



**Frederick Walter Clarke**

**FARADĖJAUS EFEKTO TYRIMAI  
SIAURATARPIUOSE PUSLAIDININKIUOSE:  
OPTINĖ ALTERNATYVA HOLO MATAVIMAMS**

**Daktaro disertacijos santrauka**

**Fiziniai mokslai, fizika (02P),  
kondensuotos medžiagos (P260)**

**Vilnius**  **LEIDYKLA  
TECHNIKA 2006**

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS  
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

**Frederick Walter Clarke**

**FARADĖJAUS EFEKTO TYRIMAI  
SIAURATARPIUOSE PUSLAIDININKIUOSE:  
OPTINĖ ALTERNATYVA HOLO MATAVIMAMS**

**Daktaro disertacijos santrauka**

**Fiziniai mokslai, fizika (02P),  
kondensuotos medžiagos (P260)**

**Vilnius**  **LEIDYKLA  
TECHNIKA 2006**

Disertacija rengta 1990 – 2005 m. JAV kariuomenės aviacijos ir raketų departamente, JAV kariuomenės kosminės ir raketinės gynybos departamente bei Puslaidininkių fizikos institute.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas:

**habil. dr. Saulius BALEVIČIUS** (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

**Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:**

Pirmininkas:

**prof. habil. dr. Steponas AŠMONTAS** (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Nariai:

**prof. habil. dr. Gintautas Jurgis BABONAS** (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P),

**doc. dr. Rimgaudas Adolfas BENDORIUS** (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P),

**prof. habil. dr. Sigitas TAMULEVIČIUS** (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P),

**habil. dr. Viktoras VAIČIKAUSKAS** (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Oponentai:

**prof. habil. dr. Marek GODLEWSKI** (Lenkijos mokslų akademijos Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P),

**prof. habil. dr. Albertas LAURINAVIČIUS** (Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2006 m. gegužės 8 d. 10 val. Puslaidininkių fizikos instituto posėdžių salėje.

Adresas: A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lietuva

Tel.: +370 5 2619759, +370 5 2617546; faksas +370 5 2627123;

el. p. spiadm@pfi.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2006 m. balandžio 7 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, Vilnius) ir Puslaidininkių fizikos instituto bibliotekoje (A. Goštauto g. 11, Vilnius).

VGTU leidyklos „Technika“ 1260 mokslo literatūros knyga.

© F. W. Clarke, 2006

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY  
SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE

**Frederick Walter CLARKE**

**FARADAY ROTATION ANALYSIS OF NARROW  
GAP SEMICONDUCTORS: AN OPTICAL  
ALTERNATIVE TO THE HALL TEST**

**Summary of Doctoral Dissertation**

**Physical Sciences, Physics (02P),  
Condensed Matter (P260)**

Doctoral dissertation was performed between 1990 – 2005 at the U.S. Army Aviation and Missile Command, U.S. Army Space and Missile Defense Command and the Semiconductor Physics Institute (Vilnius, Lithuania)

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant:

**Dr Habil Saulius BALEVIČIUS** (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P)

**The dissertation is defended at the Council of Scientific Field of Physics of the Vilnius Gediminas Technical University:**

Chairman:

**Prof Dr Habil Steponas AŠMONTAS** (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P)

Members:

**Prof Dr Habil Gintautas Jurgis BABONAS** (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P),

**Assoc Prof Dr Rimgaudas Adolfas BENDORIUS** (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P),

**Prof Dr Habil Sigitas TAMULEVIČIUS** (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Physics – 02P),

**Dr Habil Viktoras VAIČIKAUSKAS** (Institute of Physics, Physical Sciences, Physics – 02P).

Opponents:

**Prof Dr Habil Marek GODLEWSKI** (Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Physical Sciences, Physics – 02P),

**Prof Dr Habil Albertas LAURINAVIČIUS** (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Physics in the hall of the Semiconductor Physics Institute at 10 a. m. on May 8, 2006.

Address: A. Goštauto 11, LT-01108 Vilnius, Lithuania.

Phone: +370 5 2619759, +370 5 2617546; fax : +370 5 2627123;

e-mail: spiadm@pfi.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 7 April, 2006

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Libraries of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, Vilnius) and the Semiconductor Physics Institute (A. Goštauto g. 11, Vilnius).

# Bendras disertacinio darbo apibūdinimas

## Temos aktualumas

Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te medžiagą pirmą kartą pagamino britų mokslininkai [1–3] 1958 metais ir nuo to laiko ji tapo viena labiausiai tiriamų bei naudojamų siauratarpių puslaidininkių, kuriant 3–30 μm bangos ilgio elektromagnetinio spinduliavimo registravimo prietaisus. Silpnas Hg-Te ryšys šioje medžiagoje [3–4] stimuliuoja Te ir HgTe darinių formavimąsi, todėl homogeniško didelio tūrio HgCdTe sintezavimas iki šiol yra rimta technologinė problema.

Nuo 1980 iki 1990 metų infraraudonosios srities spinduliavimo detektoriai buvo gaminami iš tūrinių HgCdTe plokštelių, kurių savybės nustatomos, naudojant Holo arba Van der Pauw metodą. Abu šie būdai reikalauja gerų „ominių“ kontaktų, kurių formavimo metu tam tikros puslaidininkio sritys papildomai legiruojamos ir keičia savo savybes. Be to Holo efekto tyrimas leidžia nustatyti tik vidutines puslaidininkio parametrų vertes tarpkontaktinėje srityje, kuri paprastai siekia keletą cm<sup>2</sup>. Tuo tarpu vienietinių infraraudonojo spinduliavimo jutiklių dydžiai gerokai mažesni, dėl to galutinės detektoriaus charakteristikos buvo nustatomos tik po to, kai sukuriamas visas prietaisas. Todėl buvo ieškoma alternatyvių būdų, ypatingą dėmesį kreipiant į optinius metodus, kurie yra spartūs, neiššaukia negrįžtamų pokyčių puslaidininkyje ir juos naudojant galima gauti informaciją apie palyginti mažo medžiagos tūrio savybes.

Optiniai tyrimai leidžia nustatyti krūvininkų judrį  $\mu$ , jų koncentraciją  $N$  bei puslaidininkinių medžiagų elektrinį laidumą, jeigu iš anksto yra žinoma efektinė masė  $m^*$ . Kai temperatūros aukštesnės, negu skystojo helio temperatūra, labiausiai tinkamas yra Faradėjaus efektas, pasireiškiantis kaip šviesos bangos poliarizacijos plokštumos sukimas išoriniame magnetiniame lauke. Puslaidininkiuose šis efektas turi dvi pagrindines dedamąsias: pirmoji atsiranda dėl elektromagnetinės bangos sąveikos su laisvaisiais krūvininkais ir yra vadinama „plazmine dedamąja“, o antroji – dėl krūvininkų sužadavimo per uždraustą energijos tarpą ir todėl vadinama „tarpjuostine dedamąja“. Infraraudonojoje spektro srityje plazminė dedamoji yra proporcinga  $N/m^{*2}$  ir nepriklauso nuo defektų bei krūvininkų sklaidos mechanizmų. Kai temperatūros aukštesnės, negu skystojo helio temperatūra, šios dedamosios išskyrimas HgCdTe medžiagoje buvo gana sudėtinga techninė problema, todėl sistemingi  $m^*$  tyrimai šioje medžiagoje nėra atlikti. Paprastai pramonėje ir tyrimuose buvo naudojamos teorinės  $m^*_{be}$  vertės, apskaičiuotos ties laidumo juostos dugnu, naudojant Kane modelį [5–6]. Dėl laidumo juostos neparaboliškumo buvo manoma, jog efektinė masė aukštesnėse temperatūrose gali būti žymiai didesnė, negu  $m^*_{be}$ . Pagal Ahrenkiel [7] ir Elizarov [8] kambario temperatūroje ji yra du kartus didesnė už  $m^*_{be}$ .

Būtina pažymėti, jog, nežiūrint daugelio privalumų, optiniai metodai yra mažiau jautrūs, palyginus su elektriniais, pavyzdžiui, Holo efektu, ir todėl pakankamai efektyvūs, kai krūvininkų tankis viršija  $10^{15}$ – $10^{16}$  cm<sup>-3</sup>. Tačiau to pakanka tiriant tokius siauratarpius puslaidininkius, kaip Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te, kai  $x \leq 0,30$  ir InSb arba kitas panašias medžiagas, naudojamas infraraudonojo spektro šviesos

bangoms registruoti. Klasikinės teorijos ribose Faradėjaus plokštumos sukimo kampo  $\theta$  ir absorbcijos koeficiento  $\alpha$  santykis yra proporcingas krūvininkų judriui  $\mu$ . Šis ryšys leidžia nustatyti  $\mu$ , atlikus du paprastus matavimus, naudojant skirtingus vieno ir to paties prietaiso registravimo kanalus, iš anksto nežinant nei lūžio rodiklio, nei efektinės masės ar krūvininkų koncentracijos. Pagrindiniai sunkumai, išskylantys šiuo atveju, yra tai, jog turi būti žinoma, kokiems krūvininkams (elektronams ar skylėms) šis santykis  $\theta/\alpha$  yra nustatomas, ir tai, kad proporcingumo koeficientas tarp  $\theta/\alpha$  ir  $\mu$  yra žinomas tik klasikinės teorijos galiojimo ribose, kai šviesos kvanto energija  $\hbar\omega < kT$ . Labai svarbus 5–20  $\mu\text{m}$  ruožas, kuriame veikia infraraudonojo spektro detektoriai, atitinka kvantinį režimą, t.y.  $\hbar\omega > kT$ . Šiuo atveju proporcingumo koeficientas  $C$  tarp  $\theta/\alpha$  ir  $\mu$  yra sudėtingas ir turi būti nustatytas, naudojant papildomus tyrimus.

Šiame darbe tokie tyrimai buvo atlikti n-tipo HgCdTe, InSb, GaAs, Si ir Ge bandiniuose, esant įvairioms jų temperatūroms. InSb, GaAs, Si ir Ge medžiagos tarnavo kaip etalonai, kuriant ir išvystant originalias didelio jautrio Faradėjaus efekto tyrimo savojo laidumo siauratarpiuose puslaidininkiuose metodikas. Nustatant proporcingumo koeficiento tarp  $\theta/\alpha$  ir  $\mu$  vertes įvairiose temperatūrose, krūvininkų judris  $\mu$  buvo išmatuotas, naudojant Holo efektą, o efektinio absorbcijos skerspjūvio vertės n-tipo HgCdTe ir InSb medžiagoms buvo paimtos iš literatūros. Holo efekto matavimams buvo panaudota speciali „šaltų“ elektrinių kontaktų gamybos technologija, neturinti įtakos elektrinėms puslaidininkio savybėms. Kadangi n-tipo HgCdTe ir InSb skylių efektinės masės yra žymiai didesnės už elektronų, galima tvirtinti, jog  $\theta/\alpha$  nulemia laisvieji krūvininkai (elektronai), tačiau šiose medžiagose skylių absorbcijos koeficientas  $\alpha$  yra daug didesnis už elektronų, o šio koeficiento priklausomybės nuo šviesos bangos ilgio abiejų rūšių krūvininkams yra labai artimos ir dėl to sunkiai išskiriamos. Dėl šios priežasties absorbcijos koeficientas  $\alpha$  buvo apskaičiuojamas, remiantis literatūros duomenimis. Taip pat buvo pasinaudota tuo, jog Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te, kai  $x = 0,20$ , elektronų skaičius apie 100 kartų viršija skylių skaičių, o tai atitinka  $N \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , todėl skylių įtaka absorbcijai yra nežymi. n-tipo InSb atveju, kai legiravimo laipsnis siekia  $N \geq 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , šioje medžiagoje skylių absorbcijos galima neįskaityti.

Taigi darbe buvo išvystytas alternatyvus Holo efektui optinis metodas, leidžiantis plačiame temperatūrų ruože tarp 77 K ir 296 K nustatyti krūvininkų (elektronų) efektinę masę Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te medžiagoje, kai  $0,2 \leq x \leq 0,3$ , ir, ją naudojant, apskaičiuoti šių krūvininkų koncentraciją. Remiantis šiuo metodu, buvo ištirtos efektinės masės priklausomybės nuo temperatūros tipiškiausiuose siauratarpiuose puslaidininkiuose, t.y. n-tipo HgCdTe, InSb, GaAs, o taip pat Si ir Ge.

### **Darbo tikslai**

Šio darbo tikslas buvo sukurti greitą, paprastą, neiššaukiančią negrįžtamų pokyčių puslaidininkyje krūvininkų koncentracijos ir judrio matavimo metodiką, naudojant Faradėjaus sukimą ir santykio tarp Faradėjaus sukimo  $\theta$  ir absorbcijos

koeficiento  $\alpha$  nustatymą, bei sukurti siauratarpių puslaidininkių, tokių kaip InSb bei HgCdTe, efektinės masės  $m^*$  matavimo metodiką. Buvo siekiama:

- išmatuoti HgCdTe medžiagoje  $m^*$  priklausomybę nuo temperatūros  $T$ ;
- išmatuoti InSb, GaAs ir Si medžiagose  $m^*$  priklausomybę nuo  $T$ ;
- apskaičiuoti santykį tarp eksperimentiškai nustatytos HgCdTe efektinės masės  $m^*$  ir efektinės masės  $m_{be}$ , apskaičiuotos teoriškai ties laidumo juostos dugnu;
- išmatuoti proporcingumo koeficientą  $C$  tarp laisvųjų krūvininkų Faradėjaus sukimo ir absorbcijos koeficiento santykio  $\theta/\alpha$  bei krūvininkų judrio  $\mu$ .

### **Pagrindiniai šio darbo uždaviniai**

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai buvo sukurti ir išvystyti sparčias, palyginti paprastas, neardančias tiriamos medžiagos krūvininkų judrio ir koncentracijos, matavimo metodikas, kurios būtų lengvai automatizuojamos ir tinkamos pramonėje, nustatant siauratarpių puslaidininkių savybes:

- sukurti įtaisą, leidžiantį atskirti Faradėjaus efekto dedamąsias siauratarpiuose puslaidininkiuose, siekiant nustatyti laisvųjų krūvininkų koncentraciją arba efektinę masę plačiame temperatūrų ruože, naudojant optinį tyrimo metodą;
- sukurti įtaisą, leidžiantį optiniu būdu išmatuoti krūvininkų judrį, naudojant Faradėjaus efekto sukimo kampo ir absorbcijos santykį;
- išbandyti šiuos įtaisus gerai ištirtose medžiagose, t.y. InSb, GaAs, Si ir Ge;
- atlikti Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te puslaidininkio, kai  $0,20 \leq x \leq 0,30$ , sistemingus efektinės masės priklausomybės nuo temperatūros tyrimus ir palyginti rezultatus su teoriniais skaičiavimais.

### **Mokslinis naujumas**

1. Pasiūlyta nauja metodika bei sukurtas ir išbandytas jai realizuoti skirtas įtaisas Faradėjaus efekto tyrimui, naudojant CO<sub>2</sub> lazerį, pasižymintis padidintu signalas-triukšmas santykiu.
2. Sukurta ir išbandyta nauja didelės skiriamosios gebos Faradėjaus efekto spektrinės analizės tyrimo metodika, leidžianti tiesiogiai išmatuoti krūvininkų efektinę masę arba koncentraciją siauratarpiuose puslaidininkiuose.
3. Pasiūlyta ir išbandyta nauja sparti metodika, paremta Faradėjaus sukimo ir absorbcijos koeficiento santykio tyrimu ir skirta laisvųjų krūvininkų judriui išmatuoti.



4. Atlikti sistemingi empiriniai efektinės masės tyrimai n-tipo HgCdTe ir InSb, bei GaAs, Si ir Ge medžiagose.

### **Praktinė vertė**

Faradėjaus efekto tyrimo metodikos, sukurtos vykdant disertacinio darbo užduotis, leidžia atlikti siauratarpių puslaidininkų krūvininkų judrio ir koncentracijos matavimus, neiššaukiant tiriamoje medžiagoje negrįžtamų jos savybių pakitimo, todėl gali būti naudojamos infraraudonosios šviesos jutiklių pramonėje greitam puslaidininkinės medžiagos kokybės nustatymui. Empirinės proporcingumo koeficientų tarp krūvininkų judrio ir Faradėjaus sukimo bei absorbcijos koeficiento santykio priklausomybės nuo temperatūros, gautos šiame darbe, gali būti panaudotos, nustatant naujai pagaminto siauratarpio puslaidininkio krūvininkų judrį ir koncentraciją tuo atveju, kai šios konstantos negali būti apskaičiuojamos, remiantis klasikine teorija, galiojančia, kai šviesos kvanto energija  $\hbar\omega < kT$ .

### **Rezultatų aprobacija**

Pagrindiniai tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiose tarptautinėse SPIE konferencijose 1994, 1995, 1996 ir 2004 metais. Jie taip pat publikuoti leidiniuose, įtrauktuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) sąrašą, tokiuose kaip *The Journal of Applied Physics*, *The Journal of Electronic Materials*, and *Semiconductor Science and Technology*. Dvi tyrimų metodikos yra patentuotos JAV.

### **Ginamieji teiginiai**

1. Infraraudonojoje spektro srityje Faradėjaus efektas leidžia vienareikšmiškai nustatyti siauratarpių puslaidininkų krūvininkų efektinę masę arba koncentraciją bei atskirti šio efekto dedamąsias, nulemtas laisvųjų krūvininkų ir tarpjuostinių šuolių. Šis metodas yra spartus, neiššaukia negrįžtamų pokyčių tiriamoje medžiagoje ir gali būti nesunkiai automatizuojamas.
2. Eksperimentiniu būdu  $77 \text{ K} \leq T \leq 296 \text{ K}$  temperatūrų ruože nustatytos krūvininkų efektinės masės  $m^*$  vertės Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te, kai  $0,20 \leq x \leq 0,30$ , yra didesnės negu  $m^*_{be}$ , gaunamos iš teorinių skaičiavimų elektronams laidumo juostos dugne. Šio nesutapimo priežastis yra siauratarpių puslaidininkų laidumo juostos neparaboliškumas. Skirtumas tarp  $m^*$  ir  $m^*_{be}$  auga, didėjant temperatūrai, kaip  $m^* = (4,52 \times 10^{-3} T + 0,78) m^*_{be}$ .
3. Dėl mažo skylių judrio, palyginus su elektronų judriu, Faradėjaus efektas laisviesiems elektronams n-tipo HgCdTe gali būti nustatytas atskirai tik šiems krūvininkams. Taip pat absorbcija laisvais elektronais gali būti atskirta

nuo skylių absorbcijos šioje medžiagoje, jeigu priemaišų koncentracija viršija  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , nes tokiu atveju elektronų skaičius yra daugiau kaip 100 kartų didesnis, negu skylių. Elektronų judrį šiomis sąlygomis galima nustatyti, žinant Faradėjaus efekto ir absorbcijos koeficiento santykį.

4. Naudojant kvaziklasikinį modelį laisviesiems krūvininkams, įskaitantį tris Faradėjaus efekto dedamąsias, t.y. tarpjuostinę, sukinio ir plazminę, galima iš dalies paaiškinti eksperimentiniu būdu gautus rezultatus. Įskaitymas tik tarpjuostinės ir plazminės dedamųjų HgCdTe ir InSb medžiagose duoda palyginti gerą eksperimento ir teorijos sutapimą aukštesnėse temperatūrose. Tuo tarpu sukinio dedamosios įskaitymas, ypač aukštesnėse temperatūrose, žymiai padidina eksperimento ir teorijos nesutapimą.

### **Disertacijos sandara**

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, apibendrinimas ir pagrindinės išvados, cituojamos literatūros sąrašas, mokslinių darbų disertacijos tema sąrašas ir santrauka lietuvių kalba.

### **Disertacijos turinys**

**Įvade** pagrįstas darbo aktualumas, nurodyti pagrindiniai darbo tikslai, spręsti uždaviniai, mokslinis naujumas ir ginamieji teiginiai.

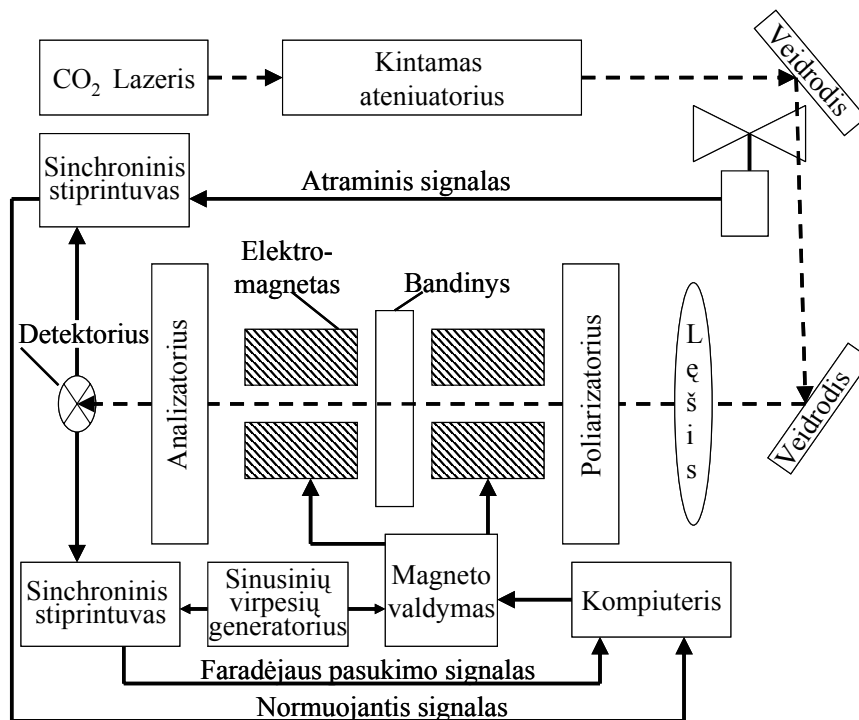
## **1. Literatūros apžvalga**

**I skyriuje** apžvelgti pagrindiniai optiniai (infraraudonosios srities) metodai, naudojami krūvininkų koncentracijos  $N$  ir judrio  $\mu$  matavimams puslaidininkiuose. Tai atspindžio metodas, naudojamas absorbcijos plazminio krašto nustatymui, siekiant išmatuoti krūvininkų koncentracijos ir efektinės masės santykį  $N/m^*$  ir relaksacijos trukmę  $\tau$ ; laisvųjų krūvininkų absorbcijos tyrimai, iš kurių nustatomas santykis  $N/m^*$  ir elektrinis laidumas  $\sigma_0 = Ne\mu$ , čia  $e$  yra elektrono krūvis; ir infraraudonosios srities Faradėjaus sukimas dėl laisvųjų krūvininkų, iš kurio taip pat gaunamas santykis  $N/m^{*2}$ . Laisvųjų krūvininkų Faradėjaus sukimo  $\theta$  santykis su absorbcijos koeficientu  $\alpha$  leidžia nustatyti šio santykio proporcingumo judriui koeficientą  $C$ . Taigi jei  $C$  yra žinomas, judris gali būti nustatytas, naudojant du gana paprastus tiesioginius matavimus, kai iš anksto nebūtina žinoti lūžio rodiklio  $n$ , efektinės masės  $m^*$  arba koncentracijos  $N$ . Skirtingoms medžiagoms proporcingumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros yra skirtinga dėl skirtingų vyraujančių krūvininkų išbarstymo mechanizmų. Faradėjaus sukimas infraraudonojoje spektro srityje nepriklauso nuo išbarstymo mechanizmų. Šioje disertacijos dalyje taip pat apžvelgiami infraraudonosios srities absorbcijos koeficiento, kuris yra svarbus proporcingumo koeficiento  $C$  tarp  $\mu$  ir  $\theta/\alpha$  nustatymui, matavimai tokiose medžiagose: HgCdTe, InSb, GaAs, Si ir Ge. Taip

pat trumpai apžvelgiami mikrobangų ruožo Faradėjaus sukimo ir helikoninių bangų tyrimai puslaidininkiuose.

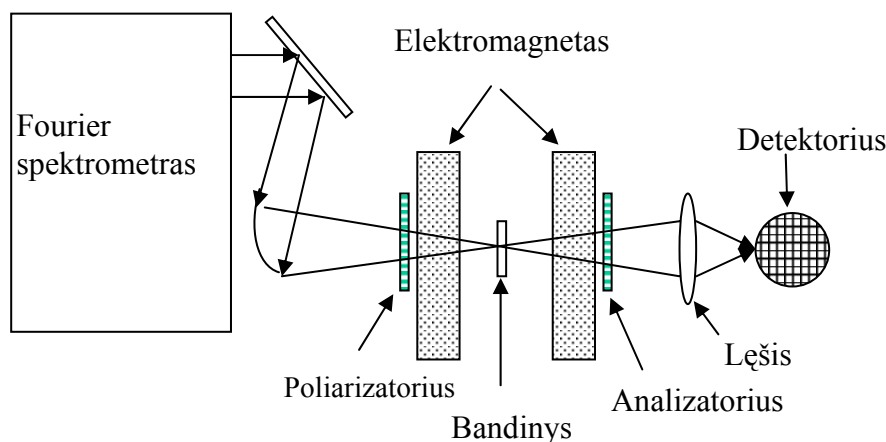
## 2. Tyrimų metodika

**II skyriuje** pateikti trijų naujų Faradėjaus efekto tyrimo metodikų aprašymai. Pirmoji yra skirta padidinti signalo ir triukšmų santykį ir išmatuoti Faradėjaus sukimą, esant skirtingiems bangų ilgiams  $\lambda$ . Tokio prietaiso ir matavimų principinė schema parodyta 1 paveiksle, o jo veikimas plačiau aprašytas patentuose [9–10] ir straipsnyje [11]. CO<sub>2</sub> lazerio, derinamo šiuo atveju nuo 9,3  $\mu\text{m}$  iki 10,6  $\mu\text{m}$ , spindulys, praėjęs pro šviesos pertraukėją, veikiantį 100 Hz dažniu, yra tiesiškai poliarizuojamas poliarizatoriumi ir, praėjęs magneto polius bei bandinį, patenka į analizatorių ir detektorių. Atraminis 100 Hz signalas, aplenkdamas bandinį, patalpintą magnetiniame lauke, tiesiai patenka į sinchroninį stiprintuvą. Faradėjaus sukimo signalas yra sukuriamas, naudojant sinusinių virpesių generatorių (nustatytą 40 Hz dažniu), kuris valdo magnetą. Signalas iš šio generatoriaus patenka į kitą sinchroninį stiprintuvą, nustatytą 40 Hz dažniui. Abiejų signalų santykis yra proporcingas Faradėjaus sukimui. Todėl žymiai padidinamas signalas-triukšmas santykis, dėl to išauga metodo jautrumas. Iš pradžių buvo nustatomas normuojančio signalo dydis, o Faradėjaus sukimo signalas buvo nuskaitomas kaip pokytis, atsirandantis įjungus magnetą. Pradinis normuojančio signalo dydis buvo tikrinamas, išjungus po matavimų magnetinį lauką. Taip buvo nustatoma, ar matavimų metu nebuvo pradinio signalo dreifo.



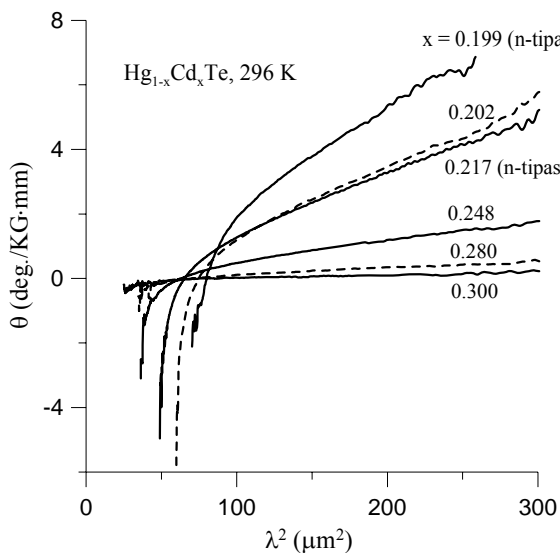
1 pav. Blokinė pirmosios Faradėjaus efekto tyrimų metodikos schema [9]

2 pav. parodyta antrosios metodikos blokinė schema, kuri leido patobulinti Faradėjaus efekto tyrimus, papildomai šalia Fourier infraraudonosios srities spektrometro (FTIR) panaudojant magnetą ir polarizatoriaus-analizatoriaus porą ir taip gauti didelės skiriamosios gebos Faradėjaus sukimo spektrus.

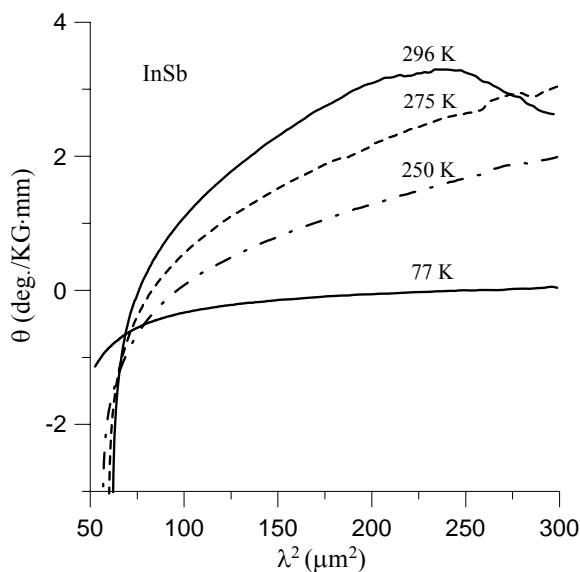


2 pav. Blokinė antrosios Faradėjaus efekto tyrimų metodikos schema [12]

Siauratarpių puslaidininkių, tokių kaip n-tipo  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ir beveik savojo laidumo  $\text{InSb}$  ( $N_{(296\text{ K})} = 1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) Faradėjaus sukimo spektrai yra parodyti 3 ir 4 paveiksluose.



3 pav. Faradėjaus sukimo kampo spektrai  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , kai  $0,20 \leq x \leq 0,30$

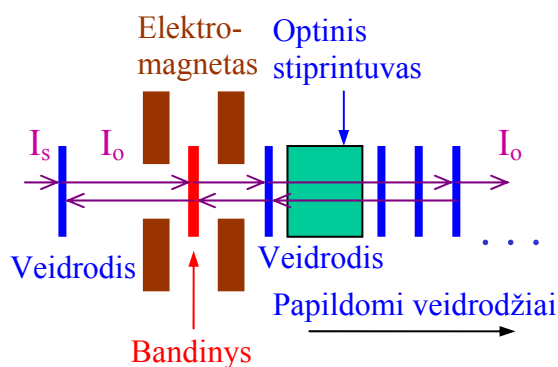


4 pav. Faradėjaus sukimo kampo spektrai  $\text{InSb}$

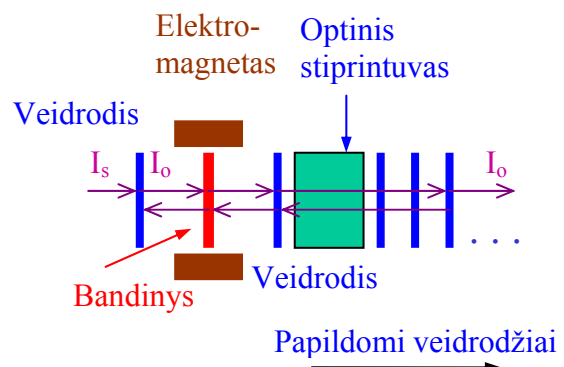
Kaip matyti, neigiama tarpjuostinė sukimo dedamoji yra didelė ir dominuoja kairėje spektro pusėje (mažiams bangų ilgiams). Didėjant bangos ilgiui, tarpjuostinė dedamoji mažėja ir pradeda dominuoti tiesinė (nuo  $\lambda^2$ ) laisvųjų krūvininkų Faradėjaus efekto dedamoji (teigiama).  $\theta$  svyravimai („triukšmas“) stebimi, esant didelėms  $\lambda$  vertėms ir  $\theta$  sumažėjimas (4 pav. kreivė  $T = 296\text{ K}$ ) atsiranda dėl analizatoriaus ribojimo, nes didelis Faradėjaus sukimo kampas

sumuojasi su poliarizatoriaus sukimo kampų ir priartėja prie  $90^\circ$ . Laisvųjų krūvininkų koncentracijos ir efektinės masės kvadrato santykis yra tiesiškai proporcingas Faradėjaus spektro tiesinės dalies polinkiui. Didelė skiriamoji šių spektrų geba leidžia nustatyti polinkio kampus ir krūvininkų koncentraciją 5%, o efektinę masę – 2–3% tikslumu. Kitas šių spektrų požymis yra nelygus nuliui  $\theta$ , ekstrapoliavus tiesinę dalį į  $\lambda = 0$  vertę. Balkanski ir kt. [13] matuodami efektinę masę PbS, naudojant Faradėjaus efektą, taip pat gavo neigiamas  $\theta$  vertes, ekstrapoliavus į  $\lambda = 0$ . Kiti autoriai, tyrę GaAs medžiagą [14–17] ir ekstrapoliavę tiesines spektrų dalis, gavo teigiamą  $\theta$  vertę. Šį rezultatą jie aiškino daugkartinių vidinių atspindžių (MIR) bandinyje įtaka. Pakoregavus šiame darbe išmatuotus Faradėjaus spektrus, atsižvelgiant į publikacijas [14, 16], gauta, jog spektrų tiesinės dalies polinkio kampo verčių korekcija yra ne didesnė, negu eksperimento paklaida netgi kraštiniais atvejais (3 pav.), kai MIR yra didžiausi bandiniams, pasižymintiems dideliu sukimu ir maža absorbcija. Nedidelės polinkio kampo pataisos taip pat buvo stebėtos ir darbuose [14, 16]. Taigi, nors ir neįrodant matematiškai arba nepagrindžiant išsamiais tyrimais, reikėtų pažymėti, kad  $m^*$  arba  $N$  matavimai, naudojant Faradėjaus sukimo spektrų polinkio kampą, praktiškai neįturi MIR poveikio. Siekiant patikrinti šio metodo tikslumą, efektinė masė  $m^*$  buvo išmatuota n-tipo InSb ir GaAs medžiagose temperatūrų ruože tarp 77 K ir 296 K. Rezultatai paklaidų ribose sutapo su literatūroje pateiktomis vertėmis, įskaitant ir du  $m^*$  matavimus, atliktus HgCdTe medžiagoje kambario temperatūroje [7–8].

Trečioji Faradėjaus efekto matavimo metodika yra skirta Faradėjaus efekto tyrimams plonuosiuose sluoksniuose. Naujausiems infraraudonosios srities detektoriams naudojami HgCdTe sluoksniai, užauginti ant CdZnTe padėklų. Faradėjaus sukimas tiesiškai priklauso nuo storio, todėl plonųjų sluoksnių Faradėjaus signalas yra labai mažas. Šiuolaikiniai pastovūs magnetai sukuria nepakankamai stiprų magnetinį lauką, kurio reikia, norint išmatuoti Faradėjaus efektą nanometrinių storio bandiniuose.



5 pav. Daugkartinio praėjimo Faradėjaus efekto matavimo principinė schema;  $B \parallel$  šviesos spinduliui

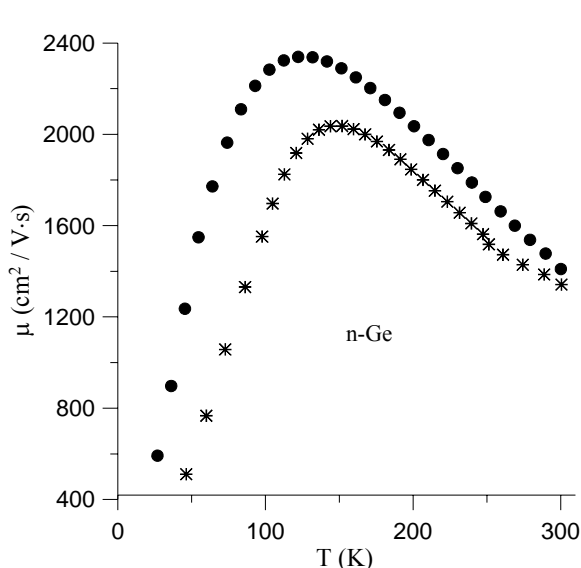


6 pav. Daugkartinio praėjimo Faradėjaus efekto matavimo principinė schema;  $B \perp$  šviesos spinduliui, Voigt konfigūracija

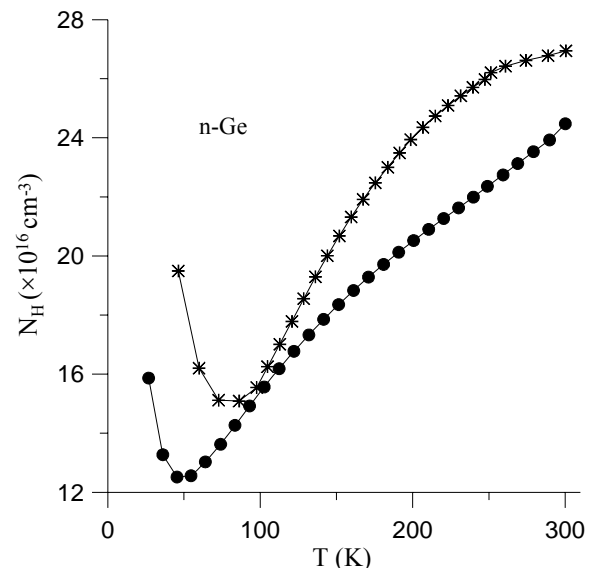
Šios metodikos (5–6 pav.) tikslas yra sustiprinti Faradėjaus efektą, naudojant vidinį atspindį ir veidrodžius, kuriais spindulys daug kartų būtų

nukreipiamas į bandinį. Paprastai stengiamasi išvengti interferuojančio daugkartinio atspindžio. Šiuo atveju jis naudojamas ploname mažai absorbuojančiame bandinyje sustiprinti Faradėjaus signalą. Bandinio kameros išorinis veidrodis yra sureguliuojamas taip, kad spindulys kiek galima daugiau kartų praeitų pro bandinį, atsižvelgiant į bandinio absorbciją tam tikram bangos dažniui. Po to jis patenka į kitą – optinio stiprintuvo (OS) kamerą. Didžiausiu praėjimų skaičiumi siekiama sumažinti optinio stiprintuvo sukeliamas paklaidas, kurios gali atsirasti dėl jo nesugebėjimo išlaikyti pastovią signalo poliarizaciją, t. y. siekiama gauti kiek galima didesnę Faradėjaus signalą, prieš jam patenkant į optinį stiprintuvą. Spindulys per bandinio išorinio veidrodžio kamerą patenka į optinį stiprintuvą, kur vyksta daugkartiniai atspindžiai. OS tikslas yra kompensuoti sistemos nuostolius, atsirandančius dėl bandinio absorbcijos, veidrodžių praėjimo nuostolius ir kt. Stiprinimas nustatomas pagal optinį kameros stiprinimą ir veidrodžių pralaidumą. Sustiprintas spindulys vėl siunčiamas per bandinį, siekiant išgauti didesnę Faradėjaus sukimą.

Šiame skyriuje taip pat aprašoma „šaltojo kontakto“ metodika, skirta atlikti Holo matavimus. Indžio kontaktai, pasižymintys stabilumu ir omiškumu iki žemų temperatūrų (10 K) gali būti uždėti ant n-tipo HgCdTe, InSb, Si, ir Ge be papildomo atkaitinimo, siekiant išvengti medžiagos užteršimo. Tai ypač svarbu didelio judrio medžiagoms, tokioms kaip HgCdTe ir InSb, kuriose, lituojant kontaktus, gali padidėti krūvininkų koncentracija ir sumažėti judris. 7 ir 8 pav. parodytas minėtas efektas n-Ge bandinyje ( $N_{(296\text{ K})} = 26.94 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). Kaip matome iš 7 pav., pakaitinimas sukelia virš 10% judrio padidėjimą ir postūmį, o 8 pav. – 10–23% krūvininkų koncentracijos padidėjimą priklausomybėje nuo temperatūros. Būdinga šios koncentracijos n-Ge judrio maksimali vertė yra



7 pav. Judrio priklausomybė nuo temperatūros n-Ge.  $N=26,94 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Viršutinė kreivė gauta „šaltojo kontakto“ metodu, apatinė – lituojant

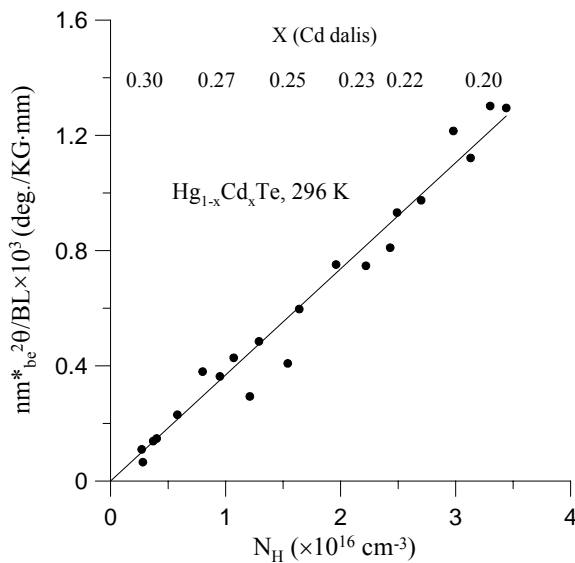


8 pav. Krūvininkų koncentracijos priklausomybė nuo temperatūros n-Ge.  $N=24,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Apatinė kreivė gauta „šaltojo kontakto“ metodu, viršutinė – lituojant

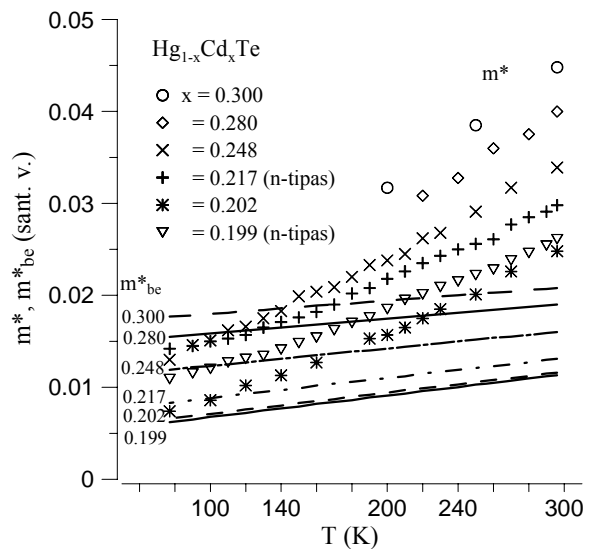
2400 cm<sup>2</sup>/Vs [18]. Skyriaus pabaigoje yra aprašyti n-tipo HgCdTe, InSb, GaAs, Si, ir Ge bandiniai, tyrinėti šiame darbe, ir pateiktos jų krūvininkų koncentracijų bei judrio priklausomybės nuo temperatūros, nustatytos iš Holo matavimų, naudojant “šaltojo kontakto” metodiką.

### 3. Tyrimų rezultatai

**III skyriuje** pateikti eksperimentiniai Faradėjaus efekto tyrimai ir absorbcijos matavimai n-tipo HgCdTe, InSb, GaAs, Si, ir Ge, siekiant nustatyti krūvininkų koncentraciją ir judrį. Kiekvienam bandiniui, įskaitant ir HgCdTe, buvo išmatuota efektinė masė. Tai pirmieji, kiek žinoma, sisteminiai  $m^*$  tyrimai Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te medžiagoje temperatūrų ruože nuo 77 K iki 296 K, kai  $x$  vertės:  $0,20 \leq x \leq 0,30$ . Taip pat pateikti tiesinio „pataisos“ koeficiento  $m^{**}$ , siejančio efektinę masę  $m^*$  su efektine mase  $m^*_{be}$ , teoriškai apskaičiuota ties laidumo juostos dugnu, skaičiavimai. 9 pav. parodyta HgCdTe Faradėjaus sukimo, normuoto į  $m^*_{be}$ , priklausomybė nuo krūvininkų koncentracijos, kai Cd molinė dalis  $x$  kito nuo 0,20 iki 0,30, esant  $T = 296$  K. Šios kreivės polinkio kampas yra  $0,368 \times 10^{-19}$  deg/KGmm. Lyginant su teoriniu, jis yra sumažintas 4,59 karto. Tai leidžia nustatyti efektinės masės santykio sumažėjimą kaip  $\sqrt{4,59} = 2,14$  kartų, lyginant su  $m^*_{be}$  verte, o tai gana gerai atitinka Ahrenkiel ir kt. [7] rezultata 1,96 bandiniui, kurio  $x = 0,37$  ir Elizarov ir kt. [8] rezultata dviem bandiniams su  $x$  tarp 0,2 ir 0,26.



9 pav. Normuoto Faradėjaus sukimo priklausomybė nuo krūvininkų koncentracijos.  $T=296$  K. Taškai – eksperimentas, tiesė gauta vidutinių kvadratinių nukrypimų metodu

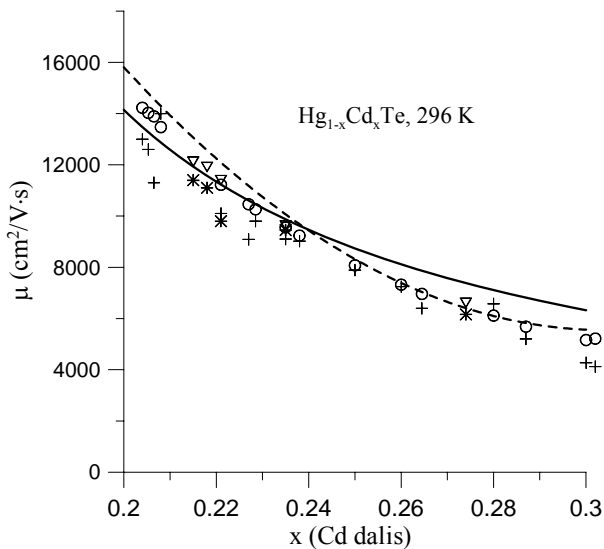


10 pav. Efektyvių masių priklausomybė nuo temperatūros HgCdTe, kai  $0,20 \leq x \leq 0,30$ . Taškai – eksperimentinės  $m^*$  vertės, tiesės – apskaičiuotos  $m^*_{be}$ , naudojant Weiler formulę [9]

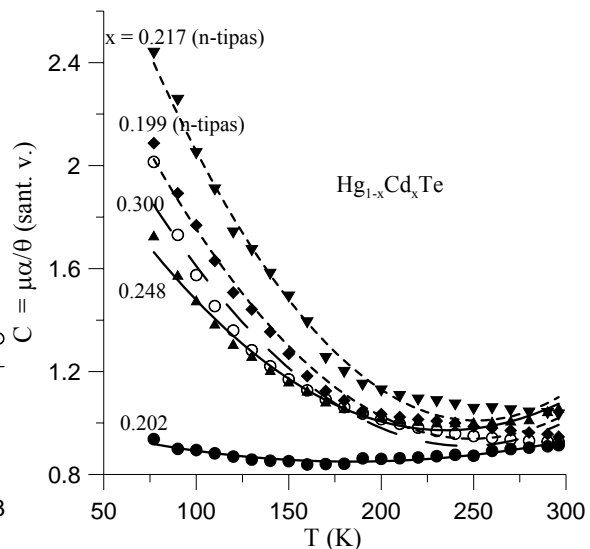
9 pav. pavaizduota laisvųjų nešėjų Faradėjaus sukimo dedamoji, nustatyta, naudojant 1 pav. pavaizduotą metodiką, kai  $\lambda = 10,6$   $\mu$ m. Tarpjuostinė ir laisvųjų

krūvininkų dedamosios buvo atskirtos, atliekant keturis matavimus bangų ruože tarp 9,3 ir 10,6  $\mu\text{m}$  ir naudojant priklausomybę  $a\lambda^{-2} + b\lambda^2$ . Tarpjuostinė dedamoji „a“, kuri, kaip buvo laikoma, priklauso nuo  $\lambda^{-2}$ , buvo atskirta nuo laisvųjų krūvininkų dedamosios „b“, aproksimuojant tiese. 10 pav. parodyta HgCdTe efektinės masės priklausomybė nuo temperatūros, gauta naudojant Faradėjaus metodą (2 pav.), ir nustatyta iš polinkio kampo 3 ir 4 paveiksluose. Kreivės yra apskaičiuotos  $m^*_{be}$  vertės, o simboliai – eksperimentinės vertės. Matome, kad eksperimentinės vertės yra gerokai didesnės už apskaičiuotas, ir skirtumas didėja, didėjant temperatūrai. Tiek teorinės  $m^*_{be}$ , tiek eksperimentinės  $m^*$  priklausomybės 10 pav. yra beveik tiesinės, todėl galime įvesti „pataisos“ koeficientą  $m^{**}$ :  $m^* = m^{**}m^*_{be}$ . Buvo nustatytas toks koeficientas:  $m^{**} = 4,52 \times 10^{-3} T + 0,78$ , kai  $77 \text{ K} \leq T \leq 296 \text{ K}$  ir  $0,20 \leq x \leq 0,30$ . Kai  $T = 296 \text{ K}$ ,  $m^{**} = 2,12$ , o tai gerai sutampa su aukščiau pateiktais rezultatais, gautais naudojant metodiką, pavaizduotą 1 paveiksle.

HgCdTe absorbcijos skerspjūvis laisviems elektronams  $\sigma_n$ , buvo paimtas iš literatūros [19]. Naudojant  $\alpha = N\sigma_n$ , čia  $\alpha$  yra laisvųjų elektronų absorbcijos koeficientas, ir laisvųjų krūvininkų Faradėjaus sukimą, nustatytą iš  $m^*$  verčių, gautų iš 10 pav., Faradėjaus sukimo ir absorbcijos koeficiento santykis laisviems elektronams buvo apskaičiuotas ir atidėtas punktyrine kreive 11 pav. Ištininė kreivė yra empirinė kreivė iš darbo [20], gauta HgCdTe judriui, kai  $T = 296 \text{ K}$ . Simboliais atidėti šiame darbe tirtų bandinių Holo matavimų eksperimentiniai rezultatai. Kaip matome, proporcingumo koeficientas lygus 1, t.y.  $\mu = \theta/\alpha$ , gerai aprašo eksperimentinius rezultatus. Čia Faradėjaus sukimas  $\theta$ , kurio matavimo vienetai



11 pav. Holo judrio (+ ir \*) ir proporcingumo koeficiento C (o ir Δ) priklausomybė nuo Cd molinės dalies;  $\lambda=10,6 \mu\text{m}$ . Ištininė kreivė – empiriškai gauta HgCdTe (296 K) iš [20], punktyrinė – apskaičiuotas santykis  $\theta/\alpha$



12 pav. Proporcingumo koeficiento C priklausomybė nuo temperatūros HgCdTe, kai  $0,20 \leq x \leq 0,30$ ;  $\lambda=15 \mu\text{m}$

deg/KGmm, buvo sunormuotas į magnetinio lauko indukciją ir bandinio storį. 12 pav. parodytas proporcingumo tarp judrio ir  $\theta/\alpha$  koeficientas C, kaip temperatūros



funkcija keletui bandinių, kurių  $x$  kito tarp 0,20 ir 0,30. Reikėtų pažymėti, kad tiesinio proporcingumo koeficientas gali būti naudojamas tik labai geros kokybės bandiniams. Medžiagoje su defektais veikia papildomi krūvininkų sklaidos mechanizmai ir pasikeičia absorbcijos koeficientas, todėl proporcingumo koeficiento taikyti negalima, nebent kaip apytikrį įvertinimą, kuris blogėja, didėjant defektų skaičiui.

Teorinis Faradėjaus efekto modelis HgCdTe ir InSb buvo panaudotas skaičiavimams, sujungiant atskirų dedamųjų modelius, pateiktus literatūroje.

Laisvųjų krūvininkų (plazminė) dedamoji, gauta Mitchell [21]:

$$\theta_p = \frac{2\pi e^3 NBL}{c^2 n m_0^2 \omega^2 m^{*2}} \frac{180}{\pi}, \quad (1)$$

čia  $\theta_p$  matuojama deg/KGcm;  $e$  yra elektrono krūvis  $4,803 \times 10^{10}$  elektrostatiniais vienetais;  $B$  – magnetinio lauko indukcija, KG;  $N$  – laisvųjų krūvininkų koncentracija,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $m^*$  – efektinė masė (santykis su  $m_0$ );  $n$  – lūžio rodiklis;  $\omega$  – bangos dažnis;  $L$  – bandinio ilgis.

Tarpjuostinė dedamoji, gauta Roth [22]:

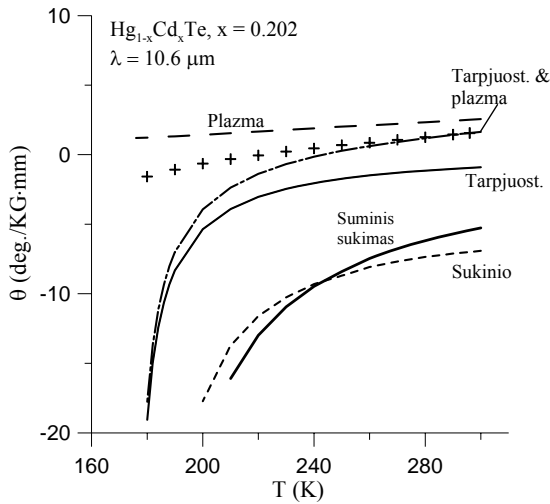
$$\theta_i = KF(\chi)BL, \quad (2)$$

čia  $K$ , matuojama deg/KGcm, yra draustinės juostos tarpo  $E_g$ , laisvųjų skylių ir elektronų, Luttinger'io parametru ir laidumo elektrono  $g$ -faktoriaus  $g^*$  funkcija. Funkcija  $F(\chi)$  turi singularumą ir artėja į begalybę, kai energija sutampa su  $E_g$ .

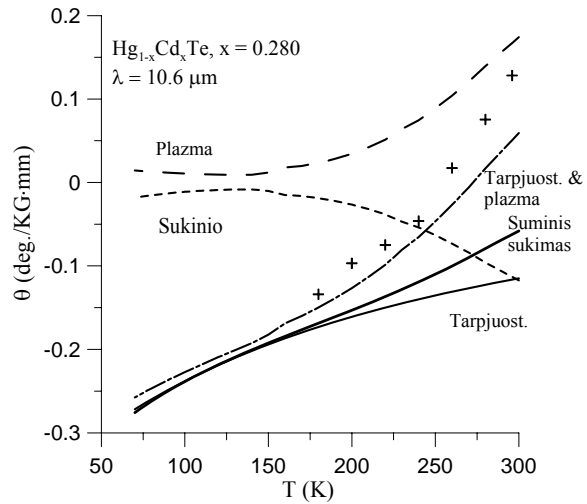
Trečioji dedamoji šiame modelyje yra rezonansinė sukinio dedamoji [23–24]:

$$\theta_s = g^* \frac{\pi \hbar e^2}{m_0 c} \frac{NL}{n E_g} \frac{180}{\pi} \frac{1}{1 - \left( \frac{\hbar \omega}{E_g} \right)^2} \langle \sigma_z \rangle, \quad (3)$$

čia  $\hbar = h/2\pi$ , kur  $h$  yra Plank'o konstanta,  $m_0$  – laisvojo elektrono masė,  $\omega$  – bangos dažnis,  $\langle \sigma_z \rangle$  – sukinio orientavimo faktorius arba dalis laidumo juostos elektronų, kurių sukiniai lygiagretūs magnetiniam laukui. Sukinio dedamoji yra nagrinėjama kaip dalis tarpjuostinės dedamosios ir taip pat turi singularumą, kai energija lygi  $E_g$ . Priešingai tarpjuostinei dedamajai, sukinio dedamoji tiesiškai priklauso nuo krūvininkų koncentracijos. Kai energija artima  $E_g$ , sukinio dedamoji labai išauga ir tampa daug didesnė už kitas dedamąsias [23]. Buvo manoma, kad šis efektas leis išmatuoti krūvininkų koncentraciją. 13–16 pav. parodytas skaičiavimų, remiantis minėtu modeliu, rezultatų palyginimas su eksperimentiniais rezultatais. Pasirodė, kad teoriniai skaičiavimai gerai aprašo HgCdTe ir InSb bandinių eksperimentinius

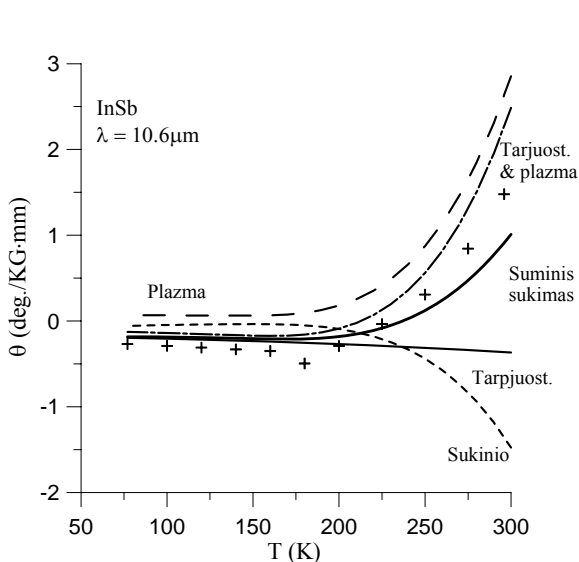


13 pav. Faradėjaus sukimo dedamųjų teoriniai skaičiavimai  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ . Simboliai – eksperimentiniai rezultatai

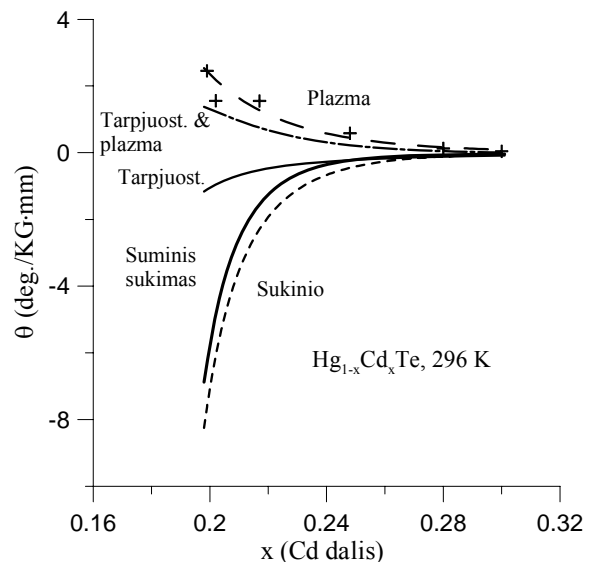


14 pav. Faradėjaus sukimo dedamųjų teoriniai skaičiavimai  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ . Simboliai – eksperimentiniai rezultatai

rezultatus, ypač aukštesnėse temperatūrose, kai įskaitomos tik tarpjuostinė ir plazminė dedamosios. Sukinio dedamosios įskaitymas tik padidina teorinių ir eksperimentinių rezultatų nesutapimą. Iš modelio matyti, kad arti draustinės juostos energijos singularumas tarpjuostinės ir sukinio dedamųjų išraiškose nulemia didelį Faradėjaus sukimą. Todėl negalima jų atskirti, nebent labai arti draustinės juostos tarpo, kur sukinio dedamoji nustelbia tarpjuostinę, ir N galbūt galima išmatuoti.



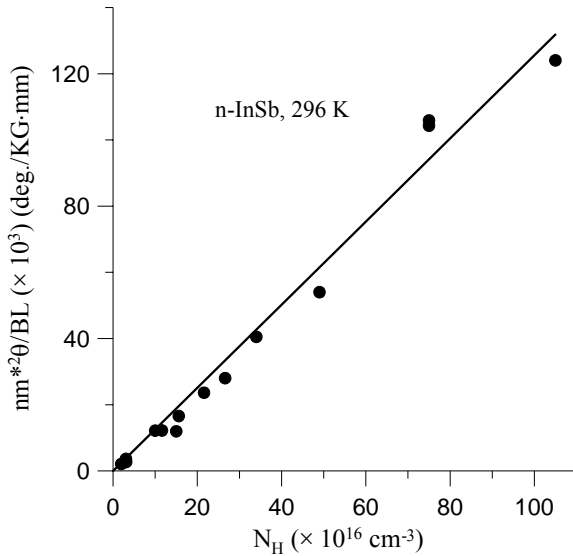
15 pav. Faradėjaus sukimo dedamųjų teoriniai skaičiavimai beveik savojo laidumo InSb;  $N_{(296K)} = 1,8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Simboliai – eksperimentiniai rezultatai



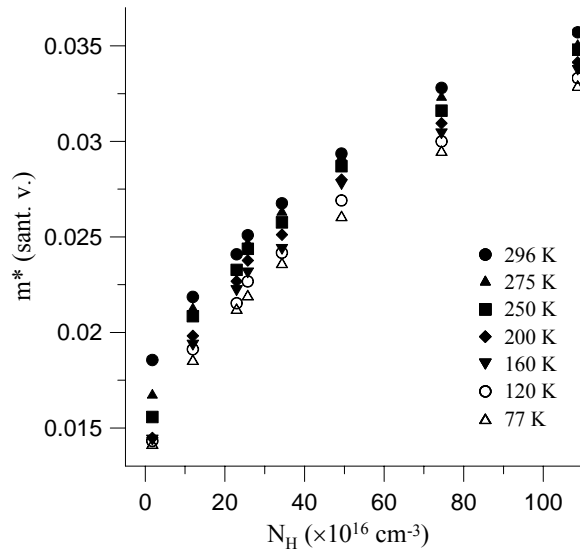
16 pav. Faradėjaus sukimo dedamųjų teoriniai skaičiavimai  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ . Simboliai – eksperimentiniai rezultatai

Tačiau šiuo atveju naudojant sukinio dedamąją, N galima išmatuoti tik, kai Cd molinė dalis x yra žinoma  $\pm 0,0002$  tikslumu arba bangos ilgio paklaida  $\Delta\lambda < 14 \text{ nm}$ . Tai praktiškai sunku įgyvendinti.

17 pav. parodytas laisvųjų krūvininkų Faradėjaus sukimas n-InSb. Sukimas yra sunormuotas į efektinę masę, paimtą iš literatūros [25]. Polinkis 2% tikslumu sutampa su teoriniu, todėl gerai sutampa ir šio darbo bei paskelbti spaudoje kitų autorių rezultatai. 18 pav. yra pavaizduota n-InSb efektinės masės priklausomybė nuo temperatūros.



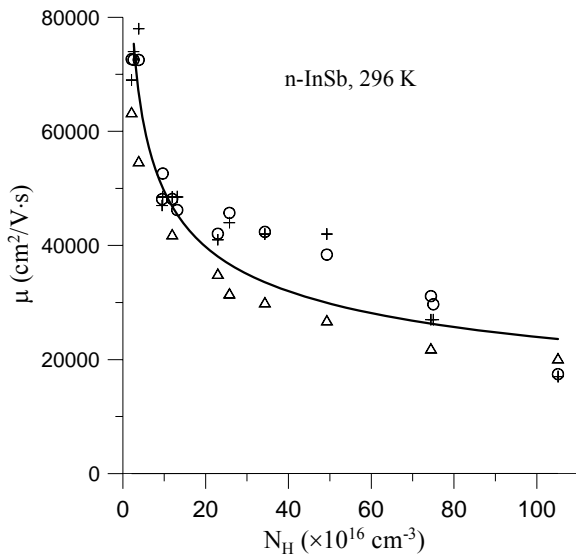
17 pav. Normuotas elektronų Faradėjaus sukimas n-InSb.  $B=0,1$  T;  $\lambda=9$   $\mu\text{m}$ . Tiesė gauta vidutinių kvadratinių nukrypimų metodu



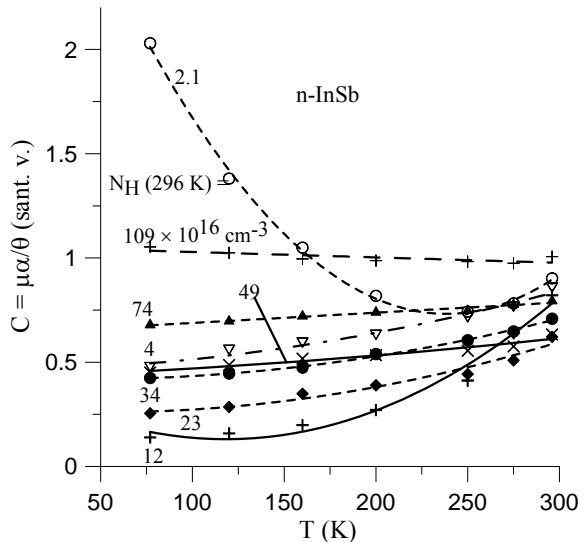
18 pav. Efektinės masės n-InSb priklausomybė nuo koncentracijos

19 pav. parodyta n-InSb judrio priklausomybė, gauta iš Holo matavimų (+ simboliai), Faradėjaus efekto ir absorbcijos koeficiento matavimų (trikampiai) bei „šaltojo kontakto“ matavimų (apskritimai). Ištinė kreivė gauta, kai proporcingumo koeficientas  $C$  yra lygus 1, t.y.  $\mu = \theta/\alpha$ . Faradėjaus posūkis, kai  $\lambda = 9$   $\mu\text{m}$ , apskaičiuotas iš (1), o  $m^*$  gauta iš 18 pav. Čia  $\alpha$  buvo apskaičiuotas visoms koncentracijoms, naudojant absorbcijos skerspjūvį iš literatūros [26].

Absorbcijos koeficientai, kai  $N \leq 20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , buvo apskaičiuoti, naudojant minėtą skerspjūvį. Koncentracijoms  $N > 20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  buvo naudoti išmatuoti absorbcijos koeficientai, kai  $\lambda = 9$   $\mu\text{m}$ . Kurnick ir Powell [26] absorbcijos koeficientų rezultatai rodo, kad skylių  $\alpha$  yra 40 kartų didesnis už elektronų. Esant savajai koncentracijai  $1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , tai reiškia, kad skylių absorbcija nežymi ( $\leq 6\%$ ), kai  $N \geq 40 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Bet eksperimentiniai rezultatai (19 pav.) rodo, kad kritinė koncentracija yra apie  $20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . 20 pav. parodyta proporcingumo koeficiento  $C$  tarp judrio ir  $\theta/\alpha$  priklausomybė nuo temperatūros n-InSb, gauta, naudojant apskaičiuotus absorbcijos koeficientus, kai  $N \leq 20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , o  $T = 296$  K, ir išmatuotas vertes, kai  $N \geq 20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Išmatuotos vertės buvo naudotos daugumai bandinių žemose temperatūrose, nes nuosava koncentracija ženkliai sumažėja, mažinant temperatūrą.

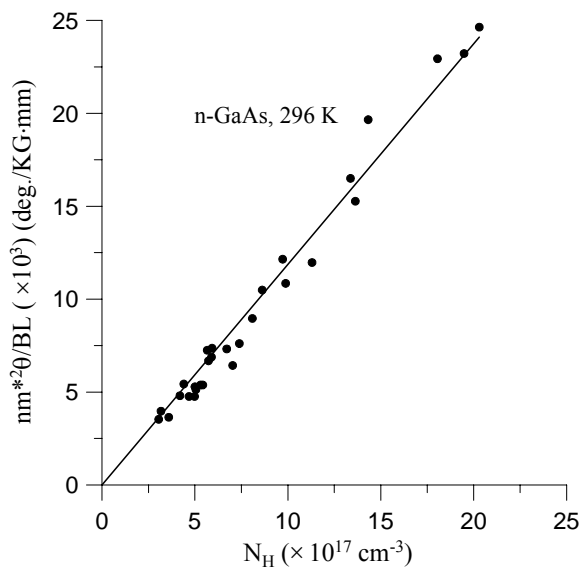


19 pav. Elektronų judrio priklausomybė nuo krūvininkų koncentracijos n-InSb. Ištinė kreivė –  $\mu = \theta/\alpha$  skaičiavimai, čia  $\theta$  paskaičiuota iš efektinės masės 18 pav., o  $\alpha = N\sigma_n$

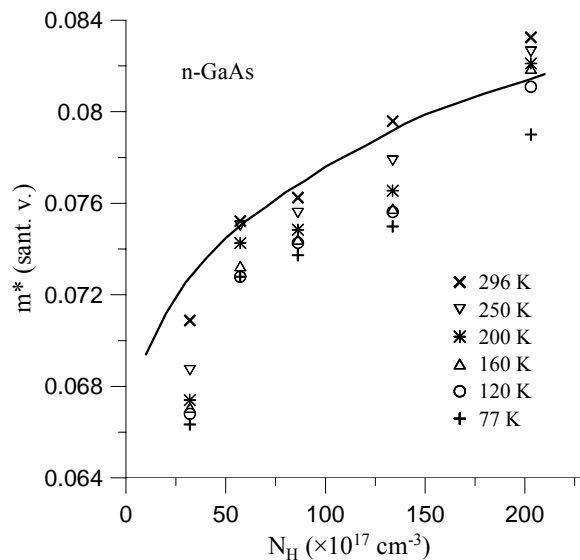


20 pav. Judrio proporcingumo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros.  $\lambda = 9$  m $\mu$ . Kreivės – taškų aproksimacija

21 pav. parodytas normuotas laisvųjų krūvininkų Faradėjaus sukimas n-GaAs, naudojant  $m^*$  vertes iš literatūros [27]. Efektinės masės priklausomybė nuo koncentracijos įvairioms temperatūroms parodyta 22 pav. Taškų išbarstymą, matyt, lemia gamintojo naudojamas kontaktų uždėjimo būdas Holo matavimams –



21 pav. Normuoto Faradėjaus sukimo priklausomybė nuo krūvininkų koncentracijos n-GaAs.  $T = 296$  K;  $B = 0,1$  T;  $\lambda = 9$  m $\mu$ . Taškai – eksperimentas, tiesė gauta vidutinių kvadratinių nukrypimų metodu



22 pav. Efektinės masės n-GaAs priklausomybė nuo koncentracijos. Ištinė kreivė paimta iš [27], kai  $T = 296$  K

litavimas. Tokie kontaktai yra nestabilūs žemose temperatūrose ir, be to, dėl pakaitinimo lituojant, gali pasikeisti koncentracija. „Šaltojo kontakto“ metodo nepavyko pritaikyti n-GaAs žemiau 230 K. Proporciningumo koeficientas C buvo išmatuotas n-GaAs, esant 296 K temperatūrai, ir gautas artimas 1, t.y. nuo 0,9 iki 0,96, esant krūvininkų koncentracijoms tarp 4 ir  $20 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Absorbcijos skerspjūvio žinoti nereikėjo dėl mažos savosios krūvininkų koncentracijos GaAs.

Elektronų efektinės masės Si ir Ge yra didelės, palyginus su HgCdTe, InSb ir GaAs. Todėl Faradėjaus spektrai, gauti naudojant metodiką, parodytą 2 pav., rodė didelį triukšmo lygį, kai magnetinis laukas buvo 1,2 T. Efektinės masės n-tipo Si ir Ge buvo apskaičiuotos iš atskirų Faradėjaus efekto matavimų bangų ruožuose tarp 10 ir 15  $\mu\text{m}$ , kur triukšmo lygis mažesnis. Taip pat buvo atlikta sukimo korekcija dėl daugkartinių vidinių atspindžių. Tai buvo nežymi korekcija stipriau legiruotiems bandiniams (didesnis  $\alpha$ ). Mažiau legiruotiems Si ir Ge bandiniams sukimo korekcija (neigiama) buvo 5–7%.

**Santraukoje ir pagrindinėse išvadose** pateiktos bendrosios išvados ir rezultatai bei jų praktinio panaudojimo svarba.

**Literatūros sąrašė** pateikti darbai, kurių rezultatai buvo apžvelgti ir cituojami šiame darbe.

**Mokslinių darbų sąrašė** pateiktos disertacijos tema spausdintos publikacijos bei patentai.

### **Pagrindiniai rezultatai ir išvados**

1. Buvo sukurtas prietaisas bei metodika Faradėjaus efekto tyrimams, skirta padidinti signalo ir triukšmų santykį, eliminuojant lazerio nestabilumus, ir išmatuoti Faradėjaus sukimą, esant skirtingiems bangų ilgiams  $\lambda$ . Laisvųjų krūvininkų dedamoji buvo išskirta, naudojant tiesinę Faradėjaus spektrų dalį, siekiant nustatyti krūvininkų koncentracijos ir efektinės masės kvadrato santykį  $N/m^2$ .
2. Antroji metodika ir ją įgyvendinantis prietaisas buvo sukurti, papildomai panaudojant šalia Fourier infraraudonosios srities spektrometro (FTIR) magnetą ir poliarizatoriaus-analizatoriaus porą, o tai leido gauti didelės skiriamosios gebos Faradėjaus sukimo spektrus bangų ruože tarp 5 ir 20  $\mu\text{m}$ . Iš infraraudonosios srities Faradėjaus efekto spektrų tiesinės dalies polinkio kampo buvo nustatytas siauratarpių puslaidininkų HgCdTe ir InS santykis  $N/m^2$ , iš kurio gautos N arba  $m^*$  vertės. Parodyta, jog ši metodika turi eilę privalumų:
  - a) Faradėjaus spektrai leidžia išskirti laisvųjų krūvininkų dedamąją;
  - b) iš didelės skiriamosios gebos spektrų polinkio kampo galima nustatyti krūvininkų koncentraciją ir efektinę masę, atitinkamai 5% ir 2–3%

tikslumu, o daugkartiniai vidiniai atspindžiai šiuo atveju neturi matavimams pastebimos įtakos;

- c) metodika yra sparti, labai jautri, nesukelianti negrįžtamų bandinio savybių pokyčių ir lengvai automatizuojama.
3. Atlikti sistemingi efektinės elektronų masės  $m^*$  priklausomybės nuo temperatūros matavimai  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  medžiagoje, kai  $x$  kito  $0,20 \leq x \leq 0,30$ , ir nustatytas „pataisos“ koeficientas  $m^{**}$  tarp efektinių masių  $m^*$  ir  $m_{be}^*$ , kuri apskaičiuota teoriškai ties laidumo juostos dugnu.
4. Buvo pasiūlytas prietaisas ir metodika, skirta Faradėjaus efekto tyrimams plonuosiuose sluoksniuose, naudojamuose šiuolaikinių infraraudonosios srities jutiklių kūrime.
5. Nustatytas proporcingumo koeficientas  $C$  tarp laisvųjų elektronų judrio ir santykio tarp Faradėjaus sukimo bei absorbcijos koeficiento  $n$ -tipo  $\text{HgCdTe}$ ,  $\text{InSb}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{Si}$ , ir  $\text{Ge}$  medžiagose. Tai leido išmatuoti tiriamų bandinių judrį, atliekant tik Faradėjaus spektrų polinkio kampo bei absorbcijos koeficiento matavimus, iš anksto nežinant koncentracijos  $N$ , lūžio rodiklio  $n$  ar efektinės masės  $m^*$ . Nors  $\text{HgCdTe}$  ir  $\text{InSb}$  medžiagose, pasižyminčiose didele savąja krūvininkų koncentracija, neįmanoma atskirai išmatuoti skylių ir elektronų absorbcijos koeficientų, buvo parodyta, jog ši metodika gali būti panaudota  $n$ - $\text{HgCdTe}$  atveju, kur elektronų yra keliomis eilėmis daugiau, negu skylių, o taip pat ji tinkama judriui matuoti  $n$ - $\text{InSb}$  atveju, kai  $N \geq 20 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .
6. Teoriniams įvertinimams buvo panaudotas kvaziklasikinis Faradėjaus efekto dedamųjų modelis  $\text{HgCdTe}$  ir  $\text{InSb}$  medžiagoms, kuriame buvo įskaitytos laisvųjų krūvininkų (plazminė), tarpjuostinė ir sukinio dedamosios. Nustatyta, kad tarpjuostinės ir plazminės dedamųjų įskaitymas gerai aprašo eksperimentinius rezultatus  $\text{HgCdTe}$  ir  $\text{InSb}$ , ypač aukštesnėse temperatūrose, o tuo tarpu sukinio dedamosios įskaitymas, ypač aukštesnėse temperatūrose, žymiai padidina eksperimento ir teorijos nesutapimą.

### Literatūros sąrašas

- [1] P. Norton, *Opto-Electronics Review* **10**, 159 (2002).
- [2] D. Long and J. L. Schmit, Mercury-Cadmium Telluride and Closely Related Alloys, in *Semiconductors and Semimetals*, eds. R. K. Willardson and A. C. Beer, vol. 5, p. 175 (Academic, New York, 1970).
- [3] A. Rogalski, *Infrared Physics and Technology* **43**, 187 (2002).
- [4] A. Rogalski, *J. Appl. Phys.* **93**, 4355 (2003).
- [5] M. H. Weiler, Magneto-Optical Properties of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  Alloys, in *Semiconductors and Semimetals*, eds. R. K. Willardson and A. C. Beer, vol. 16, p. 119 (Academic, New York, 1981).

- [6] D. G. Seiler, C. L. Littler, and M. H. Weiler, *Semiconductors and Semimetals*, eds. D. G. Seiler and C. L. Littler, vol. 36 (Academic, Boston 1992).
- [7] R. K. Ahrenkiel, P. Weiss, D. Watkins, S. K. Gulati and W. W. Granneman, *J. Appl. Phys.* **49**, 2265 (1978).
- [8] A. I. Elizarov, E. K. Martynchuk, V. A. Petryakov and F. F. Sizov, *J. Appl. Spect.* **41**, 1416 (1984).
- [9] J. A. Grisham, F. W. Clarke, C. R. Christensen, and J. L. Stensby, *Modulated High Sensitivity Infrared Polarimeter*, U. S. Patent 5,210,417. May 11, 1993.
- [10] G. A. Tanton, J. A. Grisham, *High-Sensitivity Infrared Polarimeter*, U. S. Patent number 4,818,881. April, 1989.
- [11] G. A. Tanton, J. A. Grisham, C. R. Christensen, and S. Razi, *Proc. SPIE* **505**, 221 (1984).
- [12] F. W. Clarke, J. K. McDonald, C. R. Christensen, and J. A. Grisham, *Device and Method for Performing an Optical Hall Test*, U. S. Patent 5,907,401. May 25, 1999.
- [13] M. Balkanski and E. Amzallag, *phys. stat. sol.* **30**, 407 (1968).
- [14] T. H. Lee and H. Y. Fan, *Phys. Rev.* **165**, 927 (1968).
- [15] Yu. P. Mashukov, *Soviet Physics-Semiconductors* **1**, 828 (1968).
- [16] R. R. Alfano and D. H. Baird, *J. Appl. Phys.* **39**, 2931 (1968).
- [17] Yu. I. Ukhanov, *Soviet Phys-Solid State* **5**, 75 (1963).
- [18] V. I. Fistul, *Heavily Doped Semiconductors*, p.77 (New York: Plenum, 1969).
- [19] J. A. McOczkowski and D. A. Nelson, *J. Appl. Phys.* **54**, 2041 (1983).
- [20] W. M. Higgins, G. N. Pultz, R. G. Roy, and R. A. Lancaster, *J. Vac. Sci. Technol.* **A7**, 271 (1989).
- [21] E. W. J. Mitchell, *Proc. Phys. Soc. London* **68**, 973 (1955)
- [22] L.M. Roth, *Phys. Rev.* **133**, A542 (1964).
- [23] S. Y. Yuen, P. A. Wolff, P. Becla, and D. Nelson, *J. Vac. Sci. Technol.* **A5**, 3040 (1987).
- [24] A. J. Syllaios, C. L. Littler, X. N. Song, V. C. Lopes, C. R. Christensen, J. A. Grisham, and F. W. Clarke, *Semicond. Sci. Technol.* **8**, 953 (1993).
- [25] E. D. Palik and G. B. Wright, *Free Carrier Magneto-Optical Effects*, in *Semiconductors and Semimetals*, eds. R. K. Willardson and A. C. Beer, vol. 3, p. 421 (New York: Academic, 1967).
- [26] S. W. Kurnick and J. M. Powell, *Phys. Rev.* **116**, 597 (1959).
- [27] C. Constantinescu and S. Nan, *phys. stat. sol. (a)* **18**, 277 (1973).
- [28] W. Grevendonk, P. Van Den Keybus, G. Ruymbeek, and B. Vanhuyse, *Physica* **100 B**, 88 (1980).
- [29] R. L. Aggarwal, R. F. Lucey Jr., and D. P. Ryan-Howard, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2656 (1988).

### **Mokslinių darbų disertacijos tema sąrašas**

- 1\*. F. W. Clarke, S. Balevičius, J. K. McDonald, and J. A. Grisham, Measurement of electron effective mass ratios in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  for  $0.20 \leq x \leq 0.30$  between 77 K and 296 K (Invited Paper), SPIE **5564**, 73 (2004). ISSN 0277-786X, ISBN 0-8194-5502-4.
- 2\*. F.W. Clarke, An Optical Alternative to the Hall Test, Journal of Electronic Materials **26**, 592 (1997). ISSN 0361-5235.
- 3\*. F.W. Clarke, An Optical Characterization Technique for N-type Semiconductors, Including Infrared Detector and Other Optical Materials, SPIE **2775**, 197 (1996). ISBN 0-8194-2160-X.
- 4\*. F. W. Clarke, A Nondestructive Characterization Technique for Most N-type Semiconductors, Including Infrared Detector Materials, SPIE **2554**, 97 (1995). ISBN 0-8194-1913-3
- 5\*. A.J. Syllaios, J.M. Anderson, L. Colombo, C.L. Littler, G.L. Brostow, C.R. Christensen, J.A.Grisham, and F.W. Clarke, Magneto-optical characterization of HgCdTe thin films, SPIE **2228**, 309 (1994). ISBN 0-8194-1532-4.
- 6\*. F.W. Clarke, Nondestructive Determination of Free Electron Concentration and Mobility in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , n-Type InSb and N-type GaAs, Journal of Applied Physics **75**, 4319 (1994). ISSN 0021-8979.
- 7\*. A.J. Syllaios, C.L. Littler, X.N. Song, V.C. Lopes, CR. Christensen, J.A.Grisham, and F.W. Clarke, Faraday Rotation Analysis of HgCdTe, Semicond. Sci. Technol. **8**, 953 (1993). ISSN 0268-1242.

### ***Patentai***

- 8\*. Frederick W. Clarke, Joseph K. McDonald, Charles R. Christensen and John A.Grisham, Device and Method for Performing an Optical Hall Test, Patent 5,907,401, May 25, 1999.
- 9\*. John A. Grisham, Frederick W. Clarke, Charles R. Christensen, and John L.Stensby, Modulated High Sensitivity Infrared Polarimeter, Patent 5,210,417, May 11, 1993

### **Kitos mokslinės publikacijos, kurių rezultatai neįtraukti į disertaciją**

- 10\*. A. K. Sood, R. Singh, Y. R. Puri, F. W. Clarke, O. Laboutin, P. Deluca, R. Welser, T. J. Deng, and J. C. M. Hwang, Growth and Characterization of AlGaIn/GaN Epitaxial Layers by MOCVD on SiC Substrates for RF Device Applications, SPIE **6121**, 107 (2006). ISBN 0-8194-6163-6.



- 11\*. A. K. Sood, R. Singh, Y. R. Puri, F. W. Clarke, A. Dabiran, P. Chow, T. J. Deng, and J. C. M. Hwang, Design and Development of MBE Growth AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT Devices on SiC Substrates for RF Applications, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **892**, FF-13-12 (2006).
- 12\*. S. Balevičius, N. Žurauskienė, V Stankevič, S. Keršulis, J. Novickij, L. L. Altgibers, and F. Clarke, High Pulsed Magnetic Field Sensor Based on La-Ca-Mn-O Thin Polycrystalline Films, *ACTA Physica Polonica A* **107**, 207 (2005). ISSN 0587-4246.
- 13\*. A. K. Sood, E. J. Egerton, Y. R. Puri, F. W. Clarke, J. C. M. Hwang, A. Dabiran, and P. Chow, Development of High Performance AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistors for RF Applications, *SPIE* **5550**, 130 (2004). ISBN 0277-786X. ISBN 0-8194-5488-5
- 14\*. Frederick W. Clarke, Fat Duen Ho, M. Asif Khan, Grigory Simin, J. Yang, Remis Gaska, Michael S. Shur, Jianyu Deng, and S. Karmalkar, Gate Current Modeling for Insulating Gate III-N Heterostructure Field Effect Transistors, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **743**, L9.10 (2002). ISSN 1-5589-68-X.
- 15\*. J. Milton Harris, John R. Moffatt, Martha G. Case, Frederick W. Clarke, Judith S. Polley, Thomas K. Morgan, Jr., Thomas M. Ford, and Roger K. Murry, Jr., Reactivity of Geometrically Constrained Cyclopropylcarbinyl and Homoallyl Substrates. Solvolysis of 2,4-Dehydro-5-homoadamantyl and 2-Homoadamant-4-enyl Derivatives, *J. Org. Chem.* **47**, 2740 (1982). ISSN 0022-3263.

### *Patentai*

- 16\*. Henry C. Allen and Frederick W. Clarke, Tetra-Alkyl Titanates as Bonding Agents for Thermoplastic Propellants, Patent 4,597,924, July 1, 1986.

# Faraday Rotation Analysis of Narrow Gap Semiconductors: an Optical Alternative to the Hall Test

## Summary

The main aim of this work was to develop a method of screening HgCdTe materials for carrier concentration and mobility using Faraday rotation  $\theta$  and absorption  $\alpha$ . Faraday rotation provides  $N/m^{*2}$ , where  $N$  is the carrier concentration and  $m^*$  is the effective mass. Since  $m^*$  was not known in HgCdTe, a Faraday rotation spectrometer was developed to systematically measure it as a function of temperature and Cd mole fraction. Effective masses in n-InSb, and n-GaAs were measured and compared with known values in the literature to validate the method. Mobility is proportional to  $\theta/\alpha$ . The proportionalities were determined in HgCdTe, n-InSb, and n-GaAs at infrared wavelengths.

The dissertation consists of the preface, introduction, three chapters, summary and main conclusions, references, list of publications and abstract (in Lithuanian).

The main objectives of the work, scientific novelty, goals, validation of results, and statements for defence of the dissertation are presented in the **preface**.

**Chapter I** presents an introduction and review of previous work on optical (infrared) methods of measuring carrier concentration  $N$  and mobility  $\mu$  in semiconductors. These methods include: variations of the basic plasma edge reflection (spectrum) method which offers a method of determining the carrier concentration to effective mass ratio  $N/m^*$  and the relaxation time  $\tau$ ; free carrier absorption studies that provide  $N/m^*$  and conductivity  $\sigma_0 = Ne\mu$ ; and infrared Faraday rotation due to free carriers that provides  $N/m^{*2}$ . The ratio of free carrier Faraday rotation  $\theta$  to absorption  $\alpha$  provides a quantity  $C$  proportional to the  $\mu$ . Thus, if the  $C$  were known,  $\mu$  could be determined by two fairly simple, straight forward measurements without the necessity of knowing  $m^*$ ,  $N$ , or the refractive index  $n$ . The differences in the proportionality between materials at different temperatures are due to the differences in resident carrier scattering mechanisms in the materials. Faraday rotation is immune to scattering mechanisms in the infrared. Studies of infrared absorption that would support calculation of the proportionality between  $\mu$  and  $\theta/\alpha$  in the “classical” and quantum regimes are reviewed in HgCdTe, InSb, GaAs, Si and Ge. Microwave Faraday rotation and helicon wave studies are also briefly reviewed.

**Chapter II** presents descriptions of three methods for measurement of Faraday rotation. The first describes a device for increasing the signal to noise ratio and measurement of Faraday rotation at individual wavelengths. The second describes a method of obtaining a high resolution Faraday rotation spectrum for use in measuring  $m^*$ . The third describes a proposed device for obtaining usable Faraday rotation measurements in thin films. A “cold contact” technique is

described for performing Hall tests without the contamination that usually results from conventional soldered contacts. Finally, n-type HgCdTe, InSb, GaAs, Si, and Ge samples used in the work are described and characterized.

**Chapter III** presents experimental results of Faraday rotation and absorption measurements in n-type HgCdTe, InSb, GaAs, Si, and Ge to determine carrier concentration and mobility. Effective mass was measured in each sample including HgCdTe. This is the first systematic measurement of  $m^*$  in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  for temperatures between 77 K and 296 K and  $0.20 \leq x \leq 0.30$ . A linear factor,  $m^{**}$ , relating  $m^*$  to theoretical band edge effective mass,  $m_{\text{be}}^*$ , calculations are reported.

**Summary and Main Conclusions** presents the general conclusions and results of the research and describes their practical applications.

**References** include articles, books, and scientific authorities consulted to compile the introduction and sources of data and information used in this work.

**List of publications** presents patents and articles in scientific journals and proceedings in which the main results of the research described in this dissertation have been published.

## **Trumpos žinios apie autorių**

Frederick W. Clarke gimė 1951 m. gruodžio 24 d. Georgia, JAV.

1980 m. įgijo chemijos-biologijos bakalauro laipsnį, o 1981 m. – chemijos-biologijos magistro laipsnį Alabamos universitete, JAV. 1984 m. įgijo elektronikos inžinieriaus bakalauro laipsnį, o 1989 m. – elektronikos inžinieriaus magistro laipsnį Alabamos universitete, JAV. 1985–2001 m. studijavo Alabamos universitete pagal doktorantūros programą ir ją sėkmingai įvykdė. 1989–1990 m. dirbo elektronikos inžinieriumi JAV (Huntsvill) kariuomenės raketinės gynybos departamente Gynybos pažangių projektų agentūroje (DARPA), 1990–1998 m. dirbo elektronikos inžinieriumi JAV (Huntsvill) kariuomenės aviacijos ir raketų departamente, o nuo 1998 m. ir šiuo metu dirba elektronikos inžinieriumi JAV (Huntsvill) kariuomenės kosminės ir raketinės gynybos departamente.

**Frederick Walter Clarke**

**FARADĖJAUS EFEKTO TYRIMAI SIAURATARPIUOSE  
PUSLAIDININKIUOSE: OPTINĖ ALTERNATYVA HOLO  
MATAVIMAMS**

**Daktaro disertacijos santrauka  
Fiziniai mokslai, fizika (02P),  
kondensuotos medžiagos (P260)**

**Frederick Walter Clarke**

**FARADAY ROTATION ANALYSIS OF NARROW GAP  
SEMICONDUCTORS: AN OPTICAL ALTERNATIVE TO THE HALL  
TEST**

**Summary of Doctoral Dissertation  
Physical Sciences, Physics (02P),  
Condensed Matter (P260)**

2006 03 27. 1,75 sp. l. Tiražas 70 egz.

Leido Vilniaus Gedimino technikos universiteto

leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT–10223 Vilnius–40

Spausdino UAB „Ūkana“, A.Goštauto g. 11, LT–01108 Vilnius