

Ing. Jakub Rybár

Autoreferát dizertačnej práce

**SKÚMANIE KVALITY POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV A ŠTRUKTÚR
METÓDOU DLTS**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Mikroelektronika (študijný odbor: 5.2.13 elektronika)

Miesto a dátum: Bratislava, 11.10.2012

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Jakub Rybár

Autoreferát dizertačnej práce

**SKÚMANIE KVALITY POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV A ŠTRUKTÚR
METÓDOU DLTS**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Mikroelektronika (študijný odbor: 5.2.13 elektronika)

Miesto a dátum: Bratislava, 11.10.2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na pracovisku Ústavu elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava

Predkladateľ: **Ing. Jakub Rybár**

Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Ľubica Stuchlíková, PhD.**

Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Ing. Jozef Osvald, DrSc.**

Elektrotechnický ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

doc. Ing. Igor Jamnický CSc.

Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na Ústave elektroniky a fotoniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD

Dekan FEI STU

Obsah

1. Úvod	3
2. Prehľad súčasného stavu	4
3. Ciele dizertačnej práce	7
4. Dosiahnuté výsledky	8
5. Hlavné prínosy dizertačnej práce	11
6. Záver	12
7. Summary	14
8. Použitá literatúra	15
9. Zoznam vlastných publikácií	17

1. Úvod

Rýchly rozvoj elektroniky si vyžaduje stále inovácie v oblasti materiálov, ktoré sa v elektronike používajú. Prvým polovodičovým materiálom, ktorý umožnil rýchly rast elektronického priemyslu bol kremík. Proces neprestajného zlepšovania priniesol množstvo novínok a otvoril nové horizonty ďalšiemu výskumu. Materiály, ktoré boli z časti preskúmané už v minulosti ale neboli dostatočne zaujímavé pre aplikácie v danej dobe, sa v dnešnej dobe dostávajú do popredia vďaka svojim aktuálne veľmi zaujímavým vlastnostiam.

Medzi takéto materiály patria i zložené polovodiče (ternárne a kvaternárne polovodičové materiály) na báze GaAs. Kvaternárny polovodičový materiál InGaAsN a ternárny InGaAs rastené na GaAs substráte majú veľký potenciál presadiť sa v optoelektronickom priemysle pre oblasť vlnových dĺžok spektra žiarenia 1,3 μm – 1,5 μm [1], [2]. Nastavením vhodného pomeru koncentrácií indiu a dusíka, je možné dosiahnuť dobré mriežkové prispôsobenie s GaAs alebo nastaviť požadovanú šírku energetickej medzery, čo napomáha presadeniu týchto materiálov z pohľadu investícií pri implementácii do priemyslu. Vlastnosti týchto tzv. „zriedených“ nitridov, z ktorých je najzaujímavejší ohyb pásiem s rastúcou koncentráciou dusíka, umožňujú mnohé aplikácie pre elektronický a optoelektronický priemysel.

Pochopenie fyzikálnych procesov v polovodičových štruktúrach na báze InGaAsN/GaAs je dôležitou súčasťou výskumu týchto materiálov. Vyžaduje hlbšiu analýzu procesov vzniku defektov, generácie a rekombinácie nosičov náboja na poruchách materiálu a vôbec na energetických hladinách v materiáli. Tieto a podobné javy majú priamy vplyv na elektrické vlastnosti materiálov. Spomínané procesy sa dajú nepriamo skúmať pomocou kapacitnej spektroskopie hlbokých hladín (DLTS). Využitím numerických metód výpočtu matematických a fyzikálnych modelov v DLTS analýze je možné hlbšie

pochopiť procesy odohrávajúce sa na energetických hladinách týchto zložitých polovodičových materiálov.

Vzhľadom na široké možnosti aplikácie „zriedených“ nitridov v optoelektronike a potenciálne vylepšenia kvality rôznych zariadení ako napr. vysokoúčinných solárnych článkov využitím charakteristických vlastností III-V-N polovodičov je skúmanie týchto materiálov veľmi dôležité pre ďalší vývoj tejto vednej disciplíny.

Táto práca sa zaoberá DLTS charakterizáciou heteroštruktúr na báze „zriedených“ nitridov. Pozornosť je zameraná na analýzu vplyvu koncentrácií dusíka a india na kvalitu predložených InGaAsN štruktúr a emisno-záchytné procesy súvisiace s prítomnosťou kvantových jám v štruktúrach. Taktiež je predstavená DLTS analýza heteroštruktúr InGaAsN vyrobených pre solárne články s využitím získaných poznatkov o vplyve koncentrácií india a dusíka. Pre porovnanie výsledkov analýzy DLTS pomocou štandardných metód bola navrhnutá numerická metóda využívajúca mierne adaptovaný spôsob výpočtu matematicko-fyzikálneho modelu emisno-záchytných procesov v polovodičoch.

Práca je členená do niekoľkých kapitol, ktoré sú usporiadané nasledovne:

Úvodná kapitola obsahuje teóriu popisujúcu kvaternárny polovodičový materiál InGaAsN a jeho najdôležitejšie vlastnosti, súvisiace so skúmanou problematikou. Ďalšia kapitola popisuje materiálové defekty a emisno-záchytné procesy na nich. V nasledujúcej kapitole je popísaná metóda termálnej spektroskopie hlbokých hladín (DLTS) a problémy spojené s vyhodnocovaním DLTS meraní na zložitých štruktúrach. Piata kapitola opisuje návrh algoritmu výpočtu parametrov hlbokých energetických hladín a jeho porovnanie s inými spôsobmi DLTS vyhodnocovania. Záverečná kapitola a zároveň najrozsiahlejšia časť práce obsahuje experimentálne výsledky z DLTS meraní a analýz doplnených komentárom a diskusiou.

2. Prehľad súčasného stavu

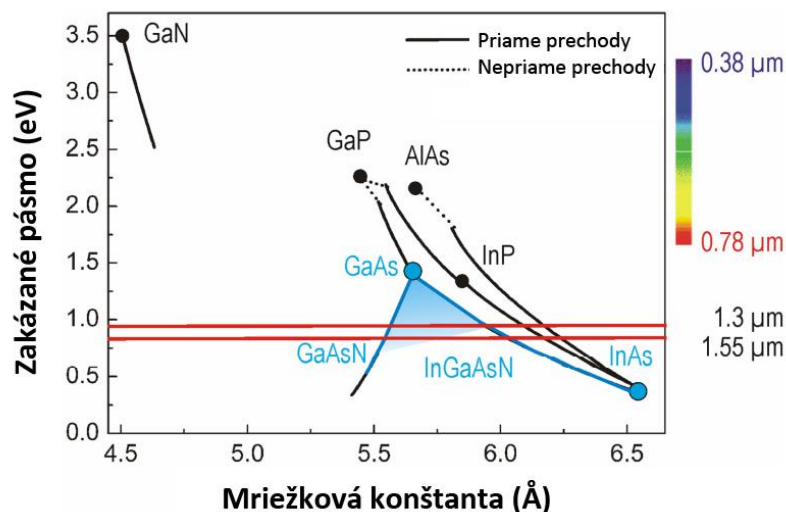
GaAs je najznámejší A3B5 zložený polovodičový materiál. Na rozdiel od kremíka (Si), GaAs a mnohé ďalšie zložené polovodiče sú priame polovodiče a práve pre túto svoju vlastnosť sú často používané v optoelektronických aplikáciách.

Zlúčením napríklad GaAs a AlAs je možné získať ternárny 3-5 polovodič $Al_xGa_{1-x}As$. Taktiež je možné získať kvaternárny polovodič ako napr. $In_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ zlúčením štyroch prvkov, dvoch z 3. a dvoch z 5. skupiny [3].

V posledných desaťročiach pridávanie dusíka do polovodičových materiálov umožnilo veľmi zaujímavý vývoj v oblasti zložených polovodičov. Predpokladalo sa, že pridanie dusíka do gálium arzenidu by mohlo viesť k vlastnostiam podobným materiálu GaN, vrátane svetelného žiarenia vo viditeľnej oblasti. Weyers, Sato a Ando však objavili, že pridanie už malého množstva dusíka do

gálium arzenidu v skutočnosti posúva vlnovú dĺžku vyžarovaného svetla práve opačným smerom, ďalej do infračervenej oblasti spektra [1], [2]. Tieto „zriedené“ nitridy, s koncentráciou dusíka menšou ako 5%, otvorili dvere viacerým kľúčovým technológiám v oblasti blízkej infračervenej, najmä pre komunikačné optické vlákna.

Existuje viacero dôvodov tak veľkého záujmu o tieto „zriedené nitridy“. Doteraz boli vyrábané telekomunikačné lasery s vlnovými dĺžkami žiarenia buď 1,3 μm , alebo 1,55 μm , a to z dôvodu známeho silného absorbného maxima optických vlákien v oblasti 1,4 μm , kvôli prítomnosti OH väzieb v skle. Spoločnosť Corning vyvinula optické vlákno s malou absorpciou, ktoré ponúka nízko stratové okno v celej oblasti od 1,2 do 1,7 μm . A teda existuje voľné frekvenčné pásmo pre nové aplikácie, ale bez vhodných laserov v tejto vlnovej dĺžke (Obr. 1). Ďalšou výhodou „zriedených“ nitridov v súvislosti s posunom do väčších vlnových dĺžok je fakt, že ľudské oko nemôže zaostriť tieto dlhé vlnové dĺžky na sietnicu a teda nie sú ohrozením pre zdravie človeka. Lasery teda môžu fungovať pri väčších výkonoch bez rizika ohrozenia oka. To ďalej umožňuje rýchlejšie toky dát, väčšie vzdialenosti prenosu signálu a iné výhody. Ďalšou výhodou laserových diód s väčšou vlnovou dĺžkou je ich operačné napätie. Operačné napätie lasera je približne rovné šírke zakázaného pásma, ktorá je nepriamo úmerná veľkosti vlnovej dĺžke emitujúceho žiarenia. Nízke operačné napätie umožní jednoduchšiu integráciu do CMOS technológie, ktorá pracuje práve na podobných nízkych napätiach [4]002E



Obr. 1 Závislosť zakázaného pásma od mriežkovej konštanty pre viaczložkové polovodiče [5].

Problémom „zriedených“ nitridov bol vždy malý vnútorný optický zisk súvisiaci s rekombináciou nosičov náboja, z dôvodu nízkej kvality materiálu. Je ťažké rásť kvalitný materiál s tak veľmi reaktívnym prvkom, akým je dusík v atómovej forme. Rozsiahly teoretický a experimentálny výskum je zameraný na pôvod porúch v týchto materiáloch, ale ich základný pôvod je stále nejasný [6], [7], [8].

Jednou z príčin mnohých nejasností súvisiacich s poruchami v takýchto nových progresívnych materiáloch sú aj obmedzenia starších metodík a algoritmov, používaných pri vyhodnocovaní nameraných dát. Často používaná meracia metóda pre identifikáciu a výpočet parametrov porúch v polovodičových materiáloch je termálna spektroskopia hlbokých hladín (DLTS). Spočíva v meraní a analyzovaní kapacitných časových priebehov skúmaných štruktúr. Dôvod komplikácií pri DLTS analýze treba hľadať v zložení kapacitných časových priebehov. Často sa jedná o spojenie viacerých exponenciálnych kapacitných časových priebehov, ktorých súčet nedáva čistý exponenciálny charakter. Jednotlivé zložkové signály pochádzajú z emisie voľných nosičov náboja z rozličných energetických hladín, ktoré predstavujú materiálové defekty, alebo lokalizované stavy, príp. iné záchytné centrá. Existujú viaceré príčiny takýchto neexponenciálnych kapacitných časových priebehov. Niektoré sú spojené s nedodržaním všetkých nutných podmienok pri meraní, alebo analýze. Ďalšie príčiny pochádzajú z vnútorného pnutia kryštalickej mriežky vo viaczložkových polovodičových materiáloch. Uvedené príčiny neexponenciálnych kapacitných časových priebehov je možné v niektorých prípadoch zahrnúť do vyhodnocovania DLTS metódou. Takto sa eliminujú ich vplyvy na analýzu hlbokých hladín kapacitnou metódou a získajú sa hodnoverné výsledky. Najčastejšie spomínaný problém vo vyhodnocovaní DLTS je separácia signálov blízkych hlbokých hladín vo výslednom DLTS spektre. Existuje niekoľko prístupov, ktoré pomáhajú riešiť tento problém.

V celej histórii vedy sa často objavuje problém separácie niekoľkých blízkych exponenciálnych zložiek v nameraných údajoch. V prípade DLTS existujú dve hlavné skupiny prístupu k tejto problematike: analógové a digitálne spracovanie signálu. Všetky analógové prístupy spracovávajú signál v reálnom čase a preto stihnú spracovať iba niekoľko hodnôt meraných signálov. V týchto prístupoch sa používajú tzv. váhové funkcie, ktoré sú časovo závislé a nimi sa vynásobí nameraný kapacitný signál. Mnohé druhy váhových funkcií boli skúmané ako napr. double boxcar [9], exponenciálna [10], alebo multiple boxcar [11].

Istratov [12] porovnáva viacero váhových funkcií. Niektoré z nich môžu zmenšiť šírku vrcholov skoro tri-krát oproti šírkam z lock-in DLTS, ale za cenu zníženia odstup signál-šum o viac ako rád. Použitím váhových funkcií podľa Gaver-Stehfestovho algoritmu, bolo ukázané, že je možné zmenšiť šírku vrcholov skoro päť-krát (v porovnaní s lock-in zosilňovačom) a zároveň zachovať slušný odstup signál-šum [13].

Digitálny prístup k problematike multi-exponenciálnych kapacitných časových priebehov spočíva v digitalizácii analógového výstupu kapacitného merača. Kvôli redukcii šumu sa pri digitalizácii spriemeruje veľa kapacitných časových priebehov pri rovnakej teplote. Následne zo získaného signálu sú pomocou softvéru vybrané všetky dostupné časové konštanty poklesov. Výber algoritmu, ktorý sa použije pre tento krok analýzy je veľmi zložitý. Existuje niekoľko skupín, ktoré sa zaoberajú touto problematikou čisto v DLTS analýze. Napr. Ikossi-Anastasiou a Roenker [14] použili “metódu

najmenších štvorcov”, Nolte a Haller [15] použili inverznú Laplaceovu transformáciu. Dobaczewski [16], [17] popisuje úspešný DLTS systém založený na spätnej Laplaceovej transformácii. Najdôležitejším prínosom tejto metódy je, že v prípadoch, v ktorých dáva štandardná DLTS nepoužiteľné maximá, spektrá Laplaceovej DLTS odhaľujú jasné zloženie tepelných emisných procesov (t.j. je možné jasne vidieť jednotlivé maximá).

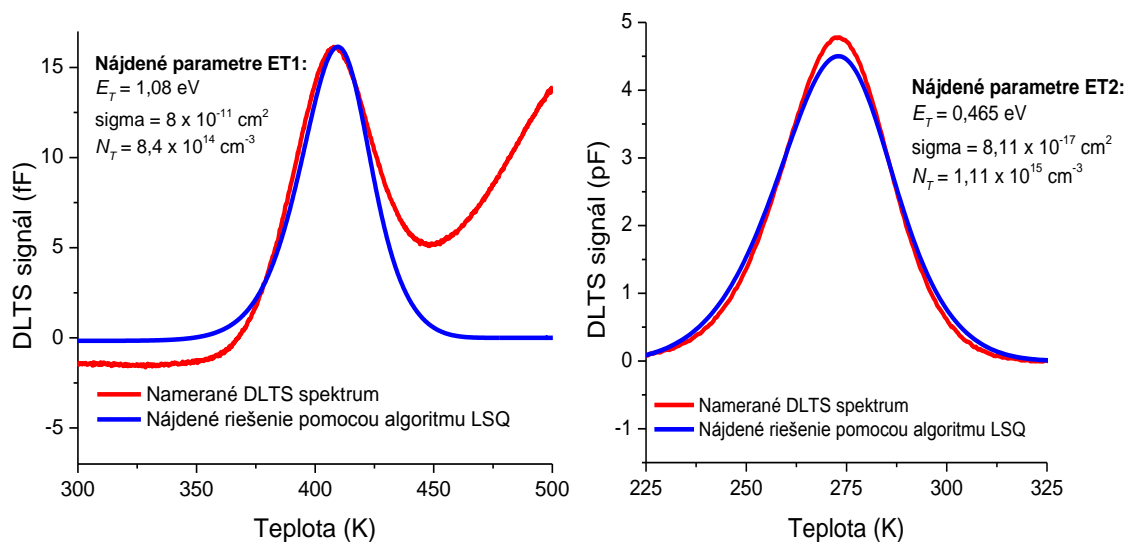
3. Ciele dizertačnej práce

Problémy spojené s kvalitou heteroštruktúr na báze A3B5, ale aj so skúmaním ich elektrických vlastností závislých od emisno-záchytných procesov v nich, sú neustále stredobodom záujmu základného výskumu. Na základe analýzy aktuálneho stavu uvedenej problematiky boli stanovené pre dizertačnú prácu nasledovné ciele:

- Oboznámiť sa s vlastnosťami a súčasným stavom vývoja materiálov a štruktúr na báze A3B5. Pozornosť sústrediť na kvaternárne polovodičové materiály a to najmä na “zriedené” nitridy a ich vlastnosti zaujímavé pre aplikácie v optoelektronickom priemysle.
- Analyzovať možnosti použitia metódy Fourierovej spektroskopie hlbokých hladín na skúmanie emisno-záchytných procesov v zakázanom pásme zvolených štruktúr na báze A3B5.
- Navrhnuť algoritmus evaluácie DLTS spektier získaných z kapacitných transient s neexponenciálnym charakterom. Aplikovať navrhnutý algoritmus evaluácie na DLTS spektrá namerané na vybraných polovodičových štruktúrach na báze A3B5.
- Pomocou metódy DLTS analyzovať vplyv koncentrácie jednotlivých zložiek kvaternárnych polovodičových materiálov na báze A3B5 na predložených heteroštruktúrach. Na základe získaných poznatkov a ďalšieho výskumu analyzovať emisno-záchytné procesy súvisiace s prítomnosťou materiálových defektov a kvantových jám v heteroštruktúrach na báze A3B5 vyrobených pre aplikácie v solárnych článkoch.

4. Dosiahnuté výsledky

V predloženej práci je experimentálna časť rozdelená na dva hlavné celky. Prvý celok je venovaný návrhu algoritmu pre výpočet parametrov hlbokých energetických hladín. Na začiatku sú analyzované možnosti použitia rôznych algoritmov pri vyhodnocovaní nameraných DLTS spektier. V prvotnej analýze bol použitý model využívajúci Gaussovské rozdelenie pre vyhodnotenie kapacitných časových priebehov. Neskôr sa ukázalo ako vhodnejšie použiť matematicko-fyzikálny model pre vyhodnotenie kapacitných časových priebehov a tento model zároveň poskytoval presnejšie výsledky. Výsledkom hlbšej analýzy emisno-záchytných procesov bol algoritmus výpočtu parametrov hlbokých energetických hladín využívajúci metódu najmenších štvorcov (algoritmus LSQ). Hlavnými výhodami tohto algoritmu sú: transparentnosť jednotlivých výpočtov (v porovnaní s rôznymi komerčnými riešeniami), použitie upraveného fyzikálneho modelu založeného na štandardnom SRH (Shockley-Read-Hall) modely skúmaných procesov a použitie metódy najmenších štvorcov, ktorá predstavuje efektívny spôsobom numerického hľadania riešenia pre nelineárne závislosti opisujúce emisno-záchytné procesy v polovodičoch. Obr. 2 porovnáva použité metódy DLTS analýzy na referenčných vzorkách kremíkovej Schottkyho dióde (energetická hladina ET2) a InGaAsN/GaAs heteroštruktúre (energetická hladina ET1). Porovnanie výsledkov potvrdilo dôveryhodnosť navrhnutého algoritmu a perspektívu jeho použitia vo vyhodnocovaní nameraných DLTS spektier.



Obr. 2 Nájdené riešenia algoritmom LSQ pre energetické hladiny ET1 a ET2.

Po overení presnosti algoritmu využívajúceho metódu najmenších štvorcov v porovnaní s algoritmom využívajúcim Gaussovské rozdelenie a ďalšími štandardnými metódami vyhodnocovania bolo zistené, že navrhnutý algoritmus je presnejší. Hodnota aktivačnej energie (E_T) dosahovala rozdiel 1-4%, hodnota záchytného priemeru dosahovala rozdiel okolo 0,25-12% a hodnota koncentrácie N_T

dosahovala rozdiel 4-9%. Presnosť však ovplyvňuje viacero faktorov, medzi ktoré patria hlavne veľkosť zvolených rozsahov hľadaných parametrov, v ktorých algoritmus hľadá riešenie ako aj počítačová hodnota parametrov a samozrejme minimálna presnosť algoritmu, ktorá hovorí o minimálnom rozdiel funkčnej hodnoty pre hľadané minimum funkcie. Všetky tieto parametre si je možné zvoliť pred spustením algoritmu a takýmto spôsobom ovplyvniť výslednú presnosť hľadaných parametrov hlbokých energetických hladín.

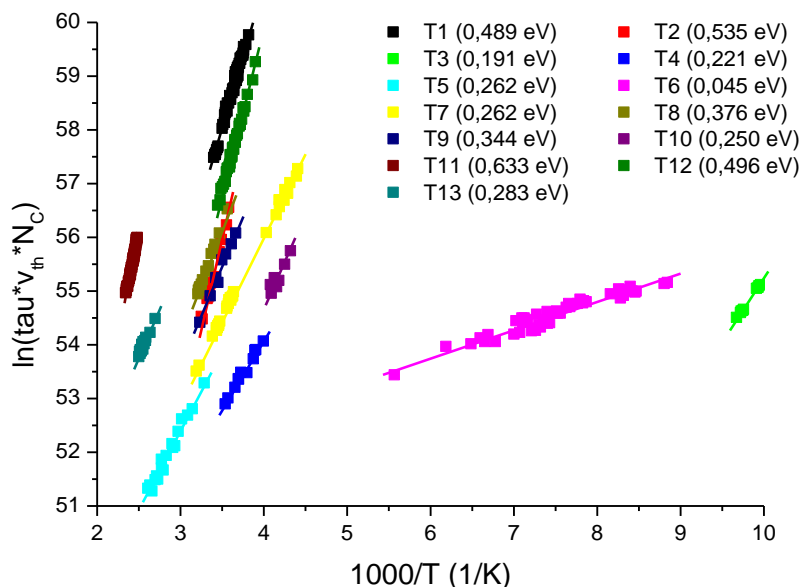
Druhý celok experimentálnej časti sa zaoberá DLTS charakterizáciou heteroštruktúr InGaAsN/GaAs. Najprv sú predstavené skúmané štruktúry a stručne popísané podmienky rastu. Ďalej je skúmaný vplyv zmeny koncentrácií jednotlivých zložiek materiálu InGaAsN, ktoré môžu spôsobiť signifikantné zmeny v konečnej materiállovej štruktúre tohto štvorzložkového polovodiča a tak ovplyvniť aj jeho vlastnosti. Vplyv dusíka, ako zdroju rozličných defektov v kryštalickej štruktúre materiálu bol jednoznačne potvrdený na štruktúre s koncentráciou dusíka 0,36% porovnávanéj so štruktúrou bez dusíka. Vplyv dusíka môže mať rôzny charakter na energetické hladiny, a to taký, že vykompenzuje určitú hladinu (ako v prípade energetickej hladiny s energiou 0,472 eV), alebo naopak, kedy vytvorí určitú energetickú hladinu (prípady energetických hladín s energiami 0,974 eV a 0,572 eV). V mnohých prípadoch ide práve o rastové poruchy spôsobené komplikáciami pri začlenení dusíka do typickej kryštalickej mriežky GaAs (prípady energetickej hladiny s energiou 0,572 eV).

Rozsiahlym experimentom na siedmych štruktúrach s rôznymi koncentraciami dusíka a india predstavenom v kapitole 6.3 bolo možné ukázať správanie sa skúmanej heteroštruktúry v závislosti od koncentrácie dusíka a india (Obr. 3). Na základe tohto experimentu vyplýva, že najlepšie zrelaxovaná bola štruktúra InGaAsN/GaAs so zložením 0,32 % dusíka a 13,3 % india. V štruktúrach s veľkou koncentraciou dusíka boli identifikované centrá EL16, ktoré sú známym materiálovým defektom GaAs. Na základe experimentov zameraných na vplyv koncentrácie dusíka a india na štruktúry InGaAsN/GaAs bolo zistené, že vplyv dusíka na degradáciu kryštalickej štruktúry je značne väčší ako vplyv india.

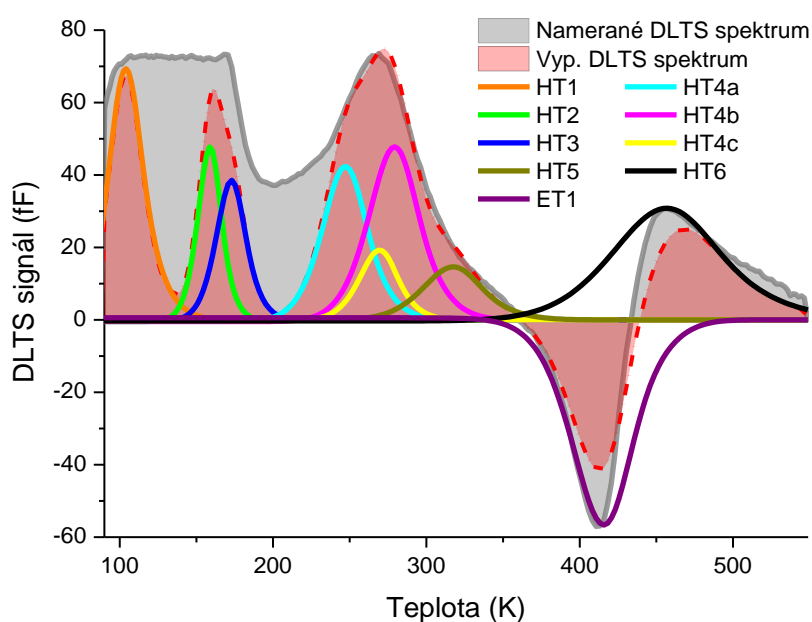
Významným poznatkom získaným počas tohto experimentu bola identifikácia emisie z kvantovej jamy. Túto emisiu bolo možné pozorovať v nameranom DLTS spektre iba pre vyššie koncentrácie dusíka a india (napr. 0,32 % dusíka a 13,3 % india) v skúmaných štruktúrach. Bolo ukázané, že takýto pomer koncentrácií má priamy vplyv na zmenšenie mriežkového pnutia v štruktúre a zníženie koncentrácie lokalizovaných stavov a defektov. Preto bolo možné identifikovať emisiu nosičov náboja z kvantovej jamy (emisiu dier z kvantovej jamy vo valenčnom pásme a emisiu elektrónov z kvantovej jamy vo vodivostnom pásme).

V poslednej časti šiestej kapitoly je predstavený experiment zameraný na skúmanie heteroštruktúry InGaAsN/GaAs pre aplikácie v solárnych článkoch s viacnásobnou kvantovou jamou. DLTS merania a výsledky analýzy potvrdili namerané koncentračné profily štruktúr. Detailná analýza nameraných

DLTS spektier na skúmaných p-i-n heteroštruktúrach GaAs/InGaAsN/GaAs odhalila prítomnosť väčšieho počtu energetických hladín. Pri tejto analýze bol použitý okrem štandardných vyhodnocovacích algoritmov aj algoritmus výpočtu parametrov energetických hladín pomocou metódy najmenších štvorcov, ktorý bol navrhnutý v predloženej práci (Obr. 4). Prítomnosť kvantovej jamy v jednej zo skúmaných p-i-n heteroštruktúr znamenala väčšiu koncentráciu defektov a lokalizovaných stavov v štruktúre na rozdiel od štruktúry bez kvantovej jamy. Na základe poznatkov, získaných z predchádzajúcich experimentov, bolo možné identifikovať materiálové defekty a emisiu z kvantovej jamy.



Obr. 3 Arrheniove závislosti hlbokých energetických hladín identifikovaných počas experimentu zameraného na vplyv koncentrácií dusíka a india.



Obr. 4 Vypočítané DLTS spectrum podľa parametrov hlbokých energetických hladín vyhodnotených pomocou algoritmu LSQ

5. Hlavné prínosy dizertačnej práce

Predložená práca svojím obsahom spĺňa vytýčené ciele. Hlavné prínosy je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- získanie nových poznatkov o kvaternárnych a ternárnych materiáloch InGaAsN a InGaAs a ich elektrických a optických vlastnostiach so zámerom priemyselných aplikácií a tiež analýza súčasného stavu v oblasti defektov v týchto zložených polovodičových materiáloch,
- prehĺbenie poznatkov o možnostiach vyhodnocovania nameraných DLTS spektier s využitím váhových funkcií, Fourierovej a Laplaceovej spätnej transformácie a numerických metód,
- vývoj a príprava analytických metodík numerického vyhodnocovania zložených DLTS spektier bariérových polovodičových štruktúr pomocou metódy DLTS na Ústave Elektroniky a Fotoniky FEI STU,
- návrh a realizácia algoritmu a softvérového riešenia pre numerické počítanie parametrov hlbokých energetických hladín pomocou metódy najmenších štvorcov,
- analyzovaný bol vplyv koncentrácie dusíka a india na prítomnosť elektricky aktívnych porúch v heteroštruktúrach s kvaternárnym polovodičovým materiálom InGaAsN a na základe tejto analýzy vyplýva, že najlepšie zrelaxovaná štruktúra mala zloženie 0,32 % dusíka a 13,3 % india,
- v skúmaných heteroštruktúrach InGaAsN/GaAs s trojitou kvantovou jamou boli identifikované z nameraných DLTS spektier elektricky aktívne poruchy a vypočítané ich parametre,
- experimentálne bolo potvrdené aj na základe DLTS meraní, že vplyv veľkosti koncentrácie dusíka na degradáciu kryštalickej mriežky heteroštruktúry InGaAsN/GaAs je značne väčší ako vplyv india,
- identifikovaná bola emisia elektrónov z kvantovej jamy vo vodivostnom pásme a emisia dier z kvantovej jamy vo valenčnom pásme,
- s cieľom optimalizácie výroby solárnych článkov s viacnásobnou kvantovou jamou boli získané nové poznatky o InGaAsN/GaAs heteroštruktúrach pomocou DLTS analýzy,

- aplikovaný bol navrhnutý algoritmus numerického výpočtu zložených DLTS spektier pri DLTS analýze InGaAsN/GaAs heteroštruktúr vyrobených pre aplikácie v solárnych článkoch s viacnásobnou kvantovou jamou.

6. Záver

Rýchlo sa rozvíjajúca oblasť optoelektroniky a laserovej techniky využívajúca kvaternárne polovodičové materiály na báze GaAs je silnou motiváciou pre hlbší výskum „zriedených“ nitridov. Táto práca bola zameraná na heteroštruktúry InGaAsN/GaAs a výskum vplyvu koncentrácií jednotlivých materiálových zložiek na výsledné elektrické vlastnosti celej štruktúry.

Na splnenie cieľov bolo potrebné okrem množstva experimentov a DLTS meraní pochopiť a vedieť interpretovať fyzikálne procesy prebiehajúce na energetických hladinách v polovodičových štruktúrach. Tieto poznatky sú obsiahnuté v teoretickej časti práce, v prvých štyroch kapitolách. Definované boli závislosti fyzikálnych veličín opisujúcich záchyt a emisiu nosičov náboja na energetických hladinách. Skúmané boli viaceré metódy analýzy emisno-záchytných procesov na energetických hladinách a spracovania nameraných DLTS kapacitných časových priebehov. Hlbšia analýza emisno-záchytných procesov umožnila vyvinúť algoritmus výpočtu parametrov hlbokých energetických hladín využívajúci metódu najmenších štvorcov, ktorý bol následne aj využitý pri vyhodnocovaní nameraných DLTS spektier.

Malé zmeny koncentrácií jednotlivých zložiek materiálu InGaAsN môžu spôsobiť významné zmeny v konečnej materiálovej štruktúre tohto štvorzložkového polovodiča a tak ovplyvniť aj jeho vlastnosti. Skúmaniu tohto vplyvu je venovaná väčšia časť šiestej kapitoly, ktorá sa pomerne rozsiahlo zaoberá vplyvom zvlášť koncentrácie dusíka, ale aj v kombinácii s koncentráciou india.

Dusík, ako prvok s malou veľkosťou atómu, ale zároveň veľkou elektronegativitou, je známym zdrojom rozličných defektov v kryštalickej štruktúre materiálu, v ktorom sa nachádza. Tento vplyv bol jednoznačne potvrdený identifikáciou energetických hladín v skúmaných štruktúrach a zároveň bol ukázaný rôzny charakter tohto vplyvu na energetické hladiny. Bolo možné identifikovať tri energetické hladiny a vypočítať ich parametre. Na konci kapitoly 6.2 je pojednané o dôležitosti správnej identifikácie majoritných nosičov náboja. Ukázané bolo, že to má vplyv aj na interpretáciu nameraných DLTS spektier.

Hlavný význam pridávania india do InGaAsN materiálu spočíva v jeho opačnom pôsobení na mriežkové pnutie v porovnaní s dusíkom. Použitím správnych koncentrácií dusíka a india je možné získať materiál InGaAsN, ktorý je mriežkovo prispôbený GaAs. Tento fakt, je obrovskou výhodou skúmaného materiálu. Okrem tohto vplyvu, má pomer koncentrácií jednotlivých prvkov závažný vplyv i na šírku zakázaného pásma a ofset valenčného a vodivostného pásma. Skúmaniu tejto problematiky

bol venovaný rozsiahly experiment na siedmych štruktúrach s rôznymi koncentraciami dusíka a india a vplyv dusíka na degradáciu kryštalickej štruktúry sa potvrdil ako značne väčší v porovnaní s vplyvom india. Počas tohto experimentu bola identifikovaná aj emisná z kvantovej jamy.

Kvaternárny materiál InGaAsN je veľmi zaujímavý kandidát pre aplikácie v solárnych článkoch s viacnásobnou kvantovou jamou. DLTS analýza nameraných spektier poukázala na komplikované emisno-záchytné procesy na rozhraniach jednotlivých vrstiev skúmanej heteroštruktúry s kvantovou jamou. Zvládnutie technológie rastu tenkých vrstiev v týchto heteroštruktúrach je prioritou pre praktické aplikácie vo vysokoúčinných solárnych článkoch s viacnásobnými kvantovými jamami.

Predložená práca bola vypracovaná na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU Bratislava v Centre Excelencie „CENAMOST“ (Agentúra pre podporu vedy a výskumu, kontrakt č. VVCE-0049-07) s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR (Projekty VEGA 1/0742/08, VEGA 1/0507/09, VEGA 1/0689/09, VEGA 1/0866/11, VEGA 1/0712/12, VEGA 1/0377/13, VEGA 1/0439/13), Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (Projekt APVV-0509-10) a 7. F. P. MORGAN. Táto práca bola spolufinancovaná Poľským ministerstvom vedy a vysokého školstva z grantu č. N N515 607539, Európskou úniou z Európskeho fondu regionálneho rozvoja cez program Inovačná ekonomika (POIG.01.01.02-00-008/08-05), štatutárnym grantom Wroclawskej Technickej Univerzity S10019, B20011 a Slovensko-Poľským Programom medzinárodnej spolupráce č. SK-PL-0017-09 & 0005-12.

7. Summary

Rapid development in optoelectronics and lasers using quaternary semiconductor materials based on GaAs is a strong motivation for a more in-depth research of the so called “dilute” nitrides. Quaternary semiconductor material InGaAsN grown on GaAs substrate is a very good candidate for the optoelectronics industry application for wavelengths of 1.3 μm – 1.5 μm [1], [2]. This work presents a systematic study of the InGaAsN structures in perspective of the multijunction solar cell application. Due to the importance of the physical processes in the studied structures, detailed theoretical background is included in the beginning of the thesis. Capture and emission processes of the charge carriers on the deep energy levels are described.

This work was concentrated on DLTS study of the InGaAsN/GaAs structures. The theory of the DLTS method was necessary for understanding the limitations of the method. An analysis of the various evaluation methods in DLTS characterization is presented. The result of the analysis is a new algorithm of deep energy level parameters calculation using the method of least squares. The algorithm was compared with other algorithms used in DLTS evaluation and its precision was found better.

The in-depth study of the influence of the nitrogen and indium concentrations confirmed that the nitrogen has a far worse influence on the degradation of the structure than indium. Many deep energy levels were identified and the optimal parameters for the concentration of nitrogen and indium were observed. Very interesting effect was observed in the structures with the parameters near the optimal once, where the emission from the quantum well was identified.

Considerable part of the thesis is concentrated on the DLTS experiment of the InGaAsN/GaAs structures developed for the multijunction solar cells applications. Based on the understanding of the processes in the studied structures obtained from the previous experiments it was possible to identify several deep energy levels that relate to the material defects and quantum well emission. The priority for the practical applications of the studied structures in the optoelectronics is the mature growth technology and thus ability to grow structures with low defect concentrations.

Keywords:

Deep level transient spectroscopy, InGaAsN, emission and capture, numerical evaluation algorithm.

8. Použitá literatura

- [1] M. Weyers, M. Sato, and H. Ando, "Red shift of photoluminescence and absorption in dilute GaAsN alloy layers," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 31, no. 7A, pp. 1853-1855, 1992.
- [2] S. Sakai, Y. Ueta, and Y. Terauchi, "Band gap energy and band lineup of III–V alloy semiconductors incorporating nitrogen and boron," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 32, no. 10, p. 4413–4417, 1993.
- [3] H. T. Grahn, *Introduction to Semiconductor Physics*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001.
- [4] M. A. Wistey, "Growth of 1.5 μm GaInNAsSb Vertical cavity surface emitting lasers by molecular beam epitaxy," Stanford University Dizertačná práca, 2005.
- [5] M. Galluppi, "Optical characterization of InGaAsN / GaAs quantum wells: Effects of annealing and determination of the band offsets," Philipps-Universität Marburg Dizertačná práca, 2005.
- [6] P. Krispin, S. G. Spruytte, J. S. Harris, and K. H. Ploog, "Electron traps in Ga(as,N) layers grown by molecular–beam epitaxy," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 12, p. 2120–2122, Mar. 2012.
- [7] Y. Zhang, et al., "Effects of heavy nitrogen doping in III–V semiconductors – how well does the conventional wisdom hold for the dilute nitrogen "III–V–N alloys"?", *Physica Status Solidi B*, vol. 240, no. 2, p. 396–403, 2003.
- [8] S. B. Zhang and S. H. Wei, "Nitrogen solubility and induced defect complexes in epitaxial GaAs:N," *Phys Rev Lett*, vol. 86, no. 9, p. 1789–1792, Feb. 2001.
- [9] D. V. Lang, "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 7, 1974.
- [10] J. A. Borsuk and R. M. Swanson, "Current transient spectroscopy: A high-sensitivity DLTS system," *Transactions on Electron Devices, IEEE*, vol. 27, no. 12, 1980.
- [11] C. R. Crowell and S. Alipanahi, "Transient distortion and nth order filtering in deep level transient spectroscopy (DLTS)," *Solid-State Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 25-36, 1981.
- [12] A. Istratov, H. Hieslmair, C. Flink, and E. R. Weber, "Determination of parameters of deep level defects from numerical fit of deep level transient spectroscopy spectra: Analysis of accuracy and sensitivity to noise," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 69, no. 1, pp. 224-250, Jan. 1998.
- [13] A. A. Istratov, "New correlations in narrow energy bands," *Proc. Roy. Soc.*, vol. A276, p. 238, 1997.
- [14] K. Ikossi-Anastasiou and K. P. Roenker, "Refinements in the method of moments for analysis of multiexponential capacitance transients in deep-level transient spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, vol. 61, pp. 182-191, 1987.

- [15] D. D. Nolte and E. E. Haller, "Optimization of the energy resolution of deep level transient spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 3, pp. 900-907, 1987.
- [16] L. Dobaczewski, P. Kaczor, I. D. Hawkins, and A. R. Peaker, "Laplace transform deep-level transient spectroscopic studies of defects in semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, p. 194, 1994.
- [17] L. Dobaczewski and A. R. Peaker, "Laplace-transform Deep-level Spectroscopy:," *J. Appl. Phys.*, vol. 96, p. 4689–4728, Nov. 2004.
- [18] W. E. Meyer, "Digital DLTS studies on radiation induced defects in Si, GaAs and GaN," University of Pretoria Písmomná práca k dizertačnej skúške, 2007.
- [19] L. Dobaczewski, P. Kaczor, M. Missous, A. R. Peaker, and Z. Zytkeiwicz, "Evidence for substitutional-interstitial defect motion leading to DX behaviour by donors in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 68, p. 2508, 1992.
- [20] G. L. Miller, J. V. Ramirez, and D. A. H. Robinson, "A correlation method for semiconductor transient signal measurements," *J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 2638-2645, 1975.
- [21] G. A. Korn and T. M. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [22] C. Eiche, et al., "Analysis of photoinduced current transient spectroscopy (PICTS) data by a regularization method," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 4, no. 28, p. 6131, 1992.

9. Zoznam vlastných publikácií

Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch:

1. Stuchlíková, Ľubica - Harmatha, Ladislav - Petrus, Miroslav - Rybár, Jakub - Šebok, Ján - Sciana, Beata - Radziewicz, Damian - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek - Kósa, Arpád - Benko, Peter - Kováč, Jaroslav - Juhász, Peter: Electrical Characterization of the AIIBV-N Heterostructures by Capacitance Methods. In: Applied Surface Science. - ISSN 0169-4332. - Vol. 269 (2013), s. 175-179

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách:

1. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica: Numerical approach to the problem of composite signals in digital DLTS measurements. In: EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013: Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013. - Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013. - ISBN 978-80-214-4754-7. - S. 85-90
2. Stuchlíková, Ľubica - Harmatha, Ladislav - Rybár, Jakub - Jakuš, Juraj - Kováč, Jaroslav - Nemeč, Michal - Petrus, Miroslav - Sciana, Beata - Radziewicz, Damian - Pucicki, Damian - Dawidowski, Wojciech - Tlaczala, Marek: Investigation of emission and capture processes in Schottky and p-i-n structures based on InGaAsN/GaAs heterostructures. In: EDS'13. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2013: Proceedings; Brno, Czech Republic, 26-27 June 2013. - Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2013. - ISBN 978-80-214-4754-7. - S. 195-200
3. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica: Problem of Composite Capacitance Transient Signals in Digital DLTS Measurements. In: EDS'12. Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2012 : Proceedings; Brno, Czech Republic, 28-29 June 2012. - Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2012. - ISBN 978-80-214-4539-0. - S. 126-131
4. Stuchlíková, Ľubica - Benkovská, Jana - Benko, Peter - Rybár, Jakub - Petrus, Miroslav - Nemeč, Michal - Šebok, Ján - Harmatha, Ladislav: Quality Criteria in Practice of Electronic Education. In: Nové technologie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj] : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011. - Brno : Masarykova univerzita, 2012. - ISBN 978-80-210-5942-9. - CD-ROM [5] s.
5. Benkovská, Jana - Stuchlíková, Ľubica - Nemeč, Michal - Šebok, Ján - Stuchlík, M. - Rybár, Jakub - Petrus, Miroslav: Renewable Energy Sources for Pupils of Elementary Schools. In: Nové technologie ve výuce. 5. ročník [elektronický zdroj] : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2011. - Brno : Masarykova univerzita, 2012. - ISBN 978-80-210-5942-9. - CD-ROM [5] s.
6. Stuchlíková, Ľubica - Benkovská, Jana - Varga, Štefan - Rybár, Jakub - Nemeč, Michal - Šebok, Ján: Ako efektívne vyvíjať kvalitné e-learning kurzy. In: Nové technologie ve výuce. 4. ročník : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2010. - Brno : Masarykova univerzita, 2010. - ISBN 978-80-210-5333-5. - S. 1-4

7. Stuchlíková, Ľubica - Šebok, Ján - Rybár, Jakub - Petrus, Miroslav - Nemeč, Michal - Harmatha, Ladislav - Benkovská, Jana - Kováč, Jaroslav - Škriniarová, Jaroslava - Lalinský, Tibor - Paszkiewicz, Bogdan - Tlaczala, Marek: Investigation of Deep Energy Levels in Heterostructures based on GaN by DLTS. In: ASDAM 2010. The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, 25 - 27 October 2010. - Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. - ISBN 978-1-4244-8572-7. - S. 135-138
8. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica - Kováč, Jaroslav - Kováč, Jaroslav: Multimedia in Optoelectronics and Sensorics. In: EWME 2010. 8th European Workshop on Microelectronics Education : Darmstadt, Germany, 10.-12.5.2010. - Darmstadt : Technische Universität Darmstadt, 2010. - S. 102-107
9. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica: Tímová práca ako jedna z efektívnych foriem vzdelávania. In: Nové technológie ve výuce. 3. ročník : Mezinárodní konference. Sborník abstraktů a elektronických verzí příspěvků. Brno 2009. - Brno : Masarykova univerzita, 2009. - ISBN 978-80-210-5092-1. - CD-Rom

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách:

1. Rybár, Jakub - Kósa, Arpád - Stuchlíková, Ľubica: Deep Level Parameters Calculation Using Fitting Evaluation Analysis in Digital DLTS Measurements. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 262-265
2. Stuchlíková, Ľubica - Jakuš, Juraj - Rybár, Jakub - Harmatha, Ladislav - Kováč, Jaroslav - Sciana, Beata - Radziewicz, Damian - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek: Deep-Level Transient Spectroscopy Study of Triple Quantum Well InGaAsN/GaAs Heterostructures. In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 52-55
3. Stuchlíková, Ľubica - Rybár, Jakub - Harmatha, Ladislav - Kováč, Jaroslav - Sciana, Beata - Radziewicz, Damian - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek: DLTFs Study of p-i-n Diode Based on InGaAsN/GaAs Multi-Quantum Well Structure. In: APCOM 2013. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 19th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 19-21, 2013. - Bratislava : STU v Bratislave, 2013. - ISBN 978-80-227-3956-6. - S. 293-296
4. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica - Petrus, Miroslav - Harmatha, Ladislav - Sciana, Beata - Radziewicz, Damian - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek: Deep Levels in InGaAsN/GaAs and InGaAs/GaAs Heterojunctions. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 103-106

5. Stuchlíková, Ľubica - Petrus, Miroslav - Kováč, Jaroslav - Rybár, Jakub - Harmatha, Ladislav - Donoval, Daniel - Benkovská, Jana - Behmenburg, H. - Heuken, M.: Electrical Characterization of the InAlN/GaN Heterostructures by Capacitance Methods. In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 51-54
6. Stuchlíková, Ľubica - Rybár, Jakub - Kósa, Arpád - Petrus, Miroslav - Harmatha, Ladislav - Šciana, Beata - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek - Radziewicz, Damian: Investigation of InGaAsN/GaAs Heterostructures by Capacitance Methods. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 357-360
7. Petrus, Miroslav - Stuchlíková, Ľubica - Rybár, Jakub - Juhász, Peter - Harmatha, Ladislav - Benko, Peter - Kováč, Jaroslav - Žiška, Milan - Šebok, Ján - Šciana, Beata - Pucicki, Damian - Tlaczala, Marek - Radziewicz, Damian: Deep Level Investigation on GaAsN Structures by DLTS Method. In: APCOM 2012. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 18th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, June 20-22, 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-227-3720-3. - S. 353-356
8. Petrus, Miroslav - Stuchlíková, Ľubica - Rybár, Jakub: Solar Cells in Engineering Education. In: Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 [elektronický zdroj] : 3rd International Scientific Conference OZE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-48-9. - S. 285-286
9. Stuchlíková, Ľubica - Benkovská, Jana - Stuchlík, M. - Nemeč, Michal - Šebok, Ján - Rybár, Jakub - Petrus, Miroslav: Future of Power Engineering Depends on Young People. In: Power Engineering 2012. Renewable Energy Sources 2012 [elektronický zdroj] : 3rd International Scientific Conference OZE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-48-9. - S. 259-260
10. Kósa, Arpád - Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica: Skúmanie vlastností InGaAsN/GaAs heteroštruktúr metódou DLTS. In: ŠVOČ 2012 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác, Bratislava, 25. apríl 2012. - Bratislava : FEI STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3697-8. - CD-ROM, s. 307-312
11. Rybár, Jakub - Kósa, Arpád - Dubecký, František - Petrus, Miroslav - Stuchlíková, Ľubica - Benkovská, Jana - Harmatha, Ladislav - Hrkút, Pavol - Baček, D. - Kováč, Peter: DLTS Study of Neutron Bombarded Silicon Detector. In: APCOM 2011. Applied Physics of Condensed Matter : Proceedings of the 17th International Conference. Nový Smokovec, Slovak Republic, June 22-24, 2011. - Žilina : Žilinská univerzita, 2011. - ISBN 978-80-554-0386-1. - S. 192-195
12. Benkovská, Jana - Stuchlíková, Ľubica - Šebok, Ján - Rybár, Jakub: e-Learning and Mysterious World of Science and Technology. In: ICETA 2010 : 8th International Conference on Emerging

eLearning Technologies and Applications. Stará Lesná, Slovakia, 28.-29.10.2010. - Košice : Elfa, 2010. - ISBN 978-80-8086-166-7. - S. 307-312

13. Jakuš, Juraj - Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica: Virtual tour "Senzoriky a mikrosystémovej techniky". In: ŠVOČ 2010 : Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 21.4.2010. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2010. - ISBN 978-80-227-3286-4. - CD-Rom
14. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica - Kováč, Jaroslav - Kováč, Jaroslav: Virtual Tour in Optoelectronics Laboratories. In: Virtual University 2009 : 10th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, December 10-11, 2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-89316-11-3. - CD-Rom
15. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica - Kováč, Jaroslav - Kováč, Jaroslav: Multimediálne prvky vo Virtual tour laboratórií Optoelektroniky. In: ŠVOČ 2009 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, Slovak Republic, 29.4.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3094-5. - CD-Rom

Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií:

1. Stuchlíková, Ľubica - Harmatha, Ladislav - Petrus, Miroslav - Rybár, Jakub - Šebok, Ján - Kósa, Karol - Benko, Peter - Kováč, Jaroslav - Juhász, Peter: Electrical Characterization of AlInBv-N Heterostructures by Capacitance Methods. In: SURFINT - SREN III : Progress in Applied Surface, Interface and Thin Film Science 2012. Florence, Italy, May 14-18, 2012. - Bratislava : Comenius University, 2012. - ISBN 978-80-223-3212-5. - S. 180-181

Odborné práce v domácich nekarentovaných časopisoch:

1. Rybár, Jakub - Stuchlíková, Ľubica - Kováč, Jaroslav - Kováč, Jaroslav: Virtual tour v laboratóriách Optoelektroniky. In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 3, Iss. 3 (2010), <http://www.posterus.sk/?p=5600>

Meno autora: **Ing. Jakub Rybár**

Názov práce:

“SKÚMANIE KVALITY POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLOV A ŠTRUKTÚR
METÓDOU DLTS”

Náklad: 12 ks

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

Termín vytlačenia: 2013