



Piotras CIMPERMAN

**PLONŲJŲ MANGANITŲ SLUOKSNIŲ
TYRIMAS STIPRIUOSE IMPULSINIUOSE
ELEKTRINIUOSE IR MAGNETINIUOSE
LAUKUOSE**

Daktaro disertacijos santrauka

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

1298



**LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2006**

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Piotras CIMPERMAN

PLONŲJŲ MANGANITŲ SLUOKSNIŲ TYRIMAS
STIPRIUOSE IMPULSINIUOSE ELEKTRINIUOSE
IR MAGNETINIUOSE LAUKUOSE

Daktaro disertacijos santrauka

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



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2006

Disertacija rengta 2001–2005 metais Puslaidininkų fizikos institute.

Mokslinė vadovė

dr. Nerija ŽURAUSKIENĖ (Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Konsultantas

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

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

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

Nariai:

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

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

prof. habil. dr. Algirdas AUDZIJONIS (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P),

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

Oponentai:

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

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

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2006 m. rugsėjo 20 d. 10 val. Puslaidininkų fizikos instituto posėdžių salėje.

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

Tel.: +370 5 261 9759, +370 5 261 7546; faksas +370 5 262 7123;

el. paštas: spiadm@pfi.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2006 m. rugpjūčio 18 d.

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

VG TU leidyklos „Technika“ 1298 mokslo literatūros knyga.

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY
SEMICONDUCTOR PHYSICS INSTITUTE

Piotras CIMPERMAN

INVESTIGATION OF THIN MANGANITE FILMS
AT STRONG PULSED ELECTRIC AND MAGNETIC
FIELDS

Summary of Doctoral Dissertation

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



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2006

Doctoral dissertation was prepared at the Semiconductor Physics Institute (Vilnius, Lithuania) in 2001–2005

Scientific Supervisor

Dr Nerija ŽURAUSKIENĖ (Semiconductor Physics Institute, Physical Sciences, Physics – 02P)

Consultant

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

Members:

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

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

Prof Dr Habil Algirdas AUDZIJonis (Vilnius Pedagogical University, Physical Sciences, Physics – 02P)

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

Opponents:

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

Prof Dr Habil Sigitas TAMULEVIČIUS (Kaunas University of Technology, 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 September 20, 2006.

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

Phone: +370 5 261 9759, +370 5 261 7546; fax: +370 5 262 7123;

E-mail: spiadm@pfi.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 18 August, 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

Retųjų žemių mangano oksidai (manganitai) – tai medžiagos, pasižyminčios milžiniška magnetovarža (*MR*), kuri pasireiškia magnetiniame lauke. Šis reiškinys panaudojamas, kuriant įvairius šiuolaikinės sukinių elektronikos prietaisus, pavyzdžiui, magnetinės atminties elementus arba silpno magnetinio lauko jutiklius. Taikymams elektromagnetinėse svaityklėse, magnetokumuliacinių generatorių bei magnetinių pagalvių generatorių optimizavimui reikia jutiklių, galinčių matuoti pakankamai stiprius (iki 20–50 T) impulsinius magnetinius laukus, iš anksto nežinant jų krypties. Šie jutikliai turi būti maži, greitaveikiai, o jų jautrumas magnetiniam laukui neturi priklausyti nuo magnetinio lauko krypties. Toks jutiklis gali būti sukurtas, panaudojant *MR* reiškinį manganitų plonuosiuose sluoksniuose. Tiriant manganitų savybes, buvo pastebėta, kad ne tik stiprus magnetinis laukas, bet ir stiprus elektrinis laukas gali keliasdešimt kartų padidinti manganitų laidumą. Pastarasis reiškinys, analogiškai magnetovaržai, buvo pavadintas elektrovarža (*ER*). Šis reiškinys mokslinėje literatūroje yra įvairiai aiškinamas, tačiau *ER* reiškinio prigimtis iki šiol nėra iki galo suprata. Tai apsunkina elektrovaržos reiškinio panaudojimą praktiniuose taikymuose, pavyzdžiui, apsaugos prietaisuose nuo sparčių elektromagnetinio lauko impulsų.

Manganitų sluoksniai gana nesunkiai užauginami pramoniniu būdu, o iš jų pagaminti prietaisai yra pigūs, gali veikti kambario temperatūroje ir yra greitaveikiai. Siekiant iš manganitų sluoksnių sukurti magnetinio lauko jutiklius bei saugiklius, būtina atlikti fundamentinius tyrimus, kurie atskleistų elektrovaržos reiškinio prigimtį bei milžiniškos magnetovaržos reiškinio ypatumus šiose medžiagose.

Darbo tikslai

Šio darbo tikslas buvo ištirti plonųjų La-Ca(Sr)-MnO sluoksnių laidumo kitimo, paveikus juos stipriais impulsiniais elektriniais ir magnetiniais laukais, dėsninumus ir panaudoti juos, kuriant stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklius bei sparčiuosius apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisus:

- ištirti elektrovaržos reiškinį epitaksiniuose ir polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose, paveikus juos nanosekundžių trukmės elektrinio lauko impulsais plačiame temperatūrų ruože ir nustatyti šio reiškinio prigimtį;

- ištirti magnetovaržos reiškinių ypatumus epitaksiniuose ir polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose stipriame magnetiniame lauke;
- išaiškinti galimybes, panaudojant šiuos sluoksnius, sukurti stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklį, matuojantį absoliutinę magnetinės indukcijos vertę iki 50 T, bei spartųjį apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisą.

Mokslinis naujumas

- Pirmą kartą epitaksiniuose ir polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose sistemingai ištirtas elektrovaržos reiškinys, paveikus juos nanosekundžių trukmės elektrinio lauko impulsais, ir nustatyta šio reiškinio prigimtis: *ER* atsiranda dėl stipraus elektrinio lauko efektų tarpkristalitinėse srityse. Nustatyti šioms medžiagoms būdingi elektrinio lauko efektai: sluoksniuose, užaugintuose ant polikoro ir safyro, vyrauja neelastinis tuneliavimas per lokalizuotas būsenas, tuo tarpu sluoksniuose ant MgO, priklausomai nuo temperatūros, vyrauja efektai, susiję su erdvinio krūvio ribotomis srovėmis arba tarpelektronine sąveika silpnai netvarkiose medžiagose.
- Nustatyta nehomogeninė dviejų fazių struktūra ultraplONUose epitaksiniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose, kuri nulemia varžos maksimumo temperatūros T_m poslinkį į žemesnes temperatūras bei varžos didėjimą, mažėjant sluoksnio storiui.
- Magnetovarža, išmatuota epitaksiniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ bei $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose iki 50 T magnetiniame lauke, ir jos ypatumai paaiškinti, remiantis modifikuotu Mott'o šuolinio laidumo modeliu tiek feromagnetinėje, tiek ir paramagnetinėje fazėse. Taip pat remiantis šiuo modeliu nustatytas poliarono sukinys ultraplONUose epitaksiniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose bei polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose.
- Nustatyta magnetovaržos anizotropijos priežastis $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose kambario temperatūroje: polikristaliniuose sluoksniuose ji nulemta iš dalies tekstūruotos sluoksnio struktūros, tuo tarpu epitaksinių sluoksnių anizotropiją šioje temperatūroje lemia kampo tarp įmagnetėjimo ir srovės krypties kitimas (AMR efektas) bei demagnetizacijos lauko anizotropija (formos efektas).

- Sukurtas stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklis, veikiantis kambario temperatūroje ir matuojantis absoliutinę magnetinio lauko indukcijos vertę.
- Pasiūlytas spartus apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisas, veikiantis skystojo azoto temperatūroje.

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai

- Patobulinti impulsinio magnetinio lauko generatorių, siekiant sukurti iki 50 T amplitudės ir 0,5–2 ms trukmės magnetinio lauko impulsus manganitų magnetovaržos matavimams.
- Ištirti technologinių sąlygų bei naudojamų padėklų įtaką $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnių elektriniam laidumui.
- Išmatuoti epitaksinių ir polikristalinių $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnių elektrovaržą temperatūrų ruože 4,2–300 K, naudojant 5–30 ns trukmės elektrinius impulsus.
- Atlikti stipraus elektrinio lauko efektų tarpkristalitinėse srityse analizę ir išaiškinti dominuojančius krūvio pernašos mechanizmus.
- Remiantis gautų rezultatų analize, pasiūlyti hibridinį „superlaidininkas-manganitas“ saugiklį.
- Išmatuoti $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnių magnetovaržą temperatūrų ruože 80–300 K, naudojant 0,6–2 ms trukmės ir iki 50 T amplitudės magnetinio lauko impulsus.
- Išanalizuoti magnetovaržos ypatumus epitaksiniuose ir polikristaliniuose La-Ca(Sr)-MnO sluoksniuose, naudojant mokslinėje literatūroje pateiktus modelius.
- Sukurti magnetinio lauko jutiklį, matuojantį magnetinio lauko pokyčius elektromagnetinės svaidyklės veikimo metu.

Praktinė vertė

Panaudojus plonuosius polikristalinius $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnius, sukurtas stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklis, veikiantis kambario temperatūroje ir matuojantis absoliutinę magnetinio lauko indukcijos vertę, bei pasiūlytas spartus apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisas, veikiantis skystojo azoto temperatūroje.

Rezultatų aprobavimas

Pagrindiniai tyrimų rezultatai buvo paskelbti 1-ame ir 2-ame Europos didelės galios impulsų simpoziumuose (Saint-Louis, Prancūzija, 2002 ir

Hamburg, Vokietija, 2004), tarptautinėje vasaros mokykloje „Funkcinė keramika“ (Tallberg, Švedija, 2002), 31-oje ir 33-oje tarptautinėse puslaidininkinių junginių mokyklose (Jaszowiec, Lenkija, 2002 ir 2004), 5-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje (Vilnius, 2002), 14-oje IEEE tarptautinėje didelės galios impulsų konferencijoje (Dallas, JAV, 2003), E-MRS rudens konferencijoje (Warszawa, Lenkija, 2003), 12-ame ultrasparčiųjų procesų puslaidininkiuose simpoziume (Vilnius, 2004), 13-oje tarptautinėje plonųjų sluoksnių konferencijoje ICTF13/ACSIN8 (Stokholm, Švedija, 2005), 1-oje tarptautinėje konferencijoje „Mechatroninės sistemos ir medžiagos“ (Vilnius, 2005).

Ginamieji teiginiai

1. Elektrovaržos reiškinys plonuose La-Ca(Sr)-MnO sluoksniuose, paveikus juos nanosekundinės trukmės elektrinio lauko impulsais, nulemtas stipraus elektrinio lauko efektų tarpkristaliniuose srityse. Priklausomai nuo temperatūros bei sluoksnių gamybos technologijos gali vyrauti tokie efektai:
 - sluoksniuose, užaugintuose ant polikoro ir safyro padėklų, neelastinis tuneliavimas per lokalizuotas būsenas,
 - sluoksniuose, užaugintuose ant MgO padėklo, erdvinio krūvio ribotos srovės arba tarpelektroninė sąveika silpnai netvarkiose medžiagose.
2. Pagrindiniai neigiamos magnetovaržos ypatumai plonuose epitaksinčiuose ir polikristaliniuose La-Ca(Sr)-MnO sluoksniuose gali būti paaiškinti, remiantis modifikuotu Mott'o šuolinio laidumo modeliu tiek feromagnetinėje, tiek ir paramagnetinėje fazėse. Poliarono sukinio J , nustatyto remiantis šiuo modeliu, sumažėjimas polikristaliniuose ir ultraplonuose epitaksinčiuose sluoksniuose yra susijęs su medžiagos struktūrinės tvarkos didėjimu.
3. Magnetovaržos anizotropija polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose kambario temperatūroje yra nulemta iš dalies tekstūruotos sluoksnio struktūros ir yra žymiai silpnesnė, palyginus su epitaksiniais sluoksniais, kuriuose anizotropiją šioje temperatūroje lemia kampo tarp įmagnetėjimo ir srovės krypties kitimas (AMR efektas) bei demagnetizacijos lauko anizotropija (formos efektas).
4. Panaudojant plonuosius polikristalinius $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnius, gali būti sukurtas stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklis, veikiantis kambario temperatūroje ir matuojantis absoliutinę magnetinio lauko indukcijos vertę, bei

spartus apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisas, veikiantis skystojo azoto temperatūroje.

Disertacijos sandara

Disertaciją (anglų k.) sudaro įvadas, 6 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, spresti uždaviniai, mokslinis naujumas ir ginamieji teiginiai.

1 skyriuje apžvelgiamos manganitų bendrosios savybės. Pateikiama išsami analizė darbų, kuriuose nagrinėjamas elektrinės varžos pokytis elektriniame lauke – elektrovarža. Daugelis tyrėjų elektrinį laidumą dėl krūvio pernašos per tarpkristalines ribas analizuoja, naudodami empirinę formulę:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 V^\alpha, \quad (1)$$

kur σ – elektrinis laidumas, V – įtampa, σ_0 , σ_1 ir α – derinimo parametrai. Parametras α nusako vyraujantį krūvio pernašos mechanizmą.

Taip pat aprašomi literatūroje pateikti modeliai, skirti magnetovaržai (MR) paaiškinti. Vienas iš jų yra Wagner'io pasiūlytas modifikuotas Mott'o šuolinio laidumo modelis. Šis modelis numato tokias MR priklausomybes nuo magnetinio lauko B :

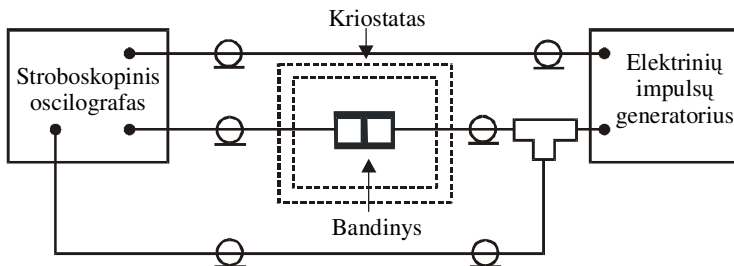
$$\begin{aligned} MR &\propto B(g\mu_B JB / k_B T), & T < T_C; \\ MR &\propto B^2(g\mu_B JB / k_B T), & T > T_C \end{aligned} \quad (2)$$

čia B (...) – Brillouin'o funkcija, g – giromagnetinė konstanta, μ_B – Bohr'o magnetonas, J – vidutinis poliarono sukiny, k_B – Boltzman'o konstanta.

2 skyriuje pateikiama bandinių gamybos technologija. Aprašomi lazerinio garinimo būdas, kuriuo buvo užauginti $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ (LCMO) sluoksniai, ir metalo organinių junginių cheminio nusodinimo iš garų fazės metodas, kuriuo buvo užauginti $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ (LSMO) sluoksniai. Pateikiamos auginimo sąlygos. Taip pat aprašoma ominių sidabro kontaktų gamybos technologija. Siekiant bandinyje sukurti stiprų elektrinį lauką, atstumas tarp kontaktinių aikštelių buvo 50 μm .

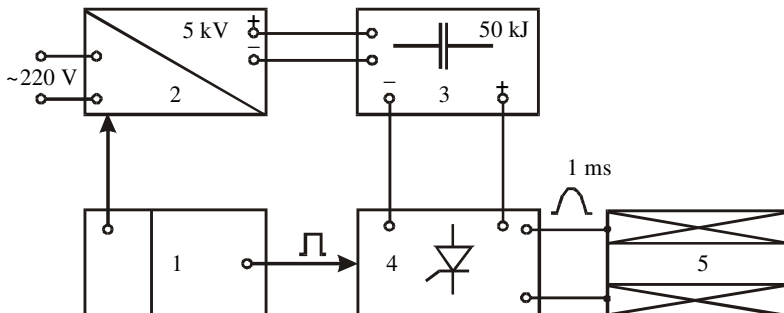
3 skyriuje aprašoma sluoksnių varžos matavimo impulsiniuose elektriniuose ir magnetiniuose laukuose metodika.

1 paveiksle pateikta matavimo trumpais nanosekundinės trukmės impulsais stendo schema. Bandinys buvo jungiamas nuosekliai į 50 Ω banginės varžos aukšto dažnio liniją. Elektriniai impulsai, kurių trukmė 5–30 ns ir amplitudė iki 1 kV, buvo generuojami gyvsidabrio relės generatoriumi. Elektriniai impulsai buvo stebimi stroboskopiniu oscilografu. Bandinių varža ir įtampos kritimas buvo paskaičiuojami iš kritusio ir praėjusio impulsų amplitudžių. Matavimai buvo atliekami 4,2–300 K temperatūrų ruože.



1 pav. Matavimo trumpais nanosekundinės trukmės elektriniais impulsais schema

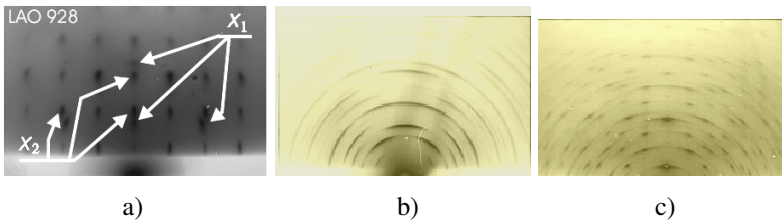
Matuojant varžos pokytį magnetiniame lauke, stiprūs (iki 50 T) impulsiniai magnetiniai laukai buvo kuriami įranga, kurios blokinė schema pateikta 2 paveiksle. 0,6–2 ms trukmės magnetinio lauko impulsai buvo sukuriami, iškraunant talpos bateriją (3) per induktyvinę ritę (5) tiristorinio bloko (4) pagalba ((1) yra valdymo blokas, (2) – talpos baterijos įkrovimo įrenginys). Bandinys buvo talpinamas ritės viduje, kur magnetinis laukas yra homogeninis. Magnetinio lauko indukcija buvo matuojama kilpiniais matuokliais.



2 pav. Impulsinių magnetinių laukų generavimo įrangos schema

4 skyriuje pateiktas bandinių struktūros charakterizavimas ir elektrinės bei magnetinės savybės silpnuose elektriniuose ir magnetiniuose laukuose [$4^*, 6^*, 10^*$].

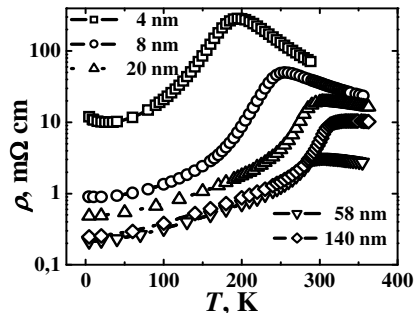
4.1–4.3 poskyriuose charakterizuojama LSMO ir LCMO sluoksnių kristalinė struktūra ir paviršiaus morfologija. Iš elektronografijos ir rentgenografijos tyrimų nustatyta, kad manganito sluoksniai ant NdGaO_3 (NGO), LaAlO_3 (LAO) ir SrTiO_3 (STO) padėklų yra epitaksiniai (3 pav., a), o ant Al_2O_3 , MgO ir polikoro padėklų – polikristaliniai arba tekstūruoti (3 pav., b, c). Buvo nustatyta, kad epitaksiniai LSMO sluoksniai sudaryti iš dviejų struktūrinių fazių. Viena iš jų turi manganitams būdingą pseudokubinę gardelę su parametru $3,8 \text{ \AA}$ (X2 fazė), o kita yra ortorombinės simetrijos su gardelės parametrais $a = b = 4,06 \text{ \AA}$ ir $c \cong 4,6 \text{ \AA}$ (X1 fazė). Refleksai nuo X1 fazės turi išplitusią formą, o tai rodo struktūros netobulumą. LSMO polikristaliniai sluoksniai turi statmeną sluoksnio paviršiui tekstūrą [111]. Ši tekstūra yra labiau išreikšta LSMO sluoksnyje ant safyro padėklo (3 pav., c).



3 pav. LSMO sluoksnių ant LAO (a), polikoro (b) ir safyro (c) elektronogramos

4.4 poskyryje pateikiamos epitaksinių sluoksnių elektrinės savybės silpname elektriniame lauke bei magnetinės savybės. Taip pat pateikiami modeliai, aprašantys savitosios varžos ρ ir jos maksimumo temperatūros T_m priklausomybes nuo storio ir spontaninio įmagnetėjimo priklausomybę nuo temperatūros.

4 paveiksle pateiktos skirtingo storio $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių savitosios varžos priklausomybės nuo temperatūros. Matome, kad mažėjant sluoksnio storiui, T_m ženkliai pasislenka į žemų temperatūrų pusę (nuo 330 iki 180 K), o ultraplonų sluoksnių ρ padidėja iki 200 kartų. Toks sluoksnio parametrų kitimas nuo storio mokslinėje literatūroje yra



4 pav. LSMO sluoksnio, užauginto ant (001) NGO padėklo, ρ priklausomybė nuo T

aiškinamas įvairiai. Pagrindine priežastimi yra laikomi įtempimai, atsirandantys, augant sluoksniui, kai nesutampa sluoksnio ir padėklo gardelių konstantos. Tačiau įvertinus, kiek galėtų pakisti sluoksnio savitoji varža, jei sluoksnis būtų paveiktas vienašiu tempimu arba suspaudimu, kurio dydis lygus įtempimui, atsirandančiam dėl sluoksnio ir padėklo gardelių nesutapimo, nustatyta, kad šis pokytis yra nežymus. Todėl buvo padaryta išvada, kad tiesioginiai mechaniniai įtempimai neturi lemiamos įtakos manganito plonųjų sluoksnių laidumui ir T_m priklausomybei nuo sluoksnio storio. Analizuojant skirtingo storio $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių elektronogramas, buvo nustatyta, kaip kinta X1 ir X2 fazių koncentracijos, atitinkamai c_1 ir c_2 , sluoksnio storyje. Ši priklausomybė storių ruože nuo 4 iki 140 nm gerai aprašoma tokia funkcija:

$$c_2 = 1/\{1 + \exp[-k(d - d_0)/a]\}, \quad (3)$$

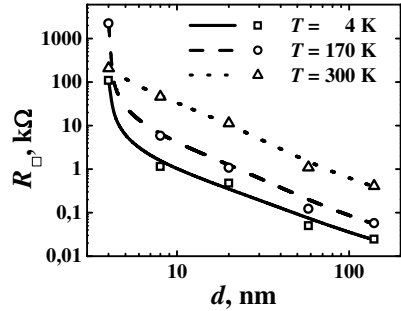
čia d_0 – sluoksnio storis, kai abiejų fazių koncentracijos sutampa ($c_1(d_0) = c_2(d_0) = 0,5$), a – gardelės konstanta, o k – parametras, charakterizuojantis gamybos sąlygas: didelės k vertės atitinka staigiai atsiskiriančias fazes, o mažos k vertės rodo, kad fazės yra persimaišiusios net storuose sluoksniuose. Kadangi ultraplonų sluoksnių, kuriuose dominuoja X1 fazė, $\rho(T)$ priklausomybė yra kitokia, negu storų sluoksnių, kuriuose dominuoja X2 fazė, todėl buvo padaryta prielaida, kad X1 ir X2 fazės yra skirtingų elektrinių laidumų. Naudojant šią prielaidą, buvo atliktas $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ plonųjų sluoksnių elektrinių savybių priklausomybės nuo sluoksnio storio modeliavimas. Apibrėšim savitąją paviršinę sluoksnio varžą (SPSV):

$$R_{\square} = R \frac{w}{l}, \quad (4)$$

kuri yra naudojama plonųjų sluoksnių elektrinių savybių apibūdinimui, kai sluoksnio paviršiaus nelygumai palyginami su sluoksnio storiu, arba, kai ρ kinta, kintant storiui. Čia R – sluoksnio varža, w – kontaktų plotis, l – atstumas tarp kontaktų.

Modeliuojant visas sluoksnius tariamai suskaidomas į $n+1$ sluoksnių. Vienas – viršutinis – sluoksnis parenkamas tokio storio, kad įskaitytų tikrojo sluoksnio paviršiaus nelygumus. Šio sluoksnio SPSV'ai priskyrėme 4 nm sluoksnio SPSV'ą. Kiti n sluoksniai yra vienodų geometrinių matmenų stačiakampiai ir tokio storio, jog galima daryti prielaidą, kad abiejų fazių koncentracijų santykis nekinta. Kiekvieno n -tojo menamo sluoksnio SPSV buvo skaičiuojama, naudojant du populiariausius kelių fazių medžiagų savybių skaičiavimų metodus: efektyvaus mediumo artėjimą (EMA) ir perkoliacijų

teoriją. Viso sluoksnio SPSV yra skaičiuojama, tariant, kad menamų sluoksnių elektrinis jungimas yra lygiagretus. Palyginus modeliavimo rezultatus su eksperimentiškai nustatytomis SPSV vertėmis, nustatyta, kad abu modeliai gerai aprašo $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių SPSV priklausomybes nuo sluoksnio storio įvairiose temperatūrose. Tačiau naudojant perkoliacijų teorijos modelį gaunamas geresnis sutapimas su eksperimentinėmis SPSV vertėmis (5 paveikslas). Šis rezultatas paaiškinamas tuo, kad perkoliacijų teorijos modelyje pasirinkta perkoliacijos slenksčio vertė ($p_c = 0,593$) geriau atitinka nagrinėjamą sistemą, negu EMA modelyje, kuriame $p_c = 0,5$ ir negali būti laisvai pasirinktas.



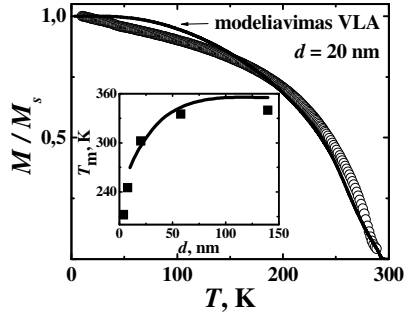
5 pav. SPSV priklausomybė nuo sluoksnio storio. Taškai – eksperimentas, kreivės – perkoliacijų modelis

Magnetinių savybių priklausomybė nuo sluoksnio storio ir temperatūros irgi gali būti paaiškinta dviejų fazių mišinio modeliu. Skaičiuojant įmagnetėjimo priklausomybę nuo temperatūros, buvo padaryta prielaida, jog X1 ir X2 fazės turi skirtingas feromagnetines savybes. Tada kiekviena kristalografinė plokštuma yra abiejų feromagnetinių fazių su skirtingais fazių svoriais ir skirtingais įmagnetėjimais mišinys. Jei pasirenkama paprasta kubinė gardelė, X1 ir X2 fazės sukinių i -toje plokštumoje magnetiniai momentai $M_{1i} = g\mu_B \langle s_{1i} \rangle$ ir $M_{2i} = g\mu_B \langle s_{2i} \rangle$ vidutinio lauko artinyje (VLA) gali būti nustatyti iš tokių lygčių:

$$\begin{aligned} \langle s_{1i} \rangle &= s_1 B \{ s_1 [J_{11} c_1 (4 \langle s_{1i} \rangle + \langle s_{1i+1} \rangle + \langle s_{1i-1} \rangle) \\ &\quad + J_{12} c_2 (4 \langle s_{2i} \rangle + \langle s_{2i+1} \rangle + \langle s_{2i-1} \rangle) + g\mu_B H] / k_B T \} \\ \langle s_{2i} \rangle &= s_2 B \{ s_2 [J_{21} c_1 (4 \langle s_{1i} \rangle + \langle s_{1i+1} \rangle + \langle s_{1i-1} \rangle) \\ &\quad + J_{22} c_2 (4 \langle s_{2i} \rangle + \langle s_{2i+1} \rangle + \langle s_{2i-1} \rangle) + g\mu_B H] / k_B T \}. \end{aligned} \quad (5)$$

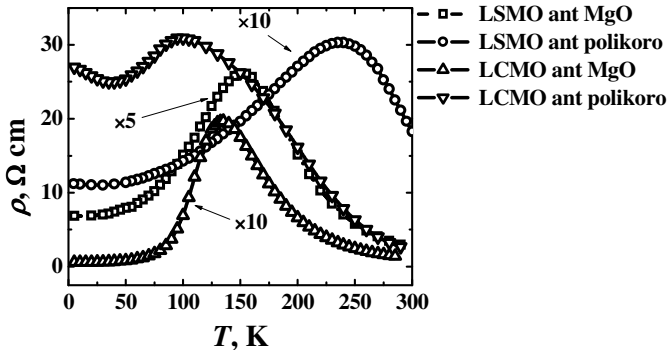
Čia s_1 ir s_2 – abiejų fazių sukinio momentai, $s_1 = s_2 = s(\text{Mn}^{3+}) = 2$, $\langle s_{1i} \rangle$ ir $\langle s_{2i} \rangle$ – jų terminiai vidurkiai i -toje plokštumoje, J_{11} , J_{22} ir $J_{12} = J_{21}$ – pamaininės kilmės sąveikos tarp atitinkamai X1 fazės sukinių, X2 fazės sukinių ir tarp skirtingų fazių sukinių. Iš (5) formulių matyti, kad i -tosios plokštumos įmagnetėjimas $M_i = M_{1i} + M_{2i}$ priklauso nuo kaimyninių plokštumų įmagnetėjimo. Norėdami gauti pilną įmagnetėjimą, sprendžiame (5) lygčių sistemą plonajam sluoksniui, kurio storis $d = Na = d_0 - (a/k) \ln[(1 - c_2)/c_2]$, o N yra kristalografinių plokštumų skaičius.

Eksperimentinės ir modeliavimo $M(T)$ kreivės palyginamos 6 paveiksle. Neblogas jų sutapimas $d = 20$ nm storio sluoksniui gaunamas, kai $J_{11}/J_{22} = 0,4$, $J_{12}/J_{22} = 0,8$, $k = 0,05$ ir $d_0 = 9,65$ nm. Įterptame paveiksle pavaizduota eksperimentinė $T_m(d)$ priklausomybė (taškai). Ji lyginama su modeliavimo rezultatais (kreivė), kurie buvo gauti tariant, kad J_{ii} parametrai, gauti 20 nm storio sluoksniui, tinka ir kito storio sluoksniams, o fazinio virsmo iš paramagnetinės į feromagnetinę būseną temperatūra T_C sutampa su varžos maksimumo temperatūra T_m .



6 pav. 20 nm LSMO sluoksniui ant NGO padėklo liekamojo įmagnetėjimo temperatūrinė priklausomybė. Įtarpe: T_m priklausomybė nuo sluoksnių storio

Polikristalinių sluoksnių savitoji varža yra keliomis eilėmis didesnė negu epitaksinių. Tai yra nulemta didelės tarpkristalinių sričių, kuriose pažeista kristalinė tvarka, varžos. 7 paveiksle parodytos polikristalinių sluoksnių, užaugintų ant polikoro ir MgO padėklų, savitosios varžos priklausomybės nuo temperatūros. Polikristalinių sluoksnių varžos maksimumo temperatūra T_m yra žemesnė negu atitinkamos cheminės sudėties storų (140 nm storio) epitaksinių sluoksnių. Be to, iš liekamojo įmagnetėjimo priklausomybės nuo temperatūros nustatyta, kad polikristalinių sluoksnių fazinio virsmo temperatūra T_C yra keliasdešimt laipsnių aukštesnė negu T_m .



7 pav. LS(C)MO sluoksnių, išaugintų ant įvairių padėklų, savitosios varžos priklausomybės nuo temperatūros

5 skyriuje pateikiami manganitų epitaksinių ir polikristalinių sluoksnių elektrovaržos tyrimo rezultatai [1*,3*,4*,6*,8*]. Elektrovarža yra apibrėžta taip:

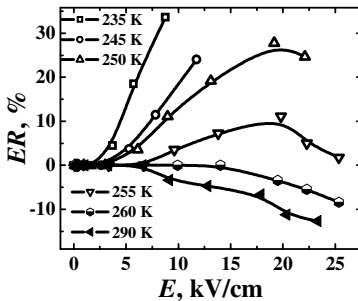
$$ER = \frac{R(E) - R(0)}{R(0)}, \quad (6)$$

čia $R(E)$ – bandinio varža stipriame elektriniame lauke, o $R(0)$ – silpname, nesiekiančiame 0,5 kV/cm impulsiniame elektriniame lauke. Buvo nustatyta, kad $R(0)$ sutampa su varža, gauta, matuojant pastoviam elektriniame lauke.

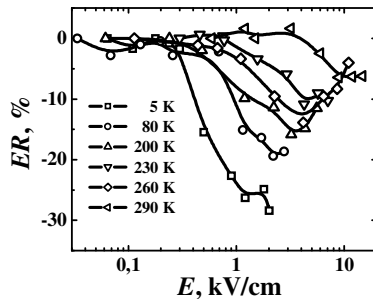
5.1 poskyryje pateikti ER efekto tyrimo rezultatai LCMO ir LSMO epitaksiniuose sluoksniuose. Ištyrus epitaksinių $\text{La}_{0,66}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnių, užaugintų ant NGO (110) padėklo, varžos priklausomybę nuo elektrinio lauko, buvo nustatyta, kad sluoksnio varža kinta palyginti nežymiai. Teigiama ir neigiama ER , gauta atitinkamai žemiau ir virš $T_m = 260$ K (8 pav.), rodo, kad šis kitimas atsiranda dėl Joule'io kaitimo: žemiau fazinio virsmo temperatūros elektrinis laukas didina sluoksnio varžą, o aukščiau – mažina, o tai atitinka temperatūros padidėjimą. Tariant, kad trumpo elektrinio impulso metu procesas yra adiabatinis ir varžos priklausomybė nuo temperatūros yra tiesinė, buvo įvertintas bandinio temperatūros pokytis, naudojant formulę:

$$\Delta T = \frac{V^2 t}{R_{\text{vid}} c_p m}, \quad (7)$$

čia V – įtampa, t – laikas, per kurį bandiniu tekėjo srovė, c ir m – savitoji sluoksnio talpa ir masė, o R_{vid} – vidutinė bandinio varža. Bandinio temperatūros pokytis, paskaičiuotas pagal (7) formulę ir įvertintas atlikus eksperimentą,



8 pav. LCMO epitaksinio 140 nm storio sluoksnio elektrovaržos priklausomybė nuo elektrinio lauko



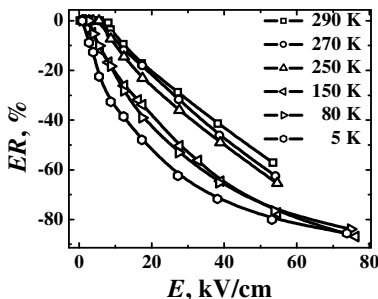
9 pav. LSMO epitaksinio 20 nm storio sluoksnio elektrovaržos priklausomybė nuo elektrinio lauko

paklaidų ribose sutapo. Ištyrus stipraus elektrinio lauko poveikį epitaksiniams 8 nm ir 140 nm storio $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniams, buvo taip pat pastebėtas silpnas jų varžos kitimas, kurį lemia Joule'io kaitimas. Tuo tarpu 20 nm storio bandiniai rodė žymų varžos sumažėjimą elektriniame lauke, kai $T < T_m$ (9 pav.). *ER* šiuo atveju siekė apie -33% . 20 nm storio LSMO sluoksniai ypatingi tuo, jog jiems augant, susiformavo dvi skirtingo laidumo fazės, kurių koncentracija šio storio sluoksniuose yra palyginama. Šių sluoksnių savitosios varžos ρ priklausomybė nuo įtamos V gerai aprašoma formule:

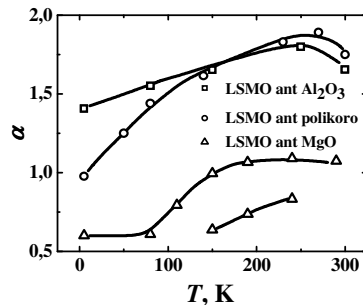
$$\rho = \rho_\infty + \frac{1}{\sigma_0 + \sigma_2 V^{4/3} + \sigma_3 V^{5/2}}, \quad (8)$$

čia ρ_∞ – didesnio laidumo fazės savitoji varža, o antrasis dešinėsios pusės narys, kur $\sigma_0, \sigma_2, \sigma_3$ – konstantos, aprašo neelastinį tuneliavimą per lokalizuotas būsenas. Iš gautų *ER* tyrimo rezultatų buvo padaryta išvada, kad epitaksinioose manganitų sluoksniuose elektroninės prigimties *ER* stebima tik tuo atveju, jei sluoksniai struktūriškai nevienalyčiai.

Ypatingai struktūriškai nevienalyčiai yra polikristaliniai sluoksniai, užauginti ant polikristalinių padėklų arba padėklų, kurių gardelės konstantos labai skiriasi nuo sluoksnio gardelės parametrų. Tokie sluoksniai, turintys savyje didelį skaičių tarpkristalinių sričių, pasižymėjo stipriu elektrinio laidumo didėjimu, augant stipraus elektrinio lauko vertei (10 pav.). Neigiama *ER* yra stebima visame matuotų temperatūrų ruože, tiek žemiau T_m , tiek aukščiau šios temperatūros. Maksimali neigiama *ER* vertė (-93%) buvo stebėta LCMO sluoksniuose ant polikoro padėklo, esant 5 K temperatūrai. Laidumo priklausomybė nuo elektrinio lauko buvo analizuojama, naudojant (1) formulę.

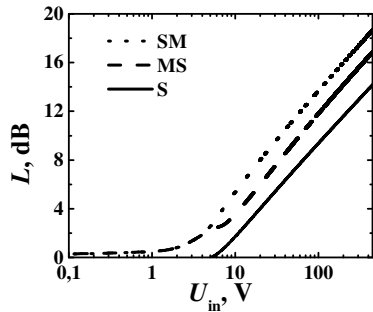


10 pav. LSMO polikristalinio sluoksnio ant safyro padėklo elektrovaržos priklausomybė nuo elektrinio lauko



11 pav. Parametro α temperatūrinės priklausomybės

Iš šios analizės buvo gautos parametro α priklausomybės nuo temperatūros polikristaliniams sluoksniams ant įvairių padėklų (11 pav.). Atsižvelgiant į literatūroje atitinkamoms α vertėms priskiriamus krūvio pernašos mechanizmus, buvo padaryta išvada, kad polikristaliniuose sluoksniuose ant polikoro ir safyro padėklų *ER* efektas gali būti dėl neelastinio tuneliavimo per lokalizuotas būsenas tarpkristalitinėse srityse ($\alpha = 1,3-2,5$). Sluoksniuose ant MgO padėklo žemose temperatūrose *ER* efektas gali būti dėl tarpelektroninės sąveikos silpnai netvarkiose medžiagose ($\alpha = 0,5$), o aukštose – dėl erdvinio krūvio ribotų srovių ($\alpha = 1$).



12 pav. Hibridinio ir superlaidaus saugiklių silpninimo charakteristikos

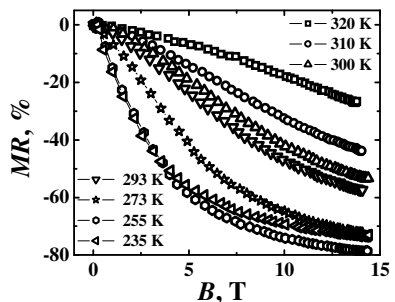
Iš minėtų rezultatų buvo padaryta išvada, jog elektroninės prigimties elektrovaržos reiškinyms manganituose egzistuoja tik struktūriškai nehomogeniškuose sluoksniuose.

Remiantis atliktu *ER* tyrimu buvo pasiūlytas hibridinis „superlaidininkas – magnetikas“ saugiklis nuo didelės galios elektromagnetinių impulsų, veikiantis skystojo azoto temperatūroje. 12 paveiksle palygintos silpninimo (*L*) charakteristikos šių saugiklių: superlaidaus saugiklio (S) bei hibridinio, kai polikristalinis manganito sluoksnis jungiamas lygiagrečiai į liniją prieš superlaidininką (MS) arba po jo (SM). Matome, kad hibridinis saugiklis pasižymi didesniu slopinimo koeficientu ir žemesne slenkstine įtampa (2 V). Todėl toks saugiklis gali apsaugoti šiuolaikinius žemos įtampos elektronikos prietaisus.

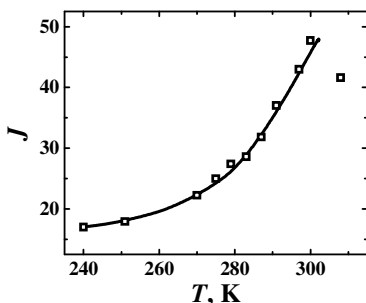
6 skyriuje aprašomas manganitų sluoksnių magnetovaržos (*MR*) ir jos anizotropijos (*MRA*) tyrimas stipriuose impulsiniuose magnetiniuose laukuose [2^* , 5^* , 7^* , 9^*]. Magnetovarža apibrėžiama taip:

$$MR = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)}, \quad (9)$$

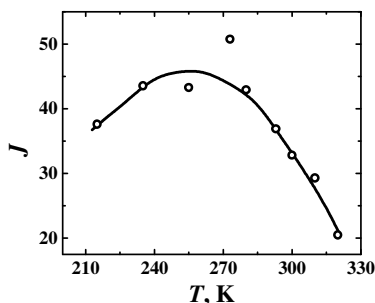
čia $R(B)$ ir $R(0)$, atitinkamai, sluoksnio varža magnetiniame lauke ir be jo.



13 pav. Epitaksinio 8 nm LSMO sluoksnio ant NGO padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko

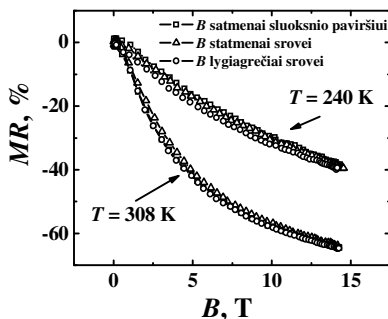


14 pav. Poliarono sukinio temperatūrinė priklausomybė 140 nm LSMO epitaksiniame sluoksnyje



15 pav. Poliarono sukinio temperatūrinė priklausomybė 8 nm LSMO epitaksiniame sluoksnyje

6.1 poskyryje pateikiami LSMO epitaksinių sluoksnių *MR* ir *MRA* stipriuose magnetiniuose laukuose tyrimai. 13 paveiksle parodyta 8 nm LSMO epitaksinio sluoksnio ant NGO padėklo *MR* priklausomybė nuo magnetinio lauko temperatūrų ruože nuo 235 iki 320 K. Maksimali neigiama *MR* 14 T magnetiniame lauke yra -76% ties $T_m = 255$ K. Buvo nustatyta, kad stipriuose magnetiniuose laukuose maksimali neigiama magnetovarža epitaksiniuose sluoksniuose, nepriklausomai nuo storio, yra ties T_m . Temperatūrose žemiau T_m (feromagnetinėje fazėje) magnetiniame lauke nuo 0 iki 2 T magnetovarža stipriai keičiasi (iki -40%), o stipresniuose laukuose stebimas *MR* polinkis į sotį. Temperatūrose aukščiau T_m , kai sluoksnis yra paramagnetinėje fazėje, magnetiniuose laukuose iki 2 T stebimas mažas neigiamos *MR* jautrumas magnetiniam laukui. Magnetovaržos priklausomybės nuo magnetinio lauko buvo analizuojamos naudojant (2) formules. Nustatyta, kad *MR* epitaksiniuose sluoksniuose gerai aprašoma Brillouin'o funkcija, kai $T < T_C$ ir Brillouin'o funkcijos kvadratu, kai $T > T_C$. Iš minėtos analizės buvo nustatytos magnetinio poliarono sukinio temperatūrinės priklausomybės (14–15 pav.). Maksimali poliarono sukinio vertė $J_{\max}$ epitaksiniuose sluoksniuose buvo nustatyta ties T_C . Mažėjant epitaksinio

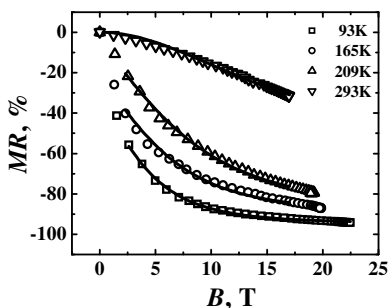


16 pav. Epitaksinio 140 nm LSMO sluoksnio magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko, esant skirtingoms jo konfigūracijoms

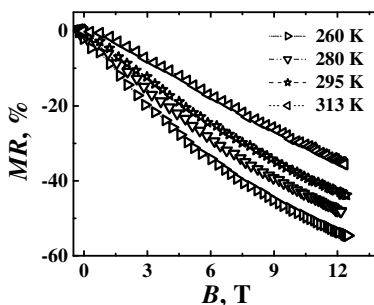
sluoksnio storiui, $J_{\max}$ mažėjo: storuose (140 nm) epitaksiniuose sluoksniuose $J_{\max} = 50$, o 4 nm storio sluoksniuose $J_{\max} = 35$. Reikia pažymėti, kad plonuose sluoksniuose buvo pastebėtas nežymus kristalinių išorientavimas.

Tai pat buvo ištirtos *MR* priklausomybės nuo magnetinio lauko, esant skirtingoms jo kryptims srovės ir sluoksnio paviršiaus atžvilgiu (16 pav.). Didžiausia neigiama *MR* stebima, kai magnetinis laukas nukreiptas išilgai paviršiui ir srovei. Mažiausia neigiama magnetovarža stebima, kai magnetinis laukas statmenas sluoksnio paviršiui ir kartu srovei. Tokia *MR* anizotropija yra būdinga manganitų sluoksniams, esantiems feromagnetinėje fazėje. Šiuo atveju *MRA* yra nulemta AMR efekto, pasireiškiančio dėl kampo tarp įmagnetėjimo ir srovės, ir demagnetizacijos lauko anizotropijos.

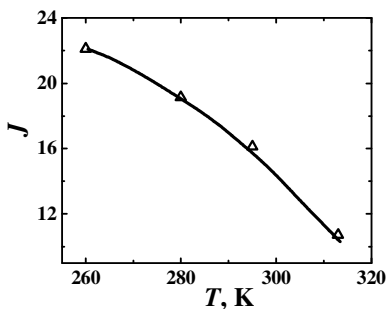
6.2 poskyryje pateikiami polikristalinių $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ sluoksnių *MR* ir *MRA* stipriuose magnetiniuose laukuose tyrimo rezultatai. 17 pav. parodyta polikristalinio LCMO sluoksnio ant polikoro padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko temperatūrų ruože nuo 93 iki 293 K. Matome, kad žemose temperatūrose silpname magnetiniame lauke (iki 2 T) neigiama *MR* stipriai keičiasi (nuo -40 iki -60 %). Toks stiprus *MR* kitimas silpnuose laukuose yra nulemtas kristalinių magnetinių momentų suorientavimu. Stipresniuose laukuose (virš 10 T) stebimas *MR* linkimas į sotį. *MR* buvo detalčiau ištirtinėta temperatūrose, artimose kambario temperatūrai, siekiant nustatyti, kurie sluoksniai yra optimalūs magnetinio lauko jutikliui. 18 paveiksle parodyta polikristalinio LSMO sluoksnio ant polikoro padėklo *MR* priklausomybė nuo magnetinio lauko temperatūrų ruože 260–320 K. Šiame temperatūrų ruože 12 T magnetiniame lauke *MR* kinta nuo -54 iki -35 %. Tirtame magnetinių laukų ruože *MR* polinkio į sotį nepastebėta.



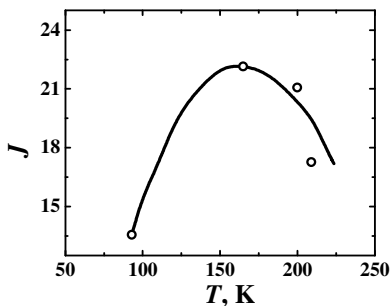
17 pav. Polikristalinio LCMO sluoksnio ant polikoro padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko



18 pav. Polikristalinio LSMO sluoksnio ant polikoro padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko



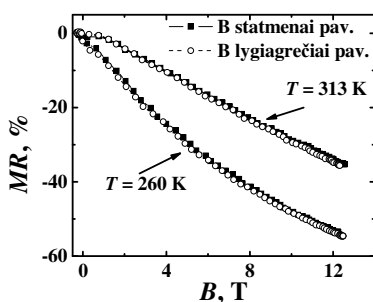
19 pav. Poliarono sukinio temperatūrinė priklausomybė LSMO polikristaliniame sluoksnyje



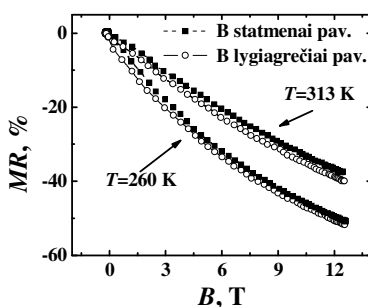
20 pav. Poliarono sukinio temperatūrinė priklausomybė LCMO polikristaliniame sluoksnyje

Šiame darbe pirmą kartą polikristalinių sluoksnių MR aprašyta Wagner'io pasiūlytu modeliu ((2) formulės). Stipriuose magnetiniuose laukuose (virš 2 T) MR polikristaliniuose sluoksniuose gerai aprašoma Brillouin'o funkcija. Kaip ir epitaksinių sluoksnių atveju, buvo nustatytos magnetinio poliarono sukinio temperatūrinės priklausomybės (19–20 pav.). Nustatyta maksimali poliarono sukinio vertė $J_{\max}$ yra maždaug du kartus mažesnė, negu epitaksiniuose sluoksniuose, ir siekia 22. Toks poliarono sukinio sumažėjimas siejamas su struktūriniu tvarku tarpkristalitinėse ribose.

Taip pat buvo ištirta magnetovaržos anizotropija LSMO polikristaliniuose sluoksniuose. LSMO sluoksnių ant polikoro ir safyro padėklų magnetovaržos priklausomybės nuo magnetinio lauko, sukurto statmenai ir lygiagrečiai bandinio paviršiui, pavaizduotos 21 ir 22 paveiksluose. Matome, kad

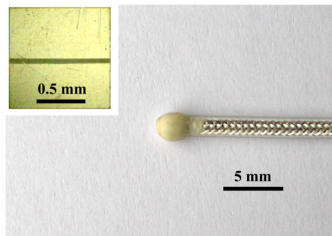


21 pav. LSMO sluoksnių ant polikoro padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko, esant skirtingoms jo konfigūracijoms



22 pav. LSMO sluoksnių ant safyro padėklo magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio lauko, esant skirtingoms jo konfigūracijoms

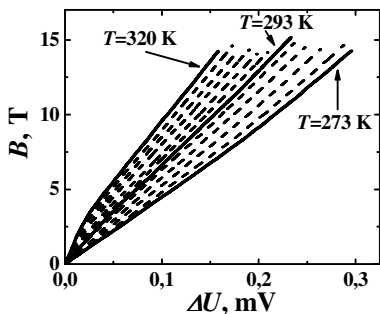
magnetovaržos anizotropija (*MR* skirtumas esant skirtingoms magnetinio lauko kryptims) LSMO sluoksniuose ant polikoro yra mažesnė, negu 0,5 %. Tuo tarpu *MRA* siekia 2 % sluoksniuose ant safyro padėklo. Kadangi tirti polikristaliniai sluoksniai yra paramagnetinėje fazėje kambario temperatūroje, *MRA* negali būti nulemta nei AMR efekto, nei demagnetizacijos anizotropijos, nes spontaninis sluoksnių įmagnetėjimas yra nykstamai mažas. Buvo padaryta išvada, kad polikristalinių sluoksnių *MRA* paramagnetinėje fazėje yra nulemta sluoksnių tekstūros, kuri buvo nustatyta iš elektronografijos tyrimų.



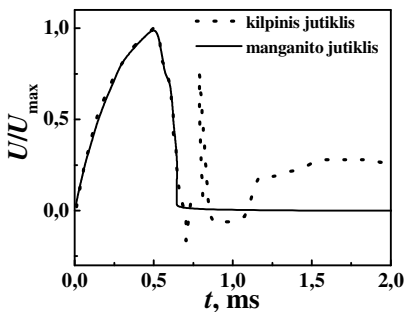
23 pav. Magnetinio lauko jutiklio vaizdas

Remiantis *MR* tyrimų rezultatais, buvo sukurtas magnetinio lauko jutiklis iš polikristalinių manganitų sluoksnių, užaugintų ant polikoro padėklo. **6.3 poskyryje** yra aprašoma šio jutiklio gamybos technologija ir testavimo rezultatai. 23 paveiksle parodytas pagaminto jutiklio vaizdas (viršutiniame kairiajame paveikslė kampe pavaizduotas sluoksnis su užgarintais kontaktais). Manganito jutiklis buvo sukalibruotas, naudojant kilpinį jutiklį. Jutiklio kalibravimo kreivės 273–320 K temperatūrų ruože pateiktos 24 paveiksle. Kambario temperatūroje ($T = 293$ K) jutiklio atsako įtampa tiesiškai priklauso nuo magnetinio lauko.

Buvo ištirtas manganito jutiklio greitaveikiškumas. Šiuo tikslu buvo panaudota sprogstanti ritė, kuri suformuoja 50 T amplitudės magnetinio lauko impulsą su staigiu (50–100 μ s) galiniu frontu. Kilpinio ir manganito jutiklių atsako į tokį magnetinio lauko impulsą oscilogramos pateiktos 25 paveiksle.



24 pav. Magnetinio lauko jutiklio kalibravimo kreivės



25 pav. Kilpinio ir manganito jutiklių atsakas į 50 T amplitudės magnetinio lauko impulsą

Matome, kad manganito ir kilpinio jutiklių atsako į magnetinio lauko impulsą forma sutampa. Tai rodo, kad manganito jutiklio greitaveikiškumas ne mažesnis negu 1 T/μs. Be to, pasibaigus magnetinio lauko impulsui (ties 0,6 ms), kilpinis jutiklis reaguoja į ritės sprogo metu sukurtus elektromagnetinius triukšmus, o manganito jutiklis yra šiems triukšmams nejautrus. Darbe taip pat parodyta, kad manganito jutikliu galima tirti magnetinio lauko ypatumus mažame tūryje.

Apibendrinimas ir pagrindinės išvados

- Elektrovaržos (*ER*) reiškinyse plonuose La-Ca(Sr)-MnO sluoksniuose, paveikus juos nanosekundinės trukmės elektrinio lauko impulsais, yra nulemtas stipraus elektrinio lauko efektų tarpkristalitinėse srityse: neelastiniu tuneliavimu per lokalizuotas būsenas, erdvinio krūvio ribotomis srovėmis arba tarpelektronine sąveika silpnai netvarkiose medžiagose. Didžiausia neigiama *ER* (–93 %) stebėta polikristaliniuose $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksniuose, užaugintuose lazerinio garinimo technologija. Tobuluose epitaksiniuose sluoksniuose elektroninės kilmės *ER* neaptikta, o varžos kitimas, paveikus stipriu elektriniu lauku, atsiranda dėl Joule'io kaitimo.
- Pagrindiniai neigiamos magnetovaržos ypatumai plonuose epitaksiniuose ir polikristaliniuose La-Ca(Sr)-MnO sluoksniuose gali būti paaiškinti, remiantis modifikuotu Mott'o šuolinio laidumo modeliu tiek feromagnetinėje, tiek ir paramagnetinėje fazėse. Poliarono sukinys J epitaksiniuose 140 nm storio $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose ties T_m siekia 50, tai atitinka maždaug 3 kristalines gardeles, o plonuose sluoksniuose (4 nm) jis yra mažesnis – 35, polikristaliniuose – 22 (2 gardelės). Poliarono sukinio sumažėjimą polikristaliniuose ir ultraplonuose epitaksiniuose sluoksniuose lemia medžiagos struktūrinės tvarkos padidėjimas.
- Nustatyta, kad magnetovaržos anizotropija polikristaliniuose $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksniuose kambario temperatūroje yra žymiai mažesnė, negu epitaksiniuose ir yra nulemta iš dalies tekstūruotos sluoksnio struktūros. Epitaksinių sluoksnių anizotropiją šioje temperatūroje lemia kampo tarp įmagnetėjimo ir srovės krypties kitimas (AMR efektas) bei demagnetizacijos lauko anizotropija (formos efektas).
- Panaudojus plonuosius polikristalinius $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ sluoksnius, sukurtas stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklis, veikiantis kambario temperatūroje ir matuojantis absoliutinę magnetinio lauko indukcijos vertę, bei pasiūlytas spartus apsaugos nuo elektromagnetinio impulso įtaisas, veikiantis skystojo azoto temperatūroje.

Autoriaus mokslinių darbų disertacijos tema sąrašas

- 1* Balevičius, S.; Kiprijanovič, O.; Anisimovas, F.; Vengalis, B.; Žurauskienė, N.; Cimmerman, P.; Altgilbers, L. L. Ultra-fast fault current limiter based on La-Ca-Mn-O thin films. *Journal de Physique IV*, 2001, Vol. 11, p. Pr11-91 / ISSN 1155-4339
- 2* Novickij, J.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Cimmerman, P.; Altgilbers, L. L. Compact system for pulsed high magnetic field generation. In: *Proc. of European Pulsed Power Symposium*, London: IEE, 2002, p. 301–304 / ISSN 0963-3308
- 3* Cimmerman, P.; Žurauskienė, N.; Balevičius, S.; Kiprijanovič, O. Electrical conductivity of thin manganite films at high electric fields (in Lithuanian, Manganitų plonųjų sluoksnių elektrinis laidumas stipriame elektriniame lauke), In: *Materials of 5th conf. of Lithuanian young scientists (Penktosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų medžiaga)*, Vilnius: Technika, 2002, p. 187–190.
- 4* Altgilbers, L. L.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Cimmerman, P.; Anisimovas, F. Hybrid superconducting-magnetic fault current limiter. In: *Digest of technical papers of 14th IEEE International Pulsed Power Conference*, 2003, p. 1040–1043 / ISBN 0-7803-7915-2
- 5* Novickij, J.; Filipavičius, V.; Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Cimmerman, P. High power switch for pulsed magnetic field generation. *Electronics and Electrical Engineering*, 2003, Vol. 44, p. 65–67 / ISSN 1392-1215
- 6* Cimmerman, P.; Stankevič, V.; Žurauskienė, N.; Balevičius, S.; Anisimovas, F.; Paršeliūnas, J.; Kiprijanovič, O.; Altgilbers, L. L. Electroresistance of La-Ca-MnO Thin Films. *Acta Physica Polonica A*, 2004, Vol. 105, p. 107–114 / ISSN 0587-4246
- 7* Balevičius, S.; Žurauskienė, N.; Stankevič, V.; Cimmerman, P.; Novickij, J.; Kačianauskas, R.; Altgilbers, L. L.; Löffler, M. J. Technical applications of colossal magnetoresistance in thin manganite films for high pulsed magnetic field measurements. In: *Proceedings of 2-nd European Pulsed Power Symposium*, Germany: Shaker Verlag Aachen, 2004, p. 195–197 / ISBN 3-8322-3217-6
- 8* Balevičius, S.; Stankevič, V.; Žurauskienė, N.; Šimkevičius, Č.; Paršeliūnas, J.; Cimmerman, P.; Abrutis, A.; Plaušinitienė, V. Magneto- and electro-resistance of ultra-thin anisotropically strained

- La-Sr-MnO films. *Acta Physics Polonica A*, 2005, Vol. 107, p. 203–206 / ISSN 0587-4246
- 9* Balevičius, S.; Žurauskienė, N. Stankevič, V.; Cimmerman, P.; Novickij, J.; Kačianauskas, R.; Stupak, E.; Šnirpūnas, V.; Kačeniauskas, A.; Löffler, M. Manganite sensor for measurements of magnetic field disturbances of pulsed actuators. *Solid State Phenomena*, 2006, Vol. 113, p. 459–64 / ISSN 1012-0394.
- 10* Balevičius, S.; Cimmerman, P.; Petrauskas, V.; Stankevič, V.; Tornau, E. E.; Žurauskienė, N.; Abrutis, A.; Plaušinitienė, V.; Sawicki, M.; Dietl, T.; Aleszkiewicz, M. Two-phase structure of ultra-thin La-Sr-MnO films. *Thin Solid Films*, 2006, in press / ISSN 0040-6090.

Kitos mokslinės publikacijos, kurių rezultatai neįtraukti į disertaciją

- 11* Dargys, A.; N. Žurauskienė, P. Cimmerman, E. Goovaerts, I. Romandic, C. Van Hoof, G. Borghs, Pereinamoji srovė rezonansiniame tuneliniam šviesos diode. *Taikomoji fizika*. Kaunas: Technologija, 2000, p. 95–98.
- 12* Dargys, A.; Cimmerman, P. A note on the relation between discrete and resonance energies in quantum structures, *Solid State Electronics*, 2001, Vol. 45, p. 525–526.
- 13* Dargys, A.; Cimmerman, P.; Žurauskienė, N. Dvibarjerio rezonansinio tunelinio diodo rezonansinės energijos ir artiniai, Pranešimų medžiaga: „Spinduliuotės sąveika su medžiaga ir jos naudojimas technologijoje“. Kaunas: Technologija, 2001, p. 31–34.
- 14* Cimmerman, P.; Stankevič, V.; Žurauskienė, N.; Šimkevičius, Č.; Balevičius, S.; Abrutis, A. Anisotropy of magnetoresistance in La-Sr-Mn-O thin films (in Lithuanian, La-Sr-Mn-O plonųjų sluoksnių magnetovaržos anizotropija), In: *Materials of conference „Lithuanian Science and Industry. University and State. Applied physics“*, Kaunas, 2002, p. 67–68.
- 15* Ašmontas, S.; Anisimovas, F.; Balevičius, S.; Cimmerman, P.; Gradauskas, J.; Lučun, A.; Stankevič, V.; Sužiedėlis, A. Vengalis, B.; Žurauskienė, N. Frequency dependence of electrical response of polycrystalline LCMO thin films. *Acta Physica Polonica A*, 2005, Vol. 107, p. 193–197 / ISSN 0587-4246

INVESTIGATION OF THIN MANGANITE FILMS AT STRONG PULSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

The main aim of this work was to investigate electrical conductivity of La-Ca(Sr)-MnO thin films at high pulsed electric and magnetic fields and to clear up the possibilities to use these materials for high pulsed magnetic field sensor and fault current limiter applications.

The dissertation consists of the preface, six 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 defense are presented in the **preface**.

Chapter 1 presents an introduction and review of previous works on electroresistance (*ER*) and magnetoresistance (*MR*) phenomena in manganites.

Chapter 2 presents a description of two deposition techniques which were used for preparation of thin manganite films: metal organic chemical vapour deposition (MOCVD) and pulsed laser deposition (PLD).

Measurement equipment and methods are described in **Chapter 3**. The resistance dependence on voltage was investigated using electric pulses with duration of 5–30 ns and amplitude up to 1000 V in the temperature range of 4.2–300 K. For magnetoresistance measurements a pulsed magnetic field generator, which generates magnetic field pulses of 0.6–2 ms duration with amplitude up to 50 T was used.

Chapter 4 presents an investigation of surface morphology of prepared films and a characterization of their properties at low electric and magnetic fields. The electric and magnetic properties of epitaxial films – an increase of electrical resistance and a decrease of the resistance maximum temperature with a decrease of film thickness – were explained by the existence of two different phases in ultrathin films.

Chapter 5 presents investigations of the electroresistance induced by the nanosecond duration strong electric field pulses in thin La-Ca(Sr)-MnO films. The *ER* was measured in the temperature range of 4.2–300 K up to electric field strength of 80 kV/cm and its behavior was studied. The highest negative *ER* (–93 %) was obtained for polycrystalline La-Ca-MnO films grown by the pulsed laser deposition technique. It was concluded that the *ER* of electronic origin in the polycrystalline and epitaxial films is a result of strong electric field effects at structural imperfections, i.e. grain boundaries (GB). The results were analyzed by using an empirical formula of conductivity for tunneling across grain boundaries and three parameters: σ_0 – low-voltage conductivity associated with electron elastic – direct and resonant – tunneling across GB, nonlinear conductivity coefficient σ_1 , and applied voltage exponent α indicating predominant tunneling mechanism, were obtained for the investigated films. It

was found that depending on film preparation conditions and temperature the following charge transport mechanisms could take place: inelastic tunneling through localized states for films grown on lucalox and sapphire, while space charge limited currents or electron-electron interaction in weakly disordered solids for films grown on MgO substrate.

Finally, a fast high-power fault current hybrid superconducting-magnetic limiter having low threshold voltages and operating at liquid nitrogen temperature was suggested.

Chapter 6 presents an investigation of magnetoresistance (*MR*) measurements in thin La-Ca(Sr)-MnO films. The *MR* was measured in the temperature range of 80–320 K in pulsed magnetic fields up to magnetic inductance of 50 T. The negative *MR* in epitaxial and polycrystalline manganite thin films was analyzed and explained using the modified Mott's hopping model for both ferromagnetic and paramagnetic phases. It was concluded that a high magnetic field mostly influences the magnetic properties of grain boundary material. In the frame of this model, it was found that the polaron spin moment *J* in polycrystalline or ultrathin epitaxial films decreases in comparison with thick epitaxial ones and this decrease is most likely related with the increase of structural disorder of the material.

The anisotropy of magnetoresistance of La-Sr-MnO films was studied around room temperature in order to use these films for the development of a high pulsed magnetic field sensor. It was found the small *MR* anisotropy of polycrystalline $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ films in temperatures around room temperature and concluded that it is a result of partial texture of the films. The obtained *MR* anisotropy of polycrystalline films was significantly smaller in comparison to epitaxial ones of the same doping, which at the room temperature were in ferromagnetic phase. It was concluded that the obtained *MR* anisotropy of epitaxial films is due to variation of an angle between magnetization and current flow (AMR effect) and demagnetization field anisotropy of thin manganite film (shape effect).

Finally, the high pulsed magnetic field sensor measuring the magnitude of magnetic field (B-scalar sensor) at the room temperature, based on thin polycrystalline $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ and $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ films, was developed.

Summary and main conclusions present the general conclusions and results of the research and describe their practical applications.

References include articles and sources of data and information used in this work.

List of publications presents 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

Piotras Cimmerman gimė 1975 m. sausio 3 d. Vilniuje. 1999 m. baigė telekomunikacijų fizikos ir elektronikos programos studijas Vilniaus universitete ir įgijo bakalauro kvalifikacinį laipsnį. Tais pačiais metais įstojo į Vilniaus universiteto fizikos fakulteto magistrantūrą. 1999–2001 m. dirbo Puslaidininkių fizikos institute (PFI) inžinieriumi (0,5 etato). 2001 m. baigė Vilniaus universiteto magistrantūrą pagal kondensuotųjų medžiagų fizikos ir elektronikos programą, apgynė magistro diplominį darbą „Rezonansinių lygmenų tyrimas GaAs/AlAs kvantiniuose dariniuose“ (darbo vadovė dr. Nerija Žurauskienė), ir jam buvo suteiktas medžiagų mokslo magistro kvalifikacinis laipsnis. 2001–2005 m. – Puslaidininkių fizikos instituto doktorantas. Šiuo metu dirba jaunesniuoju mokslo darbuotoju Puslaidininkių fizikos instituto Didelės galios impulsų laboratorijoje.

Piotras Cimmerman

**PLONŲJŲ MANGANITŲ SLUOKSNIŲ TYRIMAS STIPRIUOSE
IMPULSINIUOSE ELEKTRINIUOSE IR MAGNETINIUOSE
LAUKUOSE**

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

Piotras Cimmerman

**INVESTIGATION OF THIN MANGANITE FILMS AT STRONG
PULSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS**

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

2006 07 11. 1,25 apsk. leid. 1. Tiražas 70 egz.
Leido Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ūkana“, A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius