

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. ВЄРКІНА

ГОРЄЛИЙ Віталій Олександрович



УДК 538.935,537.312

**Магнеторезистивні властивості гранульованих
оксидних систем зі спин-залежним тунелюванням
електронів**

01.04.07 – фізика твердого тіла

10 – Природничі науки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, м. Харків

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Біляєв Євгеній Юрійович,
Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України, старший науковий співробітник відділу транспортних властивостей провідних та надпровідних систем

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Дехтярук Леонід Васильович,
Харківський національний університет Будівництва та архітектури МОН України, професор кафедри фізики;

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Білецький Володимир Іванович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна МОН України, доцент кафедри фізики низьких температур фізичного факультету.

Захист відбудеться «22» 09 2020 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України (61103, м. Харків, пр. Науки, 47).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України (61103, м. Харків, пр. Науки, 47).

Автореферат розісланий «21» 08 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03
кандидат фізико-математичних наук



О.І. Юзефович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження в області нанотехнологій, які активно розвиваються в останні роки, розширюють сферу застосування відомих матеріалів у формі нанопорошків в таких галузях промисловості, як електроніка, ядерна та альтернативна енергетика, металургія, обробна промисловість, оптика, аерокосмічна промисловість, медицина. Промислове застосування вимагає вдосконалення технології отримання наноматеріалів із заданими властивостями. Дослідження йдуть як шляхом поліпшення функціональних характеристик вже відомих матеріалів, так і шляхом пошуку нових функціональних матеріалів, які проявляють незвичайні поєднання фізичних властивостей. Одним з таких незвичайних матеріалів є двоокис хрому. Відомо, що порошки CrO_2 вже більше 50 років використовуються для магнітного запису інформації. Однак, в цій дисертаційній роботі автором вперше показано, що ефективну величину коерцитивної сили (H_c) і, відповідно, щільність запису інформації на магнітних носіях можна збільшити не тільки за рахунок зменшення розміру використовуваних наночастинок, але і за рахунок упорядкування частинок, що мають анізотропію форми. Наприклад, шляхом одновісного стиску. Крім традиційних магнітних властивостей інтерес до CrO_2 зумовлений ще й тим, що він є половинним металом. Тобто він має металевий характер провідності для електронів зі спіном вгору, і в той же час він є широкозонним діелектриком для електронів зі спіном вниз. Спіном електронів можна керувати шляхом докладання зовнішнього магнітного поля. Ці властивості CrO_2 як половинного металу є основою ефекту гігантського тунельного магнетоопору (ТМО) і відкривають великі перспективи для використання оксиду хрому IV при проектуванні пристроїв спін-залежної електроніки – спінтроніки. Температурна і магнітопольова поведінка тунельної провідності в кооперативних системах магнітних наночастинок сама по собі є недостатньо вивченою проблемою фізики твердого тіла. Особливістю ж даної роботи є те, що в ній вперше вивчаються транспортні властивості не простого CrO_2 в порошковому вигляді, а властивості нанокомпозитів, що складаються з частинок половинного металу діоксиду хрому, укладених в діелектричні оболонки різної товщини і складу. Такі діелектричні оболонки можуть бути контрольовано сформовані на поверхні наночастинок діоксиду хрому методом гідротермального синтезу, шляхом часткового відновлення оксиду хрому IV при високому тиску і температурі. Проведене дослідження фізичних властивостей нанокомпозитів феромагнітного половинного металу CrO_2 , в якому спінова поляризація прагне до 100% при зниженні температури сприятиме розробці наукових основ контрольованого отримання комплексу феромагнітних провідних матеріалів, які зможуть знайти застосування як в новітніх пристроях магнітного запису інформації, так і в приладах, які проектуються для управління потужними спін-поляризованими струмами. Наприклад, спіновими вентилями.

Таким чином проведені дослідження магнеторезистивних властивостей гранульованих композитів CrO_2 , зумовлених спін-залежним тунелюванням електронів, є **актуальними** та визначають тему цієї дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати, які увійшли до цієї дисертаційної роботи, отримані у відділі транспортних властивостей провідних і надпровідних систем Фізико-технічного інституту низьких температур

імені Б.І. Веркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем:

- «Низькотемпературні транспортні властивості низьковимірних та сильно анізотропних провідних систем» (1.4.10.5.10) 2017 – 2021 рр.;
- «Електронний транспорт у нових провідних та надпровідних системах» (1.4.10.5.9) 2012 – 2016 рр.

Виконання цієї роботи підтримувалося стипендією Президента України, наданої аспіранту В.О. Горелому в 2015 році.

У виконанні роботи автор дисертації брав участь спочатку як аспірант, а потім молодший науковий співробітник відділу.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є отримання нової інформації про поведінку низькотемпературного опору та тунельного магнетоопору в пресованих порошкових композитах, створених на основі наночастинок половинного металу CrO_2 . Особливістю даної роботи є те, що досліджені зразки відрізнялися як формою наночастинок, так і товщиною і хімічним складом діелектричного покриття на поверхні наночастинок з яких вони були складені.

Для досягнення мети ставилися та вирішувалися такі **задачі**:

1) експериментально визначити і пояснити кореляцію між анізотропією ТМО пресованих композитів і анізотропією магнітних властивостей наночастинок з яких вони були складені;

2) показати як форма наночастинок впливає на величину анізотропії ТМО в досліджуваних зразках;

3) продемонструвати вплив швидкості релаксації магнітної підсистеми на величину ТМО і вид петлі гістерезису ТМО;

4) виявити і пояснити вплив ефектів перколяції на низькотемпературні особливості ТМО пресованих порошків CrO_2 .

Об'єктом дослідження є процеси електронного транспорту в кооперативних системах магнітних тунельних контактів.

Предметом дослідження є вимірювання температурних залежностей опору і анізотропії магнетоопору, що проводились автором цієї роботи у відділі транспортних властивостей провідних та надпровідних систем ФТІНТ імені Б.І. Веркіна НАН України.

При проведенні експериментів було досліджено 12 зразків, що склалися з наночастинок CrO_2 круглої або голчастої форми, покритих діелектричними оболонками різної товщини і складу (природно-деградований поверхневий шар, Cr_2O_3 або $\beta\text{-CrOOH}$). Порошкові композити виготовлялися методом гідротермального синтезу на кафедрі магнітохімії Санкт-Петербурзького держуніверситету у вигляді пресованих таблеток, які були первісно атестовані методами рентгеноструктурного, рентгенівського фазового аналізу, мессбауерівської спектроскопії, електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю і т.д. Також магнітні дослідження цих зразків на вібраційному і SQUID магнітометрах проводилися у відділі магнітних і пружних властивостей твердих тіл ФТІНТ імені Б.І. Веркіна НАН України.

Методи дослідження. Вимірювання гістерезисних петель ТМО були проведені за 4-хконтактною методикою на постійному струмі з використанням магніту Капіци, що обертався навколо осі криостату. Тунельний опір і магнетоопір вивчалися в

температурному інтервалі $3,5 \div 350$ К та в інтервалі індукції магнітних полів до $\pm 1,5$ Т з можливістю плавного переходу через нуль магнітного поля.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. **Вперше** виявлений та пояснений зв'язок анізотропії величин тунельного магнетоопору як для голчастих, так і для сферичних наночастинок з напрямком осі пресування зразків.
2. **Вперше** виявлена та пояснена розбіжність температурних залежностей коерцитивної сили пресованого порошку феромагнітних гранул, вимірної магнітометром, і температурних залежностей коерцитивної сили гістерезисних кривих магнетоопору досліджуваних зразків.
3. **Вперше** виявлені два нових типи гістерезису ТМО, що пов'язані з перколяційним характером тунельної провідності гранульованої системи при низьких температурах та особливостями перемагнічування багатодоменних наночастинок порошку.
4. **Вперше** досліджені резистивні та магнеторезистивні властивості твердого розчину заміщення $\text{CrO}_2\text{-Fe}$ та було показано що додавання Fe призводить до збільшення коерцитивної сили композитів, але зменшує величину їх ТМО.

Наукове та практичне значення отриманих результатів полягає в тому що проведені в цій роботі дослідження присвячені недостатньо вивченим особливостям процесів переносу в гранульованих магнітних матеріалах. Вивчення залежності ТМО від товщини і типу діелектричного покриття гранул буде сприяти розробці наукових основ отримання нових феромагнітних провідних матеріалів із заданими властивостями на основі пресованих нанопорошків для потенційних застосувань в наноелектроніці, спінтроніці, технологіях магнітного запису інформації і т.д.

Особистий внесок здобувача. Роботи [1-7], в яких представлено основні результати дисертаційної роботи, було виконано здобувачем у співавторстві з науковим керівником та іншими співавторами. Дисертант брав безпосередню участь у розробці та створенні експериментального устаткування, в плануванні, підготовці та проведенні експериментів, систематизації експериментальних даних. Обговорення, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, формулювання основних висновків, написання статей здійснювалося разом із науковим керівником. Усі основні результати були представлені дисертантом у вигляді доповідей на наукових семінарах, радах та конференціях. Таким чином, особистий внесок дисертанта є **визначальним**.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались на міжнародних і вітчизняних конференціях [8-19] серед яких:

- Міжнародні конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (Харків, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).
- International Conferences for Young Scientists «Low Temperature Physics» (ICYS–LTP–2012, 2014, 2016, 2018) (Kharkiv).
- Міжнародні симпозиуми «ODPO-14», «ODPO-15», «ODPO-16», «ODPO-17», «ODPO-18», - Росія, Ростов на Дону.
- Tenth International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors, Chongqing (China), 2014.
- Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and Nanobiotechnology, Kiev, 2015.

- Міжнародна конференція «NANO 2016» Грузія, Тбілісі.
- Міжнародна конференція «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» Київ, 2016.

Публікації. Основні результати дисертації викладено в 7 наукових статтях [1-7], які опубліковано у провідних виданнях, 6 з яких входять до бази SCOPUS та у 16 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних та вітчизняних конференцій [9 - 24].

Структура дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, огляду літератури, розділу, присвяченому методиці експериментів, 4 експериментальних розділів, висновків та переліку використаних літературних джерел з 82 найменувань. Повний об'єм дисертації складає 135 аркушів. В роботі наведено 3 таблиці і 55 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

В анотації стисло представлено основні результати досліджень, зазначено їх наукову новизну, наведено ключові слова, а також дається список публікацій здобувача за темою дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі досліджень, відзначено новизну отриманих результатів, їх фундаментальне та прикладне значення, наведені дані про особистий внесок дисертанта, а також відомості щодо апробації отриманих результатів і дані про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертації «Огляд літератури» проведений аналіз літературних даних щодо структури та основних фізичних властивостей CrO_2 температурних і магнітопольових залежностей опору і магнетоопору оксиду Cr(IV) і порошкових композитів як кооперативних систем магнітних тунельних контактів.

У підрозділі 1.1 розглянута класифікація існуючих типів половинних металів та пояснена їх відмінність від напівметалів.

У підрозділі 1.2 розглянути особливості CrO_2 як єдиного існуючого бінарного оксиду, що є половинним металом з 100% поляризацією спінів при $T \rightarrow 0$.

У підрозділі 1.3 проаналізовані дані щодо магнітних властивостей CrO_2 .

У підрозділі 1.4 наводяться літературні дані щодо електронних транспортних властивостей CrO_2 у вигляді монокристалічних зразків та епітаксійних плівок.

Підрозділ 1.5 містить огляд літератури присвяченої магнетоопору CrO_2 .

У підрозділі 1.6 розглянутий механізм магнетоопору тунельних магнітних контактів, його зв'язок зі спіновою поляризацією та досягнуті рекордні величини ТМО в магнітних плівкових структурах.

У підрозділі 1.7 стисло викладаються теоретичні моделі ТМО, запропоновані Жульєром та Слончевським.

У підрозділі 1.8 розглядаються відомі експериментальні дані та теоретичні моделі щодо ТМО у кооперативних системах тунельних магнітних контактів.

Підрозділ 1.9 описує особливості прояву ефектів ТМО в порошкових системах.

У підрозділі 1.10 наводяться теоретичні комп'ютерні моделі, які описують вплив ефектів перколяції в системах магнітних гранул.

Аналіз літературних джерел виявив суттєву нестачу систематичних даних щодо стану поставленої проблеми. Саме тому дослідження опору та магнетоопору в композитних матеріалах на основі оксиду Cr(IV) є **актуальними**.

Другий розділ «Об'єкти дослідження, методика експериментів» присвячено опису використаних методів вимірювань опору та магнетоопору в порошкових зразках, його апаратної реалізації, конструкції кріостату, а також процедури підготовки зразків до магнеторезистивних досліджень.

У **підрозділі 2.1** описані використовувані технології синтезу, тестування і методи попереднього дослідження (атестації) експериментальних зразків.

У **підрозділі 2.2** ідеться про термометрію, конструкцію кріостату та процедури підготовки зразків для магнеторезистивних досліджень. Основні результати розділу опубліковано в роботі [1].

У **третьому розділі «Провідність пресованих порошків CrO₂ з спин-залежним тунелюванням електронів у відсутності магнітного поля» у підрозділі 3.1** наведено отримані при виконанні цієї дисертаційної роботи експериментальні результати низькотемпературних досліджень опору 10 зразків пресованих композитних систем які відрізнялися матеріалом та товщиною діелектричних оболонок наночастинок CrO₂ та формою наночастинок (округла чи голчаста). Параметри експериментальних зразків що вивчалися наведені в Табл.1.

Табл.1.

№ зразка	Матеріал поверхневої оболонки частинок	Товщина оболонки частинок d , нм	$\mu_0 H_c$, Тл $T=293\text{K}$	$\mu_0 H_c$, Тл $T \approx 5\text{K}$	ТМО, % $T \approx 5\text{K}$
1	Деградована (суміш хромової кислоти і $\beta\text{-CrOOH}$)	–	0,0429	–	– 20 (0,6 Тл)
2	Cr ₂ O ₃	1,6	0,0421	–	– 32 (0,4 Тл)
3	Cr ₂ O ₃	2,1	0,0422	0,0615	– 36,6 (0,4 Тл)
4	Стабілізований шар $\beta\text{-CrOOH}$	3,6	0,0149	0,033	– 18,6 (0,5 Тл)
5	$\beta\text{-CrOOH}$	1,73	0,0432	0,0609	– 38,15 (0,4 Тл)
6	$\beta\text{-CrOOH}$	1,8	0,0429	–	– 36 (0,15 Тл)
7	$\beta\text{-CrOOH}$	1,3	0,0429	0,0730	– 29 (0,14 Тл)
8	$\beta\text{-CrOOH}$	1,58	0,0429	0,0730	
9	$\beta\text{-CrOOH}$	~ 0,8	0,0522	0,0848	– 36,4 (0,2 Тл)
10	$\beta\text{-CrOOH}$	~ 1,2	0,0761	0,1138	– 26,1 (0,28Тл)

Вивчення залежностей тунельного опору пресованих порошків оксиду Cr(IV) від товщини і типу діелектричних оболонок наночастинок дозволило шляхом порівняння зразків № 2, 3 і 8 показати, що плив товщини діелектричної оболонки наночастинок є визначальним у порівнянні з впливом матеріалу діелектрика.

Також аналіз даних по температурним залежностям опору зразків (Рис.1) дозволів визначити температури при яких механізм електронної провідності із змінною довжиною стрибка типу Мотта змінювався температурними залежностями типу Арреніуса, властивими стрибкам електронів між найближчими сусідами.

У **підрозділі 3.2** наведені дані щодо можливого прояву перкаляційних ефектів в провідності пресованих композитів з нестабільними діелектричними оболонками що приводили до виникнення температурних залежностей провідності металевого типу. Основні результати третього розділу викладено в роботі [1].

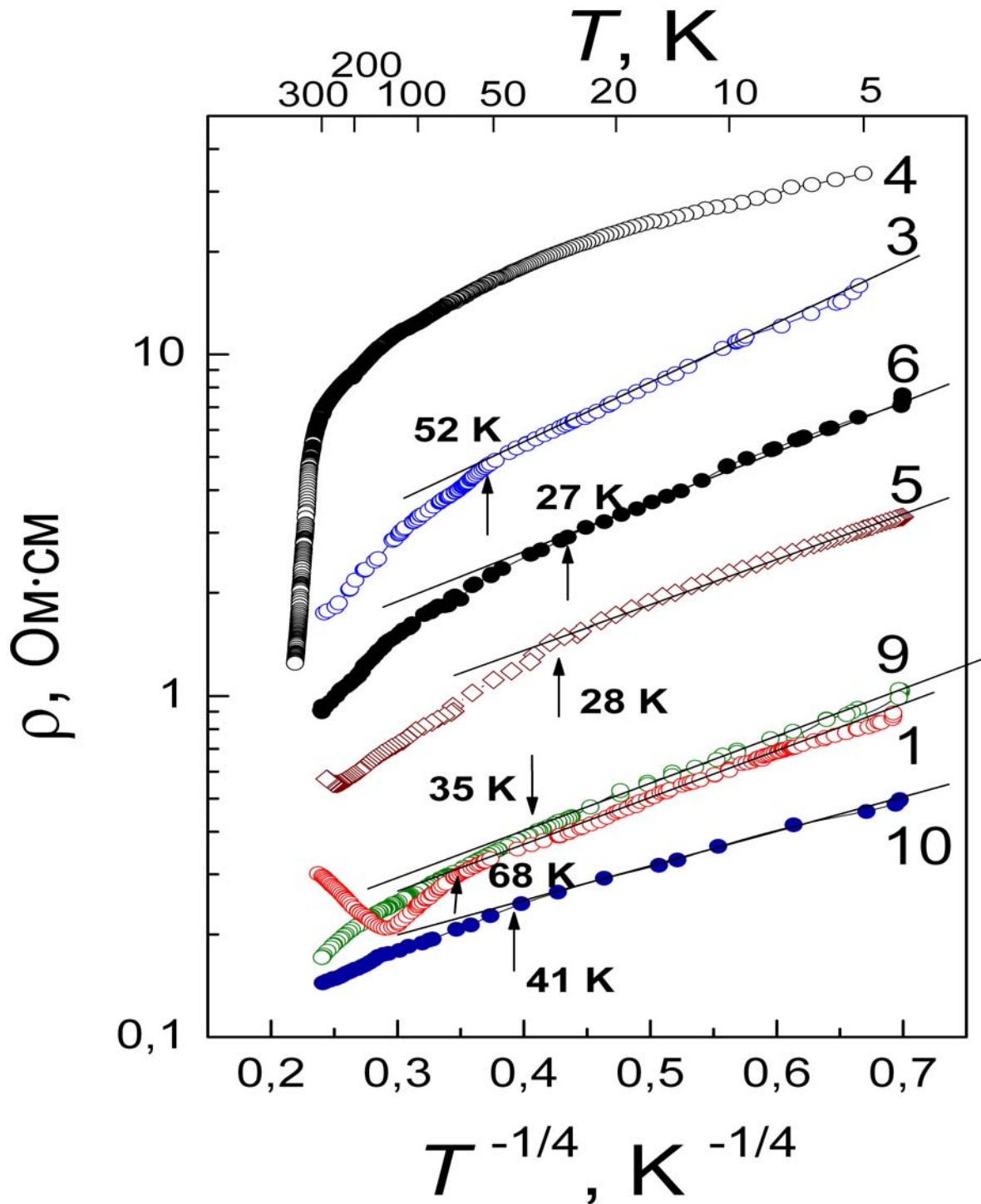


Рис. 1. Температурні залежності опору зразків. Номери кривих відповідають номерам зразків в Табл.1. Стрілками відзначені температури початку відхилення від закону Мотта.

У четвертому розділі «Особливості гістерезису тунельного магнетоопору пресованих порошків CrO_2 » досліджено поведінку магнетоопору в залежності від температури, форми наночастинок, матеріалу і товщини діелектричних оболонок для 10 зразків перелічених в Табл.1. При цьому голчасті частинки зазвичай мали довжину 302 нм. із співвідношенням довжини до діаметру $\approx 10 \div 1$ і з розбіжністю показників не більше 4 – 5%, а округлі (глобулярні) частинки мали діаметр 120 нм.

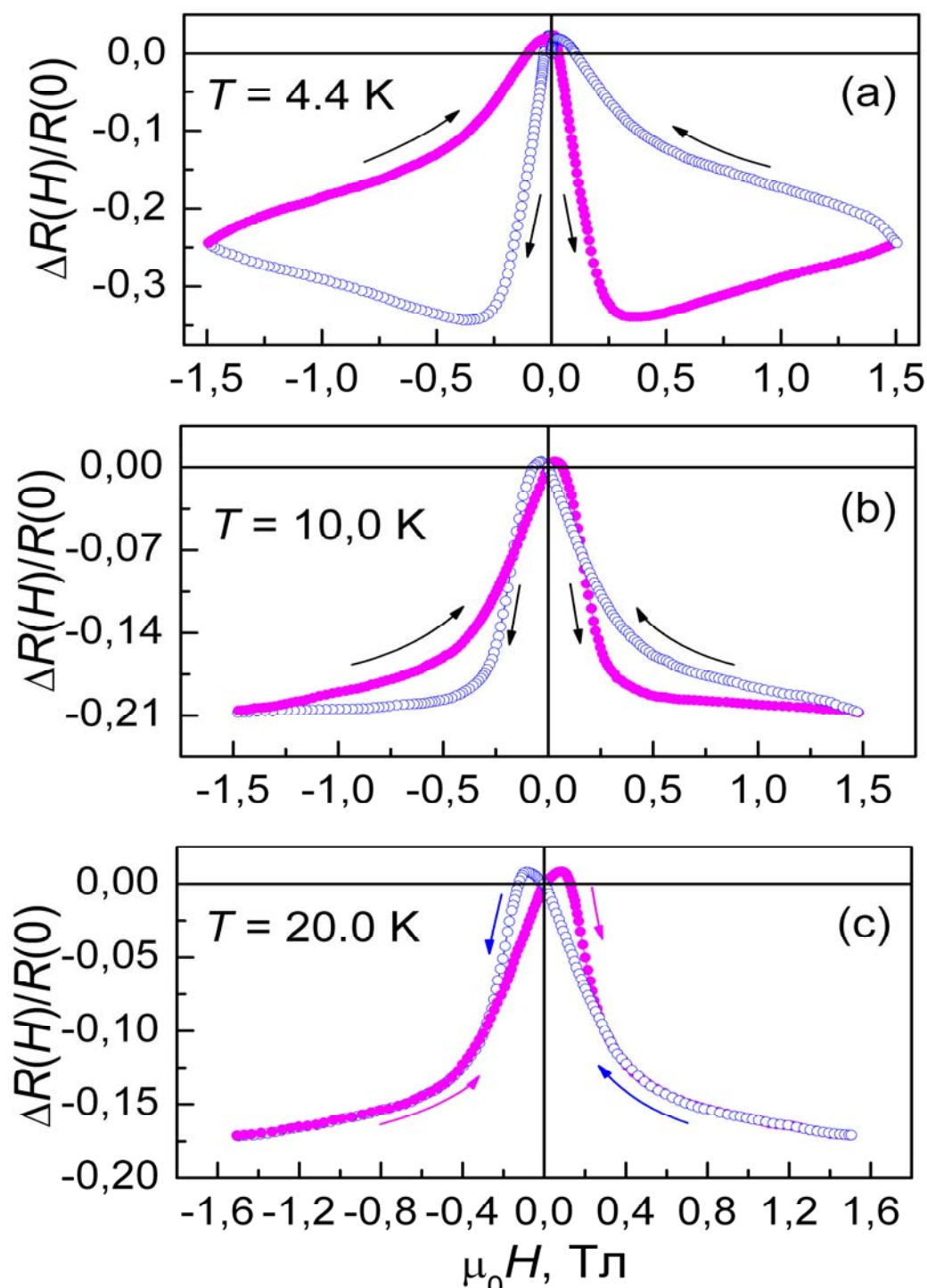


Рис. 2. Гістерезис магнетоопору зразка № 2 з голчастими наночастинками.

У **підрозділі 4.1. вперше** був вивчений вплив форми наночастинок CrO_2 і температури на вигляд петель гістерезису ТМО. Площа петель гістерезису для всіх зразків з голчастими частинками збільшувалась при зниженні температури (Рис.2). При цьому в поведінці гістерезису ТМО для зразків з голчастими наночастинками CrO_2 (як приклад, на Рис.2 зображені петлі гістерезису магнетоопору для зразка № 2) були виявлені істотні відмінності від петель гістерезису магнетоопору для зразка № 4 з наночастинками округленої форми (Рис.3). Для округлених наночастинок площа петель гістерезису ТМО була суттєво меншою.

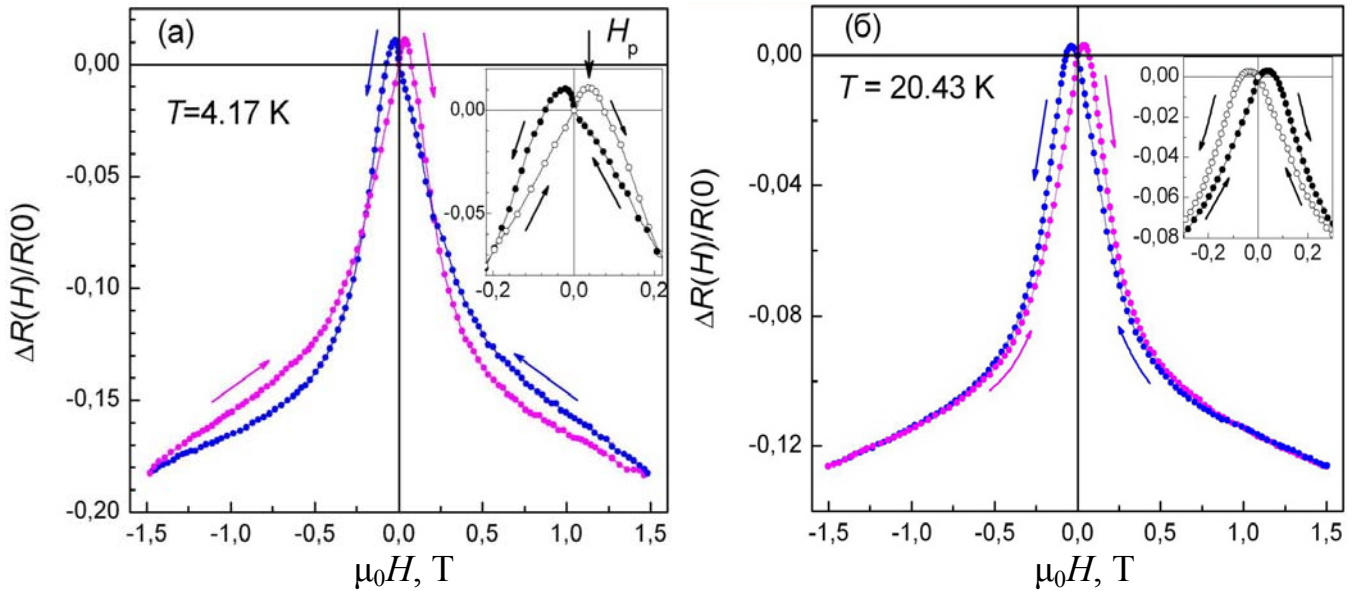


Рис. 3 Гістерезис магнетоопору зразка № 4 з сферичними наночастинками.

У **підрозділі 4.2.** описана низькотемпературна аномалія ТМО (Рис.4а, 4б, 4в). Абсолютна величина ТМО спочатку досить швидко зростає з полем (Рис.4а), а потім починає помітно спадати, утворюючи максимум. Для зразка № 3 при $T = 9,15$ К (Рис.4б) ця немонотонність проявляється вже слабо. Така поведінка при низьких температурах характерна для зразків з голчастими наночастинками. Для зразків з округленими наночастинками вона не проявляється (Рис.3).

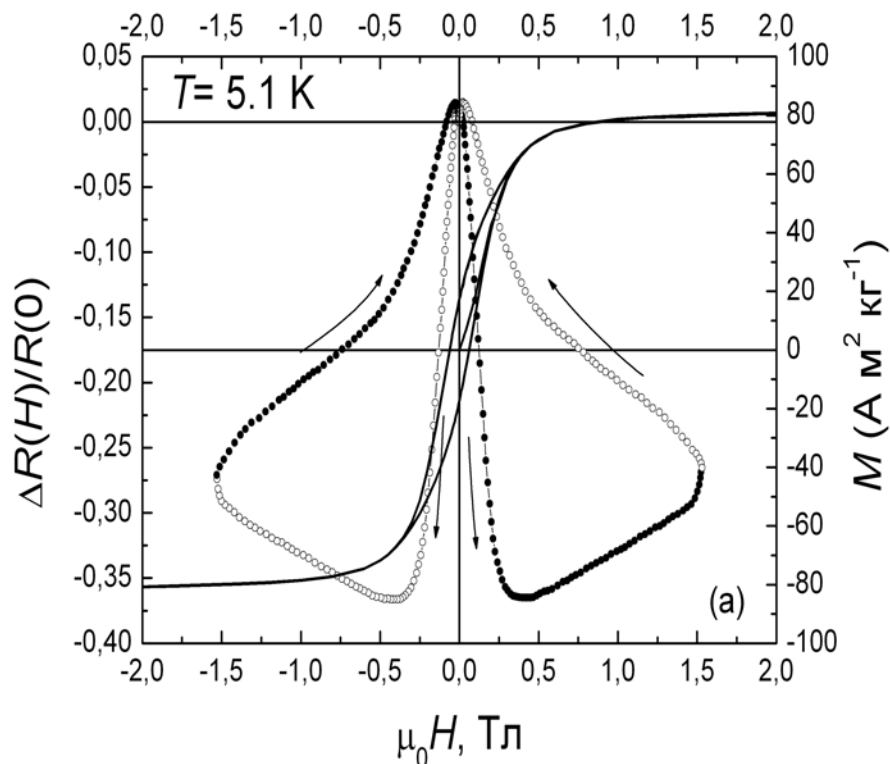


Рис. 4а. Гістерезис ТМО (ліва вісь ординат) і накладений на нього гістерезис намагніченості (права вісь ординат), для зразка № 3 при температурі $T = 5,1$ К.

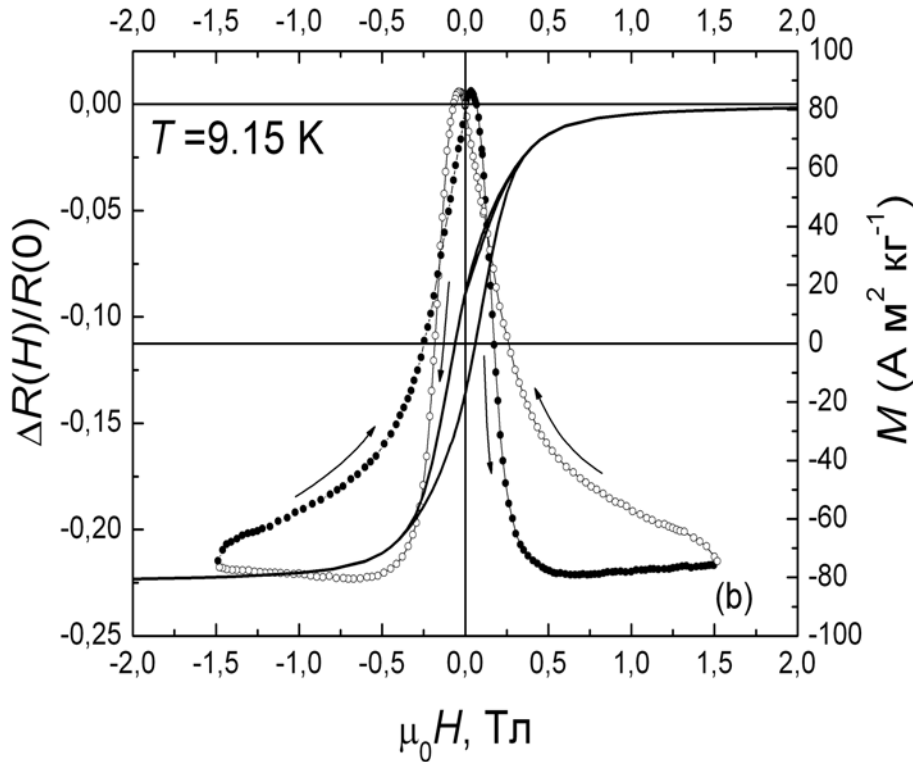


Рис. 4б. Гістерезис ТМО (ліва вісь ординат) і накладений на нього гістерезис намагніченості (права вісь ординат), для зразка № 3 при температурі $T = 9,15$ К.

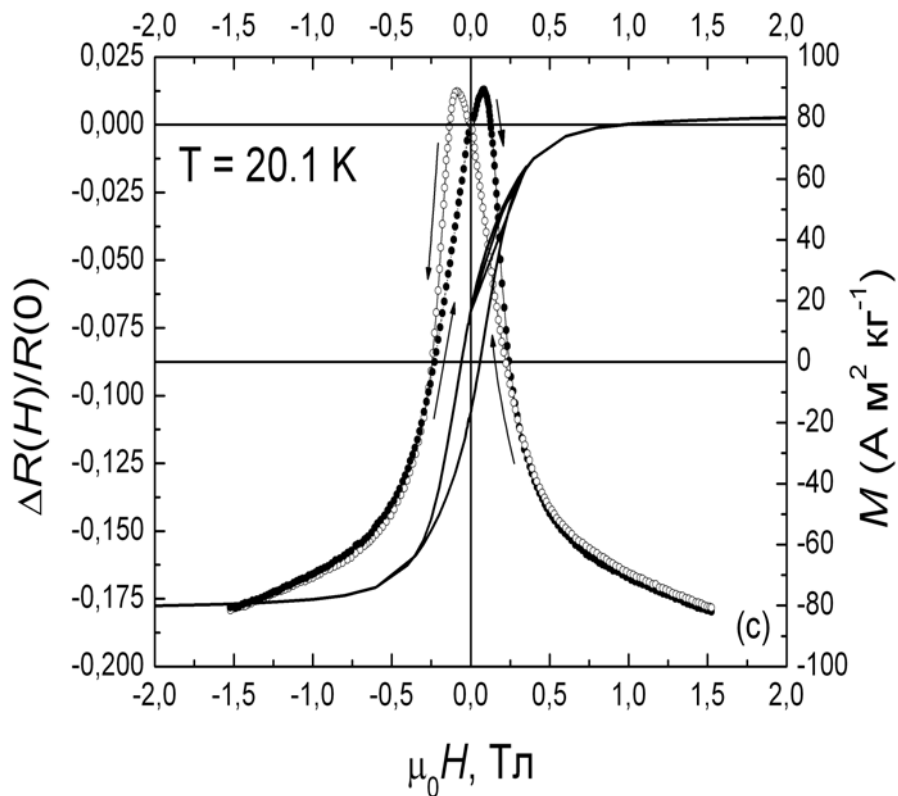


Рис. 4в. Гістерезис ТМО (ліва вісь ординат) і накладений на нього гістерезис намагніченості (права вісь ординат), для зразка № 3 при температурі $T = 20,1$ К.

У **підрозділі 4.3** розглянуто прояв перколяційних ефектів. В умовах активованої провідності для досліджених зразків число ланцюжків перколяційного кластеру що проводять струм безперервно зменшується зі зниженням температури і збільшенням магнітного поля і при низьких температурах і сильних магнітних полях перколяційна провідна сітка може звестися до єдиного провідного каналу.

Основні результати четвертого розділу опубліковані в роботі [2].

П'ятий розділ що озаглавлений «**Анізотропний тунельний магнетоопір пресованих порошків діоксиду хрому**» присвячений впливу магнітної текстури яка формується в зразках з голчастими частинками в умовах одновісного стиску.

У **підрозділі 5.1.** розглядається вплив магнітної текстури на гістерезиси ТМО (Рис.5). Струм $I = 100$ мкА спрямований в площині зразка уздовж його довгої осі. Температура $T = 4,3$ К. Кути між напрямками магнітного поля і струму вказані на малюнку. Стрілки вказують процес введення і виведення магнітного поля. Найменші значення $\Delta R(H)/R(0)$ відповідають поперечної орієнтації поля щодо площини зразка (H_{\perp} , $\varphi = 90^{\circ}$, 270°). В цьому випадку максимальна величина $\Delta R(H_{\perp})/R(0)$ в полі $H = 0,2$ Т становить 29%, а при $\varphi = 0^{\circ}$, ТМО збільшується до 36%. Максимальна ймовірність тунелювання носіїв для цього зразка досягається при поздовжньої орієнтації магнітного поля за рахунок того, що витрати на намагнічування уздовж площини зразка мінімальні.

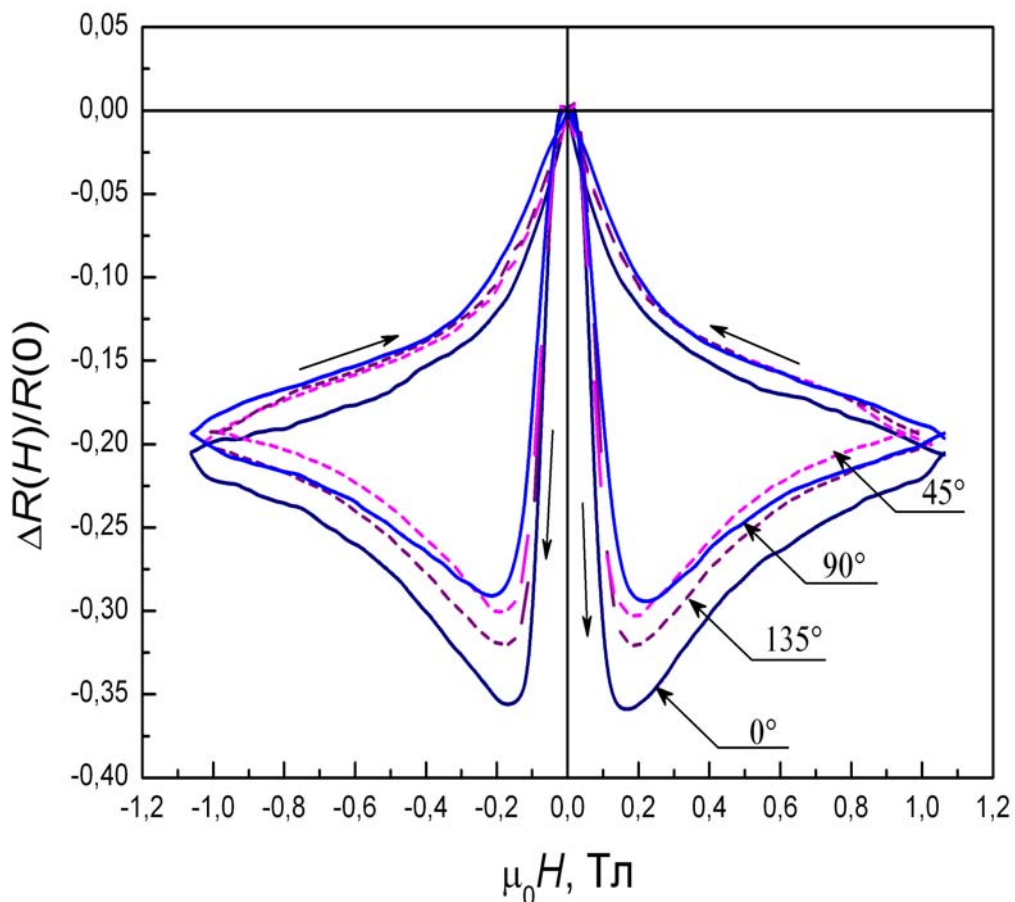


Рис.5. Петлі гістерезисів ТМО зразка № 6 при різних кутах магнітного поля по відношенню до площини зразка.

Підрозділ 5.2. Вплив форми наночастинок на форму петель гістерезису ТМО показаний на Рис.6. Експериментальні результати свідчать, що максимальна величина анізотропії ТМО (A_{\max}) зразків № 3,6,7,9 і 10 значно перевищує анізотропію зразка № 4 з округленими частинками, в якому магнітної текстури нема. Невеликі спостережувані значення анізотропії ТМО зразка № 4 можуть бути пов'язані з різницею тензора щільності уздовж і поперек осі пресування. (Відстань між частинками в площині може бути більше, ніж уздовж осі пресування.)

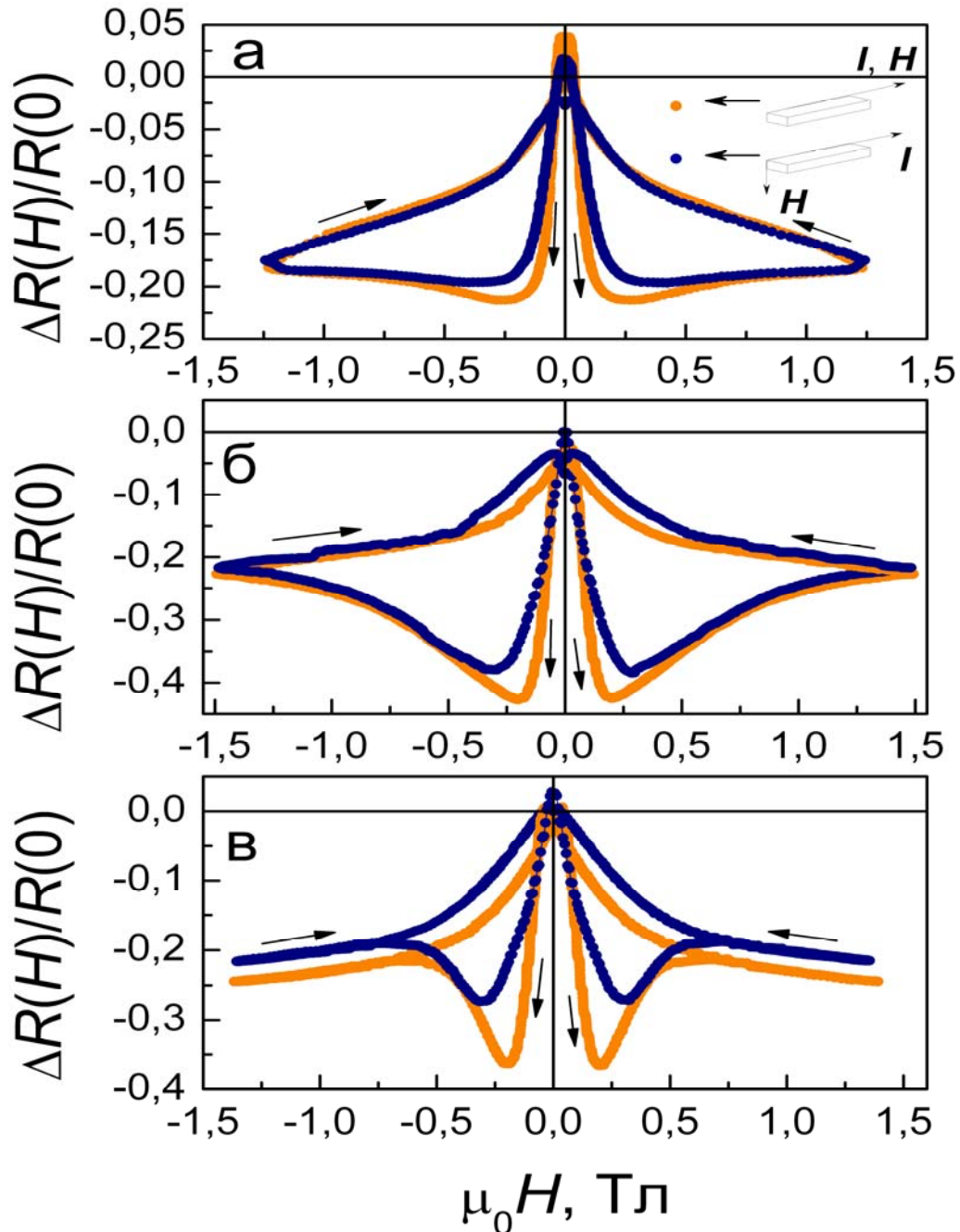


Рис.6. Гістерезиси ТМО пресованих зразків CrO_2 при $T = 4,2$ К і $I = 100$ мкА.:
 а) зразок № 4 з округлені частинки CrO_2 $\varnothing = 120$ нм., товщина Cr_2O_3 $\delta = 3,6$ нм.
 б) зразок № 9 - голчасті частинки CrO_2 $\ell = 302$ нм, товщина $\beta\text{-CrOOH}$ $\delta = 0,8$ нм.
 в) зразок № 10 - голчасті частинки CrO_2 $\ell = 302$ нм, товщина $\beta\text{-CrOOH}$ $\delta = 1,2$ нм.
 Орієнтація струму і магнітного поля зображені на вставці.

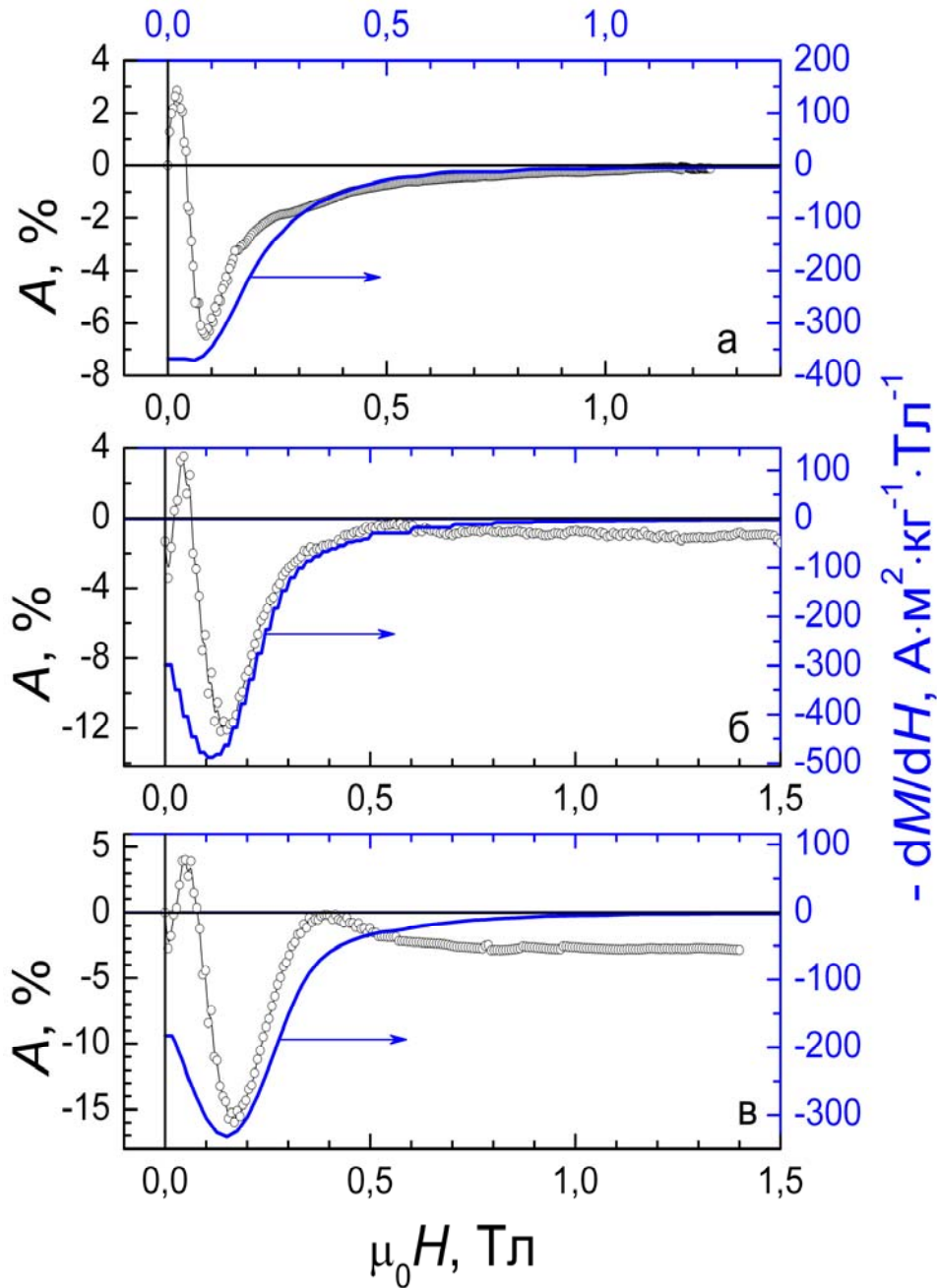


Рис. 7. Залежність анізотропії $A = [R(H_{\parallel}) - R(H_{\perp})]/R(0)$ (ліва вісь ординат) і магнітної сприйнятливості dM/dH (права вісь) від магнітного поля при $T = 4,2$ К:

- а) порошок № 4;
- б) порошок № 9;
- в) порошок № 10.

Величини анізотропії A розраховані за даними Рис.6.

Залежність анізотропії $A(H) = [R(H_{\parallel}) - R(H_{\perp})]/R(0)$ від магнітного поля є немонотонною і корелює з поведінкою намагніченості $M(H)$. Збільшення анізотропії $A(H)$ з ростом поля в малих полях змінюється її зменшенням, і з подальшим збільшенням магнітного поля анізотропія прагне до невеликої постійної величини (Рис.7). При вимірюванні намагніченості магнітне поле було орієнтоване в площині пресування зразків уздовж їх довгої осі.

Необхідно зазначити що виявлена анізотропія магнітних властивостей не відображає симетрію решітки CrO_2 , і тому вона не збігається з природною магнітокристалічною анізотропією монокристалічного CrO_2 . Подібного роду магнітна анізотропія називається наведеною. Наведена анізотропія, як правило, виникає в процесі приготування і обробки матеріалу і залежить від ряду технологічних факторів. Виявлення цих факторів становить практичний інтерес. Знаючи чинники які індукують анізотропію, можна керувати константами анізотропії, магнеторезистивними і магнітними параметрами речовини.

Дані електронно-мікроскопічних досліджень наших зразків свідчать, що голчасті і призматичні частинки CrO_2 переважно орієнтувалися в площині зразка. При такій орієнтації частинок проекція легкої магнітної осі c на напрям зовнішнього магнітного поля істотно більше в поздовжньому полі H_{\parallel} . Це призводить до більш високого значення спонтанної намагніченості M в цьому напрямку. Таким чином, магнітна анізотропія зразків № 3, 6, 7, 9, 10 що спостерігається в даній роботі, є результатом формування магнітної текстури в процесі пресування порошків. У той же час ми спостерігаємо і досить помітну анізотропію ТМО порошку, що складається із сферичних частинок (зразок № 4): $A_{\max} \approx -2,7$ при $T = 5,1$ К і $-6,4$ при $T = 4,2$ К. Звідси випливає, що механізм виникнення анізотропії ТМО пресованих порошків до кінця не зрозумілий.

Важливим результатом, що **вперше спостерігався** в наших роботах (Рис.7) є залежність величини анізотропії $A(H)$ від магнітної сприйнятливості dM/dH (тобто, від швидкості зміни намагніченості зі зміною магнітного поля в даному напрямку). Показово, що поле максимуму $d[\Delta R(H)/dH]_{\parallel}$ збігається з полем максимуму $[dM(H)/dH]_{\parallel}$: $(\mu_0 H_{\max})_{\parallel} = 0,1$ Тл. Звідси випливає, що величина і характер зміни ТМО в магнітному полі повністю відображають поведінку намагніченості. Основні результати п'ятого розділу опубліковано в роботі [3].

У шостому розділі вивчалася «Низькотемпературна спінова релаксація в пресованих нанопорошках твердих розчинів CrO_2 з домішками заліза».

Перспективи подальшого підвищення щільності запису інформації на магнітних носіях створюваних на основі нанопорошків CrO_2 пов'язані з можливістю збільшення коерцитивної сили H_c . Одним із шляхів може бути заміна частини атомів хрому Cr(IV) на атоми заліза Fe(III) . В цьому випадку зростання H_c досягається за рахунок збільшення магнітної кристаліграфічної анізотропії при утворенні твердого розчину $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$. З метою дослідження впливу домішок заліза методом гідротермального синтезу були виготовлені два порошкових зразка – зразок № 11 і зразок № 12. Зразок № 11 являв собою порошок чистого CrO_2 , а зразок № 12 – твердий розчин заміщення $\text{CrO}_2\text{--Fe}$. Зразки мали форму паралелепіпедів з розмірами $12 \times 5 \times 3$ мм. Відстань між потенційними контактами становила ~ 8 мм. Обидва зразки склалися з частинок призматичної форми із співвідношенням діаметра частинки до її довжині $\sim 1 : 10$. Зразок № 12 містив залізо в кількості 75 ммоль заліза/1 моль хрому. Загальні особливості використаної технології синтезу описані в [6]. Частинок порошків були покриті природним деградованим шаром, який складався з суміші аморфного $\beta\text{-CrOOH}$ і деякої кількості оклюдованої хромової кислоти. З Табл. 2 видно, що при введенні домішки заліза всі магнітні властивості і параметри решітки CrO_2 змінюються.

Таблиця 2.

№ зразка	H_c , E	M , А·м ² /кг		k_{\square}	a , Å	c , Å	$V_{\text{комірки}}$, Å ³	$S_{\text{пит}}$, м ² /г	$d_{\text{эф}}$, нм
		max	res						
11	522	83,9	36,6	0,437	4,4253	2,9120	57,0265	34	24
12	761	75,3	34,6	0,459	4,4270	2,9140	57,1095	24	34

У цій таблиці: H_c – коерцитивна сила, M_{max} , M_{res} – максимальна і залишкова намагніченості зразків відповідно, k_{\square} – коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису, a і c – параметри кристалічної ґратки типу рутилу, $S_{\text{пит}}$ – питома поверхня, $d_{\text{эф}}$ – ефективний діаметр частинки.

Зазначені в Табл.2 магнітні характеристики відповідають температурі $T=293$ К. Вимірювання опору проводили за стандартною чотирьохконтактною методикою в режимі заданого струму. Результати вимірювання температурної залежності опору при вимірювальному струмі $I = 100$ мкА. показані на Рис.8.

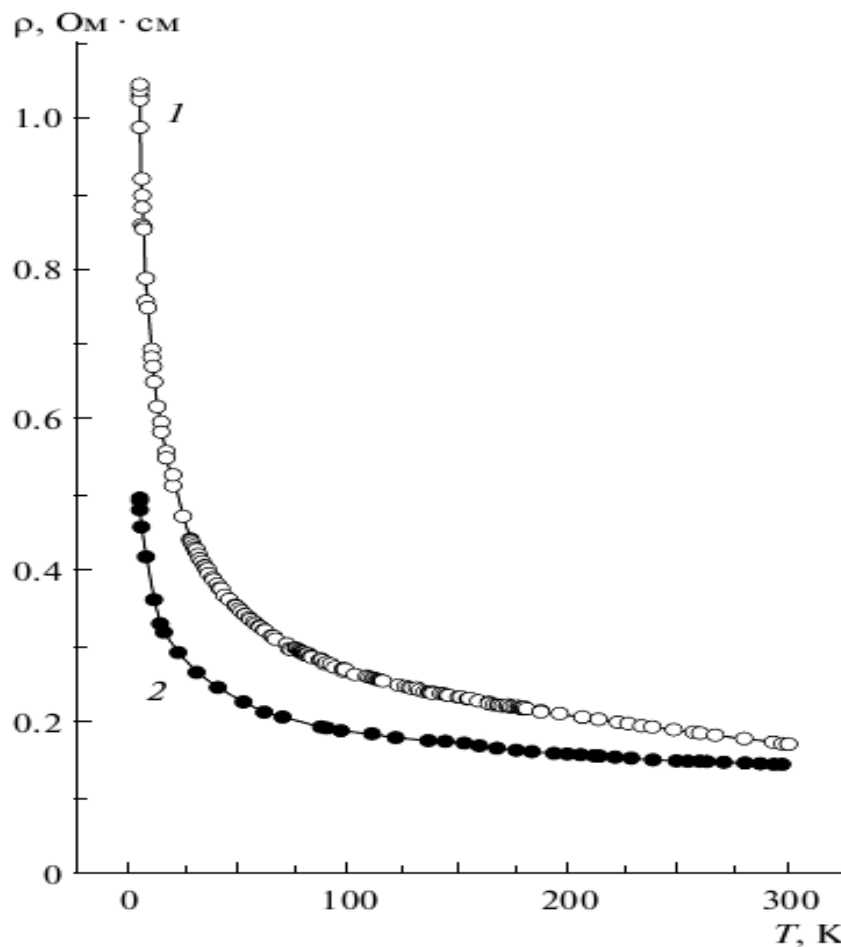


Рис. 8. Температурні залежності опору зразка № 11 (світлі кружки) і зразка № 12 (темні кружки).

Для обох зразків спостерігається неметалевий хід опору ($d\rho/dT < 0$). При $T < 20$ К залежність $\rho(T)$ близька до експоненційної, що свідчить про тунельний характер провідності.

Запис залежностей ТМО від магнітного поля проводився відповідно до звичайного протоколу запису гістерезисних циклів намагніченості. Результати вимірювання отриманих магнітопольових залежностей опору показані на Рис.9.

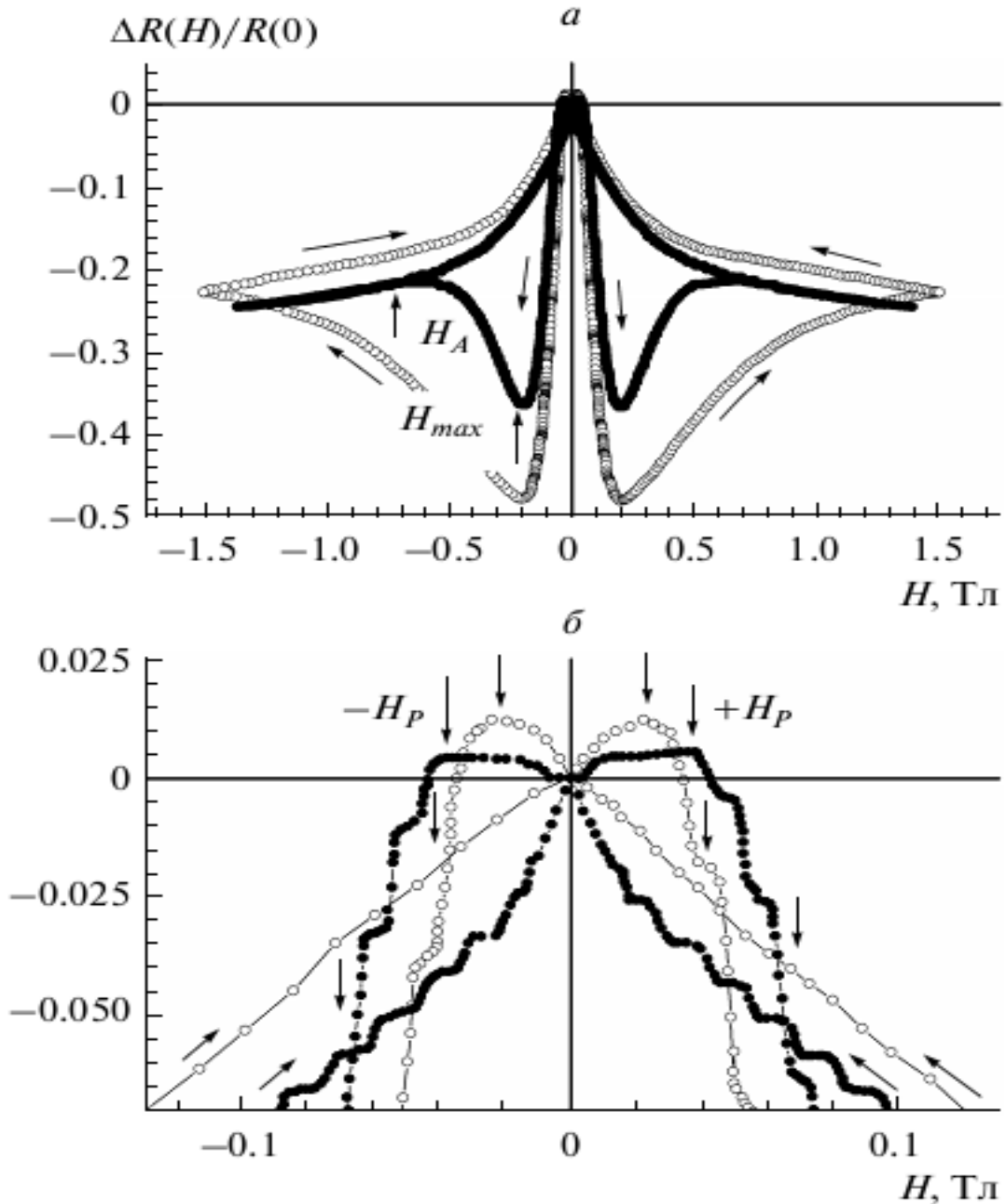


Рис. 9. а) – петлі гістерезису ТМО, зняті при температурі $T = 4,25$ К у магнітному полі, що змінювалося з часом ($dH/dt \cong 0,021$ Т/с).

Світлі кружки - зразок № 11. Темні кружки – зразок № 12;

б) – Ті ж залежності ТМО в збільшеному масштабі в області малих полів.

Гістерезисні залежності ТМО $\Delta R(H)/R(0) = [R(H) - R(0)]/R(0)$ показують два максимуми позитивного ТМО при характерних полях H , позначених $+H_p$ та $-H_p$ (Рис. 9), де H_p відповідає коерцитивній силі H_c , отриманої з магнітних вимірювань.

Величина поля коерцитивності H_p виявилася більшою для твердого розчину $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ (зразок № 12). Для цього зразка спостерігаються істотно нижчі значення негативного ТМО у порівнянні з ТМО для порошоків виготовлених з чистого CrO_2 .

Оскільки тип і якість діелектричних оболонок частинок двох зразків приблизно однакові, ми вважаємо, що більш низькі значення ТМО зразка № 12 переважно пов'язані з введенням домішки Fe. Методом мессбауерівської спектроскопії на атомах ^{57}Fe було встановлено, що іони Fe^{3+} в порошках діоксиду хрому розподіляються між трьома магнітними твердими розчинами. Окрім твердих розчинів $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ (масивна речовина і збагачений залізом поверхневий шар) і включень $\text{Cr}_{2-2x}\text{Fe}_{2x}\text{O}_3$ залізо також присутнє в оксигідроксиді хрому $\beta\text{-CrOOH}$, який входить до складу діелектричної оболонки.

Зменшення ТМО твердих розчинів $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ в порівнянні з чистим CrO_2 може бути пояснено утворенням резонансних станів на домішках Fe в поверхневому діелектричному шарі частинки. Крім того, зниження ТМО також можливо при утворенні локалізованих станів на домішках $\text{Cr}_{2-2x}\text{Fe}_{2x}\text{O}_3$, які частково знаходяться в міжгранульному діелектричному середовищі. В останньому випадку тунелювання здійснюється через ланцюжок локалізованих електронних станів, що призводить до зменшення поляризації електронів що тунелюють і до зниження негативного ТМО. Вплив домішок на провідність тунельної системи є неоднозначним. З одного боку, домішки в діелектричному прошарку можуть сприяти простому тунелюванню електронів, знижуючи опір системи. З іншого боку, ці ж домішки ускладнюють магнітне тунелювання, що призводить до зниження ТМО. Залежності $\rho(T)$ і $\Delta R(H)$ на Рис.8 і 9 відповідають цій картині.

Також Рис.9 демонструє додатковий перетин кривих $\Delta R(H)$ для прямої і зворотної розгортки магнітного поля при $H > H_p$. Такий додатковий гістерезис спостерігався і раніше [7]. Він пов'язаний з перкаляційним характером тунельної провідності гранульованої системи при низьких температурах і пояснюється перемиканням невеликої кількості струмових каналів при введенні і виведенні магнітного поля. Крім того, залежності $\Delta R(H)$ на Рис.9 показують немонотонну зміну ТМО з ростом магнітного поля, що раніше спостерігалось на порошках чистого CrO_2 [7]. Видно, що при намагнічуванні різке зростання негативного ТМО в малих полях змінюється його зменшенням, починаючи з порівняно невеликих полів $\mu H_{\max} \cong 0.2$ Т. де H_{\max} – поле максимуму негативного ТМО. Цей ефект поступово зникав при підвищенні температури або вимірювального струму. Новою особливістю низькотемпературної поведінки ТМО є більш складний характер залежності $\Delta R(H)$ для твердого розчину $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ в магнітних полях до 1,5 Т. Зменшення ТМО зразка № 12 при $H > 0,2$ Т змінюється його новим зростанням, починаючи з деякого поля H_A , рівного полю змикання гілок залежності $\Delta R(H)$ що сходять та спадають. Це означає, що при $H < H_A$ на гістерезисних кривих ТМО проявляються ефекти блокування. Очевидно, що для зразка № 11 (без домішок заліза) поле блокування H_A істотно більше експериментально досяжних нами полів, тому ефект повторного збільшення ТМО для цього зразка не спостерігався. У

блокованому стані повинна виконуватися нерівність $\tau > t_i$, де τ – час релаксації спінової системи, t_i – час спостереження. Звідси випливає, що при $H < H_A$ вид гістерезису ТМО повинен залежати від швидкості введення магнітного поля dH/dt . І дійсно, для порошку № 12 на ділянках залежностей $\Delta R(H)$ що сходять хід ТМО визначається швидкістю введення-виведення магнітного поля dH/dt (Рис.10).

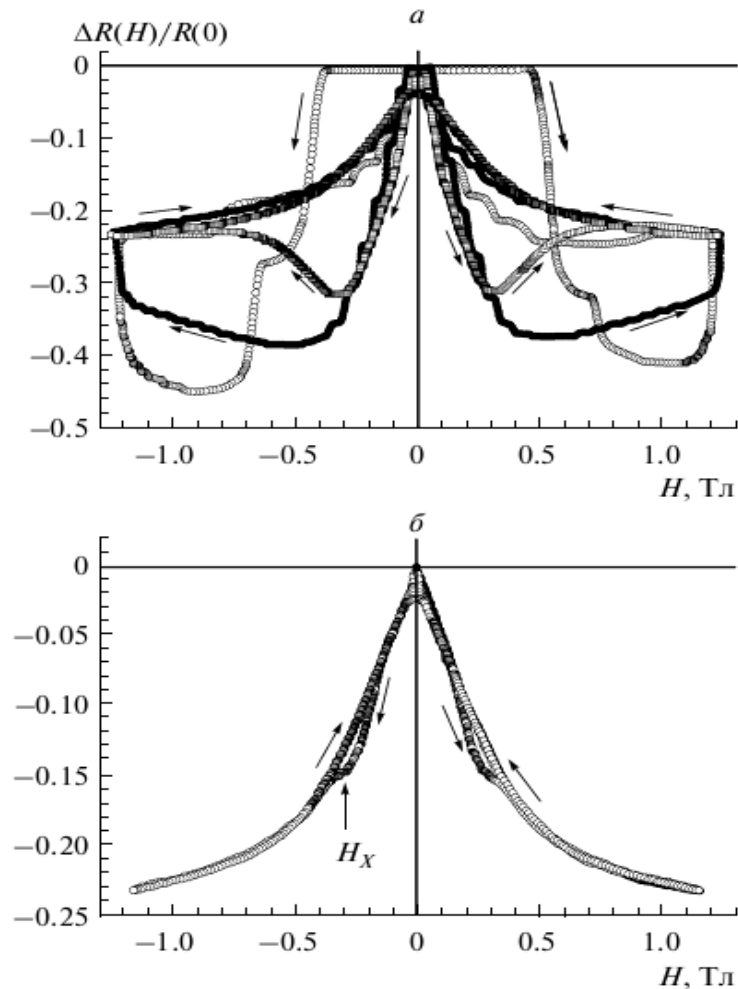


Рис.10. Гістерезисні залежності ТМО зразка № 12 при температурі $T = 4,25$ К, і струмі $I = 100$ мкА; що записані при різній швидкості розгортання магнітного поля B : а) $dB/dt = \circ - 0,25$ Т/с, $\bullet - 0,125$ Т/с, $\square - 0,037$ Т/с. б) $dB/dt = 0,0029$ Т/с

Таким чином, наші результати **вперше** показують, що максимальні величини негативного ТМО в малих полях досягаються тільки при високій швидкості зміни магнітного поля і відповідають нерівноважному стану магнітної системи.

При мінімальній швидкості $d\mu_0 H/dt = 0,0029$ Т/с, система наближається до рівноважного стану ($\tau < t_i$), і екстремум на кривих введення поля вироджується в невелике плече при H_x . Зменшення ТМО при введенні поля в цьому випадку не спостерігається (Рис.10б). Оскільки описані особливості в поведінці гістерезису $\Delta R(H)$ проявляються лише при досить низьких температурах, коли ТМО визначається провідністю невеликого числа "оптимальних" ланцюжків гранул з максимальною ймовірністю тунелювання, ясно, що процеси перемагнічування макроскопічного ансамблю феромагнітних гранул і квазіодновимірних ланцюжків

гранул (структур зі зниженою розмірністю) відбуваються за різними сценаріями. Зменшення негативного ТМО при намагнічуванні в полях $H > H_{\max}$ вказує на те, що крім зовнішнього магнітного поля і дипольного поля зразка на спінову систему діє додатковий фактор, що перешкоджає намагнічуванню. Релаксаційні процеси при перемагнічуванні гранул які входять в ланцюжки що проводять струм можуть бути пов'язані з дією полів анізотропії і з взаємодією магнітних моментів цих гранул з магнітними моментами решти зразка (сусідніх частинок, які не беруть участі в провідності). Слід зазначити, що ефект зменшення ТМО спостерігався нами у випадку голчастих частинок. В таких частинках з діаметром $24 \div 34$ нм і довжиною ~ 300 нм має місце одноосьова магнітна анізотропія, яка сприяє підвищенню коерцитивної сили і може перешкоджати перемагнічуванню зразка. Також одним з факторів, що впливають на низькотемпературну поведінку $\Delta R(H)$, може бути доменна структура частинок, які формують квазіодновимірні ланцюжки що проводять струм.

Основні результати шостого розділу дисертації опубліковано в роботі [7].

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження в ході виконання дисертаційної роботи були досягнуті всі поставлені мети. Висновки, зроблені за результатами дослідження, належать автору:

Розділ 3. Проведені дослідження дозволили **вперше** дійти до висновку що в композитній системі що складається з гранул половинного металу CrO_2 на поверхні яких методом гідротермального синтезу створювався діелектричний шар, зміна товщини діелектричної оболонки Cr_2O_3 надає більш помітний вплив на тунельний опір у порівнянні із заміною матеріалу діелектрика Cr_2O_3 на $\beta\text{-CrOOH}$.

Розділ 4. Експериментальні вимірювання дозволили **вперше** спостерігати ефект, невідповідності магнетопольової поведінки намагніченості і тунельного магнетоопору при $T < 15$ К. Знайдений ефект був пояснений тим що зі зниженням температури величина тунельного магнетоопору визначається не глобальною намагніченістю всього зразка, а намагніченістю тих частинок, які формують перкаляційні струмові канали. Такі частинки є зазвичай багатодоменими і мають знижену величину коерцитивної сили.

Розділ 5. Було **вперше** експериментально показане що анізотропія ТМО порошкового композиту пов'язана з різницею величини магнітної сприйнятливості наночастинок з яких він складається, якщо вимірювати її уздовж осі легкого намагнічування і перпендикулярно цієї осі. Ця різниця відбивається на поведінці тунельного магнетоопору через формування магнітної текстури в процесі пресування частинок порошку з анізотропією форми.

Розділ 6. Проведені експериментальні вимірювання **вперше** показали що додавання домішки заліза з утворенням твердого розчину $\text{Cr}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_2$ збільшує коерцитивну силу пресованого нанопорошку CrO_2 але зменшує величину його опору та тунельного магнетоопору.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Conductivity of pressed powders of chromium dioxide with spin-dependent electron tunneling: The effect of thickness and composition of dielectric layers / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, A.N. Bludov, **V.A. Horielyi**, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky // *Low Temperature Physics*. – 2019. – V. 45, Iss. 12. – P. 1281–1289.
2. Anomaly in the Temperature Dependence of the Coercive Force of an Ensemble of Ferromagnetic CrO₂ Nanoparticles under Conditions of Percolation Conductivity / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, **V.A. Horielyi**, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2019. – V. 83, Iss. 6. – P. 778-780.
3. Features of low-temperature tunneling magnetoresistance of pressed chromium dioxide CrO₂ nanopowders / Yu.A. Kolesnichenko, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, O.M. Bludov, **V.A. Horielyi**, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky // *Low Temperature Physics*. – 2017. – V. 43, Iss. 5. – P. 617-624.
4. Magnetic anisotropy and anisotropic tunneling magnetoresistance of compacted half-metal CrO₂ nanopowders / N.V. Dalakova, A.N. Bludov, E.Yu. Beliayev, **V.A. Horielyi**, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2017. – V. 81, Issue 3. – P. 278-281.
5. Коэрцитивная сила системы ферромагнитных гранул половинного металла CrO₂ с перколяционным характером проводимости / Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев, **В.А. Горелый** // *East European Journal of Physics*. – 2017. – V. 4 (3). – P. 78-84.
6. Low-temperature spin relaxation in compacted powders of CrO₂ solid solutions with iron impurities / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, Yu.A. Kolesnichenko, **V.A. Horielyi**, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2016. – V. 80, Issue 6. – P. 664-667.
7. Tunnel magnetoresistance of compacted CrO₂ powders with particle shape anisotropy / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky, **V.A. Gorelyy** // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2015. – V. 79, Issue 6. – P. 789-793.
8. Features of Low Temperature Tunnel Magnetoresistance in Pressed Powder of Chromium Dioxide / **V.A. Horielyi**, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev // *Los-Alamos cond-mat/ arXiv:1602.05390* 2016.
9. Низкотемпературные особенности магниторезистивных свойств прессованного порошка диоксида хрома CrO₂ / Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев, **В.А. Горелый** // “XI Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах», December 03 - 06 2013: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2013. P. 78.
10. Туннельное магнитосопротивление прессованных порошков CrO₂ с анизотропией формы частицы / Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев, **В.А. Горелый**, О.М. Осмоловская, М.Г. Осмоловский // "Proceedings of the International meeting ОМА-17" – 2014. – V.17, N 1. – P. 38-42.
11. Effect of anisotropy of particle shape and texture of the samples on tunneling magnetoresistance of compacted CrO₂ powders / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, **V.O. Horielyi** // ICYS-LTP-2014": Conference program and book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2014 – P. 172.

12. Features of Low Temperature Tunnel Magnetoresistance in Pressed Powder of Chromium Dioxide / **V.A. Horielyi**, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev // "Ukraine-German Symposium Physics and Chemistry of Nanostructure and Biotechnology" September 21 – 25 2015: book of abstracts. – Ukraine, Kyiv, 2015 – P. 131.
13. Magnetoresistive Properties of Compacted CrO₂ Powders Doped with Fe / **V.A. Horielyi**, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev // "ICYS–LTP–2015" June 02 – 05 2015: Conference program and book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2015 – P. 35.
14. Вплив домішки заліза на процеси тунелювання електронів у пресованих порошках діоксиду хрому / **В.О. Горєлий**, Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев // XII Міжнародна Конференція «Фізичні явища в твердих тілах» December 01 2015: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2015. – P. 129.
15. Низкотемпературная спиновая релаксация в прессованных порошках твердых растворов CrO₂ с примесью Fe / Н.В. Далакова, Ю.А. Колесниченко, Е.Ю. Беляев, **В.А. Горельий**, О.М. Осмоловская, М.Г. Осмоловский // "Proceedings of the International meeting ODPO-18" 2015 Вып.18, Т.1. – С.120-124.
16. Formation of Induced Anisotropy in Compacted Chromium Dioxide Nanopowders / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, **V.A. Horielyi** // "NANO 2016" October 24 – 27 2016: book of abstracts. – Georgia, Tbilisi, 2016 – P. 78.
17. Влияние примеси железа на анизотропию туннельного магнетосопротивления прессованных порошков CrO₂ / **В.О. Горельий** // «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» Київ, 2016: тези доповідей. – Україна, Київ – С. 211.
18. Low-temperature features of tunneling magnetoresistance hysteresis in CrO₂ pressed powder with an admixture of iron: the effect of temperature and current / **V.A. Horielyi**, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev // "ICYS-LTP-2016" June 06 – 10 2016: Conference program and book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2016 – P. 137.
19. Магнитная анизотропия и анизотропное туннельное магнетосопротивление прессованных нанопорошков половинного металла CrO₂ / Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев, А.Н. Блудов, **В.А. Горельий**, О.М. Осмоловская, М.Г. Осмоловский // "Proceedings of the International meeting ODPO-19" 2016. Том 1, Вып. 19. – С. 79-82.
20. Nature of anisotropic tunneling magnetoresistance in pressed nanopowder of chromium dioxide CrO₂ / **V.A. Horielyi**, N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev // "ICPYS-LTP 2017" May 29 June 02 2017: Conference program and book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P.138.
21. Вплив перкаляції на коерцитивність пресованих порошків ферромагнітного половинного металу CrO₂ / Н.В. Далакова, **В.О. Горєлий**, Е.Ю. Беляев // XIII Міжнарод. конф. «Фізичні явища в твердих тілах» December 05 2017: book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2017. – P.115.
22. Dalakova N.V., Beliayev E.Yu. **Horielyi V.A.** Nanoparticle Shape Anisotropy and Tunneling Magnetoresistance in Compacted CrO₂ Nanopowders // "ICPYS-LTP 2018" Україна, Харків с 2018-06-04 – 2018. . – P.131.
23. Аномальная температурная зависимость коэрцитивной силы ансамбля ферромагнитных наночастиц CrO₂ в условиях перколяционной проводимости / Н.В. Далакова, Е.Ю. Беляев, **В.А. Горельий**, О.М. Осмоловская, М.Г. Осмоловский // "Proceedings of the International meeting ODPO-21" 2018. Т. 1, Вып. 21, – С. 61-64.
24. Dependence of tunnel resistance for powders of compacted chromium dioxide nanoparticles and type of dielectric shells / N.V. Dalakova, E.Yu. Beliayev, **V.O. Horielyi** // ICYS-LTP-2019 June 3 – 7 2019: Conference program and book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2019. – P.112.

АНОТАЦІЯ

Горелый В.О. Магнеторезистивні властивості гранульованих оксидних систем зі спін-залежним тунелюванням електронів – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б.І. Веркіна НАН України, Харків, 2020.

Досліджені магнеторезистивні явища в пресованих порошках, складених з наночастинок половинного металу CrO_2 , з діелектричними оболонками різної товщини та складу. Показане що анізотропні властивості тунельного магнетоопору зразків, пов'язані з анізотропією форми та магнітних властивостей наночастинок з яких ці порошки склалися. Перкаляційні ефекти у зразках, що вивчалися, призводили до зміни токових каналів зі зниженням температури та збільшенням магнітного поля і дозволили вперше спостерігати незвичайні форми петель гістерезису магнетоопору. В роботі вперше виявлені причини розбіжності полів коерцитивності магнетоопору і намагнічуваності зразків яка з'являлася при зниженні температури і виявилася пов'язаною з многодоменністю деяких з голчастих наночастинок, що мали велику довжину. Показане що домішки заліза збільшують коерцитивну силу пресованого нанопорошку CrO_2 але зменшують величину опору та тунельного магнетоопору.

Отримані наукові результати становлять не тільки теоретичний але і практичний інтерес. Високі величини магнетоопору у нанокompозитах CrO_2 можуть бути використані у пристроях спінтроники, а виявлена залежність коерцитивної сили від напрямку щодо осі пресування зразків дозволяє запропонувати використання наноструктурованих поверхонь, що складаються

з голчастих наночастинок CrO_2 в якості магнітних середовищ з високою щільністю запису інформації.

Ключові слова: половинні метали, діоксид хрому, спін-залежне тунелювання, спінтроніка, магнітні тунельні контакти, наночастинки CrO_2 , пресовані порошки, діелектричні оболонки, композитні матеріали, перкаляційна провідність, анізотропія тунельного магнетоопору.

АННОТАЦИЯ

Горелый В.А. Магниторезистивные свойства гранулированных оксидных систем со спин-зависимым туннелированием электронов – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. - Физико-технический институт низких температур имени Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2020.

Исследованы магнеторезистивные явления в прессованных нанопорошках, состоящих из наночастиц половинного металла CrO_2 , покрытых диэлектрическими оболочками различной толщины и состава. Проведенные эксперименты обнаружили

анизотропию туннельного магнетосопротивления изучаемых порошковых образцов. В работе показано, что выявленная анизотропия возникает в результате одноосного сжатия порошков, состоящих из частиц с анизотропной (игольчатой) формой. Прессованные порошки с округлыми частицами обладают значительно меньшей анизотропией магнетосопротивления, по-видимому, связанной с различием тензора плотности в условиях одноосного сжатия.

Перколяционные эффекты в изучаемых образцах приводили к изменению конфигурации токовых каналов с понижением температуры и увеличением магнитного поля и позволили впервые наблюдать необычные формы петель гистерезиса магнетосопротивления с самопересечением, обусловленные гистерезисным переключением токовых каналов при вводе и выводе поля.

В работе впервые выявлены причины расхождения величин полей максимумов туннельного магнетосопротивления и величин коэрцитивной силы, определяемой при исследовании намагниченности образцов. Данный эффект усиливается с понижением температуры и связан с многодоменностью игольчатых наночастиц, имеющих бóльшую длину. Такие частицы с высокой вероятностью входят в состав перколяционного кластера, поскольку они минимизируют его сопротивление. Но облегчённый механизм их перемагничивания, связанный с движением доменных стенок, приводит к уменьшению коэрцитивной силы для ансамбля частиц, участвующих в проводимости.

В диссертации показано, что примеси железа увеличивают коэрцитивную силу прессованного нанопорошка CrO_2 но уменьшают величину сопротивления и туннельного магнетосопротивления.

Полученные научные результаты представляют не только теоретический, но и практический интерес. Высокие величины туннельного магнетосопротивления (до 36%) в некоторых образцах позволяют предложить использование исследованных в этой работе нанокмполитов половинного металла CrO_2 в таких устройствах спинтроники как мощные спиновые вентили. Выявленная зависимость величины коэрцитивной силы от направления по отношению к оси прессования образцов позволяет предложить использование наноструктурированных поверхностей, состоящих из игольчатых наночастиц диоксида хрома в качестве магнитных сред с увеличенной плотностью записи информации.

Ключевые слова: половинные металлы, диоксид хрома, спин-зависимое туннелирование, спинтоника, магнитные туннельные контакты, наночастицы CrO_2 , прессованные порошки, диэлектрические оболочки, композитные материалы, перколяционная проводимость, анизотропия туннельного магнетосопротивления.

ABSTRACT**Horielyi V.O. Magnetoresistive properties of granular oxide systems with spin-dependent electron tunneling – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics by specialty 01.04.07 – solid state physics. – B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering, NAS of Ukraine, Kharkiv, 2020.

Magnetoresistive phenomena in compacted nanopowders, composed of half-metal CrO₂ nanoparticles, coated with dielectric shells of different thickness and composition, were studied. The experiments revealed anisotropic properties of the tunneling magnetoresistance for the powder samples, which were related to the anisotropy of the shape and magnetic properties of the nanoparticles they were composed of. Percolation effects in the studied samples led to the changes in current carrying channels with decreasing temperature and increasing magnetic field, and allowed for the first time to observe unusual shapes of magnetoresistance hysteresis loops. The reasons for discrepancy between the fields of magnetoresistance coercivity and the coercivity of the samples' magnetization, which appeared with decreasing temperature were identified for the first time and were explained by the multidomain magnetic state in some of the needle-shaped nanoparticles with maximal length. The scientific results obtained in this work are not of theoretical only, but also of practical interest. The high magnitudes of tunnel magnetoresistance allow to use CrO₂ nanocomposites in spintronics devices and the anisotropy of the coercive force in pressed samples suggests using the nanostructured media for high density information recording.

Keywords: half metals, chromium dioxide, spin-dependent tunneling, spintronics, magnetic tunnel contacts, CrO₂ nanoparticles, pressed powders, dielectric shells, composite materials, percolation conductivity, tunneling magnetoresistance anisotropy.

Підписано до друку 21.08.2020 р.
Формат 60*90/16 Умов. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 874277
Друкарня «Цифра Принт»
61000, м. Харків, вул. Данилевського, 30
Тел.: (057) 7664710 <http://cifraprint.com.ua>
Свідоцтво про державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.