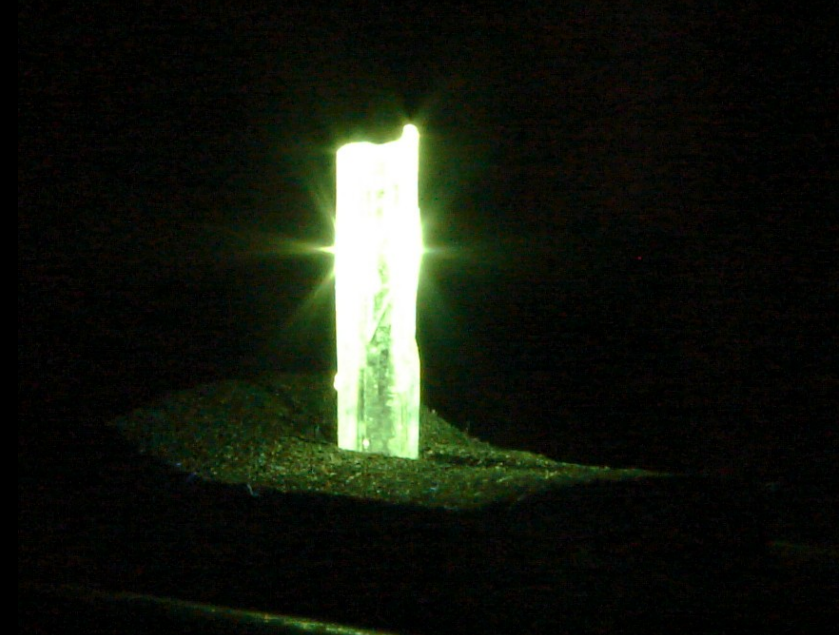




Mindaugas Karaliūnas



Optoelektronikos prietaisams skirtų įvairialyčių ZnO darinių tyrimas spektroskopijos metodais

Daktaro disertacijos pranešimas

Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08 T)

Darbo vadovas: prof. habil. dr. Edmundas Kuokštis

Vilnius, 2013-09-20

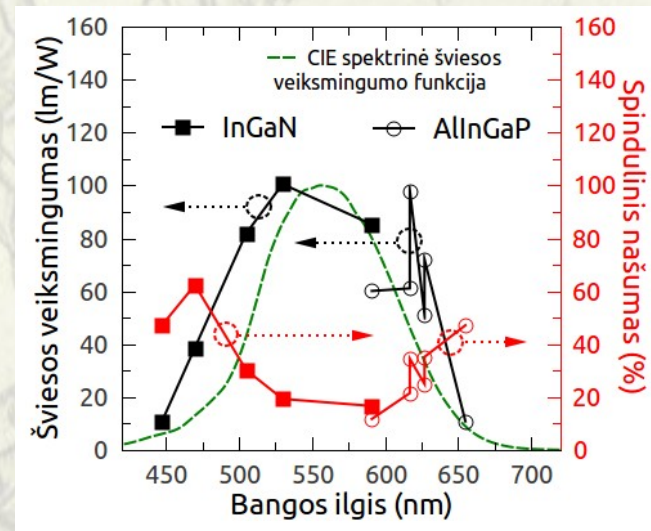
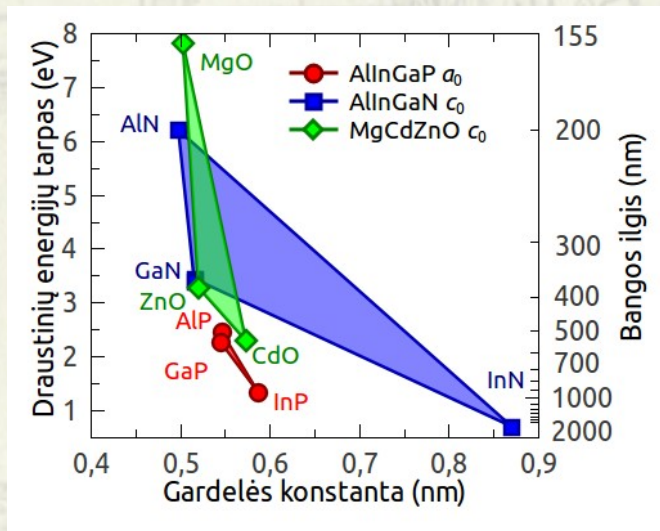
Daktaro disertacija paruošta atliekant tyrimus Vilniaus universiteto Taikomųjų mokslų institute ir Fizikos fakulteto Puslaidininkių fizikos katedroje nuo 2008 metų iki 2012 metų, vykdant projektą "Nitridų ir oksidų puslaidininkinių nanodarinių energinių technologijų taikymams tyrimai" pagal Lietuvos-Latvijos-Taivano trišalio bendradarbiavimo mokslinių tyrimų programą. Dalis rezultatų buvo pasiekti stažuotės Nacionalinio Taivano universiteto Fotonikos ir optoelektronikos institute nuo 2010 metų gruodžio iki 2011 metų vasario pagal Lietuvos mokslų tarybos finansuojamą programą "Doktorantų stažuotės užsienio mokslo centruose" (sutarties Nr. SDS-2010-042).



Motyvacijos pagrindimas

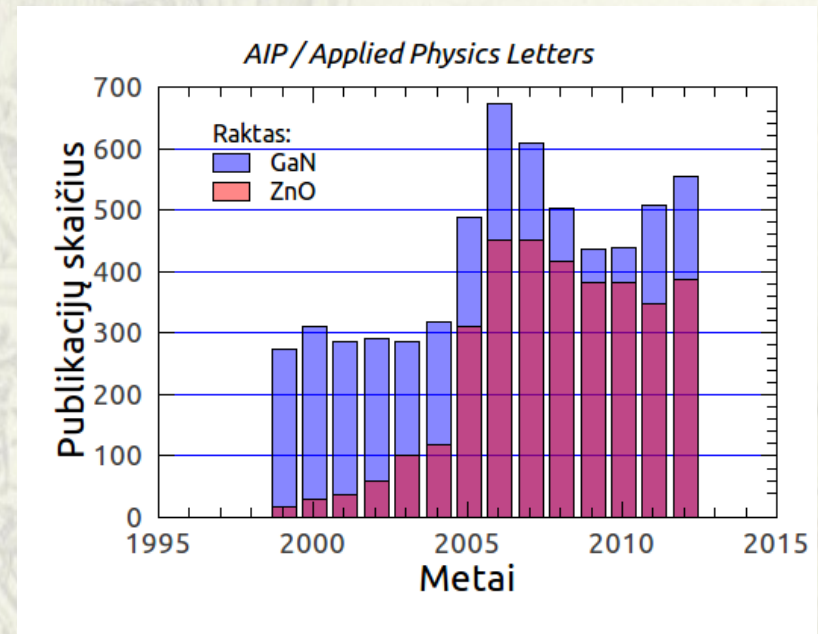
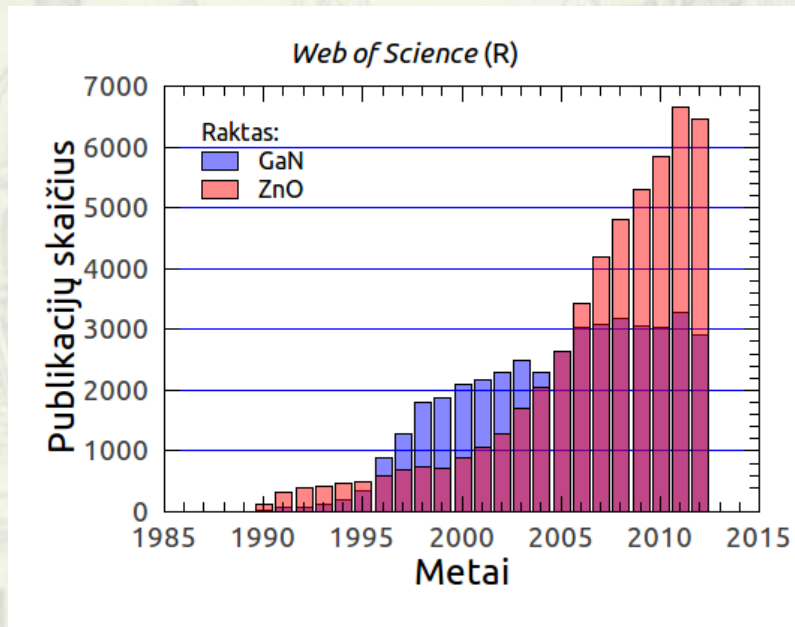


1 pav. Mėlynas šviesos diodas, ultravioletinis lazerinis diodas ir mėlynas lazerinis diodas DVD grotuve.



2 pav. Draustinių energijų tarpo inžinerija ir žalių šviestukų spindulinio našumo „duobė“.

Darbo aktualumas



3 pav. Publikacijų skaičiaus pagal raktinius paieškos žodžius „ZnO“ ir „GaN“ pasiskirstymas pagal metus duomenų bazėse www.webofknowledge.com ir www.aip.com (duomenys surinkti 2013-01-22).

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas:

Šio darbo tikslas yra ištirti ZnO, MgZnO, CdZnO įvairialyčius ir kvantinius darinius naudojant spektroskopijos metodus ir įvertinti darinių optinę kokybę atsižvelgiant į ryšį su kristalų struktūrinėmis savybėmis ir siejant su taikymo galimybėmis optoelektronikos srityje.

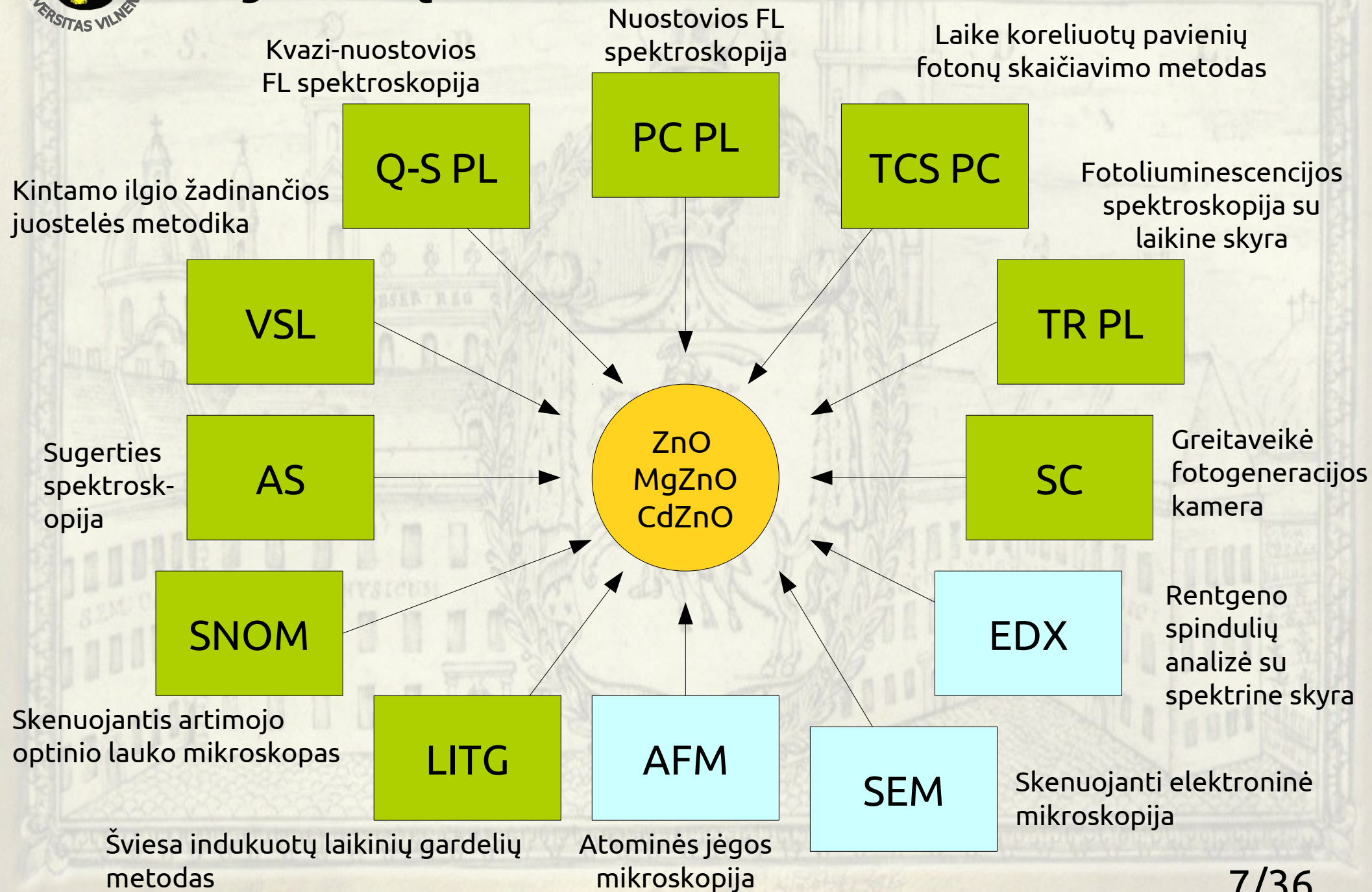
Darbo uždaviniai:

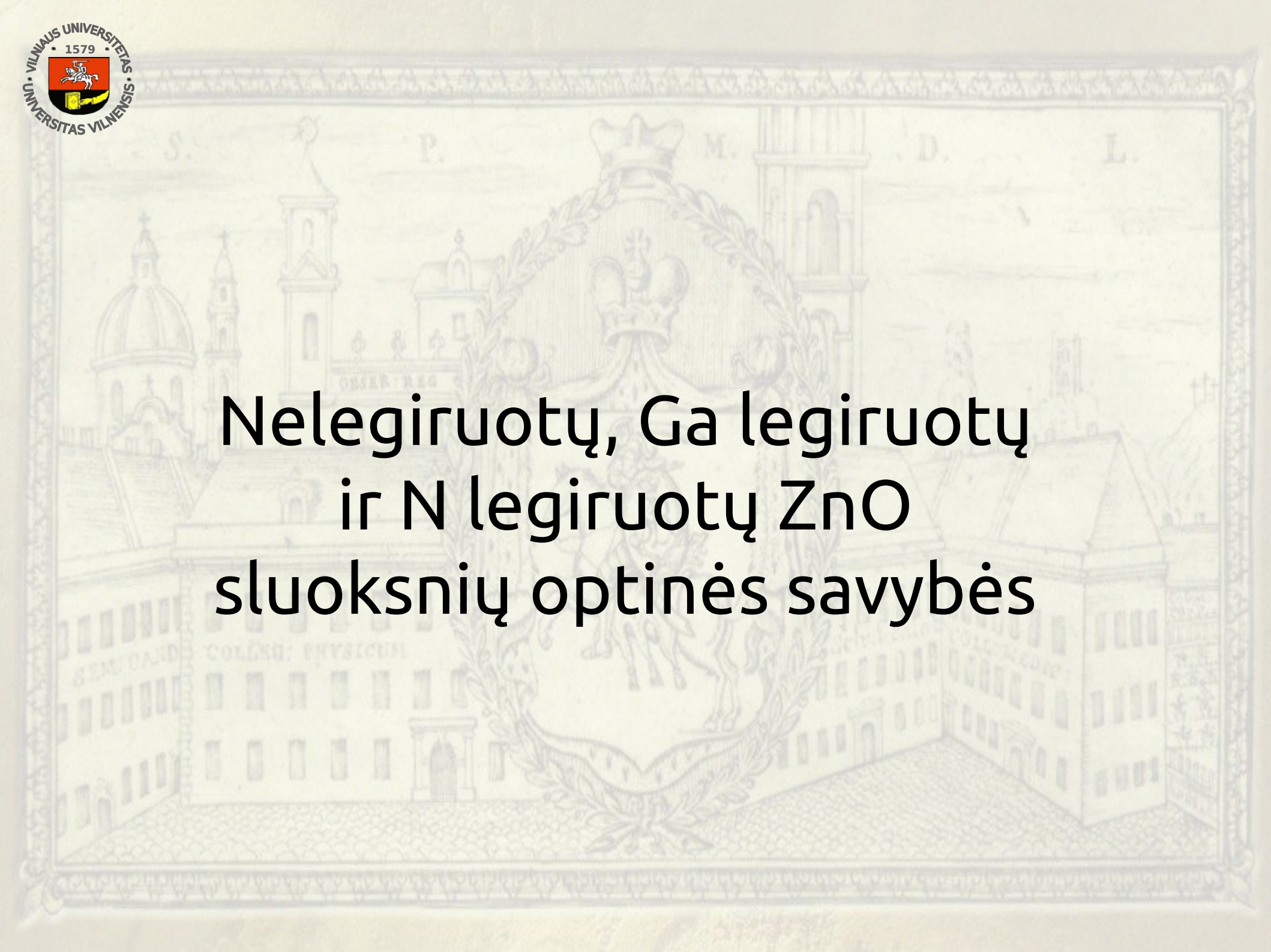
1. Naudojant spektroskopijos metodus, charakterizuoti nelegiruotus ZnO, Ga legiruotus ZnO ir N legiruotus ZnO plonuosius sluoksnius, nustatant jų optines savybes ir susiejant su kristaline sluoksnių kokybe ir heteroepitaksinių sluoksnių struktūra.
2. Ištirti Mg kiekio įtaką molekulinės epitaksijos būdu ant safyro padėklų užaugintų MgZnO epitaksinių sluoksnių optinėms ir struktūrinėms savybėms.
3. Charakterizuoti CdZnO/ZnO daugialypių kvantinių duobių darinius, paruoštus žaliems ($\lambda = 505 \text{ nm}$) šviesos diodams, ir nustatyti pagrindinius veiksnius, sąlygojančius optines išėjimo charakteristikas.

Darbo mokslinis naujumas

1. Netamprios eksitonų sąveikos modelis, įskaitantis lokalizuotų eksitonų dalyvavimą sąveikoje, pritaikytas skaičiuojant P -juostą, stebimą ZnO fotoluminescencijos spektruose. Laisvų eksitonų sąveika su lokalizuotais lemia P -juostos smailės padėties poslinkį į mažesniųjų energijų pusę ir paaiškina juostos padėties nuokrypį nuo teorinės padėties spektre.
2. Išmatuota dvigubos S -formos fotoluminescencijos spektro smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros. Dvigubas mėlynasis poslinkis fotoluminescencijos smailės padėties priklausomybėje nuo temperatūros yra aprašomas pirmą kartą ir aiškinama dvilypėmis potencialinio lauko fluktuacijomis su skirtinga vidutine lokalizacijos energija.
3. Išmatuotos fotoluminescencijos gesimo trukmės molekulinės epitaksijos būdu užaugintoms CdZnO/ZnO daugialypių kvantinių duobių aktyviosioms sritims žalių ties 505 nm bangos ilgiu spinduliuojančių šviestukų taikymams. CdZnO/ZnO daugialypių kvantinių duobių darinių optinės savybės lyginamos su atitinkamų įprastų InGaN/GaN daugialypių kvantinių duobių darinių optinėmis savybėmis.

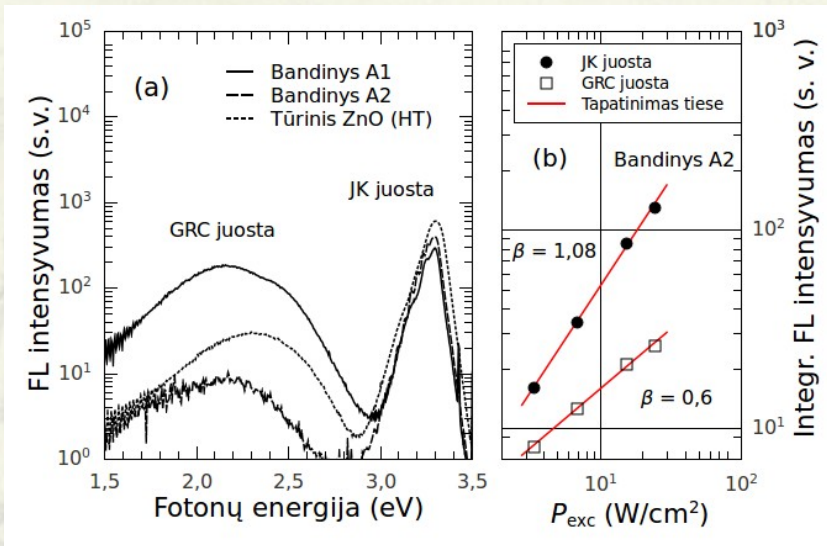
Tyrimų metodikos



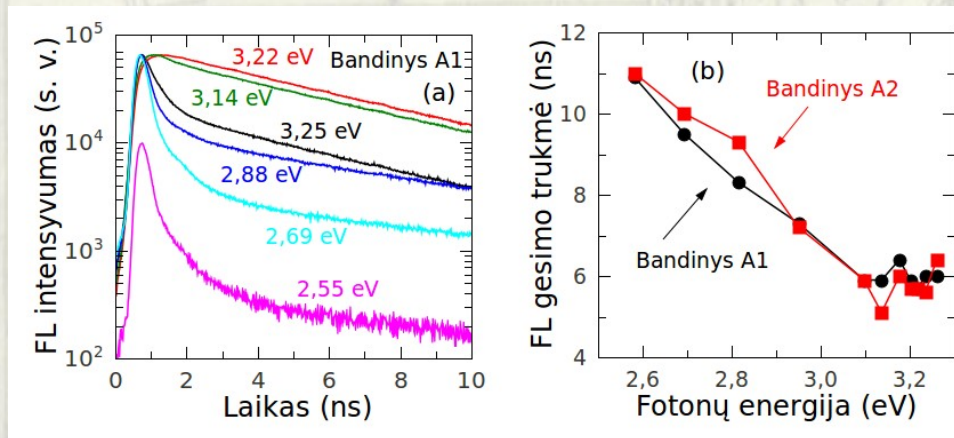


Nelegiruotų, Ga legiruotų ir N legiruotų ZnO sluoksnių optinės savybės

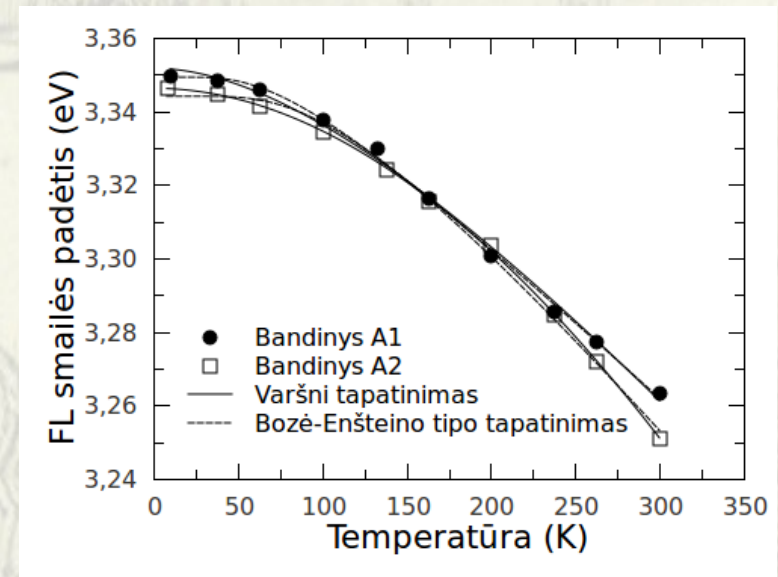
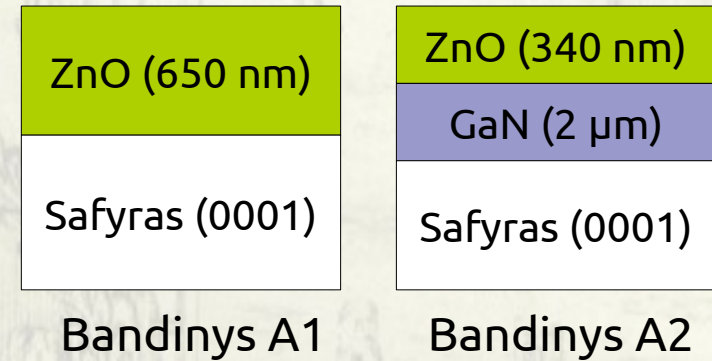
ZnO epitaksiniai sluoksniai



4 pav. Nelegiruotų ZnO epitaksinių sluoksnių fotoluminescencijos spektrų palyginimas su tūrinio ZnO.

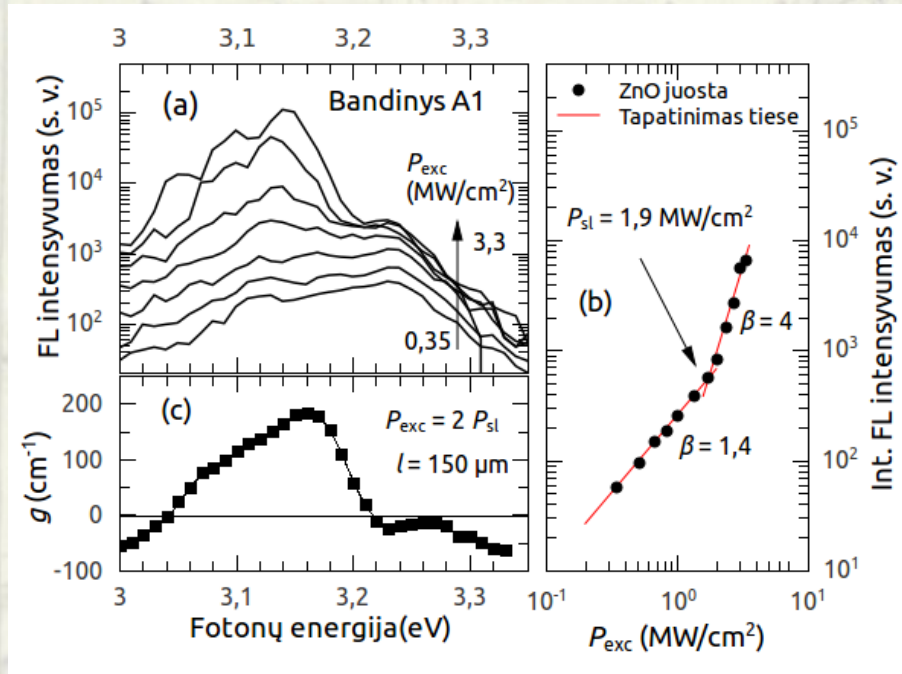


6 pav. Fotoluminescencijos gesimo trukmės ZnO epitaksiniams sluoksniams išmatuotos laike koreliuoto fotonų skaičiavimo metodu.

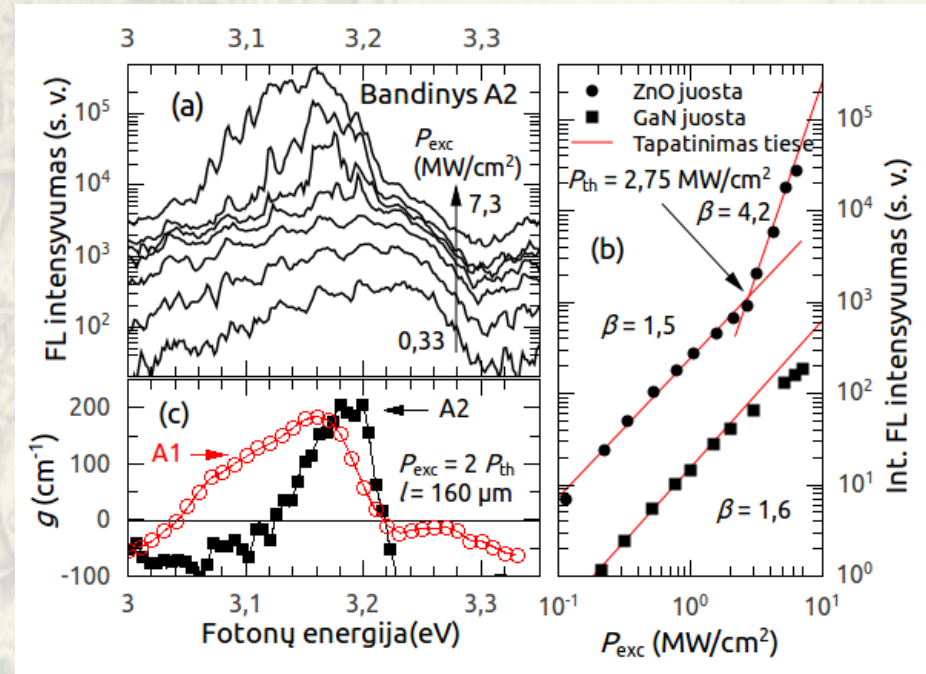


5 pav. ZnO epitaksinių sluoksnių fotoluminescencijos smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros.

ZnO epitaksiniai sluoksniai

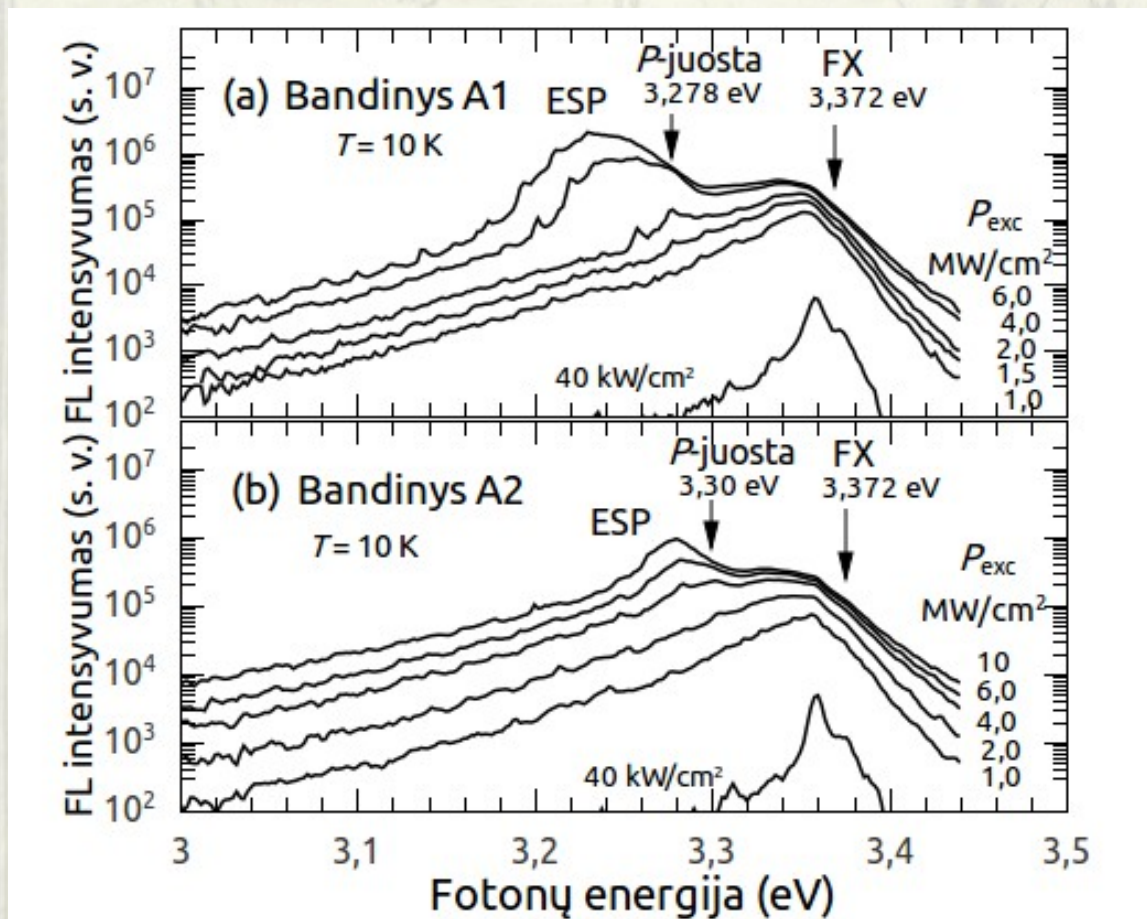


7 pav. a) Didelio sužadavimo fotoluminescencijos spektrai, b) priverstinės spinduliuotės slenkstis ir c) optinio stiprinimo koeficiento spektras bandiniui A1.

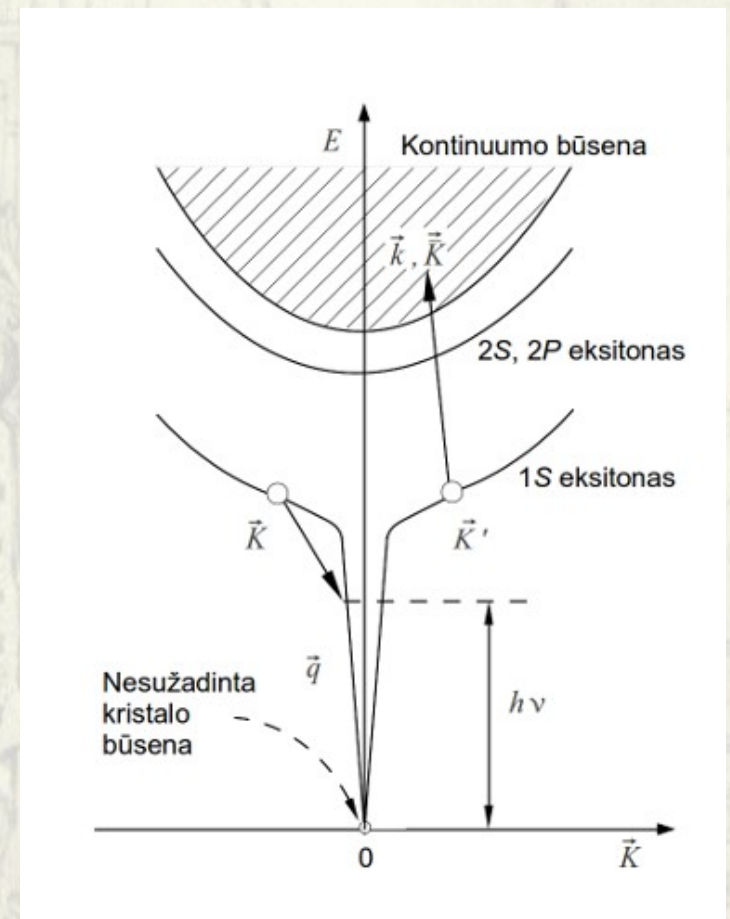


8 pav. a) Bandiniui A2 didelio sužadavimo fotoluminescencijos spektrai, b) priverstinės spinduliuotės slenkstis ir c) optinio stiprinimo koeficiento spektrai bandiniams A1 ir A2.

ZnO epitaksiniai sluoksniai



9 pav. Fotoluminescencijos spektrai ties priverstinės spinduliuotės slenksčiu. Keliant sužadinimą, atsiranda nauja priverstinės spinduliuotės linija, tačiau tikėtinos P -juostos padėtis prieš Moto virsmą skiriasi bandiniams A1 (a) ir A2 (b).



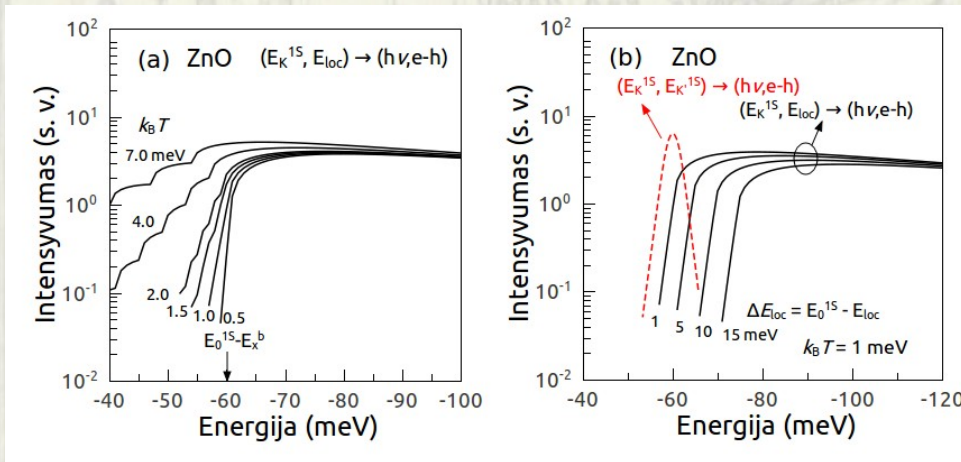
10 pav. Netamprios dviejų laisvų eksitonų sąveikos, lemiančios P -juostą fotoluminescencijos spektre, schema.

Eksitonų sąveikos modelis

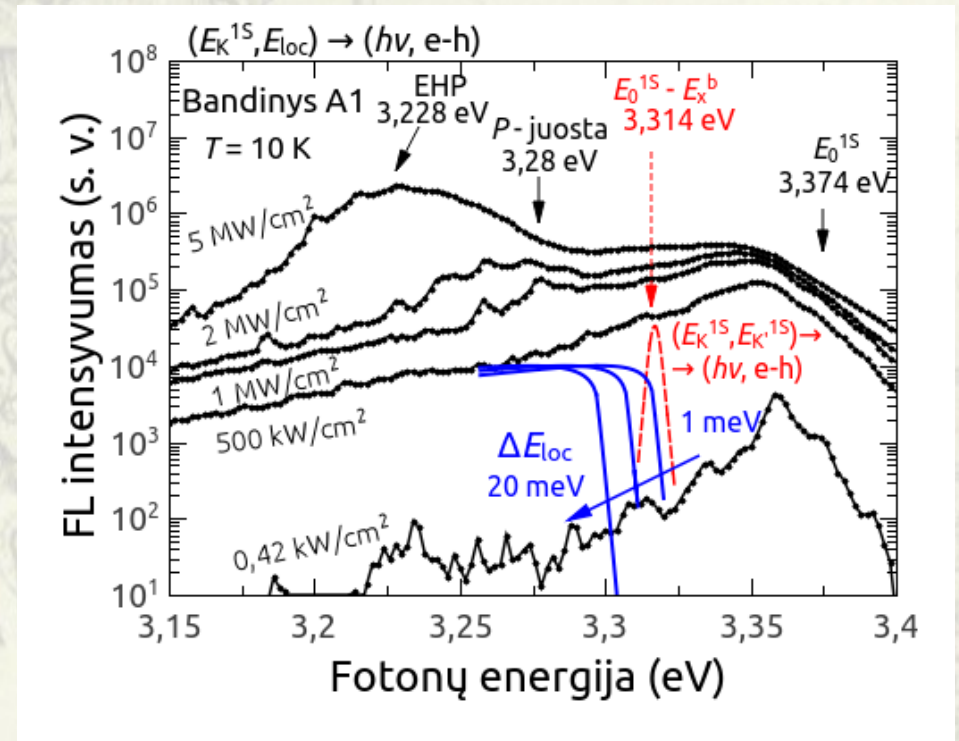
$$(E_K^{1S}, E_{loc}) \rightarrow (h\nu, e-h)$$

$$I(h\nu) = \frac{2^{11}}{\sqrt{\pi} \hbar^3} \frac{\mu^{3/2}}{VM^{1/2}} a_0^3 (a_{1S:1S}^{1S:e-h})^2 N_{1S} N_{loc} |A'|^2 \frac{h\nu \rho(h\nu)}{(E_0^{1S} - h\nu)^2} \int_0^\infty d\xi \frac{\xi^{1/2}}{(1 + \xi/E_x^b)^4} \int_0^\infty dt t^{1/2} e^{-[E_{loc} - E_x^b - h\nu - \xi + t k_B T]^{1/2}}.$$

$$E_{loc} = E_0^{1S} - \Delta E_{loc}$$

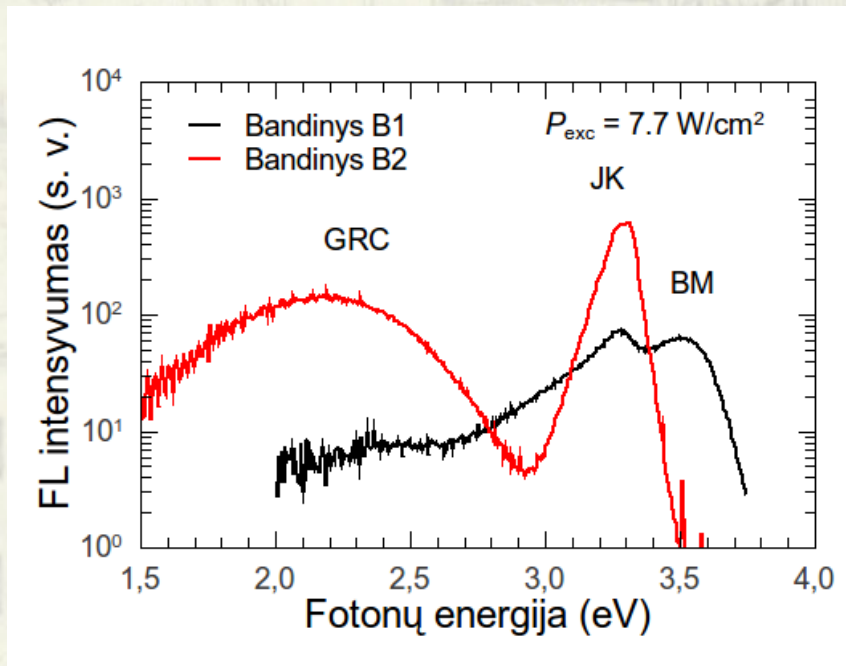
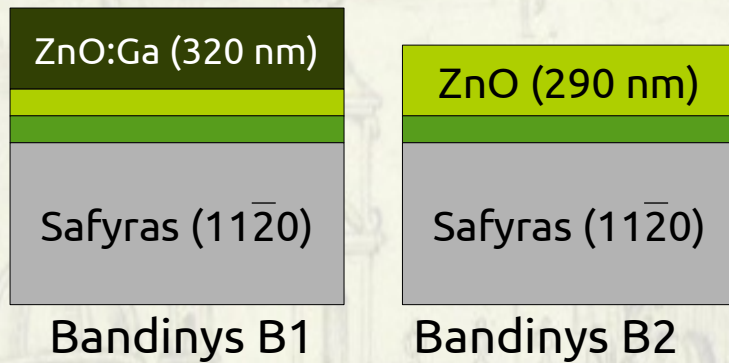


11 pav. Suskaičiuoti P -juostos fotoluminescencijos spektrai, sąveikaujant laisviems ir lokalizuotiems eksitonams: a) spektrų priklausomybė nuo temperatūros ir b) spektro priklausomybė nuo eksitono lokalizacijos energijos.

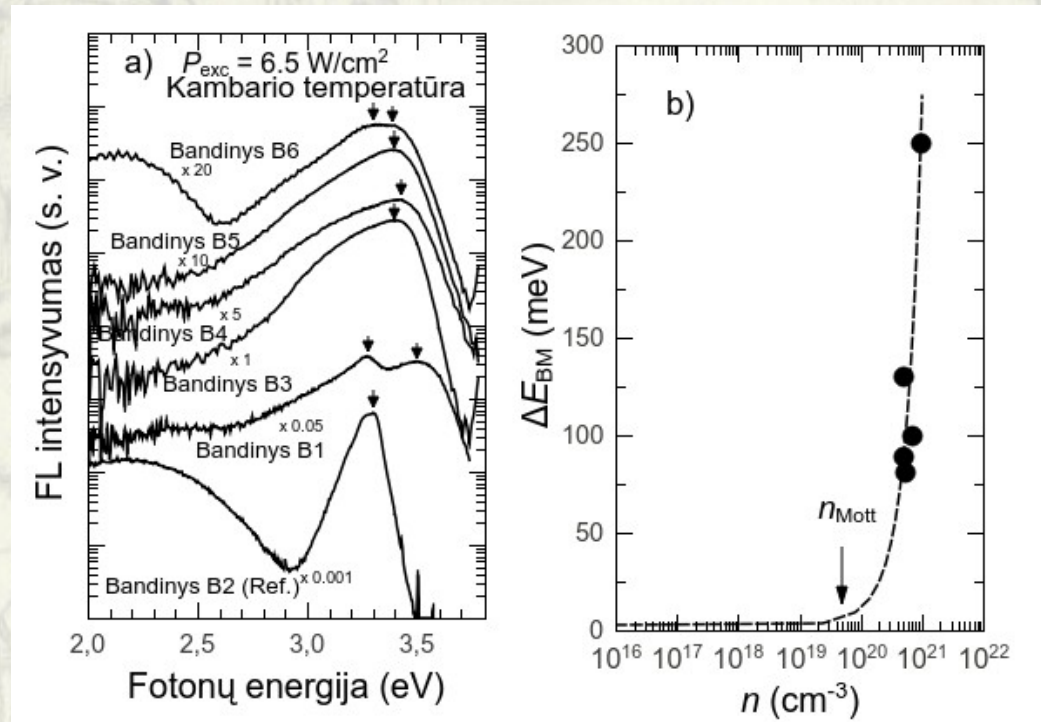


12 pav. Suskaičiuotų teorinių P -juostos spektrų palyginimas su eksperimentiniais ZnO fotoluminescencijos spektrais.

ZnO:Ga epitaksiniai sluoksniai

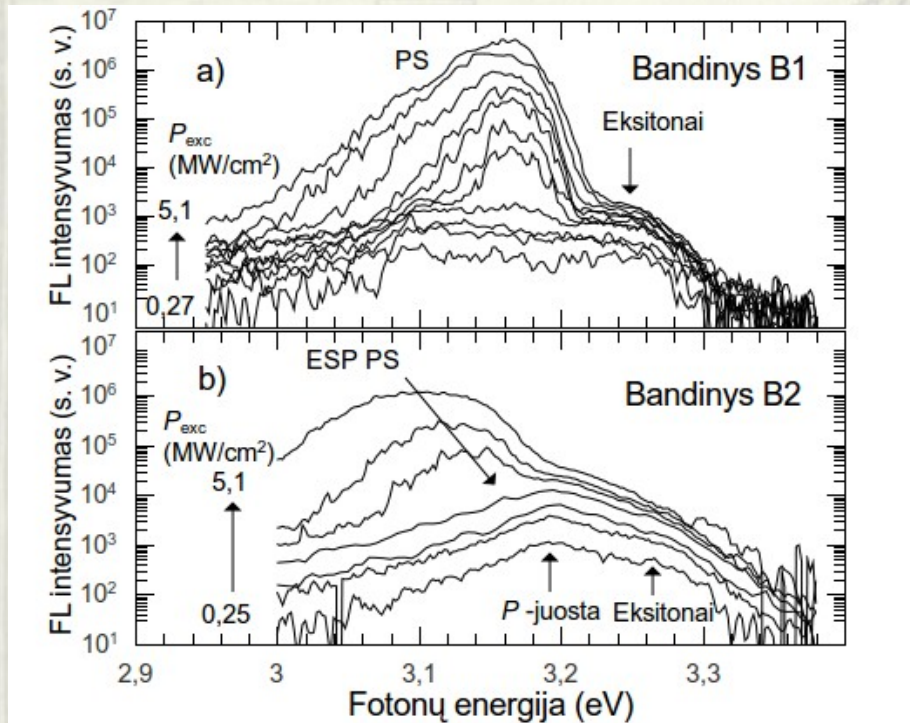


13 pav. ZnO:Ga epitaksinio sluoksnio fotoluminescencijos spektras su eksitonų ir elektronų skylių plazmos juostomis.

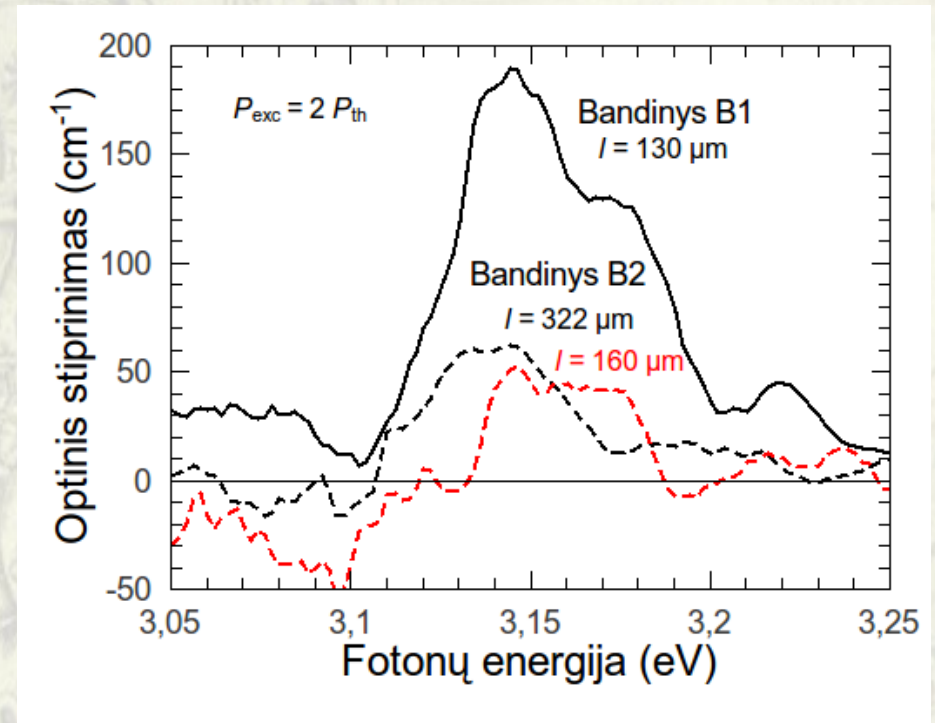


14 pav. a) ZnO:Ga epitaksinių sluoksnių ant įvairių darinių fotoluminescencijos spektrai ir b) energijos poslinkio dėl Buršteino-Moso efekto priklausomybė nuo krūvininkų tankio.

ZnO:Ga epitaksiniai sluoksniai

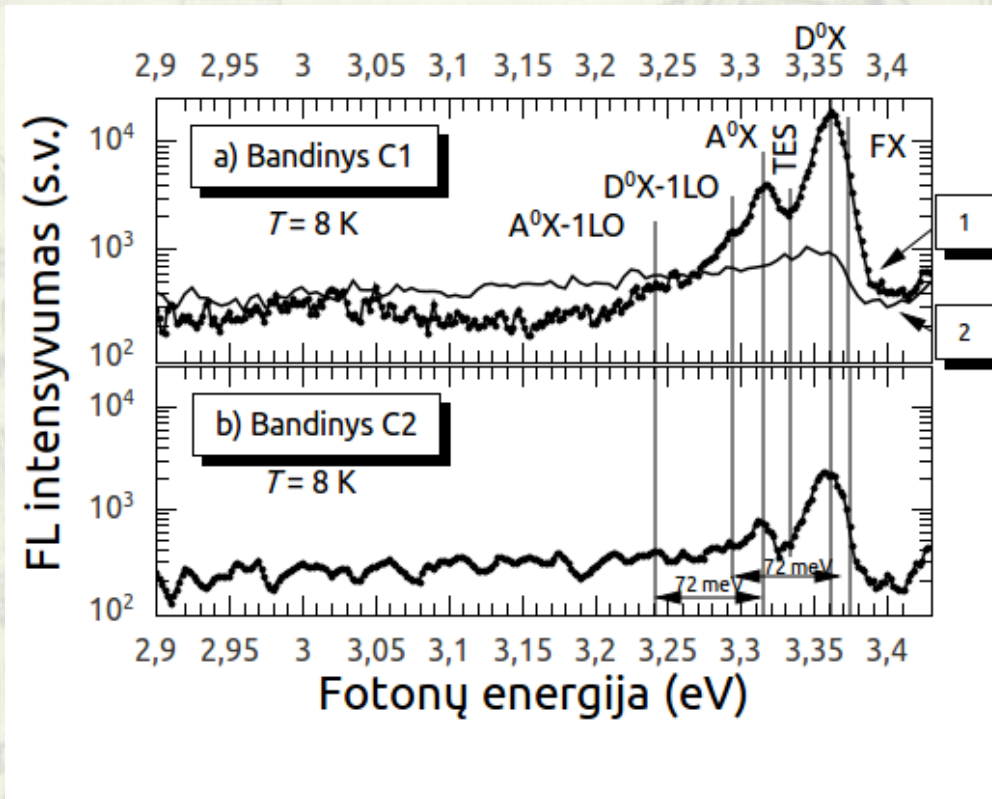


15 pav. Fotoluminescencijos spektrų priklausomybė nuo sužadinimo bandiniams B1 (a) ir B2 (b). Nustatyti atitinkami priverstinės spinduliuotės žadinimo slenksčiai yra 860 ir 1200 kW/cm².



16 pav. Optinio stiprinimo koeficiento spektrų, išmatuotų kintamo ilgio žadinančios juostelės metodu, palyginimas bandiniams B1 ir B2.

ZnO:N plonieji sluoksniai



ZnO:N

Stiklas

Bandinys C1

ZnO:N

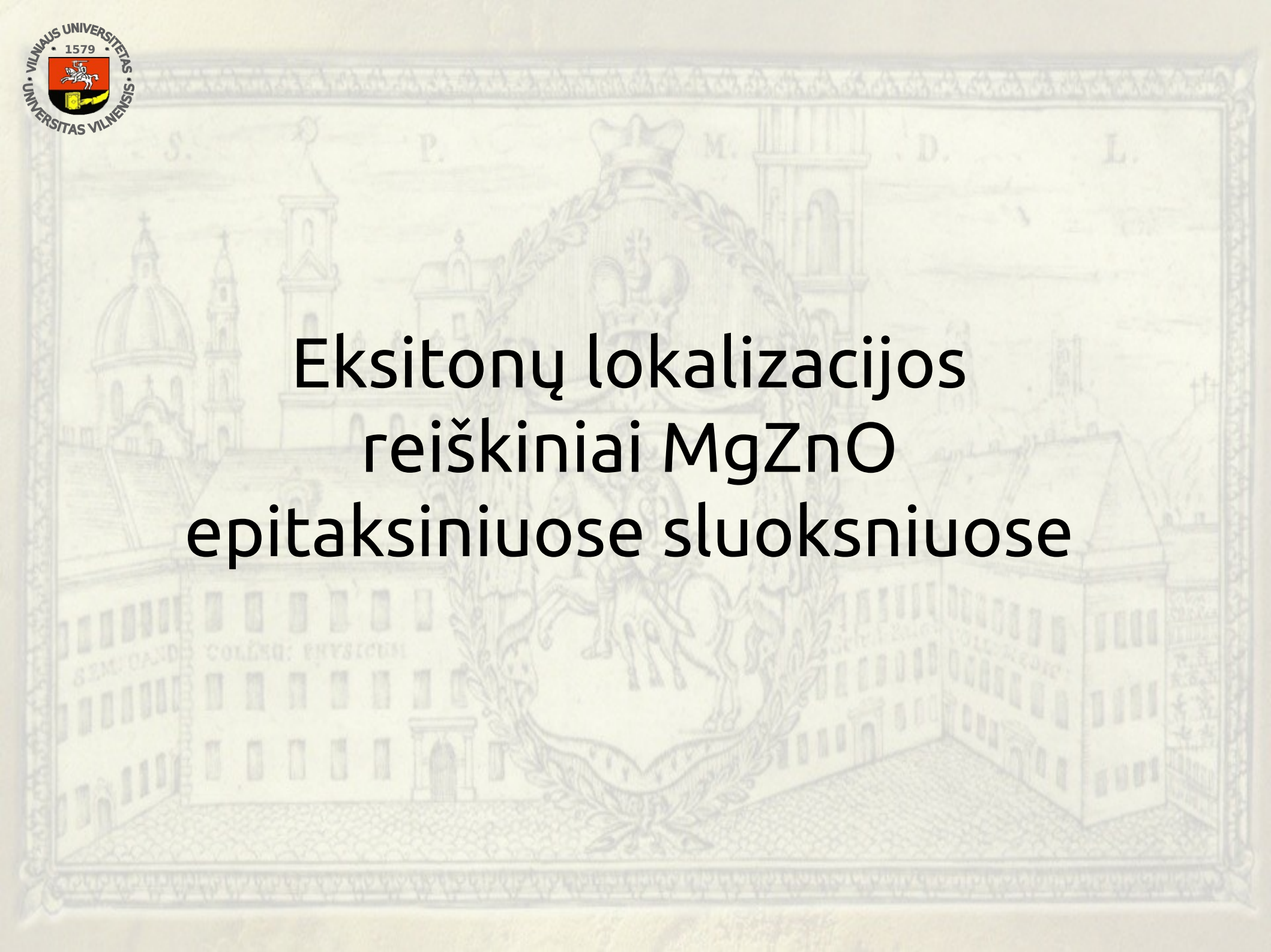
Silicis

Bandinys C2

17 pav. N legiruotuose ZnO plonuosiuose sluoksniuose buvo nustatyta santykinai intensyvi A^0X spektrinė linija, kuri priskiriama prie akceptorinių defektų klasterių pririštų eksitonų spindulinei rekombinacijai.

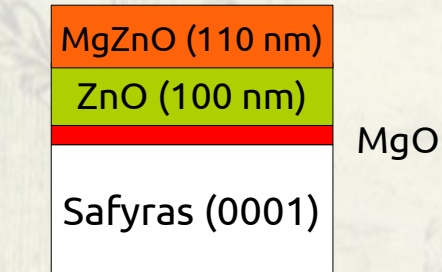
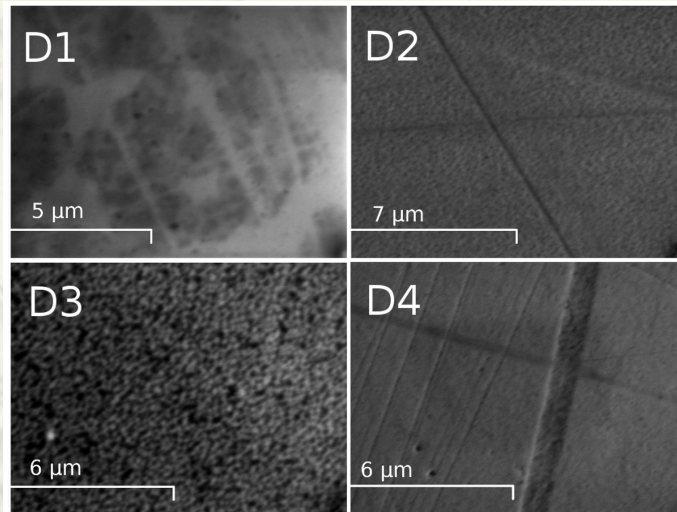
Išvados (1/3)

1. Netamprios eksitonų sąveikos modelis pritaikytas P -juostos identifikavimui ZnO fotoluminescencijos spektre. Eksperimentiškai stebėtas P -juostos nuokrypis nuo teorinės smailės padėties paaikškintas lokalizuotų eksitonų dalyvavimu formuojant P -juostą.
2. Stipriai Ga legiruoto ZnO ir aukštos auginimo temperatūros ZnO epitaksinių sluoksnių darinio riboje vykstančiai priverstinei spinduliuotei nustatytas žemas slenkstis ir didelis optinio stiptinimo koeficientas, ko priežastimi yra krūvininkų persiskirstymas ties sluoksnio riba.
3. N legiruotų ZnO sluoksnių žemos temperatūros fotoluminescencijos spektruose išmatuota intensyvi spektrinė juosta ties 3,314 eV fotonų energija. Ši juosta rodo akceptorinių lygmenų atsiradimą ZnO draustiniame tarpe.

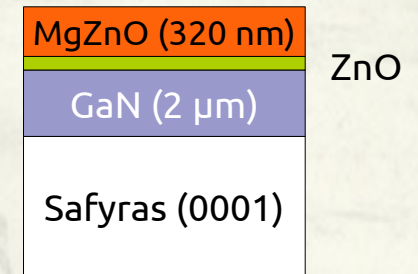


Eksitonų lokalizacijos reiškiniai MgZnO epitaksiniuose sluoksniuose

MgZnO sluoksnių kokybė

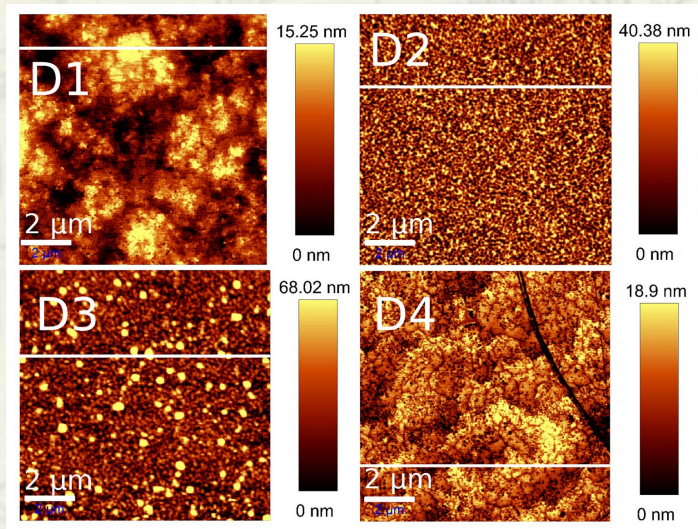


Bandiniai D1 - D3

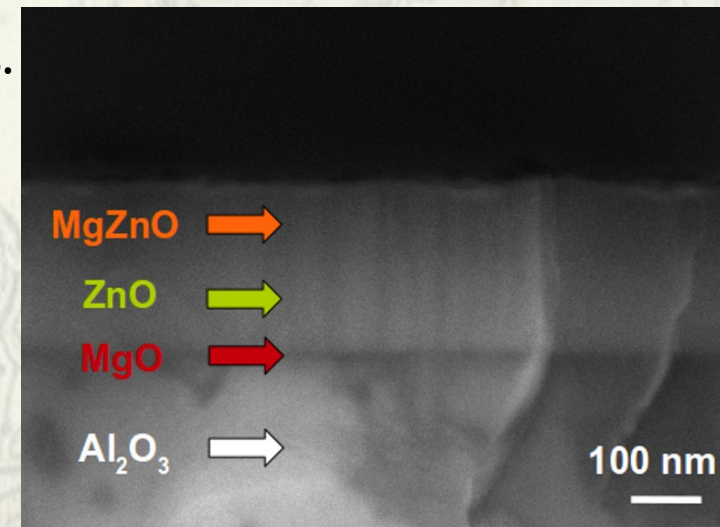


Bandinys D4

18 pav. MgZnO epitaksinių sluoksnių paviršių skenuojančiojo elektroninio mikroskopo nuotraukos.

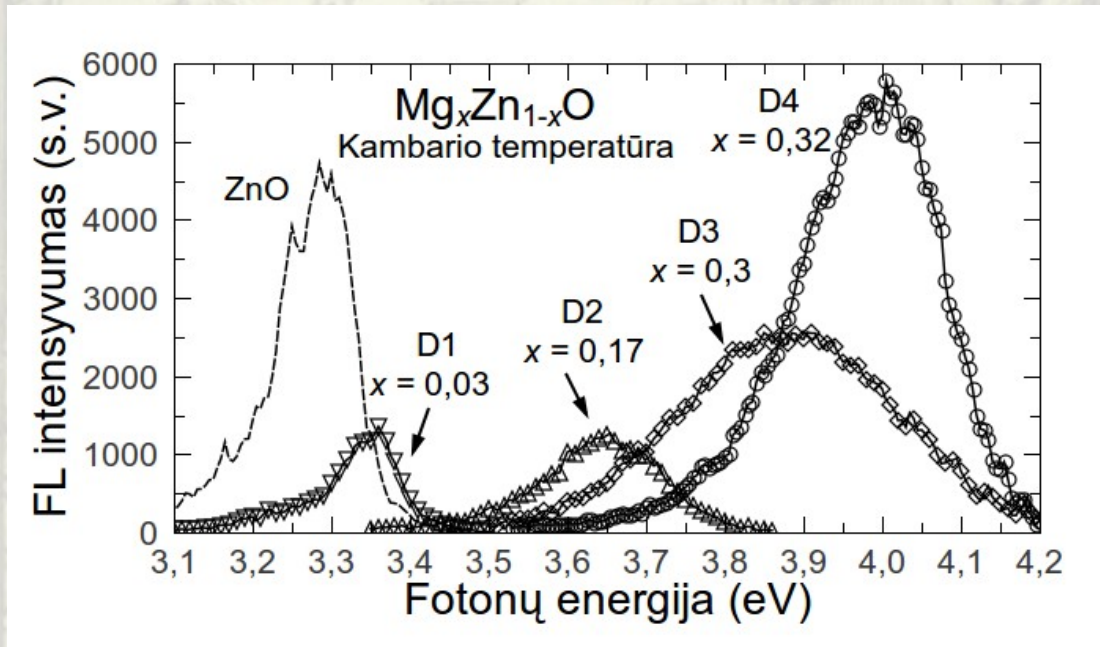


19 pav. MgZnO epitaksinių sluoksnių paviršių reljefai, išmatuoti atominės jėgos mikroskopu.

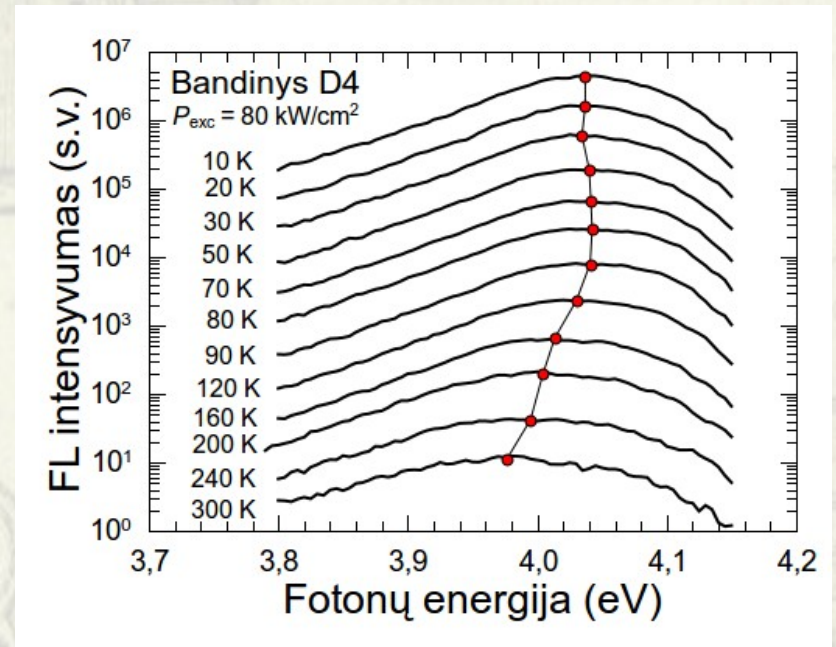


20 pav. MgZnO darinio (bandinys D3) didelės skyros skersinė nuotrauka, padaryta skenuojančiuoju elektroniniu mikroskopu.

FL spektrų temperatūrinis kitimas

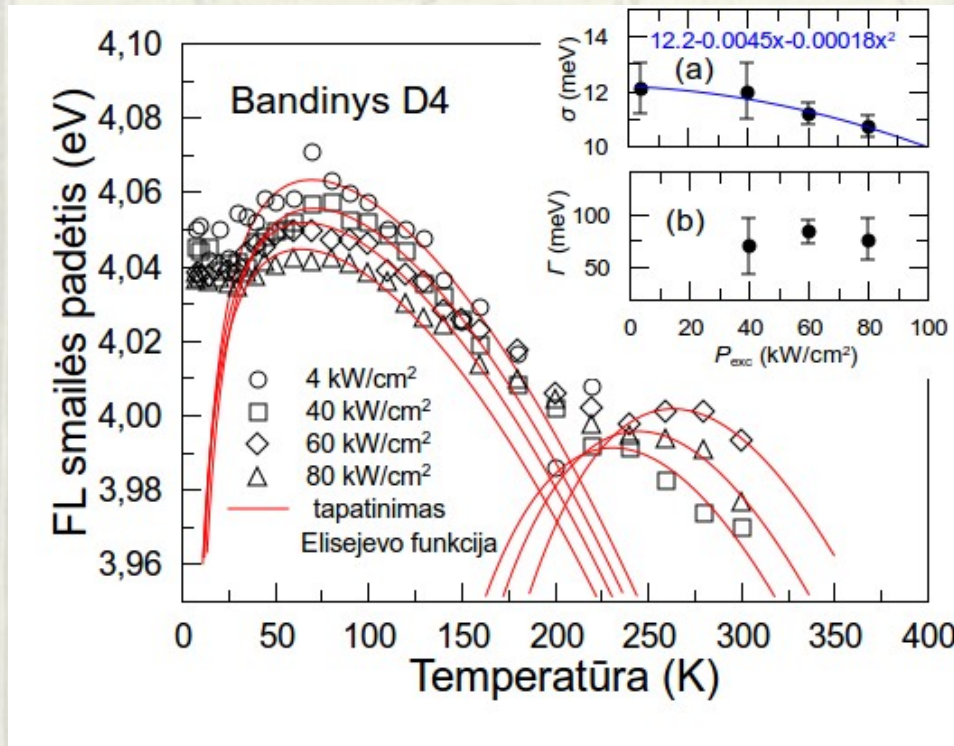


21 pav. Fotoluminescencijos spektrų priklausomybė nuo Mg kiekio MgZnO epitaksinuose sluoksniuose.



22 pav. Fotoluminescencijos spektrų priklausomybė nuo temperatūros MgZnO epitaksiniam sluoksniui su 32% Mg kiekiu lydyje.

FL spektrų temperatūrinis kitimas

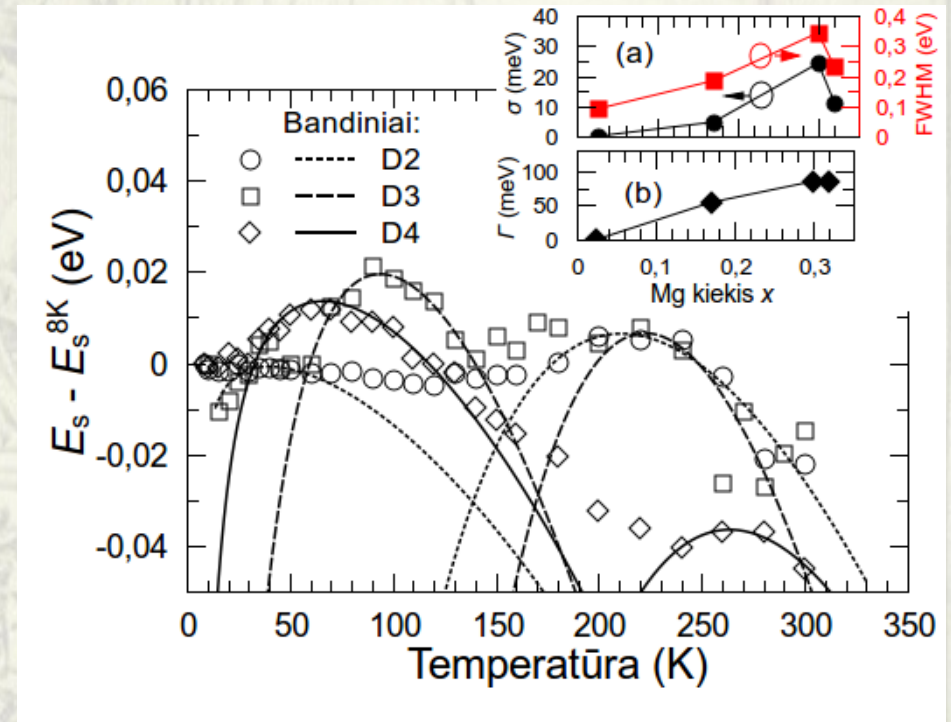


23 pav. Fotoluminescencijos spektrų smailės padėties priklausomybės nuo temperatūros tapatinimas lokalizaciją įvertinančia funkcija esant skirtingiems sužadavimo tankiams. Nustatytas $\sigma = 10$ meV, $\Gamma = 75$ meV.

Varšni funkcija su eksitonų lokalizaciją įskaitančiu nariu:

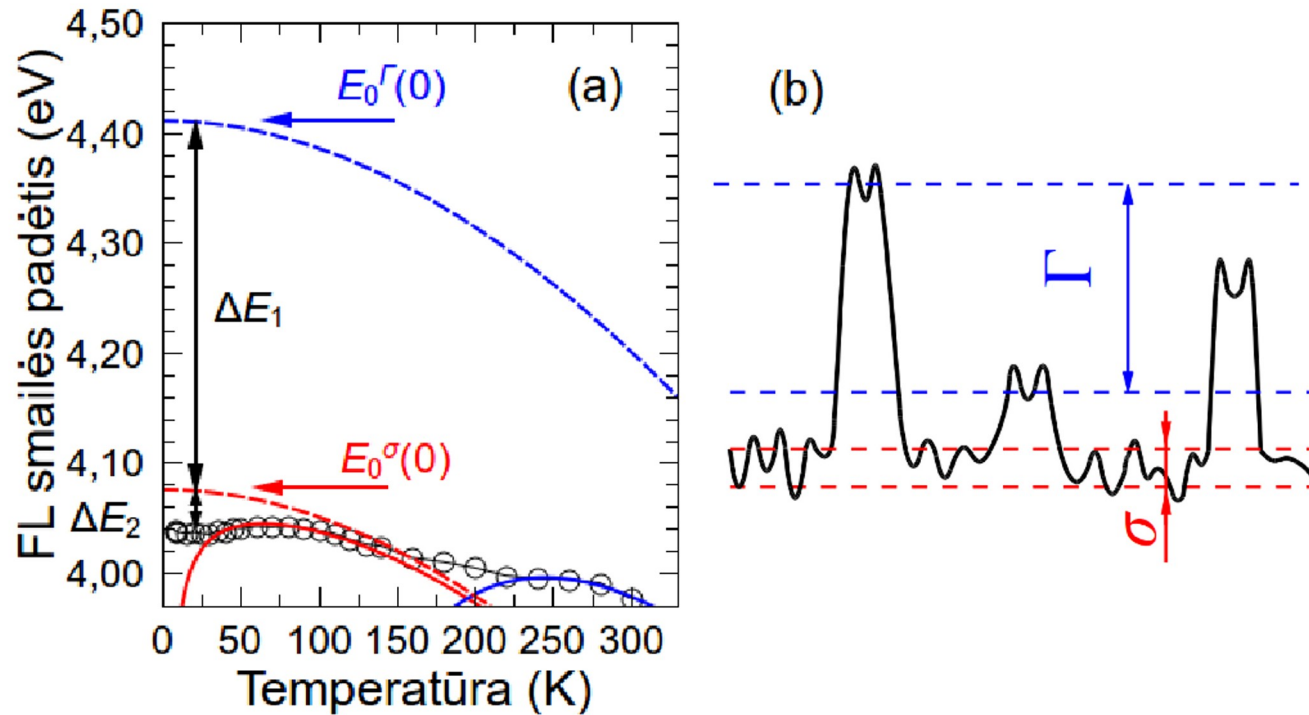
$$\rho(E) = \rho_0 \exp\left[-(E - E_0)^2 / 2\sigma^2\right] \longrightarrow E_0(T) = E_0(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} - \frac{(\sigma)^2}{k_B T}$$

[Ref.] P. G. Eliseev, P. Perlin, J. Lee, M. Osinski, Appl. Phys. Lett. 71(5), 569 (1997).



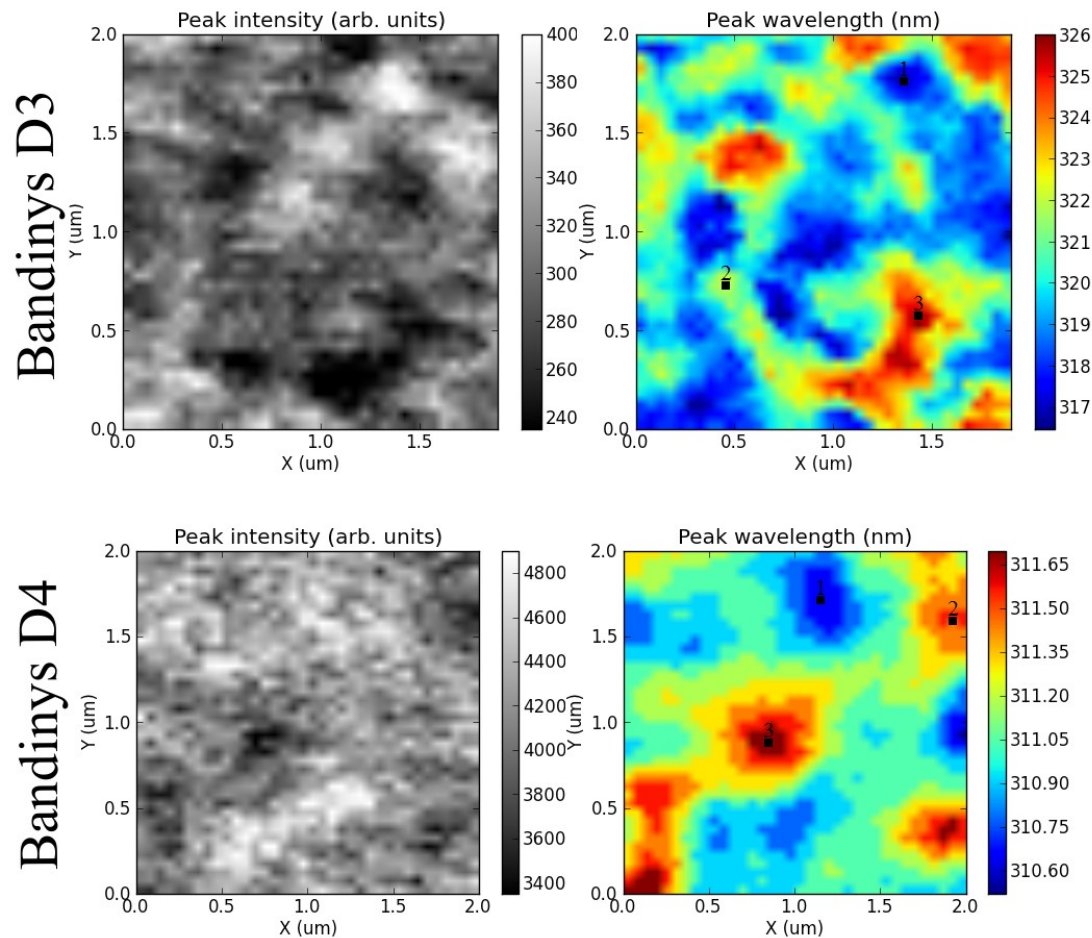
24 pav. Fotoluminescencijos spektrų smailės padėties priklausomybės nuo temperatūros tapatinimas lokalizaciją įvertinančia funkcija esant skirtingiems Mg kiekams sluoksniuose.

Būsenų tankio uodegos



25 pav. a) Dviejų Gauso formos būsenų tankio uodegų pasireiškimas MgZnO epitaksiniuose sluoksniuose ties draustinių energijų juostos kraštu paaiškina dvigubą mėlynąjį psolinkį fotoluminescencijos spektro smailės padėties priklausomybėje nuo temperatūros. b) Spektroskopijos metodais nustatyto dvilypio eksitonų lokalizacijos lauko forma.

Krūvininkų lokalizacija

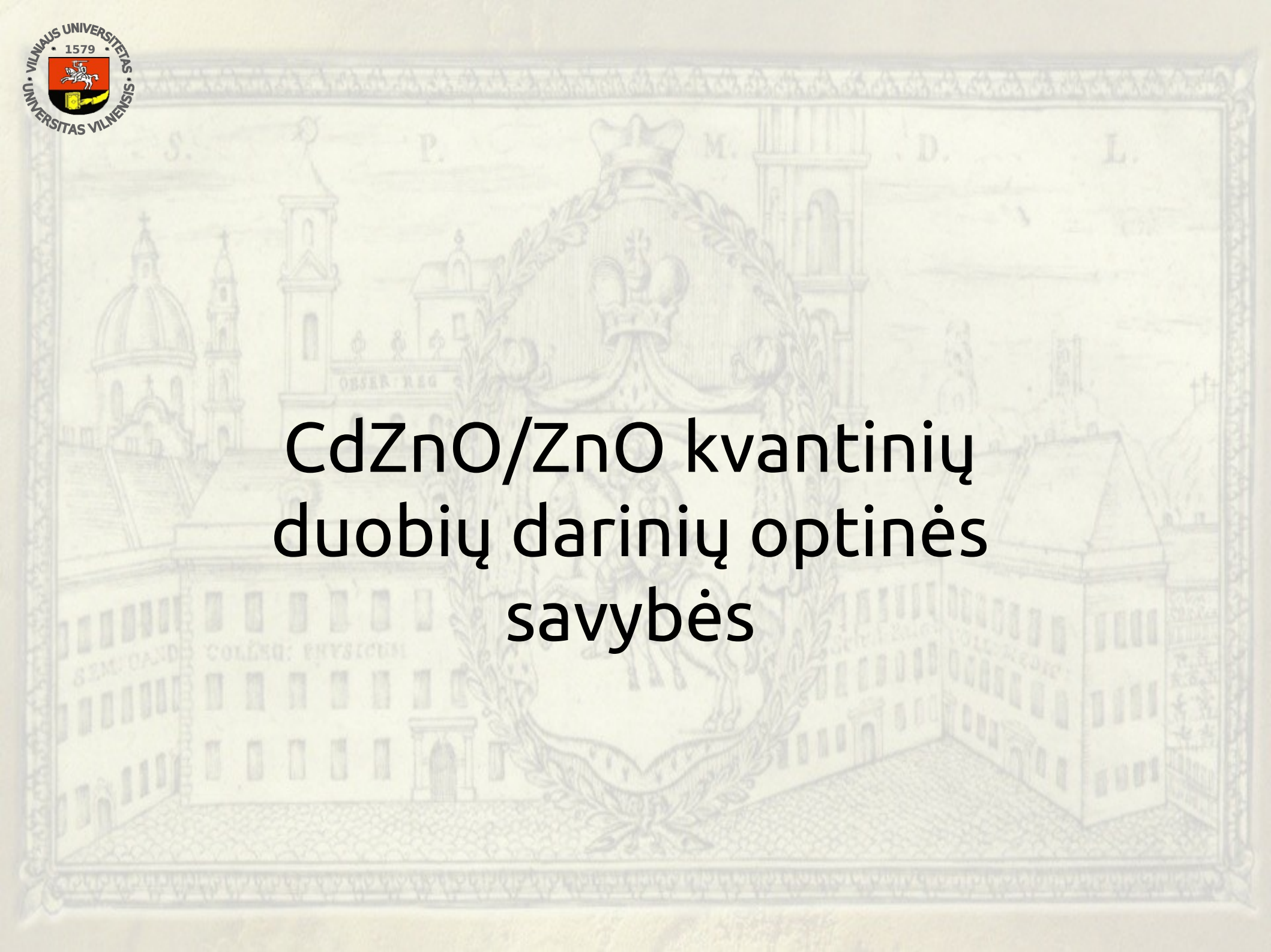


26 pav. Skenuojančiuju artimojo optinio lauko mikroskopu išmatuoti MgZnO (bandinių D3 ir D4) epitaksinių sluoksnių paviršiaus vaizdai: kairėje – liuminescencijos intensyvumo pasiskirstymas, dešinėje – liuminescencijos spektro smailės padėties pasiskirstymas. Šių dydžių koreliacijos koeficientas yra -0,5.

Išvados (2/3)

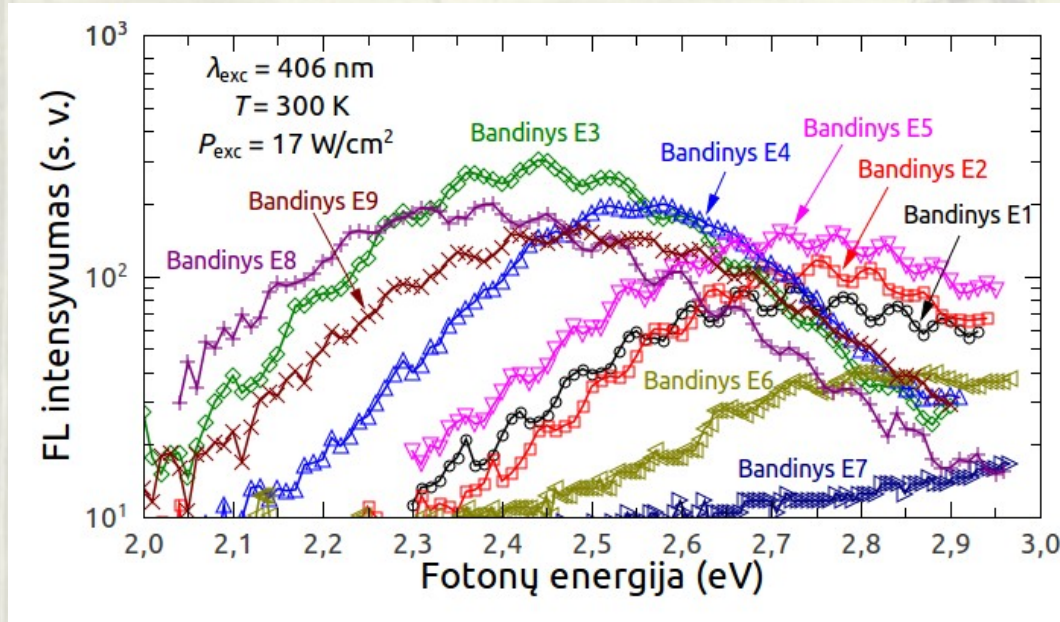
2.1. Išmatuotas dvigubos S - formos fotoluminescencijos smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros rodo stiprų krūvininkų lokalizacijos efektą MgZnO epitaksiniuose sluoksniuose. Pritaikytas dviejų Gauso formos būsenų tankio uodegų pildymo krūvininkais modelis.

2.2. Skenuojančiuoju artimojo lauko mikroskopu buvo išmatuotos mažesnės nei 100 nm skersmens padidinto Mg kiekio didesnio fotoluminescencijos intensyvumo sritys. Mažesnio Mg kiekio sritys sudaro seklesnių potencialinio lauko fliuktuacijų centrus. Padidinto Mg kiekio sritys sudaro lokalizacijos centrus su didesniu potencialinio lauko fliuktuacijų pasiskirstymu ir potencialinio lauko barjerai sulaiko krūvininkus nuo pabėgimo į mažesnio Mg kiekio sritis.



CdZnO/ZnO kvantinių duobių darinių optinės savybės

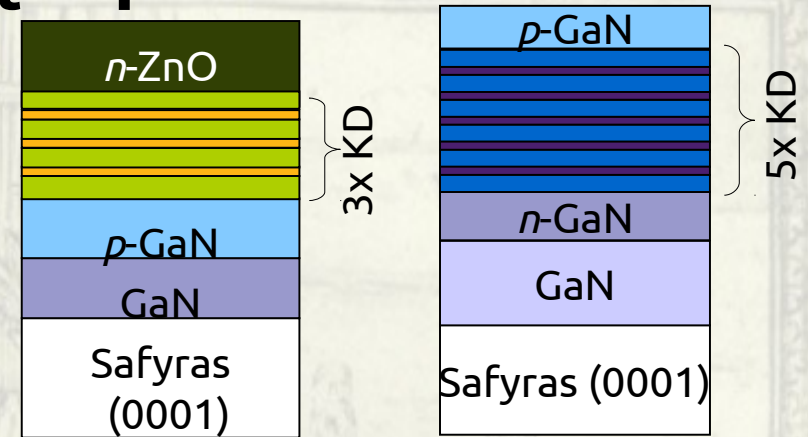
CdZnO/ZnO darinių spektrai



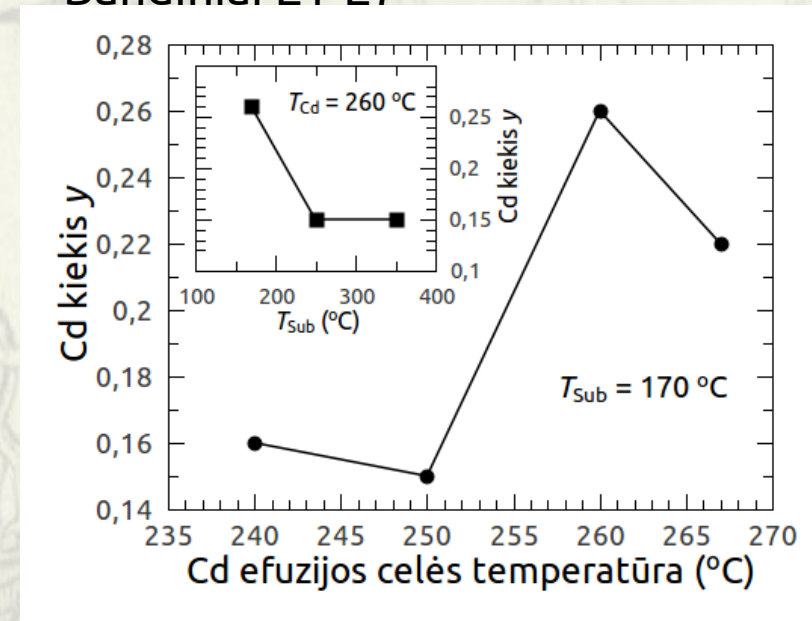
27 pav. Kambario temperatūros CdZnO/ZnO daiktinių kvantinių duobių darinių fotoluminescencijos spektrai, išmatuoti žadinant kvantines duobes selektyviai.

Vegardo dėsnis:

$$E_g^{CdZnO}(y) = E_g^{ZnO}(1-y) + E_g^{CdO}(y) - b y(1-y)$$

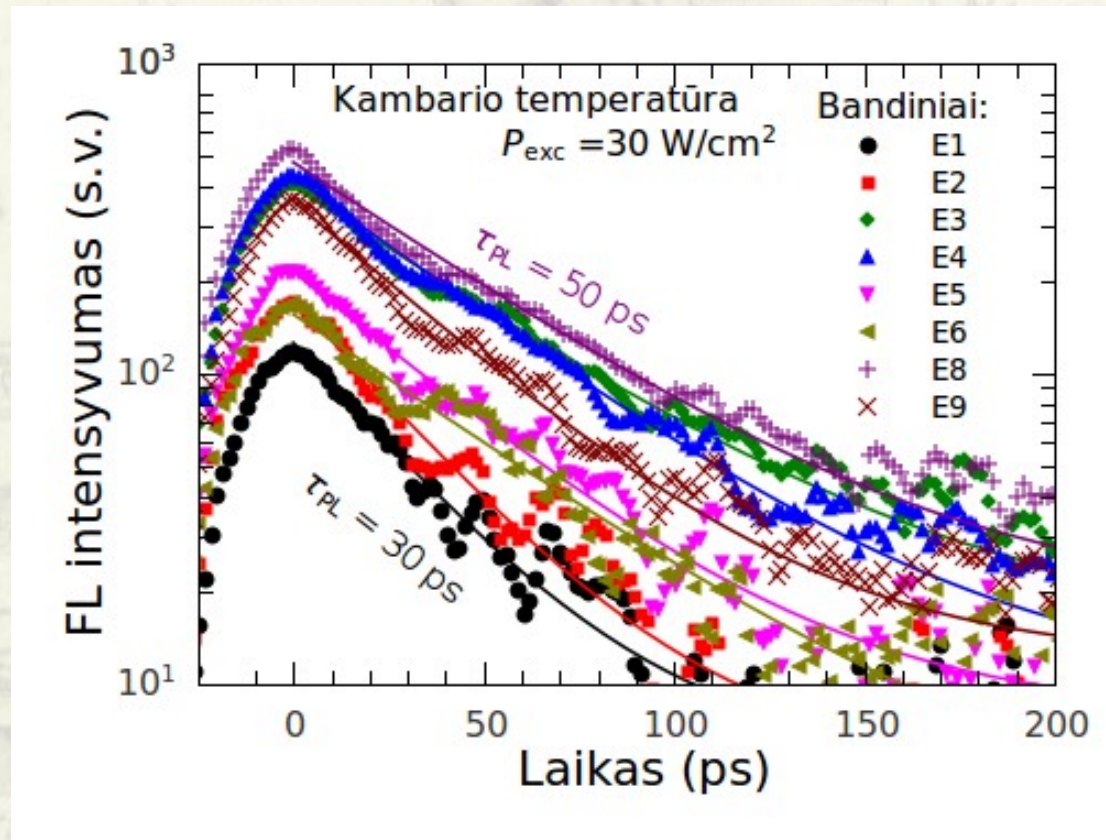


Bandiniai E1-E7 Bandiniai F1 ir F2



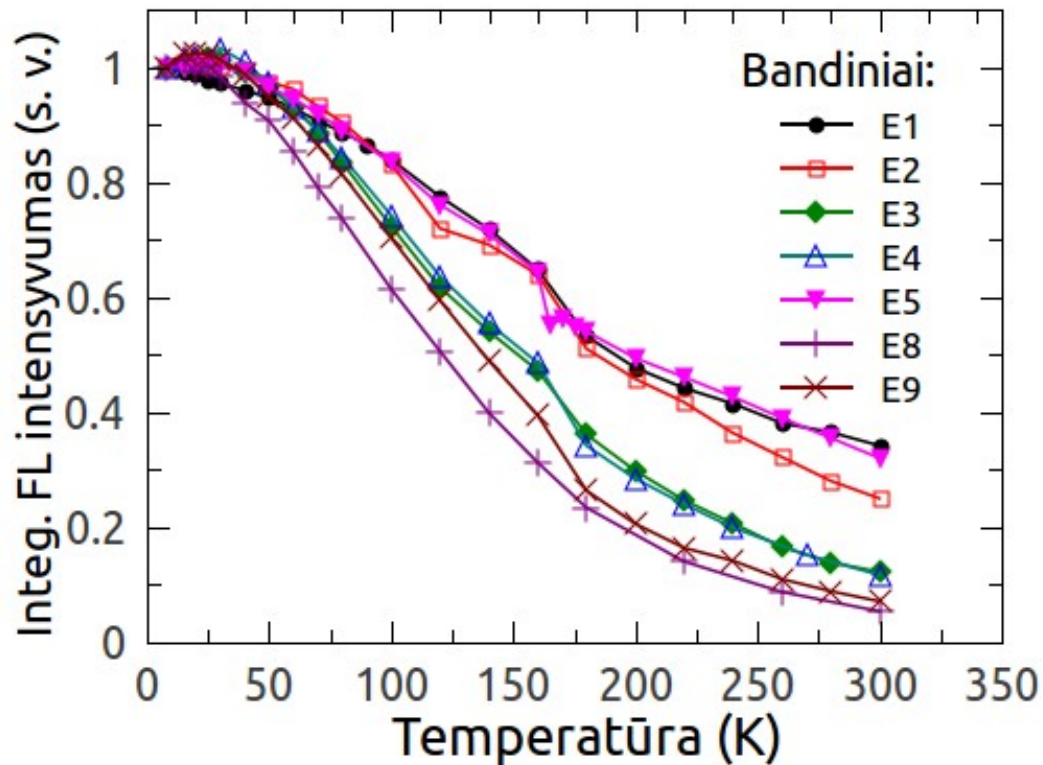
28 pav. Cd kiekio, nustatyto iš fotoluminescencijos spektrų padėties, priklausomybė nuo kvantinių duobių auginimo temperatūros.

Liuminescencijos gesimo trukmės



29 pav. Kambario temperatūros CdZnO/ZnO daugialypių kvantinių duobių fotoluminescencijos gesimo kreivės, išmatuotos žadinant kvantines duobes selektyviai.

Vidinis kvantinis našumas



Vidinis kvantinis našumas (IQE):

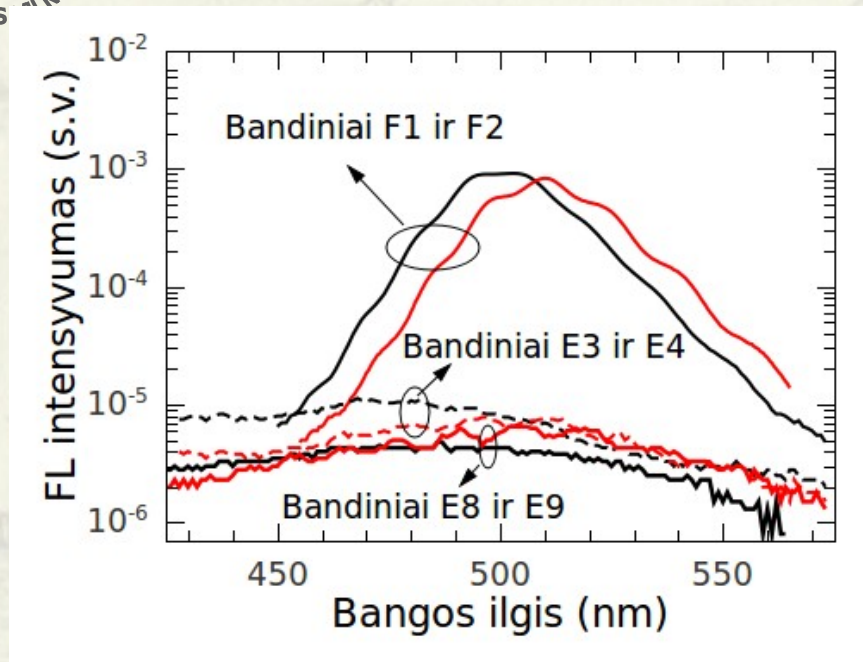
$$IQE = \frac{\tau_{PL}}{\tau_r}$$

Jeigu yra išpildomos dvi sąlygos:
 (i) žemoje temperatūroje spindulinė rekombinacija dominuoja;
 (ii) nespindulinė rekombinacija nuo temperatūros nepriklauso, tai

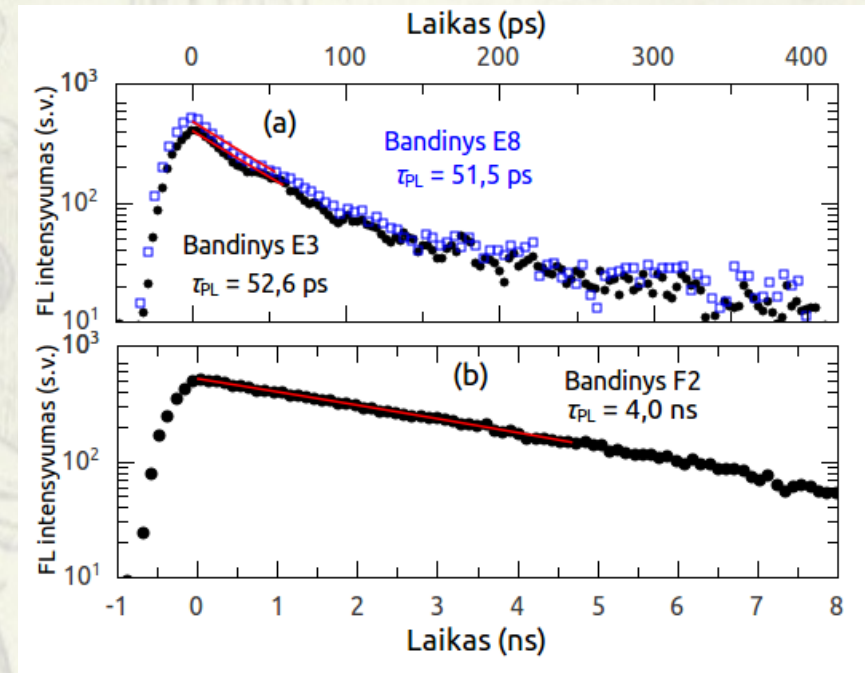
$$IQE = \frac{I_{PL}(T)}{I_{PL}(T \rightarrow 0)}$$

30 pav. Integruoto FL intensyvumo priklausomybė nuo temperatūros CdZnO/ZnO DKD struktūroms.

CdZnO/ZnO ir InGaN/GaN dariniai



31 pav. CdZnO/ZnO ir InGaN/GaN kvantinių duobių darinių laike integruoti fotoluminescencijos spektrai, išmatuoti žadinant selektyviai.

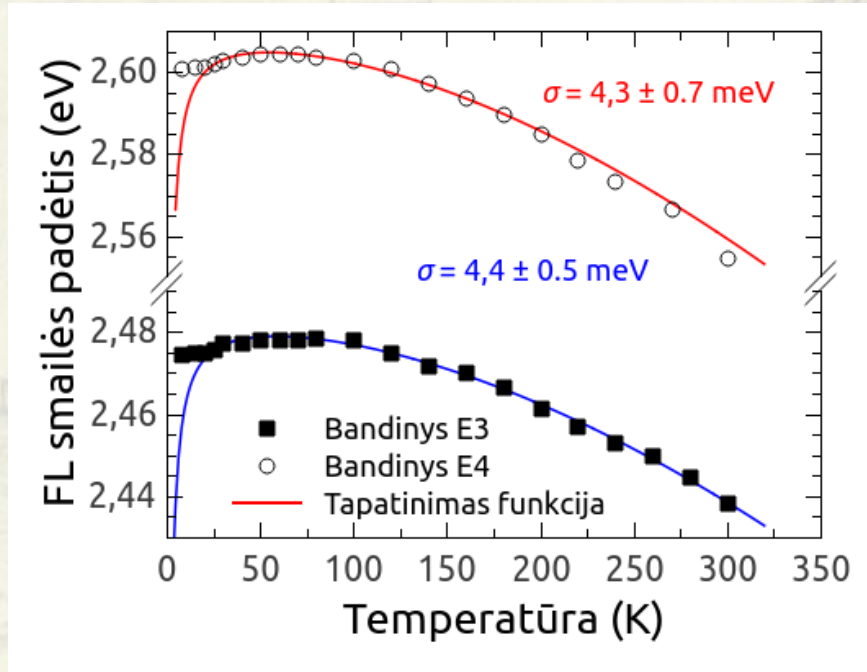


32 pav. CdZnO/ZnO (a) ir InGaN/GaN (b) darinių fotoluminescencijos gesimo trukmės, išmatuotos žadinant kvantines duobes selektyviai.

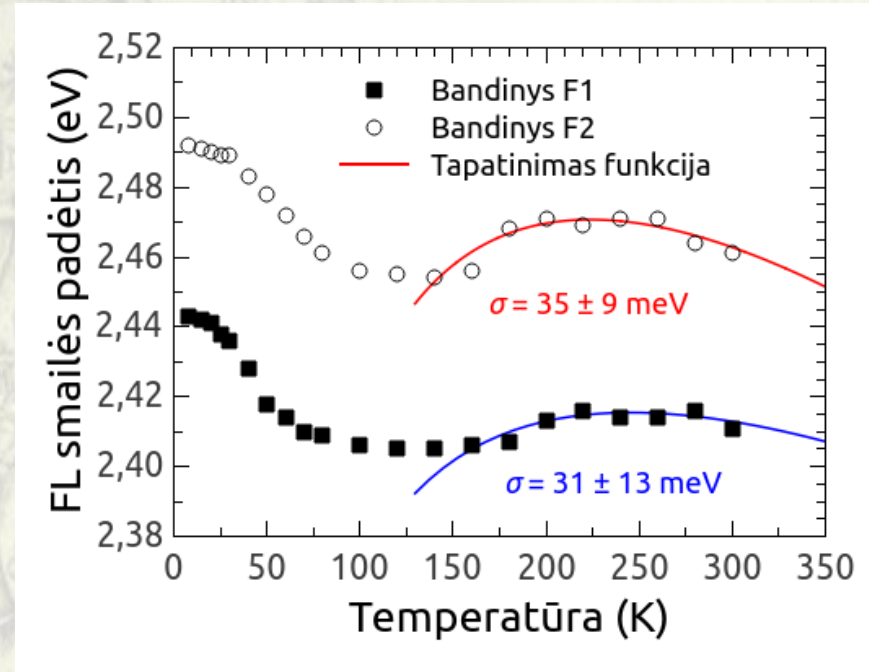
Lentelė 1. Kai kurių bandinių charakteringos eksperimentinių dydžių vertės palyginimui.

Bandiniai	λ (nm)	x (%)	τ_{PL} (ps)	IQE (%)
E3 (CdZnO)	498	23	53	12
E5 (CdZnO)	439	13	41	32
E8 (CdZnO)	506	26	52	5
F2 (InGaN)	509	26	4000	15

Krūvininkų lokalizacijos įtaka



33 pav. CdZnO/ZnO kvantinių duobių darinių fotoluminescencijos spektrų smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros.



34 pav. InGaN/GaN kvantinių duobių darinių fotoluminescencijos spektrų smailės padėties priklausomybė nuo temperatūros.

Kai $T = 297 \text{ K}$, tai $k_B T = 26 \text{ meV}$.

$$\sigma_{\text{CdZnO}} < 26 \text{ meV} < \sigma_{\text{InGaN}}$$

Išvados (3/3)

3.1. CdZnO/ZnO kvantinių duobių darinių 505 nm bangos ilgio spinduliuotės šviestukams fotoluminescencijos intensyvumas ir gesimo trukmė yra dviem eilėm mažesnė lyginant su InGaN/GaN kvantinių duobių dariniais tos pačios spektrinės srities šviestukams.

3.2. CdZnO/ZnO kvantinėse duobėse nespindulinė krūvininkų rekombinacija dominuojair žemose temperatūrose dėl didelio defektų tankio ir mažo krūvininkų lokalizacijos efekto.

Ginamieji teiginiai

1. P -juostos smailės padėtį stipriai sužadintuose ZnO kristaluose lemia netamprioji sąveika tarp laisvų ir lokalizuotų eksitonų su skirtinga lokalizacijos energija.
2. Dviejų skirtingų Gauso formos būsenų tankio uodegų modelis paaiškina dvigubą fotoluminescencijos smailės padėties mėlynąjį poslinkį jos priklausomybėje nuo temperatūros.
3. CdZnO/ZnO kvantinių duobių darinių, pagamintų 505 nm šviesos diodams, krūvininkų gyvavimo trukmė ir emisijos našumas yra dviem eilėm mažesni, lyginant su atitinkamais InGaN/GaN kvantinių duobių dariniais, dėl mažo lokalizacijos efekto aktyviojoje srityje.

Publikacijų sąrašas

1. M. Karaliūnas, V. Šukauskas, E. Kuokštis, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Band tail filling effect in MBE-grown ternary MgZnO epitaxial layers with high Mg content, *Phys. Status Solidi C* *accepted* (2013).
2. M. Karaliūnas, T. Serevičius, E. Kuokštis, S. Juršėnas, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Optical Characterization of MBE-grown ZnO Epilayers, *Advanced Materials Research* **222**, 86 (2011).
3. S. Burinskas, J. Dudonis, D. Milčius, M. Karaliūnas ir E. Kuokštis, Synthesis of ZnO:N thin films by reactive DC magnetron sputtering, *Lith. J. Phys.* **50**(3), 325 (2010).
4. E. Kuokštis, M. Karaliūnas, S. Juršėnas, S. Miasojedovas, T. Serevičius, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Photoluminescence studies of MBE-grown ZnO and MgZnO epitaxial layers, *Phys. Status Solidi C* **6**(12), 2668 (2009).
5. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, K. Kazlauskas, S. Juršėnas, V. Hoffman ir A. Knauer, Optical gain dynamics in InGaN/InGaN quantum wells, *Proc. SPIE* **7142**, 71420U (2008).
6. V. Hoffmann, A. Knauer, F. Brunner, C. Netzel, U. Zeimer, S. Einfeldt, M. Weyers, G. Tränkle, J. M. Karaliūnas, K. Kazlauskas, S. Jursenas, U. Jahn, J.R. van Look ir M. Kneissl, Influence of MOVPE growth temperature on the structural and optical properties of InGaN MQW laser diodes, *J. Cryst. Growth* **310**, 4525 (2008).

Konferencijų pranešimai (1)

1. E. Kuokštis, M. Karaliūnas, M. Stasiūnas, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, CdZnO/ZnO daugialypių kvantinių duobių optoelektronikos taikymams optinės savybės, standinis pranešimas S1-65. 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-40), 2013 m. birželio 10-12 d., Vilnius, Lietuva.
2. E. Kuokštis, V. Šukauskas, M. Karaliūnas, S. Marcinkevičius, V. Liuolia, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Taikytinų optoelektronikosaktyviosioms terpėms MgZnO epitaksinių sluoksnių tyrimai, standinis pranešimas S1-64. 40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-40), 2013 m. birželio 10-12 d., Vilnius, Lietuva.
3. H. Liu, M. Karaliūnas, V. Celedinas, K. Jarasiunas, V. Avriutin, N. Izyumskaya, M. Reshchikov, U. Ozgur ir H. Morkoc, Optical Properties of Highly Conductive and Transparent GZO Grown by Molecular Beam Epitaxy, žodinis pranešimas Z14.08. 2012 MRS Fall Meeting & Exhibit, 2012 m. lapkritis 25-30 d., Bostonas, MA, JAV.
4. M. Karaliūnas, V. Šukauskas, E. Kuokštis, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Band tail filling effect in MBE grown ternary MgZnO epitaxial layers with high Mg content, standinis pranešimas 76. The 7th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO-2012), 2012 m. rugsėjo 11-14 d., Nica, Prancūzija.
5. M. Karaliūnas, M. Stasiūnas, E. Kuokštis, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, CdZnO/ZnO kvantinių darinių fotoluminescencijos dinamika, standinis pranešimas S1-40. 39-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK-39), 2011 m. spalio 6-8 d., Vilnius, Lietuva.
6. M. Karaliūnas, V. Tumas, E. Kuokštis ir E. Anisimovas, Exciton-Exciton Interaction Models in ZnO, žodinis pranešimas O3-2. International Conference Advanced Optical Materials and Devices (AOMD-7), 2011 m. rugpjūčio 28-31 d., Vilnius, Lietuva.

Konferencijų pranešimai (2)

7. M. Karaliūnas, V. Šukauskas, T. Serevičius, E. Kuokštis, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, The Band Tail Filling Effects in Ternary MgZnO Epitaxial Layers, stendinis pranešimas P58. The 13-th International Conference - School Advanced Materials and Technologies, 2011 m. rugpjūčio 27-31 d., Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759.
8. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, K. Y. Chen, S. Y. Ting, J. J. Huang, C. H. Liao, C. Y. Chen ir C. C. Yang, Photoluminescence Properties of InGaN/GaN and CdZnO/ZnO Multiple Quantum Wells for Light-Emitting Diodes, žodinis pranešimas. 16th Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XVI), 2011 m. birželio 19-23 d., Stokholmas, Švedija.
9. M. Karaliūnas, Photoluminescence decay time study of CdZnO/ZnO and InGaN/GaN QWs LED structures, žodinis pranešimas. The Internships of PhD students in Foreign Science Centres. 2011 m. kovo 17 d., Vilnius, Lietuva.
10. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, S.Y. Ting, J.J. Huang ir C.-C. Yang, Optical Properties of CdZnO Multiple Quantum Wells, Stendinis pranešimas P68. The 12-th International Conference "Advanced Materials and Technologies" and Summer School "European Doctorate in Physics and Chemistry of Advanced Materials", 2010 m. rugpjūčio 27-31 d., Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759.
11. M. Karaliūnas, T. Serevičius, E. Kuokštis, S. Juršėnas, S. Y. Ting, J. J. Huang ir C.-C. Yang, Optical Characterization of MBE-grown ZnO Epilayers, Žodinis ir stendinis pranešimas. The 9th International Conference on Global Research and Education, 2010 m. rugpjūčio 9-12 d., Ryga, Latvija.
12. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, S. Y. Ting, J. J. Huang ir C.-C. Yang, Stimulated Emission Study in MBE-Grown ZnO Epilayers, Stendinis pranešimas TuP62. XXXIX "Jaszowiec" 2010 International School and Conference on the Physics of Semiconductors, 2010 m. birželio 19-24 d., Krynica-Zdrój, Lenkija.

Konferencijų pranešimai (3)

13. M. Karaliūnas ir E. Kuokštis, Optical Gain Coefficient Spectra in MBE-Grown ZnO Epilayers, Žodinis pranešimas. International Conference of Young Scientists, 2010 m. balandžio 29-30 d., Šiauliai, Lietuva.
14. M. Karaliūnas, P. Ščajev ir K. Jarašiūnas, Room Temperature Photoluminescence Spectra in Bulk 3C-SiC Crystals, Stendinis pranešimas P39. The 11-th International Conference-School Advanced Materials and Technologies, 2009 m. rugpjūčio 27-31 d., Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759.
15. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, S. Juršėnas, S. Miasojedovas, T. Serevičius, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Photoluminescence studies of MBE-grown ZnO and MgZnO epiaxial layers, Žodinis pranešimas. 15th Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XV), 2009 m. birželio 15-19 d., Vilnius, Lietuva.
16. M. Karaliūnas, E. Kuokštis, S.-Y. Ting, J.-J. Huang ir C.-C. Yang, Optical Gain in MBE-Grown ZnO Layers, Stendinis pranešimas S1-38. 38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, 2009 m. birželio 8-10 d., Vilnius, Lietuva.



Ačiū už dėmesį!