

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

**Научный руководитель** – д.ф.-м.н. Носов Александр Павлович

**Специальность** 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**Тема работы** – Спиновые волны в тонких пленках  
антиферромагнетиков

**Задача текущего года**

Проведение работы по изучению структурных особенностей  
антиферромагнитных тонких пленок NiO.

**Результаты, полученные в текущем году**

Найдены зависимости кристаллографических параметров решетки тонких пленок  
NiO от температуры и среды отжига. Найдена доменная структура.

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## **Апробация работы**

### **Статьи**

1. Low-frequency resonance in laminated FeGa-FeCoGa/Metglas/PZT structures / A. P. Nosov, I. V. Gribov, N. A. Moskvina, A. V. Druzhinin, S. S. Dubinin, V. V. Izyurov, K. A. Merentsova, and M. S. Artemiev // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2021. – Iss. 5. – P. 15–23. – DOI: 10.17804/2410-9908.2021.5.015-023.

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## **Апробация работы**

### **Тезисы докладов на международных конференциях**

1. Artemyev M.S., Izyurov V.V., Merencova K.A., Desyatnikov I.A., Dubinin S.S., Nosov A.P. INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT MEDIUM ON THE STRUCTURAL PARAMETERS OF NiO THIN FILMS. Сборник X Международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2023 (15-19 мая 2023 г.).
2. Merencova K.A., Izyurov V.V., Artemyev M.S., Desyatnikov I.A., Dubinin S.S., Nosov A.P. INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE PHASE COMPOSITION OF A-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> THIN FILMS. Сборник X Международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2023 (15-19 мая 2023 г.).

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

**Тезисы докладов на российских конференциях**

1. Артемьев М.С., Изюров В.В., Меренцова К.А., Десятников И.А., Дубинин С.С., Носов А.П. Влияние термообработки на структурные параметры тонких плёнок NiO. XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина (Екатеринбург), 2022. С. 87.

2. Меренцова К.А., Изюров В.В., Артемьев М.С., Десятников И.А., Дубинин С.С., Носов А.П. Зависимость фазового состава тонких пленок гематита от температуры термообработки. XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина (Екатеринбург), 2022. С. 234.

3. Изюров В.В., Носов А.П., Меренцова К.А., Артемьев М.С., Десятников И.А., Дубинин С.С. Температурные зависимости параметров мессбауэровских спектров тонких пленок  $\gamma\text{FeO}_3$ . XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина (Екатеринбург), 2022. С. 228.

4. Меренцова К.А., Изюров В.В., Артемьев М.С., Десятников И.А., Дубинин С.С., Носов А.П. Зависимость фазового состава тонких плёнок  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  от температуры термообработки. 27 Всероссийская научная конференция студентов-физиков<sup>4</sup> и молодых ученых (ВНКСФ-27), 2023, С. 46

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## Экзамены

Экзамен по философии

Июнь 2022 – “Отлично”

Экзамен по иностранному языку

Июнь 2023 – “Хорошо”

Экзамен по специальности 01.04.07

Участие в грантах

Не участвовал

Выступления на конференциях

Не выступал

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

**Таблица показателей**

Показатель	Баллы	Кол-во	Сумма
публикации в изданиях ВАК (вышедшие из печати)	20	0	0
публикации в изданиях ВАК (принятые в печать)	5	0	0
свидетельство о программах для ЭВМ, зарегистрированных в установленном порядке	20	0	0
патент	20	0	0
соавторство в монографии	5	0	0
оформленное ноу-хау	5	0	0
публикации в других изданиях (не тезисы)	2	1	2
тезисы доклада на международной конференции	5	2	10
тезисы доклада на российской конференции	3	4	12
участие в конференции с устным докладом	2	0	0
участие в конференции со стендовым докладом	1	0	0
сданный на «отлично» кандидатский экзамен	20	1	20
сданный на «хорошо» кандидатский экзамен	15	1	15
сданный на «удовлетворительно» кандидатский экзамен	10	0	0
участие в грантах в качестве: исполнителя	5	0	0
участие в грантах в качестве: руководителя	10	0	0
Общая сумма			59

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## **Исследуемая область**

Исследовали зависимости кристаллографических параметров тонких пленок NiO от температуры и среды термообработки, доменная структура.

## **Исследуемые образцы**

В качестве объектов исследования были выбраны антиферромагнитные тонкие пленки NiO толщиной 700 нм на подложке  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученные методом магнетронного распыления на переменном токе стехиометрический мишени в атмосфере 90%Ar + 10%O<sub>2</sub>. В процессе распыления температура подложки из  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляла 473 К. После распыления пленки термически обрабатывали на воздухе в диапазоне температур 573–973 К в течении 3 часов. Серия образцов прошла термическую обработку на воздухе, аргоне и кислороде при температуре 873К.

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## **Цель**

Получение тонких пленок NiO на подложках с-сапфира ( $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) высокого качества близкого к монокристаллическим.

## **Фундаментальный интерес**

Антиферромагнитный NiO, являющийся одним из наиболее распространенных и естественных оксидов переходных металлов, в последнее время стал интересным кандидатом для исследования многих новых спинтронных явлений в антиферромагнетиках, одним из которых являются собственные частоты в ТГц диапазоне. [1].

## **Практическое применение**

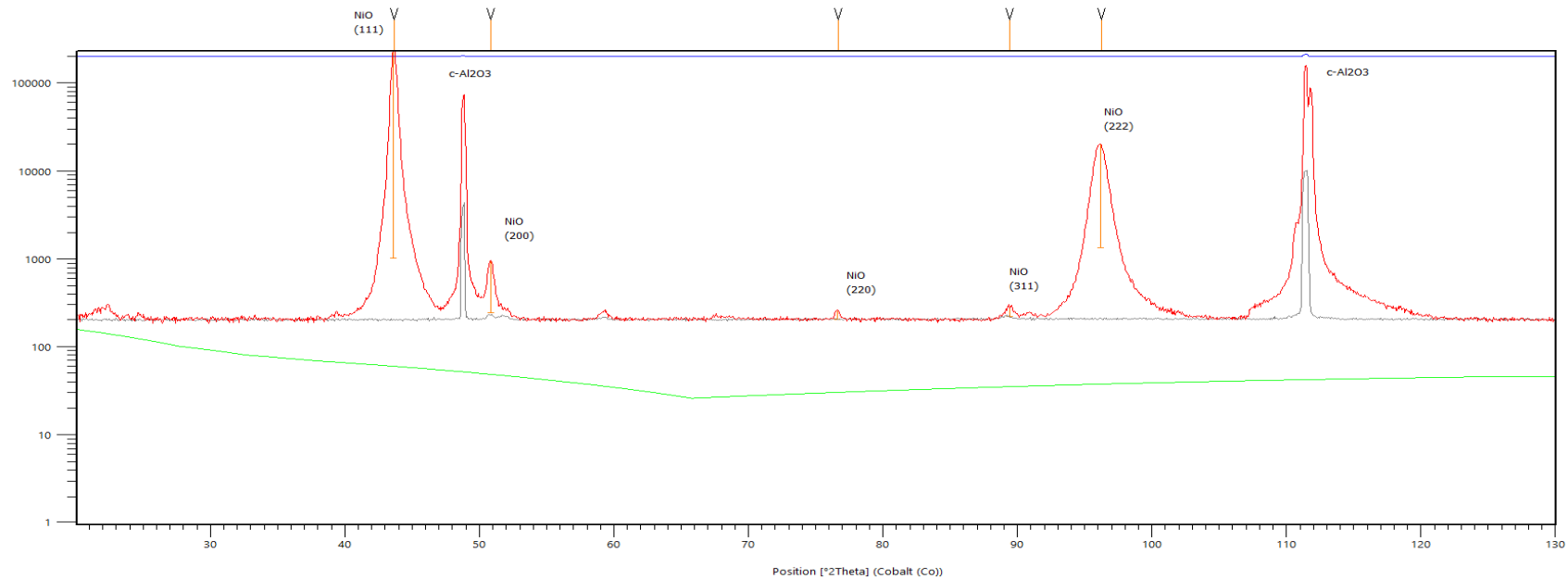
Потенциальное использование в системах телекоммуникаций для систем связи 5G и возможность продвижения перехода к формату 6G. Однако эти новаторские результаты тесно связаны с теориями и постулатами распределения их доменов, и поэтому крайне необходимо экспериментально выяснить поведение антиферромагнитных доменов [2]

1. Baierl S. et al. Terahertz-driven nonlinear spin response of antiferromagnetic nickel oxide //Physical review letters. – 2016. – Т. 117. – №. 19. – С. 197201.
2. Xu J. et al. Imaging antiferromagnetic domains in nickel oxide thin films by optical birefringence effect //Physical Review B. – 2019. – Т. 100. – №. 13. – С. 134413.



Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков

## Определение параметра решетки



Рентгеноструктурные исследования проводили с использованием дифрактометра PANalytical Empyrean. Измеряли спектры рентгеновской дифракции в копланарной геометрии. Значения параметров решетки при каждой температуре были рассчитаны методом Нельсона-Рейли [3].

Рис.1 – Рентгеноструктурные данные пленки NiO толщиной 700 нм на подложке c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков

Зависимость параметра решетки от температуры и среды термообработки

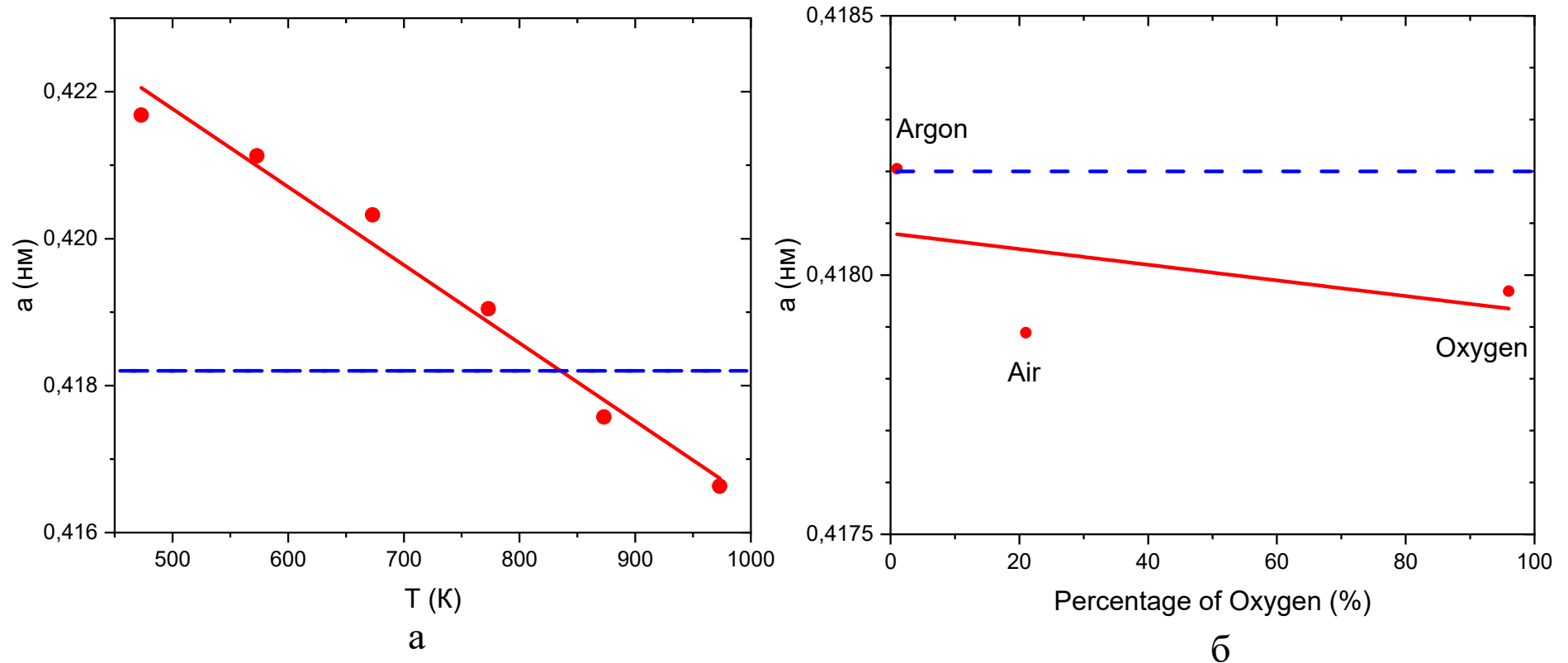
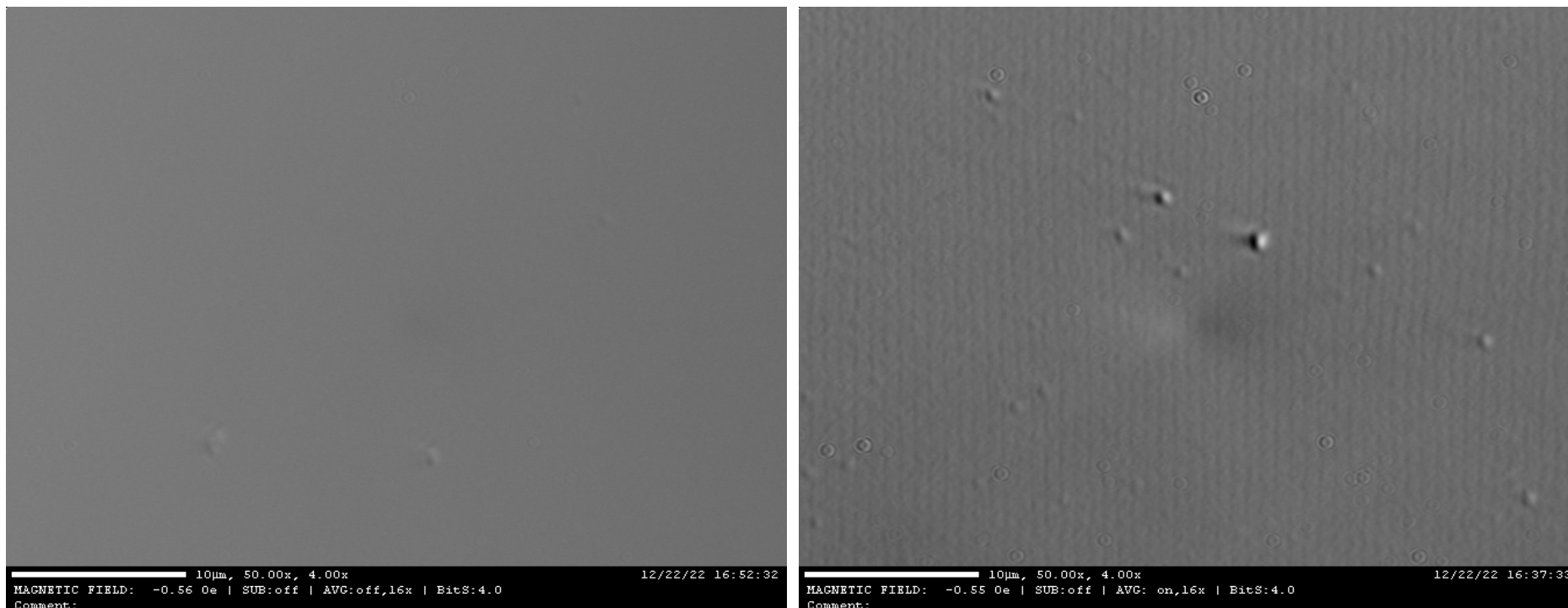


Рис.2 – Зависимость параметра решетки от температуры (а) и среды термообработки (б). Синей пунктирной линией обозначена величина постоянной решетки для монокристалла.

## Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич лаборатории нанокompозитных мультиферроиков

### Результаты измерения магнитооптического микроскопа



а

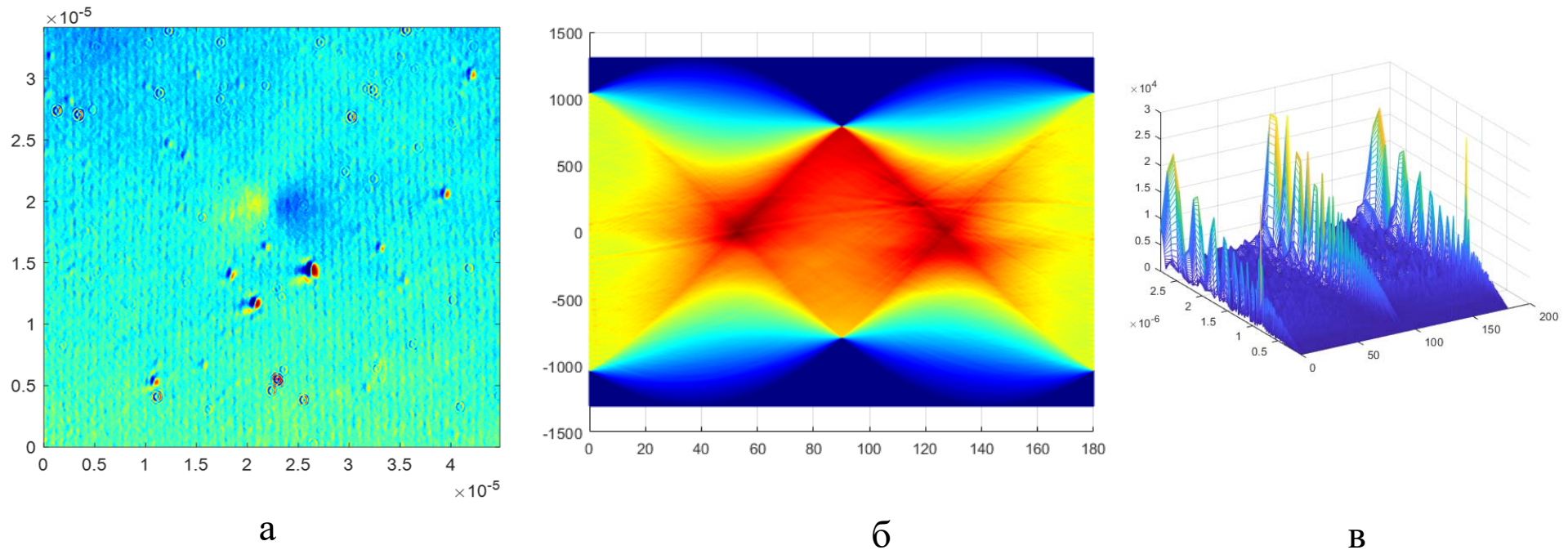
б

Рис.3 – Доменные изображения тонкой пленки NiO с толщиной 696 нм полученные в результате измерения магнитооптического микроскопа при комнатной температуре с разной геометрией измерения: угол между поляризатором и анализатором  $90^\circ$  (а) и  $45^\circ$  (б), подобная обработка может дополнительно устранить артефакты морфологии поверхности и выделить магнитные контрасты, вызванные вращением поляризации [2].

2. Xu J. et al. Imaging antiferromagnetic domains in nickel oxide thin films by optical birefringence effect //Physical Review B. – 2019. – Т. 100. – №. 13. – С. 134413.

Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков

Анализ результатов измерения магнитооптического микроскопа



Здесь нас интересует узкий и высокий пик справа (рисунок (в)), его координаты –  $\psi = 179.9^\circ$ ,  $T = 841.8$  нм.

Рис.4 – (а) изображение перевернутое относительно горизонтальной оси (б) спектр Радона (в) фрагмент модуля получившейся функции двух переменных –  $T$  и  $\psi$ , где  $T$  – пространственный период (в метрах). 12



Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков

Результаты измерения магнито-силового микроскопа

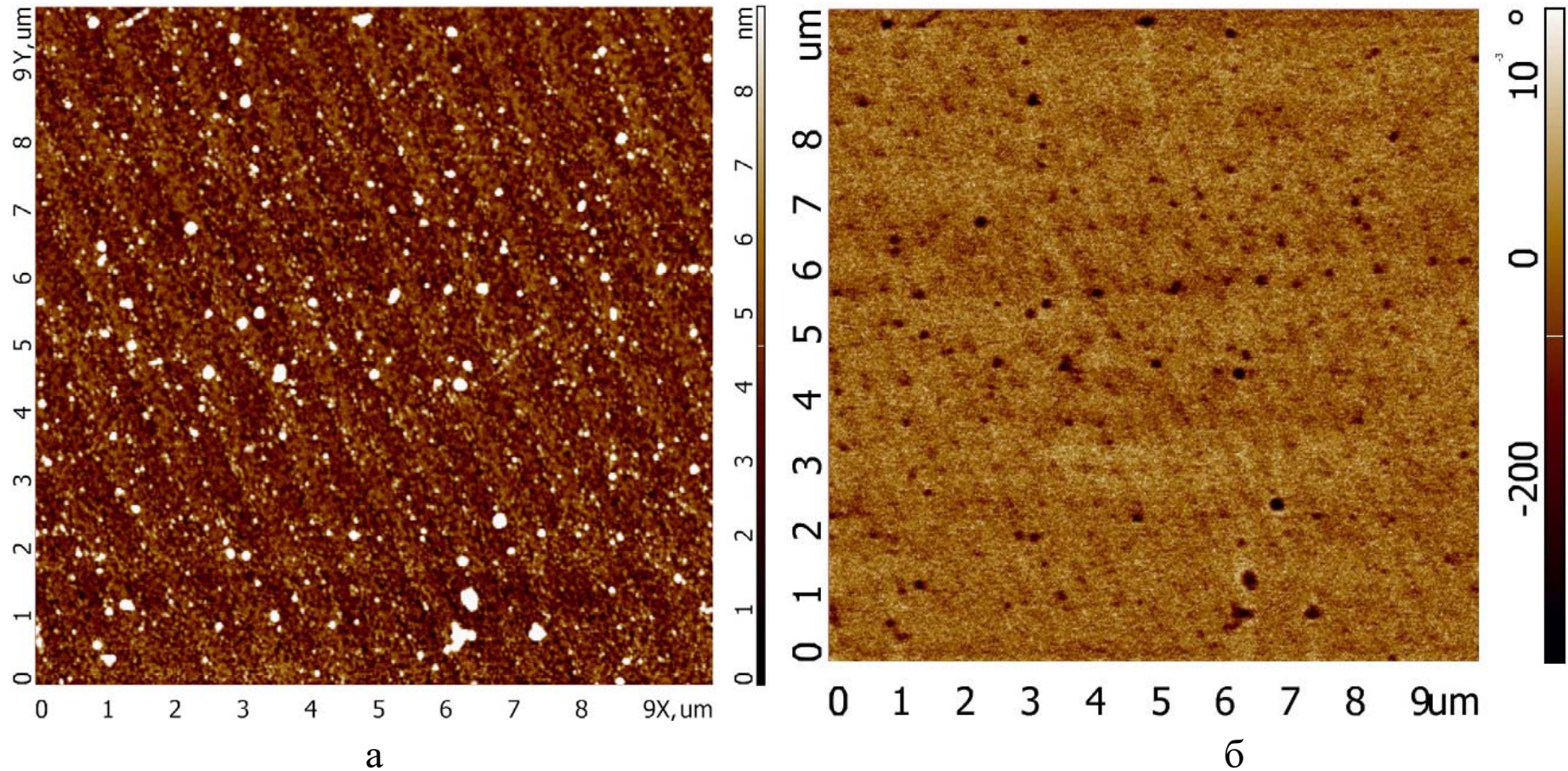
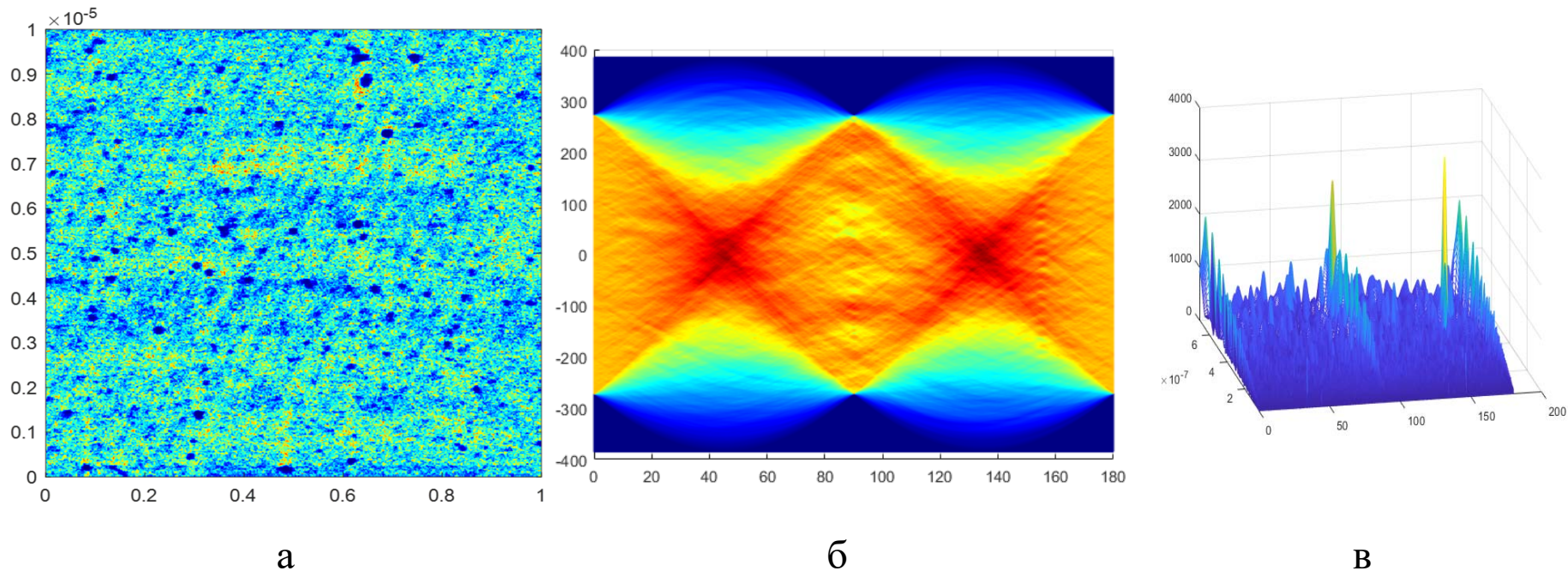


Рис.5 – Результаты измерения магнито-силового микроскопа топология (а) магнито-силовое изображение (б)

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

**Анализ результатов измерения магнито-силового микроскопа**



Здесь нас вновь интересует узкий и высокий пик справа (рисунок (в)), его координаты –  $\psi = 155.2^\circ$ ,  $T = 417.3$  нм.

Рис.6 – (а) изображение перевернутое относительно горизонтальной оси (б) спектр Радона (в) фрагмент модуля получившейся функции двух переменных –  $T$  и  $\psi$ , где  $T$  – пространственный период (в метрах).



**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

**Обсуждение полученных результатов**

Результаты проведенного анализа оптических и микроскопических (MFM) изображений с использованием преобразования Радона (Radon transform) дают следующие значения пространственного периода полосовых структур:  $\sim 820-840$  нм для оптических изображений и  $\sim 420$  нм для изображения, полученного с использованием MFM. Заметим, что  $840 = 2 * 420$ , то есть может возникнуть предположение о том, что на оптических изображениях наблюдается удвоенный период “истинного” изображения, регистрируемого микроскопом, подобные предположения требуют дальнейшего детального анализа.

**Аспирант 2 года обучения Артемьев Михаил Сергеевич  
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

## **Выводы**

В ходе проделанной работы полученные в ходе магнетронного распыления тонкие пленки NiO прошли через рентгеноструктурный анализ в следствие чего удалось выявить зависимость значения постоянной решетки от температуры термообработки в диапазоне от 573К до 973К и среды термической обработки.

Используя полученные данные была отобрана пленка термообработанная при 873К с толщиной 700нм, послужившая образцом для изучения доменной структуры с помощью магнитооптического и магнитосилового микроскопа. Полученные данные были обработаны и свидетельствуют о наличие доменной структуры и требуют дальнейшего анализа.

На основе полученных данных предполагается дальнейшая работа по реализации смещения доменной стенки с помощью электрических полей[4].