

Impulsinio tolydaus lydalo sudėties keitimo būdu užaugintų parabolinių kvantinių duobių fotoluminescencijos tyrimas pasitelkus trupmeninio matumo erdvės modelį

Investigation of parabolic quantum wells grown using pulsed analog alloy grading technique by means of photoluminescence in combination with fractional-dimensional space approach

Mindaugas Karaliūnas¹, Evelina Dudutienė¹, Aurimas Čerškus^{1,2}, Dominykas Dumbrys¹, Simona Pūkienė¹,
Andres Udal³, Renata Butkutė¹, Gintaras Valušis¹

¹Optoelektronikos skyrius, Fizinių ir technologijos mokslų centras, Saulėtekio al. 3, 10257 Vilnius, Lietuva

²Mechatronikos, robotikos ir skaitmeninės gamybos katedra, Mechanikos fakultetas, Vilnius Tech, Saulėtekio al. 11,
10223 Vilnius, Lietuva

³Department of Software Science, Talino Technikos Universitetas, *Ehitajate* g. 5, 19086 Talinas, Estija
mindaugas.karaliunas@ftmc.lt

Šiuolaikiniams optoelektronikos prietaisams, tokiems kaip infraraudonosios (IR) ir terahercų (THz) dažnių elektromagnetinių bangų spektro srities koherentiniams ir nekoherentiniams mažų matmenų šaltiniams bei detektoriams, reikalingi nauji sprendimai, kurie leistų padidinti prietaisų našumą ir patikimumą. Parabolines kvantinės duobės (PKD) dėl savo unikalių savybių yra vienos iš patraukliausių dizaino kandidačių, taikytinų aktyviojoje prietaiso terpėje. Apibendrinta Kohno teorema [1], kuri yra eksperimentiškai paliudyta [2], numato, kad PKD osciluoja ties savuoju dažniu $\omega_0 = \sqrt{8V_b/(l_w^2 m^*)}$, kuris priklauso tik nuo PKD barjerų aukščio V_b , pločio l_w ir krūvininkų efektinės masės m^* , tačiau nepriklauso nuo elektronų tarpusavio sąveikos energijos, krūvininkų skaičiaus duobėje ar PKD potencialo pokyčių dėl krūvininkų tankio kitimo. Šiame darbe buvo sumodeliuota, pagaminta ir ištyrinėta 52 nm pločio GaAs/AlGaAs PKD su 30% Al barjeruose ir impulsiniu tolydaus Al kiekiu kitimu PKD šlaituose iki 0% PKD centre.

Panaudojus skaitmeninį stacionarios vienmatės Šriodingerio lygties sprendimo metodą, buvo sumodeliuotas PKD dizainas [3]. Sprendinys leido nustatyti energijos juostų struktūrą tiek elektronams laidumo juostoje, tiek sunkioms ir lengvoms skylutėms valentinėje juostoje. Iš kvantmechaninio sprendinio buvo suskaičiuoti tikėtini fotoluminescencijos (FL) spektrai, įvertinant tarpjuostinių šuolių tikimybes, būsenų tankį ir krūvininkų statistinį pasiskirstymą. PKD buvo užauginta molekulinų pluoštelių epitaksijos būdu pritaikant tolydaus Al kiekio x keitimą epitaksinio sluoksnių auginimo kryptimi z nuo 30% AlGaAs barjere iki 0% gryno GaAs duobės centre ir vėl iki 30% AlGaAs barjere pagal parabolinį dėsnį $x(z) = x_b ((2(z - z_0)/l_w)^2 + c_q (2(z - z_0)/l_w)^4)$ su ketvirto laipsnio nario pataisa, atsveriančia aukštesnės eilės krūvininkų efektinės masės priklausomybę nuo Al kiekio pokyčio [4]. Preciziškai epitaksijai buvo pasirinktos ženkliai mažesnės auginimo spartos, o, nustatant auginimo laiką, atsižvelgta į auginimo spartos pokytį. Al šaltinio temperatūros stabilizacijai ir III grupės atomų difuzijai užtikrinti, buvo daromos pauzės. Užaugintos PKD kokybė buvo įvertinta peršviečiamuoju skenuojančiuoju elektronų mikroskopu ir FL spektroskopija, pasitelkus trupmeninio matumo erdvės modelį [4].

Tyrimas atskleidė, kad tikslus parabolinis potencialas duobėje buvo įgyvendintas dėl III grupės atomų difuzijos kristalinėje gardelėje ir dėl atominių sluoksnių visiškos užpildos pauzių metu, eksponuojant bandinį As sraute. FL rezultatų analizė trupmeninio matumo erdvės modeliu leido nustatyti juostų prigimtį bei įvertinti dimensiskumą, kurio vertė didėja nuo 2,46 iki 2,87 šuoliams tarp aukštesnių PKD sužadintų būsenų. Pildant PKD būsenas fotogeneruotais krūvininkais, FL spektruose buvo stebimos net 5 vienodais tarpais išsidėsčiusios PKD energijų pajuostės tiek laidumo, tiek valentinėje juostose. FL juostos iš paskirų sužadintų PKD būsenų buvo išskiriamos net iki 240 K temperatūros. Tyrimai atskleidė puikią sumodeliuoto dizaino ir išauginto darinio spindulinių savybių dermę. Gauti rezultatai leidžia suponuoti, kad pasiūlytas auginimo būdas yra daug žadantis taikant PKD naujose kompleksinėse kvantinėse sistemose naujiems optoelektronikos prietaisams, išnaudojant tiek tarpjuostinius šuolius IR spektro srityje [5], tiek ir tarpjuostinius šuolius THz spektro srityje [6].

Padėka: Dominyko Dumbrys indėlis finansuotas bendrai Europos socialinio fondo lėšomis (projekto Nr. 09.3.3-LMT-K-712-25-0224) pagal dotacijos sutartį su Lietuvos mokslo taryba (LMTLT).

Reikšminiai žodžiai: parabolines kvantinės duobės, impulsinis tolydaus lydalo sudėties keitimo būdas, trupmeninio matumo erdvės modelis, fotoluminescencija, kvantiniai dariniai, nanotechnologija

Literatūra

- [1] W. Kohn, Phys. Rev. **123**, 1242 (1961). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.123.1242>
- [2] L. Brey, N. F. Johnson, B. I. Halperin, Phys. Rev. B **40**, 10647(R) (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.10647>
- [3] M. Karaliūnas, A. Udal, G. Valušis, Lith. J. Phys. **60**(2), 113 (2020). <https://doi.org/10.3952/physics.v60i2.4226>
- [4] M. Karaliūnas, E. Dudutienė, A. Čerškus, J. Pagalys, S. Pūkienė, A. Udal, R. Butkutė, G. Valušis, J. Lumin. **239**, 118321 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118321>
- [5] S. Pūkienė, M. Karaliūnas, A. Jasinskas, E. Dudutienė, B. Čechavičius, J. Devenson, R. Butkutė, A. Udal, G. Valušis, Nanotechnology **30**, 455001 (2019). <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab36f3>
- [6] M. Karaliūnas, J. Pagalys, V. Jakštas, R. Norkus, A. Urbanowicz, J. Devenson, R. Butkutė, A. Udal, G. Valušis, Proc. SPIE **11124**, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications X, 1124209 (2019). <https://doi.org/10.1117/12.2528428>