené součástky. Nejčastěji používanými zdroji osvětlení jsou LED diody s různými vlnovými délkami.

Mikro či nano rozlišení systému přitom závisí jednak na zvoleném kroku mezi jednotlivými body, jednak na velikosti generujícího zdroje a zejména na průměru sondy. Platí, že čím menší krok a menší rozměry světelné skvrny na povrchu materiálu, tím větší prostorové rozlišení. Nevýhodou je ale dlouhá doba snímání signálu při skenování.



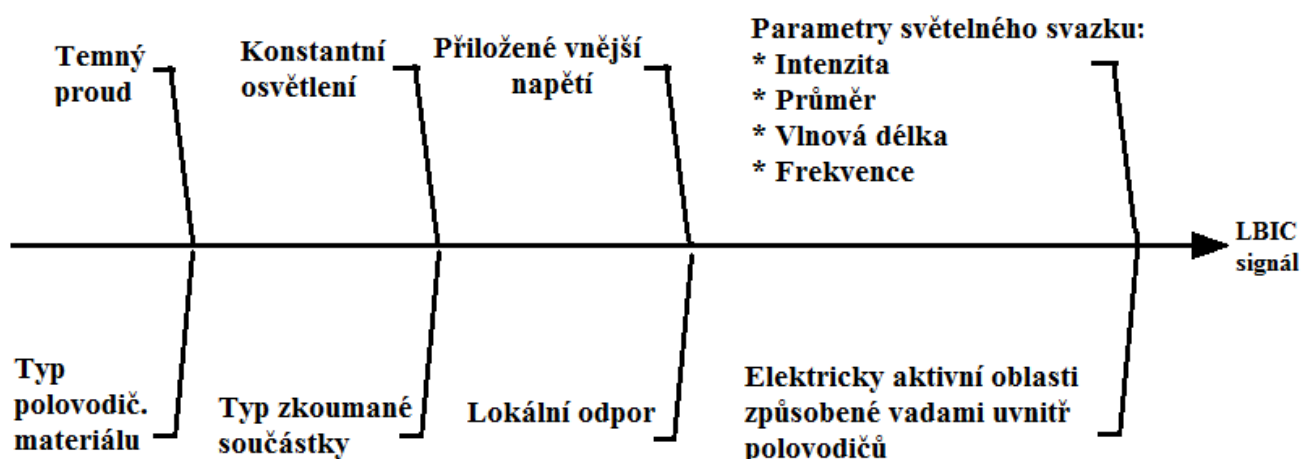
Obr. 3.1: Druhy signálů a jevů při dopadu světelného paprsku v LBIC metodě

Z obrázku 3.1. vyplývá, že LBIC proud je indukovaný přímo uvnitř polovodičového vzorku. Pomocí sondových mikroskopů je možné měřit odražené světlo, či generované fotoelektrony či fotony. Obrázek 3.2. pak shrnuje základní faktory, které ovlivňují měřený signál.

Základními výhodami těchto technik jsou:

- možnost zkoumání materiálů použitých pro výrobu polovodičových součástek, stejně jako hotových zařízení
- možnost kvalitativního a kvantitativního vyšetření
- nedestruktivní měření.

Metody LBIC a NOBIC využívají rekombinační procesy v polovodičovém materiálu, z čehož vyplývá měření a zviditelnění prostorového rozložení fotoproudu indukovaného v součástce a doby života minoritních nosičů v ní.



Obr. 3.2: Základní faktory ovlivňující LBIC signál

3.1 Rekombinační procesy

Vložením atomu pětimocného prvku do krystalové mřížky křemíku umožníme, aby pátý valenční elektron, obsažený v příměsi, mohl být uvolněn. Je totiž vázán daleko slaběji a může tedy mnohem pravděpodobněji excitovat – delokalizovat. Takto odtržený elektron přispívá k vedení proudu. Obdobně také v místě původního atomu vznikne nadbytečný, kladný, jednou nabitý iont. Takto přispěje ke koncentraci volných nosičů každý atom příměsi vždy jedním elektronem. Bez příměsi je koncentrace nosičů v křemíku velmi malá. Proto i velmi malá koncentrace příměsi podstatně zvyšuje množství elektronů [12].

Obdobě dojde k podstatnému zvýšení koncentrace děr v případě, když vložíme do krystalové mřížky křemíku jako příměs atom třímocného prvku. Je to z důvodu toho, že tyto příměsi mají zvýšenou schopnost vázat na sebe jeden volný elektron. Pokud takto elektron přijme, uvolní tím jednu díru ve valenčním pásu. V místě původního atomu příměsi bude vázán nadbytečný, záporný, jednou nabitý iont. Stejně tak v případě pětimocného prvku dochází i malou příměsí ke značnému zvýšení množství děr.

V obou případech dochází pouze ke zvýšení koncentrace jednoho typu, tedy buď elektronů, nebo děr. Příměsi v prvním případě nazýváme příměsí typu *n* nebo také *donory*, protože odevzdávají (darují) elektron. Elektrony, které mají v prvním případě větší koncentraci, nazýváme *majoritními nosiči*, a naopak díry *minoritními nosiči*. Podle typu příměsi pak označujeme celý polovodič, ve kterém jsou obsaženy příměsi pětimocného prvku, jako polovodič typu *n*. Stejně tak v druhém případě nazýváme příměsí typu *p* nebo také *akceptory*, protože přijímají (akceptují) elektrony. Elektrony jsou pak v tomto typu *minoritními nosiči* a díry *majoritními*. Podle typu příměsi pak tento typ polovodiče, tedy s příměsí třímocného prvku, označujeme jako polovodič typu *p*.

Pokud spočítáme součin koncentrací np , zjistíme, že zůstává konstantní.

$$np = n_i^2 \quad (3.1)$$

A je obecně nezávislý na koncentraci příměsi. Tedy pokud zvýšíme koncentraci elektronů, současně tím snížíme koncentraci děr. Toto zvýšení (snížení) je úměrné - tolikrát kolikrát

zvýšíme (snížíme) koncentraci, tolikrát se sníží (zvýší) koncentrace druhého typu částic. Tato úměrnost je stejná v případě polovodiče typu p i n . Vysvětlením tohoto fyzikálního jevu je *proces rekombinace*.

Rekombinace můžeme rozdělit podle druhu přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu na: zářivé rekombinace, Augerovy rekombinace a rekombinace prostřednictvím rekombinačních center. Nejčastějším druhem rekombinace je pak posledně jmenovaná – rekombinace prostřednictvím rekombinačních center.

Obecně současně s rekombinací probíhá v polovodiči i proces opačný – generace. Výsledná rekombinace je pak součtem generace a rekombinace. Pokud se v polovodiči uplatňuje více rekombinačních či generačních procesů, je výsledná rekombinace součtem všech těchto procesů.

3.1.2 Měření doby života

Využití znalosti doby života v polovodiči je důležité například při posuzování čistoty polovodičových materiálů (vyšší čistota = větší doba života), nebo pro posouzení poruch v krystalu (poruchy vedou ke snížení doby života), aj. Doba života má význam střední doby existence nadbytečných nosičů (pár elektron-díra).

Samotné měření doby života lze provádět několika metodami. Ty můžeme rozdělit podle druhu kontaktu na:

- bezkontaktní měření doby života a
- kontaktní měření doby života.

V této práci se omezíme na bezkontaktní metody měření pomocí LBIC a NOBIC, protože kontaktní měření neumožňují měřit přímo koncentraci nosičů. [14] Ve většině případů se měří změna vodivosti prostřednictvím napětí ΔU . Způsob jakým je měření prováděno nám umožňuje ztotožnit změnu napětí se změnou měrného odporu. Změna měrného odporu pak představuje zápornou změnu fotovodivosti, a tu lze již ztotožnit se změnou koncentrace. Neboli

$$\Delta n \sim \Delta \sigma \sim -\Delta \rho \sim -\Delta U. \quad (3.2)$$

Tedy ve finále měříme změnu koncentrace nosičů pouze zprostředkovaně přes veličiny, které jsou měřitelné. Do kategorie kontaktních měření můžeme zařadit: metodu fázové kompenzace, metodu frekvenčního poklesu fotovodivosti, metodu měření z difúzní délky a metodu fotovodivostního poklesu (PCD).

3.1.5 Metoda měření z difúzní délky

Generujeme-li nadbytečné nosiče v určitém místě polovodiče, pak nosiče z místa generace difundují. Nadbytečné nosiče však ve všech místech rekombinují. Prostorové rozložení jejich koncentrace proto souvisí s jejich rekombinací. Metoda měření doby života z difúzní délky je založena právě na této skutečnosti [15]. Přitom koncentrace nadbytečných nosičů závisí na vzdálenosti od místa x generace exponenciálně.

Princip samotné metody je postaven na tom, že zářením o malém absorpčním koeficientu generujeme v určité oblasti vzorku nadbytečné nosiče. Změna koncentrace je pak sledována ve

vzdálenosti x pomocí proudu, který protéká hrotovým kontaktem zapojeným v závěrném směru. Měříme tak odpovídající fotoproud, který závisí na koncentraci nadbytečných nosičů, a proto má naměřená závislost fotoproudu na vzdálenosti x vyjádření

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{x}{L}\right). \quad (3.3)$$

Z tohoto vztahu (3.3) již lze stanovit difúzní délku. Dobu života pak můžeme určit ze vztahu, který spojuje dobu života právě s difúzní délkou

$$L_n = \sqrt{D \tau_r}. \quad (3.4)$$

3.1.6 Metoda fotovodivostního poklesu (PCD)

Měření je založeno na monitorování optických excitací a jejich poklesů jako funkcí času po zániku excitace (rekombinace) [14]. Vzorky při samotném měření mohou být opatřeny kontakty, nebo bez kontaktů. Přítomnost nadbytečných nosičů při PCD metodě může být detekována mnoha způsoby. Jedním z těchto způsobů je měření vodivosti jako funkcí času.

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (3.5)$$

Potom pro $n = n_0 + \Delta n$ a $p = p_0 + \Delta p$ a současně pro případ, že $\Delta n = \Delta p$, získáváme pro nadbytečné nosiče vztah

$$\frac{\Delta p}{p} \ll 1. \quad (3.6)$$

Z tohoto vyplývá, že v případě kdy měříme $\Delta\sigma$, měříme v podstatě Δn . Pokles hustoty nadbytečných nosičů v případě slabé injekce je pak dána

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{ef}}\right), \quad (3.7)$$

kde pro τ_{ef} pak platí

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_s}, \quad (3.8)$$

kde τ_s je doba života povrchové rekombinace. Pro tuto povrchovou dobu života můžeme stanovit závislost na rozměrech vzorku. Pokud máme vzorek tvaru hranolku, pro který platí, že jeden nebo všechny rozměry jsou velké, může být rovnice (3.8) přepsána do tvaru

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_B} + \pi^2 D \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right), \quad (3.9)$$

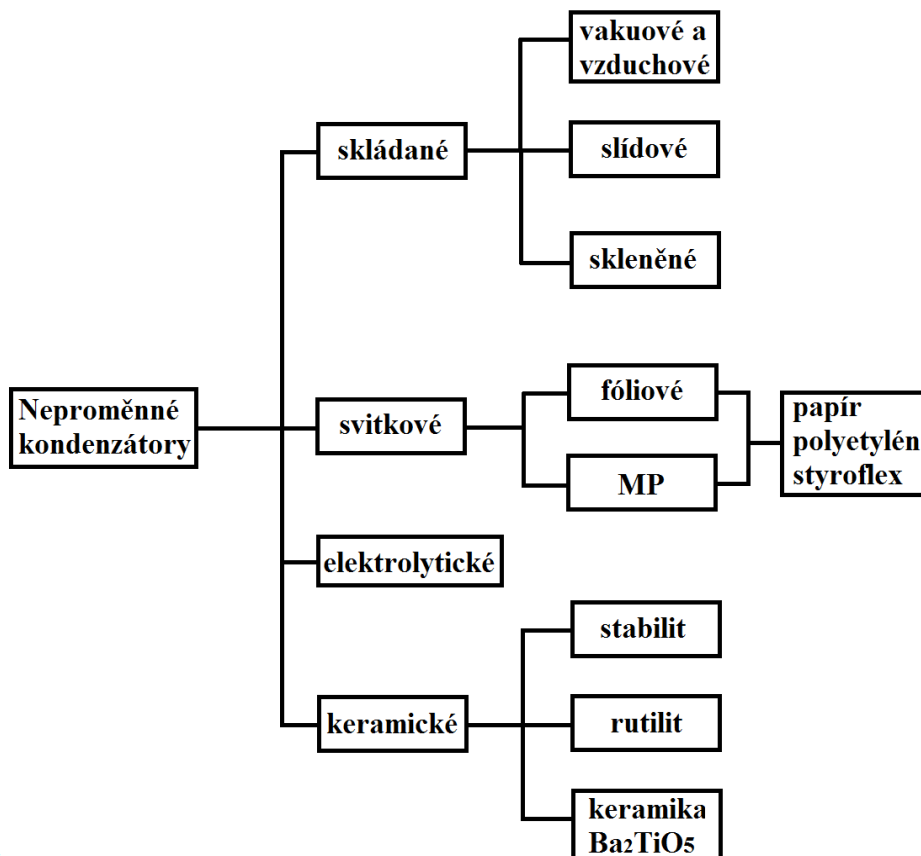
kde a , b , a c jsou rozměry vzorku.

4 ELEKTRICKÉ SOUČÁSTKY

4.1 Kondenzátory

Jak bylo řečeno v úvodu, souběžně se zmenšováním rozměrů aktivních součástek na čípech, existují i snahy o odpovídající zmenšování pasivních elektrických součástek, při současném zvyšování, nebo alespoň zachování jejich parametrů. Ukazuje se, že problémy zmenšování jsou spojeny s existencí fyzikálních mezí použitých materiálů a konec konců i s nemožností měření lokálních vlastností těchto zařízení pomocí klasických elektrických měřicích metod [16].

Kondenzátory jsou součástky, které uchovávají energii ve tvaru elektrického pole. Mohou být také použity k filtrování vysokofrekvenčních či nízkofrekvenčních signálů. Základní vlastností pro hodnocení kondenzátoru je jeho elektrická kapacita, technicky je kondenzátor určen maximálním povoleným napětím, druhem dielektrika a provedením vývodů (axiální, radiální, bezvývodový). Někdy se také užívá pojmu kapacitor. Pokud se mluví o kapacitoru, je tím myšlena ideální součástka, jejíž jedinou vlastností je kapacita. Jako kondenzátor se označuje součástka skutečná, která má kromě kapacity i další parazitní vlastnosti.



Obr. 4.1: Rozdělení kondenzátorů

4.1.1 Princip kondenzátoru

Kondenzátor se skládá ze dvou vodivých desek (elektrod) oddělených dielektrikem[17]. Na každou z desek se přivádí elektrické náboje opačné polarity, které se vzájemně přitahují elektrickou silou. Dielektrikum mezi deskami nedovolí, aby se částice s nábojem dostaly do kontaktu, a tím došlo k neutralizaci, jinak vybití elektrických nábojů. Přitom dielektrikum svou polarizací zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na deskách a umožňuje tak umístění většího množství náboje. Vzhledem k elektrostatické indukci je velikost náboje na obou deskách stejná.

4.1.2 Základní vlastnosti kondenzátoru

Pokud budeme vybírat kondenzátor pro konkrétní užití, budou nás zajímat především následující vlastnosti:

- kapacita
- maximální povolené napětí
- činitel jakosti
- další vlastnosti jako cena, hmotnost, trvanlivost, teplotní stálost, tvar ...

a) Kapacita kondenzátoru

Kapacita C kondenzátoru závisí na ploše S jeho desek, vzájemné vzdálenosti d desek mezi sebou a permitivitě ε dielektrika mezi deskami:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}. \quad [\text{F}] \quad (4.1)$$

Na desku kondenzátoru s kapacitou C lze uložit elektrický náboj:

$$Q = CU, \quad [\text{C}] \quad (4.2)$$

kde U je elektrické napětí mezi deskami kondenzátoru. Jednotkou kapacity v soustavě SI je farad.

Hodnota kapacity je indikátorem toho, kolik náboje může kondenzátor při určitém napětí pojmout a uchovat.

b) Napětí kondenzátoru

Napětí na celé součástce lze vypočítat jednoduše:

$$U = \frac{Q}{C}. \quad [\text{V}] \quad (4.3)$$

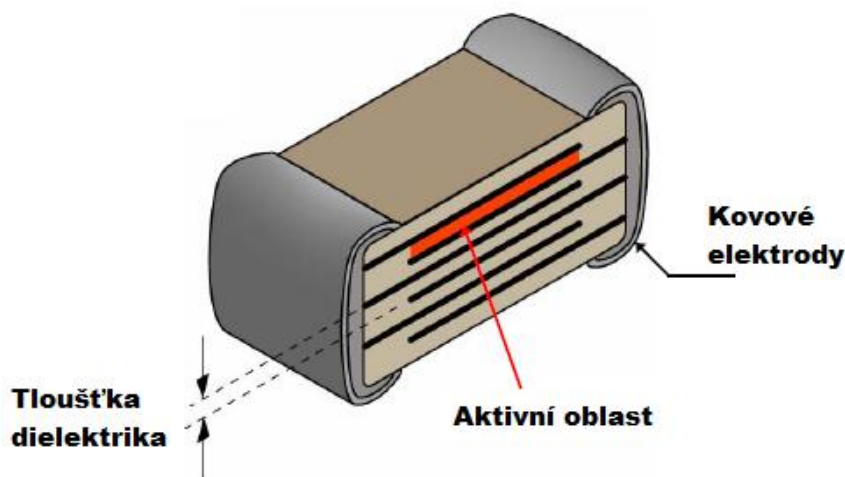
Napětí na nabitém kondenzátoru je stejné, jako je napětí zdroje. Napětí mezi elektrodami je stejné jak v součástce, tak na vodiči, kterým bychom je spojili zvenčí.

4.1.3 Multivrstvý keramický kondenzátor

Multivrstvé keramické kondenzátory jsou tvořeny střídavými keramickými a kovovými vrstvami (obr. 4.2) [18].

V současné době se používají dva materiálové systémy k výrobě keramických kondenzátorů: elektrody z vzácných kovů a elektrody ze základních kovů. Systém s vzácnými kovy je starší technologií a používá paladio-stříbrné elektrody, stříbrné zakončení, na něž se nanese niklová a cínová vrstva. Tento typ kondenzátorů se používá pro napětí vyšší jak 500 V.

Systém se základními kovy je novější a používá niklové elektrody, niklové nebo měděné zakončení a niklové a cínové pokovení. Tento typ kondenzátorů se typicky používá pro napětí menší jak 500 V.



Obr. 4.2: Řez multivrstvého keramického deskového kondenzátoru

4.2 Fotodioda

Jedná se o upravenou diodu, kde do oblasti PN přechodu proniká světelné záření. Princip fotodiody je založen na fotoelektrickém jevu. Při dopadu elektromagnetického záření se generují páry elektron – díra.

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

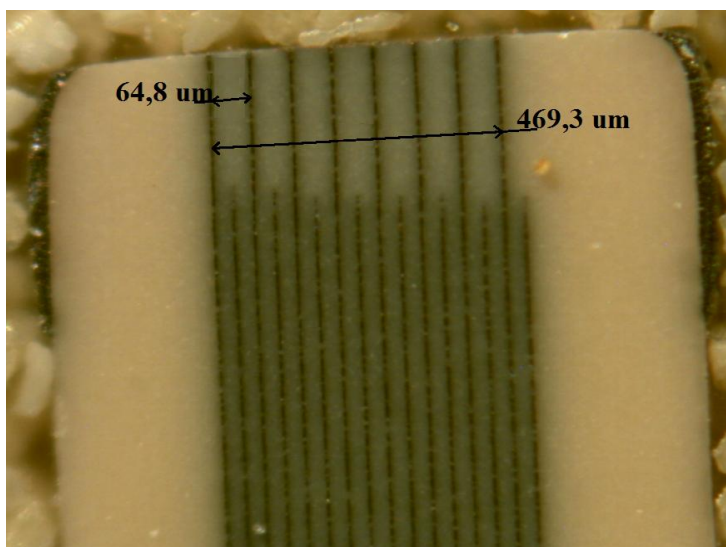
V této kapitole přinášíme výsledky použití skenovacích mikroskopů při nanoskopických měřeních submikrometrové lokalizace a charakterizace defektů v pasivních elektronických (kondenzátor) a optoelektronických součástkách (fotodioda).

5.1 Kondenzátor

Kondenzátory jsou ideálními pasivními součástkami, na nichž se ještě, dle našich znalostí, lokální měření charakteristik běžně neprovádí.

Tantalové kondenzátory jsou vyrobeny elektrochemickým růstem oxidové vrstvy, tj. dielektrika, na kovové anodě. Anoda je tvořena porézní tantalovou peleta z lisovaného, vysoce čistého, tantalového prášku [1]. Dielektrikum tvoří sklovitá velmi tenká vrstva amorfního oxidu tantalu (Ta_2O_5), která vzniká na povrchu tantalu elektrochemickou oxidací. Elektrolyt tvoří polovodičový oxid manganitý (MnO_2) vzniklý *in situ* tepelným rozkladem solí manganu. Pro správnou funkci kondenzátoru je třeba vložit vodivou vrstvu mezi dielektrikum a jednu elektrodu.

Multivrstvý keramický deskový kondenzátor s dielektrikem z Ta_2O_5 byl nejprve pozorován optickým mikroskopem se zvětšením 45 $\times$. Vzdálenosti elektrod jsou okótované (obr.5.1).

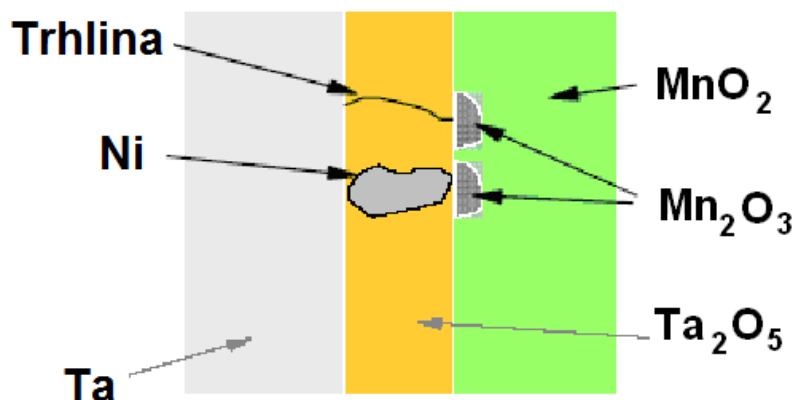


Obr. 5.1: Řez multivrstvým keramickým kondenzátorem (zvětšení 45 $\times$)

Průraz kondenzátoru je charakterizován náhlým nárůstem svodového proudu. Když dojde k defektu – např. trhlině – ve vrstvě oxidu, objeví se jiskry nebo ionizace, po níž začne převažovat svodový proud [19].

Základními mechanismy, které přispívají ke vzniku průrazu jsou (obr. 5.2):

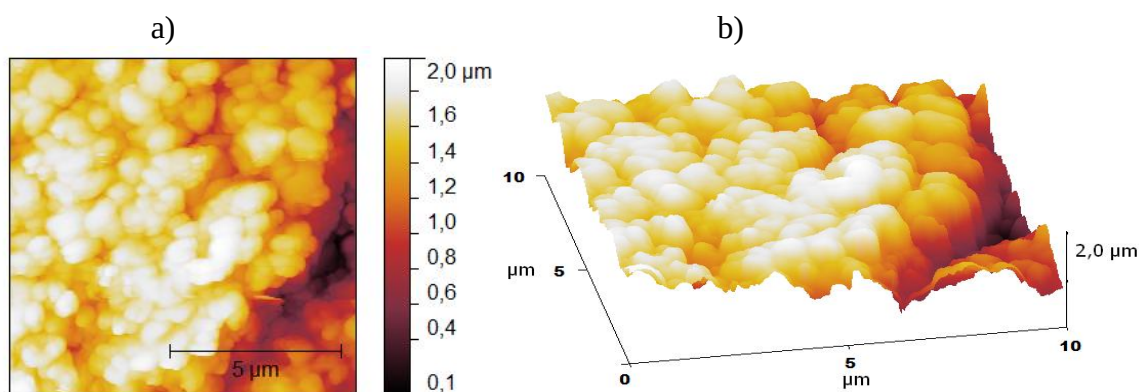
- Mechanické vady v dielektriku - trhliny,
- nečistoty v dielektriku a
- stopové krystaly oxidů, které se nacházejí v materiálu dielektrika.



Obr.5.2: Základní mechanismy průrazu

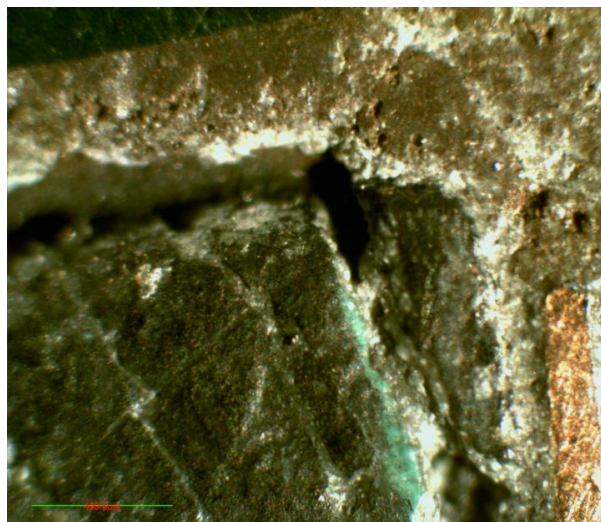
V této studii jsme zkoumali případy, kdy defekty spojené s nečistotami mohou vzniknout z segregovaných nečistot přítomných na povrchu tantalu. Těmito nečistotami může být uhlík nebo různé kovy, např. železo, nikl, vápník [20]. Za normálních podmínek je tloušťka oxidu tantalu konstantní, avšak v případě, že povrch tantalu obsahuje kovové segregáty, dojde k omezení růstu oxidu na tomto místě. Oxid z okolí čistého kovu má tendenci prorůstat částečně přes kov, ale vada oxidu stále přetrvává.

Následující obrázky ukazují výsledky dosažené se skenovacím SNOM mikroskopem na povrchu multivrstvého keramického deskového kondenzátoru (oblast béžové horní plochy z obr. 4.2.) Obrázky získané pomocí AFM mikroskopu (obr.5.3a,b) znázorňují topografii povrchu kondenzátoru s malými prohlubněmi (patrnými zejména v pravé části obrázků). Ty jsme považovali, díky nerovinatosti vrstvy, za místa pravděpodobného budoucího průrazu kondenzátoru, což se potvrdilo následným měřením (obr. 5.4) [21].



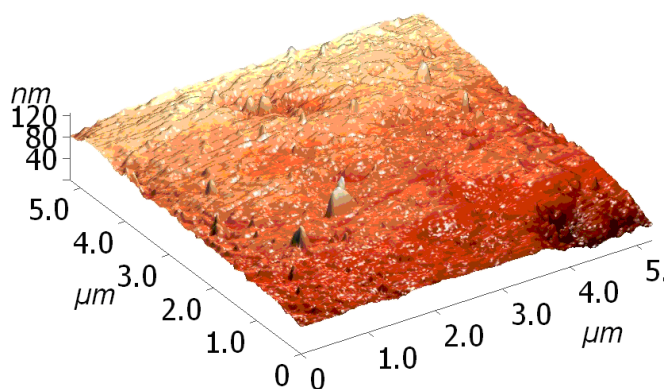
Obr. 5.3: Lokální obraz povrchu multivrstvého keramického deskového kondenzátoru
a) 2D zobrazení, b) 3D zobrazení [21]

Obrázek 5.4 potom ukazuje topografii na řezu proraženého a zničeného kondenzátoru po 50 hodinách činnosti. K průrazu došlo opravdu na námi určeném místě.



Obr. 5.4: Lokální topografie řezu proraženého kondenzátoru

Na následujícím obrázku získaného pomocí SNOM mikroskopu (obr. 5.5) jsou znázorněny kontrasty indexu lomu defektu v oxidu, které by mohly být následně lokalizovány v kanálku průrazu. Defekty v oxidové vrstvě mohou také vyplývat z nečistot přítomných v elektrolytu, a to buď z použitých chemikálií nebo vody.



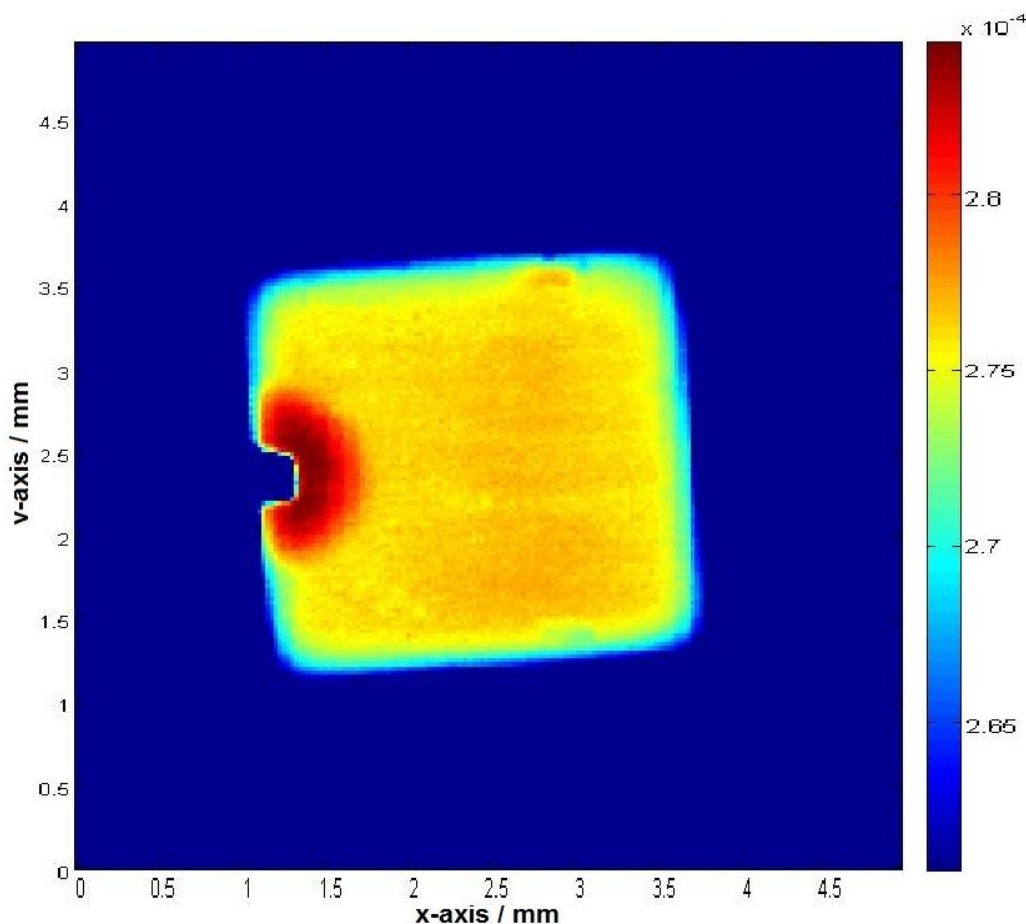
Obr. 5.5: SNOM obraz kontrastů indexů lomu z vadné oxidové vrstvy

5.2 Fotodioda

Jako příklad zviditelnění charakteristik aktivní optoelektronické součástky bylo provedeno lokální měření na povrchu fotodiody (typ BPW34) pomocí výše zmíněné metody LBIC.

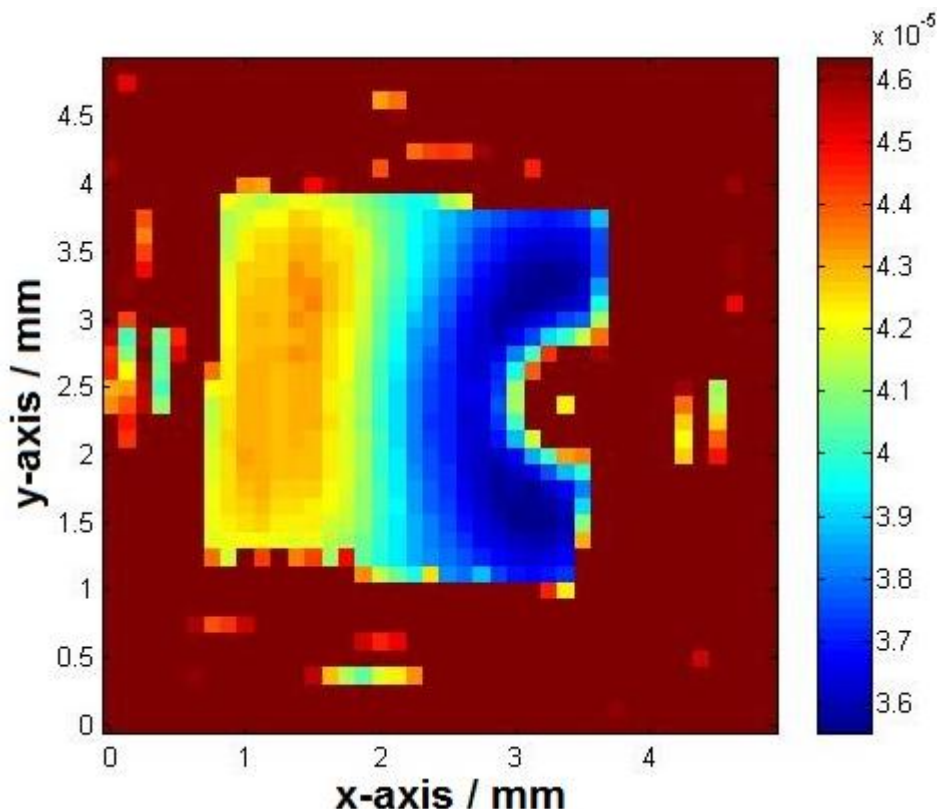
V experimentu je fotodioda umístěna těsně pod vyzařující laserovou diodu tak, aby průměr její osvětlené plochy byl minimální ($< 1 \mu\text{m}$). Dioda se pohybuje nad povrchem vzorku, lokálně jej osvětluje, čímž generuje lokální fotoproud. Část světla se přitom odráží od povrchu vzorku a je snímána fotodetektořem.

Na obr. 5.6 můžeme vidět fotoproud generovaný na povrchu fotodiody. Nejvyšší hodnota byla naměřena v levé části obrázku v okolí kontaktu. Hodnota dosahovala maximálně $0,285 \text{ mA}$.



Obr. 5.6: Fotodioda BPW34, fotoproud v LBIC

Na obr. 5.7 je pak zviditelněna dynamika doby života minoritních nosičů na stejné fotodiodě. Obrázek je zrcadlově otočený oproti předchozímu. Okolo kontaktu je doba života minoritních nosičů nejmenší (kolem $36 \mu\text{s}$). Měřené výsledky souhlasí s výsledky vypočtenými podle vztahu (3.9). Vzniklý šum kolem součástky je způsoben náhodnými odrazy při osvětlování vzorku.



Obr. 5.7: Vizualizace doby života minoritních nosičů (fotodioda BPW34)

Měřením zkratového proudu I_{sc} , výkonu dopadajícího světla P_L a koeficientu odrazu R je možné vyjádřit lokální vnitřní kvantovou účinnost (IQE) součástky

$$IQE = \frac{1}{1-R} \cdot \frac{\frac{I_{sc}}{q}}{\frac{P_L}{hc/\lambda}} = \frac{1}{(1-R)} \frac{hc I_{sc}}{\lambda q P_L}. \quad (5.1)$$

Zde I_{sc} výrazně závisí na množství absorbovaného světla. Tento vliv je upraven použitím prvního členu v (5.1). Druhý člen v (5.1) představuje tzv. vnější kvantovou účinnost (EQE). Systém zde popsané opatření IQE pouze při vlnové délce 633 nm, což odpovídá absorpční délce 25 μm v křemíku. To znamená, že je zde detekována doba života minoritních nosičů pocházejících hlavně z objemová rekombinace (viz rovnice 3.9.).

6 ZÁVĚR

Vývoj a výzkum pasivních i aktivních součástek probíhá v současné době již rychleji, než předpovídal Mooreův zákon. Je snaha dosáhnout toho, aby miniaturní součástky měly menší spotřebu, vyšší účinnost, vyšší životnost a byly vysoce spolehlivé ve všech operačních prostředích. Podobné snahy zákonitě platí i pro pasivní součástky, protože jejich rozměry jsou zatím limitujícím faktorem miniaturizace celého zařízení. Z tohoto důvodu je nutné hledat nové materiály s vyššími parametry, které by tuto miniaturizaci umožnily. Tak se dostáváme do oblasti malých rozměrů, které je velmi obtížné zkoumat pomocí klasických elektrických a optických metod.

Proto byl použit sofistikovaný optický mikroskop pracující v blízkém optickém poli, který umožňuje dosáhnout vyšší rozlišovací schopnosti než klasické optické mikroskopy, tj. srovnatelné s vlnovou délkou použitého světla. SNOM jako SPM (s osvětlením) je bezkontaktní metoda, umožňuje optická měření v blízkém poli a má vysokou rozlišovací schopnost pod difrakčním limitem.

SNOM mikroskop byl použit pro lokální měření dvou významných charakteristik materiálů s rozlišením přibližně 1 μm :

- v případě multivrstvých keramických kondenzátorů se jedná o topografii a odrazivost povrchu,
- v případě fotodiody o vizualizaci fotoproudu v součástce a měření doby života minoritních nosičů..

V experimentální části se povedlo provést optická (SNOM) a silová (AFM) měření lokálních vlastností vybraných pasivních i aktivních součástek.

Z provedených měření na kondenzátorech vyplývá, že existuje několik možných příčin, proč u nich dochází k průrazům:

- Mechanický defekt dielektrika.
- Nečistoty v dielektriku.
- Krystaly oxidu, které již v dielektriku existují.

Měření provedená na fotodiodě umožnila zviditelnit minoritní nosiče a ukázala jejich dobu života. Navíc, doba života minoritních nosičů pochází hlavně z objemová rekombinace.

Závěrem je možno říct, že SNOM mikroskop, aplikovaný do materiálového elektrického i optického výzkumu, může pracovat v pokojové teplotě a bez nutnosti vakua. Výhodami jsou minimální příprava vzorku, reálná 3D mapa povrchu pro vodivé i nevodivé vzorky, topografie informace, nedestruktivní metoda, více možných konfigurací, a hlavními nevýhodami omezená oblast měření posuvem, příliš dlouhá doba pro skenování povrchu ve vysokém rozlišení, možnost zničení hrotu, každá konfigurace slouží prakticky jen k jednomu typu měření.

7 LITERATURA

- [1] GOSER, K., GLÖSEKÖTTER, P., DIENSTUHL, J., *Nanoelectronics and Nanosystems*, Springer-Verlag, Berlin, 2004, ISBN: 978-3-540-40443-0
- [2] MIRONOV, V.L., *Fundamentals of Scanning probe microscopy*: Textbook for students of senior courses of higher educational institutions, The Russian Academy of Science, Institute for Physics of Microstructures, Nizhni Novgorod, NT-MDT, 2004, 98 s.
- [3] FRANK, L., KRÁL, J., *Metody analýzy povrchů. Iontové, sondové a speciální metody*, Academia, Praha, 2002, ISBN: 978-80-200-0594-3
- [4] KUBÍNEK, R., VŮJTEK, M., MAŠLÁŇ, M., Mikroskopie skenující sondou [online]. 2003 [cit. 2010-10-25]. Dostupný z <<http://atmilab.upol.cz/spm.html>>
- [5] SCHRODER, D.K., Nano Characterization of Materials, *Electrochemical Society Transactions*, 2010, roč. 33, s. 3-22. ISSN: 2151-2051
- [6] KAUPP, G. Scanning near-field optical microscopy on rough surfaces: Applications in chemistry, biology, and medicine, *International Journal of Photoenergy*, 2006, roč. 2006, článek ID 69878, 22 stran, ISSN: 1110-662X.
- [7] TOMÁNEK, P., *Nanotechnologie a optická nanometrologie*, Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně, Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv.24, VUTIUM Brno, 2000, ISBN: 80-214-1589-4.
- [8] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fyzika*, díl 4, VUTIUM Brno, Prometheus, 2000, ISBN: 80-214-1868-0
- [9] BREITENSTEIN, O., BAUER, J., KITTLER, M., ARGUIROV, T., SEIFERT, W., EBIC and luminescence studies of defects in solar cells, *Scanning*, 2008, roč. 30, č. 4, s. 331-338, ISSN: 0161-0457
- [10] SMITH, S., DHERE, R., GESSERT, T., STRADINS, P., WANG, T., RAMANATHAN, K., NOUFI, R., MASCARENHAS, A., Submicron optoelectronic properties of solar cell materials. *Thin Film Compound Semiconductor Photovoltaics*, Material Research Society, 2005, roč.865, s. 27-31, ISSN: 978-1-558-99818-6.
- [11] TOMÁNEK, P., ŠKARVADA, P., MACKŮ, R., GRMELA, L., Detection and localization of defects in monocrystalline silicon solar cell, *Advances in Optical Technology*, 2010, článek ID 805325, s. 1-5, ISSN: 1687-6393
- [12] SZE, S.M. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 2nd Edition, Willey, 2002, 576 s. ISBN: 978-0-471-33372-2
- [13] PISARKIEWICZ, T., Photodecay method in investigation of materials and photovoltaic structures, *Opto-Electronic Review*, 2004, roč. 12, č. 1, s. 33-40, ISSN 1230-3402.
- [14] SINGH, S. N., GANDOTRA, R., SINGH, P. K., CHAKRAVARTY, B. C., Application of photoconductivity decay and photocurrent generation methods for determination of minority carrier lifetime in silicon, *Bulletin of Material Science*, 2005, roč. 28, č. 4, s. 317–323, ISSN: 0250-4707.
- [15] TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., KOŠŤÁLOVÁ, D., GRMELA, L. KAWATA, S., Near-field optical diagnostics of carrier dynamics in semiconductor with superresolution, *Physics of Low-Dimensional Structures*, 2003, č. 3-4, s. 131-138, ISSN 0204-3467.

- [16] FLEETWOOD, D.M., PANTELIDES, S.T., SCHRIMPF, R.D. (Eds), *Defects in Microelectronic Materials and Devices*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2009, ISBN: 978-1-4200-4376-1
- [17] Kondenzátory [online]. [cit. 2010-11-20]. Dostupný z <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kondenzátor>>
- [18] GILL, J., Basic Tantalum Capacitor Technology, [cit. 2010-10-15]. Dostupný z <<http://www.avx.com/docs/techinfo/bsctant.pdf>>
- [19] REED, E. K., Characterization of Tantalum Polymer Capacitors, *NEPP Task 1.21.5, Phase1, FY05*, 2006 [cit. 2010-10-25]. Dostupný z <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080031354_2008026939.pdf>
- [20] VASINA, P., ZEDNÍČEK, T., SIKULA, J., PAVELKA, J., Failure modes of tantalum capacitors made by different technologies, *Microelectronics and Reliability*, 2002, roč. 42, s. 849 – 854, ISSN: 0026-2714.
- [21] ŠIKULA, R., Local measurement of electric devices characteristics, In *Proceedings of 17th Conference STUDENT EEICT 2011*, díl 1, s. 91-93, ISBN: 978-80-214-4271-9.