

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

DAINIUS PAVILONIS

NANOSTRUKTŪRIZUOTŲ La-Sr(Ca)-Mn-O SLUOKSNIŲ MAGNETOVARŽA IR
ELEKTRINĖS VARŽOS RELAKSACIJA

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2017 metai

Disertacija rengta 2012 - 2016 metais Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinė vadovė – prof. dr. Nerija Žurauskienė (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje:

Pirmininkas – prof. dr. Kęstutis Arlauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

doc. dr. Bonifacas Vengalis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

doc. dr. Asta Guobienė (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);

prof. habil. dr. Romualdas Navickas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T);

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

Disertacija bus ginama viešame disertacijos Gynimo tarybos posėdyje 2017 m. gruodžio mėn. 19 d. 14 val. FTMC D401 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, Vilnius, LT-10225, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2017 m. lapkričio mėn. 17 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir svetainėje adresu: <http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

DAINIUS PAVILONIS

MAGNETORESISTANCE AND ELECTRICAL RESISTANCE RELAXATION IN
La-Sr(Ca)-Mn-O NANOSTRUCTURED FILMS

Summary of doctoral dissertation
Physical sciences, physics (02P)

Vilnius, 2017

The dissertation work was carried out at Center for Physical Sciences and Technology from 2012 to 2016.

Scientific supervisor – prof. dr. Nerija Žurauskienė (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P).

The dissertation will be defended at the public meeting of the defence council:

Chairman – prof. dr. Kęstutis Arlauskas (Vilnius University, physical sciences, physics – 02P).

Members:

doc. dr. Bonifacas Vengalis (Center for Physical Sciences and Technology, physical sciences, physics – 02P);

doc. dr. Asta Guobienė (Kaunas University of Technology; physical sciences, physics – 02P),

prof. habil. dr. Romualdas Navickas (Vilnius Gediminas Technical University, technological sciences, electrical and electronic engineering – 01T);

prof. dr. Bernardo Tellini (University of Pisa, Italy, technological sciences, electrical and electronic engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the defence council on the 19th of December, 2017 at 14:00 in FTMC room D401.

Address: Saulėtekio al. 3, Vilnius, LT-10225, Lithuania.

The summary of the dissertation was distributed on the 17th of November, 2017.

The dissertation is available at the libraries of Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology and at website: <http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

Turinys

Turinys	1
1 Įvadas	2
2 Bandinių paruošimas ir tyrimų metodika	7
3 Manganitų sluoksnių magnetovarža	11
4 Elektrinės varžos relaksacija impulsiniame magnetiniame lauke	17
5 Nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių pagreitintas sendinimas	26
6 Išvados	29
Literatūra	31
Doktoranto publikacijos disertacijos tema	33
Apie autorių	34
Summary	35

1 Įvadas

Darbo aktualumas ir problemos formulavimas

Polikristaliniai sluoksniai iš manganitų, pasižymintys milžiniškos magnetovaržos (CMR) reiškiniu yra perspektyvūs, kuriant stipraus impulsinio magnetinio lauko matuoklius [1]. Buvo nustatyta, kad La-Sr-Mn-O (LSMO) sluoksniai gali būti panaudoti absoliutinės magnetinės indukcijos vertės matavimams, kai magnetinių laukų trukmė siekia keletą milisekundžių [2–4]. Pagrindiniai reikalavimai impulsinio magnetinio lauko jutikliams, sukurtiems iš manganitų sluoksnių, yra jų pakankamas jautrumas plačiame magnetinių laukų ruože (0,1–100 T) bei didelė sparta (dešimčių kHz dažnių ruožas). Todėl svarbu išsiaiškinti, kaip polikristalinių manganitų sluoksnių cheminė sudėtis ir nehomogeniška struktūra lemia magnetovaržos dydį (jutiklio jautrumą) plačiame temperatūrų ir magnetinių laukų ruože, bei ištirti magnetovaržos atminties efektus, kurie riboja matuoklio spartą.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – nanostruktūrizuoti manganitų sluoksniai: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ir $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$.

Darbo tikslas

Disertacinio darbo tikslas – ištirti magnetovaržos ir elektrinės varžos relaksacijos reiškinius nanostruktūrizuotuose La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksniuose, išsiaiškinti juos lemiančius mechanizmus ir nustatyti pagrindines sluoksnių savybes, tinkamas sparčių magnetinio lauko jutiklių, veikiančių kambario bei kriogeninių temperatūrų ruožuose, kūrimui.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti buvo sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Plačiame temperatūrų (5–300 K) ir magnetinės indukcijos (iki 60 T) ruože ištirti, La-Sr(Ca)-Mn-O sluoksnių cheminės sudėties, nusodinimo sąlygų bei storio įtaką jų magnetovaržai.
2. Nanostruktūrizuotuose La-Sr(Ca)-Mn-O sluoksniuose ištirti varžos relaksacijos reiškinius, atsirandančius magnetinio lauko impulsui pasibaigus, ir nustatyti, kaip šių procesų charakteringosios laiko konstantos ir liekamoji varža priklauso nuo aplinkos temperatūros ir magnetinio lauko.
3. Išanalizuoti ir nustatyti krūvio pernašos ir magnetinės sistemos atsistatymo į pusiausvyrinę būseną mechanizmus, nulemiančius magnetovaržos ir varžos relaksacijos reiškinius nanostruktūrizuotuose manganitų sluoksniuose.
4. Ištirti pagreitinto bei ilgalaikio sendinimo įtaką La-Sr-Mn-O sluoksnių savybėms ir nustatyti optimalias sąlygas, leidžiančias stabilizuoti šių sluoksnių varžą bei magnetovaržą.
5. Išsiaiškinti galimybes sukurti sparčius stipraus impulsinio magnetinio lauko jutiklius, veikiančius kambario ir kriogeninių temperatūrų ruožuose.

Tyrimų metodika

Tyrimams taikyta magnetinio lauko generavimo ir tirtų sluoksnių elektrinės varžos kitimo atsako registravimo metodika. Tyrimų rezultatai buvo analizuojami, taikant įvairius teorinius modelius – modifikuotą Mott'o šulinio laidumo, Kolmogorov-Avrami-Fatuzzo bei Kohlrausch-Williams-Watts – ir nagrinėjant procesus, vykstančius kristalituose bei tarpkristalitinėse srityse.

Darbo mokslinis naujumas

- Nustatyta, kad nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių magnetovarža plačiame magnetinių laukų ir temperatūrų ruože gali būti analizuojama ir aprašoma, naudojant modifikuotą Mott'o šulinio laidumo modelį, kai yra įskaitomi kristalitų ir tarpkristalitinių sričių įnašai.

- Nustatyta, kad nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių varžos relaksacija, pasibaigus magnetinio lauko impulsui, pasireiškia dviejų skirtingų trukmių ruožuose: greitoji ($\sim 100 \mu\text{s}$) ir lėtoji ($\geq 1 \text{ ms}$). Nustatyti „greitosios“ ir „lėtosios“ relaksacijos procesų komponentių charakteringųjų laiko konstantų ir santykinės liekamosios varžos verčių kitimo dėsningumai plačiame temperatūrų ir magnetinių laukų ruože. Nustatyta, kad „greitoji“ relaksacijos proceso komponentė yra gerai aprašoma Kolmogorov-Avrami-Fatuzzo modeliu su suspausta eksponente, ir dominuojantis šios relaksacijos mechanizmas yra magnetinių domenų užuomazgų susiformavimas ir persiorientavimas į pusiausvyrinę būseną. Tuo tarpu „lėtoji“ magnetinės relaksacijos proceso komponentė yra gerai aprašoma Kohlrausch-Williams-Watts modeliu, nagrinėjančiu magnetinių momentų sąveiką tarpkristalitinėse srityse, pasižyminčiose sukinių stikliškosiomis savybėmis.
- Parodyta, kad nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių atkaitinimas argono dujų atmosferoje 100–200 °C temperatūrose pagreitina sluoksnių senėjimo procesą ir stabilizuoja jų varžą bei magnetovaržą. Varžos kinetiką sluoksnių senėjimo proceso metu gerai aprašo hierarchiškai apribotos relaksacinės dinamikos modelis su ištemptąja eksponente, o varžos žymų padidėjimą galima paaiškinti dėl atkaitinimo vykstančiu deguonies koncentracijos sumažėjimu ir difuzija tarpkristalitinėse sluoksnių srityse.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Remiantis gautais tyrimų rezultatais buvo pasiūlyti magnetinio lauko jutikliai, veikiantys kambario bei kriogeninių temperatūrų ruožuose. Pirmajam taikymui (aukštų temperatūrų ruožui) yra perspektyvūs nanostruktūrizuoti La-Sr-Mn-O sluoksniai, tuo tarpu antrajam taikymui (kriogeninėms temperatūroms) tinkamesni La-Ca-Mn-O sluoksniai, pasižymintys didesne magnetovarža ir mažesnėmis liekamosios varžos vertėmis žemose temperatūrose. Magnetinės relaksacijos tyrimų rezultatai leido įvertinti galimus impulsinio magnetinio lauko jutiklių veikimo laiko ruožus: matuojant ilgesnius nei milisekundės impulsus „greitoji“ relaksacijos komponentė neturi įtakos matavimo tikslumui, tuo tarpu „lėtąją“ komponentę, pasireiškiančią milisekundžių trukmių ruože, galima sumažinti daugiau nei du kartus naudojant La-Ca-Mn-O sluoksnius su aukštesne fazinio virsmo temperatūra. Taip pat buvo parodyta, kad nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių ilgalaikį elektrinių parametrų stabilumą (dvejų metų laikotarpyje varžos

ir magnetovaržos pokytis $< 2\%$) galima pasiekti, atkaitinant sluoksnius argono aplinkoje 24 valandas $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Sluoksnių padengimas specialia pasyvuojančia medžiaga – karštojo lydymo klijais – pagreitina sendinimo procesą beveik tris kartus.

Disertacijos ginamieji teiginiai

1. Nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių morfologija bei cheminė sudėtis ženkliai įtakoja šių sluoksnių magnetovaržą, kurios priklausomybę nuo magnetinio lauko gerai aprašo modifikuotas Mott'o šuolinio laidumo modelis, įskaitantis kristalitų ir tarpkristalitinių sričių įnašus.
2. „Greitoji“ nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių varžos atsištatymo į pradinę vertę proceso komponentė, pasireiškianti mikrosekundžių trukmių ruože pasibaigus magnetinio lauko impulsui, ženkliai priklauso nuo sluoksnių struktūros, morfologijos ir yra nulemta magnetinių domenų užuomazgų susidarymu bei jų persiorientavimu į pusiausvyrinę būseną. Šio proceso kinetiką gerai aprašo Kolmogorov-Avrami-Fatuzzo modelis su suspausta eksponente.
3. „Lėtoji“ nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių varžos atsištatymo į pradinę vertę proceso komponentė, pasireiškianti milisekundžių trukmių ruože pasibaigus magnetinio lauko impulsui, yra nulemta procesu, vykstančiu netvarkiose tarpkristalitinėse srityse ir yra gerai aprašoma Kohlrausch-Williams-Watts modeliu su ištemptąja eksponente.
4. Nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių atkaitinimas argono dujų atmosferoje, aukštesnėse nei eksploatacijos temperatūrose pagreitina sluoksnių senėjimo procesą ir stabilizuoja jų varžą bei magnetovaržą. Varžos padidėjimą dėl šio atkaitinimo nulemia deguonies koncentracijos sumažėjimas ir difuzija tarpkristalitinėse sluoksnių srityse, o šio proceso kinetiką gerai aprašo hierarchiškai apribotos relaksacinės dinamikos modelis su ištemptąja eksponente.
5. Nanostruktūrizuoti $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ sluoksniai, kambario temperatūroje pasižymintys didesniu jautriu magnetiniam laukui, yra perspektyvesni magnetinio lauko jutikliams, veikiantiems aukštesnėse temperatūrose, tuo tarpu kriogeninėse temperatūrose turėtų būti panaudoti $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ sluoksniai, pasižymintys didesne magnetovarža ir mažesnėmis santykinės liekamosios varžos vertėmis.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 8 moksliniai straipsniai žurnaluose, įtrauktuose į Thomson Reuters Web of Science duomenų bazę, ir du straipsniai tarptautinių konferencijų medžiagoje.

Disertacijoje atliktų mokslinių tyrimų rezultatai buvo pristatyti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- 4th Euro-Asian Pulsed Power Conf. / 19th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany, Sept. 30–Oct. 4, 2012.
- 41-ji Lietuvos Nacionaline Fizikos Konferencija (41-th Lithuanian National Conference in Physics), Vilnius, Lithuania, June 17–19, 2015.
- 15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Vilnius, August 25–28, 2013.
- IEEE International magnetic conference INTERMAG-2014, Dresden, Germany. May 4–8, 2014.
- 11th International Conference on Research in High Magnetic Fields RHMF-2015, Grenoble, France, 1–4 July, 2015.
- 5th Euro-Asian Pulsed Power Conf. Kumamoto, Japan. September 8–12, 2014.
- 6th Euro-Asian Pulsed Power Conf. / 21th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams / 15th International Conference on megagauss magnetic field generation and related topics, Estoril, Portugal, Sept. 18–22, 2016.

Autoriaus įnašas

Disertaciniame darbe pateikti rezultatai, jų analizė ir išvados buvo gauti autoriui bendradarbiaujant su publikacijų, pateiktų autoriaus publikacijų sąrašė, bendraautoriais. Disertacijos autorius atliko tirtų sluoksnių magnetovaržos (iki 25 T) ir varžos relaksacijos tyrimus, įskaitant eksperimentinį darbą bei rezultatų analizę, naudojant modifikuotą Mott'o šuolinio laidumo, Kolmogorov-Avrami-Fatuzzo ir Kohlrausch-Williams-Watts modelius. Diskusijos su bendraautoriais padėjo interpretuoti gautus rezultatus

ir nustatyti stebimų reiškinių mechanizmus. Taip pat autorius dalyvavo, tobulinant magnetinio lauko generavimo ir registravimo metodikas ir įrangą, kuri naudojama magnetovaržos ir varžos relaksacijos matavimams.

Disertacijos struktūra

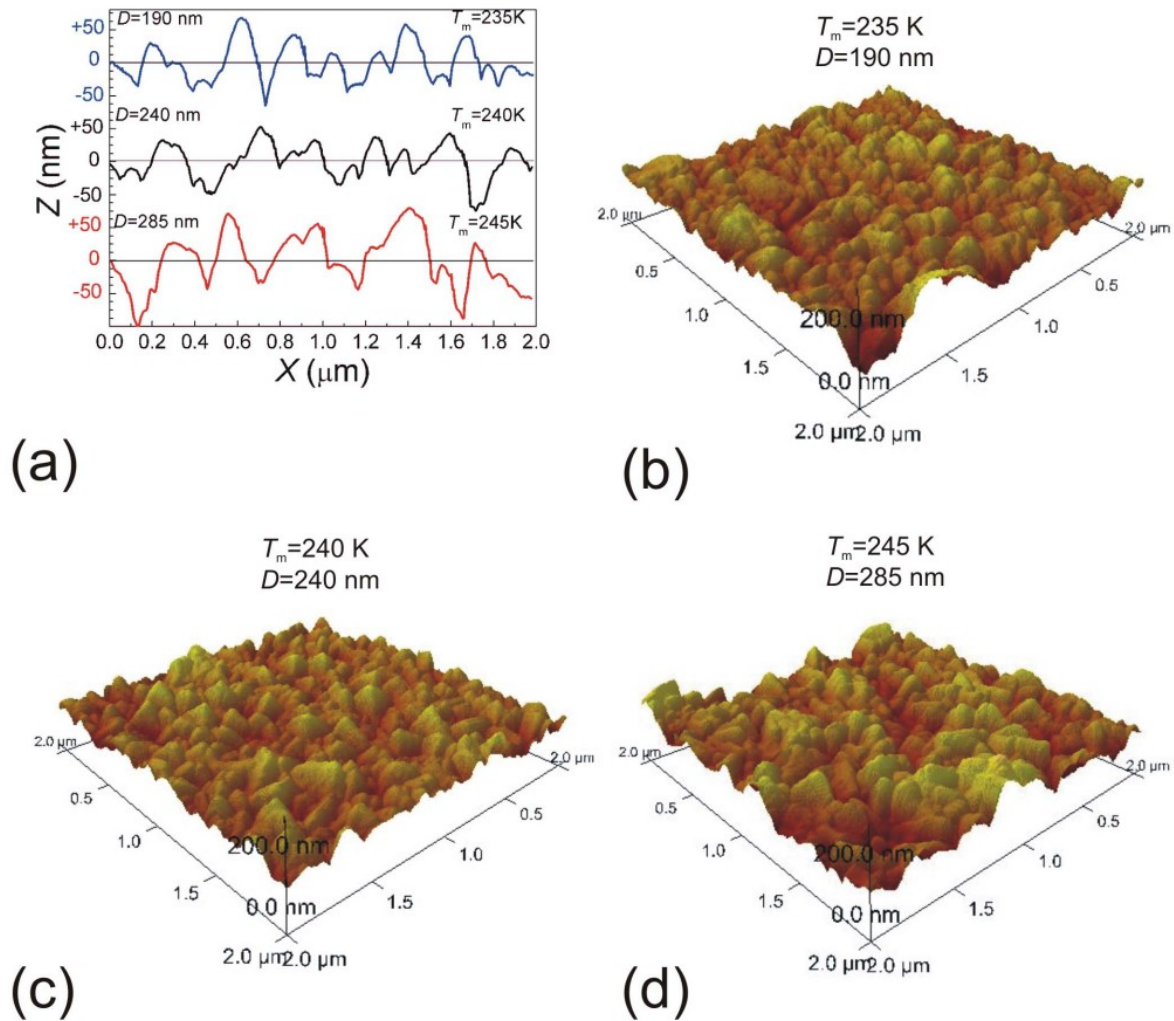
Disertaciją sudaro įvadas, trys pagrindiniai skyriai, bendrosios išvados ir cituojamos literatūros bei autoriaus publikacijų sąrašas. Įvade pristatoma problema ir tyrimų objektas, iškeliami darbo tikslai ir uždaviniai, pateikiami darbo naujumo kriterijai ir praktinė vertė, pristatomi ginamieji teiginiai. Po įvado seka literatūros apžvalga disertacijos tematika. Apžvalgoje aptariamos bendrosios tiriamų medžiagų fizikinės savybės bei pasaulinėje literatūroje sutinkami jų aprašymo metodai. Trečiame skyriuje pristatoma tyrimo metodika bei darbe naudotų bandinių gaminimo technologijos bei pagrindinės jų savybės. Ketvirtame skyriuje aptariami magnetovaržos, elektrinės varžos relaksacijos bei bandinių pagreitinto sendinimo tyrimų rezultatai. Disertacijos pabaigoje pateikiamos bendrosios išvados ir naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 113 puslapių, 56 numeruotos formulės, 73 paveikslai, 7 lentelės ir 101 literatūros šaltinis.

2 Bandinių paruošimas ir tyrimų metodika

Nanostruktūrizuoti $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ (LSMO) sluoksniai buvo užauginti Vilniaus Universiteto Chemijos fakultete, impulsinio-injekcinio metaloorganinių junginių cheminio nusodinimo iš garų fazės būdu (PI MOCVD), naudojant polikristalinius polikoro (99,9% Al_2O_3 + 0,1% MgO) padėklus, esant 600–750 °C temperatūrai. Sluoksnių storis – nuo 75 nm iki 420 nm. Gautų LSMO bandinių savybės pateiktos 1 lentelėje. LSMO sluoksnių (rinkinys S1) paviršiaus skerspjuviai pavaizduoti 1 paveiksle.

Tuo pačiu metodu buvo nusodintas rinkinys $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (LCMO) sluoksnių, keičiant legiravimo laipsnį x nuo 0,2 iki 0,4. Šie sluoksniai buvo auginami 775 °C temperatūroje. Daliai sluoksnių slėgis MOCVD kameroje buvo keičiamas 3–7 Torr ruože. Užaugintų sluoksnių storis buvo ~300 nm. Gautų LCMO bandinių savybės pateiktos 2 lentelėje.

Elektrinės varžos matavimui buvo suformuoti du sidabro elektrodai. Atstumas



1 pav.: (a) Tirtų sluoksnių paviršiaus skerspjūviai (AJM duomenys). (b)–(d) Skirtingose sąlygose užaugintų sluoksnių, turinčių skirtingus vidutinius kristalitų diametrus D , paviršiaus vaizdai. Nustatytos D ir T_m vertės pateiktos šalia kiekvieno paveikslo.

tarp elektrodų – $50 \mu\text{m}$. Manganitų sluoksnių magnetovaržos bei atminties efektų tyrimams stipriame magnetiniame lauke buvo naudojamas stiprių impulsinių magnetinių laukų generatorius. Jo veikimo principas paremtas kondensatorių baterijos iškrovimu per ritę – specialiai pagamintą solenoidą. Blokinė šio įrenginio schema (2 pav.) susideda iš: 1) paleidimo įrenginio, 2) kondensatorių užkrovimo įrenginio, 3) kondensatorių baterijos, 4) tiristorinio jungiklio, 5) ritės, 6) oscilografo (Tektronix DPO 4034, 350 MHz realaus laiko oscilografas). Magnetinis laukas buvo generuojamas, iškraunant užkrautą kondensatorių bateriją (3) per indukcinę ritę (5). Srovės nutraukimui po sinuso pusperiodžio buvo naudojamas tiristorinis jungiklis (4). Aktyvuoti jungikliui buvo naudojamas $50 \mu\text{s}$

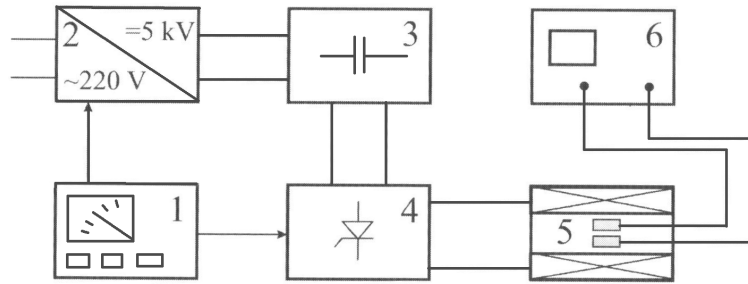
1 lentelė: Pagrindinės šiame darbe naudotų $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ bandinių charakteristikos.

		$\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$				
		$T_{dep}, ^\circ\text{C}$	T_m, K	$\rho_m, \Omega\text{cm}$	d, nm	D_{avg}, nm
Rinkinys S1		700	240	1,6	420	240
		725	235	1,9	420	190
		750	245	0,8	420	285
Rinkinys S2		750	187	2,1	75	90
		750	235	1,2	170	110
		750	237	1,16	280	130
Rinkinys S3		650	160	53	400	110
		700	220	6,5	400	140
		750	235	1,8	400	170
		750	245	0,8	400	285
Rinkinys S4		750	235	1,4	400	250

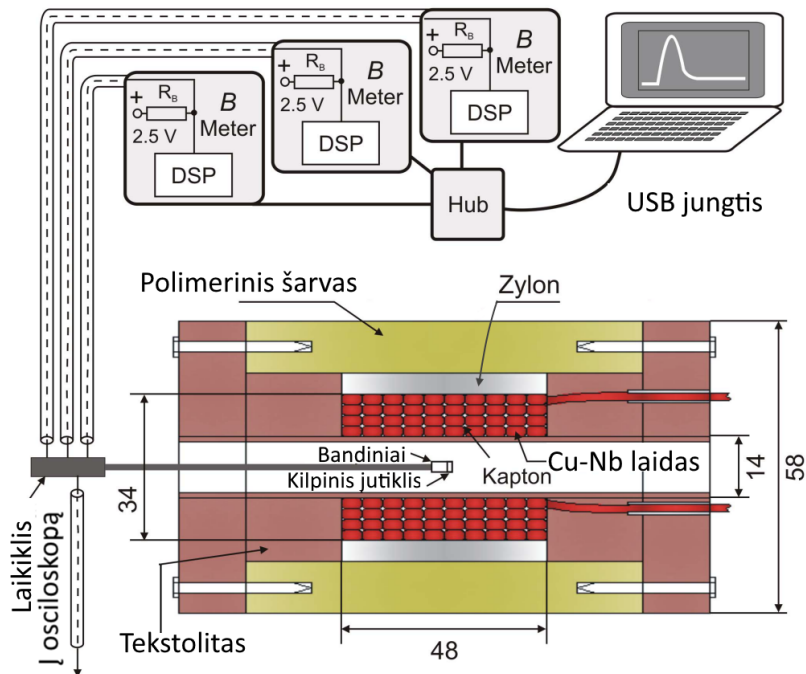
2 lentelė: Pagrindinės šiame darbe naudotų $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ bandinių charakteristikos.

		$\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$						
		x	$T_{dep}, ^\circ\text{C}$	P_{dep}, Torr	T_m, K	$\rho_m, \Omega\text{cm}$	d, nm	D_{avg}, nm
Rinkinys C1		0,218	775	5	220	8,2	320	110
		0,296	775	5	185	5,4	320	140
		0,41	775	5	130	2,8	320	210
		0,285	775	5	115	5,0	320	157
Rinkinys C2		0,28	775	3	175	19,3	300	100
		0,28	775	5	225	2,8	300	120
		0,27	775	7	225	2,8	300	120

trukmės impulsas, kurį sugeneruodavo paleidimo blokas (1). Paleidimo blokas taip pat sugeneruodavo sinchronizacinį impulsą, kuris aktyvuodavo oscilografą (6). Sugeneruoto magnetinio lauko impulso amplitudę sąlygoja kondensatorių užkrovimas iki tam tikros įtampos. Todėl keisdami užkrovimo įtampą, mes keičiame maksimalų magnetinio srauto tankį. Ši sistema buvo naudojama sluoksnių magnetovaržos tyrimams iki 25 T. Magnetinio lauko impulso trukmę galima keisti, keičiant indukcinės ritės parametrus. Todėl priklausomai nuo ritės, impulso trukmė buvo keičiama 0,26–1 ms ruože. Matavimo metu bandinys ir magnetinio lauko jutiklis buvo talpinami ritės centre. Ritės parametrai užtikrino homogeninį magnetinį lauką (5 % tikslumu) 0,5 cm atstumu išilgai ritės ašies nuo jos centro. Elektrinės varžos relaksacijos anizotropija buvo tiriama keičiant manganito sluoksnio plokštumos orientaciją magnetinio lauko atžvilgiu.



2 pav.: Stipraus impulsinio magnetinio lauko matavimo įrenginio blokinė schema.



3 pav.: Varžos matavimo įrangos ir magnetinės ritės, naudojamos varžos relaksacijos tyrimams, struktūrinė schema. Matmenys pateikti milimetrais.

Polikristalinių $\text{La}_{0,83}\text{Sr}_{0,17}\text{MnO}_3$ sluoksnių stabilumo tyrimai buvo atliekami atkaitinant bandinius argono atmosferoje 50, 100, 150, 200 arba 250 °C temperatūroje. Bandiniai buvo sunumeruoti pagal atkaitinimo temperatūrą ($S_{50} - S_{250}$). Po to bandiniai būdavo lėtai (per maždaug 30 minučių) ataušinami ir pakartotinai buvo matuojama jų varža ir magnetovarža 0–40 °C temperatūrų ruože. Šis bandymų ciklas buvo kartojamas kelis kartus. Laiko tarpas tarp atskirų bandymų ciklų buvo nuo kelių iki keliolikos parų. Taip pat buvo ištirtas bandinių parametrų kitimas dvejų metų laikotarpyje.

3 Manganitų sluoksnių magnetovarža

Šiame skyriuje pateikiami nanstruktūrizuotų manganitų sluoksnių magnetovaržos tyrimai išskiriant polikristaliniams sluoksniams būdingas silpno lauko magnetovaržos (LFMR) ir stipraus lauko magnetovaržos (HFMR) sritis.

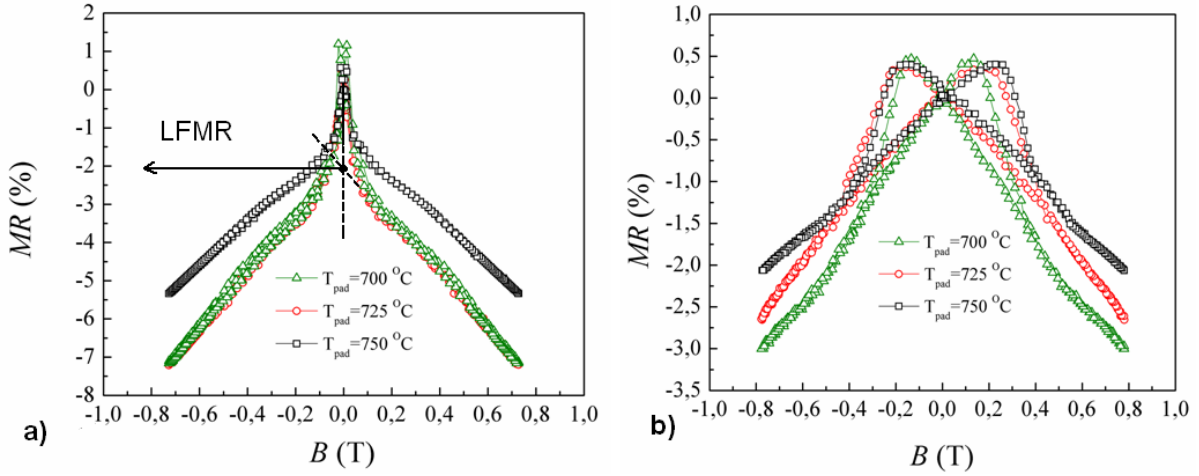
Manganitų sluoksnių magnetovarža silpname magnetiniame lauke

LSMO ir LCMO sluoksnių magnetovarža silpname lauke įvairiose temperatūrose buvo matuojama panaudojant nuolatinio magnetinio lauko generatorių – elektromagnetą bei uždaro ciklo helio kriostatą. Matavimai buvo atliekami orientuojant bandinius dviem kryptimis magnetinio lauko atžvilgiu: magnetinis laukas statmenas bandinio plokštumai ir magnetinis laukas nukreiptas išilgai bandinio plokštumos. Magnetovarža buvo skaičiuojama pagal šią formulę:

$$MR = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \times 100\%, \quad (1)$$

kur $R(B)$ ir $R(0)$ – bandinio varža atitinkamai magnetiniame lauke ir be lauko.

4 pav. pateikti nanostruktūrizuotų LSMO sluoksnių (rinkinys S1, žr. 1 lentelę) magnetovaržos matavimų silpname magnetiniame lauke rezultatai esant 200 K temperatūrai. Galima pastebėti, kad bandinių, išaugintų 750 °C temperatūroje ($T_m = 245$ K) magnetovarža (absoliutiniu dydžiu) yra mažesnė negu kitų dviejų bandinių, o pastarųjų magnetovaržos skiriasi nedaug. Matome, kad magnetovarža pasižymi gana didele anizotropija (skirtingas kreivių pobūdis statmename ir lygiagrečiame laukuose). Esant abiem magnetinio lauko orientacijoms labai silpnuose laukuose stebima teigiama magnetovarža – didinant magnetinį lauką (absoliutiniu dydžiu) varža didėja, o po to ji pradeda mažėti, tuo tarpu mažinant magnetinį lauką (absoliutiniu dydžiu) laukuose mažesniuose už 0,4 T statmeno lauko atveju ir mažesniuose už 0,05 T lygiagretaus lauko atveju yra stebima histerezė. Panaudojus magnetovaržos priklausomybes lygiagrečiame bandinio plokštumai lauke galima nustatyti koercinį lauką, kuris yra reikalingas perorientuoti magnetinius domenų priešinga kryptimi. Jis lygus magnetinės indukcijos vertei ties smailės viršūne: apie 22 mT bandinio, auginto prie 700 °C ($T_m = 240$ K), ir 12 mT bandinio, augin-

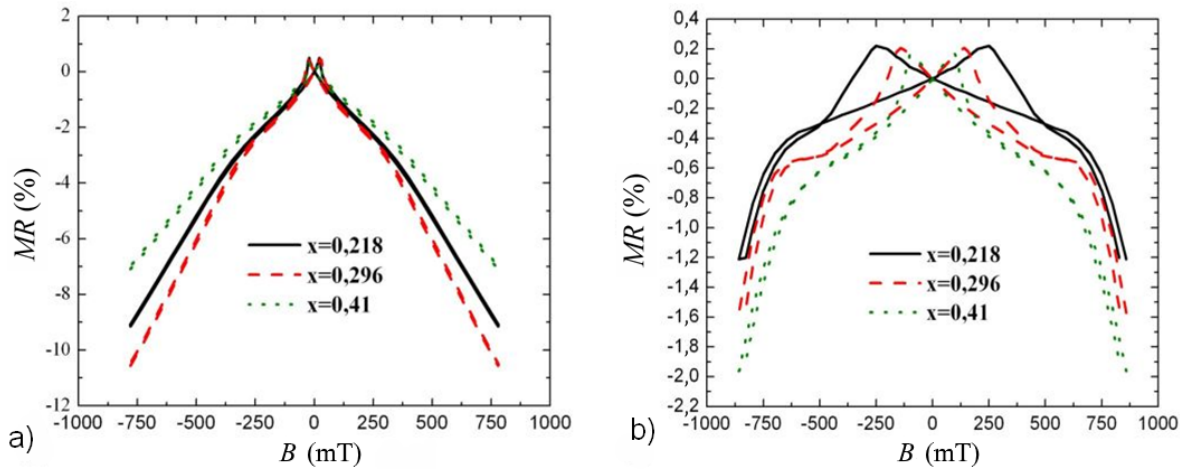


4 pav.: Magnetovaržos priklausomybės nuo magnetinio lauko esant 200 K temperatūrai: a) magnetinis laukas lygiagretus bandinio paviršiui; b) magnetinis laukas statmenas bandinio plokštumai.

to prie $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_m = 245\text{ K}$). Panaudojus magnetovaržos priklausomybes statmename bandinio plokštumai lauke galima nustatyti demagnetizacijos lauką, reikalingą perorientuoti domenų statmena plokštumai kryptimi: 135 mT augintam $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje ($T_m = 240\text{ K}$) bandiniui ir 180 mT augintam $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje ($T_m = 245\text{ K}$).

Iš magnetovaržos priklausomybės lygiagrečiame bandinio plokštumai magnetiniame lauke galima įvertinti poliarizuotų sukinių tuneliavimo įtaką, kuri nulemia polikristaliniams sluoksniams būdingą staigų magnetovaržos padidėjimą silpnuose magnetiniuose laukuose, taip vadinamą silpno lauko magnetovaržą (LFMR). Ją galima apskaičiuoti pratęsus stipresniame magnetiniame lauke silpniau kintančios kreivės dalį (kai $|B| > 0,15\text{ T}$) iki susikirtimo su ordinačių ašimi ($B = 0\text{ T}$). Mūsų atveju ši silpno lauko magnetovarža sudaro $-2,0\%$ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_m = 240\text{ K}$) temperatūroje išaugintam bandiniui ir $-1,4\%$ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_m = 245\text{ K}$) temperatūroje išaugintam bandiniui (žr. 4a pav.).

5 pav. pateikti nanostruktūrizuotų LCMO sluoksnių (rinkinys C1, žr. 2 lentelę) magnetovaržos matavimų silpname magnetiniame lauke rezultatai, esant 200 K temperatūrai. Galime pastebėti, kad statmenojo lauko atveju didinant x didėja ir MR vertės (jautrumas) prie tų pačių B verčių. Kai magnetinis laukas lygiagretus sluoksnio paviršiui, didžiausią jautrumą turi sluoksnis su $x = 0,296$, o mažiausią – $x = 0,41$. Matome, kad magnetovarža pasižymi gana didele anizotropija (skirtingas kreivių pobūdis statmename ir lygiagrečiame laukuose). Kai magnetinis laukas didesnis už $0,5\text{ T}$, tai magnetovarža

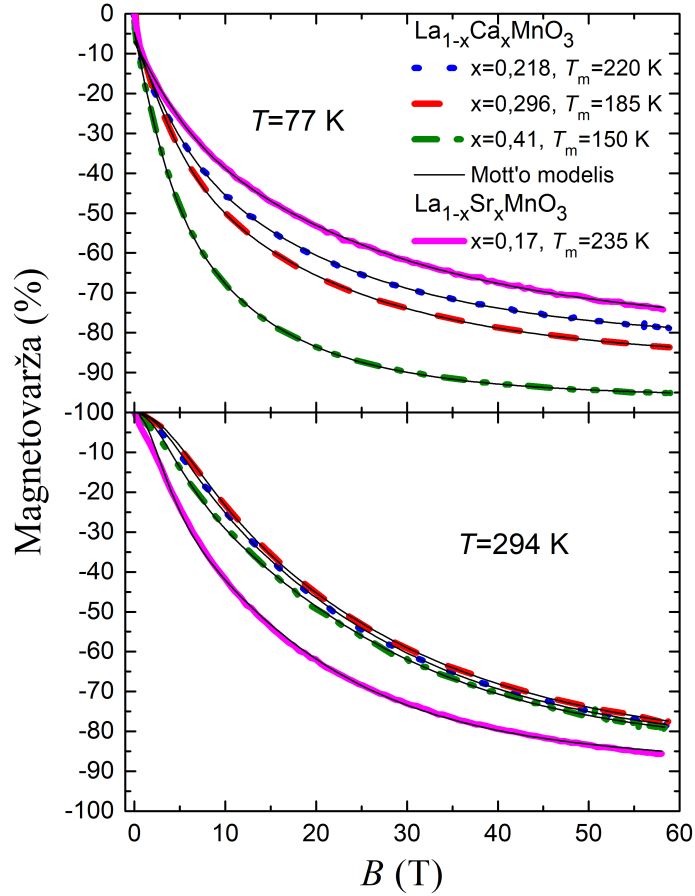


5 pav.: LCMO sluoksnių magnetovaržos priklausomybės nuo magnetinio lauko esant 200 K temperatūrai: a) magnetinis laukas lygiagretus bandinio paviršiui; b) magnetinis laukas statmenas bandinio plokštumai.

veikiant magnetiniam laukui bandinio plokštumoje gali būti iki 10 kartų didesnė negu veikiant magnetiniam laukui statmenai bandinio plokštumai. Koercinis laukas siekia apie 24 mT visiems bandiniams. LCMO sluoksniams žemose temperatūrose LFMR siekė (10–15) %. Demagnetizacijos laukas, reikalingas pasukti domenų statmena plokštumai kryptimi: 250 mT bandiniui su $x = 0,218$ ($T_m = 220$ K) atveju, 140 mT – $x = 0,296$ ($T_m = 200$ K) atveju ir 100 mT – $x = 0,41$ ($T_m = 160$ K) atveju. Reikia pažymėti, kad demagnetizacijos laukas didesnis LCMO sluoksniams lyginant su LSMO sluoksniais dėl siauresnių tarpkristalitinių sričių ir todėl padidėjusia tolimąja magnetine sąveika tarp kristalitų sluoksnio plokštumoje. Mažiausia anizotropija (santykinis MR skirtumas skirtingomis magnetinio lauko kryptimis) pasižymi LCMO sluoksniu su didesniu x (0,41), nes jo metalas-izoliatorius fazinio virsmo temperatūra $T_m = 160$ K yra žemesnė, lyginant su matavimo temperatūra 200 K, nei kitų sluoksnių.

Manganitų sluoksnių magnetovarža stipriame magnetiniame lauke

6 pav. parodytos MR priklausomybės nuo magnetinės indukcijos skirtingo Ca kiekio LCMO bandiniams ir palygintos su LSMO bandiniu (žr. [P2]). Matome, kad žemoje temperatūroje (77 K) LCMO sluoksnių MR yra žymiai didesnė, nei LSMO sluoksnio. Todėl magnetinio lauko jutiklių, skirtų matuoti magnetinį lauką žemoje tem-



6 pav.: Skirtingų legiravimo laipsnių LCMO ir LSMO sluoksnių magnetovaržos priklausomybės nuo magnetinės indukcijos 77 K ir 294 K temperatūrose.

peratūroje, kūrimui reikėtų panaudoti La-Ca-Mn-O sluoksnius. Didžiausia MR (o tuo pačiu ir jutiklio jautrumas) gaunama sluoksniams su žemiausia T_m (LCMO atveju kai $x = 0,41$). Kaip buvo parodyta aukščiau, tokių sluoksnių magnetovaržos anizotropija silpnuose laukuose taip pat yra mažesnė, kas labai svarbu absoliutinę magnetinio lauko vertę matuojančio jutiklio tikslumui. Tačiau kuriant impulsinio magnetinio lauko jutiklius labai svarbu atsižvelgti ir į magnetovaržos atminties efektus, stebimus pasibaigus impulsui. Šių tyrimų rezultatai pateikti kitame skyriuje.

Kambario temperatūroje (žr. 6 pav. apačioje) veikiančius jutiklius reikėtų kurti panaudojant La-Sr-Mn-O sluoksnius, pasižyminčius didesnėmis magnetovaržos vertėmis aukštoje temperatūroje. Tokie sluoksniai buvo pritaikyti magnetinio lauko pasiskirstymo nesuirstančioje ritėje matavimams Drezdeno stiprių magnetinių laukų laboratorijoje [5]. Reikia pažymėti, kad LCMO sluoksnių magnetovaržos aprašymui (kaip ir LSMO atve-

ju) buvo panaudotas modifikuotas Mott'o šuolinio laidumo modelis, P. Wagner ir kitų autorių [6] pasiūlytas epitaksiniam sluoksniams, įskaitant LFMR dedamąją. Šiuo būdu feromagnetinėje būsenoje esančius sluoksnius galima aprašyti pirmo laipsnio Briulijeno funkcija (2), o paramagnetinėje fazėje – jos kvadratu (3) [6]. Kaip buvo anksčiau minėta, toks aprašymas tinka tik iki vidutinių magnetinių laukų (20 T) [7], o visame matuotų magnetinių laukų ruože (0–60 T) reikia įskaityti tiek kristalitų, tiek ir tarpkristalinių sričių dalis (žr. [P2]). 6 pav. parodytas tokio aprašymo panaudojimas LCMO ir LSMO sluoksniams.

$$MR = f \times A_C \times \mathcal{B}(\chi_C) + (1 - f) \times A_{GB} \times \mathcal{B}(\chi_{GB}) + LFMR, \quad (2)$$

$$MR = f \times A_C \times \mathcal{B}^2(\chi_C) + (1 - f) \times A_{GB} \times \mathcal{B}^2(\chi_{GB}). \quad (3)$$

Čia f yra kristalitų (C) medžiagos dalis, $(1 - f)$ tarpkristalitinės (GB) medžiagos dalis. $\mathcal{B}(\chi)$ yra Briulijeno funkcija, $\chi_{C(GB)} = g \times \mu_B \times J_{C(GB)} \times B/k_B T$ yra magnetinės ir terminės energijų santykis, g – Lande faktorius, μ_B – Boro magnetonas, k_B – Boltzmano konstanta, B – magnetinė indukcija, T – temperatūra. Sukinio-orbitinis kvantinis skaičius (magnetinio poliarono momentas) J ir magnetovaržos maksimalus galimas dydis A yra derinimo parametrai. LFMR vertės įvertintos iš silpno lauko matavimų, kai laukas orientuotas lygiagrečiai sluoksnio plokštumai.

3 lentelė: Gautų derinimo parametrų ribos pagal Mott'o šuolinio laidumo modelį LCMO ir LSMO sluoksnių magnetovaržai.

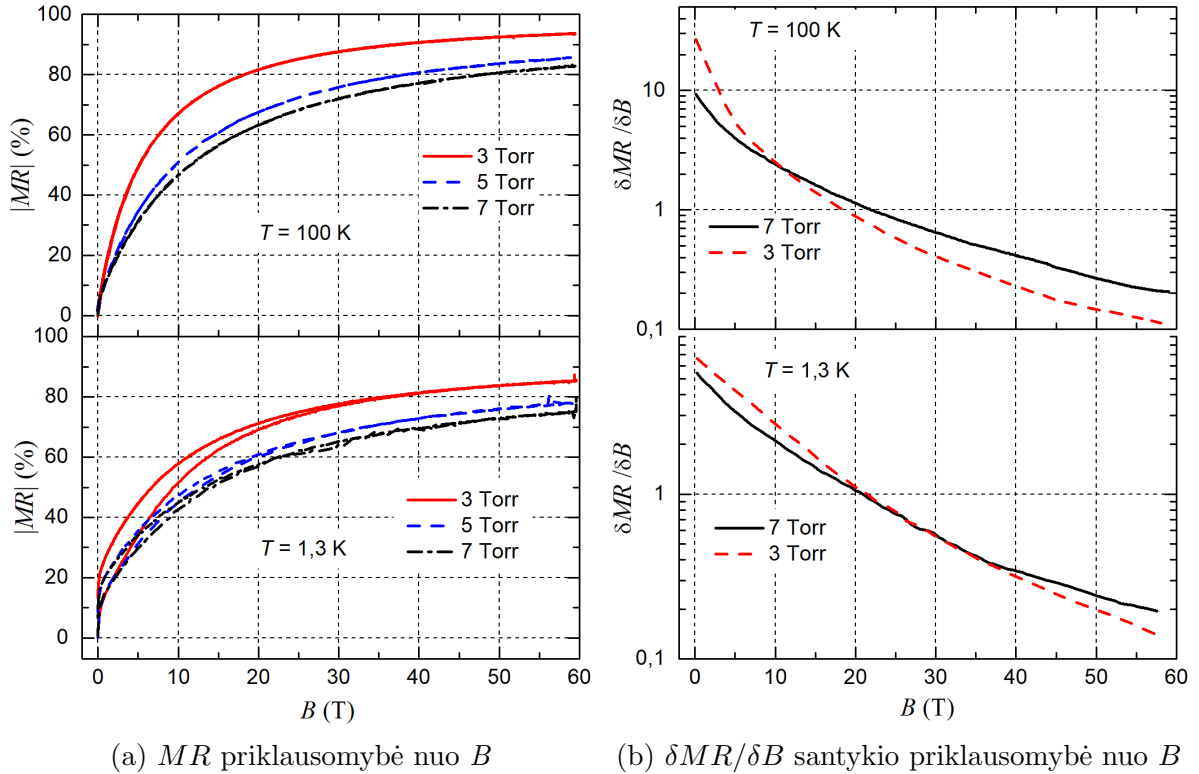
	LCMO		LSMO	
	$T = 77\text{K}$	$T = 290\text{K}$	$T = 77\text{K}$	$T = 290\text{K}$
$f \times A_C$	–(31,3 – 45,4)%	–(28,8 – 30,7)%	~ –23,7%	~ –33,4%
$(1 - f) \times A_{GB}$	–(44,9 – 45,7)%	–(52,9 – 57)%	~ –49,7%	~ –52,9%
J_C	7,5 – 11,8	27,2 – 37,8	~ 7,5	~ 52,5
J_{GB}	1,8 – 3,1	7,8 – 8,6	~ 1,5	~ 10,7
$LFMR$	–(5 – 7)%	-	~ –7%	-

Pagal rezultatus, pateiktus 3 lentelėje, LSMO bandiniui su kuriuo lyginami LCMO rezultatai, $f \times A_C$ vertės gautos panašios, tuo tarpu J vertės nustatytos apytiksliai 1.5 karto didesnės. Matome gerą eksperimentinių ir teorinių rezultatų sutapimą, kas rodo, kad modifikuotas Mott'o šuolinio laidumo modelis tinka ir nanostruktūrizuotų sluoksnių magnetovaržos aprašymui. Magnetovaržos aprašymo, naudojant šį modelį, rezultatai, gauti 77 K ir 290 K temperatūrose, yra pateikti straipsnyje [P2].

Auginimo slėgio įtaka LCMO sluoksnių magnetovaržai

LCMO sluoksnių savybės priklauso ne tik nuo legiravimo laipsnio, bet ir nuo daugybės kitų procesų, vykstančių auginimo metu. Taigi jutiklių taikymui yra svarbu nustatyti optimalias auginimo sąlygas. Viena tokių sąlygų yra auginimo slėgis P_{dep} MOCVD kameroje. Absoliutinės magnetovaržos vertės priklausomybė nuo temperatūros LCMO sluoksniams auginiems esant 3–7 Torr slėgiui parodė, kad žemose temperatūrose (1,3–200 K) sluoksniai auginti prie 3 Torr turi didesnę magnetovaržą nei sluoksniai auginti prie 5–7 Torr [P8]. Šį rezultatą lemia didesnė struktūrinė tvarkta sluoksniuose augintuose žemesnio slėgio sąlygomis.

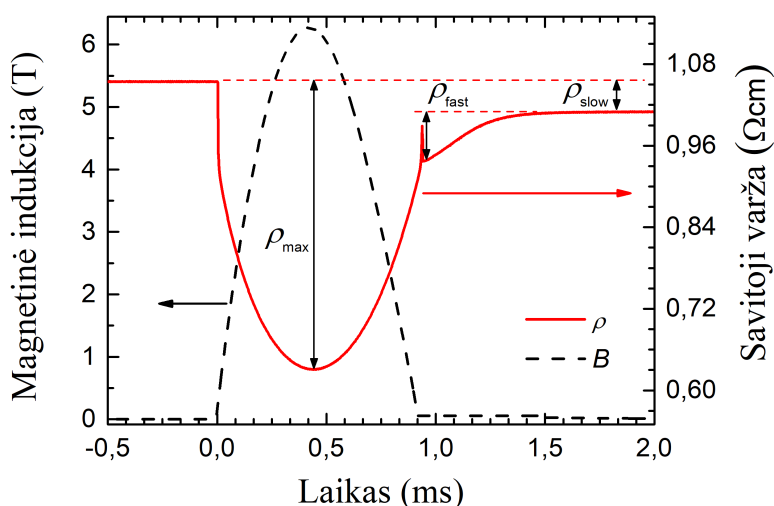
7a paveiksle pavaizduoti magnetovaržos priklausomybės matavimai nuo magnetinio lauko LCMO sluoksniams 100 K ir 1,3 K temperatūroje. Čia matyti, kad manganitų sluoksniai auginti esant 3 Torr slėgiui turi didesnę magnetovaržą palyginus su sluoksniais, augintais esant 5–7 Torr slėgiui.

(a) MR priklausomybė nuo B (b) $\delta MR / \delta B$ santykio priklausomybė nuo B

7 pav.: Sluoksnių augintų skirtinguose slėgiuose magnetovaržos (a) ir jautrio magnetiniam laukui (b) priklausomybė nuo magnetinės indukcijos B .

Norint pagaminti jutiklį veikianti žemose temperatūrose, yra svarbu turėti pakankamai didelį jautrį plačiame magnetinių laukų ruože. Jautris šiuo atveju gali būti apibūdintas kaip magnetovaržos pokyčio ir magnetinio lauko pokyčio santykis $\delta MR/\delta B$. Šio santykio priklausomybė nuo magnetinės indukcijos pavaizduota 7b paveiksle. Didesniu jautriu silpnesnių magnetinių laukų ruože (< 10 T) pasižymi sluoksniai auginti esant 3 Torr slėgiui. Šie sluoksniai labiau tiktų būti panaudoti kaip magnetinio lauko jutikliai veikiantys 1,3–100 K temperatūrų ruože ir matuojantys laukus iki 10 T. Tuo tarpu ypač stiprių laukų matavimams (20–60 T), sluoksniai auginti esant 7 Torr yra perspektyvesni.

4 Elektrinės varžos relaksacija impulsiniame magnetiniame lauke



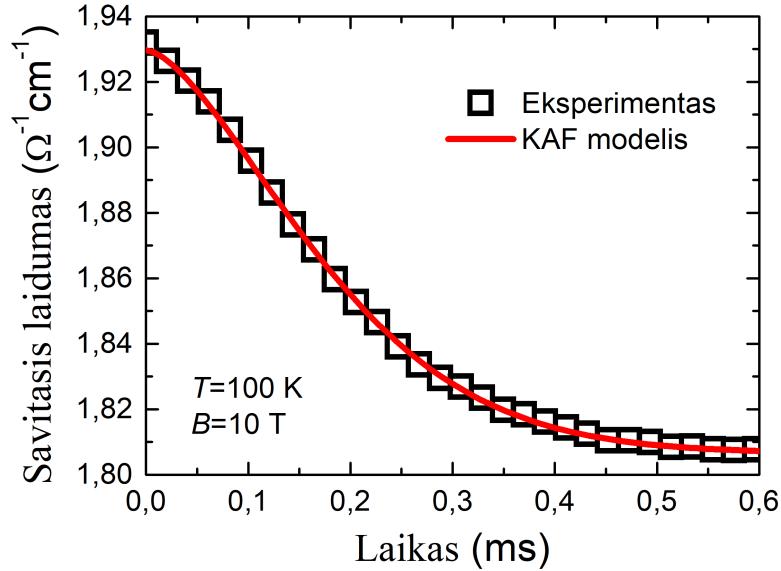
8 pav.: Magnetinio lauko impulsas (skalė kairėje) ir tiriamojo LSMO sluoksnio savitosios elektrinės varžos atsakas (dešinėje). $T = 100$ K.

Buvo pastebėta, kad temperatūrose, žemesnėse nei T_m , nanostruktūrizuotą sluoksnį paveikus magnetinio lauko impulsu, stebimas lėtas sluoksnio varžos grįžimas į pusiausvyrinę vertę impulsui pasibaigus. Šį procesą galima suskirstyti į tris charakteringus laiko intervalus: 1) ultraspartųjį, sekantį magnetinio lauko impulso kritimo trukmę (varžos relaksacijos trukmė < 1 μ s), žr. 8 pav.; 2) „greitąją“ relaksaciją, žemose temperatūrose primenančią „S“ formą (~ 100 μ s); 3) „lėtąją“ relaksaciją, kurios charakteringoji trukmė

ilgesnė nei 1 ms (žr.[P1,P2]).

Manganito sluoksnio savitasis laidumas buvo pasirinktas kaip patogiausias dydis relaksacijos nagrinėjimui. Buvo tiriama, kaip ši laidumo dinamika priklauso nuo temperatūros bei maksimalios impulsinio magnetinio lauko indukcijos laiko intervale iki 8 ms pasibaigus impulsui. Nustatyta, kad norint tiksliai aprašyti laidumo relaksaciją, reikia tyrinėti dvi skirtingais laiko ruožais dominuojančias relaksacijos rūšis: greitąją ($\tau \sim 100 \mu\text{s}$) ir lėtąją ($\tau \geq 1\text{ms}$).

Greitoji relaksacija – KAF modelis



9 pav.: LSMO sluoksnio savitasis laidumas greitosios relaksacijos proceso metu. Simboliai – eksperimentiniai duomenys, kreivė atitinka KAF modelį. $\beta = 1,55$, $\tau_{fast} = 210 \mu\text{s}$.

Buvo nustatyta, kad greitajai relaksacijai, kuri trunka apie $200 \mu\text{s}$ po magnetinio lauko impulso pabaigos [P1,P2,P6], galima pritaikyti Kolmogorov-Avrani-Fatuzzo (KAF) modelį, įskaitantį magnetinių domenų kristalituose persiorientavimą į pusiausvyrinę būseną (žr. 9 pav.). Greitoji relaksacija gerai aprašoma „suspaustu“ eksponentiniu dėsnium su eksponentės rodikliu $1 < \beta < 3$ [8–10]:

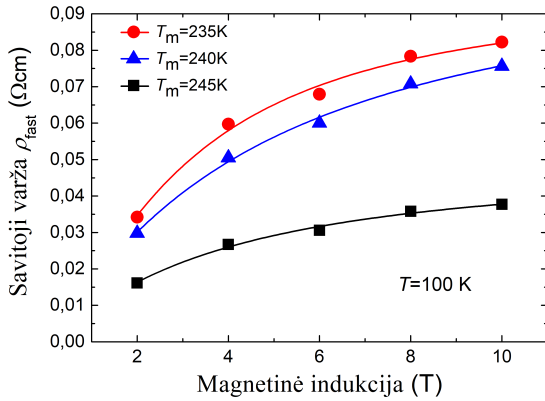
$$\sigma(t) = \sigma_{0fast} + \sigma_{fast} \exp[-(t/\tau_{fast})^\beta], \quad 1 < \beta < 3 \quad (4)$$

kur τ_{fast} yra charakteringoji relaksacijos laiko pastovioji, o σ_{0fast} ir σ_{fast} yra atitinkamai savitasis laidumas be magnetinio lauko ir pradinis liekamasis savitasis laidumas atitinkantis 8 pav. parodytą savitąją varžą $\rho_{fast} = 1/\sigma_{fast}$. 4 lentelėje pateikiami relaksacijos

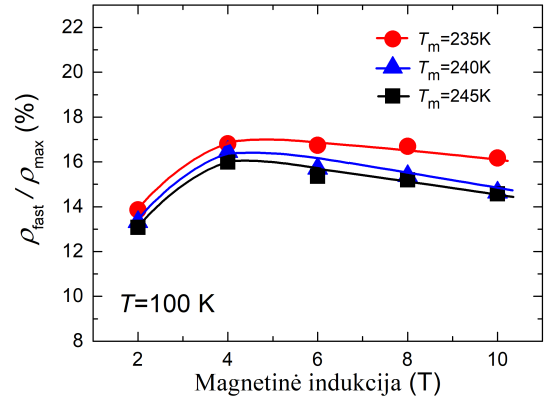
4 lentelė: Pagrindiniai greitosios relaksacijos kinetikos parametrai skirtingo storio LSMO sluoksniams.

Sluoksnio storis, nm	β	τ_{fast}	$t_{1/2}$
280	1,87	430	350
170	1,66	360	285
75	1,33	352	250

kinetikos parametrai rodo, kad didinant sluoksnio storį, τ_{fast} ir β didėja [P7]. Toks sąryšis galėtų būti paašškintas didesne netvarkios tarpkristalitinės medžiagos dalimi plonesniuose sluoksniuose, kuri lemia greitesnę atsistatymą į pusiausvyrinę padėtį. Būtent tose netvarkiose tarpkristalitinėse srityse esantys defektai manomai veikia kaip papildomi persiorientavimo traukos centrai magnetinio lauko impulsu suformuotiems domenams.



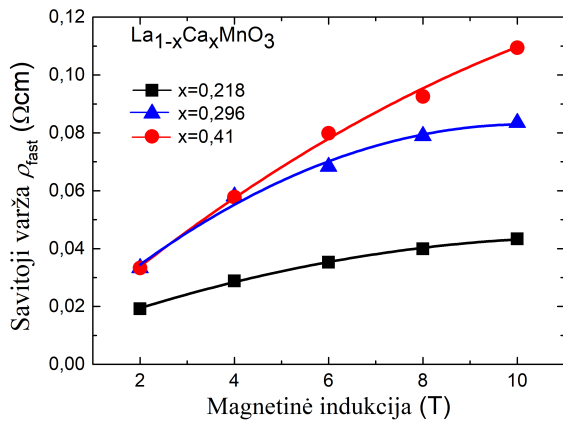
(a) Absoliutinė savitoji varža.



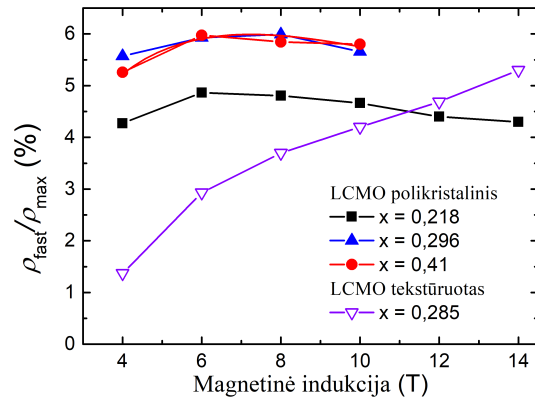
(b) Santykinė savitoji varža.

10 pav.: Absoliutinės ir santykinės liekamosios varžos priklausomybės nuo magnetinio lauko LSMO bandiniams su skirtingais T_m .

Taip pat buvo tiriama greitosios relaksacijos liekamosios varžos priklausomybė nuo magnetinio lauko (žr. pav. 10 LSMO ir pav. 11 LCMO sluoksniams). 10a ir 11a pav. matome, kad ši liekamoji varža didėja, didinant magnetinę indukciją ir turi tendenciją sotintis ties 10 T. Buvo nustatyta, kad greitosios relaksacijos liekamoji varža proporcinga sluoksnio magnetovaržai ($MR = \rho_{max}/\rho_0$): kuo didesnė MR , tuo didesnė



(a) Absoliutinė savitoji varža.



(b) Santykinė savitoji varža.

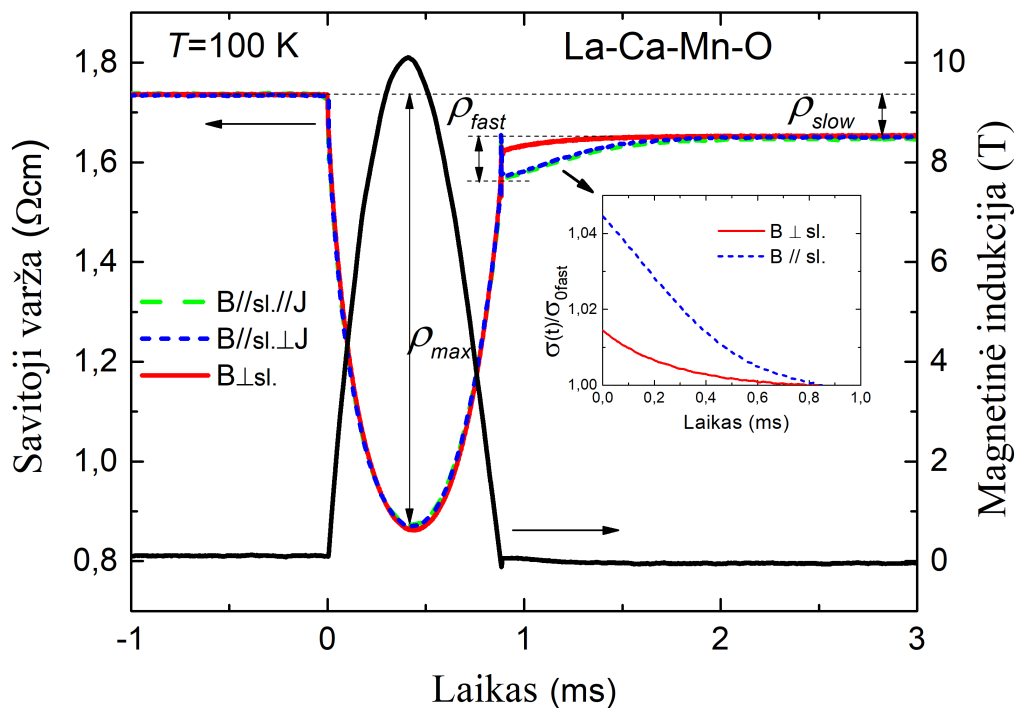
11 pav.: Absoliutinė ir santykinė liekamosios varžos priklausomybės nuo magnetinio lauko LCMO bandiniams su skirtinga Ca dalimi (x).

ρ_{fast}/ρ_0 . Todėl buvo nustatyta, kad liekamosios savitosios varžos ir maksimalaus varžos pokyčio santykis $\rho_{fast}/\rho_{max} = (\rho_{fast}/\rho_0)/(MR)$ yra beveik pastovus iki 10 T, išskyrus tekstūruotą LCMO sluoksnį, kurio $x = 0,285$ (žr. 11 pav.). Šiuos rezultatus galima paaiškinti taip: yra žinoma, kad tobulos struktūros epitaksinių sluoksnių MR įsisotina ties ~ 10 T [6]. Tai reiškia, kad praktiškai visi magnetiniai domenai suorientuoti magnetinio lauko kryptimi. Tuo tarpu polikristalinių (nanostruktūrizuotų) sluoksnių MR pradeda įsisotinti tik esant daug stipresniems magnetiniams laukams ($B > 50$ T, [P2]). Tuo būdu greitosios relaksacijos liekamoji savitoji varža yra susijusi su tvarkingų kristalinių įmagnetėjimu ir jo relaksacija. Todėl esant stipresniam magnetiniam laukui ($B > 10$ T) santykinė liekamoji varža ρ_{fast}/ρ_{max} turėtų mažėti. Tokią tendenciją stebime sluoksniui, kurio $x = 0,218$ (žr. 11b pav.). Beveik tiesiškas santykinės liekamosios varžos didėjimas tekstūruotam sluoksniui gali būti paaiškintas stipriai nehomogeniška sluoksnio, sudaryto iš didelių ir mažų kristalinių ir jų klasterių, nulemiančių skirtingas jų magnetines ir elektrines savybes, struktūra.

Siekiant sumažinti greitosios relaksacijos proceso liekamąją varžą, kurios dydis turi įtakos magnetinio lauko jutiklių, veikiančių žemoje temperatūroje, matavimo tikslumui, reikia naudoti LCMO sluoksnius, kurių varžos maksimumą atitinkanti temperatūra yra didžiausia – šiuo atveju LCMO, kurių $x = 0,218$. Santykinė greitosios relaksacijos liekamosios varžos dalis silpnai priklauso nuo magnetinio lauko ir gali būti sumažinta, naudojant sluoksnius su didesniais kristalinitais. Stiprių magnetinių laukų, kurių trukmė

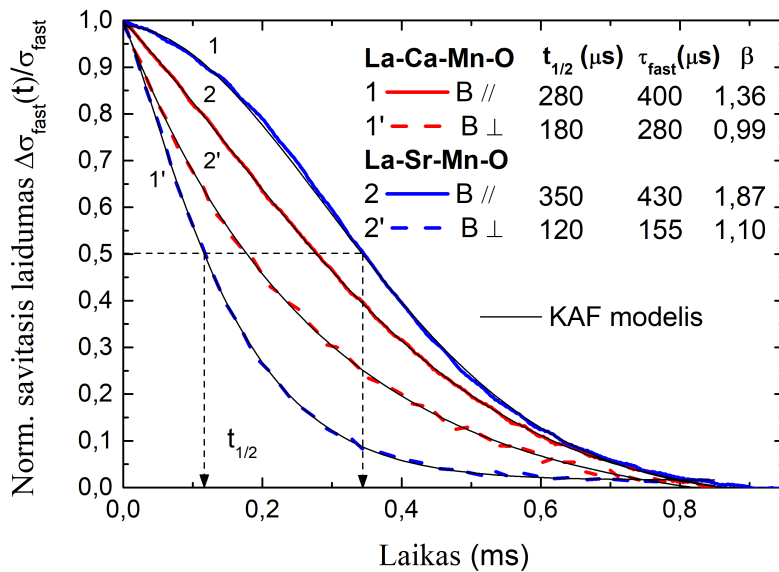
ilgesnė negu kelios milisekundės, matavimo tikslumui ši greitoji relaksacijos komponentė praktiškai neturi įtakos. Lyginant LSMO ir LCMO sluoksnius jautiklių taikymo kontekste žemose temperatūrose LCMO sluoksniai turi didesnę pranašumą dėl mažesnės liekamosios varžos ir didesnės magnetovaržos.

Greitosios relaksacijos anizotropija



12 pav.: Magnetinio lauko impulsas (dešinėje) ir savitosios varžos atsakas (kairėje) La-Ca-Mn-O sluoksniui, kai magnetinis laukas orientuotas trimis skirtingomis kryptimis sluoksnio plokštumos ir elektros srovės J atžvilgiu. Vidinis grafikas rodo normuotas savitojo laidumo dinamikas dvejoms pagrindinėms magnetinio lauko orientacijoms ($t = 0$ kai baigiasi B impulsas).

Greitosios relaksacijos anizotropijos matavimai buvo atliekami 100 K temperatūroje, kai išorinis magnetinis laukas buvo sukurtas trimis skirtingomis kryptimis sluoksnio plokštumos ir bandiniu tekančios elektros srovės atžvilgiu [P7]. Buvo nustatyta, kad greitosios varžos relaksacijos procesai yra panašūs abiem atvejais ($B \perp J$ ir $B \parallel J$) kai magnetinis laukas sukuriamas lygiagrečiai sluoksnio paviršiui (žr. pav. 12).



13 pav.: Normuoto savitojo laidumo kinetika LCMO ir LSMO sluoksniams ($d=280$ nm) kai magnetinis laukas sukurtas statmenai arba lygiagrečiai sluoksnio plokštumai. Vidinė lentelė rodo amplitudės pusiaukritimo laiko $t_{1/2}$, charakteringosios laikinės konstantos τ_{fast} ir eksponentės laipsnio rodiklio β vertes gautas taikant (4) lygtį. $T=100$ K; $B=10$ T.

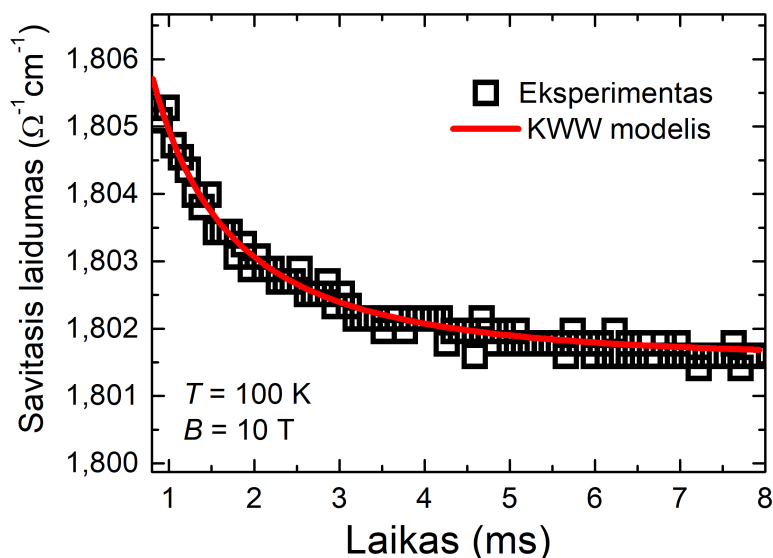
Tačiau, kai magnetinis laukas sukuriamas statmenai sluoksnio plokštumai, liekamoji varža yra žymiai mažesnė. 13 paveiksle pristatomi LSMO ir LCMO sluoksnių matavimų rezultatai 100 K temperatūroje (ferromagnetinėje būsenoje). Kaip matome savitojo laidumo kinetika $\Delta\sigma_{fast}$ turi labiau išreikštą S formą, kai magnetinis laukas pridedamas lygiagrečiai, ir trunka ilgiau ($t_{1/2} = 350$ μs) La-Sr-Mn-O sluoksniams palyginus su La-Ca-Mn-O sluoksniais ($t_{1/2} = 280$ μs). Charakteringosios laikinės konstantos τ_{fast} ir eksponentės rodiklis β gauti taikant (4) lygtį yra, atitinkamai, 430 μs ir 1,87 LSMO sluoksniams, bei 400 μs ir 1,36 LCMO sluoksniams. Stebimą anizotropiją galime paaiškinti tuo, kad ferromagnetinėje būsenoje relaksaciją nulemia magnetinių domėnų persiorientavimas į pusiausvyrinę būseną. Tuo atveju, kai sluoksnis įmagnetinamas statmenai savo plokštumos atžvilgiu ($B\perp$), relaksacija yra greitesnė dėl formos efekto – lengvoji įmagnetėjimo kryptis sluoksnyje yra lygiagreti plokštumai. $B\perp$ atveju ribojamas persiorientuojančių domėnų plėtimasis dėl tūrinių apribojimų ir nekoreliuota relaksacija tampa dominuojančiu reiškiniu. Tai patvirtino ir atlikti relaksacijos anizotropijos tyrimai skirtingo storio sluoksniams – plonesni sluoksniai parodė relaksacijos formas artimesnes eksponentei su rodikliu $\beta \rightarrow 1$.

Lėtoji relaksacija – KWW modelis

Lėtoji relaksacija gerai aprašoma Kohlrausch-Williams-Watts (KWW) modeliu, įskaitančiu magnetinių momentų sąveiką netvarkiose tarpkristalitinėse srityse, būdingą stikliškosioms sistemoms, t.y. ištemptąja eksponente su eksponentės rodikliu $0 < \beta < 1$ [11–13]:

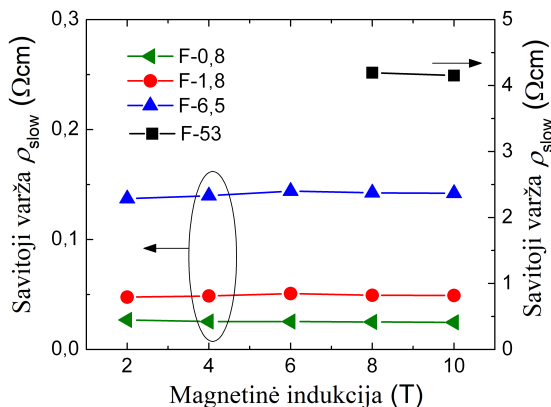
$$\sigma(t) = \sigma_{0slow} + \sigma_{slow} \exp[-((t - t_0)/\tau_{slow})^\beta], \quad 0 < \beta < 1 \quad (5)$$

kur t_0 yra laikas, kai greitoji relaksacija yra laikoma pasibaigusi ir lėtoji relaksacija pradama analizuoti, τ_{slow} yra charakterioji lėtosios relaksacijos proceso laikinė konstanta, σ_{0slow} ir σ_{slow} atitinkamai išreiškia savitąjį laidumą, kai lėtoji relaksacija yra pasibaigusi ir liekamojo savitojo laidumo amplitudę. Atitinkama savitoji varža $\rho_{slow} = 1/\sigma_{slow}$ atvaizduota 8 paveiksle. Buvo nustatyta, kad 10 T magnetiniame lauke 100 K tempera-

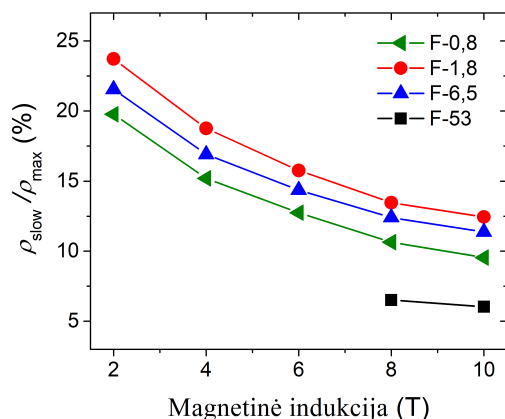


14 pav.: Savitojo liekamojo laidumo lėtoji komponentė ir jos aprašymas, naudojant Kohlrausch-Williams-Watts modelį. $\beta = 0,79$, $\tau_{slow} = 1,08$ ms. $t = 0$ kai baigiasi B impulsas.

tūroje τ_{slow} yra kelios milisekundės, o β – apie 0,7 ms ir viršija iš mikroskopinės teorijos gaunamą $3/5$ vertę, kas rodo, kad lėtajai relaksacijai būdingas vienas mechanizmas – artimoji sukinių sąveika per taškinis defektus. Didėjant temperatūrai, β artėja prie 1 (paprastosios Debajaus eksponentės), nes sluoksnis pereina į paramagnetinę fazę.

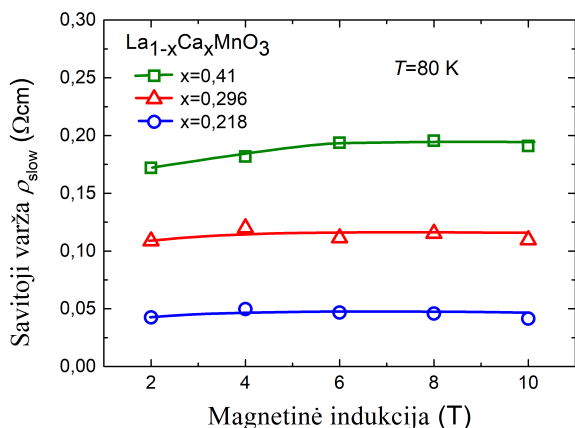


(a) Absoliutinė savitoji varža.

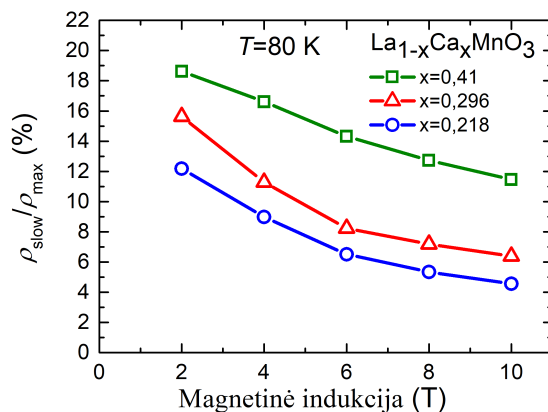


(b) Santykinė savitoji varža.

15 pav.: Absoliutinės ir santykinės liekamosios savitosios varžos priklausomybės nuo magnetinio lauko lėtamam relaksacijos procesui S3 rinkinio LSMO bandiniams su skirtingais ρ_m .



(a) Absoliutinė savitoji varža.



(b) Santykinė savitoji varža.

16 pav.: Absoliutinės ir santykinės liekamosios savitosios varžos priklausomybės nuo magnetinio lauko lėtamam relaksacijos procesui C1 rinkinio LCMO bandiniams su skirtingu x .

Santykinės (lyginant su visu varžos pokyčiu magnetinio lauko impulso metu) liekamosios varžos dalys taip pat mažėja, augant temperatūrai. Lėtosios relaksacijos liekamoji varža praktiškai nepriklauso nuo magnetinio lauko (žr. pav. 15a) ir todėl santykinė jos dalis mažėja, stiprėjant laukui (žr. pav. 15b). Galima įvertinti, kad esant megagausiniams magnetiniams laukams „lėtoji“ komponentė sudarytų mažiau nei 5%.

LCMO bandiniams iš C1 rinkinio lėtosios relaksacijos santykinės liekamosios varžos siekia 12–19 % esant 80 K temperatūrai ir 2 T magnetiniam laukui (žr. pav. 16b). Šie rezultatai yra panašūs kaip ir LSMO sluoksniams. Mažiausia santykinė liekamoji varža gaunama sluoksniuose su mažiausių matmenų kristalitais (mažiausiu x). Santykinė liekamoji varža visuose tirtuose sluoksniuose stabiliai mažėja kylant temperatūrai ir praktiškai nestebima virš 250 K.

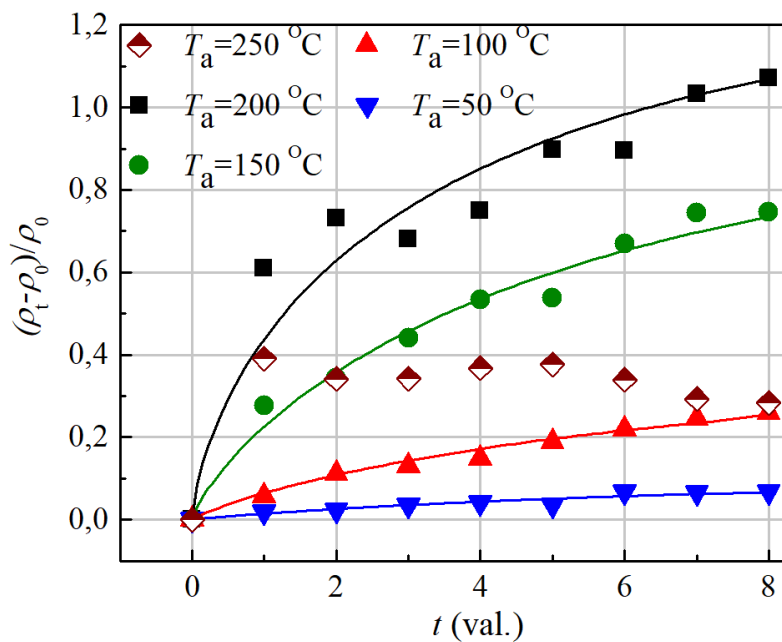
Iš tirtų nanostruktūrizuotų sluoksnių mažiausia lėtosios relaksacijos pradinės liekamosios varžos dalis kaip ir „greitosios“ relaksacijos atveju, stebima sluoksniuose su didžiausia T_m (mažiausiu x). Reikia pažymėti, kad La-Ca-Mn-O sluoksnių atveju tiek „greitosios“, tiek ir „lėtosios“ relaksacijos pradinės liekamosios varžos dalys yra mažesnės, palyginus su La-Sr-Mn-O sluoksniais [P1]. Tai dar vienas sluoksnių, legiruotų Ca, privalumas (kartu su didesniu jautriu magnetiniam laukui), kuriant magnetinio lauko jutiklius žemose temperatūrose. Didėjant temperatūrai virš T_m , sluoksniai pereina į paramagnetinę fazę ir varžos relaksacija nestebima.

5 Nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių pagreintas sendinimas

Magnetinio lauko jutiklių kūrimui labai svarbu pasiekti stabilius (mažai kintančius laike) manganitų sluoksnių parametrus – varžą ir magnetovaržą. Todėl buvo iširta, kaip pagreitinto sendinimo procedūra, atkaitinant sluoksnius 50–250 °C temperatūroje gali stabilizuoti jų savybes. 6 pav. simboliais parodyta sluoksnių varžos kinetika. Bandinių atkaitinimo prie skirtingų temperatūrų rezultatų analizei buvo naudojama 6 lygtis.

$$\frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0} \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^k\right]\right) \quad (6)$$

Parametrai $(\rho_\infty - \rho_0)/\rho_0$, τ ir k pateikti lentelėje 5, o kreivės atidėtos 17 paveiksle. Kaip matome, visi parametrai priklauso nuo atkaitinimo temperatūros. Tai rodo, kad



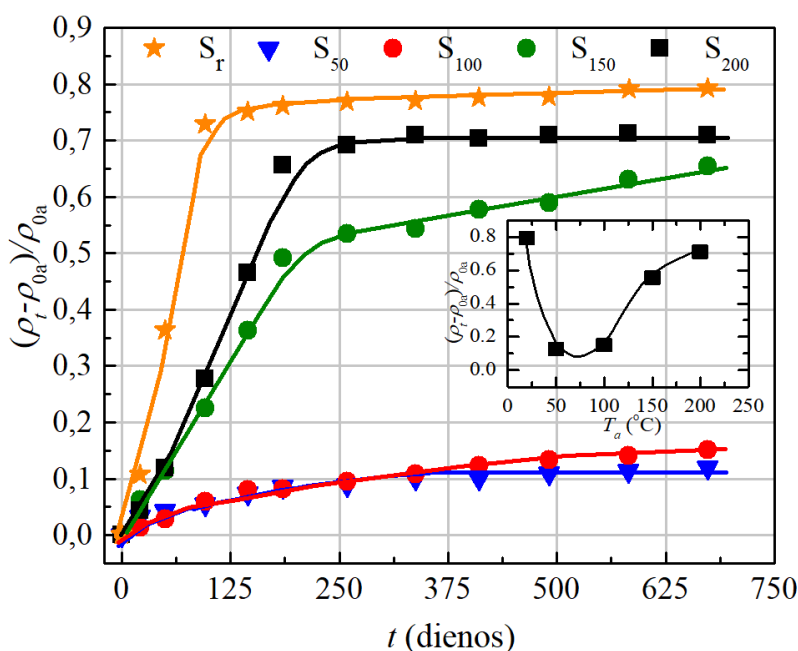
17 pav.: Santykinis savitosios varžos pokytis laike, atkaitinant bandinius įvairiose temperatūrose. Matavimai atlikti 20 °C temperatūroje. Simboliai – eksperimento duomenys, kreivės – pagal (6) lygtį.

mažiausiai keletas mechanizmų lemia senėjimo dinamiką ir tie mechanizmai turi skirtingas aktyvacijos energijas bei charakteringąsias laikines dedamąsias. 18 pav. parodytas santykinės varžos kitimas ilgą laiką (iki 675 dienų) laikant bandinius kambario tempera-

5 lentelė: Atkaitinimo dinamikos parametrai pagal 6 lygtį.

Atkaitinimo temperatūra, °C	$(\rho_\infty - \rho_0)/\rho_0$	τ , h	k
50	0,11	8,4	0,88
100	0,36	6,6	0,83
150	1	5,6	0,74
200	1,32	3,8	0,66

tūroje, eksikatoriuje (kad nebūtų drėgmės poveikio). Iš rezultatų galima daryti išvadą,



18 pav.: Santykiniai varžos pokyčiai ilgalaikio bandinių sendinimo metu po 8 valandų atkaitinimo skirtingose temperatūrose. Vidinis grafikas rodo santykinės varžos sendinimo pabaigoje (po 675 dienų) priklausomybę nuo atkaitinimo temperatūros.

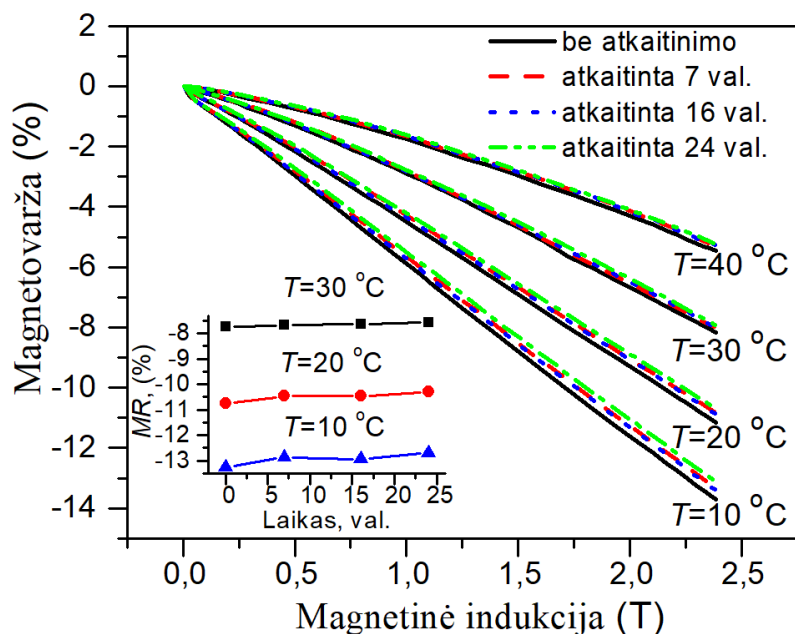
kad optimalus yra bandinių atkaitinimas argono atmosferoje 50–100 °C temperatūroje ne mažiau kaip 8 val.

Pagal Mott'o šuolinio laidumo modelį, savitoji elektrinė varža gali būti išreikšta kaip [14, 15]

$$\rho = \rho_{res} \exp(T_0/T)^{1/4}. \quad (7)$$

Pagal (7) lygtį buvo nustatytas krūvininkų lokalizacijos ilgis ir gauta, kad sendinimo metu jis mažėja, kas rodo, jog atkaitinimo metu vyksta deguonies koncentracijos mažėjimas ir jo difuzija iš sluoksnio per tarpkristalitinę sritį. Iš magnetovaržos tyrimų

silpnuose laukuose nustatyta, jog sendinimas sumažina demagnetizacijos lauką, o stipriuose laukuose magnetovarža praktiškai nekinta (žr. pav. 19). Taip pat buvo atlikti



19 pav.: MR priklausomybė nuo pridėto magnetinio lauko skirtingose temperatūrose prieš ir po bandinio skirtingos trukmės atkaitinimo (7, 16, 24 val.) prie 100 °C. Vidinis grafikas rodo MR priklausomybę (prie $B = 2,3$ T) nuo atkaitinimo laiko.

magnetovaržos tyrimai stipriuose impulsiniuose magnetiniuose laukuose iki 20 T ir gauta, kad terminis atkaitinimas iki 24 valandų magnetovaržos verčių praktiškai nepakeičia tiek žemose (100 K), tiek ir kambario temperatūrose. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad pagreintinto sendinimo metu silpnais ryšiais prisikabinęs deguonis netvarkiose tarpkristalitinėse srityse difunduoja link sluoksnio paviršiaus, taip suardydamas dvigubos pamaininės sąveikos šuolio galimybę ir didindamas šuolio ilgį (mažindamas lokalizacijos ilgį). Dėl to nesikeičia santykis $R(B)/R(0)$, ko pasekoje nekinta ir magnetovarža.

Disertacijos 4.3.2 skyriuje pateikiami pagreintinto sendinimo tyrimai, kai sluoksnis padengtas apsauginiu sluoksniu – karšto lydimo klijais. Tiriant sendinimo kinetiką parodyta, kad šiuo atveju charakteringoji laiko konstanta τ (6 formulė) yra beveik 3 kartus mažesnė, nei atviro sluoksnio atveju. Tai leidžia sumažinti terminio atkaitinimo laiką siekiant stabilizuoti sluoksnio savybes ir apsaugo sluoksnį nuo drėgmės bei išorinio poveikio.

6 Išvados

1. Nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių magnetovarža ženkliai priklauso nuo sluoksnių morfologijos ir cheminės sudėties ir gali būti aprašoma modifikuotu Mott'o šuolinio laidumo modeliu, įskaitant kristalitų ir tarpkristalitinių sričių įnašus. Magnetovaržos priklausomybė nuo magnetinio srauto tankio feromagnetinėje būsenoje gerai aprašoma atitinkamų Brillouin'o funkcijų suma $\mathcal{B}(\chi_C) + \mathcal{B}(\chi_{GB})$, tuo tarpu paramagnetinėje būsenoje – atitinkamų \mathcal{B}^2 suma.
2. Nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių varžos relaksacija, pasibaigus magnetinio lauko impulsui, pasireiškia dviejų skirtingų trukmių ruožuose: greitoji ($\sim 100 \mu\text{s}$) ir lėtoji ($\geq 1 \text{ ms}$). „Greitosios“ ir „lėtosios“ relaksacijos proceso komponentių charakteringų trukmių laiko pastoviosios ir santykinės liekamosios varžos vertės mažėja augant temperatūrai ir yra nežymios paramagnetinėje sluoksnių būsenoje.
 - 2.1 „Greitoji“ relaksacijos proceso komponentė yra gerai aprašoma Kolmogorov-Avrami-Fatuzzo modeliu su suspautąja eksponente. Gautos eksponentės rodiklio β vertės intervale 1,3–1,5 parodo, kad dominuojantis „greitosios“ relaksacijos mechanizmas yra magnetinių domenų užuomazgų susiformavimas ir persiorientavimas į pusiausvyrinę būseną. „Greitoji“ relaksacijos komponentė savo verte priklauso nuo sluoksnių mikrostruktūros ir yra keletą kartų greitesnė, kai magnetinis laukas nukreiptas statmenai sluoksnio plokštumai, kas yra nulemta sluoksnio „formos“ (demagnetizacijos) efektu.
 - 2.2 „Greitosios“ relaksacijos proceso komponentės liekamoji varža yra proporcinga sluoksnių magnetovaržai ir su magnetiniu lauku netiesiškai didėja. Santykinė liekamosios varžos dalis atžvilgiu viso varžos pokyčio magnetiniame lauke gali būti sumažinta, panaudojus sluoksnius su didesniais kristalitais. Milisekundžių trukmės stiprių magnetinių laukų matavimo tikslumui „greitoji“ komponentė turi nežymią įtaką.
 - 2.3 „Lėtoji“ magnetinės relaksacijos proceso komponentė yra gerai aprašoma Kohlrausch-Williams-Watts modeliu, nagrinėjančiu magnetinių momentų sąveiką tarpkristalitinėse srityse, pasižyminčiose sukinių stikliškosiomis savybėmis. Šio proceso kinetiką gerai aprašo išplėtoji eksponentė su rodiklio β vertėmis intervale 0,6–0,8.

- 2.4 „Lėtosios“ magnetinės relaksacijos proceso komponentės liekamoji varža yra proporcinga sluoksnio varžai ir beveik nepriklauso nuo magnetinio lauko vertės. Tuo būdu santykinė liekamosios varžos dalis mažėja, didėjant magnetiniam laukui ir stipriuose laukuose (60 T) kriogeninėse temperatūrose yra mažesnė nei 5%.
3. Nanostruktūrizuoti $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ sluoksniai, kambario temperatūroje pasižymintys didesniu jautriu magnetiniam laukui, geriau tinka magnetinio lauko jutikliams, veikiantiems aukštos temperatūrose, tuo tarpu kriogeninėse temperatūrose turėtų būti panaudoti $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ sluoksniai, pasižymintys didesne magnetovarža ir mažesnėmis santykinėmis liekamosios varžos vertėmis.
4. Nanostruktūrizuotų La-Sr(Ca)-Mn-O manganitų sluoksnių atkaitinimas argono dujų atmosferoje 100–200 °C temperatūrose pagreitina sluoksnių senėjimo procesą ir stabilizuoja jų varžą bei magnetovaržą.
- 4.1 Varžos kinetiką gerai aprašo hierarchiškai apribotos relaksacinės dinamikos modelis su ištemptąja eksponente, o varžos žymų padidėjimą galima paaiškinti dėl atkaitinimo vykstančiu deguonies koncentracijos sumažėjimu ir difuzija iš sluoksnio per tarpkristalines sritis.
- 4.2 Pagreitinto sendinimo procesas sumažina sluoksnių demagnetizacijos lauką ir dėl to silpnuose laukuose (< 1 T) sumažėja magnetovaržos anizotropija. Stipriuose magnetiniuose laukuose pagreitinto sendinimo procesas magnetovaržai turi labai mažą (< 2%) įtaką.
- 4.3 Nanostruktūrizuotų manganitų sluoksnių elektrinių parametrų stabilumą (dvejų metų laikotarpyje varžos ir magnetovaržos pokytis < 2%) galima pasiekti atkaitinant sluoksnis 24–28 val. temperatūroje, artimoje 100 °C . Sluoksnių padengimas specialia pasyvuojančia medžiaga (karštojo lydymo klijais) pagreitina sendinimo procesą beveik tris kartus ir stabilizuoja sluoksnių varžą bei magnetovaržą.

Literatūra

- [1] C. Israel, M. J. Calderón, and N. D. Mathur, “The current spin on manganites,” *Materials Today*, vol. 10, no. 10, pp. 24–32, 2007.
- [2] T. Stankevič, L. Medišauskas, V. Stankevič, S. Balevičius, N. Žurauskienė, O. Liebfried, and M. Schneider, “Pulsed magnetic field measurement system based on colossal magnetoresistance-B-scalar sensors for railgun investigation,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, no. 4, p. 044704, 2014.
- [3] S. Balevičius, N. Žurauskienė, V. Stankevič, T. Herrmannsdörfer, S. Zherlitsyn, Y. Skourski, F. Wolff-Fabris, and J. Wosnitza, “CMR-B-scalar sensor application for high magnetic field measurement in nondestructive pulsed magnets,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 11, pp. 5480–5484, 2013.
- [4] M. Schneider, O. Liebfried, V. Stankevic, S. Balevicius, and N. Zurauskiene, “Magnetic diffusion in railguns: Measurements using CMR-based sensors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 430–435, 2009.
- [5] S. Balevičius, N. Žurauskienė, V. Stankevič, S. Keršulis, V. Plaušinitienė, A. Abrutis, S. Zherlitsyn, T. Herrmannsdörfer, J. Wosnitza, and F. Wolff-Fabris, “Nanostructured thin manganite films in megagauss magnetic field,” *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 9, p. 092407, 2012.
- [6] P. Wagner, I. Gordon, L. Trappeniers, J. Vanacken, F. Herlach, V. Moshchalkov, and Y. Bruynseraede, “Spin dependent hopping and colossal negative magnetoresistance in epitaxial Nd 0.52 Sr 0.48 MnO 3 films in fields up to 50 T,” *Physical Review Letters*, vol. 81, no. 18, p. 3980, 1998.
- [7] N. Žurauskienė, S. Balevičius, P. Cimmperman, V. Stankevič, S. Keršulis, J. Novickij, A. Abrutis, and V. Plaušinitienė, “Colossal magnetoresistance properties of La_{0.83}Sr_{0.17}MnO₃ thin films grown by mocvd on lualox substrate,” *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 159, no. 1-2, pp. 64–67, 2010.
- [8] A. N. Kolmogorov, “On the statistical theory of the crystallization of metals,” *Bull. Acad. Sci. USSR, Math. Ser.*, vol. 1, pp. 355–359, 1937.
- [9] M. Avrami, “Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 8, no. 2, pp. 212–224, 1940.

- [10] E. Fatuzzo, “Theoretical considerations on the switching transient in ferroelectrics,” *Physical Review*, vol. 127, no. 6, p. 1999, 1962.
- [11] F. Kohlrausch, “Experimental-untersuchungen über die elastische nachwirkung bei der torsion, ausdehnung und biegun,” *Annalen der Physik*, vol. 234, no. 7, pp. 337–375, 1876.
- [12] J. Phillips, “Stretched exponential relaxation in molecular and electronic glasses,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 59, no. 9, p. 1133, 1996.
- [13] J. Phillips, “Microscopic theory of atomic and electronic stretched exponential relaxation in high temperature superconductors,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 340, no. 4, pp. 292–298, 2000.
- [14] M. Viret, L. Ranno, and J. D. Coey, “Magnetic localization in mixed-valence manganites,” *Physical Review B*, vol. 55, no. 13, p. 8067, 1997.
- [15] S. Ravi and M. Kar, “Study of magneto-resistivity in $\text{La}_{1-x}\text{Ag}_x\text{MnO}_3$ compounds,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 348, no. 1, pp. 169–176, 2004.

Doktoranto publikacijos disertacijos tema

Publikacijos periodiniuose leidiniuose

- P1. N. Žurauskienė, S. Balevičius, D. Pavilionis, V. Stankevič, S. Keršulis, J. Novickij (2013) Magnetoresistance Relaxation in Thin La-Sr-Mn-O Films Exposed to High-Pulsed Magnetic Fields, *IEEE Transactions on Plasma Science*, VOL. 41, NO. 10: 2830-2835.
- P2. N. Žurauskienė, S. Balevičius, D. Pavilionis, V. Stankevič, V. Plaušinitienė, S. Zherlitsyn, T. Herrmannsdörfer, J. M. Law, J. Wosnitza (2014) Magnetoresistance and Resistance Relaxation of Nanostructured La-Ca-MnO Films in Pulsed Magnetic Fields, *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 50, NO. 11: 1-4
- P3. D. Pavilionis, N. Žurauskienė (2014) Slow relaxation of resistance in nanostructured $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ films induced by pulsed magnetic fields, *Lithuanian Journal of Physics* VOL. 54: 37–40.
- P4. V. Stankevič, Č. Šimkevičius, S. Keršulis, S. Balevičius, N. Žurauskienė, D. Pavilionis, S. Tolvaišienė (2015) Improvement in the long-term stability of parameters of encapsulated magnetic field sensors based on La-Sr-Mn-O thin films. *Sensors and Actuators A*, VOL. 228: 112–117.
- P5. Č. Šimkevičius, S. Keršulis, V. Stankevič, D. Pavilionis, N. Žurauskienė, S. Balevičius, S. Tolvaišienė (2015) Accelerated ageing effects in nanostructured $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$ films. *Thin Solid Films*, VOL. 589: 331–337.
- P6. N. Žurauskienė, D. Pavilionis, S. Balevičius, V. Stankevič, A. Maneikis, V. Plaušinitienė, J. Novickij (2015) Fast Resistance Relaxation in Nanostructured La-Ca-Mn-O Films in Pulsed Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Plasma Science*, VOL. 43 NO. 10: 3445-3450.
- P7. N. Žurauskienė, D. Pavilionis, J. Klimantavičius, S. Balevičius, V. Stankevič, R. Vasiliauskas, V. Plaušinitienė, A. Abrutis, M. Skapas, R. Juškėnas (2017) Magnetoresistance Relaxation Anisotropy of Nanostructured La-Sr(Ca)-Mn-O Films Induced by High-Pulsed Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Plasma Science*, VOL. 45 NO. 10: 2773-2779.

- P8. N. Žurauskienė, D. Pavilionis, J. Klimantavičius, S. Balevičius, V. Stankevič, S. Keršulis, V. Plaušinitienė, A. Abrutis, R. Lukošė, M. Skapas, R. Juškėnas, B. Knašienė, E. Naujalis, J. M. Law (2017) Influence of MOCVD Growth Pressure on Magnetoresistance of Nanostructured La-Ca-Mn-O Films Used for Magnetic Field Sensors. IEEE Transactions on Plasma Science, VOL. 45 NO. 10: 2780-2786.

Publikacijos recenzuojamuose konferencijų leidiniuose

- PC1. N. Žurauskienė, S. Balevičius, D. Pavilionis, V. Stankevič, S. Keršulis, J. Novickij, Magnetoresistance Relaxation in Thin La-Sr-Mn-O Films Exposed to High Pulsed Magnetic Fields, 4th Euro-Asian Pulsed Power Conf. / 19th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Karlsruhe, Germany, Sept. 30–Oct. 4, 2012 : EAPPC 2012/BEAMS 2012 / Proceedings, pp. 181-1-4, 2012.
- PC2. N. Žurauskienė, S. Balevičius, D. Pavilionis, V. Stankevič, V. Plaušinitienė, Sergei Zherlitsyn, Thomas Herrmannsdoerfer, Joseph Law, Joachim Wosnitza (2014) Magnetoresistance and Resistance Relaxation of Nanostructured La-Ca-MnO Films in Pulsed Magnetic Fields, IEEE International magnetic conference INTERMAG-2014 Digest Book: 1568-1569.

Apie autorių

Dainius Pavilionis gimė 1987 metais Panevėžyje. 2006 metais baigė Panevėžio Juozo Balčikonio gimnaziją. 2010 metais baigė Kompiuterinės fizikos bakalauro studijų programą Vilniaus universiteto Fizikos fakultete. 2012 metais baigė Fizikinių technologijų ir jų vadybos magistrantūros studijų programą Vilniaus universiteto Fizikos fakultete. Tais pačiais metais įstojo į doktorantūrą Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Summary

Thin polycrystalline manganite films exhibiting the colossal magnetoresistance (CMR) effect are perspective for application of high pulsed magnetic field (up to megagauss) measurements. The applications require fast response times and it is important to avoid the performance limiting effects of magnetic nature. Research has shown that chemical composition and doping levels of manganite material have high impact on the resistivity and magnetoresistance values as well as on relaxation and recovery times after film is affected with magnetic field. The purpose of this thesis is to investigate magnetoresistance and resistance relaxation phenomena in nanostructured La-Sr(Ca)-Mn-O films, to clear up the origin of these effects and to determine the main properties of the films for the development of fast high magnetic field sensors operating at two ranges of temperatures: close to room and cryogenic.

It was demonstrated that the magnetoresistance of nanostructured manganite films strongly depends on the morphology and chemical composition of the films and can be analysed using modified Mott's hopping model taking into account contributions of both crystallites and grain boundaries. It was found that resistance relaxation process in these films after magnetic field is switched off has two different components: 'fast' ($\sim 100 \mu\text{s}$), and 'slow' ($\geq 1 \text{ ms}$). The characteristic time constants and relative parts of the remnant resistivity of these processes were systematically analysed in a wide range of temperatures and magnetic fields. It was demonstrated that the 'fast' magnetic relaxation process is well described using the Kolmogorov–Avrami–Fatuzzo model, and the nucleation and reorientation of magnetic domains into their equilibrium state is a predominant mechanism of this process, while the 'slow' magnetic relaxation process is well described using the Kohlrausch–Williams–Watts model considering the interaction of the magnetic moments in disordered grain boundaries. The obtained results enable to suggest the development of fast high pulsed magnetic field sensors operating at two ranges of temperatures: close to room and cryogenic. For the high temperature range the nanostructured La-Sr-Mn-O films are favoured, while for the cryogenic temperatures application the La-Ca-Mn-O films exhibiting higher magnetoresistance values and lower remnant resistivity are preferable. The results of the investigation of magnetic relaxation phenomena revealed the possible time scales of the sensors operation: for measurement of high pulsed magnetic fields with durations longer than milliseconds, the 'fast' resistance relaxation plays insignificant role, while the 'slow' relaxation process occurring

in milliseconds time scale could be reduced by more than two times using La-Ca-Mn-O films with higher phase transition temperature.

It was also shown that the treatment of nanostructured manganite films by annealing them in an argon atmosphere at temperatures of 100–200 °C accelerates their ageing process and stabilizes their resistance and magnetoresistance. The annealing of the manganite samples coated by a hot-melt adhesive increases the accelerated ageing process by almost three times. It was found that the ageing kinetics leads to a significant increase of the film resistivity which can be explained by the model of hierarchically limited relaxation dynamics with stretched exponential dependence typical for topologically-disordered systems, and is related with oxygen depletion and its diffusion in the grain boundaries of the nanostructured manganite films.

Eight articles were published on the subject of the dissertation in scientific journals included in Thomson Reuters Web of Science database, two article in conference proceedings. The work was presented at seven national and international conferences.