VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ Edice PhD Thesis, sv. 400 ISSN 1213-4198

# Mgr. Dana Otevřelová

# Lokální optické pole vidů mělce vnořených kanálků vlnovodu (Teorie a experiment)

# Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav fyziky

Mgr. Dana Otevřelová

# LOKÁLNÍ OPTICKÉ POLE VIDŮ MĚLCE VNOŘENÝCH KANÁLKŮ VLNOVODU (TEORIE A EXPERIMENT)

# Local optical fields of shallowly buried waveguides

(Theory and experiment)

# Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Mikroelektronika a elektrotechnologie

Školitel : Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc. Ing. Josef Lazar, PhD.

Datum obhajoby: 9. ledna 2007

# Klíčová slova

Optoelektronické integrované obvody, kanálkové vlnovody, mělce vnořené struktury, blízké optické pole, rozložení vidů, evanescentní pole, simulace, deskový vlnovod, 1D- a 2D-výpočet, lokální optická mikroskopie v blízkém poli, měření, spektroskopie stojatých vln

# Keywords

Optoelectronic integrated circuits, channel waveguides, shallowly buried structures, near-field optics, mode distribution, evanescent field, simulation, slab waveguides, 1D- and 2D-calculation, local near-field optical microscopy, measurement, spectroscopy of standing waves

Rukopis disertační práce je uložen na

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

© Dana Otevřelová, 2007 ISBN 978-80-214-3351-9 ISSN 1213-4198

# Obsah

| 1  | ÚVOD  | 5 |
|----|---|---|
| 2  | SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY                           | 7 |
|    | 2.1 Metoda efektivního indexu                               | 7 |
|    | 2.2 METODA SPEKTRÁLNÍHO INDEXU                              |   |
|    | 2.3 METODA VYZAŘOVÁNÍ DO VOLNÉHO PROSTORU - FSRM            |   |
| 3  | CÍLE PRÁCE  |   |
| 4  | ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ                                   |   |
|    | 4.1 METODA VYZAŘOVÁNÍ DO VOLNÉHO POLOPROSTORU – HSRM        |   |
|    | 4.2 Odrazivost čela   |   |
|    | 4.3 Experimentální sestava SNOM                             |   |
| 5  | HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE                                       |   |
|    | 5.1 Odrazivost čela vlnovodu                                |   |
|    | 5.1.1 Deskový vlnovod bez napařené antireflexní (AR) vrstvy |   |
|    | 5.1.2 Deskový vlnovod s napařenou AR vrstvou                |   |
|    | 5.1.3 Obdélníkový vlnovod s čelem bez AR vrstvy             |   |
|    | 5.1.4 Obdélníkový vlnovod s napařenou AR vrstvou            |   |
|    | 5.2 Experimentální SNOM měření                              |   |
|    | 5.2.1 Rozložení světla v blízkém poli nad vlnovodem         |   |
|    | 5.2.2 Získání příčné složky vlnového vektoru k <sub>v</sub> |   |
|    | 5.2.3 Spektroskopie stojatých vln                           |   |
|    | 5.2.4 Poruchy způsobené sondou                              |   |
| 6  | ZÁVĚR   |   |
| 7  | LITERATURA  |   |
| 8  | VLASTNÍ PUBLIKACE   |   |
| 9  | CURRICULUM VITAE  |   |
| 1( | 0 ABSTRACT  |   |

# 1 ÚVOD

Jedním z úkolů vědeckého výzkumu v 6. rámcovém programu Evropské komise v oboru fotonických součástek [1] je vyvinout progresivní materiály, pevnofázové zdroje, mikro a nanofotonická zařízení a integrovat fotonické funkce do mikro/nanoelektronických součástek a to zejména v oblastech:

- "Informační technologie pro oblast péče o zdraví a vědách o životě": podstatný vývoj funkčních součástek a subsystémů pro biofotoniku;
- "Komunikační a informační technologie": na jednu stranu rozvoj laciných, na druhou stranu rozvoj velmi výkonných součástek a subsystémů;
- "Životní prostředí a bezpečnost": zavedení moderních fotonických a vláknových senzorů a součástek v oblasti vizualizace a zobrazování.

K dosažení tohoto cíle je třeba rozvíjet následující nástroje:

- Výrobní technologie a koncepty zařízení, které budou splňovat požadavky výše uvedených aplikačních oblastí.
- Hybridní a monolitické fotonické integrační technologie, včetně nano-mikro opakovačů a interfejsů vykazující vyšší užitnou hodnotu a funkčnost, snižující cenu a rozměry zařízení nebo spotřebu energie.
- "Fotonické systémy na čipu" pro aplikace v komunikacích (pro zpracování signálů nebo manipulaci s vlnovými délkami) a v medicíně (jako např. biofotonické senzory).
- Moderní součástky pro optické přenosové sítě, laciné součástky pro širokopásmové bezdrátová či síťová připojení.
- Perspektivní zdroje, včetně polovodičových, organických a vláknových laserů, ke zvýšení kompaktnosti, jasu, přeladitelnosti a spektrální čistoty.
- Moderní osvětlovací technika na bázi anorganických a organických materiálů pro aplikace v komunikačních a informačních technologiích.

Předložená disertační práce je příspěvkem k jednomu z těchto aktuálních témat, tj. "Fotonické systémy na čipu" pro aplikace v komunikačních technologiích. Současný rozvoj optických vláknových systémů a využití multiplexu vlnových délek (Wavelength Division Multiplexing – WDM, Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM) vyžaduje optoelektronické integrované obvody (OptoElectronic Integrated Circuits – OEIC) na jednom čipu, které splňují systémové požadavky na vysokou rychlost přenosu i na velký objem dat a velkou šířku pásma. Ve světě se vyvíjí celá řada nových OEIC, přičemž se klade důraz nejen na zlepšení stávajících zařízení, ale i na jejich kompletaci pomocí základních součástek (např. laserového zdroje, vlnovodu, detektoru) a na využití OEIC, tj. na jejich vazbu s optickými vlákny [2,3]. Vyrobené kanálkové vlnovody pro OEIC

rozměrově odpovídají vláknům, i když na rozdíl od optických vláken je tvar jejich elektrického pole většinou eliptický [4]. Tato zařízení adaptují velikost vidu v OEIC na rozměry vidu ve vlákně a jsou nazývána vidovým bodovým konvertorem (mode spot converter) (Obr.1).



a) hluboce vnořený vlnovod, b) povrchový žebrový vlnovod

# 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dosud vyvinuté metody pro analýzu OEIC lze klasifikovat jako analytické, numerické a semianalytické.

Analytické metody se omezují jen na jednoduché vrstvové deskové vlnovody [5].

Exaktní numerické metody navíc zkoumají struktury, které svírají malý úhel s osou šíření a vyžadují velké výpočetní kapacity [6].

Semianalytické metody, např. metoda efektivního indexu lomu (EI) [7], metoda spektrálního indexu lomu (SI) [5] a metoda volného šíření vidu do prostoru (FSRM) [6], užívají aproximace, které zmenšují složitost systému a jsou rychlé a vhodné pro účely návrhu.

V této práci jsou využívány zejména semianalytické metody, a proto provedeme rozbor nejpoužívanějších metod.

#### 2.1 Metoda efektivního indexu lomu

Efektivní index lomu  $n_{\text{eff}}$  se získá postupným řešením dvou transcendentních rovnic pro koeficient šíření  $\beta$  v deskové struktuře. Uvažujeme-li například žebrový vlnovod, (obr.2), pak tato metoda řeší v prvním kroku transcendentní rovnice pro tři svislé deskové oblasti – obr. 2b. Takto získané efektivní indexy  $n_{\text{eff}}$  budou indexy lomu pro vodorovný deskový vlnovod – obr.2c.



**Obr.2.** Metoda efektivního indexu pro žebrový vlnovod a) původní žebrový vlnovod, b) řešení problému svislé vrstvy pro určení  $n_{eff1}$  a  $n_{eff2}$  (krok 1), c) řešení problému ekvivalentu vodorovné vrstvy problém pro  $n_{eff}$  celé struktury (krok 2)

Řešení transcendentní rovnice pro hodnoty vodorovné vrstvy poskytuje dobrou aproximaci efektivního indexu lomu původní struktury žebrového vlnovodu. Předností metody EI je její aplikovatelnost na rozmanité struktury. Nedostatkem je pak její nevhodnost pro struktury přenášející vlny v blízkosti mezní frekvence nebo pro žebrové vlnovody, jejichž povrchová vrstva není vodivá [8]. Navíc profily polí získané touto metodou mají omezené použití.

#### 2.2 Metoda spektrálního indexu lomu

Metoda spektrálního indexu lomu (SI) byla navržena pro analýzu přechodů vzduchpolovodič u žebrových vlnovodů [9,10]. Průnik optického pole z polovodiče do okolního vzduchu je modelován pomocí Goosova-Hänchenové posuvu, spojeným s okrajovou podmínkou E = 0 na nové hranici posunuté do vzduchu. Následkem toho je otevřená struktura nahrazena poněkud širší a zčásti uzavřenou strukturou, kterou lze jednodušeji analyzovat a jejíž řešení je lépe aproximovatelné na původní strukturu.

SI metoda řeší 2-D skalární Helmholtzovu vlnovou rovnici

$$\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} + \left(k_i^2 - \beta^2\right) E(x,y) = 0, \qquad (1)$$

kde E(x,y) je skalární funkce polarizovaného elektrického pole  $E(x,y,z) = E(x,y).e^{-j\beta z}$ v žebru a v oblasti pod žebrem,  $\beta$  je konstanta přenosu,  $\lambda$  je vlnová délka pro volný prostor,  $n_i$  lokální index lomu a  $k_i = 2\pi n_i/\lambda$ . V žebru je vlnová rovnice řešena exaktně a je možné ji vyjádřit odděleně. V oblasti pod žebrem je, pro zmenšení dimenze problému, pole převedeno do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace. Intenzita elektrického pole v základně žebra je spojitá, ale její gradient je obecně nespojitý. Pro minimalizovanou nespojitost gradientu lze efektivně určit z transcendentní rovnice konstantu přenosu  $\beta$ .

Pro výpočet se používá efektivní struktura, která nahrazuje původní strukturu vlnovodu. Celkový prostor žebrového vlnovodu je rozdělen na dvě oblasti: oblast žebra  $\Omega_1$  (0 < y < H) a oblast rovinné vrstvy  $\Omega_2$  (y < 0).

Protože elektrické pole vlevo i vpravo od žebra je nulové, pole oblasti  $\Omega_1$  (vnitřek žebra) může být aproximováno v příčném směru jedním nebo více členy Fourierova rozvoje. Předpokládejme, že bude stačit právě jeden člen rozvoje. Pole je možné vyjádřit ve tvaru

$$E(x, y) = F(x) G(y),$$
(2)

kde pro základní symetrický vid nabývá funkce F(x) tvaru

$$F(x) = \cos(s_1 x), \text{ kde } s_1 = \frac{\pi}{2W}$$
 (3)

Pro jednoduchost omezíme rozvoj transcendentní rovnice pro  $\beta$  jen na základní symetrický vid.

V oblasti  $\Omega_2$  pod žebrem je použita Fourierova transformace podle *x* pro snížení dimense vlnové rovnice. Pomocí  $\Phi(s,y) = FT[E(x,y)]$  je možné (1) zapsat ve tvaru

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \left(k_i^2(y) - s^2 - \beta^2\right) \Phi = 0, \qquad (4)$$

kde

$$\Phi(s,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(x,y) e^{-jsx} dx \quad a \quad E(x,y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(s,y) e^{jsx} ds .$$
(5)

Řešení rovnice (4) lze zapsat ve tvaru

$$\Phi(s, y) = f(s)g(s, y).$$
(6)

Transcendentní rovnice pro  $\beta$  dostane tvar

$$\gamma_{1} \cot g(\gamma_{1} H) = \frac{4s_{1}^{3}}{\pi^{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Gamma(s) \cos^{2}(sW')}{(s^{2} - s_{1}^{2})^{2}} ds, \qquad (7)$$

kde normovaná gradientní funkce  $\Gamma(s)$  pod základnou žebra je

$$\Gamma(s) = \frac{1}{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y}.$$
(8)

Disperzní rovnice (7) a rozložení pole jsou hlavními výsledky standardní SI metody. Disperzní rovnici pro  $\beta$  je možné snadno řešit použitím metody půlení nebo pomocí algoritmu pro vyhledávání reálného a komplexního kořene.

#### 2.3 Metoda vyzařování do volného prostoru - FSRM

Metoda vyzařování do volného prostoru (Full Space Radiation Metod - FSRM) byla vyvinuta pro analýzu odrazivosti čel polovodičových laserů a později byla rozšířena na analýzu šíření světla v optických vlnovodech [11]. V poslední době byla upravena i na určování skalárních, polarizovaných a vektorových vidů hluboce vnořených vlnovodů pravoúhlých průřezů [A22]. Byla též rozšířena na vícevrstvé struktury, na odrazivost čel deskových a 2D-vnořených vlnovodů v případech skalárních, semivektorových a vektorových polí [12]. Pomocí FSRM jsou přesně zpracovávány vedené vidy, ale zářivé vidy jen přibližně.

FSRM byla úspěšně použita i pro výpočet odrazivosti čela hluboce vnořených kanálků vlnovodu. Byly také popsány případy, kdy čelo vlnovodu svírá s kanálkem deskového vlnovodu či 2D-vlnovodu jiný než pravý úhel a to v případě napařených i nenapařených čel [13]. Také bylo popsáno rozšíření na plně vektorové přiblížení pro odrazivost 2D-vlnovodů, tzn. pro blízké pole [A28].

V citovaných pracích se využívá FSRM metoda pouze pro analýzu hluboce vnořené struktury vlnovodů, u nichž je jádro obklopeno nekonečnou oblastí o konstantním indexu lomu.

# **3** CÍLE PRÁCE

Jak je patrné z přehledu současného stavu, většina dosud publikovaných prací se zabývá případem hluboce vnořeného kanálkového vlnovodu. V literatuře je jen velmi málo zmínek o mělce vnořených vlnovodech, navíc jsou popisovány jen jako extrapolace hluboce vnořeného kanálkového vlnovodu. Dosud tedy existuje jen málo informací o tom, co se vlastně děje v bezprostřední blízkosti kanálku vlnovodu (tzn. v jeho blízkém poli). Proto se předložená disertace zabývá detailněji popisem a studiem vlnovodů v blízkosti rozhraní vzduch-polovodič. Uvažujeme přitom jeden poměrně nový konvertor vytvořený z malého žebrového vlnovodu obklopeného vzduchem a konvertor, jehož jeden kanálek je mělce vnořen v materiálu polovodiče. Proto se část této práce zabývá vidovou (módovou) analýzou mělce vnořeného kanálkového vlnovodu a jeho vlivem na vazbu s vláknem.

Dále se práce soustřeďuje na modelování a kvantifikování odrazivosti od čela pravoúhlého a šikmo orientovaného vnořeného vlnovodu v těsné blízkosti rozhraní vzduch-polovodič, protože přítomnost optických odrazů způsobuje pokles výkonu, šum, výkonové fluktuace a rozptyl signálu.

Potřeba analyzovat ekonomicky a technologicky proveditelné polovodičové vlnovody, vytvořené v blízkosti rozhraní se vzduchem, nás vedla k rozvoji nové teoretické metody, zvané metoda vyzařování do poloprostoru (Half Space Radiation Method - HSRM) [A22] a experimentální metody – Spektroskopie stojatých vln [A23]. Teoretická metoda řeší vedené a zářivé vidy podobně jako FSRM, ale pouze v poloprostoru, který v případě studovaného OEIC tvoří polovodič.

I když je tato metoda přínosná, nezabývá se, podobně jako ostatní používané metody, problémem posunu elektrického pole do evanescentní vlny nad vlnovodem a vlivy dielektrických růžků vlnovodu na přenos signálu.

Proto cílem práce je studium případu

- vlivu evanescentní vlny (tj. blízkého pole) nad mělce vnořeným kanálkovým vlnovodem na přenos signálu a
- vlivu dielektrického růžku na přenos signálu.
- Tyto cíle vyžadují
- rozpracování a úpravu metody HSRM tak, aby umožňovala efektivně analyzovat vlivy dielektrického růžku pro mělce vnořené vlnovody,
- experimentální ověření tvaru evenescentního pole na povrchu vzorku a nad ním a porovnání s polem modelu.

### 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

#### 4.1 Metoda vyzařování do volného poloprostoru – HSRM

Vlastním přínosem práce je ověření nové semianalytické metody – metody vyzařování vidů do poloprostoru (Half Space Radiation Mode method – HSRM), kterou jsme pak použili pro analýzu vidů a analýzu odrazivosti čel vlnovodů v blízkém poli rozhraní vzduch-polovodič [6,7, A28]. HSRM metodu je též možné použít pro simulaci šíření v nehomogenních 3D vlnovodech vnořených do těsné blízkosti rozhraní se vzduchem.

Základ této metody lze popsat pomocí šesti kroků:

- 1. Posuv původního rozhraní vzduch-polovodič do nové polohy do vzduchu pomocí Goosova-Hänchenové posunu.
- 2. Použití okrajové podmínky E = 0 na tomto novém rozhraní.
- Použití Fourierovy sinusové transformace ve svislém směru pro dolní poloprostor.
- 4. Šíření vidů ve vodorovném směru.
- 5. Vytvoření transcendentní rovnice pro konstantu šíření  $\beta$  použitím podmínky ortogonality mezi zářivými a nezářivými vidy.
- 6. Řešení transcendentní rovnice pro  $\beta$ .

Tuto metodu lze použít pro zjednodušení skalární a semivektorové analýzy. Řešení získaná semivektorovou analýzou jsou využita ke srovnání s výsledky experimentů. Semivektorové přiblížení předpokládá, že jedna z příčných složek elektrického nebo magnetického pole je nulová. V případě TE polarizace a zadáním E-pole je nulovou složkou pole  $E_y$  (nebo  $H_x$  při zadání *H*-pole) a hlavní složkou pole je  $E_x$ ( $H_y$  pro zadání *H*-pole). Pro TM polarizaci a zadání E-pole je nulovou složkou pole  $E_x$  ( $H_y$ ) a hlavní složkou pole je  $E_y$  ( $H_x$ ).

U polarizovaných polí je průnik optického pole do plášťů různý pro TE a TM polarizaci. Průnik pole do pláště, a tedy posun rozhraní vzduch-polovodič, pro TE polarizaci je dán výrazem

$$\Delta_{TE} = \Delta_t = \frac{1}{\sqrt{\beta^2 - k_o^2}} \tag{9}$$

a pro TM polarizaci

$$\Delta_{TM} = \Delta_t = \frac{(n_o / n_2)}{\sqrt{\beta^2 - k_o^2}}.$$
 (10)

#### 4.2 Odrazivost čela

Pro efektivní funkci mnoha optických zařízení je důležitým parametrem odrazivost čela vlnovodu. Při návrhu čela se musí uvažovat i 90° růžek na rozhraní polovodič-vzduch, který byl doposud při výpočtech zanedbáván. Tento růžek může být příčinou difrakčních jevů a tím i značné nespojitosti v lokálním poli a může podstatně ovlivnit odrazivost [A31]. Z těchto důvodů a z důvodů uvedených dále byl navržen nový iterační postup pro analýzu čel deskového a 2D-vlnovodu [A26, A29, A30]. Tento postup budeme aplikovat na mělce vnořené 2D-vlnovody. Budeme uvažovat obecný případ vlnovodu, který svírá s napařeným čelem určitý úhel.

Analyzovaný vlnovod má šířku 2*W* a výšku 2*H* a leží v hloubce *D* pod rozhraním vzduch-polovodič. Index lomu vzduchu je  $n_0$ , jádra  $n_1$  a pláště  $n_2$ . Půdorys struktury (obr.3) vlnovodu svírá úhel  $\theta$ s rovinou čela. Na čele může být napařen libovolný počet AR vrstev. Uvažujme vedlejší vztažnou soustavu spojenou s osou vlnovodu a hlavní s osou kolmou na čelo. Na obr.3c je nárys této struktury, na němž je jasně patrná přítomnost polovodičového růžku na čele.



**Obr.3** Několik náhledů na studovanou strukturu: a) bokorys - průřez vlnovodu , b) půdorys, c) nárys, d) nárys ukazující malý posun rozhraní do polohy E = 0.

Cílem této metody je vyřešit rovnici pro neznámou odrazivost R využitím podmínek spojitosti a ortogonality ve spektrální oblasti. Avšak určení sinusové Fourierovy transformace rovnice pro intenzitu elektrického pole

$$E^{-}(y,z) = \left[ \left( e^{-j\beta z} + Re^{j\beta z} \right) \int_{0}^{\infty} \tilde{e}_{G}(s) \sin(sy) ds + \int_{0}^{\infty} \left( \tilde{f}(s)e^{-j\gamma z} \right) \sin(sy) ds \right] U(y), \quad z \le 0 \quad (11)$$

vyžaduje konvoluci. Tato konvoluce bude zřejmě snižovat účinnost HSRM metody.

V naší metodě je proto místo konvoluce zaveden iterační postup. Ve směru x' lze použít Fourierovu transformaci (FT) na celou strukturu, zatímco ve směru y' se musí použít sinusová Fourierova transformace (SFT).

V rovině z' = 0 bude

$$\tilde{E}(p,s)\Big|_{z'=0^{-}} = \tilde{E}_{i}(p,s) + R\tilde{E}_{r}(p,s) + \tilde{E}_{B}(p,s), \qquad (12)$$

$$\tilde{E}^{+}(p,t)\Big|_{z'=0^{+}} = \tilde{E}_{F}(p,t)$$
, (13)

z čehož lze lehce získat výsledky pro různé spektrální proměnné pro směr *y* na každé straně čela.

Podobně je možné vyjádřit transformaci magnetického pole, kde  $\tilde{H}^+(p,s)$  reprezentuje magnetické pole v  $z = 0^+$ .

Použitím podmínky ortogonality mezi zářivými a vedenými vidy ve tvaru

$$\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_{B}(p,s) \tilde{H}_{r}(p,s) dp = 0, \qquad (14)$$

je výsledný vztah pro odrazivost roven

$$R = \frac{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{\tilde{H}^{+}(p,s) \Big|_{z=0^{+}} - \tilde{H}_{i}(p,s)}{Y_{B}(p,s)} \tilde{H}_{r}(p,s) \right]}{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{\tilde{H}_{r}(p,s)}{Y_{B}(p,s)} \tilde{H}_{r}(p,s) \right]}.$$
(15)

Z důvodů spojitosti musí být na rozhraní stejné tečné složky elektrického a magnetického pole. Tedy

$$\tilde{E}_{F}^{+}(p,s)\Big|_{z=0^{+}} = \left[\tilde{E}_{i}(p,s) + R\tilde{E}_{r}(p,s) + \tilde{E}_{B}(p,s)\right]\Big|_{z=0^{-}}.$$
(16)

Pro počáteční hodnotu odrazivosti vidu  $R^{(0)}$  vychází

$$R^{(0)} = \frac{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{Y_F(p,s)\tilde{E}_i(p,s) - \tilde{H}_i(p,s)}{Y_F(p,s) - Y_B(p,s)} \tilde{H}_r(p,s) \right]}{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{\tilde{H}_r(p,s) - Y_F(p,s)\tilde{E}_r(p,s)}{Y_F(p,s) - Y_B(p,s)} \tilde{H}_r(p,s) \right]}.$$
(17)

Tato počáteční hodnota je vstupem vývojového diagramu iterace pro řešení reálného problému. Iterativní postup začíná počátečním odhadem vidové odrazivosti  $R^{(0)}$ . Prvním krokem smyčky diagramu je odhad  $\tilde{E}_F(p,s)$ , z níž dostaneme  $E_F(x',y')$  pomocí inverzní SFT.

Pro odrazivost v n-té iteraci vztah

$$R = \frac{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{H^{+(n)}(p,s) \Big|_{z=0^{+}} - \tilde{H}_{i}(p,s)}{Y_{B}(p,s)} \tilde{H}_{r}(p,s) \right]}{\int_{0}^{\infty} ds \int_{-\infty}^{\infty} dp \left[ \frac{\tilde{H}_{r}(p,s)}{Y_{B}(p,s)} \tilde{H}_{r}(p,s) \right]}.$$
 (18)

Jestliže se odrazivost z *n*-té iterace liší od výsledku předchozí iterace o více než předdefinovanou chybu, je třeba zahájit další iterační krok pro výpočet  $\tilde{E}_F(p,s)$ .

#### 4.3 Experimentální sestava SNOM

Funkčnost vlnovodů je objasňována pomocí moderních technik, jako jsou evanescentní vazba a resonance v mikrostruktuře, tj. jevů, které výrazně závisejí na lokálním poli a vlastnostech šíření ve vlnovodech [A28]. Přestože lze provést přesné simulace i komplikovaných vlnovodných zařízení, které jsou založeny na předpokladech znalosti fyzikální struktury, je nutné přímé měření vnitřních optických vidů a lokálních vlastností šíření ve vlnovodu, protože ne všechny jevy jsou již plně objasněny.

Užitím lokálních sondových technik, např. rastrovací optické mikroskopie v blízkém poli (SNOM) [14-16, A15, A21], je možné měřit evanescentní pole nad vlnovodem, čímž se vytvoří detailní a komplexní obraz vedeného vidu, který daleko převyšuje předchozí nepřímé zobrazovací techniky [A1, A15, A20].

V experimentální práci jsme použili SNOM pro měření a pozorování stojatých vidů v jednovidovém vlákně a pro určení všech složek vektoru šíření [A32].

Studované vlnovody byly navrženy pro optické telekomunikace pro vlnovou délku  $\lambda = 1,55 \ \mu\text{m}$ . Schéma konfigurace experimentu je na obr.4. Struktura optického vlnovodu je tvořena jádrem pravoúhlého průřezu z taveniny Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> o indexu lomu n = 1,65 a pláštěm z čistého křemene SiO<sub>2</sub> o indexu lomu n = 1,44. Pro měření je použit laditelná laserová dioda s vnější dutinou (HP 8168F) pracující v rozsahu  $\lambda = 1440-1570 \ \text{nm}$ . Optické vlákno, opatřené na obou koncích leptanými mikročočkami, slouží k vevázání světla do vlnovodu. Polarizační stav ve vlákně je nastaven a řízen pomocí zkřížených polarizátorů. Světlo prošlé vlnovodem je z výstupního čela směrováno na CCD kameru (pro optimalizaci vazby) a na Ge fotodiodu určenou pro kvantitativní měření. Polarizátor může být umístěn před detektory, aby bylo možné vybrat požadovanou výstupní polarizaci. Sonda SNOM rastruje povrch nad vlnovodem ve vzdálenosti asi 10 nm a přenáší zachycené světlo k InGaAs fotodetektoru. Zpětnovazební smyčka k řízení posuvu hrotu sondy má přesnost nastavení ± 0,3 nm a metoda střižných sil pomocí ladící vidličky [15] drží hrot v režimu konstantní vzdálenosti nad povrchem vzorku.



**Obr.4** Experimentální schéma pro charakterizaci vnitřního optického pole uvnitř vlnovodné součástky. Světlo z laditelného laseru je vevázáno do testovaného zařízení a je analyzováno prošlé světlo. Sonda SNOM rastruje povrch součástky, měří přitom jak topografii, tak vzorkuje evanescentní pole

# 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

#### 5.1 Odrazivost čela vlnovodu

V této části je uvedena jedna sada výsledků získaných pomocí rozšířené HSRM metody a to pro odrazivost čela v závislosti na hloubce vnoření *D*, pro TE polarizaci a různé tloušťky vlnovodů. Je zde zkoumán vliv rozhraní vzduch-polovodič i difrakčního růžku na vlnovodu. Jedná se o analýzu vlnovodů, jejichž parametry budou uvedeny současně s vyhodnocením výsledků.

K výpočtu jsme použili čtyři struktury [A28]

- a) deskový vlnovod bez napařené antireflexní (AR) vrstvy
- b) deskový vlnovod s jednou AR vrstvou
- c) 2D-obdélníkový vlnovod bez napařených AR vrstev
- d) 2D-obdélníkový vlnovod s jednou AR vrstvou

#### 5.1.1 Deskový vlnovod bez napařené antireflexní (AR) vrstvy

Analyzovaná struktura má index lomu  $n_1 = 3,6$  a index lomu pláště  $n_2 = 3,5$ . Použitá vlnová délka je  $\lambda = 0,86 \mu m$ .



**Obr. 5** Závislost odrazivosti na hloubce vnoření D pro  $H = 0,2 \mu m, 0,5 \mu m a 1 \mu m$  pro TE polarizaci.

Snižováním hloubky vnoření se obecně zvyšuje odrazivost, ale v případě velmi tenkých vlnovodů klesá odrazivost pro velmi malá *D*. Předpokládáme, že tento pokles je způsoben limitní frekvencí šíření vlnovodného vidu. Pro větší hloubku vnoření je změna odrazivosti zanedbatelná.

#### 5.1.2 Deskový vlnovod s napařenou AR vrstvou

Je zde použita stejná struktura vlnovodu jako v hořejším případě, ale doplněná





**Obr. 6** Závislost odrazivosti vlnovodu s napařeným čelem na hloubce vnoření D pro tloušťky vlnovodu  $H = 0,1, 0,2 \mu m, 0,5 \mu m$  a 1  $\mu m$  a pro TE polarizaci.

Z obrázku je vidět, že závislost odrazivosti je citlivější na hloubku vnoření, tzn. na blízkost rozhraní vzduch-polovodič a na přítomnost difrakčního růžku. Celkově lze říci, že odrazivost se řádově zmenšila.

#### 5.1.3 Obdélníkový vlnovod s čelem bez AR vrstvy

V tomto případě je analyzován typický v praxi používaný vlnovod s indexem lomu jádra  $n_1 = 3,2819$ , pláště  $n_2 = 3,1665$ , šířkou  $2W = 5 \mu m$  a tloušťkou  $2H = 0,1 \mu m$ .



**Obr. 7** Závislost odrazivosti čela na hloubce vnoření pro 2D-vlnovod a ekvivalentní deskovou strukturu pro TE polarizaci

Hloubky vnoření *D* byly zvoleny tak, aby struktura vytvářela téměř kruhový profil pole. Použitá vlnová délka je  $\lambda = 1,3 \mu m$ .

Z obr.7 je patrné, že vliv rozhraní vzduch-polovodič na holé čelo je malý, i když

je patrnější pro 2D-analýzu. Zvlnění u 2D-analýzy je způsobeno stojatými vlnami vzniklými zpětnými odrazy rozhraní vzduch-polovodič. Pro obdélníkový vlnovod odrazivost s hloubkou vnoření roste.

#### 5.1.4 Obdélníkový vlnovod s napařenou AR vrstvou

Stejně jako v případě s holým čelem budeme uvažovat vlnovod vnořený hlouběji do struktury. V tomto případě se hodnoty odrazivosti naměřené pro  $D = 1 \ \mu m$  až  $D = 10 \ \mu m$  téměř nemění. Vzhledem k velmi malým hodnotám odrazivosti grafické znázornění zde neuvádíme.

Pomocí rozšířené HSRM metody pro analýzu odrazivosti čela jsme zjistili, že umístěním deskového vlnovodu do blízkosti rozhraní vzduch-polovodič se několikrát zvyšuje odrazivost a tím se narušuje vlastní funkce přenosu signálu přes čelo vlnovodu. U 2D-vlnovodů jsme analýzu prováděli pro reálné hloubky, kde se vliv rozhraní vzduch-polovodič projevuje více v případě tenkých vlnovodů. Dodatečným nakloněním vlnovodu vůči čelu se zmenšuje citlivost odrazivosti na geometrii vlnovodu.

#### 5.2 Experimentální SNOM měření

#### 5.2.1 Rozložení světla v blízkém poli nad vlnovodem

Vhodnost této konfigurace měření je potvrzena simulací rozložení vidů pro tento vlnovod (obr.8). Z intenzity elektrického pole těchto simulací ve vertikálním nebo x-směru (obr.9) vidíme, že dosti velká část pole proniká do vzduchu a tedy lze ji měřit nad povrchem vlnovodu.



Obr. 8 Simulace povolených vidů, které se šíří v pravoúhlém vlnovodu

Počátečním měřením musí být porovnání úrovně rozptýleného světla k evanescentnímu poli na povrchu vzorku [A29]. Na obr. 10a je zobrazena změřená optická intenzita ze SNOM skenu ve vertikální rovině, kolmé ke směru šíření světla.

Tento sken ukazuje velmi dobrou kvalitativní shodu se simulací rozložení vidů (obr. 10b) a tedy na absenci rozptylu světla do šířících se vidů ve volném prostoru. Vertikální řez intenzity světla nad středem jádra (obr. 11) vykazuje podle předpokladu čistě exponenciální charakter a to do vzdálenosti asi 600 nm, kde již převládá šum systému.



Obr. 9 Vertikální řez simulace vidů pro 3 vedené vidy v testovaném zařízení



**Obr. 10** a) Měřená optická intenzita SNOM skenu ve vertikální rovině. Ve výšce x = 500 nm došlo již k úplnému poklesu intensity. b) Simulace intensity vidu pro tutéž oblast.

Jsou-li generovány TM vidy řízením vstupní polarizace, dostaneme výsledek zobrazený na obr. 12. Závislost měřené optické intensity podél osy y odpovídá jednovidovému vlnovodu. Periodické změny ve směru z jsou způsobeny stojatými vlnami v dutině tvořené vstupním a výstupním čelem vlnovodu.

Ve směru kolmém na strukturu vlnovodu, tj. ve směru *x*, je konstanta šíření imaginární čímž vzniknou evanescentní vlny  $k_x \rightarrow \alpha_x$ . Vertikální sken z obr. 12 může být fitován tak, abychom získali redukovanou hodnotu  $\alpha = \alpha(y)$  napříč vlnovodem.



**Obr. 11** Pokles intensity světla nad středem jádra pravoúhlého vlnovodu. V grafu je proložena fitovací přímka s koeficientem útlumu  $\alpha \,\mu m^{-1}$ 



**Obr. 12** Optický obraz nad povrchem, když jsou generovány TM vidy. Periodické změny ve směru z jsou stojaté vlny (vidy) dutiny, které ve vlnovodu vzniká. Při skenu směrem dolů v y = 0 je patrný poměr maxim a minim u prakticky harmonického průběhu intenzity

#### 5.2.2 Získání příčné složky vlnového vektoru $k_y$

Složku vlnového vektoru  $\vec{k}$  ve směru y, tj.  $k_y$ , je možné určit z tvaru vidu. Z naměřených a upravených hodnot určíme v pěti oblastech příslušné parametry  $k_y$ ,  $k_x$  a extinkční koeficienty  $\alpha_{xy}$  (obr. 13). Změřené a vypočtené hodnoty (udané v závorkách)  $k_x$  a k<sub>y</sub> se liší maximálně o 6%.

Dosazením naměřených hodnot  $\alpha_x$ ,  $k_y$  a  $k_z$  do  $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = n^2 k_0^2$  získáme  $k_0 = 3,894 \ \mu\text{m}^{-1}$ , což je srovnatelné s teoretickou hodnotou  $k_0 = 4,056 \ \mu\text{m}^{-1}$ .

| $\alpha_y = 0.839(0.790)$<br>$\alpha_x = 4.22(4.23)$ | $k_y = 0.703(0.718)$<br>$\alpha_x = 4.36(4.36)$ | $\alpha_y = 0.839(0.790)$<br>$\alpha_x = 4.22(4.23)$ |
|--|---|--|
|  | $\alpha_x = 1.08(1.09)$                         |  |
|  | k <sub>x</sub> = 3.05(3.05)                     |  |

#### $k_s = 5.91(5.94)$

**Obr. 13** Měřené konstanty šíření v různých oblastech vlnovodu v jednotkách µm<sup>-1</sup>. Vypočtené hodnoty jsou v závorkách

#### 5.2.3 Spektroskopie stojatých vln

SNOM sken pro TE vidy z obr. 14 je odlišný od TM polarizace díky příspěvku vidů vyšších řádů. Rozdíly při šíření vidů TE<sub>0</sub> aTE<sub>1</sub>, na které se omezujeme, jsou malé. Vidy mají různé penetrační hloubky do pláště, a tedy i jejich  $n_{\text{eff}}$  se liší. Fit intenzity v konstantní vzdálenosti z umožní určit fázi a relativní podíl TE<sub>0</sub> a TE<sub>1</sub>.



**Obr.14** Optický obraz povrchu při generování TE vidů. Skenová čára v  $y = 1 \mu m$  má téměř harmonický průběh s poměrem maxima a minima = 1,3

Současná existence  $TE_0$  a  $TE_1$ , které se šíří s jinými hodnotami  $n_{eff}$ , způsobuje rázy stojatých vln (obr. 15). Perioda těchto rázů poskytuje přímé měření rozdílů vidových indexů dvou vedených vidů:

$$T = \frac{\pi}{\left(k_z^{TE_0} - k_z^{TE_1}\right)} = \frac{\lambda_0}{\left(n_{eff}^{TE_0} - n_{eff}^{TE_1}\right)} = \frac{\lambda_0}{2\Delta n_{eff}}.$$
 (19)

Pro T = 25 µm dostaneme  $\Delta n_{\text{eff}} = 0,031$ . Vlnovod je vyroben s přesností, které odpovídá tolerance šířky několik procent. V rámci této tolerance je dosažena shoda mezi simulací a naměřenými hodnotami  $n_{\text{eff}}$ .

Vzhledem k tomu, že pomocí fitovací techniky nelze vyjádřit závislost intenzity na y jsou  $k_y$  středními hodnotami.

Konečně jsme také schopni oddělit hodnoty  $k_y$  pro TE<sub>0</sub> a TE<sub>1</sub> užitím váhových poměrů,  $\Delta n_{\text{eff}}$  z rovnice (19) a průměrné periody stojatých vidů z obr. 14 pomocí rovnic

$$n_{\rm eff, \, průměr} = a n_{\rm eff, TE1} + b n_{\rm eff, TE1}$$
(20)

 $n_{\rm eff,TE0} = n_{\rm eff, \, průměr} + b\Delta n_{\rm eff}$ (21)

 $n_{\rm eff,TE1} = n_{\rm eff,průměr} - a n_{\rm eff}.$  (22)



**Obr.15** Rázy mezi TE<sub>0</sub> a TE<sub>1</sub>. Pomocí měření délky rázu je možné měřit  $\Delta n$ 

#### 5.2.4 Poruchy způsobené sondou

Při měření studovaného systému mohou vzniknout nezanedbatelné poruchy způsobené sondou [A14]. Z měření optických vidů na povrchu je jasné, že tato porucha je malá z hlediska určení  $k_z$  periody stojatého vidu.

Porucha způsobená sondou se sama může ozřejmit dvojím způsobem. Za prvé, přítomnost difrakčního předmětu (SNOM sonda) uvnitř evanescentního pole vlnovodu odvede část optického výkonu ze systému, což se projeví poklesem celkově přeneseného světla vlnovodem. Za druhé přítomnost předmětu nad vlnovodem mění lokální index lomu v tomto bodě nad vlnovodem.

# 6 ZÁVĚR

Rychlý rozvoj technik a metod v integrované optice, oblasti optoelektroniky, fotoniky, nanoelektroniky a nanofotoniky určitě umožní vývoj dalších miniaturizovaných optických zařízení. Tato nová zařízení budou vyžadovat přesnější výpočty a měření, zejména s velkým podílem výpočtů v blízkém optickém poli, přičemž nebude možné opominout vektorový charakter řešení.

U studovaných mělce vnořených vlnovodů se nutně projevuje vliv nesymetričnosti vlnovodu, tj. blízkosti rozhraní polovodič-vzduch a dielektrických růžků. Práce ukázala, že vliv blízkosti rozhraní lze s dostatečnou přesností řešit HSRM metodou.

Zahrnutí vlivu dielektrických růžků vedlo ke složitým a pracným rovnicím, které lze jen s obtížemi řešit pomocí konvoluce. Proto byla rozpracovaná metoda, která je předmětem této práce, využívající iteračního řešení rovnice. Ta umožňuje rychlejší zpracování transcendentní rovnice pro konstantu šíření  $\beta$  a pro odrazivost R. Navíc umožňuje při řešení integrovaných vlnovodů zahrnovat vlivy dalších elementů a tím zpřesňovat simulaci parametrů vlnovodů a odrazivosti na jejich koncích. Tato skutečnost je velmi důležitá pro vazbu optických zařízení na optická vlákna, která má zajistit co nejlepší energetický přenos.

Dalším úkolem bylo experimentální zjištění evanescentního pole v těsné blízkosti nad kanálkem vlnovodu. K tomuto účelu byla použita v laboratoři rozpracovaná metoda rastrovací tunelové mikroskopie v optickém blízkém poli s lokální sondou (SNOM), která byla vlastní průpravou pro základní měření nešířících se polí.

Pomocí této metody jsme získali obraz vnitřního prostorového rozložení vidů v mělce vnořeném kanálkovém vlnovodu a těsně nad ním. Ukázali jsme, že měření periody stojatých vln poskytuje přesné a přímé měření efektivního indexu lomu, který v kombinaci s měřeným tvarem vidů v příčném směru a s konstantou poklesu určuje hodnoty všech prostorových složek vlnového vektoru.

V návaznosti na tuto disertaci by měly následovat práce ověřující použití upravené metody pro mohovidové vlnovody. Jak je v práci uvedeno, je reálný předpoklad pro rozšíření této metody. Výhledově lze předpokládat, že tyto výsledky i metody měření mohou být použity i na komplexnější systémy.

Práce splnila zadané cíle. Byla rozpracována metoda rychlého a efektivního výpočtu rozložení vidů od mělce vnořené struktury vlnovodného kanálku uvnitř i v těsné blízkosti povrchu optoelektronických integrovaných obvodů.

Poprvé byla použita optická rastrovací tunelová mikroskopie k nedestruktivnímu měření spektroskopie lokálního pole rozložení stojatých vln ve vlnovodu a v jeho nejbližším okolí s příčným rozlišením lepším než 250 nm.

#### 7 LITERATURA

- [1] <u>http://www.cordis.lu/ist/workprogramme/wp0506\_en/2\_5\_1.htm</u>
- [2] MERSALI, B., RAMDANE, A., CARENCO, A. Optical-mode transformer: a III-V current integration enabler, *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, vol. 3, p. 1321-1221, ISSN 1077-260.
- [3] MOERMAN, I., VAN DAELE, P. P., DEMEESTER, P. M. A review on fabrication technologies for the monolithic integration of tapers with III-V semiconductor devices, *IEEE J.1 of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, vol. 3, p. 977-984, ISSN 1077-260.
- [4] FERNANDEZ, F. A., LU, Y. *Microwave and optical waveguide analysis by the Finite Element method*, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [5] KNOX, R. M., TOULIOS, P. P. Integrated circuits for the millimeter through optical frequency range, *Proc. M.R.I. Symp. Submillimeter waves*, Fox J.(Ed.), Polytechnic Press, New York, 1970, p. 497-516.
- [6] McILROY, P. W. A. Spectral Index method: single rib waveguide, In Robson, P.N., Kendall, P.C. (Eds.), *Rib waveguide theory by the Spectral Index method*, chapter 5, John Wiley & Sons Inc., 1990.
- [7] HUANG, W. P., XU, C. L., CHAUNDHURI, S. K. A finite difference vector beam propagation method for three dimensional waveguide structures, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, vol. 4, p. 148-151, ISSN: 1041-1135.
- [8] CHIANG, K. S. Review of numerical and approximate methods for the analysis of general optical dielectric waveguides, *Opt. and Quant. Electron.*, 1994, vol. 26, p. S113-S134, ISSN 0306-8919.
- [9] BENSON, T. M., BOZEAT, R. J., KENDALL, P. C. Rigorous EI method for semiconductor optical rib waveguides, *IEE Proc. J.*, 1992, vol. 139, p. 67-70, ISSN 1350-2433.
- [10] VUKOVIC, A., SEWELL, P., BENSON, T. M., KENDALL, P. C. Singularity corrected Spectral Index method, *IEE Proc.J.Optoelectron.*, 1998, vol. 145, p.59-65, ISSN 1350-2433.
- [11] BERRY, G. M., BURKE, S. V., SMARTT, C. J., BENSON, T. M., KENDALL, P. C. Exact and variational Fourier transform methods for analysis of multilayered planar waveguides, *IEE Proc. – Optoelectronics*, 1995, vol. 142, p. 66-75, ISSN 1350-2433.
- [12] REED, M., SEWELL, P., BENSON, T. M., KENDALL, P. C. The Free space radiation mode method for analysis of coated angled facets and comparison with a FD-TD method, *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 1997, vol. 15, p. 12-16, ISSN 0018-9480.
- [13] REED, M., SEWELL, P., BENSON, T. M., KENDALL, P. C. Limitations of onedimensional models of waveguide facets, *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 1997, vol. 15, p. 196-198, ISSN 0018-9480.
- [14] FILLARD, J.P. Near field optics and nanoscopy, World Scientific, Singapore, 1996, 438 pages, ISBN 981-02-2349-8
- [15] COURJON, D., BAINIER, C. Le champ proche optique, Springer, Paris, 2001, 344 pages, ISBN 2-287-59720-4.
- [16] KAWATA, S, OHTSU, M., IRIE, M. Nano-Optics, Springer, Berlin, 2002, 321 pages, ISBN3-540-41829-6.

# 8 VLASTNÍ PUBLIKACE

- A1 OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L. *Digital imaging and image resolution in scanning probe microscopy* In CO-MAT-TECH 2001. CO-MAT-TECH 2001. Trnava: STU Bratislava, 2001, s. 273 - 278, ISBN 80-224-1591-3
- A2 OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P., BRÜSTLOVÁ, J., TOMÁNEK, P. Near-field photoluminescence as high resolution diagnostics of semiconductor structures In Proceedings of Materials structure and micromechanics of fracture. Brno: VUTIUM, 2001, s. 439 - 443, ISBN 80-24-14-1892-3
- A3 TOMÁNEK, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., DOBIS, P. Near-field optical microscopy diagnostics In From quantum optics to photonics. From Quantum Optics to Photonics. Warszaw: Faculty of Physics, Warszaw University, 2001, s. 90 - 90, ISBN 83-913171-4-5
- A4 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., GRMELA, L., BRÜSTLOVÁ, J., OTEVŘELOVÁ, 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: MSSI, 2001, s. 59 – 59
- A5 TOMÁNEK, P., GRMELA, L., OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P., BRÜSTLOVÁ, J. Projekt "Fyzikální základy optoelektroniky" In Nové trendy ve fyzice (New trends in Physics). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, s. 536 - 539, ISBN 80-214-1992-X
- A6 OTEVŘELOVÁ, D. Digital imaging processing in scaning probe microscopy In Nové trendy ve fyzice (New trends in physics). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001, s. 375 380, ISBN 80-214-1992-X
- A7 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., LÉTAL, P. Local optical characteristics of semiconductor surfaces. *Proceedings of SPIE*, 2002, roč. 4607, s. 168 177. ISSN 0277-786X
- A8 OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., TOMÁNEK, P., UHDEOVÁ, N. *Photoluminiscence* scanning near-field optical microscopy in GaAlAs/GaAs quantum wells In Photonics Prague 2002 - 4th Int.Conf. on Photonics, Devices and Systems. Praha: Techmarket, 2002, s. 148 - 148, ISBN 80-86114-46-5
- A9 GRMELA, L., BRÜSTLOVÁ, J., OTEVŘELOVÁ, D., TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M. Local photoluminescence scanning measurement on A3-B5 quantum dots In Optics in computing - St. Petersburg, St. Petersburg Institute of fine Mechanics and Optics, Russia, 2002, s. 25 – 26.
- A10 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L. Spectral measurements of semiconductor structures using optical near-field approach In Joint COST-Action workgroup meeting on individual and assembled nanoparticles and quantum dots. IANQ. Leuven, Belgie: KU Leuven, COST 523, 2002, s. P55 0.

- A11 OTEVŘELOVÁ, D. Local Photoluminiscence on Quantum Dots In Student EEICT 2002. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2002, s. 229 - 233, ISBN 80-214-2115-0
- A12 TOMÁNEK, P., DOBIS, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D. Nanometric applications of the Scanning Near-field Optical Microscopy In NANO'02. Nanovědy, nanotechnologie a nanomateriály v České republice: Akademické nakladatelství, CERM, Brno, 2002, s. 53 - 53, ISBN 80-7204-258-0
- A13 OTEVŘELOVÁ, D. Lokální spektroskopie luminiscence polovodičových struktur In Metody blízkého pole. 3. seminář o metodách blízkého pole. Praha: Spektroskopická společnost Jana Marca Marci, 2002, s. 37 – 37.
- A14 OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., TOMÁNEK, P., BRÜSTLOVÁ, J. Photoluminescence scanning near-field optical microscopy in GaAlAs/GaAs quantum wells. *Proceedings of* SPIE, ISSN 0277-786X, 2003, roč. 5036, č. 5036, s. 640 - 644.
- A15 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., KAWATA, S. Near-field optical diagnostics of carrier dynamics in semiconductor with superresolution. *Physics of low-dimensional structures*, ISSN 0204-3467, 2003, roč. 2003, č. 3/4, s. 131 - 137.
- A16 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., DOBIS, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., KAWATA, S. Near-field optical imaging of carrier dynamics in silicon with superresolution In Scanning Probe Microscopy – 2003, Nizhniy Novgorod, Russia: Institute for Physics of microstructures RAS, 2003, s. 63 – 65.
- A17 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., DOBIS, P. Local optical imaging of electronic characteristics in semiconductors In Noise and fluctuation ICNF 2003. Brno, 2003, s. 445 448, ISBN 80-239-1005-1
- A18 OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P., TOMÁNEK, P. Singular Spectral Index Method for the Analysis of the Rib Waveguide In Measurement 2003, STU Bratislava,2003, s. 395 398, ISBN 80 967402 6 1
- A19 BENEŠOVÁ, M., TOMÁNEK, P., OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P., GRMELA, L. Near field scanning optical microscopy as an imaging tool for carrier process in silicon In AED2003 Advanced Engineereing Design. Praha: Process Engineering Publisher, 2003, s. F1.3 4, ISBN 80-86059-35-9
- A20 TOMÁNEK, P., DOBIS, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., UHDEOVÁ, N. Nanometric applications of the Scanning Near-field optical microscopy In Proceedings of the National Conference NANO'02. Brno: Česká společnost pro nové materiály a technologie, 2003, s. 166 – 169, ISBN 80-7329-027-8
- A21 OTEVŘELOVÁ, D. Lokální spektroskopie luminiscence polovodičových struktur. *Československý časopis pro fyziku*, ISSN 0009-0700, 2003, roč. 53, č. 2, s. 117 - 119.
- A22 OTEVŘELOVÁ, D. Local Half Space Radiation Mode Analysis of Waveguides Buried at Realistic Depth In Student EEICT 2003. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2003, s. 470 -474, ISBN 80-214-2379-X
- A23 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., LÉTAL, P. *Optika a mikroskopie v blízkém poli* In 3.konference o Matematice a fyzice na vysokých školách technických. Vojenská akademie Brno, 2003, s. 20 28, ISBN 80-85960-51-6

- A24 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P. Scanning near-field optical microscopy in semiconductor research. *Physics of low-dimensional structures*, 2004, roč. 2004, č. 1/2, s. 47 - 53. ISSN 0204-3467
- A25 TOMÁNEK, P., BENEŠOVÁ, M., OTEVŘELOVÁ, D., DOBIS, P. Scanning near-field optical microscopy and its application in semiconductor investigation In Scanning probe microscopy 2004. Nizhny Novgorod: Institute for Physics of Microsctructures RAS, 2004, s. 108 111.
- A26 OTEVŘELOVÁ, D., TOMÁNEK, P., GRMELA, L. *Local characterization of optical waveguide structure using Scanning near-field optical microscopy* In Applied physics on condensed matter APCOM 2004. STU Bratislava, 2004, s. 183 186, ISBN 80-227-2073-9
- A27 TOMÁNEK, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS, P. Nearfield local optical spectroscopy of nanostructured semiconductors. ISBN 80-214-2672-1. (abstrakt)
- A28 OTEVŘELOVÁ, D., TOMÁNEK, P. Výpočet odrazivosti čela vlnovodu mělce vnořeného do polovodičového materiálu. *Jemná mechanika a optika*, 2004, roč. 49, č. 9, s. 245 247. ISSN 0447-6411
- A29 OTEVŘELOVÁ, D. Šíření optického signálu v 3D strukturách v těsné blízkosti rozhraní polovodič-vzduch In Workshop NDT 2004, Non-destructive testing. Brno: Brno University of Technology, 2004, s. 126 - 131, ISBN 80-7204-371-4
- A30 OTEVŘELOVÁ, D. Analysis Of Buried Waveguides For Mode Spot Converters In Nové trendy ve fyzice NTF 2004, Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., Ondráčkova 105, Brno, 2004, s. 254 - 257, ISBN 80-7355-024-5
- A31 OTEVŘELOVÁ, D. *Facet Reflectivity of Waveguides Buried at Realistic Depth* In Student EEICT 2004. Brno: Ing. Zdeněk Novotný CSc., 2004, s. 665 669, ISBN 80-214-2636-5
- A32 TOMÁNEK, P., OTEVŘELOVÁ, D., GRMELA, L., BRÜSTLOVÁ, J., DOBIS, P. Local near-field scanning optical microscopy and spectroscopy of nanostructures In Nanovědy, nanotechnologie a nanomateriály - Nano04. Brno: Brno University of Technology, 2005, s. 188 - 193, ISBN 80-214-2793-0

# 9 CURRICULUM VITAE

Jméno: Dana Košťálová- OTEVŘELOVÁ

Narozen: 29. října 1975 v Brně

Bydliště: Vondrákova 25, Brno, 63500

Kontakt:kostala@feec.vutbr.cz

#### Vzdělání

- 1990 94 Gym. Slovanské nám., Brno
- 1994 99 Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta, katedra optiky Státní zkouška složena v červnu 1999 Diplomová práce: Zpracování informace pomocí neuronových sítí (květen 1999)
  2000 05 Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a informatiky, ústav fyziky
  - Ph.D. studium Státní doktorská zkouška v červnu 2002

#### **Odborná praxe**

| 2000 - 04 | asistentka na ústavu fyziky FEKT VUT |
|-----------|--------------------------------------|
|           |                                      |

2004 – Střední škola informačních technologií, Purkyňova, Brno

#### Jazykové znalosti

angličtina, ruština

#### Účast na grantových projektech

- grant FRVŠ : IS 0149: Inovace kursu Fyzikální základy optoelektroniky, řešitel : Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. (2001)
- výzkumný záměr MŠMT: č. MSM 262200022: Výzkum mikroelektronických systémů a technologií (2002-2004)
- grant MŠMT: Kontakt č. ME 544: Polovodiče lokální optické a elektrické vlastnosti, řešitel: Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc. (2002-2004)
- doktorský grant FRVŠ č. IS1757: Rastrovací optická mikroskopie v blízkém poli (2002)

#### **10 ABSTRACT**

New, fast and accurate semianalytic analytic methods for the study of OptoElectric Integrated Circuit (OEIC) waveguides for nanooptic and nanophotonic applications, and an experimental method of Spectroscopy of standing waves are presented.

For the analytic use, the Spectral Index (SI) and the Free Space Radiation Mode (FSRM) methods are reviewed, and the Half Space Radiation Mode (HSRM) method is deeply elaborated. The FSRM method applies to low contrast waveguides, the SI and HSRM methods to configurations with an upper air-cladding surface.

These methods are all spectral ones and can be combined to exploit the advantages of each of them and to increase the range of structures that can be analyzed. SI is totally accurate, while FSRM currently solves waveguide problems by means of fully vectorial calculus in seconds on a PC, but it is limited to transverse index contrasts of less than 10%.

The novel Fourier transform technique, HSRM removes this limitation in index variation, allowing buried structures in the vicinity of an arbitrary transverse dielectric discontinuity to be analyzed, including diffraction. The HSRM method is a semianalytical approach and is based on the assumption that the radiation modes of a waveguiding structure propagate in a region of a uniform refractive index. It is therefore ideally suited to structures in which only a small index variation in the transverse direction exists. In many cases, the method can be considered an alternative to more computationally intensive methods and is a suitable CAD tool, finding application in design environment.

The HSRM method automatically includes reflections in the analysis, and is newer, faster and more accurate than other common approaches. The speed advantage is often several orders of magnitude compared with mode matching and other methods: runs which have taken several hours can now be accomplished in minutes.

The experimental verification and visualization of the mode spatial distribution inside a waveguide as well as in its vicinity in the air is provided by exploiting a nondestructive Scanning near-field optical microscopy technique and Spectroscopy of standing waves with a lateral superresolution better than 250 nanometers. Consequently, this technique seems to be a very powerful and useful tool for the characterization of features of nanophotonic and nanoelectronic devices.