

DOKTORANTŪROS STUDIJŲ DALYKO SANDAS

Dalyko pavadinimas	Mokslo kryptis (kodas)	Centras	Skyrius
Puslaidininkių ir jų darinių technologija (7,5 ECTS kredito)	Medžiagų inžinerija T 008	Fizinių ir technologijos mokslų centras	Fizikinių technologijų skyrius Optoelektronikos skyrius
Studijų būdas	Kreditų skaičius	Studijų būdas	Kreditų skaičius
Paskaitos		Konsultacijos	
Individualus	7,5	Seminarai	

Dalyko anotacija

Dalyko sando tikslai ir numatomi gebėjimai

Tikslai: Suteikti pažangių žinių apie puslaidininkines medžiagas, nanodarinius bei prietaisų technologijas, didžiausią dėmesį skiriant atominiam formavimo tikslumui ir juostų inžinerijai. Studentai ugdytų gebėjimus projektuoti sluoksniuotus hibridinius darinius naujos kartos prietaisams, tokiems kaip aukšto naudingumo spinduliuotės šaltiniai, kvantinių taškų detektoriai, daugiafunkčiai jutikliai bei neuromorfinė techninė įranga. Naujas akcentas skiriamas energiją taupančioms gamybos technologijoms bei autonominių sistemų, verčiančių sudėtingus fizinius signalus skaitmeniniais duomenimis, integravimui.

Ugdomi gebėjimai: Studentai tobulins gebėjimus kritiškai vertinti ir sintetinti MTM („More-than-Moore“) mastelio mažinimo tendencijas, analizuodami įvairius mokslinius šaltinius. Bus lavinama profesinė kompetencija taikyti nuspėjamąjį modeliavimą puslaidininkinių prietaisų charakteristikoms simuliuoti prieš fizinį prototipų kūrimą. Taip pat kursas skatins suprasti ir diegti tvaros mokslinės veiklos ir plėtros (R&D) principus, orientuojantis į medžiagų gyvavimo ciklą ir aplinkos poveikio mažinimą šiuolaikinėse švariose zonose.

Dalyko sando turinys – pagrindinės temos

1. Puslaidininkinių medžiagų struktūra ir susijusios savybės. Pernašos reiškiniai:

- Puslaidininkinių kristalų ir sluoksnių formavimosi modeliai, auginimo metodai.
- Struktūra, elektroninės ir fotoninės savybės, krūvio pernaša.
- Įvadas į topologinius izoliatorius ir spinu poliarizuotos pernašos mechanizmus.
- Plačiajuosčių (WBG) ir ultra-plačiajuosčių puslaidininkinių (GaN , SiC , Ga_2O_3 ir deimanto) fizika ir auginimas.

2. Daugiasluksniai ir daugiakomponenčiai dariniai. Juostų inžinerija:

- Kvantiniai dariniai: duobės, supergadelės, gijos, taškai.
- Tikslinis elektroninės sandaros keitimas („band-gap-engineering“); A_2B_6 ir A_3B_5 junginiai bei kietieji tirpalai.
- Tuneliniai reiškiniai, juostų trūkiai; kvantinė pernaša (magnetinio lauko poveikis 2D elektronams, Šubnikovo-de Haaza matavimai, kvantinis Holo reiškinys).
- Muarė (Moirė) supergadelės ir „twistronika“ van der Waalso heterosandūrose.

3. Optinės kvantinių darinių savybės:

- Eksitonai ir seklūs priemaišos kvantiniuose dariniuose.
- Absorbcija, optinė emisija, šuoliai tarp pajuosčių.
- Blocho oscilacijos; kvantinis ribojimas ir Štarko efektas.

4. Plonasluoksnės technologijos ir jų taikymai:

- Plonųjų sluoksnių auginimo mechanizmai: epitaksija, įtempti sluoksniai, nanoklasterių formavimasis ir tarpgranulinės ribos.
- Nusodinimo metodai: PVD, CVD (PECVD), MOCVD, MBE ir atominio sluoksnio nusodinimas (ALD).
- Atominis tikslumas: Selektyvusis srities nusodinimas (ASD) ir atominio sluoksnio esdinimas (ALE) pažangiam mastelio mažinimui.
- Litografija (Praktika): UV rašymo (writer) ir tradicinio kaukių sutapdinimo (mask aligner) įvaldymas; kaukių projektavimas ir fotorezistų chemija.
- Litografija (Teorija): Ekstremalaus ultravioletinio (EUV) spinduliavimo, lazerinė litografija ir nanoimprinto litografijos pagrindai sub-10nm technologijoms.
- Pažangus integravimas: Čipletų (chipselets) architektūros, 3D integriniai grandynai (3D IC) ir TSV (Through-Silicon Vias) technologijos.
- CMOS technologijos principai, švarios zonos ir užterštumo kontrolė.

5. Medžiagų ir nanodarinių tyrimo metodai:

- Struktūrinė analizė: Rentgeno struktūrinė analizė ir didelės skyros XRD.
- Cheminės sudėties analizė: XPS, RBS, ESCA, SIMS ir Ožė spektroskopija.
- Šiuolaikinė mikroskopija: SNOM, SEM, TEM bei įvadas į 4D-STEM ir STEM-EELS.
- Optiniai ir ultragreitieji tyrimai: Ramano ir FTIR spektroskopija, elipsometrija, laikinės skyros fotoluminescencija.
- Sinchrotroniniai metodai: ARPES (kampinės skyros fotoemisijos spektroskopija) ir XAS (Rentgeno absorbcijos spektroskopija).

6. Naujosios medžiagos ir „nuo pagrindo aukštyn“ (bottom-up) technologijos:

- Nanostruktūrintos medžiagos, hibridiniai dariniai ir savitvarkis formavimasis.
- Dvimatės (2D) atominio storio medžiagos: Grafenas, TMD (MoS_2 , WS_2 ir kt.) bei MXen'ai (MXenes).
- Perovskitiniai puslaidininkiai: Kristalinės struktūros inžinerija optoelektronikai ir fotovoltikai.
- Spausdinimo ir rašymo metodai lanksčiajai elektronikai ir dėvimosioms sistemoms.

7. Puslaidininkinių darinių pritaikymai, pagrįsti išorės poveikio keitimu į išvesties signalą:

- Mechaninio poveikio (slėgio, jėgos, pagreičio) ir cheminės sudėties detektavimas (dujų jutikliai, ISFET).
- Neuromorfinė skaičiavimo įranga: Memristoriniai dariniai dirbtinėms sinapsėms ir AI-on-chip sistemoms.
- Naujos kartos emiteriai: Lazeriniai diodai, diskiniai lazeriai, Kvantiniai kaskadiniai lazeriai (QCL), THz šaltiniai ir mikro-LED matricos.

- Aukšto naudingumo fotovoltika: Perovskito-silicio tandemai ir daugiasandūriai saulės elementai

Pagrindinė literatūra

Pagrindiniai puslaidininkių vadovėliai

1. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-14323-9. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
2. Dresselhaus, M., Dresselhaus, G., Cronin, S. B., & Souza Filho, A. G. (2018). *Solid State Properties: From Bulk to Nano*. Graduate Texts in Physics, Springer-Verlag GmbH Germany. ISBN 978-3-662-55920-8, ISBN 978-3-662-55922-2 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55922-2>
3. Yu, P., & Cardona, M. (2010). *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (4th ed.). Springer. ISBN 978-3-642-00710-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1>
Note: The 5th edition (2022) mentioned in the original list appears to be an error. The latest widely available edition is the 4th edition from 2010.

Gamybos ir auginimo metodai

4. Levinson, H. J. (2020). *Principles of Lithography* (4th ed.). SPIE Press, Bellingham, Washington. ISBN 978-1-5106-2760-4. <https://doi.org/10.1117/3.2525393>
5. Cao, Z. (Ed.) (2011). *Thin Film Growth: Physics, Materials Science and Applications*. Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-1-84569-736-5. <https://doi.org/10.1533/9780857094902>
Note: Available online at Woodhead Publishing / Elsevier
6. Lamberti, C., & Agostini, G. (Eds.) (2013). *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures* (2nd ed.). Elsevier. ISBN 978-0-444-59551-5 (hard-back). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59551-5.00001-7>

Naujosios medžiagos ir kvantiniai reiškiniai

7. Wood, C., & Jena, D. (Eds.) (2008). *Polarization Effects in Semiconductors: From Ab Initio Theory to Device Applications*. Springer. ISBN 978-0-387-36831-6 (hardcover), ISBN 978-0-387-68319-5 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68319-5>
8. Solanki, M. B., & Jani, M. (2025). "Recent advancements in the development of 2D transition metal dichalcogenides (TMDs) and potential applications." *arXiv preprint* arXiv:2509.12940. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.12940>
9. He, C., & Liu, X. (2023). "The rise of halide perovskite semiconductors." *Light: Science & Applications*, 12:15. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01010-4>
10. Goyal, R. K. (2024). "Exploring quantum materials & applications: A review." *arXiv preprint* arXiv:2404.17594. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.17594>
Also published as: Goyal, R. K., Maharaj, S., Kumar, P., & Chandrasekhar, M. (2025). *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. <https://doi.org/10.1186/s40712-024-00202-7>
11. Liu, B., & Zhou, K. (2019). "Recent progress on graphene-analogous 2D nanomaterials: Properties, modeling and applications." *Progress in Materials Science*, 100, 99-169. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.09.004>

Pažangūs tyrimo metodai ir specializuoti taikymai

12. Mikkelsen, A. (2024). "Characterization of semiconductors by synchrotron-based techniques" in *Comprehensive Semiconductor Science and Technology* (2nd ed.), Volume 2, pp. V2:540-V2:577. Elsevier. ISBN 978-0-323-96027-4 (print), ISBN 978-0-323-95819-6 (electronic). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96027-4.00033-4>

13. de la Mata, M., & Molina, S. I. (2022). "STEM tools for semiconductor characterization: Beyond high-resolution imaging." <i>Nanomaterials</i>, 12(3), 337. https://doi.org/10.3390/nano12030337 14. Razeghi, M., et al. (2025). "High-power, high-wall-plug-efficiency quantum cascade lasers with high-brightness in continuous wave operation at 3–300μm." <i>Light: Science & Applications</i>, 14:252. PMC12297514. https://doi.org/10.1038/s41377-025-01935-6 15. Novoselov, K., et al. (2020–2024). "2D Materials: Properties and Device Applications" (Review Series). <i>Nature Reviews Materials</i>. 16. Huang, X., et al. (2022). "2D semiconductors for specific electronic applications." <i>npj 2D Materials and Applications</i>, 6:51. https://doi.org/10.1038/s41699-022-00327-3			
Dalyko atsiskaitymo būdas			
Mokymo metodai Pagrindinė dalyko studijų forma – savarankiškas, moksliniais tyrimais grįstas darbas. Konsultacijos rengiamos individualiu susitarimu pagal pasirinktą temą, aptariant tiek teorinius klausimus, tiek praktinius gamybos iššūkius (pvz., UV rašymą ar kaukių sutapdinimą). Atsiskaitymo reikalavimai Galutinis žinių patikrinimas pagrįstas referatu iš anksto suderinta tema. Referatas turi apimti pagrindinius mokslinius ir technologinius klausimus, kurie yra doktorantūros studijų ir disertacijos temos pagrindas. Referato apimtis neturi viršyti 30 puslapių (A4 formatas, Times New Roman 12pt, tarpas tarp eilučių 1). Darbe turi būti detalios išnagrinėtos sąsajos su bent 2–3 dalyko turinio temomis. Vertinimo būdas Egzaminą sudaro trys dalys su individualiu vertinimu. Pirma, referatas turi būti pateiktas komisijai likus 2–3 savaitėms iki egzamino datos. Antra, egzamino metu skaitomas pranešimas su skaidrėmis, kurio trukmė negali viršyti 30 minučių. Trečioji egzamino dalis yra diskusija po pranešimo. Diskusija yra procesas, kurio metu komisijos nariai užduoda klausimus, o studentas atsako į juos referato bei pranešimo temos aspektais. Egzamino data nustatoma bendru komisijos narių ir studento sutarimu suderinus temą. Bendrą balą sudaro: referatas – iki 3 balų, pranešimas – iki 3 balų, atsakymai į klausimus ir diskusija – iki 4 balų (iš viso iki 10 balų).			
Konsultuojantys dėstytojai	Mokslo laipsnis	Pedag. vardas	Pagrindinės mokslinės publikacijos per pastaruosius 5 metus
Jan Devenson (jan.devenson@ftmc.lt)	Dr.		1. Devenson, J., Stasys, K., Norkus, R., Stanionyte, S., & Krotkus, A. (2023). Intervalley energy separation in the conduction band of InAs_{1-x}Bi_x determined by terahertz emission spectroscopy. <i>Japanese Journal of Applied Physics</i>, 62(4), 5. DOI: 10.35848/1347-4065/acc777 2. Stašys, K., Geižutis, A., & Devenson, J. (2024). Enhanced thermal emission from metal-free, fully epitaxial structures with epsilon-near-zero InAs layers. <i>Journal of Semiconductors</i>, 45(2), 022101. DOI: 10.1088/1674-4926/45/2/022101 3. Paulauskas, T., Devenson, J., Stanionyte, S., Skapas, M., Karpus, V., Cechavicius, B., ... Pacebutas, V. (2022). Epitaxial growth of GaAsBi on thin step-graded InGaAs buffer layers. <i>Semiconductor Science and Technology</i>, 37(6), 8. DOI: 10.1088/1361-6641/ac61ff

			4. Devenson, J., Norkus, R., Juskenas, R., & Krotkus, A. (2021). Terahertz emission from ultrathin bismuth layers. <i>Optics Letters</i>, 46(15), 3681-3684. DOI: 10.1364/ol.425271 5. Paulauskas, T., Pacebutas, V., Butkute, R., Cechavicius, B., Naujokaitis, A., Kamarauskas, M., ... Devenson, J., ... Krotkus, A. (2020). Atomic-Resolution EDX, HAADF, and EELS Study of GaAs_{1-x}Bi_x Alloys. <i>Nanoscale Research Letters</i>, 15(1), 12. DOI: 10.1186/s11671-020-03349-2
Renata Butkutė (renata.butkute@ftmc.lt)	dr.	doc.	1. A.Vaitkevičius, A. Špokas, A. Zelioli, U. Cibulskaitė, A. Bičiūnas, E. Dudutienė, B. Čechavičius, M. Skapas, A.Čerškus, M. Talaikis, P. Baranowski, P. Wojnar, R. Butkutė, Segregation-driven formation of bismuth quantum dots in parabolic GaAsBi/AlGaAs quantum structures, <i>Surfaces and Interfaces</i>, Volume 68, 106586 (2025); https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106586 2. Špokas A. Zelioli, A. Bičiūnas, B. Čechavičius, J. Glemža, S. Pralgauskaitė, M. Kamarauskas, V. Bukauskas, J. Spigulis, Y-J. Chiu, J. Matukas, R. Butkutė, Optimising (Al,Ga) (As,Bi) Quantum Well Laser Structures for Reflectance Mode Pulse Oximetry, <i>Micromachines</i>, 16, 506 1-10 (2025); https://doi.org/10.3390/mi16050506 3. Evelina Dudutienė, Algirdas Jasinskas, Sandra Stanionytė, Martynas Skapas, Augustas Vaitkevičius, Bronislovas echavičius, Renata Butkutė, Impact of elevated GaAs barrier growth temperature on the homogeneity and photoluminescence of GaAsBi multiple quantum wells, <i>Materials Science in Semiconductor Processing</i>, Vol. 199, 109828 (2025); https://doi.org/10.1016/j.mssp.2025.109828 4. Andrea Zelioli, Aivaras Špokas, Bronislovas Čechavičius, Martynas Talaikis, Sandra Stanionytė, Virginijus Bukauskas, Augustas Vaitkevičius, Aurimas Čerškus, Piotr Wojnar, Vitaly Deibuk, Evelina Dudutienė & Renata Butkutė, Comprehensive investigation of emission homogeneity of InGaAs multiple quantum wells using spatially resolved spectroscopy, <i>Scientific Reports</i>, (2025) 15:32885; https://doi.org/10.1038/s41598-025-17326-1 5. J. Glemža, A. Špokas A. Zelioli, M. Kamarauskas, A. Bičiūnas, B. Čechavičius, J. Spigulis, Y-J. Chiu, S. Pralgauskaitė, J. Matukas, R. Butkutė, Quality evaluation of NIR laser diodes for medical application using low-frequency noise characterization, <i>Infrared Physics and Technology</i>, 147, 105794 (2025); https://doi.org/10.1016/j.infrared.2025.105794

		6. M. Skapas, E. Luna, S. Stanionytė, K. Graser, R. Butkutė, In Situ TEM Study of Size-Controlled Bi Quantum Dots in an Annealed GaAsBi/AlAs Multiple Quantum Well Structure, <i>ACS Omega</i> 10(10), 10432–10437 (2025); DOI:10.1021/acsomega.4c10631 7. A. Štaupienė, A. Zelioli, A. Špokas, A. Vaitkevičius B. Čechavičius, S. Stanionytė, S. Raišys, R. Butkutė, E. Dudutienė. Internal quantum efficiency of GaAsBi MQW structure for the active region of VECSELs. <i>Appl. Phys. Lett.</i> 125, 221102 (2024); 10.1063/5.0234853 8. Armalytė, S.; Glemža, J.; Jonkus, V.; Pralgauskaitė, S.; Matukas, J.; Pūkienė, S.; Zelioli, A.; Dudutienė, E.; Naujokaitis, A.; Bičiūnas, A.; Čechavičius, B.; Butkutė, R. Low-Frequency Noise Characteristics of (Al, Ga)As and Ga(As, Bi) Quantum Well Structures for NIR Laser Diodes. <i>Sensors</i> 2023, 23, 2282. https://doi.org/10.3390/s23042282 9. Ignas Grigelionis, Vladislovas Čižas, Mindaugas Karaliūnas, Vytautas Jakštas, Kęstutis Ikamas, Andrzej Urbanowicz, Marius Treideris, Andrius Bičiūnas, Domas Jokubauskis, Renata Butkutė, Linas Minkevičius, Narrowband Thermal Terahertz Emission from Homoepitaxial GaAs Structures Coupled with Ti/Au Metasurface, <i>Sensors</i>, Volume 23, Issue 10, 4600 (2023). 10. Karpus Vytautas; Čechavičius Bronislovas; Tumėnas Saulius; Stanionytė Sandra; Butkutė Renata; Skapas Martynas; Paulauskas Tadas, Optical anisotropy of CuPt-ordered GaAsBi alloys, <i>J. Phys. D: Appl. Phys.</i> 54 (2021) 504001 (8pp) https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac244a 11. Mindaugas Karaliūnas, Evelina Dudutienė, Aurimas Čerškus, Justas Pagalys, Simona Pūkienė, Andres Udál, Renata Butkutė, Gintaras Valušis, High precision parabolic quantum wells grown using pulsed analog alloy grading technique: Photoluminescence probing and fractional-dimensional space approach, <i>Journal of Luminescence</i>, Vol. 239, p. 118321 (9 ps) (2021), https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118321
Patvirtinta Medžiagų inžinerijos mokslų krypties doktorantūros komiteto posėdyje 2026 m. vasario 24 d., protokolo Nr. 5.2.2 E-15600-KT-725		
Komiteto pirmininkas dr. Arūnas Kadys		