



STUDIJŲ DALYKO (MODULIO) APRAŠAS

Dalyko (modulio) pavadinimas	Kodas
Netiesinė optika	

Dėstytojas (-ai)	Padalinys (-iai)
Koordinuojantis: prof. Audrius Dubietis Kitas (-i): doc. Rytis Butkus, Arūnas Čiburys (lab. darbai)	Fizikos fakultetas, Lazerinių tyrimų centras

Studijų pakopa	Dalyko (modulio) tipas
Antroji (magistro)	Privalomas

Igyvendinimo forma	Vykdymo laikotarpis	Vykdymo kalba (-os)
Auditorinė	1 semestras	Lietuvių

Reikalavimai studijuojančiajam	
Išankstiniai reikalavimai: Optikos, Lazerių fizikos (ar kvantinės elektronikos) kursai	Gretutiniai reikalavimai (jei yra):

Dalyko (modulio) apimtis kreditais	Visas studento darbo krūvis	Kontaktinio darbo valandos	Savarankiško darbo valandos
5	140	64	76

Dalyko (modulio) tikslas: studijų programos ugdomos kompetencijos
<p>Šiame kurse apžvelgiami netiesiniai optiniai reiškiniai atsirandantys dėl intensyvios lazerio spinduliuotės ir medžiagos sąveikos. Supažindinama su netiesiniais optiniais reiškiniais kvadratinio netiesiškumo terpėse – antrosios harmonikos, suminio ir skirtuminio dažnio generacija, parametrine šviesos generacija bei stiprinimu, apžvelgiami parametrinių šviesos stiprintuvų veikimo principai, naujausi moksliniai ir praktiniai šios srities pasiekimai. Nagrinėjami šviesos saviveikos skaidriose kubinio netiesiškumo terpėse reiškiniai – šviesos saviveika, šviesos gijų susidarymas ir superkontinuumo generacija, aptariamas intensyvios spinduliuotės poveikis skaidrioms medžiagoms – netiesinė sugertis, medžiagų jonizacija, optinis pažeidimas, priverstinė Ramano sklaida. Pabaigoje apžvelgiami netiesiniai optiniai reiškiniai, vykstantys stipriame optinės spinduliuotės lauke – aukštesniųjų harmonikų generacija ir netiesiniai optiniai reiškiniai plazmoje, taip pat trumpai supažindinama su ekstremaliais netiesinės optikos reiškiniais. Baigęs šį kursą studentas gebės: (i) suprasti šiuolaikinės netiesinės optikos problematiką ir vystymosi tendencijas, (ii) identifikuoti, suprasti ir paaiškinti pagrindinius netiesinės optikos reiškinius bei juos praktškai pritaikyti darbe su įvairiomis lazerinėmis sistemomis.</p>

Dalyko (modulio) studijų siekiniai	Studijų metodai	Vertinimo metodai
Netiesinės optikos problematika ir netiesinių optinių reiškinų samprata ir apžvalga	Probleminis dėstymas	Egzaminas raštu
Praktinių įgūdžių formavimas, gebėjimas netiesinės optikos reiškinius taikyti praktikoje	Laboratoriniai darbai	Laboratorinio darbo rezultatų gynimas

Temos	Kontaktinio darbo valandos						Savarankiškų studijų laikas ir užduotys	
	Paskaitos	Konsultacijos	Seminarai	Pratybos	Laboratoriniai	Praktika	Visas kontaktinis	Savarankiškas darbas

1. Įvadas į netiesinius optinius reiškinius. Netiesinė poliarizacija. Pagrindiniai netiesiniai reiškiniai. Parametriniai ir neparimetriniai reiškiniai. Virtualių energijos lygmenų diagramos. Netiesinio optinio jautrio kilmė. Optinio jautrio tenzorius ir jo savybės. Efektinis netiesiškumas ir kristalų simetrija.	3						3	3	Paskaitų medžiagos ir vadovėlių skaitymas
2. Banginis netiesinių reiškinų aprašymas. Bangų lygtis netiesinėse medžiagose. Surištųjų amplitudžių lygtys ir trijų bangų sąveikos. Fazinio derinimo vaidmuo. Manley-Rowe sąryšiai.	2						2	2	Paskaitų medžiagos ir vadovėlių skaitymas
3. Netiesiniai optiniai reiškiniai kvadratinio netiesiškumo medžiagose. Fazinis sinchronizmas anizotropiniuose kristaluose. Vektorinis ir temperatūrinis sinchronizmas. Fazinis kvazi sinchronizmas periodiškai orientuotose medžiagose. Atsitiktinis fazinis kvazi sinchronizmas. Antrosios harmonikos generacija. Bangos ilgio keitimas realiuose pluoštuose ir terpėse. Suminio ir skirtuminio dažnio generacija. Pagrindinių netiesinių kristalų apžvalga.	3			16			19	7	Paskaitų medžiagos ir vadovėlių skaitymas, laboratoriniai darbai
4. Parametrinė šviesos generacija ir stiprinimas. Parametrinė fluorescencija ir superfluorescencija. Parametrinis šviesos stiprinimas. Parametriniai osciliatoriai ir stiprintuvai. Ultratrumpųjų impulsų parametrinis stiprinimas. Grupinių greičių nederinimas. Stiprinimo juosta. Nekolinearus parametrinis stiprinimas. Čirpuotų impulsų parametrinis stiprinimas (OPCPA).	5						5	5	Paskaitų medžiagos, vadovėlių ir mokslinės literatūros skaitymas
5. Netiesinis lūžio rodiklis. Nerezonansinis elektroninis netiesiškumas. Orientacinis netiesiškumas. Šiluminis netiesiškumas. Netiesiškumas dėl pakopinių kvadratinų reiškinų. Plazmos netiesiškumas. Netiesinio lūžio rodiklio nustatymas, z-skenavimas.	2						2	2	Paskaitų medžiagos, vadovėlių skaitymas
6. Šviesos sąveikos reiškiniai. Šviesos pluoštų fokusavimasis. Šviesos impulsų fazės moduliavimasis. Sąveikos reiškinų taikymai: Kerro lęšio modų sinchronizacija, impulsų spektro plėtra ir spūda, optiniai solitonai..	2			8			12	6	Paskaitų medžiagos, vadovėlių skaitymas, laboratoriniai darbai
7. Bangos ilgio keitimas kubinio netiesiškumo medžiagose. Keturbangis dažnių maišymas ir keturbangis parametrinis šviesos stiprinimas. Kūginė spinduliuotė. Trečiosios harmonikos generacija. Penktosios harmonikos generacija ir aukštesniųjų eilių netiesiškumai. Priverstinė Ramano sklaida..	2						2	2	Paskaitų medžiagos ir vadovėlių skaitymas
8. Femtosekundinės šviesos gijos. Impulsinių šviesos pluoštų fokusavimasis. Femtosekundinės šviesos gijos skaidriose medžiagose. Femtosekundinių šviesos gijų taikymai. Superkontinuumo generacija tūrinėse terpėse. Impulsinių Beselio pluoštų sąveika..	5						5	5	Paskaitų medžiagos, vadovėlių ir mokslinės literatūros skaitymas
9. Šviesos ir medžiagos sąveika. Dvifotonė, trifotonė ir aukštesnių eilių netiesinė sugertis. Medžiagos jonizacijos režimai. Optinis medžiagų pažeidimas ir jo mechanizmai. Lazериu indukuoto pažeidimo spektroskopija (LIBS). Optinis pažeidimas pasikartojančiais impulsais. Lazериu indukuotos periodinės paviršiaus struktūros.	4			8			12	6	Paskaitų medžiagos, vadovėlių ir mokslinės literatūros skaitymas, laboratoriniai darbai

10. Stiprių laukų netiesinė optika. Aukštesniųjų harmonikų generacija (HHG). Atosekundiniai impulsai. Dalelių greitinimas. Ekstremalioji netiesinė optika.	2						2	2	Paskaitų medžiagos, vadovėlių ir mokslinės literatūros skaitymas
11. Pasiruošimas egzaminui ir jo laikymas								36	Paskaitų medžiagos, vadovėlių ir mokslinės literatūros skaitymas
Iš viso	32					32		64	76

Vertinimo strategija	Svoris proc.	Atsiskaitymo laikas	Vertinimo kriterijai
Laboratoriniai darbai – darbo rezultatų aprašas ir gynimas	20	Semestro metu	5 laboratoriniai darbai, ginant kiekvienas darbas vertinamas atskirai, o bendras įvertinimas nuo 0 iki 2 balų, kurie sumuojami su egzamino rezultatais.
Egzaminas	80	Egzaminų sesijos metu	Egzaminas raštu, 8 klausimai iš viso kurso. Vertinamas atsakymas į kiekvieną klausimą: išsamus atsakymas – 1 taškas, nepilnas atsakymas – 0,5 taško, neteisingas atsakymas – 0 taškų, taškai sumuojami.
Viso	100		Suminis balas apvalinamas į didesnę pusę: <5 balų – neišlaikyta (nepakankamai) 5 balai – silpnai 6 balai – patenkinamai 7 balai – vidutiniškai 8 balai – gerai 9 balai – labai gerai 10 balų – puikiai

Autorius	Leidimo metai	Pavadinimas	Periodinio leidinio Nr. ar leidinio tomas	Leidimo vieta ir leidykla ar internetinė nuoroda
Privaloma literatūra				
A. Dubietis	2011	Netiesinė optika		VU leidykla, Vilnius, 178 p.
R. W. Boyd	2008	Nonlinear optics	3 rd. Ed.	Academic Press, 613 p.
O. Balachnaitė ir kt.	2008	Netiesinės optikos laboratoriniai darbai		VU leidykla, 152 p.
Papildoma literatūra				
A. Dubietis, A. Couairon	2018	Ultrafast supercontinuum generation in transparent solid state media		Springer Nature, 125 p.
A. P. Stabinis, G. Valiulis	2008	Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika		TEV, Vilnius, 244 p.
R. L. Sutherland ed.	2003	Handbook of nonlinear optics	2 nd Ed.	Marcel Dekker Inc., 972 p.



COURSE UNIT (MODULE) DESCRIPTION

Course unit (module) title	Code
Nonlinear Optics	

Lecturer(s)	Department(s) where the course unit (module) is delivered
Coordinator: prof. Audrius Dubietis Other(s): assoc. prof. Rytis Butkus, Arūnas Čiburys	Laser Research Center, Faculty of Physics

Study cycle	Type of the course unit (module)
Second (master program)	Compulsory

Mode of delivery	Period when the course unit (module) is delivered	Language(s) of instruction
Auditorium	1 semester	Lithuanian

Requirements for students	
Prerequisites: Courses of Optics, Laser Physics (or Quantum Electronics)	Additional requirements (if any):

Course (module) volume in credits	Total student's workload	Contact hours	Self-study hours
5	140	64	76

Purpose of the course unit (module): programme competences to be developed

This course overviews nonlinear optical phenomena arising from interaction of intense laser radiation with matter. The first part of the course is dedicated to nonlinear optical phenomena in materials with second order nonlinearity: second harmonic, sum and difference frequency generation, and optical parametric amplification with the emphasis on design principles of the optical parametric amplifiers and their current state of the art. The second part deals with nonlinear optical phenomena in materials with cubic nonlinearity: self-action of intense laser pulses and beams, femtosecond filamentation, supercontinuum generation, nonlinear absorption and ionization, optical damage and stimulated Raman scattering. Finally, a brief overview of strong field phenomena, such as high harmonic generation and plasma nonlinearities is given. By the end of the course, student will be able (i) to understand the scope and trends of modern nonlinear optics; (ii) to identify, understand and explain nonlinear optical phenomena, and apply them in practice working with diverse lasers and laser systems.

Learning outcomes of the course unit (module)	Teaching and learning methods	Assessment methods
Overview and understanding of nonlinear optical phenomena	Lectures	Exam
Training of practical skills, ability to apply nonlinear optical phenomena in practice	Laboratory work	Defence of laboratory work results

Content: breakdown of the topics	Contact hours	Self-study work: time and assignments

	Lectures	Tutorials	Seminars	Exercises	Laboratory work	Internship/work placement	Contact hours	Self-study hours	Assignments
1. Introduction to nonlinear optical phenomena. Nonlinear polarization. Basic nonlinear phenomena. Parametric and nonparametric phenomena. Virtual energy level diagrams. Origin of nonlinear optical susceptibility. Susceptibility tensor and its properties. Effective nonlinearity and symmetry properties of crystals.	3						3	3	Reading of lecture notes and textbooks
2. Wave description of nonlinear optical phenomena. Wave equation in nonlinear materials. Coupled wave equations and three wave interactions. The role of phase matching. Manley-Rowe relations.	2						2	2	Reading of lecture notes and textbooks
3. Nonlinear optical phenomena in materials with quadratic nonlinearity. Phase matching in anisotropic crystals. Vector and temperature phase matching. Quasi-phase matching in periodically poled materials. Random quasi-phase matching. Second harmonic generation. Wavelength conversion with real beams and pulses. Sum and difference frequency generation. Overview of basic nonlinear crystals.	3				16		19	7	Reading of lecture notes and textbooks, laboratory work
4. Optical parametric generation and amplification. Parametric fluorescence and superfluorescence. Optical parametric amplification. Optical parametric oscillators and amplifiers. Optical parametric amplification of ultrashort light pulses. Group velocity mismatch. Amplification bandwidth. Noncollinear optical parametric amplification. Optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA).	5						5	5	Reading of lecture notes, textbooks and scientific literature
5. Nonlinear index of refraction. Nonresonant electronic nonlinearity. Nonlinearity due to molecular orientation. Thermal nonlinearity. Nonlinearity due to second-order cascading. Plasma nonlinearity. Evaluation of nonlinear refractive index, z-scan.	2						2	2	Reading of lecture notes and textbooks
6. Self-action phenomena. Self-focusing of light beams. Self-phase modulation of light pulses. Applications of self-action phenomena: Kerr lens mode-locking, spectral broadening and pulse post-compression, optical solitons.	4				8		12	6	Reading of lecture notes and textbooks, laboratory work
7. Frequency conversion via self-action effects. Four-wave mixing and four-wave parametric amplification. Conical emission. Third harmonic generation. Fifth harmonic generation, the role of higher order nonlinearities. Stimulated Raman scattering.	2						2	2	Reading of lecture notes and textbooks
8. Femtosecond filamentation. Self-focusing of pulsed light beams. Femtosecond filamentation in transparent materials. Applications of femtosecond filaments. Supercontinuum generation in transparent bulk materials. Self-action of ultrashort-pulsed Bessel beams.	5						5	5	Reading of lecture notes, textbooks and scientific literature

9. Light-matter interactions. Two photon, three photon and higher order nonlinear absorption. Ionization regimes. Optical damage and its mechanisms. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). Optical damage via multiple pulse illumination. Laser induced periodic surface structures. .	4				8		12	6	Reading of lecture notes, textbooks and scientific literature laboratory work
10. Strong-field nonlinear optics. High harmonic generation (HHG). Attosecond pulses. Particle acceleration. Extreme nonlinear optics	2						2	2	Reading of lecture notes and textbooks
11. Preparation for the exam								3	
								6	
Total	32				32		64	7	6

Assessment strategy	Weight, %	Deadline	Assessment criteria
Laboratory work	20	By the end of semester	5 laboratory works, each work is defended separately. The final mark is from 0 to 2, which add to a final course mark
Exam	80	By the end of the course	Exam in written form, 8 questions from the whole course. Answers to each topic are marked as follows: 0 (incorrect answer), 0.5 (partially correct) and 1 (correct). All marks sum up.
Overall	100		The overall mark is the sum of the above items and is rounded. <5 below threshold 5 – weak 6 – satisfactory 7 – average 8 – good 9 – very good 10 – excellent

Author	Year of publication	Title	Issue of a periodical or volume of a publication	Publishing place and house or web link
Compulsory reading				
A. Dubietis	2011	Nonlinear optics (in Lithuanian)		Vilnius University Press, Vilnius, 178 p.
R. W. Boyd	2008	Nonlinear optics	3 rd. Ed.	Academic Press, 613 p.
O. Balachninaite et al	2008	Nonlinear optics laboratory practice (in Lithuanian)		Vilnius University Press, Vilnius, 152 p.
Optional reading				
A. Dubietis, A. Couairon	2018	Ultrafast supercontinuum generation in transparent solid state media		Springer Nature, 125 p.
A. P. Stabinis, G. Valiulis	2008	Nonlinear optics of ultrashort light pulses (in Lithuanian)		TEV, Vilnius, 244 p.
R. L. Sutherland ed.	2003	Handbook of nonlinear optics	2 nd Ed.	Marcel Dekker Inc., 972 p.