



2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veikslių programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-09-V priemonės „Studijų programų plėtra Nacionalinėse kompleksinėse programose“

Projektas

„I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Projekto numeris VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-005

ŠILUMINIO SPINDULIAVIMO TYRIMAS IR TEMPERATŪROS MATAVIMAS OPTINIU PIROMETRU

Praktinio užsiėmimo konspektas
magistrantūros programos
„Saulės elementų ir modulių inžinerija“
studentams

Parengė
doc., dr. D. Jasaitis
prof., dr. A. Jukna
dr. V. Valuntaitė

Vilnius 2012

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Saulės elementų ir modulių inžinerijos magistrantas turi turėti žinių apie Saulės energijos išteklius, jų apimtį ir išgavimo technologijas. Saulė – „nemokamas“, ilgalaikis ir ekologiškas energijos šaltinis. Žemę pasiekia apie $4,6 \cdot 10^{-10}$ dalis visomis kryptimis spinduliuojamos Saulės energijos. Saulės elementai paverčia Saulės spinduliuojamą energiją į elektros energiją, todėl jais padengus dalį Žemės paviršiaus, Žmonija galėtų pasigaminti norimą elektros energijos kiekį. Iš Saulės atmosferos apatinio sluoksnio (fotosferos, t.y. matomojo spindinčio Saulės paviršiaus) sklindančios spinduliuotės spektras artimas absoliučiai juodo kūno spektrui, todėl šios studijų programos magistrantams aktualūs ir absoliučiai juodojo kūno šiluminio spinduliavimo dėsniai.

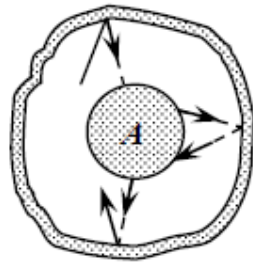
Šis praktinius įgūdžių formavimo užsiėmimas skirtas susipažinimui su šiluminio spinduliavimo reiškiniu, įkaitinto kūno temperatūros matavimui optiniu pirometru ir Stefano-Bolcmano konstantos nustatymui.

Banginė optika neįstengė paaiškinti šiluminio spinduliavimo dėsnio. Pasirodo, kad šį reiškinį galima paaiškinti, jei šviesa yra tam tikros energijos dalelių (korpuskulų) srautas. Šitaip šviesą nagrinėjantis fizikos skyrius vadinamas *kvantine optika*.

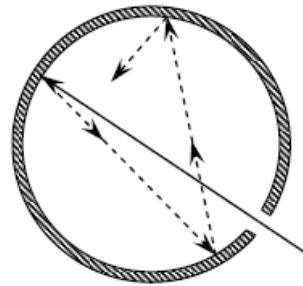
Žinoma, kad visi kūnai, kurių temperatūra didesnė už nulį, skleidžia elektromagnetines bangas, t.y. praranda energiją. Jų vidinė energija (kartu ir temperatūra) turi mažėti. Jei temperatūra nekinta, reiškia energija nuolat papildoma. *Šiluminis* (arba *temperatūrinis*) *spinduliavimas* yra kūno elektromagnetinis spinduliavimas, kurį sukelia kūno sužadinti atomai arba molekulės dėl jų šiluminio judėjimo. Didėjant kūno temperatūrai spinduliuotės tankis didėja. Kitais būdais sužadintas spinduliavimas vadinamas *liuminescenciniu*, pavyzdžiui, katodinė liuminescencija, fotoliuminescencija, cheminė liuminescencija ir kt.

Kūnas ne tik spinduliuoja, bet ir sugeria šiluminę spinduliuotę. Šiluminis spinduliavimas stacionarus, jei spinduliuojančiojo kūno temperatūra pastovi dėl pastovaus jo kaitinimo. Stacionarusis šiluminis spinduliavimas, vykstantis termiškai izoliuotų kūnų sistemoje, kurioje kūnai gali keistis energija tik per elektromagnetinę spinduliuotę ir sugertį, vadinamas *pusiausyruoju šiluminiu spinduliavimu*.

Kiekvienas kūnas, kurio temperatūra aukštesnė kaip 0 K, spinduliuoja energiją. Tačiau būdamas žemos temperatūros, jis skleidžia tik infraraudonuosius spindulius; kuo temperatūra aukštesnė, tuo platesnis spinduliavimo dažnių diapazonas: aukštoje temperatūroje jau spinduliuojami regimieji bei ultravioletiniai spinduliai. Be to, kylant temperatūrai, didėja bet kokia dažnio spinduliavimo intensyvumas. Šiluminio spinduliavimo intensyvumas ir spektras priklauso nuo spinduliuojančio kūno savybių ir temperatūros.



1 pav.



2 pav.

Spinduliuojantį kūną *A* (1 pav.) apgaubkime spinduliavimą idealiai atspindinčiu apvalkalu. Tuomet kūno skleidžiamoji spinduliavimo energija neišsisklaido erdvėje, o visiškai atsispindėjusi nuo apvalkalo vėl daugiau ar mažiau sugeriama kūno – vyksta nepertraukiama energijos kaita. Tokiomis sąlygomis energijos nuostolių nėra. Kai šiluminis spinduliavimas yra pusiausviras, elektromagnetinių bangų, skleidžiamų kiekvieno sistemos kūno per vienetinį laiką, energija lygi energijai bangų, sugeriamų šių kūnų per tą patį laiką. Kai per laiko vienetą kūnas išspinduliuoja tiek pat energijos, kiek ir sugeria, tarp kūno ir spinduliavimo nusistovi dinaminė pusiausvyra. Šitokį spinduliavimą vadiname *pusiausvyruoju*. Tik šiluminis spinduliavimas gali būti pusiausvyrisis, o liuminescenciniai spinduliavimai yra nepusiausvyrieji.

Kūnų šiluminis spinduliavimas energetiniu požiūriu apibūdinamas tam tikrais fizikiniais dydžiais.

Spinduliavimo geba vadinama energija, išspinduliuojama iš kūno paviršiaus ploto vienetą visame bangų ilgių (kartu ir dažnių) ruože ($0 < \lambda < \infty$, arba $0 > \nu > \infty$):

$$\varepsilon = \frac{d^2 E_T}{dS dt} = \frac{dW_T}{dS}, \quad (1)$$

čia: W_T – iš kūno paviršiaus spinduliuojama galia. Indeksas T – dydis yra absoliučiosios

temperatūros funkcija. SI vienetais $\varepsilon = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Vienetiniam dažnių intervalui tenkanti spinduliavimo geba vadinama kūno *spektrine spinduliavimo geba*:

$$\varepsilon(\nu) = \frac{d\varepsilon}{d\nu}. \quad (2)$$

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Spektrinę spinduliavimo gebą galima išreikšti ir kaip vienetiniam bangų ilgių vakuume ruožui tenkančią spinduliavimo gebą:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{d\varepsilon}{d\lambda}. \quad (3)$$

$$\text{SI vienetais } [\varepsilon(\nu)] = \frac{\text{Ws}}{\text{m}^2}, [\varepsilon(\lambda)] = \frac{\text{W}}{\text{m}^3}.$$

Kūno *spektrinės sugerties faktorius* rodo, kokia elektromagnetinių bangų energijos dalis yra sugerama dažnių ruože nuo ν iki $\nu + d\nu$:

$$a(\nu) = \frac{dE_{\nu, Tsug.}}{dE_{\nu, T}}. \quad (4)$$

Kūno *sugerties geba* rodo, kokia elektromagnetinių bangų energijos dalis yra sugerama visame dažnių (kartu bangų ilgių) ruože:

$$a = \frac{dE_{Tsug.}}{dE_T} = \int_0^{\infty} a(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} a(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Galima pagaminti kūną, kurio spinduliavimo ir absorbcijos savybės labai artimos absoliučiai juodo kūno savybėms. Tai beveik uždara ertmė (2 pav.) su nedidele anga. Pro angą patekę spinduliai krinta į ertmės sienelės. Daug kartų sugerti ir atsispindėję sienelėse praktiškai sugeriami bet kokio dažnio spinduliai.

Absoliučiai juodu vadinamas kūnas, kuris sugeria visą į jį krintančią spinduliuotę. Vadinasi, absoliučiai juodo kūno sugerties geba (žymima viršutiniu indeksu \bullet) lygi vienetui:

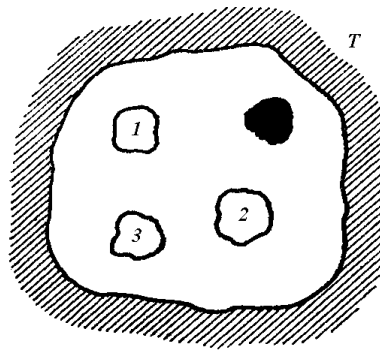
$$a^{\bullet} = 1. \quad (6)$$

Pilkuoju vadinamas kūnas, kurio sugerties geba a_T nepriklauso nuo dažnio (kartu ir nuo bangos ilgio), tačiau yra mažesnė už vienetą, ir yra tik temperatūros bei pilkojo kūno paviršiaus savybių funkcija.

Šiluminio spinduliavimo dėsniai

Kirchhofo dėsnis išreiškia ryšį tarp įvairių kūnų emisijos ir absorbcijos pajėgumų. Įsivaizduokime indą, kurio sienelės iš vidaus išklotos veidrodžiu ir nepraleidžia spindulių, sienelių

temperatūra T palaikoma pastovi. Tarkime, kad šiame inde yra keletas skirtingų kūnų, iš kurių vienas – absoliučiai juodas (3 pav.). Šie kūnai gali tarp savęs ir su indo sienelėmis pasikeisti energija, tik spinduliuodami ir absorbuodami elektromagnetines bangas, nes oras iš indo yra išsiurbtas. Tyrimais nustatyta, kad po kurio laiko visoje sistemoje nusistovi pusiausvyra – visų kūnų temperatūra pasidaro vienoda ir lygi sienelių temperatūrai T . Kūnas, kurio emisijos pajėgumas ε didesnis, per laiko vienetą išspinduliuoja iš ploto vieneto daugiau didesnį energijos kiekį, negu kūnas, kurio ε mažesnis. Kadangi kūnų temperatūra nekinta, tai kūnas išspinduliuojantis daugiau energijos, turi daugiau jos ir absorbuoti, t.y. turi būti didesnis jo absorbcijos pajėgumas a . Taigi kuo didesnis kūno emisijos pajėgumas, tuo didesnis jo ir absorbcijos pajėgumas.



3 pav.

Pagal *Kirchhofo dėsnį* bet kurio kūno spinduliavimo gebos ir sugerties gebos santykis nepriklauso nuo kūno prigimties ir yra universalioji dažnio ir temperatūros funkcija:

$$\frac{\varepsilon(\nu)}{a(\nu)} = \varphi(\nu, T). \quad (7)$$

Funkcija $\varphi(\nu, T)$ vadinama *universalioji Kirchhofo funkcija*.

Iš Kirchhofo dėsnio seka, kad kai kūnas smarkiau spinduliuoja energiją, tai geriau ją ir sugeria. Pavyzdžiui, suodžiais padengta platinos juostelės dalis įkaitusi švyti žymiai ryškiau už nepadengtą suodžiais dalį. Kadangi absoliučiai juodo kūno absorbcijos geba yra lygi 1, tai nejuodo kūno spektrinis spinduliuotės tankis negali būti didesnis už tos pačios temperatūros absoliučiai juodo kūno spektrinį tankį.

Realieji kūnai nėra nei absoliučiai juodi, nei pilkieji, jų sugertiems geba $a(\lambda) < 1$, o jų spektrinė spinduliavimo geba mažesnė už tokios pat temperatūros absoliučiai juodojo kūno spektrinę spinduliavimo gebą:

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon^*(\lambda) a(\lambda). \quad (8)$$

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Kadangi $a(\lambda)$ yra bangos ilgio funkcija, nejuodųjų ir nepilkųjų kūnų spinduliavimo gebos priklausomybės nuo bangų ilgio grafikas, t.y. spektras, nėra geometriškai panašus į tos pačios temperatūros absoliučiai juodojo kūno spektrą. Jeigu tam tikrame bangų ilgių ruože sugertiems geba $a(\lambda)$ kinta nedaug, taikoma vidutinė sugertiems ribos reikšmė, t.y. šiame spektro ruože kūnas laikomas pilkuoju. Pilkojo kūno spinduliavimo geba yra:

$$\varepsilon = a_T \varepsilon_T^{\bullet}, \quad (9)$$

čia ε_T^{\bullet} – absoliučiai juodojo kūno spinduliavimo geba tame pačiame spektro ruože esant tai pačiai temperatūrai.

Stefano ir Bolcmano dėsnis: absoliučiai juodo kūno spinduliavimo geba yra tiesiogiai proporcinga kūno absoliučiajai temperatūrai ketvirtuoju laipsniu:

$$\varepsilon_T^{\bullet} = \sigma T^4, \quad (10)$$

čia: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ - Stefano ir Bolcmano konstanta.

Jeigu spinduliuojančio absoliučiai juodojo kūno absoliučioji temperatūra T ir aplinkos absoliučioji temperatūra T_0 skiriasi mažai, Stefano ir Bocmano dėsnį užrašomas taip:

$$\varepsilon_T^{\bullet} = \sigma(T^4 - T_0^4). \quad (11)$$

Jei kūną, kurio temperatūra matuojama, kaitiname elektros srove I , o ją sukelia įtampa U , tai kūno paviršiaus ploto vieneto spinduliavimo geba:

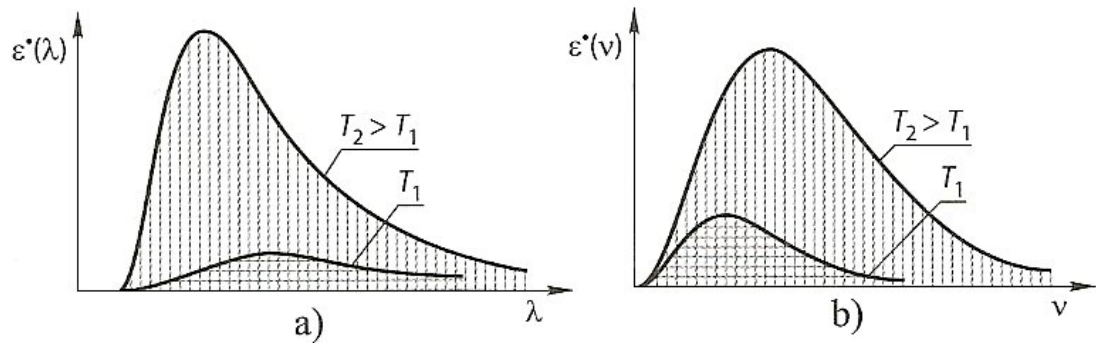
$$\varepsilon_T^{\bullet} = \frac{I \cdot U}{S}. \quad (12)$$

Iš (11) ir (12) gauname Stefano-Bolcmano konstantos išraišką:

$$\sigma = \frac{IU}{AS(T^4 - T_0^4)}. \quad (13)$$

Norint nustatyti Stefano-Bolcmano konstantą σ , reikia išmatuoti elektrinės grandinės parametrus I, U ir spinduliuojančio kūno bei aplinkos temperatūras T ir T_0 .

Spinduliavimo geba netolygiai pasiskirsto absoliučiai juodojo kūno spektre (t.y. pagal dažnį ir bangos ilgį). Skirtingos temperatūros ($T_2 > T_1$) absoliučiai juodojo kūno spinduliavimo gebos kaip bangos ilgio funkcijos grafikas pateiktas 4 pav., a, kaip dažnio funkcijos – 4 pav., b.

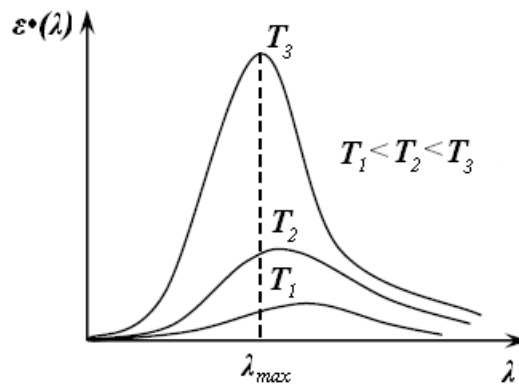


4 pav. Stefano-Bolcmano dėsnio geometrinė interpretacija

Vyno poslinkio dėsnis: bangos ilgis, atitinkantis absoliučiai juodo kūno spinduliavimo gebos maksimumą, atvirkščiai proporcingas kūno absoliučiajai temperatūrai:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (14)$$

čia: $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ - Vyno konstanta.



5 pav. ε_T^* priklausomybės nuo bangos ilgio λ kreivės, esant konkrečioms temperatūros vertėms.

Kai kūno temperatūra yra aukštesnė kaip 2000 K, tuomet įprastiniai jos matavimo metodai tampa nepatikimi arba netgi neįmanomi. Jie netinka Saulės ir žvaigždžių temperatūrai įvertinti. Todėl labai įkaitusių kūnų temperatūroms matuoti ar bent įvertinti taikomi šiluminio spinduliavimo dėsniai: iš kūno spinduliavimo sprendžiama apie jo temperatūrą.

Optinė pirometrija vadinama įkaitintų kūnų optinių temperatūros matavimo metodų visuma. Išmatavus absoliučiai juodo arba bent juodo kūno išspindį, pagal (9) lygtį apskaičiuojama jo temperatūra T . Kūno spinduliuojamos energijos matavimo principu pagrįsti temperatūros matavimo prietaisai vadinami *radiaciniais pirometrais*. Juose spindulių imtuvas dažniausiai esti

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

termoelementas arba bolometras. Pastarojo varža priklauso nuo sugertų spindulių energijos. Yra radiacinių pirometrų su bimetaline plokšte, kuri įkaitusi išlinksta, taip pat pirometrų su dujiniu termometru ir kt. tačiau jei spinduliuojantis kūnas nėra juodas, tai radiacinis pirometras rodo ne tikrąją jo temperatūrą T , o vadinamąją *radiacinę* (spinduliavimo) *temperatūrą* $T_{rad.}$:

$$T_{rad.} = \sqrt[4]{a_T T}. \quad (15)$$

Taip vadinama temperatūra absoliučiai juodo kūno, kurio bendras spinduliavimo energijos srautas yra lygus tiriamo kūno spinduliavimo energijos srautui. Radiacinė temperatūra visuomet yra žemesnė už tikrąją kūno temperatūrą ($T > T_{rad.}$).

Nustačius absoliučiai juodo kūno spinduliuojamos energijos spektrinį pasiskirstymą, randamas λ_{max} . Tuomet pagal Vyno dėsnį (12) apskaičiuojama kūno temperatūra T . Nejuodo kūno temperatūrai matuoti bendruoju atveju negalima taikyti Vyno dėsnio. Tačiau kartais tokių kūnų spinduliavimo spektre energijos pasiskirstymas gali būti artimas juodo kūno, kurio temperatūra $T_{sp.}$, energijos pasiskirstymui. Tuomet spinduliuojančio kūno spalva yra tokia pat kaip ir juodo kūno, kurio temperatūra $T_{sp.}$. Todėl šiuo būdu nustatyta kūno temperatūra $T_{sp.}$, vadinama *spalvine temperatūra*:

$$T_{sp.} = \frac{b}{\lambda_{max}}. \quad (16)$$

Skaistine kūno temperatūra $T_{sk.}$ vadinama tokia absoliučiai juodo kūno temperatūra, kai absoliučiai juodo kūno spektrinė spinduliavimo geba lygi tiriamojo kūno spektrinei gebai:

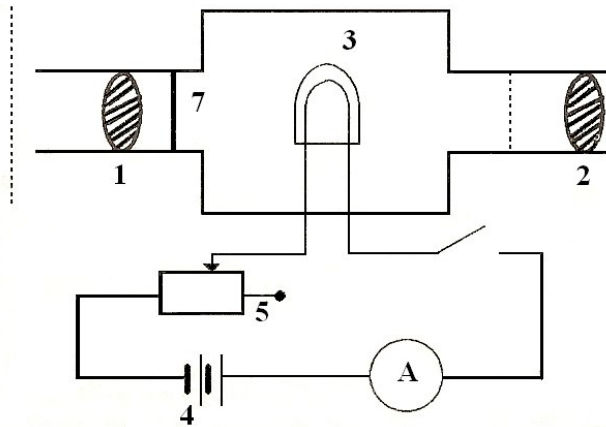
$$\varepsilon_{T_{sk.}}^{\bullet}(\lambda) = \varepsilon_T(\lambda), \quad (17)$$

čia indeksas T žymi tikrąją kūno temperatūrą. Tikroji kūno temperatūra visada didesnė už skaistinę ($T > T_{sk.}$).

Skaistinė temperatūra matuojama *nykstamojo siūlo pirometru*. Pirometro siūlo temperatūra nustatoma pagal Celsijaus laipsniais arba kelvinais graduotą pirometro skalę. Šią temperatūrą galima keisti. Su tiriamuoju kūnu vizualiai sutapdintas siūlas, kai jo temperatūra sutampa su tiriamojo kūno temperatūra, „išnyksta“, t.y. tampa nematomas kūno fone, nes kūno ir siūlo spinduliavimo geba tam tikrame bangų ilgių ruože yra vienoda. Taip nustatoma skaistinė kūno temperatūra, iš kurios žinant pirometro siūlo sugertiems gebą, apskaičiuojama tikroji temperatūra. Šis temperatūros matavimo būdas yra nesąlytinis ir leidžia matuoti nutolusių objektų (pvz., Saulės) temperatūrą.

Yra ir kitais principais veikiančių pirometrų.

Šio praktinio užsiėmimo metu bus naudojama: nykstamojo siūlo pirometras, kaitinamoji lempa, ampermetras, voltmetras, maitinimo šaltinis.



6 pav. Pirometro schema

Temperatūros matavimo optiniu pirometru principas pagrįstas įkaitusio kūno spalvos ir švytėjimo intensyvumo palyginimu su etaloninės lemputės siūlo švytėjimu. Pirometrą (6 pav.) sudaro okuliaras 1 ir objektyvas 2, lemputė 3, kurios grandinėje yra srovės šaltinis 4, reostatas 5 ir ampermetras 6. Ampermetras sugraduotas ne srovės, o jos įkaitinto siūlelio temperatūros vienetais. Švytėjimas sulyginamas reostatu 5, raudonojo filtro ($\lambda = 0,65\mu\text{m}$) šviesoje. Matuojant temperatūrą didesnę negu 1400°C , pastatomas matinis filtras 7 ir temperatūra stebima kitoje skalėje.

Paruošus optinį pirometrą darbui, įjungiamo kaitinimo lempa, kurios matuojama siūlelio temperatūra, maitinimo šaltinis ir sudaroma nedidelė įtampa, tam, kad lemputė silpnai šviestų. Pirometro objektyvas nukreipiamas į kaitinimo siūlą ir nustatomas ryškus vaizdas. Pirometras pastatomas taip, kad jo lemputės siūlas uždengtų tiriamos kaitinimo lempos siūlą. Esant skirtingiems srovės didumams matuojama lemputės siūlo temperatūra t_r . Pagal išmatuotą pirometru temperatūrą t_r ir darbo vietoje pateiktą lentelę nustatoma tikroji temperatūra T ir apskaičiuojama Stefano-Bolcmano konstanta.

Rekomenduojamos temos ir klausimai:

1. Šiluminis spinduliavimas ir jo savybės.
2. Šiluminio spinduliavimo charakteristikos: spinduliavimo ir sugėrimo geba, spektrinė spinduliavimo ir sugėrimo geba.
3. Šiluminio spinduliavimo dėsniai.
4. Energijos pasiskirstymas absoliučiai juodojo kūno spinduliavimo spektre.
5. Planko matinio spinduliavimo hipotezė.
6. Optinio pirometro veikimo principas.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Literatūra:

1. Tamašauskas, A.; Vosylius, J. Fizika 2. Vilnius: Mokslas. 1989, 193 p.
2. Tamašauskas, A.; Vosylius, J.; Radvilavičius Č. Fizika 3. Vilnius: Mokslas. 1992, 180 p.
3. Javorskis, B.; Detlafas, A. Fizikos kursas 3. Vilnius: Mintis. 1975, 582 p.
4. Jakimavičius, J.; Karpinskas, A.; Martinėnas, B.; Šatas, A. Fizikos laboratoriniai darbai. Kvantinė optika. Atominė fizika. Puslaidininkų fizika. Atomo branduolio fizika. Vilnius: VISI. 1984, 96 p.
5. Šalna, V. A. Optika. Vilnius: Enciklopedija. 2004, 272 p.
6. Požėla, I.; Radvilavičius, Č. Fizika 2. Optika ir atomo fizika. Kaunas: Technologija. 2008, 197 p.
7. Bogdanovičius, A. Fizikos pagrindai inžinerijoje. II dalis. Vilnius: Technika. 2010, 323 p.
8. Kukšas, B; Šimkūnas, S. Fizika I. Vilnius: Mintis. 1973, 439 p.