# SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky



# **Ing. Peter TELEK**

Autoreferát dizertačnej práce

## **VLASTNOSTI ELEKTROLUMINISCENČNÝCH DIÓD** PRE SPINTRONICKÉ APLIKÁCIE

**PROPERTIES OF LIGHT EMITTING DIODES FOR SPINTRONICS APPLICATION** 

na získanie vedecko-akademickej hodnosti: philosophiae doctor (PhD.)

v odbore doktorandského štúdia: v študijnom programe:

5.2.13 Elektronika Mikroelektronika

Bratislava, 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre mikroelektroniky (dnes Ústav elektroniky a fotoniky) FEI STU v Bratislave.

| Predkladateľ: | Ing. Peter Telek<br>Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave   |
|---------------|---|
| Školiteľ:     | doc. Ing. Jozef Novák, DrSc.<br>Elektrotechnický ústav SAV  |
| Oponenti:     | prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc., FŠT Trenčianska univerzita A. Dubčeka<br>doc. Ing. Dušan Pusiš, PhD., EF Žilinská univerzita |

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

v zasadačke dekana Fakulty elektrotechniky a informatiky, Ilkovičova 3 812 19 Bratislava

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD., v.r. dekan FEI STU prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc., v.r. riaditeľ ÚEF a predseda odb. komisie

# OBSAH

| Úvod                    |                                  |                        |  | 3  |  |  |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------|--|----|--|--|
| Ciele dizertačnej práce |                                  |                        |  | 4  |  |  |
| 1                       | Prehľa                           | Prehľad problematiky 5 |  |    |  |  |
|                         | 1.1                              | Elektr                 | oluminiscenčné diódy - detektory spinovej injekcie                 | 5  |  |  |
| 2                       | Zhrnutie dosiahnutých výsledkov  |                        |  | 7  |  |  |
|                         | 2.1                              | Štrukt                 | túry LED s implementovanou InMnAs vrstvou                          |    |  |  |
|                         |                                  | 2.1.1                  | Charakterizácia povrchovej štruktúry                               | 9  |  |  |
|                         |                                  | 2.1.2                  | VA charakterizácia a charakterizácia výstupného výkonu spin-LED    | 10 |  |  |
|                         |                                  | 2.1.3                  | Magnetické vlastnosti spin-LED štruktúry                           | 14 |  |  |
|                         |                                  | 2.1.4                  | Zhrnutie   | 15 |  |  |
|                         | 2.2                              | Detek                  | cia elektrickej spinovej injekcie                                  | 16 |  |  |
|                         |                                  | 2.2.1                  | Meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia |    |  |  |
|                         |                                  | emitovaného spin-LED   |  | 17 |  |  |
|                         |                                  | 2.2.2                  | Vyhodnotenie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu     |    |  |  |
|                         |                                  | žiaren                 | ia emitovaného spin-LED  | 19 |  |  |
|                         |                                  | 2.2.3                  | Zhrnutie   | 23 |  |  |
| Hlavne                  | Hlavné prínosy dizertačnej práce |                        |  | 25 |  |  |
| Záver                   | 1                                | -                      |  | 26 |  |  |
| Resum                   | ie                               |                        |  | 29 |  |  |
| Použit                  | Použitá literatúra               |                        |  |    |  |  |
| Publik                  | Publikačná činnosť autora        |                        |  |    |  |  |
|                         |                                  |                        |  |    |  |  |

## ÚVOD

Vývoj v oblasti mikroelektroniky a nanotechnológií je výrazne dynamicky sa rozvíjajúcim odvetvím výskumu nielen na Slovensku, ale aj v rámci európskych a globálnych výskumných aktivít špičkových vedeckých tímov. Významný rozvoj zaznamenáva aj oblasť optoelektroniky, kde sa výskum a vývoj v oblasti nových materiálov a technológií, spolu s vývojom nových optických komunikačných systémov a aplikovanej optoelektroniky stáva strategickým pre rozvoj, zdokonaľovanie a vynachádzanie nových systémov pre prenos a uchovávanie informácií.

Veľmi dôležitým zameraním výskumu sú aj nové perspektívne materiály určené pre rozvoj spintroniky. Ideou polovodičovej spintroniky (spin transport electronics) je využitie spinových vlastností elektrónov ako nového stupňa voľnosti v elektronických súčiastkach a zariadeniach. Teória je založená na existencií feromagnetických polovodičov a prechodných prvkov, predovšetkým Mn, ale aj Cr, menej Ni. Veľký pokrok vo vývoji III-V zriedených magnetických polovodičov umožňuje implementáciu feromagnetických epitaxných vrstiev do zložitých štruktúr a sofistikovaných súčiastok (spin-LED, spin-FET, spin-LASER). Prirodzene vysoké nároky kladené na chemickú a fyzikálnu čistotu používaných materiálov a jednotlivých komponentov sú v oblasti spintroniky doplnené o požiadavky na feromagnetické vlastnosti už pri izbovej teplote a nevyhnutnú kompatibilitu s materiálmi používanými pri príprave štandardných elektronických súčiastok (GaAs, AlGaAs, GaN, InP a pod.)

Väčšina doterajších pokusov o rast vrstiev dotovaných mangánom sa realizovala pomocou MBE (Molecular Beam Epitaxy). Použitie elementárneho zdroja mangánu a režimu rastu pri nízkych teplotách sú faktory, ktoré nemožno aplikovať pri použití technológie MOCVD, pomocou ktorej sa na Elektrotechnickom ústave SAV uskutočňuje moderný výskum zlúčenín InAs dotovaných mangánom. Preto je nevyhnutné hľadať nové a inovatívne prístupy pri riešení úloh spojených s technológiou prípravy a rastu polovodičových vrstiev. Hoci MOCVD je jedna z najvýznamnejších technológií pre prípravu štruktúr polovodičových súčiastok, existuje len málo publikácií o raste InMnAs technológiou MOCVD. Na rozšírení poznatkov z tejto oblasti má veľký význam výskum nového polovodičového materiálu InMnAs, jeho implementácie do jednotlivých skúmaných heteroštruktúr a príprava sofistikovaných elektroluminiscenčných spin-LED.

5

## CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

1. Preskúmať vlastnosti ternárneho polovodičového materiálu InMnAs pripravovaného technológiou MOCVD a overiť možnosti jeho zabudovania do štruktúry elektroluminiscenčnej diódy.

2. Navrhnúť štruktúru elektroluminiscenčnej diódy so zabudovanou feromagnetickou vrstvou, pripraviť experimentálne vzorky a overiť ich funkčnosť pri izbovej teplote.

3. Na základe informácií publikovaných v literatúre a vlastného návrhu vybudovať pracovisko na meranie spintronických vlastností pripravených vzoriek.

4. Zmerať a vyhodnotiť vplyv externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED vzorkami v závislosti na smere a intenzite magnetického poľa.

5. Porovnať namerané hodnoty parametrov experimentálnych vzoriek s výsledkami spintronických meraní publikovaných v literatúre.

#### **1 PREHĽAD PROBLEMATIKY**

#### 1.1 Elektroluminiscenčné diódy - detektory spinovej injekcie

Použitie elektroluminiscenčných diód ako detektorov spinovej injekcie, navrhnutý v roku 1970 Aranovom a Pikusom [4], priniesol zásadne nový prístup k preukázaniu prítomnosti spinovo polarizovaného prúdu v polovodičových materiáloch pre spintroniku. Tento spôsob je založený na "konverzií" spinovo polarizovaného prúdu na kruhovo polarizovanú elektroluminiscenciu. Stupeň kruhovej polarizácie žiarenia spin-LED je priamo úmerný spinovej polarizácií nosičov náboja v štruktúre kvantových jám. Tento spôsob detekcie dáva jasný dôkaz spinovej injekcie vo feromagnetických polovodičoch [6], využitím LED založených na heteroštruktúrach využívajúcich prevažne III-V a II-VI polovodičové heteroštruktúry.

Najčastejšie sa stretávame so spin-LED pripravenými pomocou zväzkovej molekulárnej epitaxie (MBE) [1-6], využívajúc dve oddelené rastové komory, jednu pre rast LED štruktúry založenej na III-V polovodičoch a druhú pre rast feromagnetickej vrstvy založenej zväčša na využití II-VI polovodičov [1-5]. Feromagnetická vrstva založená rovnako na III-V polovodičoch ako LED štruktúra sa využíva menej [6]. . Feromagnetické polovodičové vrstvy sú obyčajne z ternárnych alebo kvaternárnych materiálov. Vznik feromagnetického stavu je založený na prítomnosti mangánu, menej kadmia a telúru v štruktúre [7]. Vo väčšine publikovaných prác sa využívajú ternárne vrstvy Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As, In<sub>1-</sub> <sub>x</sub>Mn<sub>x</sub>As, Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te [4, 5, 17] alebo kvaternárny materiál Be<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>Zn<sub>1-x-y</sub>Se [6]. Stretávame sa tiež s využitím kovových vrstiev, najčastejšie využívanými feromagnetikami sú kobalt, železo a terbium [16, 18, 19, 21]. Hrúbka použitých ternárnych a kvaternárnych feromagnetických vrstiev je zvyčajne na úrovni stoviek nanometrov, najviac 360 nm [17] a v prípade použitia kovových vrstiev (Fe, Co, Tb) je obvyklá hrúbka vrstvy nižšia, v intervale od 15 nm do 30 nm [18 – 21], prípadne je použitá vrstva zložená so sendvičovej štruktúry v celkovej hrúbke do 30 nm, v ktorej sa niekoľko krát striedajú nanometrové vrstvy Fe a Tb [16]. Publikované spin-LED štruktúry boli rastené buď na p-GaAs(001) alebo n-GaAs(100) substráte v závislosti od spôsobu vytvorenia aktívnej oblasti a použitej feromagnetickej polovodičovej vrstvy. Aktívne oblasti sú najčastejšie tvorené viacnásobnými kvantovými jamami s využitím kombinácie buď GaAs-AlGaAs alebo GaAs-InGaAs. Na vylepšenie morfologických vlastností aktívnej oblasti a zabráneniu vplyvu kryštalografických porúch na túto oblasť, ktoré vnáša do štruktúry implementácia feromagnetickej vrstvy, kryštalizujúca v hexagonálnej kryštalickej štruktúre na rozdiel od zvyšku štruktúry, kryštalizujúcej

v sfaleritovej kryštalickej štruktúre, sa využíva oddeľovacia vrstva. Obvykle je z materiálu využívaného v štruktúre (AlGaAs) s hrúbkou 100 nm [4], čo nie je platné v prípade kovových feromagnetických vrstiev. Názorné príklady používaných štruktúr sú na obrázku 1.1. Publikované výsledky polarizačných meraní elektroluminiscenčných diód ako detektorov elektrickej spinovej injekcie preukazujú stupeň



*Obr.1.1* Príklady publikovaných LED štruktúr použitých na preukázanie prítomnosti spinovo polarizovaného prúdu pomocou kruhovo polarizovaného žiarenia, vľavo[6], vpravo[5].

kruhovej polarizácie žiarenia obvykle na úrovni 2 - 5 % [16, 18 - 20], v ojedinelých prípadoch až do 36% [17, 21]. Stupeň kruhovej polarizácie je priamo úmerný spinovej polarizácií nosičov náboja v štruktúre kvantových jám. Uvádzané hodnoty magnetického poľa pri meraniach sú v maximálnom rozsahu od – 10 T do + 10 T, obvykle od – 3 T do + 3 T. Väčšina publikovaných prác uvádza hodnoty Curieho teploty pripravených feromagnetických materiálov na úrovni 40 – 80 K. Vyhodnotenie stupňa kruhovej polarizácie realizovali na základe meraní uskutočnených pri teplotách do 25K.

## 2 ZHRNUTIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV

#### 2.1 Štruktúry LED s implementovanou InMnAs vrstvou

Na prípravu elektroluminiscenčnej diódovej štruktúry s implementovanou InMnAs feromagnetickou vrstvou sa použila MQW LED štruktúra (s ozn. MO1064) do ktorej sa pôvodne implementovala 300nm hrubá  $In_{1-x}Mn_xAs$  vrstva s x~0,075 (t.j. epitaxná vrstva označovaná ako MO997). Vrstva feromagnetického InMnAs bola umiestnená bezprostredne medzi 40nm hrubú oddeľovaciu vrstvu aktívnej oblasti a 300 nm p-dopovanú AlGaAs vrstvu (vzorku označujeme ako MO1065), zobrazená je na obr. 2.1 (vľavo).

porúch, odporu. či Množstvo mriežkových nárast sériového zníženie elektroluminiscencie nás viedlo k úprave LED štruktúry. Podstatou týchto zmien vykonaných za účelom zlepšenia vlastností diódovej štruktúry bolo oddialenie implementovanej epitaxnej InMnAs vrstvy od aktívnej oblasti kvantových jám s cieľom zamedziť zásahu dislokačných slučiek do aktívnej oblasti štruktúry, viď. obr. 2.2 (vľavo). Ďalšou modifikáciou bola zmena hrúbky feromagnetickej InMnAs vrstvy. Implementovaná InMnAs vrstva bola stenčená na 100 nm, úprava bola realizovaná za účelom zníženia negatívnych vplyvov morfológie InMnAs epitaxnej vrstvy na celkovú povrchovú drsnosť LED štruktúry. Nová štruktúra LED (s označením MO1094 a MO1095) bola narastená na n-GaAs (100) orientovanom substráte s 400 nm n-GaAs:Si dopovanou oddeľovacou vrstvou. Aktívna oblasť pozostáva z troch 9 nm nedopovaných GaAs jám oddelených 24 nm nedopovanými AlGaAs bariérami uzatvorenými medzi dve 48 nm nedopované AlGaAs oddeľovacie vrstvy. 1300 nm široká AlGaAs kremíkom dopovaná epitaxná vrstva bola umiestnená medzi oddeľovaciu vrstvu a štruktúru aktívnej oblasti (MQW štruktúra). Na vrchnej časti štruktúry aktívnej oblasti sa nachádza 100 nm hrubá AlGaAs zinkom dopovaná vrstva, nad ňou je 300 nm p-dopovaná AlGaAs:Zn vrstva nasledujúca po 60 nm GaAs p<sup>+</sup> krycej vrstve. Vrstvu feromagnetického InMnAs sme umiestnili do vnútra p-dopovanej AlGaAs vrstvy vo vzdialenosti 100 nm od rozhrania tejto AlGaAs vrstvy s nedopovaným AlGaAs (hornou bariérou). Na obrázku 2.1 (vpravo) vidíme umiestnenie InMnAs vrstvy v štruktúrach MQW LED MO1094 a MO1095 v porovnaní s pôvodnou LED štruktúrou MO1065 (vľavo). Rozdiel medzi štruktúrou MO1094 a MO1095 je len v zložení InMnAs vrstvy. Zatiaľ čo v MO1094 je implementovaná vrstva InMnAs s obsahom mangánu rovnakým ako vo vzorke MO997 (t.j. s molárnym zlomkom MnAs x~0,075), do štruktúry MO1095 sme implementovali vrstvu s vyšším obsahom mangánu, takým ako je vo vzorke MO1014 (t.j. s molárnym zlomkom MnAs x~0,10), pozri tabuľky 4.1 a 4.2.

Upravená spin-LED štruktúra (MO1094, MO1095) má podstatne zlepšenú kryštalografickú kvalitu aktívnej oblasti. Žiadne dislokačné slučky už nezasahujú do oblasti kvantových jám, čím nedochádza k narušeniu prúdového transportu v aktívnej oblasti. Výrazné zlepšenie je pozorovateľné aj na TEM prierezovom pohľade spin-LED štruktúrou MO1094, ktorý sa nachádza na obrázku 2.2 (vpravo).

| GaAs p⁺cap    |                            |
|---------------|----------------------------|
| AlGaAs p*     | GaAs p⁺cap<br>AlGaAs p⁺    |
| InMnAs        | <b>InMnAs</b><br>AlGaAs p⁺ |
| AlGaAs u.d.   | AlGaAs u.d.                |
| - 3QW + 2B    | - 3QW + 2B                 |
| AlGaAs u.d.   | AlGaAs u.d.                |
| AlGaAs(Si)    | AlGaAs(Si)                 |
| GaAs buffer   | GaAs(Si)buffer             |
| GaAs substrát | GaAs substrát              |

Obr. 2.1 Náčrt štruktúry spin-LED diódy pred a po úprave. Znázornené sú vzorky MO1065 (vľavo) a MO1094, MO1095 (vpravo). V štruktúrach MO1094 a MO1095 sme oddialili implementovanú epitaxnú InMnAs vrstvu od aktívnej oblasti kvantových jám a stenčili feromagnetickú vrstvu na 100 nm.



*Obr. 2.2* Porovnanie detailných TEM prierezových pohľadov aktívnymi oblasťami spin-LED štruktúr vzoriek MO1065 – pôvodná štruktúra (vľavo) a MO1094 – upravená štruktúra (vpravo). Viditeľné je zlepšenie kryštalografickej kvality aktívnej oblasti upravenej vzorky MO1094.

#### 2.1.1 Charakterizácia povrchovej štruktúry

Pripravené feromagnetické InMnAs ternárne epitaxné vrstvy boli implementované do štruktúr elektroluminiscenčnej diódy do priestoru nad aktívnu oblasť, ktorá emituje žiarenie. Preto sú veľmi dôležité ich morfologické vlastnosti. Povrchovú štruktúru epitaxných vrstiev MO995 a MO997 aj s príslušnými detailnými zobrazeniami vidíme na AFM snímkach a na grafoch povrchovej drsnosti zobrazených na obrázkoch 2.3 až 2.6. Názorne je vidieť silný vplyv zvyšujúceho sa obsahu mangánu obsiahnutého v štruktúre vrstvy na povrchovú drsnosť epitaxných vrstiev InMnAs. Pri zvýšení molárneho zlomku MnAs z x~0,010 (MO995) na x~0,075 (MO997) dochádza k nárastu povrchovej drsnosti zo 40 nm až na 300 nm (min. píkmax. pík).

Ako sme už uviedli, zaznamenávame silný vplyv narastajúceho obsahu mangánu na povrchovú drsnosť InMnAs epitaxných vrstiev. Povrchová drsnosť InMnAs vrstvy sa čiastočne transformuje aj do drsnosti spin-LED štruktúry. Povrchová morfológia vzorky MO1065 je zjavne pod vplyvom drsnosti implementovanej InMnAs vrstvy. Povrch vzorky MO1064 bez InMnAs vrstvy v štruktúre LED je extrémne hladký, hodnota rms je nižšia ako 0,1 nm, čo predstavuje drsnosť na úrovni rastového autonómneho stupienka epitaxnej vrstvy. Hodnota rms u vzorky MO1065 s InMnAs vrstvou je podstatne vyššia, je na úrovni až 100 nm.



*Obr. 2.3* AFM snímka vzorky MO995, molárny zlomok MnAs v InMnAs je 0,01



Obr. 2.4 Čiarový prierezový graf povrchovej drsnosti vzorky MO995





*Obr. 2.5* AFM snímka vzorky MO997, molárny zlomok MnAs v InMnAs je 0,075

*Obr. 2.6* Čiarový prierezový graf povrchovej drsnosti vzorky MO997

Implementovaná InMnAs vrstva do vzoriek MO1094 a MO1095, stenčená na 100 nm, bola realizovaná za účelom zníženia negatívnych vplyvov morfológie InMnAs epitaxnej vrstvy na celkovú povrchovú drsnosť LED štruktúry. Zaznamenali sme podstatné zlepšenie povrchovej morfológie u oboch vzoriek upravených spin-LED štruktúr MO1094 a MO1095, s hodnotami rms na úrovni 20 – 25 nm. Potvrdil sa náš predpoklad, že znížením hrúbky InMnAs vrstvy dosiahneme podstatne lepších výsledkov v povrchovej morfológií LED štruktúr.

## 2.1.2 VA charakterizácia a charakterizácia výstupného výkonu spin-LED

Hodnota úbytku napätia v priepustnom smere VA charakteristík LED štruktúry MO1065 zodpovedá štandardným hodnotám pre PN prechod v AlGaAs a poklesla z hodnoty 1,15V na 0,80V, viď obr. 2.7.

Na určenie sériového odporu diód sme použili Cheungovou metódou [15] a zistili sme nárast sériového odporu až na hodnotu 180-250  $\Omega$ .

Nárast záverného prúdu je viditeľný z obr. 2.9, kde pozorujeme nárast z hodnoty  $10^{-8}$  A až na úroveň  $10^{-3}$ A.

Predpokladáme, že povrchové defekty, dislokačné slučky a blízke umiestnenie InMnAs vrstvy k aktívnej oblasti LED spôsobujú problémy s prúdovým transportom v diódovej štruktúre MO1065 a ich výsledkom sú spomínané negatívne prejavy. Vyhodnotili sme voltampérové charakteristiky optimalizovaných spin-LED štruktúr MO1094 a MO1095 a porovnali ich s priebehmi VA charakteristík pôvodných štruktúr MO1064 a MO1065. Zaznamenali sme značný vplyv obsahu a koncentrácie mangánu v štruktúre spin-LED na VA charakteristiky štruktúr. Zatiaľ čo štruktúra s nižším obsahom mangánu (MO1094) vykazovala zníženie sériového odporu (na jednotky  $\Omega$ ) a priblíženie sa hodnoty úbytku napätia v priepustnom smere (1,10V) k hodnotám úbytku napätia vzorky bez obsahu mangánu (úbytok napätia v priepustnom smere u vzorky MO1064 bol 1,15V), vzorka MO1095 s implementovaným feromagnetickým materiálom InMnAs s molárnym zlomkom MnAs x~0,10 dosiahla hodnotou úbytku napätia v priepustnom smere 0,60V a sériový odpor narástol na hodnotu desiatok  $\Omega$  (však menej ako u vzorky MO1065), viď. obr. 2.7.

Významnú zmenu idealizačného faktora sme nezaznamenali u žiadnej z charakterizovaných vzoriek.

Prítomnosť InMnAs epitaxnej vrstvy s štruktúre LED, nemá vplyv na vlnovú dĺžku emitovaného žiarenia spin-LED.

Typický prúd v "závernom smere" bol u štruktúry MO1094 na úrovni 3.10<sup>-6</sup>A a u štruktúry MO1095 podstatne viac, až na úrovni 0,01A, čo je dokonca viac ako u štruktúry MO1065, viď. obr. 2.9.

Pre sériový odpor vzoriek môžeme konštatovať, že platí:  $Rs_{1064} < Rs_{1094} < Rs_{1095} < Rs_{1065}$ .



*Obr.* 2.7 VA charakteristika LED v priepustnom smere (MO1064, MO1065, MO1094, MO1095), šípky naznačujú hodnoty úbytku napätia v priepustnom smere pre jednotlivé vzorky

Odstránením mriežkových porúch z aktívnej oblasti, prostredníctvom oddialenia InMnAs vrstvy od aktívnej oblasti kvantových jám, sa výrazne zlepšili aj optické a výkonové vlastnosti spin-LED štruktúr. Ako vidíme na obr. 2.10, výstupný výkon optimalizovaných LED štruktúr (MO1094, MO1095) sa podstatne zvýšil oproti výstupnému výkonu predošlých štruktúr (MO1065), ktorých výkon bol na nemerateľnej úrovni. Upravené diódové štruktúry s približne implementovanou InMnAs vrstvou majú polovičný výstupný výkon oproti referenčnej LED štruktúre (MO1064). Vidíme, že pri I<sub>F</sub>=50 mA sa pohybuje výstupný výkon upravených štruktúr MO1094 a MO1095 na úrovni 6.10<sup>-5</sup>W. Medzi štruktúrami MO1094 a MO1095 sú len minimálne výkonové rozdiely. Meranie charakteristík výstupného výkonu diódových štruktúr sme uskutočnili pomocou Ulbrichtovej integrálnej gule v rozsahu prúdov v priepustnom smere 0 až 50 mA pri teplote T=300K.



*Obr.* 2.8 VA charakteristiky LED v priepustnom smere, MO1064 (vľavo) a MO1065 (vpravo). Štruktúra s nižším obsahom mangánu vykazovala zníženie sériového odporu na jednotky  $\Omega$ , kým však vzorka MO1065 vykazovala hodnoty sériového odporu až na úrovni stoviek  $\Omega$ .



Obr. 2.9 VA charakteristiky LED v závernom smere (MO1064, MO1065, MO1094, MO1095)



Obr. 2.10 Charakteristiky výstupného výkonu LED štruktúr (MO1064, MO1065, MO1094, MO1095)

#### 2.1.3 Magnetické vlastnosti spin-LED štruktúry

Skúmané epitaxné vrstvy vykazujú p-typ vodivosti, teda sa u nich prejavuje dierovo podporený feromagnetizmus. Ako sme už uviedli, epitaxné vrstvy MO997 a MO1014 sú feromagnetické už pri izbovej teplote s Curieho teplotou Tc~340K, t.j. hodnotou vyššou ako Tc MnAs. Z meraní tiež vyplynulo, že pre x > 0,05 Curieho teplota prestáva byť závislá na obsahu mangánu. Tento jav je vysvetlený na základe nanoklasteringu na atómovej úrovni [14]. Curieho teplota je teplota fázového prechodu, kedy materiál prestáva byť feromagnetický. Pomerne vysoká Curieho teplota skúmaných materiálov nám umožňuje využitie ternárneho InMnAs ako materiálu spĺňajúceho požiadavky na spinovú injekciu pri izbovej teplote.

Teplotná závislosť magnetických vlastností diódových štruktúr MO1094 a MO1095 bola nameraná pomocou SQUID magnetometra v rozsahu magnetického poľa od 50 Oe do 1500 Oe. Výsledný magnetický moment bol vyhodnotený po odpočítaní diamagnetického príspevku GaAs substrátu, viď. obr. 2.11. Z obrázku 2.11 je tiež zrejmé, že obe štruktúry MO1094 a MO1095 vykazujú hodnotu Curieho teploty na úrovni Tc=343K. Táto hodnota Curieho teploty je identická s nameranými hodnotami Curieho teploty samotných InMnAs vrstiev MO997 a MO1014.



*Obr. 2.11* Magnetický moment ako funkcia teploty pre štruktúry MO1094 (dole) a MO1095 (hore). Zvýšená hodnota magnetizácie u vzorky MO1095 oproti hodnotám nameraným u vzorky MO1094 je spôsobená vyššou koncentráciou mangánu v epitaxnej vrstve InMnAs implementovanej v štruktúre MO1095.

#### 2.1.4 Zhrnutie

Záverom tejto kapitoly konštatujeme, že zriedený ternárny magnetický polovodič InMnAs je vhodným materiálom použiteľným pre spintronické aplikácie pri izbovej teplote, práve vďaka tomu, že vykazuje hodnoty Curieho teploty na úrovni 340 K. V rámci tejto kapitoly sme skúmali vplyv vloženia tenkej (300nm alebo 100nm) InMnAs epitaxnej vrstvy na vlastnosti LED. Štruktúry sme charakterizovali pomocou TEM, AFM, PL pri izbovej teplote a meraní výstupného optického výkonu (Ulbrichtova integračná guľa). Pre implementáciu InMnAs vrstvy sme, kvôli vhodným vlastnostiam, zvolili štruktúru GaAs/AlGaAs MQW LED. Všetky LED štruktúry vykazovali maximum elektroluminiscencie pri energií 1,467eV. Prezentované výsledky preukazujú, že InMnAs vrstva sa úspešne zabudovala do LED štruktúry. Všetky pripravené vzorky LED majú zhodný rozmer čipu, 400 x 400µm, tj. 0,16 mm<sup>2</sup>. AFM charakterizácia preukázala silný vplyv zvyšujúceho sa obsahu Mn na povrchovú drsnosť epitaxných vrstiev InMnAs a tiež fakt, že povrchová drsnosť InMnAs vrstvy sa čiastočne transformuje aj do drsnosti spin-LED štruktúry. Preukázal sa tiež fakt, že pôvodne implementovaná 300nm hrubá InMnAs vrstva negatívne ovplyvňuje vlastnosti spin-LED štruktúry nielen kvôli jej hrúbke, ale aj kvôli jej umiestneniu v blízkosti aktívnej oblasti diódovej štruktúry. Preto sme pripravili nové spin-LED štruktúry (MO1094 a MO1095) s InMnAs vrstvou vysunutou ďalej od oblasti PN prechodu a znížili sme hrúbku vrstvy na 100 nm, čím sme eliminovali výskyt mriežkových porúch v aktívnej oblasti. Uskutočnené zmeny mali pozitívny vplyv na elektrické, morfologické aj optické a výkonové vlastnosti štruktúr. Voltampérové charakteristiky sme porovnali s priebehmi VA charakteristík pôvodných štruktúr MO1064 a MO1065. Zaznamenali sme značný vplyv obsahu a koncentrácie mangánu v štruktúre LED na VA charakteristiky štruktúr. Štruktúra s nižším obsahom mangánu (MO1094) vykazovala sériový odpor na úrovni jednotiek  $\Omega$ , vzorka MO1095 s implementovaným feromagnetickým materiálom InMnAs s molárnym zlomkom MnAs x~0,10 vykazovala sériový odpor desiatok  $\Omega$ , čo je však o rád menej ako u vzorky MO1065. V závernej oblasti VA charakteristika štruktúry MO1094 vykazovala hodnoty záverného prúdu okolo 3.10<sup>-6</sup>A a štruktúra MO1095 podstatne viac, až 0,01A. Teplotná závislosť magnetických vlastností diódových štruktúr MO1094 a MO1095 bola nameraná pomocou SQUID magnetometra v rozsahu magnetického poľa od 50 Oe do 1500 Oe. Výsledný magnetický moment bol vyhodnotený po odpočítaní diamagnetického príspevku GaAs substrátu. Obe štruktúry MO1094 a MO1095 vykazujú hodnotu Curieho teploty na úrovni Tc=343K. Výstupný výkon LED štruktúry MO1064 bol na úrovni 1,5.10<sup>-4</sup>W pri I<sub>F</sub>=50 mA.

Pôvodne pripravená štruktúra s InMnAs vrstvou (MO1065) nevykazovala merateľné hodnoty výstupného výkonu. Upravené diódové štruktúry s implementovanou InMnAs vrstvou mali výstupný výkon na úrovni  $6.10^{-5}$ W pri prúde v priepustnom smere, I<sub>F</sub>=50 mA, čo predstavuje približne polovičný výstupný výkon oproti referenčnej LED štruktúre (MO1064). Môžeme konštatovať, že takýto výstupný výkon je postačujúci pre realizáciu spintronických meraní a teda sa nám podarilo pripraviť vhodné vzorky spin-LED určené pre charakterizáciu spintronických vlastností.

#### 2.2 Detekcia elektrickej spinovej injekcie

Na základe rozboru publikovaných prác o problematike detekcie spinovej injekcie využitím spin-LED a vplyvu konfigurácie meracieho pracoviska na získané výsledky [6, 11-13] a na základe reálneho zhodnotenia možností, ktoré sú dostupné na pracovisku, sme navrhli dva varianty zostavenia meracieho pracoviska. Väčšinou sa pri experimentoch uskutočnených na spin-LED využíva pôsobenie externého magnetického poľa paralelné so smerom prúdového napájania elektroluminiscenčnej diódy a rovnako paralelné s emitovaným žiarením vychádzajúcim z povrchu spin-LED čipu [5,7,8,9,10]. V literatúre sa však stretávame aj s prístupom, že žiarenie emitované z hrany spin-LED čipu je použité na preukázanie spinovej polarizácie, aj napriek tomu, že pre feromagnetické materiály je magnetický moment mangánového systému kolmý na os rastu štruktúry [6]. Pri tomto usporiadaní je externé magnetické pole paralelné s vlnovým vektorom emitovaného žiarenia, ale zároveň kolmé na os rastu štruktúry.



*Obr.2.12* Schematické znázornenie návrhu nášho meracieho pracoviska a experimentálne umiestnenie spin-LED vzhľadom na pôsobenie externého magnetického poľa.

Základným rozdielom je umiestnenie vzorky spin-LED vzhľadom na orientáciu pôsobenia externého magnetického poľa. Nami navrhnutý variant A, navrhuje umiestniť vzorku v magnetickom poli tak, že povrchovo emitované žiarenie je v smere osi rastu štruktúry, zatiaľ čo magnetické pole pôsobí na vzorku kolmo na os rastu. Variant B, je zhodný s variantom A, jediným rozdielom je umiestnenie vzorky tak, aby externé magnetické pole bolo paralelné s osou rastu štruktúry, viď. obr. 2.12.

# 2.2.1 Meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED

Meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného pripravenými referenčnými LED (MO1064) a spin-LED (MO1094 a MO1095) vzorkami sme realizovali na popísanej zhotovenej meracej sústave v závislosti na smere a intenzite externého magnetického poľa. Hlavným sledovaným, tj. meraným parametrom bola intenzita (detekovaného) žiarenia, ktoré bolo emitované pozorovanými vzorkami a prechádzalo meracou sústavou. Rozsah externého magnetického poľa, v ktorom sme meranie uskutočňovali bol od 0T do +0,75T a od 0T do -0,75T, s krokom 0,25T. Napájacie prúdy skúmaných LED sa menili v rozsahu 0mA – 5mA s krokom 1mA. Meranie spočívalo v postupnom nastavení kroku externého magnetického poľa a nastavení jednotlivého kroku napájacieho prúdu. Pri každej kombinácií zvolenej hodnoty externého magnetického poľa (pre B>0T) a napájacieho prúdu boli zaznamenané dve lokálne maximá meraného optického výkonu, ktoré sme získali mechanickou rotáciou štvrťvlnovej doštičky v rozsahu 0° - 360°. Získané hodnoty maxím optického výkonu (Pmax+, Pmax-) pre každú kombináciu kroku externého magnetického poľa a napájacieho prúdu sme zaznamenali. Rovnako sme zaznamenali aj hodnoty výstupného optického výkonu pozorovaných vzoriek LED štruktúr bez prítomnosti externého magnetického poľa (P<sub>0</sub>), kedy k vplyvu mechanickej rotácie štvrťvlnovej doštičky na hodnoty výstupného optického výkonu pozorovaných vzoriek LED štruktúr nedochádzalo. Z uvedeného vyplýva, že pre každú charakterizovanú vzorku sme získali v každom z piatich krokov napájacieho prúdu jednu hodnotu P<sub>0</sub> a po šesť hodnôt P<sub>max+</sub> a P<sub>max</sub>. a celkový čas charakterizácie jednej vzorky bol t<sub>max</sub>=275s.

Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim presnosť merania je dokázanie časovej stability vyžiareného výkonu vzoriek minimálne pre čas realizácie merania vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami a rozsah zvolených napájacích prúdov. Uskutočnili sme meranie časovej stability vyžiareného optického výkonu

vzoriek, ktoré sme následne podrobili meraniam vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami. Časovú stabilitu sme sledovali v Ulbrichtovej integrálnej guli, v čase od 0 s do 300 s s krokom zaznamenania 60s. Časovú stabilitu vzoriek sme merali pri napájacích prúdoch 3mA, 5mA a 10mA s použitím stabilizovaného digitálneho prúdového zdroja. Z výsledkov meraní závislosti vyžiareného optického výkonu na čase môžeme konštatovať, že všetky vzorky MO1064, MO1094 aj MO1095 podrobené meraniu sú v čase t<300s stabilné a nevykazujú žiadne známky poklesu optického výkonu v čase pri všetkých zvolených napájacích prúdoch, viď obr. 2.14. Na základe uvedených zistení sme aj meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami realizovali pri napájacích prúdoch do 5mA, čo nám zaručovalo, že do nameraných hodnôt výstupného optického výkonu nevstupovala chyba časovej nestability vyžiareného výkonu, pri trvaní merania v čase t < 300 s, napríklad z dôvodu zníženia optického výkonu vzorky vplyvom degradácie (ohrevu) štruktúry spôsobenej prechodom prúdovej hustoty cez štruktúru. Ďalším dôležitým parametrom pri meraní vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami, je pomer zachyteného a celkového vyžiareného optického výkonu vzorkami. Na zistenie uvedeného parametra sme uskutočnili meranie výstupného optického žiarenia vzoriek, tj. optického výkonu v Ulbrichtovej integrálnej guli pri napájacom napätí od 1mA do 5mA, s krokom 1mA a porovnali ho s meraniami v zostavenej aparatúre určenej pre meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami pri hodnote externého magnetického poľa B=0T (namerané hodnoty optického výkonu označené ako P<sub>0</sub>). Na základe uskutočnených meraní môžeme konštatovať, že pomer zachyteného a celkového vyžiareného optického výkonu vzorkami na zostavenom pracovisku meraní vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami je na úrovni priemerne 28% z celkového vyžiareného optického výkonu vzoriek nameraného v Ulbrichtovej integrálnej guli, obr. 2.14.



*Obr.2.13* Priebeh optického výkonu v závislosti na čase pri napájacích prúdoch 3mA, 5mA a 10mA u vzoriek MO1094 (vľavo) a MO1095 (vpravo).



*Obr.2.14* Porovnanie priebehu optického výkonu v závislosti na napájacom prúde meranom v Ulbrichtovej integrálnej guli a na zostavenom pracovisku na meranie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami, MO1094 (vľavo) a MO1095 (vpravo).

## 2.2.2 Vyhodnotenie vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED

Výsledkom merania vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného LED vzorkami bol súbor 75 nameraných hodnôt optického výkonu (35 hodnôt  $P_{max+}$ , 35 hodnôt  $P_{max-}$ , 5 hodnôt  $P_0$ ) pre každú z desiatich charakterizovaných vzoriek (MO1064/1, MO1064/2 – vzorky LED bez implementovanej InMnAs vrstvy, MO1094/2, MO1094/3, MO1094/4, MO1094/5 – vzorky s InMnAs vrstvou zabudovanou v štruktúre LED s molárny zlomkom MnAs na úrovni x~0,075, MO1095/1, MO1095/4, MO1095/5, MO1095/6 – vzorky s InMnAs vrstvou zabudovanou v štruktúre LED s molárny zlomkom MnAs na úrovni x~0,100). Meranie bolo uskutočnené pre oba varianty umiestnenia vzorky v externom magnetickom poli.

Výpočet percentuálnej hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia skúmaných LED vzoriek, ako kvalitatívneho ukazovateľa elektrickej spinovej injekcie a prítomnosti spinovo polarizovaného prúdu v polovodičoch sme realizovali použitím vzťahu:

$$\mathbf{P} = (|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2| / (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)) * 100\%$$
(5)

kde  $P_1 = P_{max^+} - P_{0}$ ,  $P_2 = P_{max^-} - P_{0}$ .

Na základe vyhodnotenia vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED vzorkami môžeme konštatovať, že sme zaznamenali vplyv prítomnosti a intenzity externého magnetického poľa na hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia. Rozdielny vplyv opačnej polarity pôsobenia externého magnetického poľa na hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia sme nezaznamenali. Môžeme konštatovať, že nárastom intenzity externého magnetického poľa, dochádza výraznému (približne exponenciálnemu) nárastu hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia u oboch skúmaných štruktúr spin-LED

(MO1094 aj MO1095), obr. 2.16. Percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia u vzoriek MO1094 a MO1095 sú takmer zhodné, rovnako aj jednotlivé vzorky v rámci rovnakého druhu oboch pozorovaných štruktúr nevykazujú odlišnosti v závislostiach hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia a intenzity externého magnetického poľa. Uvedené platí pre obe polarity externého magnetického poľa. Vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na žiarenie emitované vzorkami bez prítomnosti vrstvy s InMnAs (MO1064/1, MO1064/2) sme nezaznamenali, obr. 2.15. Uvedený fakt je dôkazom, že vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na emitované žiarenie vzoriek LED sa prejavuje len u vzoriek s implementovanou InMnAs vrstvou, obr. 2.17, čo potvrdzuje tvrdenie, že nami pripravené vzorky MO1094 a MO1095 s implementovanou vrstvou InMnAs vykazujú existenciu elektrickej spinovej injekcie a prítomnosť spinovo polarizovaného prúdu v polovodičovej štruktúre.



*Obr.2.15* Vzorka MO1064/1 (bez prítomnosti InMnAs v štruktúre) nevykazuje kruhovú polarizáciu emitovaného žiarenia (vľavo). Hodnota napájacieho prúdu rovnako nemá vplyv na prítomnosť kruhovej polarizácie žiarenia vzoriek bez prítomnosti InMnAs v štruktúre (vpravo).



*Obr.2.16* Priebeh kruhovej polarizácie žiarenia vzoriek MO1094 (vľavo) a MO1095 (vpravo) v závislosti od intenzity externého magnetického poľa v rozsahu 0T - 0,75T pri napájacom prúde 5 mA. Viditeľný je dramatický nárast percentuálnej hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia pri vyšších hodnotách externého magnetického poľa nad 0,5T.



*Obr.2.17* Porovnanie priebehov kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia vzoriek MO1094, MO1095 a vzorky MO1064 bez implementovanej vrstvy InMnAs v závislosti od intenzity externého magnetického poľa v rozsahu 0T – 0,75T pri napájacom prúde 5 mA. Viditeľný je približne rovnaký priebeh hodnôt kruhovej polarizácie žiarenia u vzoriek spin-LED (MO1094, MO1095) zatiaľ čo emitované žiarenie vzorky MO1064 nevykazuje prítomnosť kruhovej polarizácie žiarenia ani v závislosti od prítomnosti či intenzity externého magnetického poľa. Uvedené je dôkazom, že vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na emitované žiarenie vzoriek LED sa prejavuje len u vzoriek s implementovanou InMnAs vrstvou.

Intenzita externého magnetického poľa zásadne ovplyvňuje percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia vzoriek spin-LED (MO1094, MO1095). Kruhová polarizácia je pri nižších hodnotách intenzity externého magnetického poľa, do 0,25T, takmer na nemerateľnej úrovni, menej ako 0,1%. So zvyšujúcou sa intenzitou externého magnetického poľa zásadne narastá úroveň hodnôt kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia, až do maximálnej nameranej hodnoty 8,5% pri B=0,75T a I=5mA (MO1095/1), obr. 2.16. Vplyv napájacieho prúdu štruktúry LED na hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia sme sledovali v rozsahu napájacích prúdov od 1 mA do 5 mA, s krokom 1 mA. Môžeme konštatovať, že s narastajúcim napájacím prúdom sa efekt kruhovej polarizácie žiarenia polovodičovej LED štruktúry zdôrazňuje. Zaznamenali sme mierny nárast hodnôt stupňa kruhovej polarizácie žiarenia na úrovni od 0,1% do 0,8% bez závislosti na hodnote intenzity externého magnetického poľa, viď. obr. 2.18. Percentuálne hodnoty stupňa kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia u vzoriek spin-LED sú takmer zhodné, pozorujeme len kruhovej mierne vyššie hodnoty polarizácie emitovaného žiarenia vzoriek u

s implementovanou vrstvou InMnAs s vyšším molárnym zlomkom MnAs (MO1095) ako v prípade vzoriek MO1094. Rozdiel je na úrovni do 0,8% pri maximálnej intenzite externého magnetického poľa B=0,75T, obr. 2.19 vľavo. Pri nižších hodnotách intenzity magnetického poľa sa tento pozorovaný rozdiel minimalizuje, viď. obr. 2.19 vpravo.



*Obr.2.18* Vľavo závislosť kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia vzorky MO1094/2 od hodnoty napájacieho prúdu štruktúry pre jednotlivé úrovne intenzity externého magnetického poľa. Môžeme sledovať, že s narastajúcim napájacím prúdom sa efekt kruhovej polarizácie žiarenia polovodičovej LED štruktúry zdôrazňuje. Vpravo je znázornená závislosť kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia vzorky MO1095/1 od intenzity externého magnetického poľa pre jednotlivé úrovne napájacích prúdov.



*Obr. 2.19* Vľavo porovnanie závislosti kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia vzoriek MO1094/2, MO1095/1 a MO1064/1 od hodnoty napájacieho prúdu štruktúry na úrovni intenzity externého magnetického poľa B=0,25T. Vpravo je znázornená závislosť kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia tých istých vzoriek od hodnoty napájacieho prúdu štruktúry na úrovni intenzity externého magnetického poľa B=0,75T. Sledujeme nárast rozdielu hodnôt kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia medzi vzorkami MO1095/1 a MO1094/2 s narastajúcou intenzitou externého magnetického poľa.

Všetky doposiaľ uvedené výsledky vyhodnotenia vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED boli realizované pri uložení vzorky podľa návrhu variantu B, t.j. umiestnenie vzorky spin-LED je vzhľadom na orientáciu pôsobenia externého magnetického poľa také, aby externé magnetické pole bolo paralelné s osou rastu štruktúry. Druhý nami navrhnutý variant uloženia vzorky v externom magnetickom poli, variant A, navrhuje umiestniť vzorku v magnetickom poli tak, že povrchovo emitované žiarenie je v smere osi rastu štruktúry, zatiaľ čo magnetické pole pôsobí na vzorku kolmo na os rastu, viď. obr. 6.1. Ukázalo sa však, že pri takomto uložení vzorky v externom magnetickom poli sme nezaznamenali efekt vzniku kruhovo polarizovaného žiarenia pozorovaných vzoriek.

#### 2.2.3 Zhrnutie

Môžeme konštatovať, že sa nám podarilo vytvoriť funkčné pracovisko na meranie spintronických vlastností pripravených LED štruktúr, s možnosťou variantného umiestnenia vzorky vzhľadom na pôsobenie externého magnetického poľa na charakterizovanú štruktúru. Sledovaným parametrom bola intenzita detekovaného žiarenia, ktoré bolo emitované pozorovanými vzorkami a prechádzalo meracou sústavou. Rozsah externého magnetického poľa v ktorom sme meranie uskutočňovali bol od 0T do +0,75T a od 0T do -0,75T, s krokom 0,25T. Napájacie prúdy štruktúr pozorovaných LED boli v rozsahu 1mA - 5mA s krokom 1mA. Pre každú charakterizovanú vzorku sme získali v každom z piatich krokov napájacieho prúdu jednu hodnotu P<sub>0</sub> a po šesť hodnôt P<sub>max+</sub> a P<sub>max-</sub> a celkový čas charakterizácie jednej vzorky bol t<sub>max</sub>=275s. Z výsledkov meraní závislosti vyžiareného optického výkonu na čase môžeme konštatovať, že všetky vzorky podrobené meraniu sú v čase t<300s stabilné a nevykazujú žiadne známky poklesu optického výkonu v čase pri všetkých zvolených napájacích prúdoch. Dôležitým parametrom, ktorý je pri meraní vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami je pomer zachyteného a celkového vyžiareného optického výkonu vzorkami. Na základe uskutočnených meraní môžeme konštatovať, že pomer zachyteného a celkového vyžiareného optického výkonu vzorkami na zostavenom pracovisku meraní vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného vzorkami je na úrovni priemerne 28% z celkového vyžiareného optického výkonu vzoriek nameraného v Ulbrichtovej integrálnej guli. Na základe vyhodnotenia vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED vzorkami môžeme konštatovať, že sme zaznamenali vplyv prítomnosti a intenzity externého magnetického poľa na hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia. Rozdielny vplyv opačnej polarity pôsobenia externého magnetického poľa na hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia sme nezaznamenali. Môžeme konštatovať, že nárastom intenzity externého magnetického poľa, dochádza výraznému nárastu hodnoty kruhovej

25

polarizácie žiarenia u oboch skúmaných štruktúr spin-LED. Percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia u vzoriek MO1094 a MO1095 sú takmer zhodné, rovnako aj jednotlivé vzorky v rámci rovnakého druhu oboch pozorovaných štruktúr nevykazujú odlišnosti v závislostiach hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia a intenzity externého magnetického poľa. Uvedené platí pre obe polarity externého magnetického poľa. Vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na žiarenie emitované vzorkami bez prítomnosti vrstvy s InMnAs sme, nezaznamenali. Uvedený fakt je dôkazom, že vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na emitované žiarenie vzoriek LED sa prejavuje len u vzoriek s implementovanou InMnAs vrstvou, čo potvrdzuje tvrdenie, že nami pripravené vzorky s implementovanou vrstvou InMnAs vykazujú existenciu elektrickej spinovej injekcie a prítomnosť spinovo polarizovaného prúdu v polovodičovej štruktúre. Intenzita externého magnetického poľa zásadne ovplyvňuje percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia vzoriek spin-LED. Kruhová polarizácia je pri nižších hodnotách intenzity externého magnetického poľa, do 0,25T, takmer na nemerateľnej úrovni, menej ako 0,1%. So zvyšujúcou sa intenzitou externého magnetického poľa zásadne narastá úroveň hodnôt kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia, až do maximálnej nameranej hodnoty 8,5% pri B=0,75T a I=5mA (MO1095/1). Vplyv napájacieho prúdu štruktúry LED na hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia sme sledovali v rozsahu napájacích prúdov od 1 mA do 5 mA, s krokom 1 mA. Môžeme konštatovať, že s narastajúcim napájacím prúdom sa efekt kruhovej polarizácie žiarenia polovodičovej LED štruktúry zdôrazňuje. Zaznamenali sme mierny nárast hodnôt kruhovej polarizácie žiarenia na úrovni od 0,1% do 0,8% bez závislosti na hodnote intenzity externého magnetického poľa. Percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia u vzoriek spin-LED sú takmer zhodné, pozorujeme len mierne vyššie hodnoty kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia u vzoriek s implementovanou vrstvou InMnAs s vyšším molárnym zlomkom MnAs. Rozdiel je na úrovni do 0,8% pri maximálnej intenzite externého magnetického poľa B=0,75T. Pri nižších hodnotách intenzity magnetického poľa sa tento pozorovaný rozdiel minimalizuje.

# HLAVNÉ PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

1. Preskúmali a zhodnotili sme elektrické a magnetické vlastnosti InMnAs epitaxných vrstiev a ukázali rozsah zloženia pri ktorom je materiál jednofázový (sfaleritová kryštalická štuktúra) a Currieho teplota vyššia ako izbová.

2. Navrhli a pripravili sme štruktúru spin-LED so zabudovanou InMnAs vrstvou. Pri návrhu sme zohľadnili najmä maximálnu možnú hrúbku vrstvy InMnAs (takú, ktorá je už dostatočne hrubá na dosiahnutie koherencie spinu a súčasne akceptovateľná z hľadiska tvorby dislokácií) a súčasne jej zloženie (najvyšší možný obsah Mn, ktorý je potrebný z hľadiska dosiahnutia koherencie spinu a súčasne ešte umožňuje rast jednofázovej epitaxnej vrstvy s akceptovateľným misfitom).

3. Experimentálne sme overili, že parametre pripravených spin-LED sú stabilné v dostatočne dlhom časovom intervale (niekoľko minút) a umožňujú vykonanie polarizačných meraní.

4. Navrhli a vybudovali sme experimentálne pracovisko na polarizačné merania žiarenia emitovaného spintronickými elektroluminiscenčnými diódami. Navrhli sme a overili metodiku určovania stupňa polarizácie v závislosti od magnetického poľa.

5. Pomocou uskutočnených polarizačných meraní sme preukázali, že pripravené vzorky spin-LED vykazujú hodnoty stupňa polarizácie emitovaného žierenia na úrovni do 8,5% pri izbovej teplote a magnetickom boli B=0,75 T.

## ZÁVER

Zriedený magnetický polovodič InMnAs je vhodným materiálom použiteľným pre spintronické aplikácie. V rámci tejto práce sme skúmali vplyv vloženia tenkej InMnAs epitaxnej vrstvy na vlastnosti LED. Štruktúry sme charakterizovali pomocou TEM, AFM, PL pri izbovej teplote, galvanomagnetických meraní (metóda Van der Pauwa) a meraní výstupného optického výkonu (Ulbrichtova integračná guľa). Pre implementáciu InMnAs vrstvy sme, kvôli vhodným vlastnostiam, zvolili štruktúru GaAs/AlGaAs MQW LED. Všetky LED štruktúry vykazovali maximum elektroluminiscencie pri energií 1,467eV. Prezentované výsledky preukazujú, že InMnAs vrstva sa úspešne zabudovala do LED štruktúry. Všetky

Rozpustnosť mangánu v III-V polovodičoch je pomerne nízka. Materiály obsahujúce viac mangánu ako je limit rozpustnosti vykazujú silnú tendenciu formovať obidve kryštalické fázy (sfaleritovú aj hexagonálnu). V súvislosti so spomenutými problémami sme sa rozhodli implementovať do štruktúry InMnAs vrstvu s molárnym zlomkom MnAs x~0,075, ktorá je tvorená len jednofázovým materiálom.

Všetky InMnAs vrstvy vykazovali p–typ vodivosti. Referenčná InAs vzorka MO 909 vykazovala vodivosť n-typu (n~2,80.10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>) a merný odpor  $\rho$ =2,52.10<sup>-2</sup>  $\Omega$ .cm.

Vzorky s vyšším obsahom mangánu (nad x~0,051) vykazovali feromagnetické vlastnosti už pri izbovej teplote. Pomerne vysoká Curieho teplota (Tc~340K) predurčuje InMnAs ako perspektívny materiál spĺňajúci požiadavky na spinovú injekciu pri izbovej teplote.

AFM charakterizácia preukázala silný vplyv zvyšujúceho sa obsahu Mn na povrchovú drsnosť epitaxných vrstiev InMnAs a tiež fakt, že povrchová drsnosť InMnAs vrstvy sa čiastočne transformuje aj do drsnosti spin-LED štruktúry. Preukázal sa tiež fakt, že pôvodne implementovaná 300nm hrubá InMnAs vrstva negatívne ovplyvňuje vlastnosti spin-LED štruktúry nielen kvôli jej hrúbke, ale aj kvôli jej umiestneniu v blízkosti aktívnej oblasti diódovej štruktúry. Preto sme pripravili nové spin-LED štruktúry (MO1094 a MO1095) s InMnAs vrstvou vysunutou ďalej od oblasti PN prechodu a znížili sme hrúbku vrstvy na 100 nm, čím sme eliminovali výskyt mriežkových porúch v aktívnej oblasti. Uskutočnené zmeny mali pozitívny vplyv na elektrické, morfologické aj optické a výkonové vlastnosti štruktúr.

Voltampérové charakteristiky upravených štruktúr sme porovnali s priebehmi VA charakteristík pôvodných štruktúr MO1064 a MO1065. Štruktúra s nižším obsahom mangánu (MO1094) vykazovala sériový odpor na úrovni jednotiek Ω, vzorka MO1095

s implementovaným feromagnetickým materiálom InMnAs s molárnym zlomkom MnAs  $x\sim0,10$  vykazovala sériový odpor desiatok  $\Omega$ , čo je však o rád menej ako u vzorky MO1065.

V závernej oblasti VA charakteristika štruktúry MO1094 vykazovala hodnoty záverného prúdu okolo 3.10<sup>-6</sup>A a štruktúra MO1095 podstatne viac, až 0,01A.

Výstupný výkon LED štruktúry MO1064 bol na úrovni 1,5.10<sup>-4</sup>W pri I<sub>F</sub>=50 mA. Pôvodne pripravená štruktúra s InMnAs vrstvou (MO1065) nevykazovala merateľné hodnoty výstupného výkonu. Upravené diódové štruktúry s implementovanou InMnAs vrstvou mali výstupný výkon na úrovni  $6.10^{-5}$ W pri prúde v priepustnom smere, I<sub>F</sub>=50 mA, čo predstavuje približne polovičný výstupný výkon oproti referenčnej LED štruktúre (MO1064). Takýto výstupný výkon je postačujúci pre realizáciu spintronických meraní.

Ďalej sa nám podarilo vytvoriť funkčné pracovisko na meranie spintronických vlastností pripravených LED štruktúr, s možnosťou variantného umiestnenia vzorky vzhľadom na pôsobenie externého magnetického poľa na charakterizovanú štruktúru. Sledovaným parametrom bola intenzita detekovaného žiarenia, ktoré bolo emitované pozorovanými vzorkami a prechádzalo meracou sústavou. Rozsah externého magnetického poľa v ktorom sme meranie uskutočňovali bol od 0T do +0,75T a od 0T do -0,75T, s krokom 0,25T. Napájacie prúdy štruktúr pozorovaných LED boli v rozsahu 0mA – 5mA s krokom 1mA.

Z výsledkov meraní závislosti vyžiareného optického výkonu na čase môžeme konštatovať, že všetky vzorky MO1064, MO1094 aj MO1095 podrobené meraniu sú v čase t<300s stabilné a nevykazujú žiadne známky poklesu optického výkonu v čase pri všetkých zvolených napájacích prúdoch.

Na základe vyhodnotenia vplyvu externého magnetického poľa na polarizáciu žiarenia emitovaného spin-LED vzorkami môžeme konštatovať, že sme zaznamenali vplyv prítomnosti a intenzity externého magnetického poľa na hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia. Môžeme konštatovať, že nárastom intenzity externého magnetického poľa, dochádza výraznému nárastu hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia u oboch skúmaných štruktúr spin-LED (MO1094 aj MO1095). Vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na žiarenie emitované vzorkami bez prítomnosti vrstvy s InMnAs (MO1064/1, MO1064/2) sme, nezaznamenali. Uvedený fakt je dôkazom, že vplyv prítomnosti externého magnetického poľa na emitované žiarenie vzoriek LED sa prejavuje len u vzoriek s implementovanou InMnAs vrstvou, čo potvrdzuje tvrdenie, že nami pripravené vzorky MO1094 a MO1095 s implementovanou vrstvou InMnAs vykazujú existenciu elektrickej spinovej injekcie a prítomnosť spinovo polarizovaného prúdu v polovodičovej štruktúre. Intenzita externého

29

magnetického poľa zásadne ovplyvňuje percentuálne hodnoty kruhovej polarizácie žiarenia vzoriek spin-LED (MO1094, MO1095). Kruhová polarizácia je pri nižších hodnotách intenzity externého magnetického poľa, do 0,25T, takmer na nemerateľnej úrovni, menej ako 0,1%. So zvyšujúcou sa intenzitou externého magnetického poľa zásadne narastá úroveň hodnôt kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia, až do maximálnej nameranej hodnoty 8,5% pri B=0,75T a I=5mA (MO1095/1).

Ďalej môžeme konštatovať, že s narastajúcim napájacím prúdom sa efekt kruhovej polarizácie žiarenia polovodičovej LED štruktúry zdôrazňuje. Zaznamenali sme mierny nárast hodnôt kruhovej polarizácie žiarenia na úrovni od 0,1% do 0,8% bez závislosti na hodnote intenzity externého magnetického poľa.

Publikované výsledky polarizačných meraní elektroluminiscenčných diód ako detektorov elektrickej spinovej injekcie preukazujú stupeň kruhovej polarizácie žiarenia obvykle na úrovni 2 - 5 %, v ojedinelých prípadoch až do 36%. Uvádzané hodnoty magnetického poľa pri meraniach sú v maximálnom rozsahu od -10 T do +10 T, obvykle od -3 T do +3 T. Väčsina publikovaných prác uvádza hodnoty Curieho teploty pripravených feromagnetických materiálov na úrovni 40 – 80 K. Rozsah externého magnetického poľa, v ktorom sme meranie uskutočňovali my, bol od -0,75 T do +0,75 T. Kruhová polarizácia bola pri nižších hodnotách intenzity externého magnetického poľa, do 0,25 T, takmer na nemerateľnej úrovni, menej ako 0,1%, v čom sa zhodujeme s publikovaným. So zvyšujúcou sa intenzitou externého magnetického poľa zásadne narastala úroveň hodnôt kruhovej polarizácie emitovaného žiarenia. Dôležitým faktom je, že Curieho teplota nášho InMnAs ternárneho feromagnetického materiálu je 340 K a teda aj všetky merania prebiehali pri izbovej teplote, T=293 K. Môžeme konštatovať, že ternárny InMnAs materiál bol vhodným výberom pre realizáciu spin-LED štruktúr a na rozdiel od väčšiny publikovaných prác je funkčným aj pri izbovej teplote, čo ho predurčuje byť perspektívnym materiálom pre širokú škálu spintronických aplikácií.

#### RESUME

Diluted magnetic semiconductor InMnAs is a good material useful for spintronic applications. In this work, we investigated the effect of insertion InMnAs thin epitaxial layer on the characteristics of LED. The structures are characterized by TEM, AFM, PL at room temperature, galvano-magnetic measurements (Van der Pauw method) and measured output optical power (Ulbricht integrating sphere). For the implementation of InMnAs layer was chosen structure GaAs / AlGaAs MQW LED. All LED structures exhibit electroluminescence peak energy at 1.467 eV. The results presented show that InMnAs layer was successfully integrated a LED structure.

All InMnAs layers showed p-type conductivity. The reference InAs sample showed n-type conductivity (n ~ 2,80.1018 cm-3) and resistivity  $\rho = 2,52.10-2 \Omega.cm$ .

Samples with high manganese content (over  $x \sim 0.051$ ) exhibit ferromagnetic properties even at room temperature. The relatively high Curie temperature (Tc  $\sim 340$ K) predisposes InMnAs as a prospective material accomplish the requirements for spin injection at room temperature.

We measured and evaluated the volt-ampere characteristics of the structures. Structure with lower manganese content showed a series resistivity at the units  $\Omega$ , the sample with embedded ferromagnetic material InMnAs with molar fraction x ~ 0.10 MnAs showed tens of  $\Omega$  series resistance, which is an order of magnitude less than the original structure. The containment area VA characteristic optimized structure showed values Closing stream around 3.10-6A.

Based on evaluation of the impact of an external magnetic field on the degree of polarization of the radiation emitted by the spin-LED samples, we can conclude that we have seen the impact of the presence and intensity of the external magnetic field to the value of degree of the circular polarization of radiation. We conclude that the increase in the intensity of the external magnetic field, there is a significant increase in the value of degree of the circular polarization of radiation in both studied spin-LED structures. The effect of an external magnetic field on the radiation emitted by samples without the presence of a layer with InMnAs we did not. This fact shows that the impact of the presence of an external magnetic field on the radiation emitted sample LED is manifested only in samples with implemented InMnAs layer, which corroborates that our samples prepared with a layer implemented InMnAs reveal the existence of electrical spin injection and the presence of spin-polarized current in a semiconductor structure. The intensity of the external magnetic field strongly influences the percentages of degree of circular polarization of radiation of the samples spin-LED. Degree of circular polarization, at low values of the intensity of an external magnetic field to 0.25 T, almost immeasurable level less than 0.1%. With increasing intensity of the external magnetic field significantly increases the values of degree of circular polarization the emitted radiation, up to a maximum measured value of 8.5% at B = 0.75 T and I = 5 mA.

# POUŽITÁ LITERATÚRA

- Monzon, F. G., Roukes, M. L.: Spin injection and the local Hall effect in InAs quantum wells. in: Journal of Magn. Magn. Mater., 1999, vol.198, p.632
- Hammar, P. R., Bennet, B. R., Yang, M. J., Johnson, M.: Observation of Spin Injection at a Ferromagnet-Semiconductor Interface. in: Phys. Rev. Lett., 1999, vol.83, p.203
- [3] Schmidt, G., Ferrand, D., Molenkamp, L. W., Filip, A. T., Wees, B. J.: Fundamental obstacle for electrical spin injection from a ferromagnetic metal into a diffusive semiconductor. in: Phys. Rev. B, 2000, vol.62, R4790
- [4] Arnov, A. G., Pikus, G. E.: Spin injection into semiconductors. in: Sov. Phys. Semicond., 1976, vol.10, p.698
- [5] Fiederling, R., Keim, M., Reuscher, G., Ossau, W., Schmidt, G., Waag, A.,
   Molenkamp, L. W.: Injection and detection of a spin-polarized current in a lightemitting diode. in: Nature, 1999, vol.402, p.787
- [6] Ohno, Y., Young, D. K., Beschoten, B., Matsukura, F., Ohno, H., Awschalom, D. D.: Electrical spin injection in a ferromagnetic semiconductor heterostructure. in: Nature, 1999, vol.402, p.790
- Zhu, H. J., Ramsteiner, M., Kostial, H., Wassermeier, M., Schonher, H. P., Ploog, K.
   H.: Electron spin filtering in ferromagnet/semiconductor heterostructures. in: Phys.
   Rev. Lett., 2001, vol.87, 016601
- [8] Hanbicki, A. T., Jonker, B. T., Itskos, G., Kioseoglou, G., Petrou, A.: Electrical spin injection into the InAs/GaAs wetting layer. in: Appl. Phys. Lett., 2002, vol.80, p.1240
- Jonker, B. T., Park, Y. D., Bennet, B. R., Cheong, H. D., Kioseoglou, G., Petrou, A.: Robust electrical spin injection into a semiconductor heterostructure . in: Phys. Rev. B, 2000, vol.62, 8180
- [10] Gruber, T., Keim, M., Fiederling, R., Reuscher, G., Ossau, W., Schmidt, G., Waag, A., Molenkamp, L. W.: Spin-dependent delay time and the Hartman effect in tunneling through diluted-magnetic-semiconductor/semiconductor heterostructures. in: Appl. Phys. Lett., 2001, vol.78, p.1101
- [11] Meier F., Zakharchenya, B. P.: Optical Orientation, Elsevier Science, Amsterdam, 1984. 178 p.

- [12] Weisbuch, C., Vinter, B.: Quantum Semiconductor Structures Fundamentals and Applications, Academic, Boston, 1991. 376 p.
- [13] Young, D. K., Johnston-Halperin, E., Awschalom, D. D., Ohno, Y., Ohno, H.: Anisotropic Electrical Spin Injection in Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures. in: Appl. Phys. Lett., 2002, vol.80, p.1598
- [14] Blattner, A.J., Wessels, B.W.: Ferromagnetism in InMnAs diluted magnetic semiconductor thin films grown by metalorganic vapor phase epitaxy. in: J. Vac. Sci. Technol., 2002, p.1582
- [15] Cheung, S.K., Cheung N.W.: The influence of ohmic back contacts on the properties of a-Si:H Schottky diodes. in: Appl. Phys. Lett., 1986, p.49
- [16] Ludwig, A., Roescu, R., Rai, A.K., Trunov, K., Stromberg, F., Li, M., Soldat, H., Ebbing, A., Grehrdt, N.C., Hofmann, M.R., Wende, H., Keune, W., Reuter, D., Wieck, A.D.: Electrical spin injection in InAs quantum dots at room temperature and adjustment of the emission wavelenght for spintronic applications. in: Journal of Crystal Growth, 2011, vol.323, p.376-379
- [17] Oestreich, M., Hübner, J., Hägele, D., Klar, P.J., Heimbrodt, W., Rühle, W.W.: Spin injection into semiconductors. in: Appl. Phys. Lett., 1999, vol.74, p.9
- [18] Ramsteiner, M.: Spin injection from epitaxial ferromagnetic films into GaAs. in: Microelectronic Engineering, 2002, vol.63, p.3-9
- [19] Ramsteiner, M., Zhu, H.J., Schönherr, H.P., Ploog, K.H.: Electrical spin injection from Fe into GaAs at room temperature. in: Physica E, 2002, vol.13, p.529-532
- [20] Zaitsev, S.V., Kulakovskii, V.D., Dorokhin, M.V., Danilov, Yu.A., Demina, P.B., Sapozhnikov, M.V., Vikhrova, O.V., Zvonkov, B.N.: Circulary polarized electroluminiscence in LED heterostructures with InGaAs/GaAs quantum well and Mn- δ layer. in: Physica E, 2009, vol.41, p.652-654
- [21] Liu, B.L., Sénés, M., Couderc, S., Bobo, J.F., Marie, X., Amand, T., Fontaine, C., Arnoult, A.: Optical and electrical spin injection in spin-LED. in: Physica E, 2003, vol.17, p.358-360

## PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

- Jakabovič, J., Weis, M., Kováč, J., Donoval, D., Donoval, M., Daříček, M., Telek, P., Cirák, J., Peng, Y., Xie, J., Lv, W., Yang, T., Yao, B., Wang, Y.: Photogenerated charge carriers in double-layer organic field-effect transistor. In: Synthetic Metals, Vol. 175, 2013, p. 47 – 51, ISSN 0379-6779
- [2] Vavrinský, E., Donoval, M., Daříček, M., Telek, P., Donoval, D.: Praktický monitoring biopotenciálov pomocou nízkošumového bezdrôtového senzora. In: Transfer, Veda – výskum – prenos technológií do praxe, roč. 4, č. 1, p.16 – 17
- [3] Kuzma, A., Weis, M., Flickyngerová, S., Jakabovič, J., Šatka, A., Dobročka, E., Chlpik, E., Cirak, J., Donoval, M., Telek, P., Uherek, F., Donoval, D.: Influence of Surface Oxidation on Plasmon Resonance in Monolayer of Gold and Silver Nanoparticles. In: Journal of Applied Physics, Vol. 112, 2012, p.103531 – 103535, ISSN 0021-8979
- [4] Vavrinský, E., Donoval, M., Daříček, M., Horínek, F., Jagelka, M., Telek, P., Donoval, D.: Biopotenciálový senzor pre bezdrôtový EMG monitoring. In: ELOSYS, Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012. Trenčín, Slovakia, 2012, p.122 125
- [5] Daříček, M., Donoval, M., Horínek, F., Vavrinský, E., Telek, P., Donoval, D.: Synchronization Methods for Wireless Bio-Sensing Network. In: Radioelektronika 2012: Proceedings of 22nd International Conference, Brno, Czech Republic, 2012, p.157 – 160, ISBN 978-80-214-4468-3
- [6] Sládek, Ľ., Telek, P., Donoval, M., Daříček, M., Horínek, F., Šatka, A., Donoval, D.: Využitie impulznej reflektometrie pre alanýzu vlatností ľudskej kože. In: ELOSYS, Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2012. Trenčín, Slovakia, 2012, p.118 – 121
- [7] Vavrinský, E., Tvarožek, V., Gašpierik, P., Stopjaková, V., Donoval, M., Telek, P.: Design of non-invasive set up for Car Driver Biomonitoring. In: 2nd International

Conference on Bio-Sensing Technology, Amsterdam, The Nederlands, 2011, Vol.6, p.203 – 210

- [8] Horínek, F., Daříček, M., Donoval, D., Telek, P., Vavrinský, E., Donoval, M., Šatka, A.: Inovatívne metódy spracovania biosignálov svalového aparátu. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku, ro4. 17, č. ELOSYS, 2011, p.9 – 11, ISSN 1335-2547
- [9] Novák, J., Telek, P., Vávra, I., Hasenöhrl, S., Reiffers., M.: MOVPE growth and properties of light emitting diodes with an incorporated InMnAs ferromagnetic layer.
   In: Journal of Crystal Growth, Vol. 315, 2011, p.78 81, ISSN 0022-0248
- [10] Vavrinský, E., Telek, P., Donoval, M., Sládek, Ľ., Daříček, M., Horínek, F., Donoval,
   D.: Sensor System for Wirwless Bio-Signal Monitoring. In: 2nd International
   Conference on Bio-Sensing Technology. Amsterdam, The Nederlands, 2011, p.155 –
   164
- [11] Vavrinský, E., Daříček, M., Donoval, M., Telek, P., Stopjaková, V., Tvarožek, V.: Alternative Methods for Heart-Rate Sensing. In: ISABEL 2011: 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Barcelona, Spain, 2011, ACM, ISBN 978-1-4503-0913-4
- [12] Daříček, M., Horínek, F., Vavrinský, E., Donoval, M., Telek, P., Donoval, D.: Smart System for Low-Power Wireless Probes Human Biosignal Sensing. In: Bio-Sensing Technology – 2nd International Conference, Amsterdam, The Nederlands, 2011, p.213
- [13] Telek, P., Hasenöhrl, S., Šoltýs, J., Vávra, I., Držík, M., Novák, J.: Design, preparation and properties of spin-LED structures based on InMnAs. In: ASDAM 2010, Smolenice Castle, Slovakia, 2010, Abstract book, p.175 – 178, ISBN 978-1-4244-8572-7
- [14] Telek, P., Hasenöhrl, S., Šoltýs, J., Vávra, I., Novák, J.: Influence of InMnAs layer on the properties of GaAs/AlGaAs MQW LED. In: 17th International Workshop on Heterostructure Technology, Venice, 2008, Abstract book, p.27

Ing. Peter Telek Autor:

Názov práce: Elektroluminiscenčné diódy so zabudovanou feromagnetickou vrstvou pre spintronické aplikácie 35 ks

Náklad:

Dizertačná práca spolu s autoreferátom je uložená na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.