

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 381*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**IS**

*Ing. Petr Létal*

**Lokální spektroskopie  
polovodičových struktur  
pomocí optického rastrovacího  
tunelovacího mikroskopu**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav fyziky

**Ing. Petr Létal**

**LOKÁLNÍ SPEKTROSKOPIE POLOVODIČOVÝCH  
STRUKTUR POMOCÍ OPTICKÉHO RASTROVACÍHO  
TUNELOVACÍHO MIKROSKOPU**

Local spectroscopy of semiconductor structures using Scanning  
near-field optical microscope

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Mikroelektronika a elektrotechnologie  
Školitel: Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.  
Oponenti: Prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.  
Ing. Štefan Lanyi, DrSc.  
Datum obhajoby: 30. listopadu 2004

## **Klíčová slova**

Optická mikroskopie, vzdálené pole, blízké pole, rastrovací optická mikroskopie v blízkém poli, lokální sonda, výroba sond, teorie, interakce hrot-předmět, superrozlišení, polovodičové struktury, lokální spektroskopie, lokální fotoluminiscence, lokální elektroluminiscence, kvantové jámy, Schottkyho přechod, výkonné laserové diody, stárnutí, spolehlivost, životnost.

## **Keywords**

Optical microscopy, far-field, near-field, scanning near-field optical microscopy, local probe, fabrication of probes, theory, interaction tip-sample, superresolution, semiconductor structures, local spectroscopy, local photoluminescence, local electroluminescence, quantum wells, Schottky barrier, power laser diode, aging, reliability, lifetime.

Rukopis disertační práce je uložen na

Ústavu fyziky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně, Technická 8, 616 00 Brno

# OBSAH

<b>1</b>	<b>SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉHO PROBLÉMU .....</b>	<b>5</b>
1.1	LOKÁLNÍ OPTICKÁ SPEKTROSKOPIE – AKTUÁLNÍ STAV PROBLEMATIKY .....	6
1.1.1	<i>Spektroskopie struktur p-i-n přechodů a laserových diod .....</i>	7
<b>2</b>	<b>CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>9</b>
3.1	PŘÍPRAVA SOND .....	9
3.2	LOKÁLNÍ SPEKTROSKOPIE POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR .....	9
3.2.1	<i>Vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní v Schottkyho bariéře .....</i>	9
3.2.2	<i>Vliv rozměrů zdroje na rozlišení v případě lokálně opticky indukovaného fotoproudu do polovodičové struktury.....</i>	10
3.2.3	<i>Studium defektů a vliv procesu stárnutí vlnovodné struktury výkonných laserových diod .....</i>	10
<b>4</b>	<b>HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
4.1	PŘÍPRAVA SOND .....	11
4.2	LOKÁLNÍ SPEKTROSKOPIE POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR .....	12
4.2.1	<i>Vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní v Schottkyho bariéře .....</i>	12
4.2.2	<i>Vliv rozměrů zdroje na rozlišení v případě lokálně opticky indukovaného fotoproudu do polovodičové struktury.....</i>	14
4.2.3	<i>Studium defektů a vliv procesu stárnutí vlnovodné struktury výkonných laserových diod .....</i>	17
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>VLASTNÍ PUBLIKACE.....</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>CURRICULUM VITAE.....</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>28</b>

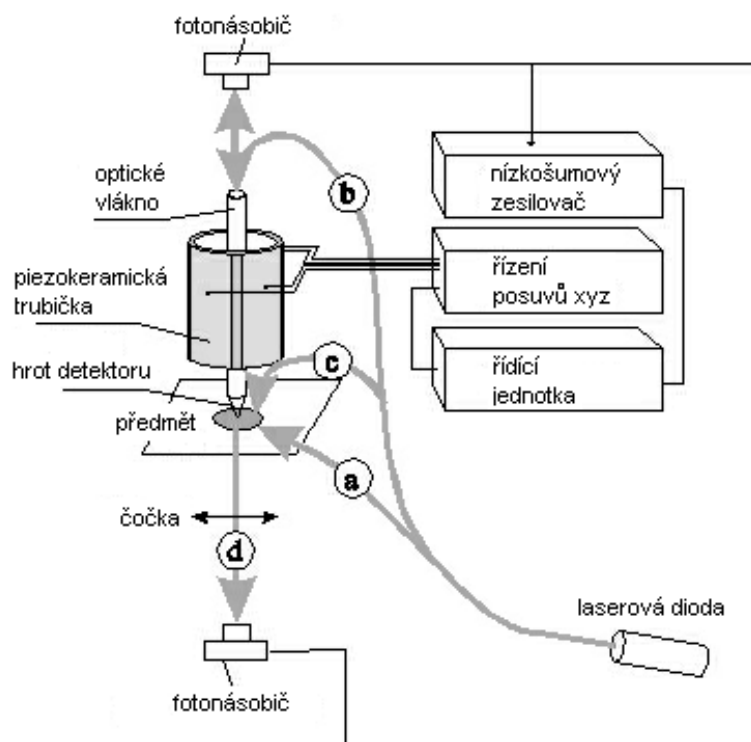


# 1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Po dlouhá léta byla principiálním omezením klasické optické mikroskopie difrakce na otvorech, která umožní rozlišit dva sousední body, jejichž vzdálenost  $d$  je dle Rayleighova kritéria

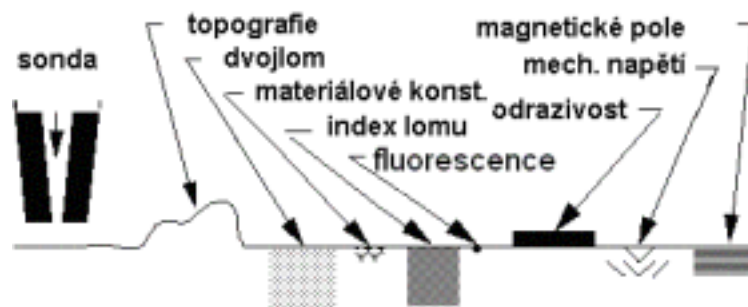
$$d > 1,22\lambda / (2n \sin \Theta), \quad (1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka použitého světla,  $n$  index lomu prostředí a  $\Theta$  aperturní úhel optického systému. Minimální vzdálenost dvou rozlišitelných bodů je ve viditelném světle je tedy asi 250 nm. Postupně se hledaly cesty, jak tuto hranici obejít, až počátkem 80.let minulého století vznikla, jako analogie k STM a pro zvýšení rozlišovací schopnosti optických mikroskopů, nová generace zobrazovacích systémů založených na užití a detekci *nezářivých polí*. Nezářivá pole existují v těsné blízkosti každého předmětu, problém však byl, jak je detekovat. Příčný rozměr nejmenších detailů předmětů, zviditelněných těmito systémy, je určen velikostí plochy interakce mezi vzorkem a sondou detektoru, která se nachází ve vzdálenosti několika nanometrů od předmětu. Na základě této myšlenky se zrodila moderní třída mikroskopů, zvaných *optické skenovací (rastrovací, řádkovací) mikroskopy s lokální sondou* [1,2] (Obr.1).



**Obr. 1.** Princip osvětlení a detekce optického blízkého pole vzorků v jednotlivých typech mikroskopů s lokální sondou.

Optická mikroskopie s lokální sondou v blízkém poli vykazuje značný počet předností před mikroskopií elektronovou: relativně snadné použití, minimální příprava vzorku, možnost pracovat na vzduchu či ve vodě při pokojové teplotě [2]. Optické mikroskopy jsou významné zejména pro spektroskopické aplikace, protože jsou schopny zkoumat různé vlastnosti materiálu. Přitom kontrast získaných informací značně závisí na operačním režimu mikroskopu [3]. Díky rychlému technologickému rozvoji a rozmanitosti možných konfigurací mikroskopu umožňuje rastrovací optický mikroskop pracující v blízkém poli (Scanning Near-field optical microscope - SNOM) [4-14], oproti jiným sondovým mikroskopům, pozorovat celou škálu kontrastů fyzikálních i chemických vlastností vzorku (obr.2).



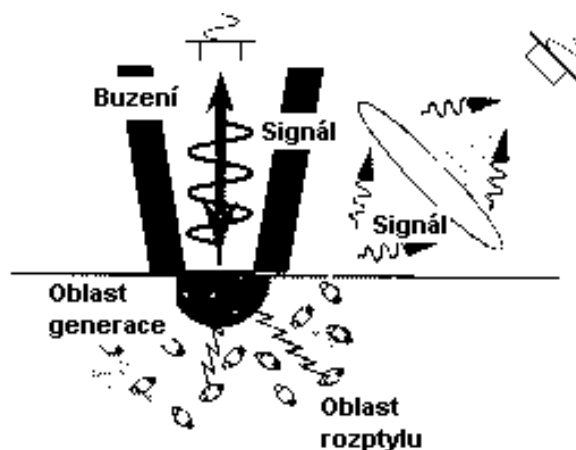
Obr.2 Některé fyzikální parametry měřitelné pomocí SNOM.

## 1.1 LOKÁLNÍ OPTICKÁ SPEKTROSKOPIE – AKTUÁLNÍ STAV PROBLEMATIKY

V elektronice umožňuje tunelová spektroskopie pochopení chemických a elektronových vlastností povrchů zkoumaných předmětů. Týká se zejména vlivů působení hustoty stavů na tunelový proud. Tyto vlivy se projeví samy v anomální závislosti napětí na tunelovém proudu. Při použití tunelové spektroskopie s STM je šířka mezery mezi vzorkem a elektrodou sondy řízena samotným tunelovým proudem, a to buď v režimu konstantního proudu nebo režimu konstantního odporu [4]. Tedy časová závislost proudových změn, která má spektroskopický význam, může být pomalá či rychlá v závislosti na limitní frekvenci kontrolního obvodu tunelového proudu. Tunelová spektra jsou obvykle volena jako superpozice malých, rychlých modulací tunelového napětí, přičemž její skenování je pomalé.

Podobné vlastnosti vykazuje i spektroskopie v optickém blízkém poli. Její značnou předností je schopnost realizovat lokální spektroskopická měření, která nejsou proveditelná pomocí STM a AFM [10-14]. Výhodou je, že spektroskopie - je lokální,

- provádí se v předem zvolených polohách,
- probíhá za definovaných podmínek,
- může být kombinována s jinými metodami,
- může poskytovat spektroskopické obrazy (obr. 3).



**Obr.3.** Lokalizované buzení náboje a jeho detekce v iluminačním a hybridním režimu SNOM.

### 1.1.1 Spektroskopie struktur p-i-n přechodů a laserových diod

Při výrobě laserových diod se používají kvantové jámy pro jejich významné nelineární jevy. Aby se dosáhlo dobré optické lokalizace na povrchu, jámy se často nacházejí ve specifické vrstvě či multivrstvě, mezi vrstvou dotovanou  $n$  materiálem a vrstvou dotovanou  $p$  materiálem (přechod p-i-n). Injektování elektronů a děr probíhá pomocí elektrického proudu. Proces rekombinace elektronů a děr v kvantových jamách vede k vyzařování fotonů. Při slabém injekčním proudu převládá spontánní emise. Když proud překoná určitou prahovou hodnotu, objeví se stimulovaná emise a začíná laserový proces. Pro dosažení vyšší účinnosti a nižšího prahového proudu je možné pracovat s kvantovými tečkami místo s jámami, důsledkem čehož jsou ještě více nelineární jevy.

Principiálně se provádějí dva typy měření: fotovodivost a elektroluminiscence. První experimenty s lokální fotovodivostí realizovali Buratto et al. v r. 1994 na p-i-n přechodu InP, v němž se nacházely kvantové multijámy InGaAsP [15]. Přechod byl osvětlen He-Ne laserem, aby v dotované části InP vznikly nosiče. Měření fotoproudu v různých místech výstupu v přechodu ukázalo podstatně lepší rozlišení než bylo dosažené ve vzdáleném poli. Tato měření poskytla množství informací o heterogenitě růstu, rozložení defektů, apod. Určení fotoproudu v blízkém poli je také dobrou metodou pro studium dalších kvantových struktur. Na Schottkyho fotodiodě Karrai et al. [16] určili velmi přesným způsobem délku difúze majoritních nosičů.

Heteropřechody nebo laserové diody mohou být také studovány pomocí elektroluminescenční spektroskopie. Elektroluminiscenční (EL) experimenty se podobají PL, ale vzhledem k tomu, že ke vzorku je přiloženo předpětí, dochází k elektrickému buzení vzorku, ten svítí a chová se jako zdroj záření. Hrot SNOM nyní slouží k detekci tohoto světla. Prostorové rozlišení PL v polovodičích je komplikované, závisí na penetrační hloubce, ohybu pásů, rychlosti povrchové



rekombinace a zejména na velikosti apertury hrotu sondy. Rozlišení je lepší, jestliže se vyšší rychlost povrchové rekombinace kombinuje s ohybem pásu tak, že majoritní nosiče difundují k povrchu.

Změnou budící vlnové délky je možné realizovat také spektroskopii fotoproudu v blízkém poli (NPC). Touto změnou, tzn. i změnou penetrační hloubky v polovodiči, je možné oddělit příspěvky od povrchu vzorku od příspěvků z hloubky vzorku [17].

## 2 CÍLE PRÁCE

Optický mikroskop pracující v blízkém poli je možné využít k lokálnímu měření různých mechanismů kontrastu, proto prezentovaná práce sestává z několika samostatných dílčích témat, které jsou současně i jejími cíli:

- a) Příprava vhodných optických sond pro měření v optickém blízkém poli.
- b) Experimentální lokální spektroskopie polovodičových struktur. V této části jsou postupně studovány tři aplikační směry:
  - Injektování lokálně indukovaného fotoproudu do Schottkyho bariéry Au/GaAs a současná vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní.
  - Studium vlivu rozměrů sond mikroskopu na lokálně opticky indukovaný fotoproud v polovodičových strukturách s kvantovými jámami v blízkém poli.
  - Studium defektů a vlivu procesu akcelerovaného stárnutí výkonných laserových diod vykazujících různou strukturu vlnovodné vrstvy.

Ve všech třech aplikacích byl použit hybridní iluminačně-kolekční mikroskop s pokoveným i nepokoveným hrotem sondy, přičemž se lišily vzorky.

## 3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

### 3.1 PŘÍPRAVA SOND

Prvním cílem práce (zdaleka však ne zanedbatelným) byla *příprava vhodných optických sond* nezbytných pro měření v optickém blízkém poli a *jejich interakce se vzorkem v blízkém optickém poli*. Pro dosažení tohoto cíle byly postupně vyrobeny sondy z jednovidového a mnohavidového vlákna modifikací dvou známých metod, tj. ohřevem a tažením vlákna či jeho leptáním v různých prostředích a jejich následným pokovením, či ponecháním bez kovové vrstvy. Přitom byly teoreticky a experimentálně studovány jejich charakteristiky. Vhodná technologie přípravy sond měla přispět k vylepšení stávajícího iluminačně-kolekčního mikroskopu tak, aby s ním bylo možné měřit lokální optické a elek-trické vlastnosti na polovodičových rozhraních s kvantovými detaily a dosáhnout přitom subvlnového rozlišení. Tato kapitola je částečně založena na výsledcích publikovaných v [A1-A5].

### 3.2 LOKÁLNÍ SPEKTROSKOPIE POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR

Nejdůležitější výsledky, dosažené s inovovaným mikroskopem v blízkém optickém poli, jsou prezentovány a diskutovány v oddíle věnovaném jádru práce a třetímu cíli – *experimentální lokální spektroskopii polovodičových struktur*. Potenciální předností, kterou v tomto případě nabízí optika v blízkém poli, je snadná změny vlnové délky. Ta byla použita u tří případů lokální spektroskopie, která se jeví jednou z hlavních aktivit využití optického blízkého pole. Ve všech aplikacích byl použit hybridní iluminačně-kolekční mikroskop s pokoveným i nepokoveným hrotem, přičemž se lišily zkoumané vzorky. Kapitola s experimentálními výsledky je částečně založena na publikacích [A6-A16].

#### 3.2.1 Vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní v Schottkyho bariéře

V první části, tj. *injektování lokálně indukovaného fotoproudu do Schottkyho bariéry a vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní*, byla studována homogenní Schottkyho bariéra na rozhraní Au/GaAs [16,A8]. Protože se v technologiích polovodičů používají struktury o subvlnových rozměrech, je možné použít SNOM ke kontrole a detekci nehomogenit a defektů vzorku. Přitom bylo aplikováno lokální osvětlení pomocí nanozdroje s proměnou vlnovou délkou. Současně byly zaznamenány změny fotoproudu pro pět různých vlnových délek a při různých předpětích přiložených ke vzorku. Byly porovnány výsledky dosažené pomocí pokovené i nepokovené dielektrické sondy.

### **3.2.2 Vliv rozměrů zdroje na rozlišení v případě lokálně opticky indukovaného fotoproudu do polovodičové struktury**

V druhé části byl studován *lokálně opticky indukovaný fotoproud do polovodičových struktur* (Near-field optical beam induced photocurrent - NOBIC). Aplikovaná metoda spočívá v lokálním buzení fotoproudu pomocí nanozdroje – hrotu sondy. Obraz fotoproudu vykazuje vysoké rozlišení u polovodičových materiálů, což umožní provést korelaci složení vrstev přímo s lokálními optickými vlastnostmi optoelektronických součástí. Byl zkoumán vliv rozměrů apertury sondy na rozlišení metody NOBIC, a jak toto rozlišení souvisí s množstvím evanescentního pole vevázaného do polovodiče [A13].

### **3.2.3 Studium defektů a vliv procesu stárnutí vlnovodné struktury výkonných laserových diod**

V třetí, nejobsáhlejší, části byla využita spektroskopie fotoproudu v blízkém poli pro *studium defektů a vlivů procesu stárnutí* u vysoce výkonných laserových diod. Byla provedena srovnávací studie prostorového rozložení spekter se superrozlišením pro výkonné laserové diody s různou skladbou vlnovodné struktury. Diody byly zkoumány před a po akcelerovaném stárnutí laserové struktury. Provedené experimenty umožňují pohled na mechanismus vzniku poruch v *p-i-n* přechodech InAlGaAs/GaAs laserů, které podstupují proces akcelerovaného stárnutí [A9]. Vliv vlnovodné struktury a procesů povrchové rekombinace na rozdělení fotoproudů v blízkém poli byl studován pomocí metody BPM (beam propagating method).

## 4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

### 4.1 PŘÍPRAVA SOND

Optické sondy používané v mikroskopii blízkého pole musí splňovat několik základních požadavků [A3]:

Optické:

- kompromis mezi množstvím světla nezbytným k dosažení žádoucího rozlišení a množstvím detekovaného signálu,
- materiál odpovídající dané spektrální oblasti (malá absorpce),
- polarizační odezva.

Mechanické:

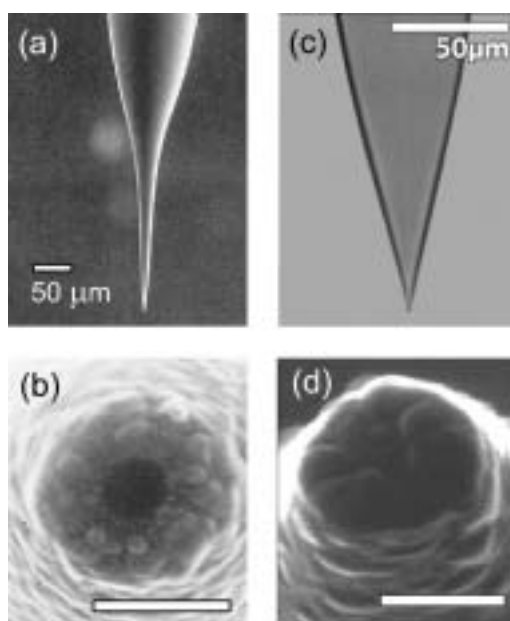
- dostatečná pružnost sondy, aby nedošlo k poškození hrotu,
- malé rozměry pro topografické rozlišení.

Teplotní:

- světelný výkon přenášený pokovenými sondami musí být nižší než desetiny miliwattů, aby se tepelně nepoškodila kovová vrstva sondy.

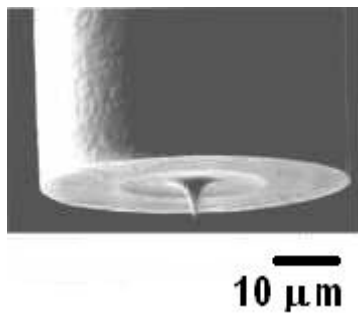
Chemické:

- sondy musí být použitelné pro biologické prostředí.

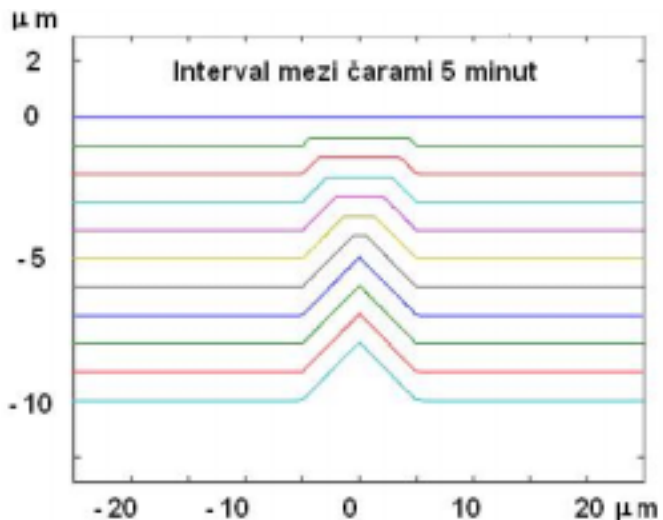


**Obr. 4.** SEM obrazy sondy z jednovidového vlákna: a) taženého, c) taženého a leptaného. b) tažené vlákno z a) pokovené 80 nm vrstvou Al. Průměr apertury 80 nm. d) leptané vlákno z c) pokovené 80 nm vrstvou Al. Průměr apertury 50 nm. Velikost měřítka 200 nm.

Zlepšili jsme metodiku dosavadní výroby reprodukovatelných hrotů tím, že jsme nejprve vytvořili hrubý tvar kužele ohřevem a tažením vlákna [A2]. Konečný ostrý tvar je dosažen rychlým leptáním v HF (obr. 4.c). Tato hybridní technika umožňuje zkrátit dobu výroby sondy a dosáhnout reprodukovatelnosti tvaru sondy. Pokovený hrot je vhodný pro dosažení vysokého kontrastu obrazů [2], pro spektroskopické aplikace je výhodnější jednoduchý nepokovený, tj. dielektrický hrot vlákna.



**Obr. 5.a** SEM obraz leptaného jednovlákenného vlákna Nufern 630HP (vhodné pro vlnové délky 610–770 nm, útlum < 12 dB/km při  $\lambda = 632,8$  nm). [A3]

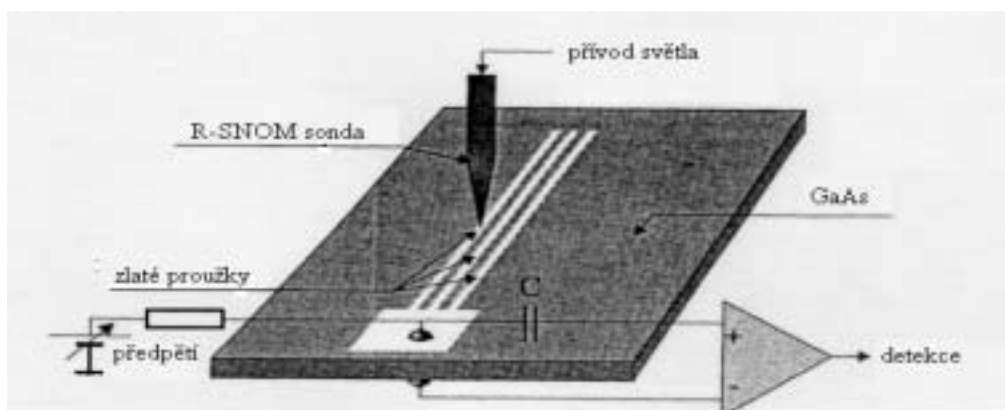


**Obr. 5.b** Časový průběh vzniku hrotu leptáním jednovlákenného vlákna z obr. 4.2a. v 48% vodním roztoku HF.

## 4.2 EXPERIMENTÁLNÍ LOKÁLNÍ SPEKTROSKOPIE POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR

### 4.2.1 Vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní v Schottkyho bariéře

Jako příklad jsme studovali rovinnou homogenní Au/GaAs Schottkyho bariéru. Přitom jsme použili lokální osvětlení pomocí nanozdroje s proměnou vlnovou délkou. Protože se v technologiích polovodičů používají struktury o subvlnných rozměrech, je možné použít SNOM ke kontrole a detekci nehomogenit.

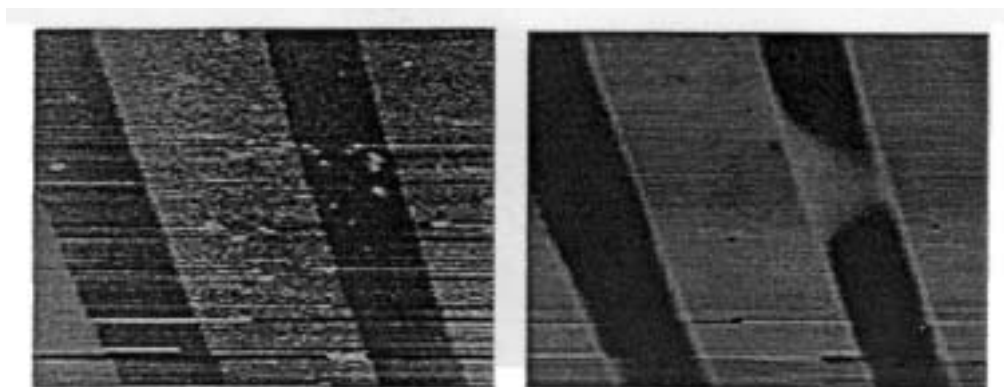


**Obr. 6.** Schéma experimentu.

Vzorkem je GaAs substrát, na němž jsou naneseny tři zlaté proužky (elektrody) ( $\text{š} = 15 \mu\text{m}$ ,  $d = 5 \text{ nm}$ ,  $v = 10 \text{ nm}$ ). Několik vrstev s rozdílnou koncentrací donoru Si bylo naneseno na  $n^+$  dotovaný GaAs substrát. Elektrické kontakty byly umístěny na

zlatých proužcích a na spodní stěně struktury.

Princip experimentu je na Obr. 6. Vzorek byl skenován jednak Al-pokoveným optickým hrotem, jednak dielektrickým nepokoveným hrotem. Současně byl zaznamenán fotoproud a topografie zlatých proužků (obr. 7).

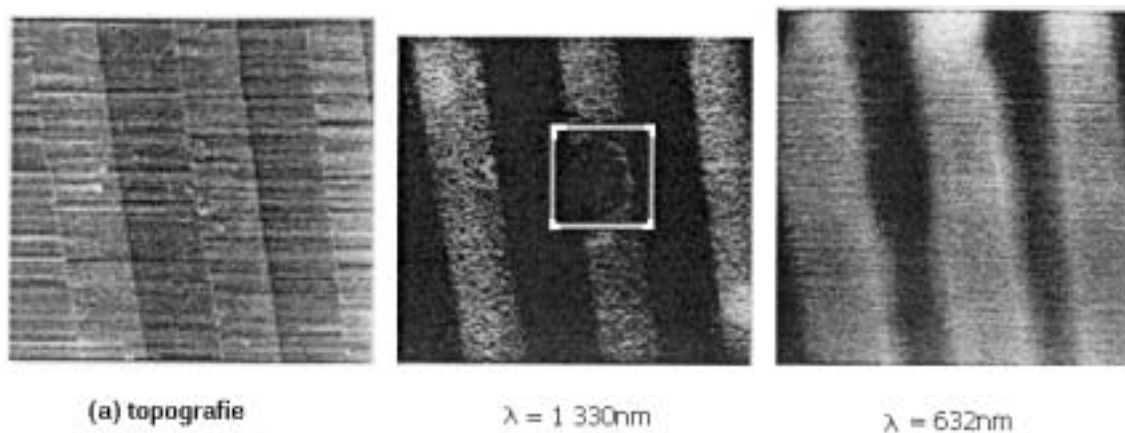


**Obr.7.** Detekce vzorku pokoveným hrotem. a) topografie b) obraz fotoproudu.

Vidíme, že při  $\lambda = 782$  nm oba obrazy korelují: obraz fotoproudu odpovídá topografii zlatých proužků, což potvrzuje tento experiment. Velikost fotoproudu je 10 pA. Obraz fotoproudu má vysoké rozlišení, ale několik jevů může toto rozlišení ovlivnit. Na Obr. 7.b uprostřed můžeme vidět přemostění fotoproudu mezi dvěma proužky. Tato difúze ukazuje, že rozlišení není pouze funkcí optického rozlišení hrotu.

Některé obrazy byly získány pomocí nepokoveného hrotu, v důsledku nízkého fotoproudu při  $\lambda = 1,31\mu\text{m}$ . Pro tuto vlnovou délku zde získáme vyšší rozlišení ze dvou důvodů:

- GaAs je téměř transparentní pro tuto vlnovou délku a zlatý proužek nezáří,
- pole v okolí hrotu je dostatečné k dosažení subvlnového rozlišení, jak prokázaly litografické experimenty. [1]



**Obr.8.** Obrazy fotoproudu získané pomocí dielektrického hrotu.

Na středním snímku v Obr. 8 je záznam vady rozhraní, což nekoreluje s topografií ani s poškozením zlatého proužku: fotony mají nízkou energii a tedy fotoproud závisí značně na kvalitě rozhraní. Tatož vada není viditelná na pravém snímku navzdory vyšší úrovni fotoproudu při  $\lambda = 632$  nm (okolo 1 nA, místo 10 pA) [A15].

Pro lepší rozlišení s dielektrickým hrotem jsme na přechod přiložili předpětí: vzhledem k Schotkyho jevu způsobuje změna napětí změnu šířky přechodu. Kladné napětí na kovu snižuje bariéru polovodič/kov a tím roste fotoproud. Naopak, jestliže záporné napětí roste, zvyšuje se bariéra a fotoproud klesá (Obr.9).



a)  $U = -1,5$  V

b)  $U = 0$  V

c)  $U = +0,3$  V

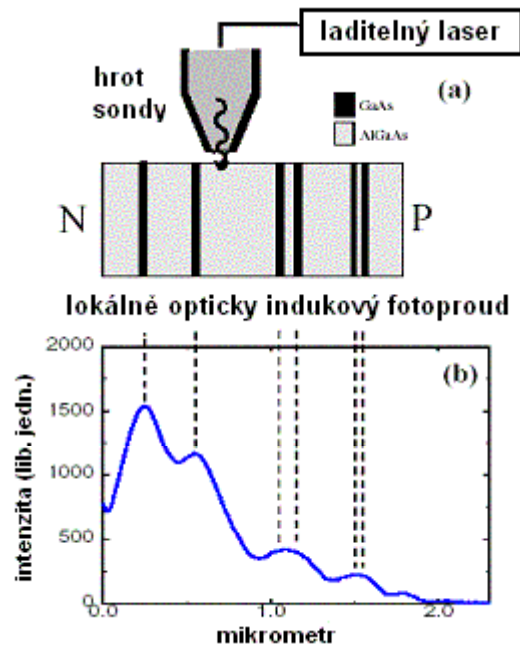
**Obr. 9.** Obraz fotoproudu při  $\lambda = 543$  nm při různých předpětích.

#### 4.2.2 Vliv rozměrů zdroje na rozlišení v případě lokálně opticky indukovaného fotoproudu do polovodičové struktury

Faktory, které omezují rozlišení fotoproudu v blízkém poli spadají do dvou velkých oblastí: za prvé, velikost objemu vzorku pod hrotem, která absorbuje dopadající záření a odtud plynoucí prostorové rozložení fotogenerovaných nosičů. Za druhé, transport těchto nosičů následuje jejich vznik ke kontaktům ve vzorku.

Použití heterostruktur může eliminovat omezení způsobené difúzí, jak je ilustrováno umístěním AlGaAs širší vrstvy zakázaného pásu v ochuzené oblasti [15]. Fotoproud v blízkém poli laserových diod také indikoval dominanci difúzní délky majoritních nosičů v rozlišení NPC [3, A8]. V těchto studiích, byly šířka ochuzené oblasti i penetrační hloubka stejného řádu jako difúzní délky majoritních nosičů. V důsledku těchto faktorů ovládají lokace  $p$ - $n$  přechodu a difúze nosičů proces rozlišení. Navíc, dosud žádná studie nesledovala vliv dvou těsně u sebe ležících oblastí identického složení vzorku na rozlišení.

Ke studiu rozlišení NOBIC, sloužila polovodičová struktura, sestávající s tří párů GaAs kvantových jam, oklopených bariérami z  $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ , které se nacházejí v ochuzené oblasti  $p$ - $i$ - $n$  diody. Důvodem, proč bariéry  $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$  obklopují GaAs kvantové jámy, je abychom dostali okno o vlnové délce 700-850 nm, v němž GaAs kvantová jáma pouze absorbuje dopadající záření. To umožňuje studovat závislost NOBIC na vlnové délce. Navíc,  $p$ - a  $n$ -oblasti  $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$  vytvářejí difúzní bariéry pro nosiče generované v neutrálních GaAs oblastech, zejména substrát a horní  $p$ -vrstva GaAs.



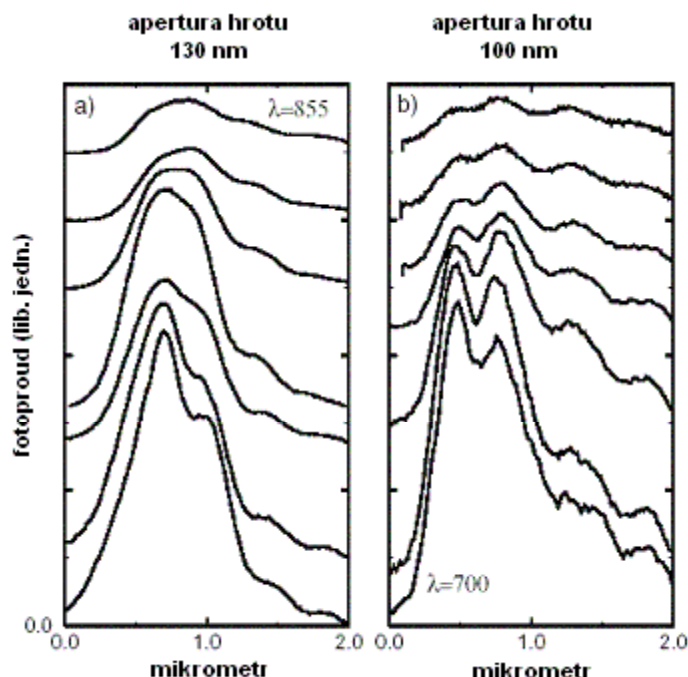
**Obr. 10.** a) Schéma měření. b) Rastrovací křivka NOBIC měření s nákresem struktury vrstvy. GaAs kvantové jámy jsou 30 nm široké a v párech jsou od sebe vzdáleny 300 nm, 120 nm, 50 nm. K vzorku je přiloženo předpětí -2V [A9].

Na Obr. 10 je znázorněna NOBIC čára skenu při  $\lambda = 700$  nm ve směru epitaxního růstu a její korelace se strukturou vrstev. Kvantové jámy, vzdálené 300 nm od sebe, jsou jasně rozlišeny. Je-li hrot sondy ve výšce 500 nm nad povrchem, pak jsou tyto dvě GaAs jámy nerozlišitelné. V tomto experimentu jsme nemohli rozlišit páry jam, které se nacházely v menší vzdálenosti a to v důsledku značného průměru sondy (130nm) a nedostatku úplného vyprázdnění oblasti, které bylo způsobené přítomností silně  $p$ -dopovaného pozadí v neúmyslně dopované oblasti, což se projeví jako  $p$ - $\pi$ - $n$  struktura. V těchto diodách jsou také zřetelné jak vysoká hodnota pozadí, tak i vysoký únikový proud v závěrném směru, což zabraňuje použití velkých závěrných předpětí. Profil elektrického pole v ochuzené oblasti je zřejmý z celkové-ho poklesu fotoproudu, když se excitační hrot sondy pohybuje směrem od rozhraní  $n$ - $\pi$ . To omezuje kolekční účinnost fotogenerovaných nosičů i rozlišení obrazu.

Profil blízkého pole z apertury subvlnových menších rozměrů obsahuje jak evanescentní, tak i šířící se složky. Evanescentní vidy, v nichž se nachází většina intenzity, klesají rychle ve volném prostoru, ve vzdálenostech menších, než je poloměr sondy [A9,21]. Když hrot rastruje v těsné blízkosti povrch polovodičového vzorku, mohly bychom se nadít obrazů se superrozlišením, způsobeným poklesem evanescentního pole bez ohledu na koeficient absorpce. V tomto případě nebyla pozorována spektrální závislost rozlišení NOBIC na vlnové délce. Avšak vzhledem k tomu, že polovodič je mnohem hustší prostředí ( $n \approx 3,5$  pro GaAs) než křemenný hrot ( $n = 1,5$ ) a vzduch, mohou být evanescentní vidy navázány do šířících se vidů v polovodiči. Profil pole pro tyto šířící se vidy je tak ovládan objemovými



charakteristikami absorpce v materiálu. V tomto případě určuje penetrační hloubka v GaAs kvantové jámě maximální rozlišovací schopnost pro NOBIC zobrazování polonekonečných struktur.



**Obr.11.** Závislost NOBIC signálu na vlnové délce excitačního záření pro hrot o průměru a) 130 nm, b) 100 nm. Rozsah použitých vlnových délek je 700 - 855 nm. V Obr. 11 a) je možné si všimnout poklesu rozlišovací schopnosti s růstem vlnové délky a penetrační hloubky, zatímco pro menší hrot b) je rozlišení hlavně způsobeno větší složkou nešířícího se pole od apertury menšího hrotu.

Užitím apertur sond o různých průměrech, a tedy změnou velikosti vlnového vektoru evanescentní složky vystupujících polí, jsme mohli pozorovat oba tyto režimy. NOBIC byl proveden jako funkce budící vlnové délky s hroty o průměru 130 nm a 100 nm. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 11 pro excitační vlnové délky od 700 nm do 855 nm a kvantové jámy vzdálené od sebe 300 nm. V Obr. 11a je zřejmé, že v případě sondy o průměru apertury 130 nm je dosaženo nejvyššího rozlišení s nejkratšími vlnovými délkami. Pro  $\lambda = 755$  nm již nejsou dvě kvantové jámy rozlišeny. Pro oblast 700-855 nm klesá objemový koeficient absorpce GaAs s rostoucí vlnovou délkou od  $4 \cdot 10^4$  do  $1 \cdot 10^4$   $\text{cm}^{-1}$ , což odpovídá penetrační hloubce od 250 nm pro  $\lambda = 700$  nm, po 1  $\mu\text{m}$  pro  $\lambda = 855$  nm. Tedy kratší vlnová délka a menší penetrační hloubka znamenají, že větší část optického pole je absorbována v kvantové jámě přímo pod hrotem. Vlnové délky kratší než 700 nm nevedou k vyššímu rozlišení, poněvadž AlGaAs bariéry již nejsou transparentní, čímž by se zničil kontrastní mechanismus NOBIC.

Na Obr. 11b jsou výsledky pro hrot o průměru apertury 100 nm. Místo ztráty rozlišení pro excitaci delšími vlnovými délkami si uchovává menší apertura totéž rozlišení, dokonce i při delších vlnových délkách, kde hloubka optické absorpce je

větší ( $\alpha_L = 1 \mu\text{m}$ ). Pro průměr 100 nm je apertura hrotu menší než  $\lambda/2$  v GaAs ( $\lambda/2n$ ,  $n = 3,5$ ) pro celou oblast 700-855 nm. Tato data interpretujeme tak, že velká část optického pole způsobující fotoexcitaci zůstává v GaAs evanescentní. V tomto případě rozlišení nezávisí na vlnové délce excitačního světla. Naproti tomu, 130 nm apertura hrotu je větší než  $\lambda/2$  pro celou oblast uvažovaných vlnových délek, což má na následek silnou vazbu na šířící se vlny, jak je určeno spektrálně závislou rozlišovací schopností.

V Obr. 11b je pološířka (Full-Width-at-Half-Maximum) FWHM signálu fotoproudu asi 350 nm, což je značně více, než je velikost apertury hrotu. Tato relativně velká šířka je způsobena povrchovým vyprázdněním na rozhraní GaAs-vzduch, což účinně zavádí prostorovou vrstvu mezi hrot a opticky aktivní polovodičovou oblast pro rychle divergující optické pole. Vyprázdnění povrchu také částečně přispívá ke snížení fotoproudu, v případě, kdy k excitaci dochází mimo přechod. Tedy, abychom získali rozlišení v blízkém poli pomocí evanescentního pole vevázaného do polonekonečných polovodičových struktur, by měla být velikost apertury zvolena vzhledem k indexu lomu  $n$  materiálu a použité excitační vlnové délce:  $a \leq \lambda/2n$ .

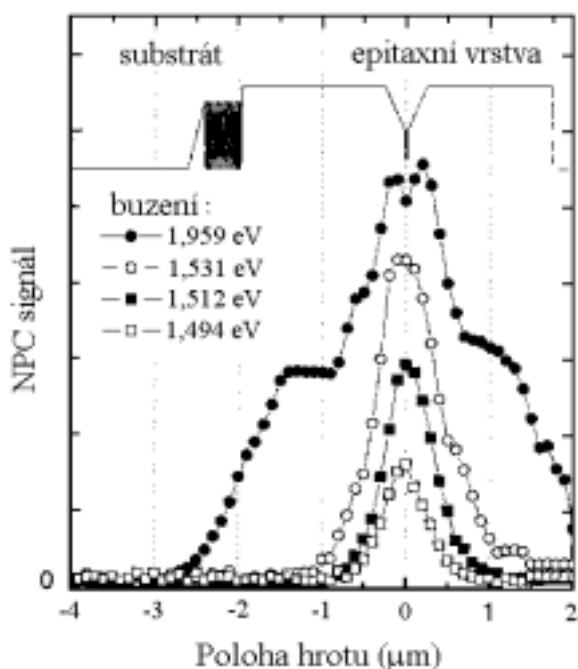
#### **4.2.3 Studium defektů a vliv procesu stárnutí vlnovodné struktury výkonných laserových diod**

V této části byla provedena srovnávací studie spekter fotoproudu dvou výkonných laserových diod, vyznačujících se různými vlnovodnými charakteristikami v případě před a po procesu akcelerovaného stárnutí struktury diody (1200 hodin při teplotě 50°C). Tato spektra byla jen obtížně rozlišitelná ve vzdáleném poli. Díky lokální excitaci laserové struktury pomocí nanometrické apertury SNOM mikroskopu bylo dosaženo subvlnové prostorové rozlišení a bylo možné zkoumat, jak jednotlivé části struktury přispívají k výslednému signálu. Přeladováním barvičkového laseru, buzeného ultrafialovým dusíkovým laserem, bylo možné dosáhnout budících energií pod i nad energií, kterou vyzařuje laserová dioda, a tím bylo možné studovat jednotlivé vlastnosti a komponenty diody. Při nižších budících energiích byla generace majoritních nosičů menší než absorpce IČ na aktivním defektu nebo příměsi v daném místě, zatímco pro energie nad laserovým zářením 1,53 eV převažuje absorpce vrstvy s aktivní dvojitou kvantovou jámou. V diodě s dvojitou kvantovou jámou ležící v ochuzené oblasti s gradientně proměnným indexem lomu (DQW-GRIN) byla pozorována velká změna tvaru křivky fotoproudu v blízkém poli v závislosti na budící energii. Velmi patrná změna signálu fotoproudu v blízkém poli byla pozorována v oblasti DQW, kde vykazovala výraznou strukturu s dvěma maximy. Pomocí paprskového modelu jsme došli k závěru, že kontrast signálu fotoproudu v blízkém poli vznikal pravděpodobně v důsledku šířících se vln ve vlnovodném kanálku uvnitř gradientní vrstvy, a že pozorované dvojí maximum je možné přisoudit nezářivým rekombinačním jevům v blízkosti povrchu [A13, 22].

Porovnáním výsledků spekter fotoproudu v blízkém poli v případě nové diody a téže struktury po proceduře zrychleného stárnutí bylo zjištěno, že dva aspekty přitom byly velmi důležité:

- 1) vliv stárnutí struktury na koncentraci a rozložení příměsí,
- 2) vliv stárnutí struktury na nezářivé rekombinační procesy v blízkosti povrchu.

Na Obr.12 jsou 1-D skeny fotoproudu v blízkém poli ve směru kolmém k aktivní vrstvě diody po stárnutí. Pro budicí energii  $E_{ex} = 1,959$  eV jsou jak amplituda signálů, tak i tvar obrazů fotoproudu v blízkém poli před a po stárnutí struktury podobné. Signál tvoří široké rameno, v případě kdy se hrot sondy nachází nad  $n$ - či  $p$ - dotovanou vrstvou pláště, a malý pík uvnitř DQW-GRIN vrstvy. Jak bylo řečeno výše, rameno vzniká v důsledku absorpce nevedených šířících se vln ve vrstvách DQW-GRIN, zatímco menší pík pochází od absorpce vedených šířených vln uvnitř DQW vrstvy a proces stárnutí jej prakticky neovlivňuje [A12].



**Obr.12.** Skeny fotoproudu v blízkém poli pro  $E_{ex} = 1,959$  eV, 1,531 eV, 1,512 eV a 1,494 eV pro DQW-GRIN diodu po procesu akcelerovaného stárnutí. Směr skenování je kolmý k aktivní vrstvě. Maximální hodnota signálu pro každý přechod byla normalizována, abychom mohli lépe porovnat přechody pro různé budicí energie.

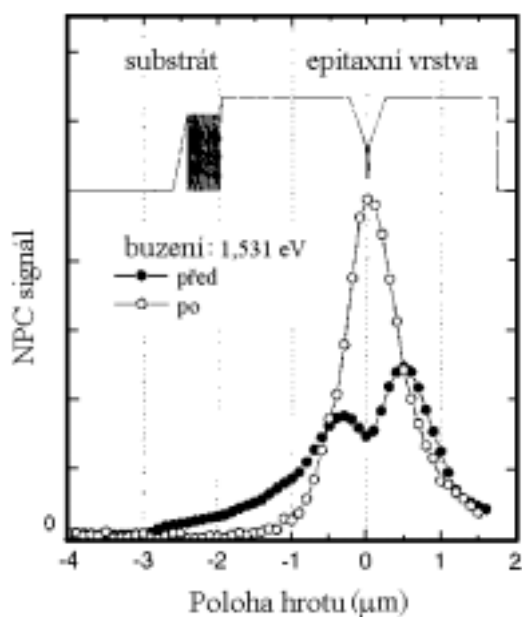
Tvar signálu fotoproudu v blízkém poli, pocházející od příměsí při energiích nižších než je energie fotonu laseru (1,476 eV a 1,494 eV) se mění při stárnutí jen nepatrně. Křivka skenu pro diodu po stárnutí odpovídá gaussovskému tvaru s plnou šířkou 600 nm pro poloviční maximum. Při porovnání s novou diodou vzroste intenzita signálu při energiích pod energií fotonu při stárnutí dvakrát, což je v souladu s vlivem procesu stárnutí na makroskopické spektrum fotoproudu. To ukazuje na fakt, že koncentrace IČ aktivního defektu *uvnitř* DQW-GRIN oblasti při stárnutí značně vzrůstá. Navíc tato metoda poprvé umožnila lokalizovat místa defektů.

Stárnutí diody mělo značný vliv na tvar signálu fotoproudu v blízkém poli pro budicí energie blízké energii pásu aktivní vrstvy. Signály fotoproudu v blízkém poli při budicí energii 1,512 eV a 1,531 eV vykazují jeden vrchol v DQW oblasti. Šířka těchto vrcholů se mírně zvětšuje s rostoucí budicí energií od 600 nm (FWHM) pro 1,476 eV do 700 nm pro 1,512 eV až po 900 nm pro 1,531 eV. Tyto experimentální výsledky byly porovnávány s výsledky pro novou diodu při budicí energii 1,531 eV (Obr. 13.).

Ve spektru fotoproudu v blízkém poli jsou patrné dvě výrazné změny:

- *struktura dvojího maxima* pro polohy hrotu v blízkosti oblasti DQW-GRIN *před* stárnutím se změní na *strukturu s jediným vrcholem* po procesu stárnutí.
- široké pozadí, které jsme našli pro novou diodu při polohách hrotu v *p*-dotované oblasti vrstvy pláště, zmizelo po akcelerovaném stárnutí.

V případě nové diody jsme předpokládali, že toto pozadí pochází od absorpce nevedených vln v DQW oblasti. Tzn., že *příspěvek DQW k signálu fotoproudu v blízkém poli prudce klesá v závislosti na procesu stárnutí diody.*



**Obr.13.** Porovnání skenů fotoproudu v blízkém poli pro  $E_{ex} = 1,531$  eV pro DQW-GRIN laserové diody před akcelerovaným stárnutím (plné kroužky) a po něm (prázdné kroužky). Na obrázku je znázorněn i tvar potenciálu vodivostního pásu (nahore - plná čára).

Na prvních experimentálních výsledcích jsme prezentovali, že lokální spektroskopie fotoproudu v blízkém poli je vhodnou metodou, která může poskytnout přímý pohled na vliv stárnutí, které ovlivňuje mikroskopické procesy tvorby defektů a povrchových rekombinací v aktivní vrstvě výkonných laserových diod. Naše diskuse dosud nevyjasnila povahu defektů spojených se stárnutím. Ukázali jsme, že jasné IČ aktivní defekty zvyšují signál fotoproudu v oblasti nižších budících energií. V důsledku značného vlivu jevů spojených s vlnovodnou strukturou na tvorbu obrazu fotoproudu v blízkém poli, je možné vysvětlit současné experimenty pravděpodobně pomocí defektů, vzniklých migrací příměsí do vlnovodné vrstvy. To bude cílem naší další práce.

## 5 ZÁVĚR

Práce, představená v této disertaci, se zaměřila na základy a několik vybraných aplikací aperturního SNOM, pokrývá však jen malou část bouřlivě probíhajícího výzkumu v oblasti optiky v blízkém poli. Její cíle byly zaměřeny na vývoj existujícího rastrovacího optického mikroskopu v blízkém poli, zejména na studium vhodných sond, a na aplikace mikroskopu pro lokální studium optických a elektrických vlastností optoelektronických struktur. Práce byla vypracována během doktorského studia na Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně v letech 1997–2001. Některé z experimentů byly provedeny v rámci projektu Barrande č.98022 „Application de la microscopie en champ proche aux mesures nanométriques des paramètres de matériaux semiconducteurs“ v letech 1998 a 1999 během dvou krátkodobých studijních pobytů v Laboratoři P.M.Duffieux Univerzity Franche-Comté v Besançonu, Francie. Práce je v ČR v určitém směru pionýrská, protože donedávna se žádné české pracoviště podobnou problematikou nezabývalo.

Práce měla několik samostatných cílů. Po stručné prezentaci konceptů i fyziky evanescentních vln, fotonového tunelového jevu i blízkého pole, jsme provedli přehled různých experimentálních konfigurací, které se užívají v optické tunelové mikroskopii. Na základě obrazů vypočtených pomocí mikroskopického modelu vazby jsme realizovali studii přenosu frekvencí mezi předmětem a obrazem. Tento přenos se ukázal být silně nelineárním. Odtud je jasné, že charakterizování přenosu frekvencí bude vyžadovat ještě značnou teoretickou práci.

Prvním, pro další činnost nezbytným, cílem práce byla *příprava vhodných optických sond* pro měření v optickém blízkém poli, vzhledem k tomu, že sonda je klíčovým místem mikroskopu, pokud jde o jeho rozlišovací schopnost. SONDY byly vyrobeny modifikací dvou základních metod, tj. ohřevem a tažením vlákna či jeho leptáním v různých prostředích a jejich následným pokovením, či ponecháním bez kovové vrstvy. Zvolená technologie sond měla přispět k vylepšení stávajícího iluminačně-kolekčního mikroskopu tak, aby s ním bylo možné měřit lokální optické a elektrické vlastnosti na polovodičových rozhraních a dosáhnout přitom subvlnového rozlišení. To se v rámci technologických možností podařilo.

Nejdůležitější výsledky, které jsme dosáhli s inovovaným mikroskopem v blízkém optickém poli, jsou prezentovány a diskutovány v kapitole zasvěcená jádru práce – *experimentální lokální spektroskopii polovodičových struktur*. Snadnost změny vlnové délky umožňuje tuto činnost, která se jeví jako jedna z hlavních aktivit využití optického blízkého pole.

V této části byly postupně studovány tři cíle:

- *aplikace lokálně indukovaného fotoproudu do Schottkyho bariéry Au/GaAs, vizualizace majoritních nosičů a vad rozhraní,*
- *studium vlivu rozměrů sond mikroskopu na lokálně opticky indukovaný fotoproud v polovodičových strukturách v blízkém poli,*

- *studium defektů a vlivu procesu akcelerovaného stárnutí výkonných laserových diod.*

Ve všech třech aplikacích byl použit hybridní iluminačně-kolekční mikroskop s pokoveným i nepokoveným hrotem, přičemž se lišily vzorky.

V prvním části byla studována homogenní Schottkyho bariéra na rozhraní Au/GaAs. Přitom bylo aplikováno lokální osvětlení pomocí nanozdroje s proměnou vlnovou délkou. Současně byly zaznamenány změny fotoproudu pro pět různých vlnových délek a při různých předpětích. Přínosem práce je, že pomocí osvětlení vlnovými délkami s energiemi v blízkosti prahových hodnot Schottkyho bariéry byl *zviditelněn jednak proud majoritních nosičů a jednak vady rozhraní o subvlnových rozměrech*, které nejsou normálně pozorovatelné při použití AFM topografie či pomocí komerčního optického mikroskopu. To potvrzuje lokální vlastnosti dielektrických sond použitých v našem mikroskopu.

V druhé části byl studován *lokálně opticky indukovaný fotoproud v polovodičových strukturách blízkém poli* (NOBIC). Obraz fotoproudu vykazuje vysoké rozlišení u polovodičových materiálů, což umožní provést korelaci složení vrstev přímo s lokálními optickými vlastnostmi optoelektronických součástek. Bylo zkoumáno, jak rozlišení metody NOBIC, využívající dvě sondy o různé apertuře, souvisí s množstvím evanescentního pole vevázaného do polovodiče. Bylo zjištěno, že pro relativně velké apertury závisí rozlišení značně na penetrační hloubce optických polí do materiálu polovodiče.

V třetí, nejobsáhlejší, části byla využita spektroskopie fotoproudu v blízkém poli pro *studium defektů a vlivů procesu stárnutí* u výkonných laserových diod. Byla provedena srovnávací studie prostorového rozložení spekter se superrozlišením pro laserové diody s různou skladbou vlnovodné struktury. Diody byly zkoumány před a po akcelerovaném stárnutí laserové struktury. Provedené experimenty umožňují pohled na mechanismus vzniku poruch v *p-i-n* přechodech InAlGaAs/GaAs laserů, které podstupují proces akcelerovaného stárnutí. Vliv vlnovodné struktury a procesů povrchové rekombinace na rozdělení fotoproudů v blízkém poli byl studován pomocí metody BPM (beam propagating method). Zjistili jsme, že pomocí této metody je možné analyzovat mikroskopické procesy stárnutí optoelektronických polovodičových součástek.

Metodologie řešení problematiky lokální spektroskopie byla uvedena v odpovídajících paragrafech. Provedené experimenty, v době doktorského studia v ČR ojedinělé, ukázaly velmi specifický charakter blízkého pole a interakce mezi hmotou a zářením. V důsledku objevu a rozvoje tunelové optické mikroskopie se neustále objevují nové moderní oblasti nanooptiky, nebo optiky v blízkém poli, které popisují a využívají světelné jevy generované v oblastech, jejichž rozměry jsou menší než vlnová délka použitého světla.

Tyto metody optické tunelové mikroskopie umožňují studovat lokální vlastnosti na rozhraních kov-polovodič, kov-dielektrikum, či polovodičových rozhraních. Přitom citlivost optické spektroskopie závisí nejen na použité konfiguraci, ale na četných dalších faktorech: polarizaci, intenzitě buzení, časovém intervalu mezi detekcí a buzením a eventuálně na vnějších poruchách.

Pokud jde o perspektivy oboru, je jen z počtu publikací zcela zřejmé, že rychlý rozvoj technik a metod optiky v blízkém poli ještě zdaleka nedosáhl svého vrcholu. Zbývá ještě vyřešit mnoho problémů a musí být provedeno množství extrémně přesných experimentů. Vzhledem k technickým problémům s výrobou hrotů je zde ještě mnoho bílých míst, která je nutné zaplnit či zlepšit, ať již se jedná o stabilitu hrotu, hranici jejich poškození, či účinnost přenosu signálu. Mikrofabrikované optické sondy pro mikroskopii v blízkém poli by mohly pomoci vyřešit tyto problémy a zlepšit reprodukovatelnost např. lepším definováním experimentálních podmínek. Vývoj také směřuje k novým konceptům hrotů, které se začínají odlišovat od prostých aperturních schémat, což by mohlo být výhodné.

Další z možností, jak zvýšit výkonnost aperturních sond, by mohlo být použití UV světla k excitaci povrchů. To by mělo posunout limitní oblast šíření jediného vidu ve špičce hrotu blíže k apexu a podstatně zvýšit koeficienty přenosu. Tohoto jevu by mohly využít sondy menších rozměrů, s menší aperturou a vyšší rozlišovací schopností. Navíc, přímá excitace některých biomolekul by mohla nahradit použití fluorescenčních markerů.

Z našeho hlediska je SNOM oblastí, v níž může být interakce mezi simulací a experimentem extrémně výhodná. Tato interakce však dosud není tak užitečná, jak bychom si přáli. To je možná spojeno s vnitřním omezením numerické simulace proti realistické konfiguraci experimentu (včetně hrotu, vzorku a detekčního schématu) a naopak s experimentálními problémy spojenými s přesnou kontrolou všech relevantních parametrů.

Z tohoto krátkého, neúplného výčtu plyne, že tato oblast, která je velmi významně zastoupena v 6. RP Evropské unie, je pro rozvoj fakulty v oblasti optoelektroniky, fotoniky, nanoelektroniky a nanofotoniky natolik důležitá, že by se jí měla věnovat patřičná pozornost. Bohužel stávající technické zázemí, i přes podporu různých grantových projektů, nedosahuje takové úrovně, aby bylo možné konkurovat vyspělým zemím.

## 6 LITERATURA

- [1] FILLARD, J. P., *Near field optics and nanoscopy*, World Scientific, Singapore, 1996, 438 pages. ISBN 981-02-2394-8.
- [2] COURJON, D., BAINIER, C., *Le champ optique proche: Théorie et applications*, Springer, Paris, 2001, 344 pages, ISBN 2-287-59720-4.
- [3] KAWATA, S., OHTSU, M., IRIE, M (Eds.), *Nano-optics*, Springer, Berlin, 2002, 321 pages. ISBN 3-540-41829-6.
- [4] MAGONOV, S.N., WHANGBO, M-H., *Surface analysis with STM and AFM*, VCH, Weinheim, 1996, 323 pages. ISBN 3-527-29313-2.
- [5] AZOULAY, J., DÉBARRE, A., TCHÉNIO, P., Field enhancement and apertureless near-field optical spectroscopy of single molecules, *J. Microscopy*, 1999, vol. 194, No. 2/3, p. 486-490.
- [6] WEISS, S., Fluorescence spectroscopy of single biomolecules, *Science*, 1999, vol. 283, p. 1676-1683.
- [7] GRAUSEM, J., HUMBERT, B., BURNEAU, A., OSWALT, Subwavelength Raman spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 1997, vol. 70, No. 13, p. 1671-1674.
- [8] KEILMANN, F., KNOLL, B., KRAMER, A., Long-wave-infrared Near-field microscopy, *Phys. Stat.Sol.b*, 1999, vol. 215, No. 7, p. 849-854.
- [9] CHOO, A.G., JACKSON, H.E., THIEL, U., BRABANDER, G.N.D., BOYD, J.T., Near field measurement of optical channel waveguides and directional couplers, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, vol. 65, No.8, p. 947-949.
- [10] OHTSU, M. (Ed.) *Near-field nano/atom optics and technology*, Springer, Tokyo, 1998, 302 pages, ISBN 4-431-70228-5.
- [11] Vanden RHODES, G.H., POMEROY, J.M., ÜNLÜ, M.S., GOLDBERG, B.B., KNOPP, K.J., CHRISTENSEN, D.H., Pump intensity profiling of vertical-cavity surface-emitting lasers using near-field scanning optical microscope, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 72, No.15, p. 1811-1813.
- [12] GREGOR, M.J., BLOME, P.G., ULBRICH, R.G., GROSMANN, P., GROSSE, S., FELDMANN, J., STOLZ, W., GOBEL, E.O., ARENT, D.J., BODE, M., BERTNESS, K.A, OLSON, J.M., Near-field optical characterization of the photoluminescence from partially ordered (gain) P, *Appl. Phys. Lett.*, 1995, vol. 67, No. 24, p. 3572-3574.
- [13] LIU, J., PERKINS, N.R., HORTON, M.N., REDWING, J.M., TISCHLER, M.A., KUECH, T.F., A near-field scanning optical microscopy study of the photoluminescence from GaN films, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, No. 32, p.3519-3521.



- [14] CROWELL, P.A., YOUNG, D.K., KELLER, S., HU, E.L., AWSHALOM, D.D., Near-field scanning optical spectroscopy of an InGaN quantum well, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 72, No. 8, p. 927-929.
- [15] BURATTO, S.K., HSU, J.W.P., TRAUTMAN, J.K., BETZIG, E., BYLSMA, R.B., BAHR, C.C., CADILLO, J., Imaging InGaAsP quantum-well laser using near-field scanning optical microscopy, *J.Appl. Phys.*, 1994, vol. 76, No. 12, p. 7720-7725.
- [16] KARRAI, K., KOLB, G., ABSTREITER, G., SCHMELLER, A., Optical near-field induced current microscopy, *Ultramicroscopy*, 1995, vol. 61, No.2/3, p. 299-304.
- [17] GHAEMI, H.F., GOLDBERG, B.B., CATES, C., WANG, P.D., TORRES, C.M.S., FRITZE, M., NURMIKKO, A., Spectroscopy of individual quantum structures with low-temperature near-field optical microscopy, *Superlatt. and Microstruc.*, 1995, vol. 17, No. 1, p. 15-18.
- [18] BARCHIESI, D., GIRARD, C., MARTIN, O. J. F., Van LABEKE, D., COURJON, D., Computing the optical near-field distributions around complex subwavelength surface structures: A comparative study of different methods, *Phys. Rev.*, 1996, vol. E 54, No. 4, p. 4285-4292.
- [19] BETHE, H. A., Theory of diffraction by small holes, *Phys.Rev.*, 1944, vol. 66, p.163-182.
- [20] BOUWKAMP, C.J., CASIMIR, H.B.G., On multipole expansions in theory of electromagnetic radiation, *Physica*, 1954, vol. 20, p. 539-554.
- [21] ASH, E., NICHOLLS, G. Super-resolution aperture scanning microscope, *Nature*, 1972, vol. 237, p. 510-512.
- [22] TOMÁNEK, P., Optická tunelová mikroskopie s lokální sondou, In: Frank, L., Král, J., (Eds). *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*, chapt.8, Academia, Praha, 2002, p. 351-379, ISBN 80-200-0594-3.

## 7 VLASTNÍ PUBLIKACE

- [A1] TOMÁNEK, P., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS, P., GRMELA, L., LÉTAL, P., Topography and local spectroscopy of transparent and reflection surfaces with subwavelength lateral resolution, In Breza J. *et al* (Eds): *New trends in surface analysis*, FEI STU Bratislava, 1997, p.49-52. ISBN 80-227-1010-5.
- [A2] LÉTAL, P., Microfabrication of the local probes for Scanning Near Field Optical Microscopy, *Proc.of 8th conf. STUDENT EEICT 2002*, Brno, Novotný, 2002, vol. 2, p. 229-233. ISBN 80-214-2115-0.
- [A3] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., Lokální optické vláknové sondy pro mikroskop pracující v blízkém poli, *Jemná mech. a optika*, 2004, vol.49, No 6, p. 163-166. ISSN 0447-6441.
- [A4] LÉTAL, P., Scattering model of evanescent waves in near-field detection, In: Svačina, J. (Ed.) *Radioelektronika 98*, VUT Brno, 1998, vol.2, p. 438-444. ISBN 80-214-0983-5.
- [A5] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., Testování řádkovací tunelové mikroskopie: detekce povrchových plasmonových polaritonů, In: *CO-MAT-TECH'99*, Trnava, STU Bratislava, 1999, vol.2, p. 361-364. ISBN 80-227-1272-8.
- [A6] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., Topography and spectroscopy of the semiconductor interface, In: *Photonics Prague '99*, Book of Abstracts, Prague, TechMarket, 1999, p. 88. ISBN 80-86114-27-9.
- [A7] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., DOBIS, P., BRÜSTLOVÁ, J., GRMELA, L., Local spectroscopy by scanning near-field optical microscopy, *Eng. Mech.*, 1998, vol. 5, No.3, p. 215-218.
- [A8] LÉTAL, P., GRMELA, L., TOMÁNEK, P., Near-field photocurrent spectroscopy: superresolving method for inspection of semiconductor interfaces, *8th CO-MAT-TECH 2000*, Trnava, STU Bratislava, 2000, vol. 4, p. 141-146. ISBN 80-227-1413-5.
- [A9] LÉTAL, P., GRMELA, L., TOMÁNEK, P., Studium lokálních charakteristik fotonproudu pomocí SPM, *Čs. čas. fyz.*, 2001, vol. 51, No.1, p.69-71. ISSN 0009-0700.
- [A10] BENEŠOVÁ, M., LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., Měření tlouštěk dielektrických tenkých vrstev pomocí fluorescence vybuzené evanescentními vlnami, In: *CO-MAT-TECH'98*, Trnava, STU Bratislava, 1998, vol.2, p. 346-350. ISBN 80-227-1112-8.
- [A11] TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., LÉTAL, P., GRMELA, L., DOBIS, P., BRÜSTLOVÁ, J., Lokální spektroskopie a lokální fluorescence dielektrických a polovodičových povrchů, In: *Transfer '99*, VUT Brno, 1999, p. H91-H92. ISBN 80-214-1341-7.

- [A12] TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., GRMELA, L., BRÜSTLOVÁ, J., KOŠŤÁLOVÁ, D., LÉTAL, P., Near field photoluminescence and photoreflectance measurements of semiconductor structures, In: *Nanomaterials: Fundamentals and Applications*, COST-Action 523 Mid-term meeting and workshop, Limerick, Ireland, 2001, p. 59-60.
- [A13] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., GRMELA, L., Near field optical beam induced current measurements on heterostructures, In: Hradilová, E. (Ed.) *New trends in Physics*, VUT Brno, 2001, vol.2, p. 387-393. ISBN 80-214-1992-X.
- [A14] LÉTAL, P., TOMÁNEK, P., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS, P., GRMELA, L., Locally resolved topography and spectroscopy of semiconductors (with lateral resolution better than of 250 nm), In: Vrba, R., (Ed.): *Proc. of 5 th Int. conf. Electronic Devices and Systems 1998 (EDS'98)*, FEI VUT Brno, 1998, p.173-176. ISBN 80-214-1198-8.
- [A15] LÉTAL, P., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS, P., GRMELA, L., TOMÁNEK, P., Near-field and far-field spectroscopy of semiconductors, *2nd Int.coll. MSMF-2*, Abstract booklet, FS VUT Brno, 1998, p. 62-63. ISBN 80-214-1181-3.
- [A16] TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., KOŠŤÁLOVÁ, D., LÉTAL, P., Local optical characteristics of semiconductor surfaces, In: Angelsky, O. (Ed.): *5th International Conference on Correlation Optics, Proc. of SPIE*, 2002, vol. 4607, p. 168-177. ISSN 0277-786X.

## 8 CURRICULUM VITAE

Jméno: Petr LÉTAL  
Narozen: 15. března 1974 v Přerově  
Bydliště: Za Mlýnem 169/19, 751 19 Vlkoš  
Kontakt: letal@solidteam.cz

### Vzdělání

- 1988 – 92 SPŠE Olomouc
- 1992 – 97 Vysoké učení technické v Brně – Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
ústav telekomunikací  
Státní zkouška složena v červnu 1997  
Diplomová práce: Programové řízení uzlu technologické linky  
(červen 1997)
- 1997 – 01 Vysoké učení technické v Brně – Fakulta elektrotechniky a informatiky,  
ústav fyziky  
Ph.D. studium  
Státní doktorská zkouška v květnu 1999

### Studijní pobyty

1998, 1999 Universita Besançon, Francie (krátkodobé pobyty)

### Odborná praxe

- 2000 – 01 asistent na ústavu fyziky FEKT VUT
- 2001 - Solid Elektro Team, Olomouc  
Školení a zkoušky pracovníků profese elektro

### Jazykové znalosti

angličtina, ruština

### Účast na grantových projektech

- GAČR č.101/97/K009: Vědecké centrum nanotechnologií a povrchového inženýrství (1997-1999)
- MŠMT - Barranté č. 98022: Application de la microscopie en champ proche aux mesures nanométriques des paramètres de matériaux semiconducteurs (1998-9)
- doktorandský grant FEI VUT: Studium lokální spektroskopie pomocí optického rastrovacího tunelového mikroskopu s lokální sondou (1998)

## 9 ABSTRACT

The dissertation presents a study of the Scanning near-field optical microscope (SNOM) and its use in the local spectroscopy of semiconductor structures with quantum features.

The theoretical study, design and fabrication of applicable optical fiber probes for the microscope represent a first target of the work. The single- and multimode fiber probes have been produced using two different methods, e.g. by heating and pulling and by chemical etching, and their subsequent metallization. The parameters and characteristics of metallized and dielectric probes also have been studied.

In the second part, a review and a theoretical study of the throughput of the light at the nanoaperture and the interaction of the light with the sample are presented.

The third and most important goal of the dissertation has been focused on the experimental study and spectroscopic applications of SNOM, mainly in the photoluminescence and electroluminescence domain using the locally induced photocurrent in the semiconductor structures.

In particular, a visualization of minority carriers in the vicinity of Schottky barrier at the Au/GaAs junction, the influence of the near-field optically induced photocurrent and the correlation of the composition of layers and local optical characteristics of optoelectronic devices, and finally the mechanisms of defects in p-i-n junctions of power InAlGaAs/GaAs lasers during the accelerated aging process were stressed.

Due to the non-destructive nature of the measurement, the proposed method is very attractive for *in-situ* local analysis of optoelectronic structures and devices.

The dissertation also suggests an outlook of SNOM investigation at the Faculty for ongoing years.