

BEVEZETÉS

Közismert, hogy a félvezető anyagok elektromos/optikai tulajdonságait az elektromos és mágneses tér, nyomás vagy éppen a környezet hőmérséklete jelentősen befolyásolhatja. Ezen tényezők hatása fokozottan érvényesülhet a kvantum- (nano)- struktúrákban, illetve a ma már igen elterjedt, kvantum-effektusokon alapuló eszközök (például, a 2D dimenziós kvantumpotenciál-gödör- lézerstruktúrák) esetében. Viszont még számos kísérleti munka szükséges ahhoz, hogy egyértelműen megállapíthatók legyenek mind az ilyen struktúrák paraméterei (rácsállandó, sávstruktúra, elektronátmenetek, törésmutató, optikai erősítési tényező), valamint a külső tényezők (hőmérséklet, mágneses tér, nyomás) hatása ezen eszközökre. Eközben természetesen számolni kell azzal is, hogy a ma ismert félvezető anyagok tulajdonságai azonban jelentős korlátot szabnak az újabb lézerstruktúrák fejlesztésének.

A jelenleg folyó kutatások egy fontos iránya a félvezető lézerek paramétereinek a javítása, valamint ezen eszközök felhasználhatóságának bővítése. Az alapkutatások szempontjából viszont további jelentős előrelépést eredményezne, ha egyidejűleg vizsgálható lenne több külső tényező együttes hatása, ami a lézerciódák alapját képező félvezető anyagok és a belőlük készült kvantumstruktúrák fizikai jellemzőinek pontosabb meghatározását segítené elő.

Mivel a hidrosztatikai nyomás alkalmazása egyike a leghatásosabb eszközöknek a kvantumpotenciál-gödör-lézerstruktúrák fontosabb paramétereinek a megváltoztatására (kibocsátott fényhullámhossz, küszöbáram), ezért ennek felhasználásától várható a kitűzött cél elérése mind az alapkutatások, mind a gyakorlati alkalmazhatóság terén.

CÉLKITÚZÉS

Jelen munkában elsősorban a magas hidrosztatikai nyomás, valamint a hőmérséklet és a külső rezonátor együttes hatását vizsgáltam az $A^{III}B^V$ alapú kvantumpotenciál-gödör-lézerciódák elektronfolyamataira, amelyek meghatározzák az ilyen lézerek elektromos és optikai tulajdonságait. Kutatásaim kiterjedtek a lézerciódáknál felhasznált félvezető anyagok, illetve azokból készült kvantumstruktúrák sávszerkezetének, fontosabb paramétereinek (tiltott sáv, kvantumszintek, optikai erősítési tényező, kisugárzott fény hullámhossza) és e struktúrákban végbemenő folyamatok, jelenségek (töltéshordozók kiáramlása az aktív rétegből, Auger-effektus, belső elektromos tér) magas nyomástól való függésére.

A doktori dolgozat fő céljai:

- Továbbfejleszteni a magasnyomású optikai mérési módszert, létrehozva egy nagy hatásfokú, száloptikával vagy zafír ablakkal rendelkező és a félvezető lézer fényforrással egyesített fénykivezető rendszert a magasnyomású kamrához. Ilyen módon egy rendszerben egyesítve a lézerciódák hullámhosszát hatáson hangoló tényezőket (hidrosztatikus nyomás, hőmérséklet, külső rezonátor) kimutatni a félvezető kvantum-generátor eszközök hidrosztatikai nyomással széles tartományban való hangolhatóságát, ami egyben lehetőséget ad a ma gyártott félvezető lézerek sugárzási tartományában meglévő, 400-2500 nm közötti rések kitöltésére.
- Tanulmányozni az A^{III}B^V (GaN, InP, GaAs, GaSb, stb.) alapú kvantumpotenciál-gödör- lézerstruktúrák optikai és elektromos jellemzőinek (kisugárzott hullámhossz, stimulált emisszió, feszültség-áram karakterisztika, küszöbáram, módusstruktúra) hidrosztatikus nyomástól való függését széles hőmérsékleti tartományban. Ezáltal alapot biztosítani olyan, lézerciódák esetében káros jelenségek mennyiségi és minőségi vizsgálataihoz mint például a töltéshordozók kiáramlása az aktív rétegből (AlGaInP, AlGaAs alapú struktúrákban), Auger- effektus (GaSb alapú struktúrában) valamint a szintén káros belső elektromos tér hatása (GaN alapú lézerstruktúrában).

EREDMÉNYEK

1. Kifejlesztettem egy eredeti, nagy hatásfokú, optikai és elektromos mérésekre egyaránt alkalmas, száloptikát tartalmazó rendszert [1], valamint részt vettem a zafír ablak fénykivezető rendszer (gradiens lencse alkalmazásával) továbbfejlesztésében a magasnyomású kamrából [2], melyek segítségével sikerült meghatároznunk egy sor kvantumpotenciál- gödör félvezető lézer paramétereinek nyomásfüggését: kisugárzott hullámhossz, stimulált emisszió, teljesítmény- áram és feszültség-áram függvény, küszöbáram. Egyes (például, InGaN/GaN- 415-420 nm, InGaAsSb/AlGaAsSb- 2300-2500 nm tartományban sugárzó struktúrák) lézerciódák esetében az ilyen mérések teljesen újszerűek [3-8], más mért struktúrák esetében pedig lényegesen kiegészítik a korábbi méréseket.

Külön ki kell emelni, hogy a felhasznált mérési rendszerek megengedték a lézerek magas nyomás (0-22kbar) alatti tanulmányozását széles hőmérsékleti tartományban (100-300K), miközben sikerült a lézerciódák sugárzásának 50-75%-át kivezetni a magasnyomású kamrából, ami úttörő munkának számít a fizika e gyakorlati terén [1, 2].

4. G.Frannsen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, L.H. Dmowski, S.P. Lepkowski, H. Teisseire, P. Pristawko, R. Czernecki, M. Leszczynski, I. Grzegory, and S. Porowski, Hydrostatic pressure as an effective tool for studying built-in electric fields in group III-nitride light emitting quantum structures, (Abstract). XXXIII International school on the physics of semiconducting compounds, Jasowiec (2004), 127.
5. T. Suski, G. Frannsen, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, P. Prystawko, M. Leszczynski, I. Grzegory, S. Porowski, A pressure-tuned blue-violet InGaN/GaN laser diode grown on bulk GaN crystal, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, (23 Feb. 2004), 1236.
6. G. Frannsen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, W. Trzeciakowski, I. Makarowa, P. Prystawko, M. Leszczynski, I. Grzegory, and S. Porowski, S.Kökényesi, Fully-screened polarization-induced electric fields in blue/violet InGaN/GaN light-emitting grown on bulk GaN, *Appl. Phys. Lett.* **87**, (2005), 041109.
7. G. Frannsen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, K. Kazlauskas, G. Tamulaitis, A. Žukauskas, R. Czernecki, M. Leszczynski, and I. Grzegory, Screening of built-in electric fields in group III-nitride laser diodes observed by means of hydrostatic pressure, *Phys. Stat. Sol. (c)* **2**, (2005), 1019.
8. P. Adamiec, A. Salhi, **R. Bohdan**, A. Bercha, F. Dybala, W. Trzeciakowski, Y. Rouillard, A. Jouillie, Pressure-Tuned InGaAsSb/AlGaAsSb diode laser with 700nm tuning range, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, (2004), 4292.
9. P.G. Eliseev, P. Adamiec, A. Bercha, F. Dybala, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Anomalous differential resistance change at the oscillation threshold in Quantum-well laser diodes, *IEEE J. Quantum. Electron.* **41**, (2005), 9.
10. P. Adamiec, T. Swietlik, **R. Bohdan**, A. Bercha, F. Dybala, W. Trzeciakowski, The effect of pressure and temperature on AlGaInP and AlGaAs laser diodes, *Acta Physica Polonica A*, **103**, (2003), 585.
11. P. Adamiec, F. Dybala, A. Bercha, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, M. Osinski, Pressure tuning of high-power laser diodes, *Proc. SPIE*, **4973**, (2003), 158.
12. F. Dybala, P. Adamiec, A. Bercha, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Wavelength tuning of laser diodes using hydrostatic pressure, *Proc. SPIE*, **4989**, (2003), 181.
13. A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Effect of pressure and temperature on AlGaInP and AlGaAs diode lasers, *Proc. SPIE*, **4986**, (2003), 613.
14. P. Adamiec, F. Dybala, A. Bercha, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Pressure tuning of high-power laser diodes, *Proc. SPIE*, **5120**, (2003), 172.

a single-mode spectrum can be obtained from a multi-mode spectrum. Also, the external resonator leads to the lowering of the threshold current (also under high pressure). It was shown for the $\text{Ga}_{0.67}\text{In}_{0.33}\text{N}_{0.02}\text{As}_{0.98}/\text{GaAs}$ ($\lambda=1340$ nm) structures that the modal net gain decreases by 33% with the increase of pressure from 0 to 21 kbar [2].

5. With the help of our devices (which allowed for the change of pressure and temperature) the III-V semiconductor quantum well lasers were tuned in a wide spectral range (10-700 nm, depending on structure). This enabled the realization of coherent light sources which were tunable in a wide spectral range and thereby we obtained laser wavelengths which are not available by other methods or materials ($\lambda=400\text{-}2500$ nm) [2, 5-8,10-14]. Using the $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ $\lambda=2400$ nm laser structure as an example, it was shown that such a light source has a stable intensity (of 10 mW) and mode structure for hundreds of hours.

Pressure-tunable semiconductor lasers were applied for concrete physical measurements. The $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ semiconductor laser functioned well as a manometer during high-pressure measurements of other semiconductor lasers. The accuracy of such a manometer was 0.2 kbar.

A pressure-tunable multi-mode $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ laser diode was used for absorption measurements of two gases (NH_3 and CH_4). The experiment was performed in widely separated parts of the optical spectrum (1.99-2.01 μm and 2.31-2.32 μm). Such an experiment would be difficult to perform by means of other methods of laser wavelength tuning (such as temperature, current, external resonator).

BIBLIOGRAPHY

1. **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, and W. Trzeciakowski, A Fiber Feedthrough for a Semiconductor Laser Located in High Hydrostatic Pressure cell, *Instruments and xperimental Techniques*, **47**(3), (2004), 422.
2. A. Bercha, F. Dybala, K. Komorowska, P. Adamiec, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, J. A. Gupta, P. J. Barrios, G. J. Pakulski, A. Delage, Z. R. Wasilewski, Pressure tuning of GaInNAs laser diodes in external cavity, *Proc. SPIE* **5722**, (2005) 565.
3. G. Franssen, **R. Bohdan**, S. Lepkowski, W. Trzeciakowski, T. Suski, and P. Perlin, Two methods of direct investigation of piezoelectric fields in InGaN/GaN quantum well light emitting diodes, XXXII International school on the physics of semiconducting compounds Jasowiec, Abstracts, (2003), 123.

2. Megállapítottuk az alapkutatásban és a gyakorlatban használt $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ alapú félvezető kvantumpotenciál-gödör-lézerstruktúrák jellemző típusainak (InGaN/GaN , $\text{InGaP}/\text{AlGaInP}$, $\text{AlGaAs}/\text{AlGaAs}$, $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$, $\text{InGaAsP}/\text{InP}$, $\text{GaInNAs}/\text{GaAs}$, $\text{InGaAsSb}/\text{AlGaAsSb}$) nyomással való hangolhatósági tényezőjét ($d(h\nu)/dp$) 0-22 kbar nyomástartományban [2, 5-8,10-14].

3. Magasnyomású mérések alapján lézerdiodákban sikerült megállapítanunk olyan káros jelenségek jellemzőit, mint a töltéshordozók kiáramlása az aktív rétegből, az Auger nem sugárzásos rekombináció és a belső elektromos tér jelenlétét.

A küszöbáram p - T diagrammjainak tanulmányozása az általunk kifejlesztett modellezés alkalmazásával két $\text{InGaP}/\text{AlGaInP}$ alapú ($\lambda=660$ és 690 nm) és egy $\text{AlGaAs}/\text{AlGaAs}$ alapú ($\lambda=780$ nm) struktúránál kimutatta a sodródásos típusú kiáramlás dominanciáját, valamint lehetőséget nyilott a lézerstruktúra energiasávja egy fontos paraméterének a meghatározására: kiszámítottam az energiagátat az aktív réteg vezetési sáv Γ - minimuma és a fedőréteg X - minimuma között, amely $\text{InGaP}/\text{AlGaInP}$ struktúra (660 nm) esetében - 215 meV, valamint kiszámítottuk ezt az energiagátat az $\text{InGaP}/\text{AlGaInP}$ struktúra ($\lambda=690$ nm) esetén - 282 meV, és az $\text{AlGaAs}/\text{AlGaAs}$ struktúra ($\lambda=780$ nm) esetén - 300 meV [10, 13].

Az áram-feszültség függés tanulmányozása során megállapítottuk, hogy az $\text{AlGaAs}/\text{AlGaAs}$ struktúrájú 785 nm-en világító Sanyo gyártmányú lézereknél a függés magas nyomás alatt anomális, ami eddig ismeretlen volt. Modellszámolásaink bizonyítják, hogy ez az elektronok aktív rétegből való kiáramlásával és ez által a kvantumgödört körülvevő rétegek ellenállás-változásával magyarázható [9].

$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ ($\lambda=2400$ nm) struktúrájú lézer esetén méréseim kimutatták, hogy nagy valószínűséggel 8 kbar alatt a CHCC típusú Auger-effektus dominál, ugyanakkor 8 kbar felett jelentősebb a CHSH típusú Auger-rekombináció [8]. Ilyen típusú Auger- effektusok jelenlétét támasztják alá az $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ ($\lambda=2500\text{nm}$) és az $\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.12}\text{Sb}_{0.88}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ ($\lambda=2300$ nm) struktúrájú lézerdiodákon végzett kísérleteink is.

Két, intrinsic, illetve adalékolt gátakkal rendelkező $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ ($\lambda=416$ és 421 nm) lézerek példáján az elektrolumineszcencia spektrumcsúcsának nyomástényező áram függéséből bebizonyítottuk a polarizációs elektromos tér létezését ilyen struktúrákban és megállapítottuk, hogy az $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ gátak Si adalékolása (10^{19}cm^{-3}), vagy az injektált áramsűrűség 150 A/cm^2 szintje szükséges ahhoz, hogy nagymértékben árnyékolja a belső elektromos teret (a beépített elektromos terek teljes árnyékolása

12 kA/cm² küszöbáram-sűrűség közelében megy végbe). De mivel a küszöbáram mind a két lézerstruktúra esetében 1A körüli és nyomásfüggetlen, ez bizonyítja, hogy a belső elektromos tér e struktúrákban nem játszik olyan jelentős szerepet a káros minőségszökkenésben, mint ahogyan az általánosan elfogadott. [3-7]

4. Kísérleti-fejlesztési munkánk gyakorlati eredményeként a Ga_{0,67}In_{0,33}N_{0,02}As_{0,98}/GaAs típusú ($\lambda=1340$ nm) lézer példáján először sikerült megvalósítani a lézerdióda két jelentős hangolási tényezőjének a hidrosztatikai nyomás és külső rezonátor (szükség esetén a kifejlesztett berendezés megengedte egyben a hőmérsékleti hangolás alkalmazását is), egyesítését [2].

Ennek alapján bebizonyítottam, hogy magasnyomás alatt, külső rezonátor segítségével a pozitív optikai erősítési tényező sávjának széles tartományában lehetséges lézerdiódát hangolni, és e rezonátor segítségével magas nyomás alatt is lehet jelentősen javítani a lézerek sugárzási módusstruktúráján (többmódusú dióda esetében egymódusú sugárzást nyerni).

A Ga_{0,67}In_{0,33}N_{0,02}As_{0,98}/GaAs alapú struktúrájánál a módus optikai erősítési tényező nyomástól való függésének tanulmányozása folytán kimutattam e tényező jelentős (33%) csökkenését a nyomás növekedésével (21 kbar-ig) [2].

5. Kísérleti berendezésünkkel magas hidrosztatikai nyomás- és hőmérséklet- változtatással az A^{III}B^V félvezető lézerdiódák alkalmazásával megvalósítottuk a széles hullámsávban hangolható koherens fényforrásokat (10-700nm, lézerstruktúrától függően). Ily módon többnyire kitölthetők azok a rések (a 400-2500 nm hullámhossztartományban), amelyek a ma gyártott félvezető lézerek sugárzási spektrumaiban észlelhetők [2,5-8,10-14]. Az In_{0,35}Ga_{0,65}As_{0,11}Sb_{0,89}/Al_{0,25}Ga_{0,75}As_{0,02}Sb_{0,98} ($\lambda=2400$ nm) struktúrájú lézerdióda példáján megmutattuk, hogy az ilyen fényforrás több száz órán keresztül stabilnak bizonyult, mind az intenzitás (10mW), mind pedig a kisugárzott fény módusstruktúrája tekintetében.

Vizsgálataim gyakorlati eredményeként megvalósítottam két, nyomással hangolt félvezető lézer által kisugárzott fény hullámhossz-változásának alkalmazását fizikai méréseknél.

Az InGaAs/GaAs alapú ($\lambda=980$ nm) lézer jól bevált mint manométer a magasnyomás mérések során más lézerek vizsgálatánál (nyomástartomány 0-22 kbar). A nyomásmérési pontosság - 0.2 kbar.

Magas nyomással hangolt többmódusú In_{0,35}Ga_{0,65}As_{0,11}Sb_{0,89}/Al_{0,25}Ga_{0,75}As_{0,02}Sb_{0,98} struktúrájú lézerdióda ($\lambda=2400$ nm) segítségével sikerült két gáz (NH₃, CH₄) abszorpciós detektálása a spektrum két, eléggé távoli tartományában (1.99-2.02 μ m

The investigation of p-T diagrams of the threshold current in laser structures based on InGaP/AlGaInP and AlGaAs/AlGaAs demonstrated that drift leakage dominates in these devices. It also allowed for the identification of an important parameter of the band structure of the laser, the energy barrier between the conduction band (minimum Γ) in the active layer and the conduction band (minimum X) in the cladding. The calculations of this barrier gave a result of 215 meV in InGaP/AlGaInP (660 nm), 282 meV in InGaP/AlGaInP (690 nm), and 300 meV in AlGaAs/AlGaAs (780 nm) respectively [10, 13].

It was demonstrated that in AlGaAs/AlGaAs laser structures (for example Sanyo $\lambda=785$ nm) at high pressure current-voltage characteristics are anomalous at laser threshold, which was unknown up until now. The model showed that this phenomenon can be explained by the leakage of electrons from the active layers to surrounding layers, and by the change in the resistance of these layers [9].

The measurements of the In_{0,35}Ga_{0,65}As_{0,11}Sb_{0,89}/Al_{0,25}Ga_{0,75}As_{0,02}Sb_{0,98} laser structure showed with high probability, that below 8 kbar the CHCC-type Auger effect, while above 8 kbar the CHSH-type Auger recombination dominates [8]. The presence of these types of Auger-effects was supported also by measurements of the In_{0,35}Ga_{0,65}As_{0,15}Sb_{0,85}/Al_{0,25}Ga_{0,75}As_{0,02}Sb_{0,98} ($\lambda=2500$ nm) and In_{0,37}Ga_{0,63}As_{0,12}Sb_{0,88}/Al_{0,25}Ga_{0,75}As_{0,02}Sb_{0,98} ($\lambda=2300$ nm) laser diodes.

The In_{0,09}Ga_{0,91}N/In_{0,02}Ga_{0,98}N lasers with undoped and doped barriers of the active region were measured under pressure. These measurements showed the existence of polarization-induced electric fields in such structures, also that Si doping of barriers at a level of 10¹⁹ cm⁻³ or well as injected charge carriers at a current density of 150 A/cm² is required for essential screening (full screening of polarization induced electric fields in nitride laser diodes can be accomplished close to lasing threshold (threshold current density- 12 kA/cm²)). But as the thresholds of both laser diodes are close to each other and pressure independent we can conclude that internal electric fields in such structures do not have such a large influence on lasing properties as it was generally considered. [3-7]

4. Using a semiconductor laser (for example Ga_{0,67}In_{0,33}N_{0,02}As_{0,98}/GaAs, $\lambda=1340$ nm), laser emission wavelength tuning by pressure and external resonator were combined simultaneously. It was shown that under high pressure it is possible to tune semiconductor laser emission across the full range of positive gain by the means of an external resonator [2]. The external resonator (also under high pressure) improves the quality of the mode structure:

tuning. The demonstration of wide spectral range high-pressure tunability (10-700 nm, structure dependent) of different quantum well lasers, that can be used to obtain laser wavelengths not available by other methods (400-2500 nm range).

- The investigation of the pressure dependences of optical and electrical parameters of the III-V semiconductor (GaN, InP, GaAs, GaSb) quantum well laser structures in a wide temperature range (emitted wavelength of light, stimulated emission, current-voltage characteristics, threshold current, modal structure). In conjunction with this, the investigation of qualitatively and quantitatively unfavourable phenomena for laser diodes, such as: carrier leakage from the active layer (structures based on AlGaInP, AlGaAs), Auger effects (structures based on GaSb), and the influence of internal electric fields (structures based on GaN).

RESULTS

1. The highly efficient extraction of laser diode light from high-pressure cell (optical fiber and graded index lens -sapphire window system) have been developed [1,2].

These systems helped to measure the pressure dependence of a range of parameters (emitted wavelength of light, stimulated emission, current-voltage characteristics, threshold current, modal structure, power-current characteristics). For some structures (e.g. InGaN/GaN – 415-420 nm, InGaAsSb/AlGaAsSb – 2300-2500 nm) such investigations were carried out for the first time [3-8], and for others the results provide additional information.

It should be noted that the applied experimental systems allowed the investigation of lasers in high pressure (0-22 kbar) in wide range of temperatures (100-300 K), while at the same time the efficiency of extraction of laser light from the pressure cell was between 50% and 75%. It must be considered as a pioneering accomplishment in applied physics [1, 2].

2. The pressure coefficients of tunability of typical quantum well laser structures have been measured (InGaN/GaN, InGaP/AlGaInP, AlGaAs/AlGaAs, InGaAs/GaAs, InGaAsP/InP, GaInNAs/GaAs, InGaAsSb/AlGaAsSb) in the pressure range 0-22 kbar [2, 5-8,10-14].

3. High-pressure investigations of semiconductor lasers helped to identify the characteristics of unfavorable phenomena in laser diodes: carrier leakage from the active layer, Auger recombination, and internal electric fields.

és 2.31-2.32 μm között), ami más hangolási módszerrel (hőmérséklettel, áramszint-változással, külső rezonátor alkalmazásával) nehezen lett volna kivitelezhető.

IRODALOMJEGYZÉK

1. **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, and W. Trzeciakowski, A Fiber Feedthrough for a Semiconductor Laser Located in High Hydrostatic Pressure cell, *Instruments and Experimental Techniques*, **47**(3), (2004), 422.
2. A. Bercha, F. Dybala, K. Komorowska, P. Adamiec, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, J. A. Gupta, P. J. Barrios, G. J. Pakulski, A. Delage, Z. R. Wasilewski, Pressure tuning of GaInNAs laser diodes in external cavity, *Proc. SPIE* **5722**, (2005), 565.
3. G. Franssen, **R. Bohdan**, S. Lepkowski, W. Trzeciakowski, T. Suski, and P. Perlin, Two methods of direct investigation of piezoelectric fields in InGaN/GaN quantum well light emitting diodes, Abstracts, XXXII International school on the physics of semiconducting compounds Jasowiec, (2003), 123.
4. G. Franssen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, L.H. Dmowski, S.P. Lepkowski, H. Teisseire, P. Prystawko, R. Czernecki, M. Leszczynski, I. Grzegory, and S. Porowski, Hydrostatic pressure as an effective tool for studying built-in electric fields in group III-nitride light emitting quantum structures, Abstracts, XXXIII International school on the physics of semiconducting compounds Jasowiec (2004), 127.
5. T. Suski, G. Franssen, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, P. Prystawko, M. Leszczynski, I. Grzegory, S. Porowski, A pressure-tuned blue-violet InGaN/GaN laser diode grown on bulk GaN crystal, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, (23 Feb. 2004), 1236.
6. G. Franssen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, W. Trzeciakowski, I. Makarowa, P. Prystawko, M. Leszczynski, I. Grzegory, and S. Porowski, S.Kökényesi, Fully-screened polarization-induced electric fields in blue/violet InGaN/GaN light-emitting grown on bulk GaN, *Appl. Phys. Lett.* **87**, (2005), 041109.
7. G. Franssen, T. Suski, P. Perlin, **R. Bohdan**, A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, W. Trzeciakowski, K. Kazlauskas, G. Tamulaitis, A. Žukauskas, R. Czernecki, M. Leszczynski, and I. Grzegory, Screening of built-in electric fields in group III-nitride laser diodes observed by means of hydrostatic pressure, *Phys. Stat. Sol. (c)* **2**, (2005), 1019.
8. P. Adamiec, A. Salhi, **R. Bohdan**, A. Bercha, F. Dybala, W. Trzeciakowski, Y. Rouillard, A. Jouillie, Pressure-Tuned InGaAsSb/AlGaAsSb diode laser with 700nm tuning range, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, (2004), 4292.

9. P.G. Eliseev, P. Adamiec, A. Bercha, F. Dybala, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Anomalous differential resistance change at the oscillation threshold in Quantum-well laser diodes, *IEEE J. Quantum Electron.* **41**, (2005), 9.
10. P. Adamiec, T. Swietlik, **R. Bohdan**, A. Bercha, F. Dybala, W. Trzeciakowski, The effect of pressure and temperature on AlGaInP and AlGaAs laser diodes, *Acta Physica Polonica A*, **103**, (2003), 585.
11. P. Adamiec, F. Dybala, A. Bercha, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, M. Osinski, Pressure tuning of high-power laser diodes, *Proc.SPIE*, **4973**, (2003)158.
12. F. Dybala, P. Adamiec, A. Bercha, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Wavelength tuning of laser diodes using hydrostatic pressure, *Proc. SPIE*, **4989**, (2003) 181.
13. A. Bercha, P. Adamiec, F. Dybala, **R. Bohdan**, W. Trzeciakowski, Effect of pressure and temperature on AlGaInP and AlGaAs diode lasers, *Proc. SPIE*, **4986**, (2003)613.
14. P. Adamiec, F. Dybala, A. Bercha, R. Bohdan, W. Trzeciakowski, Pressure tuning of high-power laser diodes, *Proc.SPIE*, **5120**, (2003), 172.

INTRODUCTION

It is well known that electric and optical properties of semiconductors are influenced by electric and magnetic fields, pressure and temperature. This influence is especially strong in low-dimensional structures. A lot of research is still required however, to interpret the influence of characteristic parameters (e.g. band structure, electron transitions, refractive index, gain), and external parameters (e.g. temperature, magnetic field, pressure) on given devices. We have to remember also that semiconductor materials applied today have limited possibilities for the development of new laser structures.

Current investigations of semiconductor laser structures are directed towards the improvement of laser parameters and also the increase in application possibilities. From the perspective of basic research investigating the influence of different parameters simultaneously could be a large step ahead. This would allow for a better identification of semiconductor material properties and quantum structures constructed on the basis of these materials.

Together with the fact that hydrostatic pressure has a large influence on selected parameters (wavelength of emitted light, threshold current) of quantum well laser structures, pressure-dependent measurements are expected to solve problems related to basic research, as well as practical applications.

AIMS

Simultaneous investigations of the influence of hydrostatic pressure, temperature and external resonator on electronic processes in quantum well lasers constructed from III-V semiconductor materials were performed in this work. These processes determine the optical and electric properties of the given laser type. The properties of semiconductor materials as well as of laser diodes built on their basis were determined this way. Among these properties there are band structure and other important parameters (band gap, gain, wavelength of emitted light, etc). Other phenomena which occur in these structures (carrier leakage from the active layer, the Auger effect, internal electric fields) and their dependence on applied pressure have also been investigated.

The main goals of this work are:

- The development of optical measurement methods under high-pressure conditions: the realization of highly efficient extraction of the laser diode light (optical fibre and sapphire window system) from high-pressure cells. Merging different lasers tuning methods one system: temperature tuning, hydrostatic pressure tuning, and external resonator



*Magas nyomás hatása a kvantumpotenciál-gödör-
lézerstruktúrák elektronfolyamataira*

*Influence of high pressure on electron processes in
quantum well laser structures*

doktori (PhD) értekezés tézisei

Bohdan Roland

Debreceni Egyetem
Természettudományi kar
Debrecen, 2006

*Magas nyomás hatása a kvantumpotenciál-gödör-
lézerstruktúrák elektronfolyamataira*

Bohdan Roland

Debrecen, 2006