

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Oliver LIEBFRIED

ELEKTROMAGNETINIŲ PROCESŲ
TYRIMAS ELEKTROMAGNETINĖSE
SVAIDYKLĖSE NAUDOJANT
MILŽINIŠKOS MAGNETOVARŽOS
JUTIKLIUS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

FIZINIAI MOKSLAI, FIZIKA (02P),
KONDENSUOTOS MEDŽIAGOS: ELEKTRONINĖ STRUKTŪRA,
ELEKTRINĖS, MAGNETINĖS IR OPTINĖS SAVYBĖS,
SUPERLAIDININKAI, MAGNETINIS REZONANSAS,
RELAKSACIJA, SPEKTROSKOPIJA (P260)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Valstybiniame mokslinių tyrimų institute Fizinių ir technologijos mokslų centre (anksčiau – Puslaidininkių fizikos institutas) bei Saint-Louiso Prancūzijos-Vokietijos tyrimų institute.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Saulius BALEVIČIUS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Konsultantai:

prof. dr. Markus LOEFFLER (Gelzenkircheno taikomųjų mokslų universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

dr. Markus SCHNEIDER (Saint-Louiso Prancūzijos-Vokietijos tyrimų institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Steponas AŠMONTAS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

doc. dr. Kęstutis ARLAUSKAS (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. habil. dr. Algimantas FEDARAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. habil. dr. Eugenijus ŠATKOVSKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Oponentai:

prof. habil. dr. Albertas LAURINAVIČIUS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. dr. Bernardo TELLINI (Pizos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2011 m. birželio 8 d. 14 val. Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos instituto salėje, 206 kab.

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

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; faksas +370 5 270 0112;

el. paštas: doktor@vgtu.lt.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2011 m. gegužės 6 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) bei Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos instituto (A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lietuva) bibliotekose.

VGTU leidyklos „Technika“ 1881-M mokslo literatūros knyga.

© Oliver Liebfried, 2011

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY
STATE RESEARCH INSTITUTE
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Oliver LIEBFRIED

THE INVESTIGATION
OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES
IN ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS
USING COLOSSAL
MAGNETORESISTANCE SENSORS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

PHYSICAL SCIENCES, PHYSICS (02P),
CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE;
ELECTRICAL, MAGNETIC AND OPTICAL PROPERTIES;
SUPERCONDUCTORS; MAGNETIC RESONANCE;
RELAXATION; SPECTROSCOPY (P260)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology (former – Semiconductor Physics Institute) and the French-German Research Institute of Saint-Louis in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Saulius BALEVIČIUS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Consultants:

Prof Dr Markus LOEFFLER (Gelsenkirchen University of Applied Sciences, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Dr Markus SCHNEIDER (French-German Research Institute of Saint-Louis, Physical Sciences, Physics – 02P).

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

Chairman

Prof Dr Habil Steponas AŠMONTAS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Members:

Assoc Prof Dr Kęstutis ARLAUSKAS (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Habil Algimantas FEDARAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Eugenijus ŠATKOVSKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Opponents:

Prof Dr Habil Albertas LAURINAVIČIUS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Bernardo TELLINI (Pisa University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Physics in the Hall of Semiconductor Physics Institute of State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology at 2 p. m. on 8 June 2011.

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

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt.

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 6 May 2011. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius) and at the Library of the Semiconductor Physics Institute of State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology (A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius).

© Oliver Liebfried, 2011

Įvadas

Mokslo problemos aktualumas. Naudodama Lorencio jėgą, elektromagnetinė svaidyklė (EMS) elektrinę energiją paverčia kinetine. Šiuo metu didelis dėmesys skiriamas bėgių tipo EMS, kurios gali kelių kg sviedinių pagreitinti net iki 2 km/s. Sviedinys yra elektros laidininkas, pagamintas iš kietojo kūno (metalo), kuriuo teka kelių kA ar net MA elektros srovė. Jis turi specialius mechaninius slystančius kontaktus, sujungiančius jį elektriškai su dviem bėgiais. Elektromagnetinio pagreitinimo metu milžiniška Lorencio jėga veikia sviedinį, todėl vienas pagrindinių uždavinių, vystant elektromagnetines svaidykles, yra atitinkamos konstrukcijos sviedinio sukūrimas. Sviedinio judėjimas ir magnetinio lauko difuzija iššaukia srovės tankio išaugimą slystančiųjų kontaktų srityse. Dėl to sviedinio pagreitėjimo metu prie kontaktų išsiskiria didelis *Joule* šilumos kiekis, suardantis bėgių paviršius. Todėl norint padidinti EMS efektyvumą, labai svarbu turėti kiekybinę informaciją apie srovės pasiskirstymą slystančių kontaktų ir bėgių sąlyčio srityse. Magnetinio lauko pasiskirstymo bėgių aplinkoje matavimai yra vienas iš metodų, siekiant gauti šią informaciją. Tokie matavimai reikalauja didelės erdvinės skyros ir galimybės matuoti stiprius sparčiai kintančius magnetinius laukus.

Manganitai $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (čia A=Sr, Ca, Ba, Pb) – tai medžiagos, pasižyminčios labai didele (milžiniška) magnetovarža (MM), kuri atsiranda dėl specifinės šioms medžiagoms elektronų su poliarizuotais sukiniais dvigubos pamaininės sąveikos tarp Mn^{+3} ir Mn^{+4} jonų. Buvo aptikta, jog magnetovarža plonuose polikristaliniuose sluoksniuose ženkliai priklauso nuo išorinio magnetinio lauko stiprio net iki 50 T, bet labai silpnai – nuo jo krypties. Iš šių sluoksnių galima pagaminti labai mažo aktyvaus tūrio ($0,4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$) magnetinio lauko MM-B-skaliarinius jutiklius, kurie gali būti naudojami matuoti elektromagnetinės svaidyklės magnetinio lauko pasiskirstymą. Šiame darbe tokie jutikliai buvo pritaikyti tirti magnetinio lauko pasiskirstymą bėgių aplinkoje, kai EMS veikia statiniu ir dinaminiu režimu.

Tyrimo objektas. Tyrimo objektas yra stipraus impulsinio magnetinio lauko jutikliai, naudojamys milžiniškos magnetovaržos reiškinį plonuose polikristaliniuose La-Sr-MnO sluoksniuose, ir elektromagnetiniai procesai bėgių tipo EM svaidyklėse.

Darbo tikslai ir uždaviniai. Pagrindinis darbo tikslas – išvystyti ir pritaikyti stipraus magnetinio lauko jutiklius, naudojančius milžiniškos magnetovaržos reiškinį, elektromagnetinių svaidyklių veikimui tirti ir atlikti

magnetinio lauko pasiskirstymo matavimus bėgių tipo EM svaityklėse statiniame ir dinamiame režime.

Darbo tikslui pasiekti darbe buvo numatyti tokie uždaviniai:

1. Sukurti ir pritaikyti 2D ir 3D magnetinio lauko matavimo sistemas iš MM-B-skaliarinių jutiklių elektromagnetinėse svaityklėse, esant aukštam elektromagnetinių trikdžių lygiui.
2. Ištirti MM-B-skaliarinių jutiklių panaudojimo galimybes dinamių magnetinių laukų matavimui ritės tipo EM svaityklėse.
3. Atlikti magnetinio lauko difuzijos bėgių aplinkoje tyrimus, atliekant bandymus bėgių tipo EM svaityklėse, veikiančiose statiniame ir dinamiame režimuose.
4. Ištirti sviedinį greitinančios elektros srovės ir Lorencio jėgos poveikį sviedinio slydimo kontaktams bėgių tipo svaityklėje.

Tyrimų metodika. Buvo panaudota speciali stiprių impulsinių magnetinių laukų ir elektros srovių matavimo įranga bei ritės ir bėgių tipo EM svaityklės. Tyrimų rezultatai buvo analizuojami ir aptarti pasitelkiant skaitmeninius modeliavimo metodus, naudojančius *COMSOL Multiphysics*, *MEGA*, *Mathematica* ir *PSpice* programas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją, buvo gauti šie fizikos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurtos naujos stipraus impulsinio magnetinio lauko matavimo sistemos, sudarytos iš MM-B-skaliarinių jutiklių, kurių aktyviosios srities tūris yra $0,4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$, galinčių matuoti absoliučiąją magnetinės indukcijos vertę iki 20 T, kai impulsų dažnio ruožas 0–10 kHz.
2. Panaudojus 2D ir 3D matavimo sistemas iš MM-B-skaliarinių jutiklių, pirmą kartą ištirti magnetinio lauko pasiskirstymai ritės tipo EM svaityklei veikiant statiniame ir dinamiame režime.
3. Ištirti magnetinio lauko difuzijos procesai bėgių tipo EM svaityklėse naudojant bėgius iš skirtingų medžiagų (plieno, duraliuminio ir vario) statiniame šių svaityklių veikimo režime ir dinamiame režime, kai sviedinio greitis siekė iki 2200 m/s.
4. Parodyta greičio skinefekto įtaka sviedinį greitinančios srovės pasiskirstymui bėgiuose, kai sviedinio greitis bėgių tipo EM svaityklėje siekia 1500 m/s. Taip pat ištirtas srovės ir magnetinio lauko pasiskirstymas sviedinio kontaktų su bėgiais aplinkoje statiniame bėgių tipo EM svaityklės veikimo režime.

Praktinė vertė. Buvo sukurta unikali matavimo įranga, skirta tirti stipraus magnetinio lauko impulsų parametrams esant aukštam elektromagnetinių trikdžių lygiui. Ši įranga suteikia galimybę išmatuoti magnetinio lauko indukcijos vertę iki 20 T, nepriklausomai nuo šio lauko krypties, kai magnetinio lauko impulsų dažnis kinta 0–10 kHz ruože. Magnetinio lauko difuzijos eksperimentinių tyrimų rezultatai praplečia supratimą apie elektromagnetinius procesus, vykstančius sviedinio slydimo kontaktų aplinkoje ir gali būti panaudoti tolimesniam skaitinių modelių, skirtų EM svaidyklių efektyvumui didinti, vystymui.

Ginamieji teiginiai

1. Magnetinio lauko jutikliai iš plonų polikristalinių $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių yra efektyvūs įtaisai tirti elektromagnetiniams procesams elektromagnetinėse svaidyklėse. Jie gali matuoti absoliutines impulsinio magnetinio lauko vertes nuo 0,5 T iki 20 T, 0–10 kHz dažnių ruože su paklaida $\leq \pm 10\%$.
2. Maksimalūs magnetinio lauko gradientai, atsirandantys tarp išorinių ir vidinių bėgių šonų dėl artumo efekto ir skinefeko, kai elektromagnetinė svaidyklė EMA3 (kalibras $15 \times 30 \text{ mm}^2$, srovės amplitudė 150 kA) veikia statiniame režime, yra, atitinkamai, 0,1 T/mm, 0,09 T/mm ir 0,056 T/mm vario, duraliuminio ir plieno bėgiams.
3. Skinefeko gylis 1,7 mm, gautas analizuojant magnetinio lauko matavimo rezultatus baigtinių elementų metodu, naudojant harmoninio osciliatoriaus artinį, kai bėgių tipo elektromagnetinės svaidyklės RAFIRA (kalibras $25 \times 25 \text{ mm}^2$) sviedinio greitis siekė 750 m/s, dėl greičio skinefeko sumažėja iki 0,5 mm, kai sviedinio greitis išauga iki 1500 m/s.
4. Magnetinio lauko ir srovės pasiskirstymo matavimai atlikti artimoje sviedinio kontaktų šepetėlių aplinkoje, kai bėgių tipo svaidyklė veikia statiniame 150 kJ energijos režime, rodo, jog priekiniai šepetėliai dėl nepakankamos Lorentzo jėgos gali prarasti kontaktą su bėgiais, net jei jų ilgis yra didesnis už atstumą tarp šių bėgių. Pakankamas kontaktas susiformuoja apytikriai po 500 μs ir yra lydymas šepetėlių medžiagos išsilydymo.

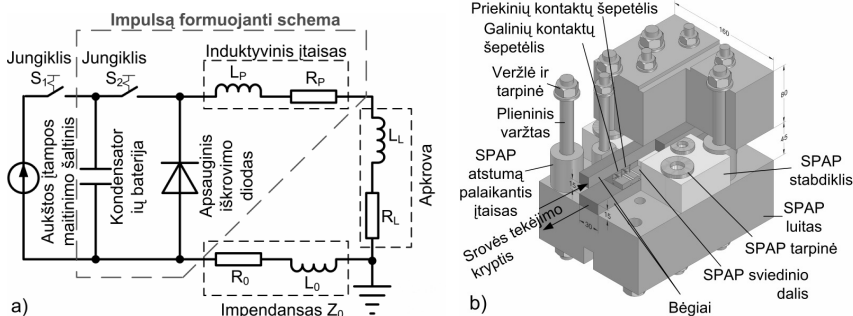
Darbo apimtis. Šią disertaciją sudaro įvadas, 6 skyriai, bendrosios išvados, cituojamos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas bei du priedai. Skyriuose yra apžvelgiama literatūra, pateikiami tyrimų metodai bei aparatūra, tyrimų rezultatai ir išvados.

1. Elektromagnetinė svaidyklė ir jos tyrimų metodai

Šiame skyriuje pateikiama literatūros analizė apie elektromagnetines svaidykles (EM), technologijų problemos ir parametrų metrologija. Skyrius prasideda nuo istorinės EM svaidyklių vystymo apžvalgos, sukauptos per pastaruosius du šimtmečius. Tuomet aprašomas ritės ir bėgių tipo svaidyklių veikimo principas, pateikiamos šių įtaisų panaudojimo sritys ir privalumai. Toliau šiame skyriuje apžvelgiamos bėgių tipo EM svaidyklių technologijų problemos. Išsamiai paaiškintas greičio skinefektas (GSE), pabrėžiant, kad tai – viena svarbiausių priežasčių iššaukianti sviedinio kontakto su bėgiu netobulumus. Pateikiami ankstesni bandymai, įvertinant GSE įtaką EM svaidyklės efektyvumui, ypatingą dėmesį skiriant magnetinių laukų svaidyklės aplinkoje tyrimams. Skyriaus pabaigoje aptariamas milžiniškos magnetovaržos efektas manganituose ir pateikiami duomenys, rodantys galimybę šį reiškinį panaudoti EM svaidyklių tyrimams.

2. Tyrimų metodika

Šiame skyriuje aprašomas didelės galios elektrinių impulsų generatorius, disertacijoje naudotų elektromagnetinių svaidyklių konstrukcijos ir šių svaidyklių parametrų matavimo įtaisai bei metodikos. 1a paveiksle parodyta didelės galios elektrinių impulsų generatoriaus, kuris naudojamas kaip impulsinis elektros srovės šaltinis magnetinio lauko induktoriams (ritėms) ir EM svaidyklėms, principinė schema. Disertacijoje eksperimentai buvo atliekami, naudojant Puslaidininkių fizikos institute (PFI) sukurtą stipraus impulsinio magnetinio lauko generatorių bei Saint Louiso Prancūzijos-Vokietijos tyrimų instituto (ISL) dviejų konstrukcijų bėgių tipo EM svaidykles. Visi eksperimentai buvo atliekami statiniame ir dinamiame režime, t. y., kai sviedinys buvo įtvirtinamas arba judėdavo, veikiamas Lorencio jėgos. PFI stipraus magnetinio lauko generatorių sudarė 2240 μ F kondensatorių baterija, galingas puslaidininkinis tiristorinis iškrovos jungiklis ir stipraus impulsinio magnetinio lauko ritė, pagaminta iš 52 apvijų 4 sluoksnių vario-niobio vielos, patalpinta į metalinį korpusą, suteikiantį ritei atsparumą nuo mechaninių perkrovų. Šis generatorius sukurdavo 20 T amplitudės ir 600 μ s trukmės pusės sinuso periodo formos magnetinio lauko impulsą. Šiame skyriuje taip pat aprašyta ir ritės tipo elektromagnetinė svaidyklė, kurią sudarė ritė su viduje patalpintu variniu 8 mm ilgio ir 4,9 mm išorinio spindulio cilindro pavidalo sviediniu. Tyrimams buvo naudojamos dviejų rūšių bėgių tipo EM svaidyklės: EMA3 ir RAFIRA. Jų tridimensinis (3D) vaizdas parodytas 1b paveiksle, o parametrai pateikti 1 lentelėje.



1 pav. a) Didelės galios elektros srovės impulsų generatoriaus struktūrinė schema.
b) EMA3 svaidyklės su įtvirtintu sviediniu 3D vaizdas

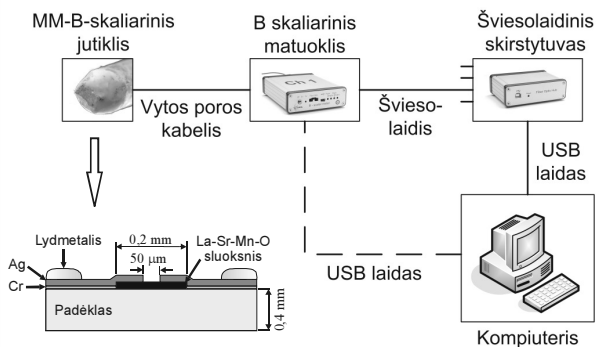
1 lentelė. Bėgių tipo svaidyklių techniniai parametrai

Pavadinimas	EMA3	RAFIRA
Maksim. energija	178 kJ	10 × 178 kJ
Impulsą formuojančios schemos induktyvumas	4 μH	4 μH
Jungiklis S ₂	Apsauginis iškrovimo diodas, dujų išlydžio arba tiristoriniai jungikliai	Apsauginis iškrovimo diodas, dujų išlydžio arba tiristoriniai jungikliai
Kalibras	15 mm × 30 mm	25 mm × 25 mm
Bėgių medžiaga (savitasis laidumas)	Cu-Cr lydinys (50 MS/m), duraliuminis (20 MS/m), plienas (0,36 MS/m)	duraliuminis (20 MS/m)
Bėgių ilgis	270 mm arba 1370 mm	3 m
Mechaninė konstrukcija	Plieniniai varžtai ir stiklo pluoštu armuotas plastikas (SPAP) medžiaga	Plieniniai varžtai ir SPAP

Toliau šiame skyriuje aprašomos bėgių tipo svaidyklių parametrų matavimo metodikos: įtampos matavimui sviedinio kontaktų savybėm tirti, srovės matavimui, naudojant *Rogowski* ritę, sviedinio padėčiai svaidyklėje nustatyti, naudojant indukcinis jutiklius, bei sviedinio greičio matavimui Doplerio radaru.

3. Magnetinio lauko jutiklis

Trečiame skyriuje aprašomas MM-B-skaliarinio jutiklio ir keturių jutiklių gardelės formavimas, kalibravimas bei pagrindinės savybės. 2 paveiksle pavaizduotas jutiklio schematinis vaizdas ir magnetinio lauko matavimo sistema. Būtina pažymėti, kad $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnis, pasižymintis milžiniška magnetovarža, yra 400 nm storio ir 0,4 mm pločio. Ant jo 50 μm atstumu vienas nuo kito yra suformuoti du elektrodai, todėl jutiklio aktyviosios srities tūris sudaro $8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$.



2 pav. Magnetinio lauko matavimo sistema ir jutiklio schematinis vaizdas

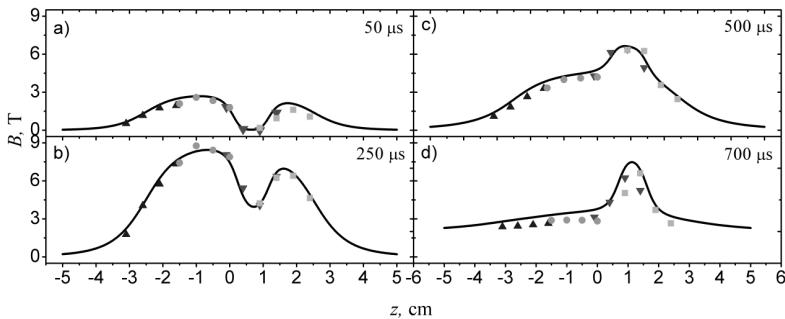
Tyrimų metu buvo nustatyta, kad dėl milžiniškos magnetovaržos efekto priklausomybės nuo temperatūros, būtina atlikti jutiklio kalibravimą skirtingose temperatūrose plačiame temperatūrų ruože. Anizotropija buvo identifikuota kaip svarbiausia priežastis atsirasti $\pm 10\%$ paklaidai, kai magnetinis laukas siekia nuo 0,5 iki 1 T, ir $\pm 5\%$ paklaidai, esant stipresniems nei iki 20 T laukams. Buvo parodyta, kad matuojamo dažnio viršutinė riba 10 kHz yra dėl elektrovaros jėgos signalo („kilpos“ efektas), indukuojamo bifiliariškai vytų laidų poroje, o ne dėl nepakankamai greito MM-B-skaliarinio jutiklio atsako.

4. Magnetinio lauko pasiskirstymas ritės tipo svaidyklėje

Šiame skyriuje magnetinio lauko matavimo ritės tipo svaidyklėje rezultatai yra lyginami su atitinkamais modeliavimo rezultatais, gautais naudojant *Mathematica* programą. MM-B-skaliarinis jutiklis buvo patalpintas į stipraus magnetinio lauko ritę, kurioje buvo įmontuotas bendraašis varinis cilindras. Pirmiausiai, cilindras bandymo metu buvo užfiksuojamas, o magnetinis laukas buvo matuojamas keturiais jutikliais cilindro viduje. Kituose bandymuose cilindras galėjo laisvai judėti, todėl magnetinis laukas buvo matuojamas išilgai

ašies keičiant jutiklių gardelės padėtį kiekvieno bandymo metu. Eksperimentinių parametru modeliavimas buvo atliktas naudojant *Mathematica*.

Norint suskaičiuoti srovės pasiskirstymą variniame cilindre ir metaliniame ritės šarve, jų matmenys buvo diskretizuojami: jie buvo padalinami į susiliečiančius stačiakampio skerspjuvio mažus žiedus. Po diskretizacijos sistemą sudaro magnetiškai sujungti laidūs žiedai. Šiame skyriuje yra pateikiamos atitinkamos diferencialinės lygtys, kurių pagalba apskaičiuojama srovė kiekviename žiede. Tada taikant Bio-Savaro dėsnį apskaičiuojamas kiekvieno žiedo magnetinis laukas, o tuo pačiu ir magnetinis laukas kiekviename įrenginio taške. Žiedo judėjimas gali būti aprašomas įvertinant Lorenco jėgą, veikiančią varinį žiedą.



3 pav. Magnetinio lauko pasiskirstymas išilgai ritės ašies, judant variniam cilindriui. Eksperimentas – simboliai, modeliavimas – kreivės

3 paveiksle pateikti judančio cilindro matavimo rezultatai. Grafikai parodo ašinių magnetinės indukcijos pasiskirstymą skirtingais laiko momentais. Išsities linijos atitinka skaičiavimo rezultatus, o taškai – bandymų metu gautus rezultatus. Atliekant skirtingus bandymus, gauti rezultatai parodyti kitais simboliais. Pagal Lenco dėsnį, indukuotos sūkurinės srovės priešinasi magnetinio lauko kitimui, dėl to atsiranda lokaliniai magnetinio lauko maksimumai ir minimumai sviedinio (cilindro) buvimo vietose. Gautas geras skaičiavimų ir matavimų rezultatų sutapimas.

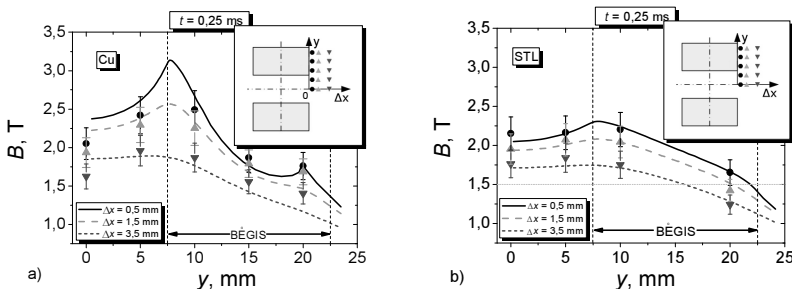
5. Magnetinio lauko difuzija į bėgių tipo svaidyklės bėgius

Šiame skyriuje pateikiami magnetinio lauko pasiskirstymo matavimai bėgių tipo svaidyklės bėgiuose, gauti naudojant MM-B-skaliarinius jutiklius, svaidyklei veikiant statiniame ir dinamiame režimuose. Eksperimentiniai duomenys buvo analizuojami, naudojant baigtinių elementų (BE) metodą.

5.1. Magnetinio lauko matavimai statiniame bėgių tipo svaidyklės režime

Šiame poskyryje aptariami rezultatai, gauti, kai EMA3 svaidyklė veiks statiniame režime. Buvo naudojami bėgiai iš trijų skirtingų medžiagų, todėl buvo galima keisti magnetinio lauko pasiskirstymą, nekeičiant maitinimo arba elektrinės grandinės parametrų. Panaudoti penki MM-B-skaliariniai jutikliai, sumontuoti plastikiniame bloke netoli bėgių paviršiaus. Tyrimų duomenys, gauti eksperimentiniu būdu, buvo modeliuojami naudojant *3-D BE MEGA* programą. 4 paveiksle parodytas magnetinės indukcijos pasiskirstymas vario ir plieno bėgiuose. Taškai rodo magnetinį lauką, išmatuotą naudojant MM-B-skaliarinius jutiklius, o ištisinės linijos – modeliavimo rezultatus laiko momentu $t=0,25$ ms, kai srovės impulsas pasiekia maksimalią vertę. Trys skirtingų atspalvių kreivės atitinka magnetinio lauko matavimus, naudojat skirtingus atstumus tarp jutiklių ir bėgių. Jutiklių padėtis parodyta įterptame paveiksle. Atstumas Δx tarp bėgių paviršiaus ir jutiklių buvo 0,5 mm, 1,5 mm ir 3,5 mm. Viršutinio bėgio padėtis brėžinyje pavaizduota dviem brūkšninėm linijom. Matavimų paklaida siekė iki $\pm 10\%$.

Magnetinio lauko pasiskirstymas vidinio bėgio šone, parodytas 4 paveiksle, kai $y=7,5$ mm, pakankamai gerai sutampa su modeliavimo rezultatais ir gali būti paaiškintas artumo efektu. Tai taip pat parodo, kad magnetinio lauko gradientai yra pakankamai dideli, todėl šio lauko pasiskirstymą galima išmatuoti tik naudojant mažo darbo tūrio MM-B-skaliarinius jutiklius, patalpintus arti bėgių paviršiaus.



4 pav. Erdvinis magnetinės indukcijos pasiskirstymas bėgiuose iš skirtingų medžiagų vario (a) ir plieno (b) laiko momentu $t=0,25$ ms (eksperimentiniai rezultatai – simboliai, modeliavimo – kreivės)

Tyrimų rezultatai pateikti šiame poskyryje rodo, kad magnetinio lauko gradientai bandymuose su plieno bėgiais yra mažesni nei vario. Tai galima paaiškinti artumo efektu ir skin efektu, nes didesni gradientai pasireiškia medžiagose, turinčiose didesnį savitąjį elektrinį laidumą.

Taigi buvo parodyta, kad MM-B-skaliariniai jutikliai gali būti sėkmingai panaudoti magnetinio lauko pasiskirstymo matavimams artimoje bėgių aplinkoje, kai bėgių tipo svaidyklė veikia statiniame režime. Eksperimentiniai rezultatai gerai sutampa su skaitinio modeliavimo BE metodu rezultatais, kurie rodo, kad išmatuoti dydžiai priklauso nuo erdvinio srovės pasiskirstymo bėgių viduje ir magnetinio lauko difuzijos reiškinio. Be to, tyrimai parodė, kokie svarbūs yra mažo aktyvaus tūrio MM-B-skaliariniai jutikliai, kurie, matuojant magnetinio lauko difuziją bėgiuose, gali būti patalpinti nedideliuose atstumuose šių bėgių aplinkoje.

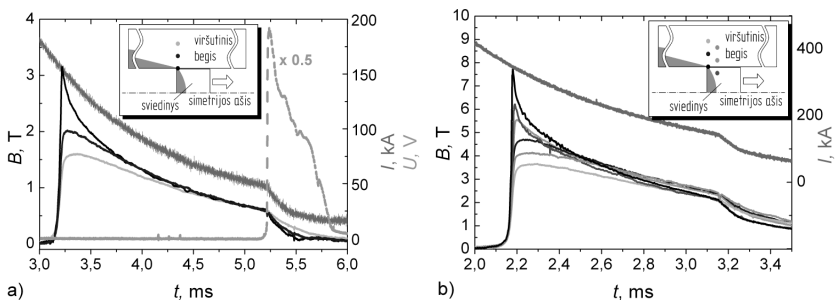
5.2. Magnetinio lauko matavimai bėgių tipo svaidyklei veikiant dinamiame režime

Šiame skyriuje pateikiami magnetinio lauko tyrimai RAFIRA bėgių tipo svaidyklei veikiant dinamiame režime. MM-B-skaliariniai jutikliai buvo naudojami išmatuoti magnetinio lauko pasiskirstymui bėgių aplinkoje. Šių tyrimų tikslas buvo ištirti magnetinio lauko difuzijos ypatumus susijusius su greičio skinefektu (GSE) ir nustatyti srovės pasiskirstymą bėgiuose, naudojant modeliavimą BE metodu.

MM-B-skaliariniai jutikliai buvo pritvirtinti prie svaidyklės bėgių, naudojant specialų apvaskalą, kuris saugojo jutiklius nuo elektrinio, mechaninio ir šiluminio poveikio. Bendras atstumas tarp jutiklių aktyviosios dalies ir bėgių siekė apie 1 mm. Atstumas tarp šalia esančių jutiklių buvo 5 mm horizontalia kryptimi ir 3,12 mm vertikalia kryptimi.

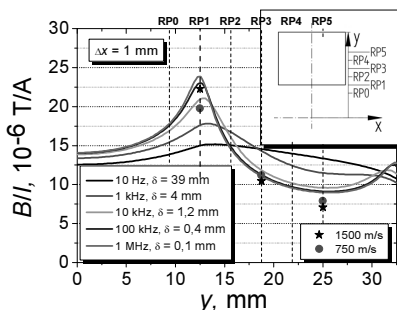
Dviejų skirtingų bandymų rezultatai, kai sviedinio greičiai matavimo vietoje siekė 750 m/s ir 1500 m/s, pateikti 5 paveiksle, kuriame taip pat parodytas greitinančios srovės kitimas laike. 5a paveiksle pateikta brūkšninė kreivė rodo įtampos tarp bėgių priklausomybę nuo laiko ir atspindi sviedinio kontakto su bėgiais kokybę. Geros kokybės kontaktui būdinga žema įtampa, o staigus jos augimas, kai $t=5,25$ ms, rodo, jog sviedinys išstumiamas iš bėgių.

Kaip matyti iš 5 paveikslo, visos magnetinio lauko kinetikos kreivės prasideda staigiu augimu, kurio amplitudė priklauso nuo to, kurioje vietoje bėgio atžvilgiu yra MM-B-skaliarinis jutiklis. Maksimali amplitudė atitinka jutiklį, patalpintą vidiniame bėgių krašte. Tai galima paaiškinti didele srovės tankio koncentracija šioje bėgio dalyje, atsirandančia dėl greičio skinefekto. Juodais taškais pažymėti jutikliai buvo patalpinti arti didelio tankio srovės gijos, tuo tarpu kiti jutikliai buvo patalpinti didesniu atstumu nuo jos. Laikui bėgant srovė išplinta į bėgių vidų, todėl magnetinio lauko pasiskirstymas erdvėje suvienodėja. Šį procesą atspindi tai, jog laikui bėgant magnetinis laukas, išmatuotas įvairiose vietose bėgių aplinkoje, konverguoja į tą pačią vertę.



5 pav. Magnetinio lauko kinetika RAFIRA bėgių aplinkoje, esant sviedinio greičiams: a) 750 m/s, b) 1500 m/s. Įterptame paveiksle – MM-B-skaliarinių jutiklių išdėstymas

Magnetinio lauko pasiskirstymui bėgių aplinkoje aprašyti buvo iškelta prielaida, jog jį atitinka skinefektų gylis, apskaičiuojamas naudojant formulę $\delta = \sqrt{2}(\mu\sigma\omega)^{-1/2}$ (čia μ , σ ir ω yra, atitinkamai, bėgių medžiagos magnetinė skvarba, elektrinis laidumas ir išorinio magnetinio lauko kitimo dažnis). Skaičiavimų rezultatai, gauti naudojant *BE COMSOL Multiphysics* programą, buvo derinami su magnetinio lauko vertėmis, išmatuotomis MM-B-skaliariniais jutikliais. Šių tyrimų duomenys, pateikti 6 paveiksle, rodo apskaičiuoto normuoto magnetinio lauko (B/I) pasiskirstymą (I – visa bėgiais tekanti srovė laiko momentu, kai šių bėgių krašte pasiekiamas maksimalus magnetinis laukas). MM-B-skaliarinių jutiklių, kurie buvo patalpinti 1 mm nuo viršutinio bėgio krašto, padėtis y ašyje parodyta brūkšninėmis linijomis. Pastorinta brūkšninė linija rodo bėgio kraštą.

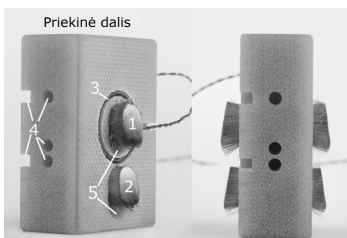


6 pav. Normuotos magnetinės indukcijos pasiskirstymas, gautas modeliuojant harmoninio magnetinio lauko artiniu, esant skirtingiems lauko svyravimo dažniams. Apskritimais ir žvaigždėmis pažymėti taškai atitinka maksimalias magnetinės indukcijos vertes iš 5 paveikslo, kai, atitinkamai, $t=3,22$ ms ir $t=2,18$ ms

Geriausias modeliavimo ir matavimo rezultatų (RP1 jutiklio duomenys) sutapimas, esant 1500 km/s ir 750 km/s sviedinio greičiams, buvo gautas, kai harmoninio svyravimo dažnis ω buvo lygus, atitinkamai, 50 kHz ir 5 kHz. Tai atitiko 0,5 mm ir 1,7 mm skinefekto gylius.

6. Srovės pasiskirstymas sviedinio daugelio gijų kontaktų šepetėliuose

Šiame skyriuje pateikiami tyrimai, kaip statinio EM svaidyklės veikimo režime elektros srovė pasiskirsto tarp daugelio gijų kontaktų šepetėlių. Srovė šepetėliuose buvo matuojama specialios konstrukcijos mažo dydžio *Rogowski* ritėmis, o magnetinis laukas šepetėlių aplinkoje – MM-B-skaliariniais jutikliais. Matavimams buvo naudojamas 1 paveiksle pavaizduotas įrenginys. Tyrimai buvo atliekami su sviediniais, kurių daugelio gijų kontaktų šepetėliai buvo pagaminti iš Cu-Cd lydinio. Tokių sviedinių vaizdas pateiktas 7 paveiksle. Šepetėlių ilgis buvo skirtingas kiekvienam tyrimams naudojamam sviediniui. Šeši jutikliai buvo patalpinti mažose skylutėse, išgręžtose plastikinėje sviedinio dalyje arti šepetėlių. Kontaktais tekančios srovės dalis, lyginant su visa srove, buvo gaunama ir skaitiniu modeliavimu, naudojant *PSpice* kodą.

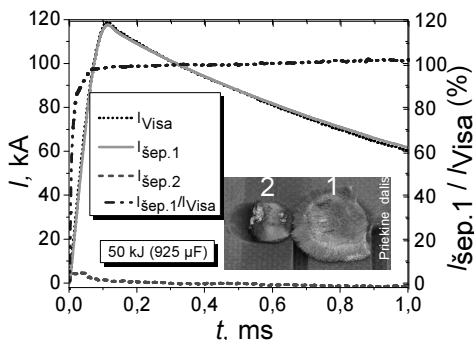


7 pav. SPAP sviedinys su priekinių kontaktų šepetėliu (1), galinių kontaktų šepetėliu (2), maža *Rogowski* rite (3) bei išgręžtomis skylėmis MM-B-skaliariniais jutikliais (4) ir šepetėliams (5)

Tyrimai buvo atlikti, keičiant EM svaidyklės elektrinio impulso energiją, galinių (sviedinio judėjimo kryptimi) šepetėlių ilgį bei visų šepetėlių ilgius. Bandymų rezultatai buvo modeliuojami skaitiniu būdu, naudojant „grandinės laidumo“ analizės metodą, kuriuo aptinkama, kai elektrinė grandinė nutrūksta (ženkliai išauga elektrinė varža). Nurūkus grandinei, pavyzdžiui, dėl plazmos išlydžio prie kontaktų, atsiras nukrypimas tarp modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų.

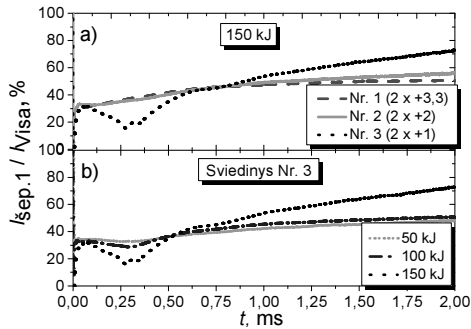
Eksperimentai buvo atliekami, palaiptui trumpinant šepetėlius, kurie pradžioje buvo maždaug 3,3 mm ilgesni, negu atstumas tarp bėgių, o po to buvo sutrumpinti taip, kad tarp jų ir bėgių galėjo atsirasti oro tarpas ($\approx 0,4$ mm). Buvo

nustatyta, kad srovės pasiskirstymas, jai tekant 3,3 mm ilgesniu už atstumą iki bėgių galiniu šepetėliu, gerai sutampa su modeliavimo rezultatais, gautais naudojant *PSpice* programą. Šiuo atveju apie 30 % srovės impulso pradžioje teka priekiniais šepetėliais, tačiau po tam tikro laiko srovės pasiskirstymas priekiniuose šepetčiuose pasiekia 50 %. Tai galima paaiškinti magnetinio lauko difuzijos reiškiniu. Buvo nustatyta, kad srovės pasiskirstymas ženkliai pasikeičia tik tuomet, jeigu tarp bėgių ir sviedinio kontaktų susidaro oro tarpas. Iš 8 paveiksle pateiktų tyrimo rezultatų matyti, jog pradžioje galiniu šepetėliu teka silpna srovė (keletas kA), tuo tarpu priekiniai šepetėliai praleidžia didžiausią srovės dalį. Atsižvelgiant į šį rezultatą, buvo padaryta išvada, kad nepakankamo ilgio šepetėliai šūvio metu gali iššaukti šepetėlių arba bėgių medžiagos suardymą, kaip tai matyti iš šepetėlių paviršiaus vaizdo 8 paveiksle.

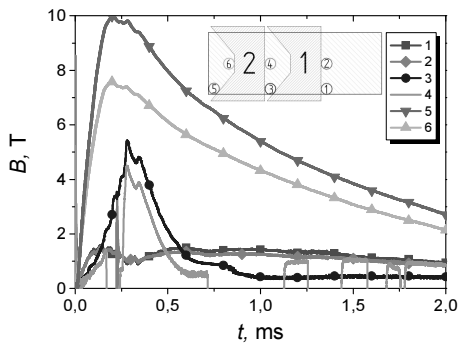


8 pav. Visos sviedinio kontaktais tekančios srovės pasiskirstymas atskiruose daugelio gijų kontaktų šepetėliuose esant per trumpam galiniam šepetėliui. Nuotraukoje šepetėlių vaizdas po bandymo

9 paveiksle pateikti rezultatai buvo gauti, kai abiejų šepetėlių ilgiai patrupinti nuo +3,3 mm iki +1 mm. Bandymai buvo atlikti su trim sviediniais. Dviejų iš jų, Nr. 1 (+3,3 mm) ir Nr. 2 (+2 mm), kontaktai buvo stabilūs, turėjo pakankamai mažą varžą, o elektrinė grandinė su jais atitiko skaitinį *PSpice* modeliavimą (9a pav.). Tačiau sviedinys Nr.3 su +1 mm ilgesniu šepetėliu elgėsi visai kitaip. 9b paveiksle parodyti rezultatai, gauti tiriant šį sviedinį, kai EM svaidyklės energija kito nuo 50 kJ iki 150 kJ. Kaip matyti, laiko tarpe nuo 0 iki 300 μ s yra stebimas srovės per priekinius kontaktus sumažėjimas. Šis reiškinys stiprėja, didinant EM svaidyklės energiją.



9 pav. Santykinė srovė, tekanti per įvairaus ilgio šepetėlius, esant pastoviai EM svaidyklės energijai (a) ir tekanti trečiojo sviedinio šepetėliais, esant skirtingoms energijoms (b)



10 pav. Magnetinės indukcijos priklausomybė nuo laiko trečiojo sviedinio kontaktų aplinkoje, išmatuota, naudojant MM-B-skaliarinius jutiklius, esant 150 kJ energijai. Jutiklių padėtys pavaizduotos intarpe. Magnetinio lauko fliuktuacijos, stebimos 4-ju jutikliu, rodo elektrinio kontakto nestabilumą

Po bandymo buvo nustatyta, jog priekinio šepetėlio medžiaga išsilydė. Tai rodo padidėjusį energijos išsiskyrimą šio šepetėlio kontakto su bėgiais vietoje. Viena kontakto trūkumo priežasčių yra nepakankama jėgos, veikiančios statmenai bėgių paviršiui, vertė. Kaip buvo minėta anksčiau, srovė galiniame šepetėlyje yra stipresnė negu priekiniame. Matavimai parodė, kad ir magnetinis laukas priekinių kontaktų aplinkoje yra daug silpnesnis negu galinių (10 pav.). Todėl ir Lorencio jėgos statmenoji projekcija į bėgių paviršių yra santykinai mažesnė prie priekinio šepetėlio. Per silpnas mechaninis slėgis prie kontakto priekiniame šepetyje impulso pradžioje ($t < 500 \mu s$), kai dar neveikia Lorencio

jėga, yra pagrindinė blogo kontakto priežastis. Gero kontakto priekiniame šepetėlyje atkūrimas gali būti paaškinamas srovės persiskirstymu, kai kontakto medžiaga išsilydo sudrėkindama kontakto medžiagos ir bėgių paviršius. Buvo padaryta išvada, kad nors bandymai statiniame EM svaidyklės veikimo režime ženkliai skiriasi nuo šovimo sąlygų, panašūs procesai kontaktų srityse gali atsirasti ir dinaminiame režime, nors priekinis šepetėlis yra pakankamo ilgio ir siekia bėgius.

Bendrosios išvados

1. Sukurtas unikalus magnetinio lauko jutiklis iš plonų polikristalinių $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių (MM-B-skaliarinis jutiklis) tinkamas tirti elektromagnetinius procesus elektromagnetinėse (EM) svaidyklėse, esant aukšto lygio elektromagnetiniams trikdžiams ir veikiant smūginėms bangoms. Panaudojus šiuos jutiklius, sukurta keturių kanalų magnetinių laukų matavimo sistema, leidžianti išmatuoti absoliutinę impulsinio magnetinio lauko vertę 0–10 kHz dažnių ruože $\pm 10\%$ tikslumu, kai magnetinis laukas kinta nuo 0,5 iki 1 T ir $\pm 5\%$ tikslumu, kai šis laukas siekia iki 20 T.
2. Panaudojus MM-B-skaliarinių jutiklių gardelę ritės tipo EM svaidyklės tyrimams buvo parodyta, jog magnetinio lauko matavimo duomenys, gauti naudojant MM-B-skaliarinius jutiklius, sutampa su matematinio modeliavimo rezultatais, o šie jutikliai gali būti sėkmingai naudojami, tiriant stiprius dinaminius magnetinius laukus labai mažuose ($0,4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$) tūriuose.
3. Magnetinių laukų tyrimai bėgių tipo EMA3 (kalibras $15 \times 30 \text{ mm}^2$) EM svaidyklės bėgių aplinkoje, kai ši svaidyklė veikė statiniame režime, naudojant MM-B-skaliarinius jutiklius ir matematinio modeliavimo programinę įrangą *MEGA*, paremtą baigtinių elementų metodu, parodė, jog didelę įtaką srovės tankio pasiskirstymui bėgiuose daro magnetinio lauko difuzijos procesai, o kai elektros srovė bėgiuose pasiekia maksimalią vertę, magnetinio lauko gradientai tarp vidinės ir išorinės bėgių dalies yra, atitinkamai, 0,1 T/mm, 0,09 T/mm ir 0,056 T/mm vario, duraliuminio ir plieno bėgiams.
4. Ištyrus magnetinio lauko pasiskirstymą EM svaidyklės RAFIRA (kalibras $25 \times 25 \text{ mm}^2$) sviedinio ir bėgių kontakto aplinkoje, kai ši svaidyklė veikė dinaminiame režime, ir naudojant baigtinių elementų metodu paremtą *COMSOL Multiphysics* programinį paketą bei harmoninių virpesių artinį, buvo aptikta, jog greičio skinefektas daro ženklią įtaką magnetinio lauko pasiskirstymui bėgiuose, o skinefektas gylis yra, atitinkamai, 1,7 mm ir 0,5 mm, kai sviedinio greičiai siekia 750 m/s ir 1500 m/s.

5. Srovės ir magnetinio lauko pasiskirstymo tyrimai, atlikti statiniame bėgių tipo EM svaidyklių veikimo režime, kai srovės energija siekė 150 kJ, parodė, jog priekinėje sviedinio šovimo kryptyje daugelio gijų kontaktų šepetėliuose prarandamas elektrinis kontaktas dėl per mažos šepetėlių prispaudimo prie bėgių jėgos. Pakankamas kontaktas susiformuoja apytikriai po 500 μ s nuo greitinančio elektros srovės impulso pradžios. Šio proceso metu vyksta kontaktų medžiagos išsilydymas.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose (ISI Web of Knowledge)

Liebfried, O.; Schneider, M.; Balevičius, S. 2010. Current Distribution and Contact Mechanisms in Static Railgun Experiments with Brush Armatures, *IEEE Transactions on Plasma Science* 39(1): 431–436. ISSN 0093-3813.

Žurauskienė, N.; Balevičius, S.; Cimmerman, P.; Stankevič, V.; Keršulis, S.; Schneider, M.; Liebfried, O.; Plaušinitienė, V.; Abrutis, A. 2010. B-Scalar Sensor Using CMR Effect in Thin Polycrystalline Manganite Films *IEEE Transactions on Plasma Science* 39(1): 411–416. ISSN 0093-3813.

Liebfried, O.; Loffler, M.; Schneider, M.; Balevičius, S.; Stankevič, V.; Žurauskienė, N.; Abrutis, A.; Plaušinitienė, V. 2009. B-Scalar Measurements by CMR-Based Sensors of Highly Inhomogeneous Transient Magnetic Fields, *IEEE Transactions on Magnetics* 45(12): 5301–5306. ISSN 0018-9464.

Schneider, M.; Liebfried, O.; Stankevic, V.; Balevicius, S.; Zurauskiene, N. 2009. Magnetic Diffusion in Railguns: Measurements Using CMR-Based Sensors *IEEE Transactions on Magnetics* 45(12): 430–435. ISSN 0018-9464.

Liebfried, O.; Schneider, M.; Loeffler, M. J.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V. 2009. Measurement of the Magnetic Field Distribution in Railguns Using CMR-B-Scalar Sensors, *Acta Physica Polonica A* 115(6): 1125–1127. ISSN 0587-4246.

Balevičius, S.; Stankevič, V.; Žurauskienė, N.; Šimkevičius, Č.; Liebfried, O.; Loffler, M. J.; Schneider, M.; Abrutis, A.; Plaušinitienė, V. 2009. Thin Film Manganite-Metal Interconnection and “Loop Effect” Studies in CMR-Based High Magnetic Field Sensors, *Acta Physica Polonica A* 115(6): 1133–1135. ISSN 0587-4246.

Kituose leidiniuose

Liebfried, O.; Balevičius, S.; Bartkevičius, S.; Loeffler, M. J.; Novickij, J.; Schneider, M.; Stankevič, V.; Žurauskiene, N. 2006. Manganite Sensors Array for Measurements of Magnetic Field Distribution, in *Proceedings of 1st Euro-Asian Pulsed Power Conference*, vol. 2, 582–586. ISBN 0-86341-774-4

Trumpos žinios apie autorių

Oliver Liebfried gimė 1980 metų sausio 7 dieną Vokietijoje Bottrope mieste. 2004 m. baigė Gelzenkircheno taikomųjų mokslų universitetą ir įgijo galios elektronikos bakalauro diplomą, o 2006 m. įgijo šio universiteto elektros energetikos sistemų magistro diplomą. 2007 m. dirbo inžinieriumi Puslaidininkių fizikos institute Vilniuje ir vėliau Gelzenkircheno taikomųjų mokslų universitete Vokietijoje. Nuo 2007 m. Puslaidininkių fizikos instituto (dabar – Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras) doktorantas ir Saint-Louiso Prancūzijos-Vokietijos tyrimų instituto (ISL) Prancūzijoje tyrėjas.

THE INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS USING COLOSSAL MAGNETORESISTANCE SENSORS

Problem under Investigation. Electromagnetic (EM) launchers convert electrical energy into kinetic energy by application of Lorentz forces. Recent developments focus on solid armature railguns which are able to accelerate massive projectiles to velocities of more than 2 km/s. The armature is a solid work piece which conducts currents of several kA up to several MA and realizes sliding contacts between two rails. The electromagnetic acceleration force of the projectile acts on its armature and one of the central technological challenges of this launcher type is the realization of appropriate armatures. The motion of the armature and magnetic diffusion lead to a current accumulation at the rear part of the sliding contact interface. Very high current densities result in phase transition and exceptional wearout at the interface during acceleration. Therefore, quantitative information about the current distribution in the vicinity of the sliding contact interface is of greatest interest. The measurement of the magnetic field distribution is one method to gather this information. Corresponding measurement techniques need to have high spatial resolution and should be able to measure highly dynamic magnetic fields.

Certain manganites exhibit a very large ("colossal") magnetoresistance (CMR). This magnetoresistive effect is characterized by a spin-polarized electron transport behaviour. It was obtained that CMR in polycrystalline films depends mainly on the magnitude of the applied magnetic field and not on its direction. Moreover, very large amplitudes (50 T) may be recorded. Based on thin manganite films, CMR-B-scalar sensors with very small active volume ($0.4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$) can be produced. In this work, they have been adapted for measurements of the magnetic field distribution in EM launchers.

Topicality of the Research Work. The current accumulation at the rear part of the sliding contact interface appears due to the so called „velocity skin effect“ (VSE). Since more than 30 years, asymmetric wear has been observed at the rear parts of recovered armatures, but the corresponding current profiles have never been measured during dynamic railgun experiments. This work presents for the first time measurements of the magnetic field distribution allowing to estimate the VSE during dynamic experiments. Furthermore, the measurement of magnetic fields with high spatial resolution for moving conductor problems are very important for the validation of simulation codes for numerous applications.

Research Object. The objects of investigations are the CMR-B-scalar sensor based on thin manganite films and electromagnetic processes, in particular at the contact interface of railguns with multiple brush armatures.

The Aim of the Work. The goal of this effort was to develop the CMR-B-scalar sensor for measurements at EM launchers and to use it for investigations of the magnetic field distribution at railguns related to magnetic diffusion at static and dynamic conditions.

Tasks of the Work

1. To develop the CMR-B-scalar sensors for magnetic field measurements at EM launchers at high level of electromagnetic interferences.
2. Testing of the CMR-B-scalar sensor at dynamic magnetic field measurement in a coilgun.
3. Investigation of magnetic diffusion in static and dynamic railgun experiments.
4. Investigation of force and current densities acting on the sliding contacts of the railgun armatures.

Applied Methods. Pulsed high magnetic fields, currents and voltages were measured at coil and rail accelerators. The results were analyzed and discussed by several numerical simulations performed with the codes *COMSOL Multiphysics*, *MEGA*, *Mathematica* and *P Spice*.

Scientific Novelty and its Importance. The contribution to the field of physical sciences involves:

1. The development of a new pulsed high magnetic field measurement system for EM launchers based on CMR-B-scalar sensors having an active volume of $0.4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$ and being able to measure absolute values of

magnetic flux density of pulses with amplitudes up to 20 T in a frequency range from 0 to 10 kHz.

2. Studies of magnetic field distribution during static and dynamic operation of coilgun and railgun type electromagnetic launchers using unique 2D and 3D arrays of CMR-B-scalar sensors.
3. The measurement of magnetic field diffusion process characteristics in static railgun experiments with different rail materials (steel, Dural and copper) and at dynamic railgun conditions with high projectile velocities (up to 2200 m/s).
4. Investigations of the VSE influence on the current distribution in the rails of a railgun at high projectile velocities (1500 m/s) and static investigation of current distributions in the case of projectiles equipped with multiple brush armatures.

Practical Value of the Work Results. The performed work led to the development of an unique and advanced system for the measurement of high pulsed magnetic fields independent from their direction. It operates in a measurement range of 20 T, a frequency range of 0–10 kHz and its features are galvanic separation, shielding against electromagnetic fields and the possibility for stand-alone operation. The achieved results improve the understanding of physical processes at the sliding contact interface of railguns and can be used to validate numerical simulations.

Statements Presented for Defense

1. The magnetic field sensor based on polycrystalline $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ thin films is an effective tool for studies of electromagnetic processes in EM launchers. It is able to measure the magnitude of the magnetic induction from 0.5 T to 20 T in the frequency range from DC to 10 kHz with an error smaller than $\pm 10\%$.
2. The local maxima of the gradients of the magnetic field distribution between the inner and outer edges of the rails appearing due to proximity and skin effect during static operation of the railgun EMA3 ($15 \times 30 \text{ mm}^2$ calibre, 150 kA peak current) are equal to 0.1 T/mm, 0.09 T/mm and 0.056 T/mm for copper, Dural and steel rails, respectively.
3. The skin depth of 1.7 mm determined at a dynamic operation of the railgun RAFIRA ($25 \times 25 \text{ mm}^2$ calibre) with a projectile velocity of 750 m/s by analysing magnetic field measurement data in the harmonic approximation using finite element method is greater than a skin depth of 0.5 mm at a velocity of 1500 m/s due to a more pronounced velocity skin effect in the latter case.

4. The distributions of magnetic field and current measured in the vicinity of multiple brush armatures during static railgun experiments with energies of 150 kJ show that the front brush can lose electrical contact with the rails due to missing Lorentz force even their length is still greater than the distance between the rails. The solid contact formation appearing after 500 μs is accompanied by material melting in the contact zone.

The Scope of the Scientific Work. The dissertation consists of an introduction, 6 chapters, general conclusions, references, list of publications and two appendices. Chapter 1 gives a literature review and introduces the field of railgun research and the idea behind this dissertation. Chapter 2 describes the experimental setups and main equipment. Chapter 3 deals with the CMR-B-scalar sensor and related methodological questions. The results of static and dynamic coilgun experiments are presented in chapter 4. Chapter 5 deals with the investigation of magnetic diffusion and the current distribution in the rails of a railgun. Chapter 6 is about the current distribution in brush armatures. This work includes 106 pages, 21 numbered formulas and 140 references.

General Conclusions

1. A magnetic field sensor based on polycrystalline $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ thin films (CMR-B-scalar sensor) was developed for studies of electromagnetic processes in EM launchers. It is able to measure the absolute value of magnetic flux density with an accuracy of $\pm 10\%$ in the range from 0.5 to 1 T and $\pm 5\%$ at higher magnetic fields up to 20 T. The array of the sensors was used for the development of unique and advanced 4 channels system for the measurement of high pulsed magnetic fields in frequency range from 0 to 10 kHz. Its features are galvanic separation, shielding against low and high frequency electromagnetic interference and the possibility for stand-alone operation.
2. The testing of four CMR-B-scalar magnetic field sensors array in a typical electromagnetic launching system - a small coilgun with an inserted hollow copper cylinder demonstrated a good agreement of the measurement results with semi-analytical simulations. It was concluded that the CMR-B-scalar sensors can be used for the highly local ($0.4 \times 50 \times 400 \mu\text{m}^3$) measurement of dynamic magnetic fields with varying orientation and large gradients.
3. The measurement of magnetic field using CMR-B-scalar sensors in the vicinity of the rails in the case of static railgun EMA3 (calibre $15 \times 30 \text{ mm}^2$) operation regime showed that measurements agree well with corresponding FEM simulation using *MEGA* code. It was obtained that the measured magnitudes depend on the spatial current distribution inside the rails which

is influenced by magnetic field diffusion process. As a result the magnetic field gradient from the inner to the outer rail edge at time instant when current pulse reached its maximum is 0.1 T/mm, 0.09 T/mm and 0.056 T/mm for copper, Dural and steel rails, respectively.

4. The investigation of magnetic field distribution in the vicinity of the rails at dynamic experiments with the railgun RAFIRA (calibre 25×25 mm²) clearly indicated a velocity induced current concentration at the rear part of the contact interface. An analysis of magnetic field distribution using the FE-code *COMSOL Multiphysics* in a harmonic approximation and comparison between simulations and experiment showed that the velocity-induced skin depths is 0.5 mm and 1.5 mm for projectile velocities of 1500 m/s and 750 m/s, respectively.
5. The investigation of electrical current and magnetic field distribution in the vicinity of multiple brush armatures at static experiments showed that brush armatures separated in shot direction at acceleration energies up to 150 kJ, exhibit contact problems occurring at the front brush in case of insufficient contact forces. An appropriate contact is formed at the contact interface of the front brush during the first 500 μs of the driving pulse and is accompanied by brush material melting.

About the author. Oliver Liebfried was born in Bottrop, Germany, in 1980. He received the Dipl.-Ing. (FH) degree in electrical engineering and the Master – Eng. degree in Energy System technology from the Gelsenkirchen University of Applied Sciences, Gelsenkirchen, Germany, in 2004 and 2006, respectively. In 2007 he was working as an engineer at the Semiconductor Physics Institute and later at the Gelsenkirchen University of Applied Sciences. Since 2007 O. Liebfried has been working toward the PhD degree at the Semiconductor Physics Institute (since 2010 – State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Vilnius, Lithuania), and at the French-German Research Institute of Saint-Louis, France.

Oliver LIEBFRIED

THE INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES
IN ELECTROMAGNETIC LAUNCHERS USING COLOSSAL
MAGNETORESISTANCE SENSORS

Summary of Doctoral Dissertation

Physical Sciences, Physics (02P), Condensed Matter: electronic structure;
electrical, magnetic and optical properties; superconductors; magnetic
resonance; relaxation; spectroscopy (P260)

ELEKTROMAGNETINIŲ PROCESŲ TYRIMAS ELEKTROMAGNETINĖSE
SVAIDYKLĖSE NAUDOJANT MILŽINIŠKOS MAGNETOVARŽOS JUTIKLIUS

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, Fizika (02P), Kondensuotos medžiagos: elektroninė struktūra,
elektrinės, magnetinės ir optinės savybės, superlaidininkai, magnetinis
rezonansas, relaksacija, spektroskopija (P260)

2011 04 26. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius