

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

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

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Тема работы – Спин-зависящие явления в тонких плёнках гематита

Задача текущего года

Ознакомиться с методами Рамановской спектроскопии и магнитно-силовой микроскопии. Исследовать серию образцов тонких плёнок α - Fe_2O_3 (термообработанных в диапазоне температур 673 - 1173 К), методами Рамановской спектроскопии и магнитно-силовой микроскопии.

Результаты, полученные в этом году:

Получены данные в результате исследования серии тонких плёнок α - Fe_2O_3 методом Рамановской спектроскопии и методом магнитно-силовой микроскопии.

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
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
2. Effect of Heat Treatment on the Phase Composition of α -Fe₂O₃ Thin Films: Analysis by Raman Spectroscopy / K.A. Merencova, Yu.V. Korkh, T.V. Kuznetsova, A.P. Nosov / подготовлена к печати

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

Апробация работы

Тезисы докладов на международных конференциях

1. 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-FE₂O₃ THIN FILMS. Сборник X Международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2023 (15-19 мая 2023 г.).
2. 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.).

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

Тезисы докладов на российских конференциях

1. 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.
2. 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 γFeO_3 . XXII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-22) памяти М.И. Куркина (Екатеринбург), 2022. С. 228.
3. 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.
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 и молодых ученых (ВНКСФ-27), 2023, С. 46

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

Экзамены

Экзамен по философии

Сдан – «Хорошо»

Экзамен по иностранному языку

Сдан – «Хорошо»

Экзамен по специальности 01.04.07

-

Участие в грантах

-

Степень участия

Выступления на конференциях

Сделано докладов

устных – 0

стендовых – 1

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
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 | 1 | 1 |
| сданный на «отлично» кандидатский экзамен | 20 | 0 | 0 |
| сданный на «хорошо» кандидатский экзамен | 15 | 2 | 30 |
| 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 | | | 55 |

**Аспирант 2 года обучения Меренцова Кристина Александровна
лаборатории нанокompозитных мультиферроиков**

ТЕПЕРЬ О НАУКЕ

Цель:

Получение тонких плёнок гематита ($\alpha - Fe_2O_3$) на монокристаллических подложках сапфира (с- Al_2O_3) и исследование их фазового состава в зависимости от температуры термообработки на воздухе.

Фундаментальный интерес:

Исследование закономерности формирования спектров спиновых волн в тонких плёнках гематита.

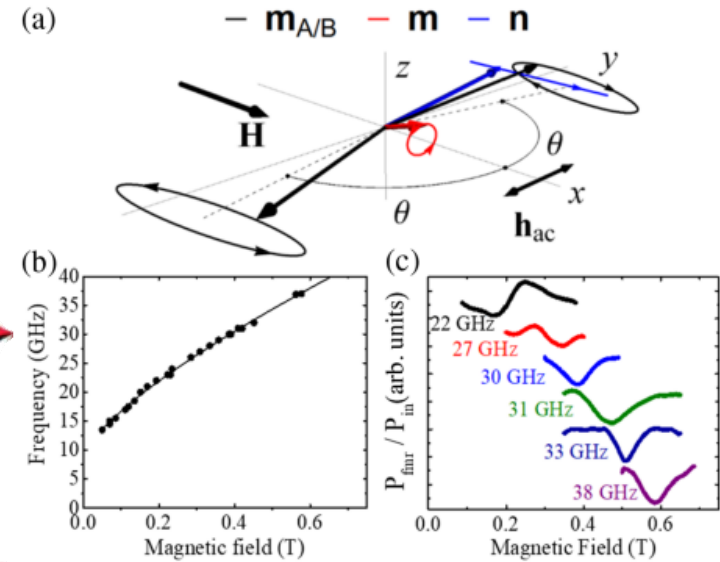
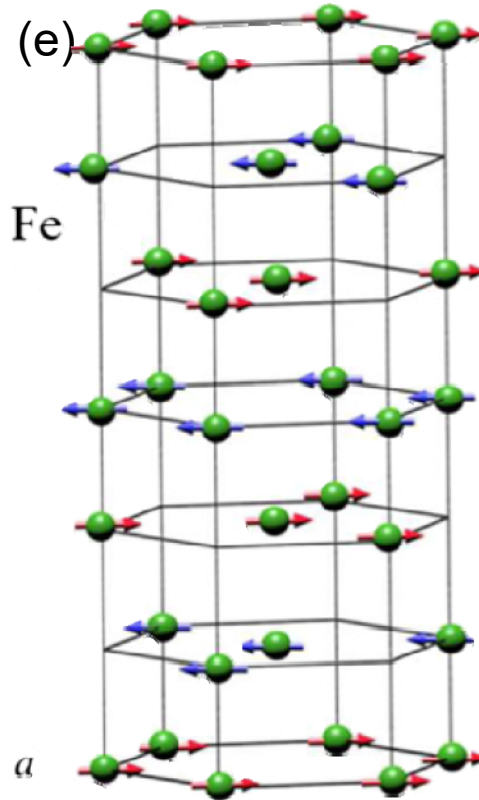
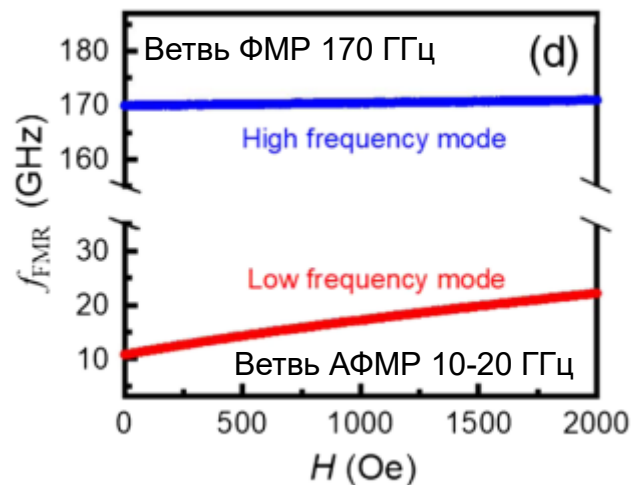
Практическое применение:

Потенциальное использование низкочастотной ветви спиновых волн в современных приложениях таких как системы телекоммуникаций, систем связи 5G.



Почему гематит?

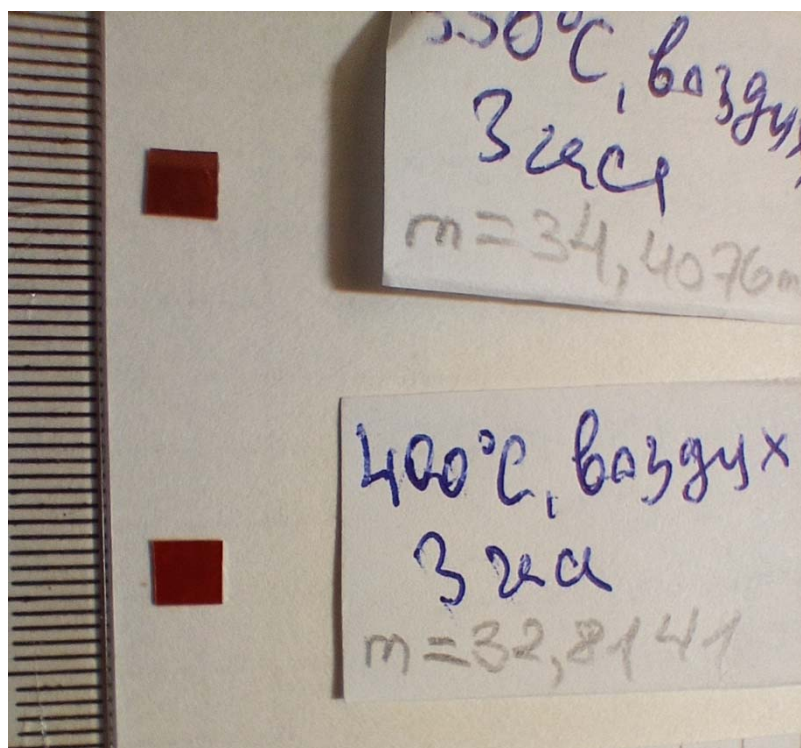
(a) Иллюстрация низкочастотной моды гематита в легкоплоскостной фазе. (b) Частотная дисперсия низкочастотной моды гематита, измеренная в диапазоне от 10 до 40 ГГц. (c) Резонансные кривые для различных значений внешнего приложенного поля. [1]



(d) Ожидаемая резонансная частота низкочастотной и высокочастотной мод как функция внешнего магнитного поля. (e) Схема кристаллической структуры α - Fe_2O_3 . Символы и стрелки указывают на атомы Fe и связанные с ними спины. [2]

1. I. Boventer, H. T. Simensen, A. Anane, ect, /Room-Temperature Antiferromagnetic Resonance and Inverse Spin-Hall Voltage in Canted Antiferromagnets / Phys. Rev. Lett. 126, 187201 (2021)

2. H. Wang, Yu. Xiao, M. Guo, ect, /Spin Pumping of an Easy-Plane Antiferromagnet Enhanced by Dzyaloshinskii–Moriya Interaction/ Phys. Rev. Lett. 127, 117202 (2021)

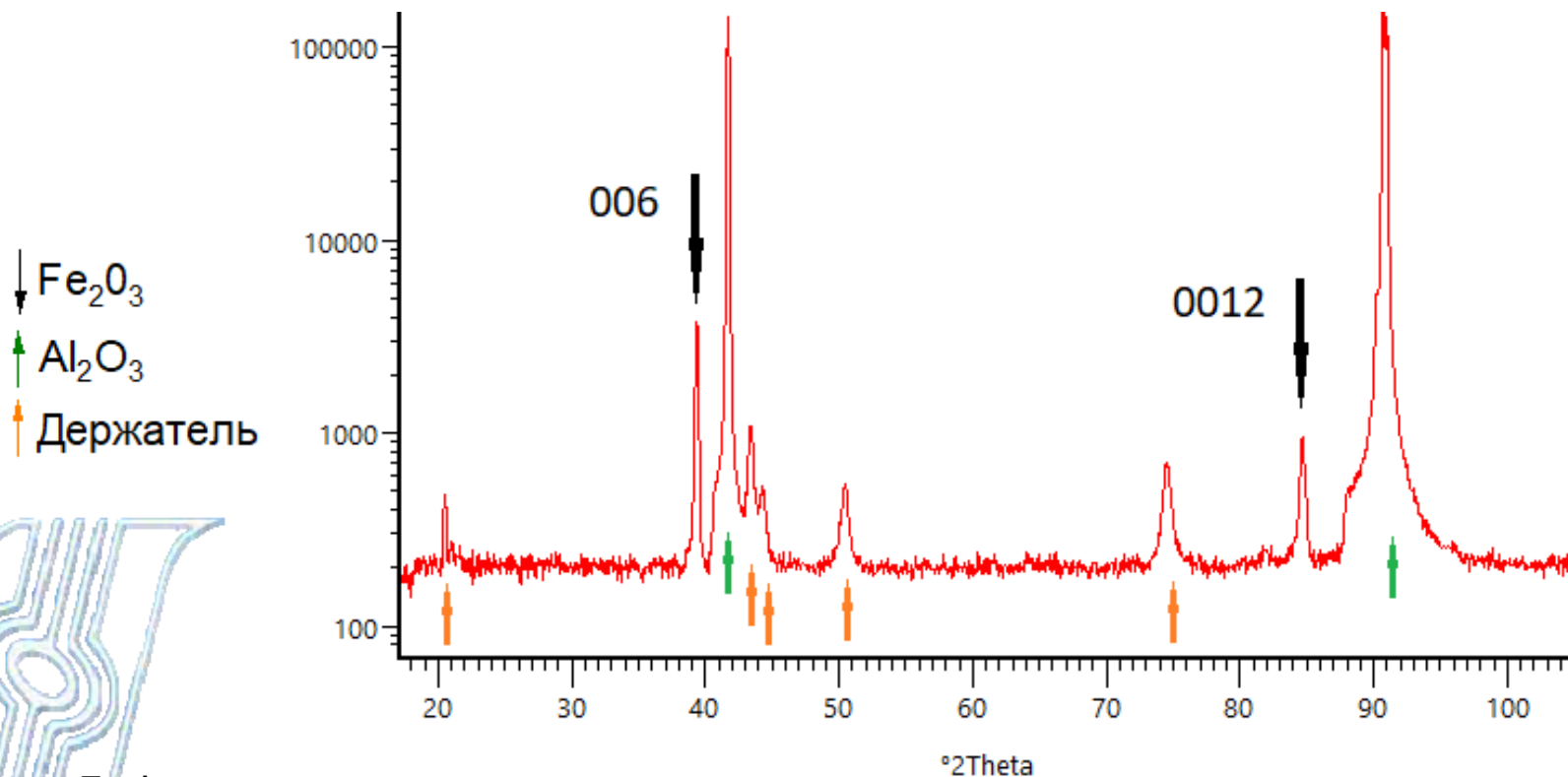
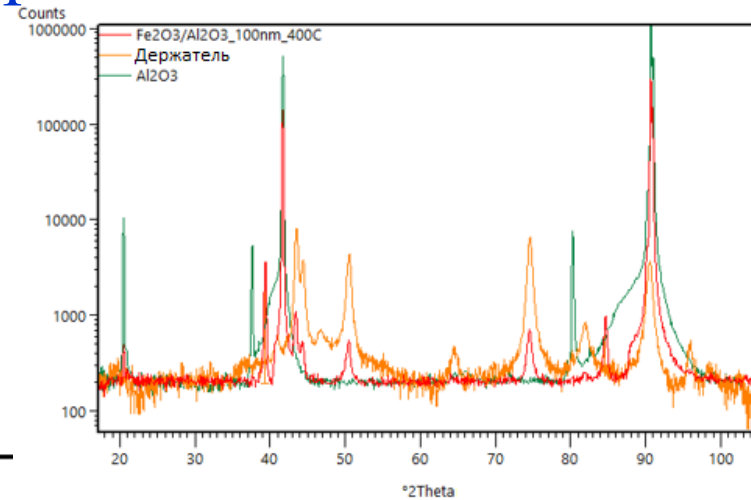
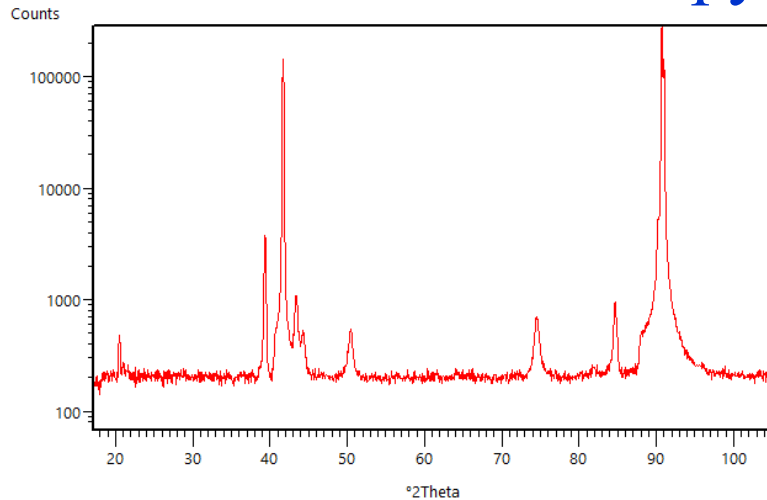


Плёнки растили методом магнетронного распыления на переменном токе из мишеней стехиометрического состава на подложке $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ при 473K.

После распыления полученные пленки с характерными размерами 15*11 мм разрезались на образцы размерами $\approx 4,5 \times 4,5 \text{ мм}^2$, каждый из которых термообработывали на воздухе в течении 3 часов в диапазоне температур от 673 K до 1173 K.

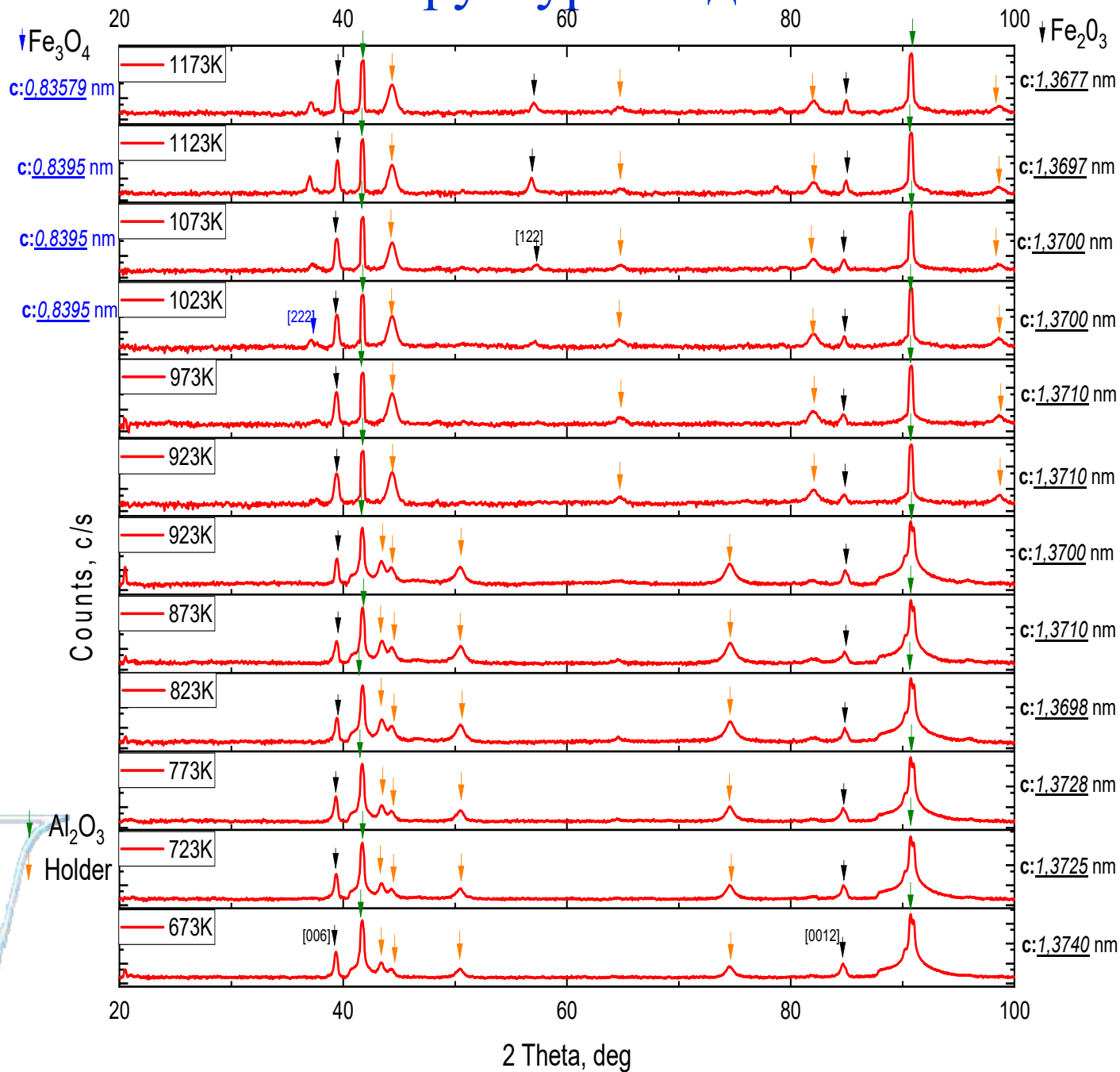


Рентгеноструктурные данные

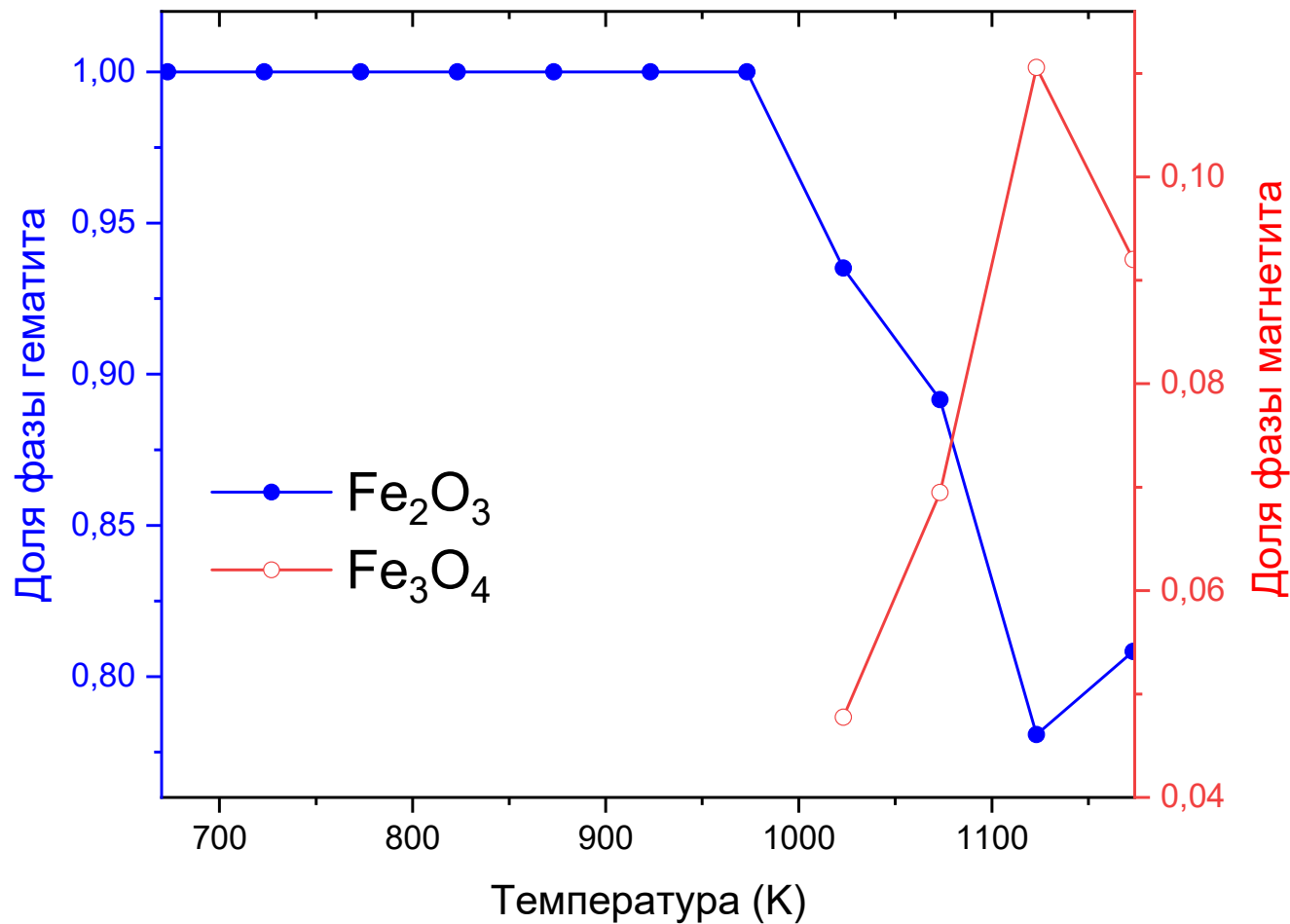


Дифрактограмма для системы плёнка + подложка, держатель, подложка.

Рентгеноструктурные данные



Структурные исследования



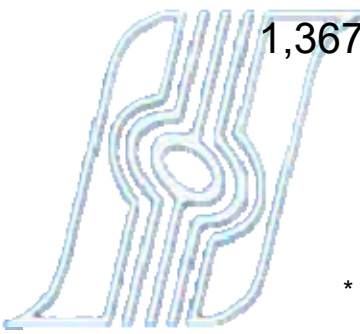
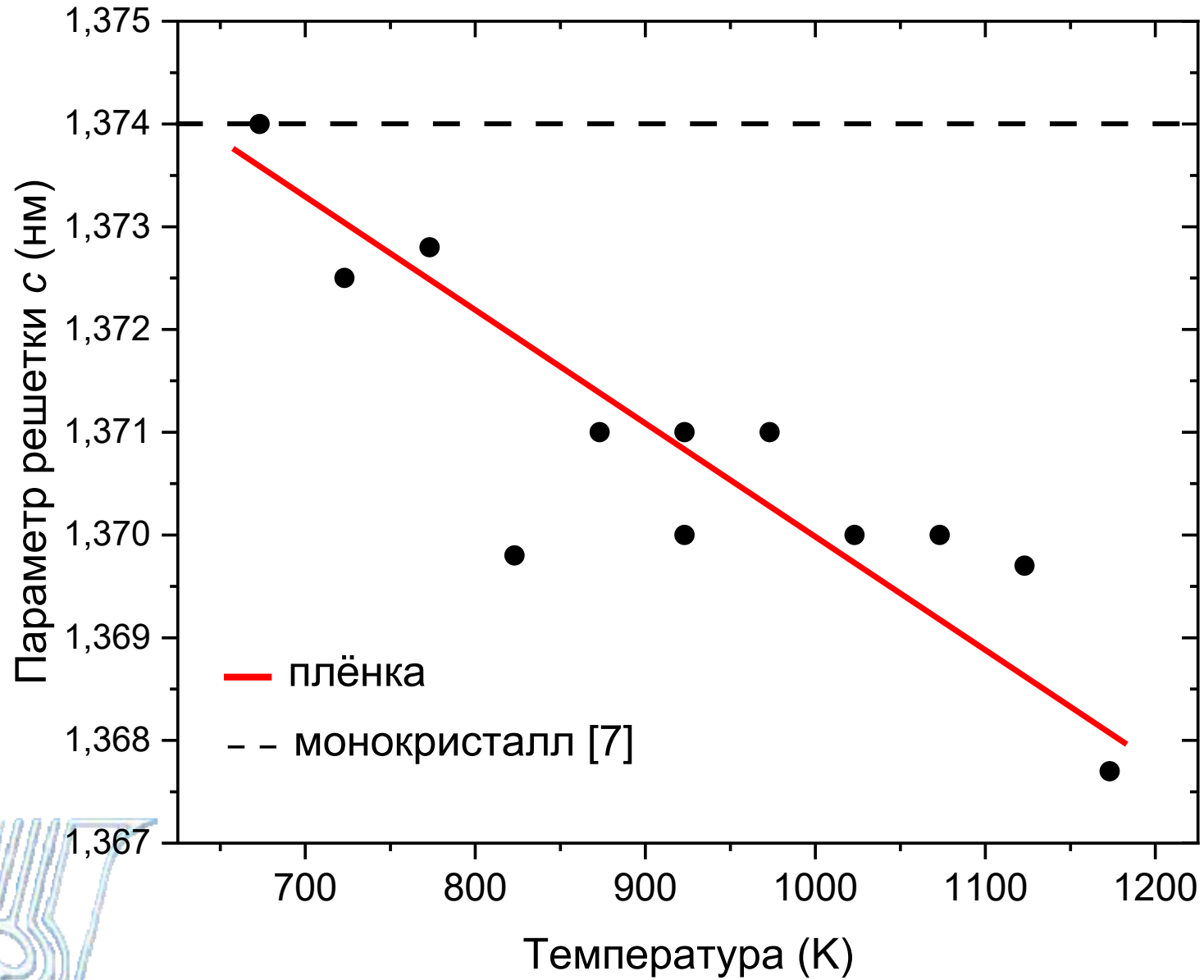
$$\alpha_{Fe_2O_3} = \frac{I_{(006)} + I_{(0012)}}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

$$\alpha_{Fe_3O_4} = \frac{I_{(222)}}{\sum_{i=1}^n I_i}$$

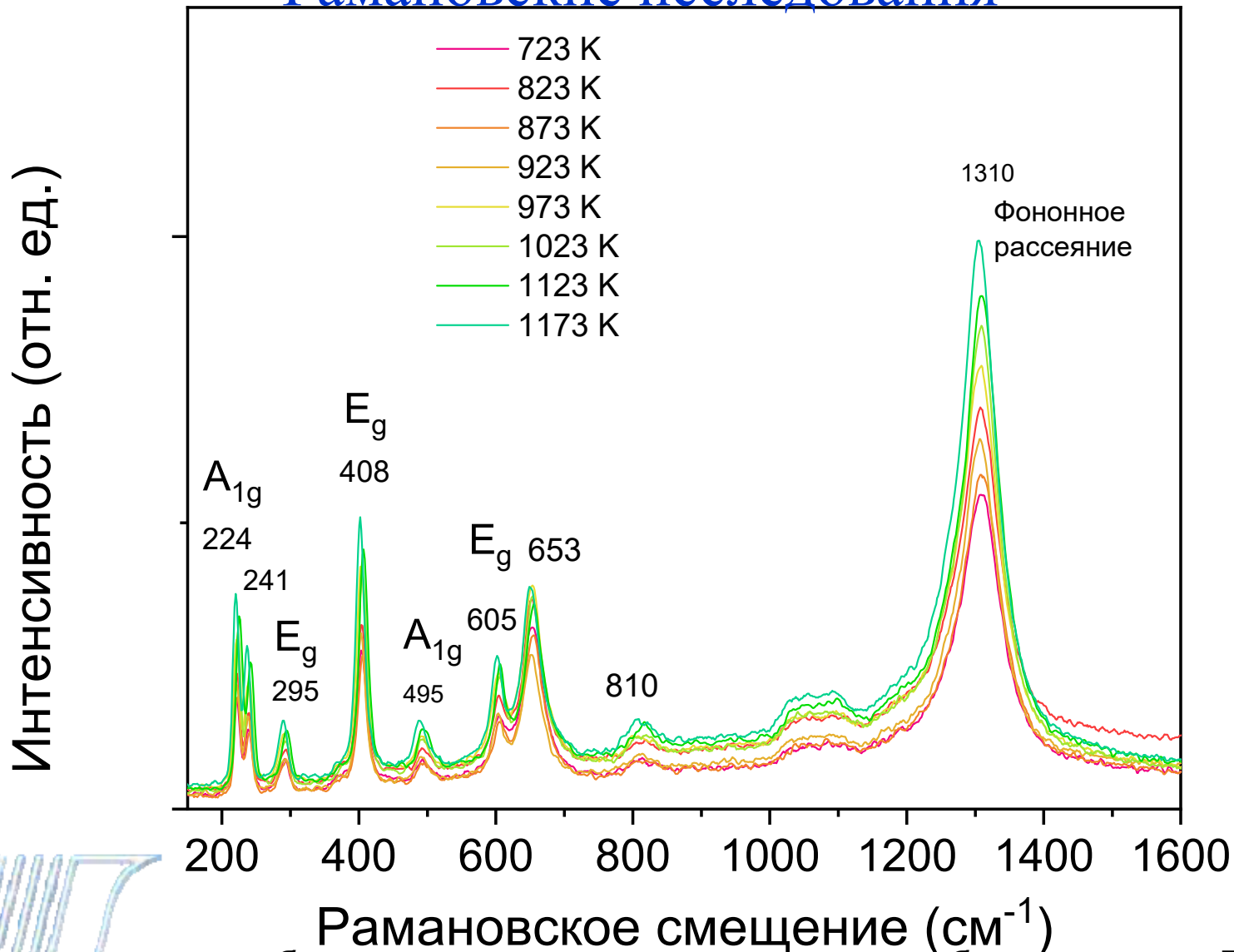
Где i – кол-во всех ПИКОВ

Образцы термообработанные при температурах до 973 К является однофазным (присутствует только фаза гематита), а начиная с 1023 К появляется дополнительная фаза магнетита.

Структурные исследования



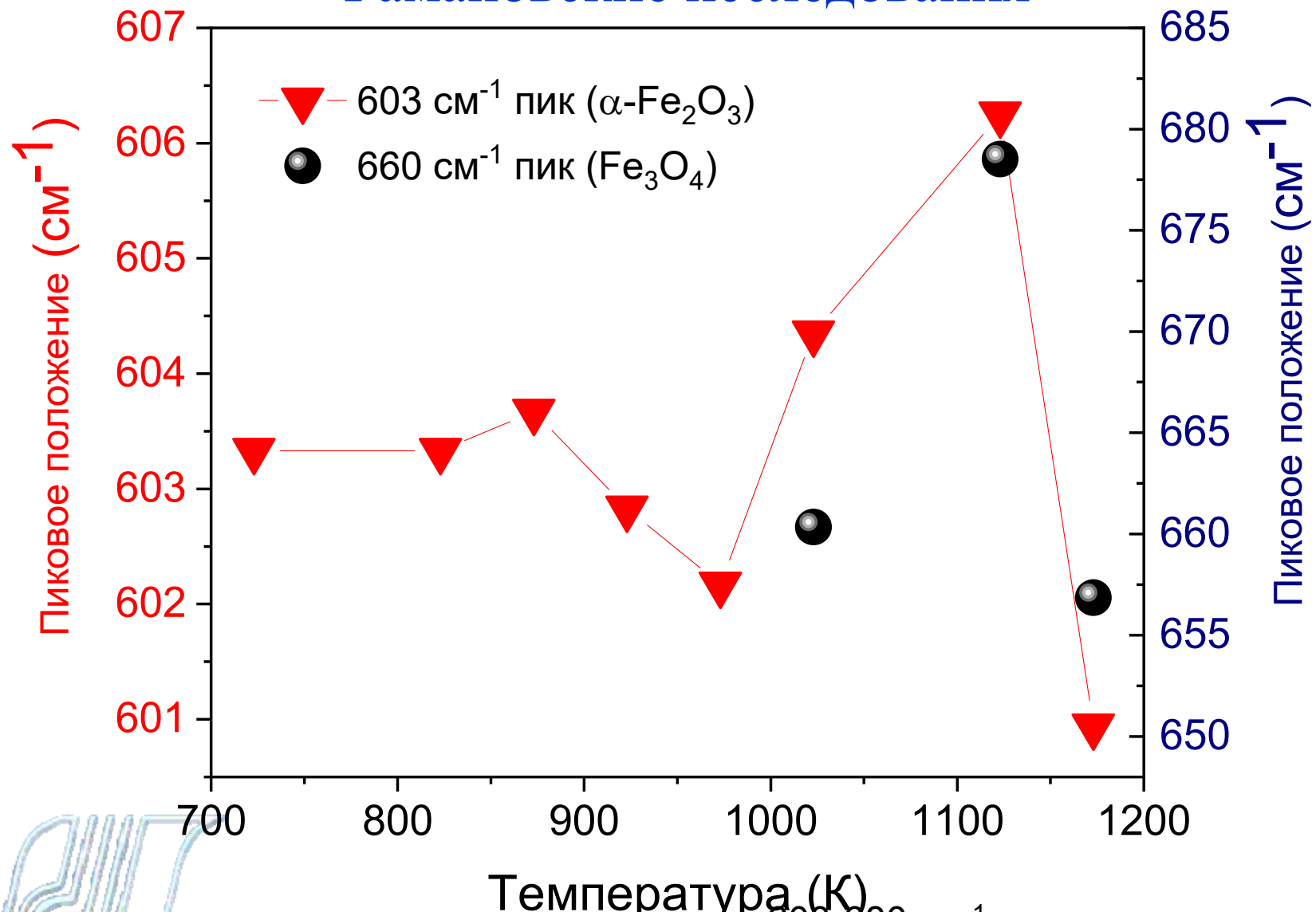
Рамановские исследования $\lambda=532$ nm



Полученные спектры комбинационного рассеяния исследуемых образцов пленок Fe_2O_3 на подложке $\text{s-Al}_2\text{O}_3$ при мощности возбуждающего лазерного излучения 0.76 мВт

* M. Giarola, G. Mariotto, D. Ajò, Micro-Raman investigations on inclusions of unusual habit in a commercial tanzanite gemstone, J. Raman Spectrosc. 43 (2012) 556–558. <https://doi.org/10.1002/jrs.3059>.

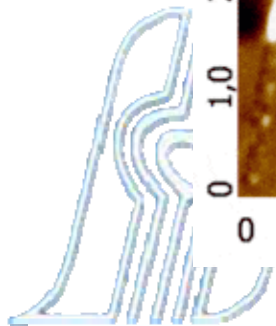
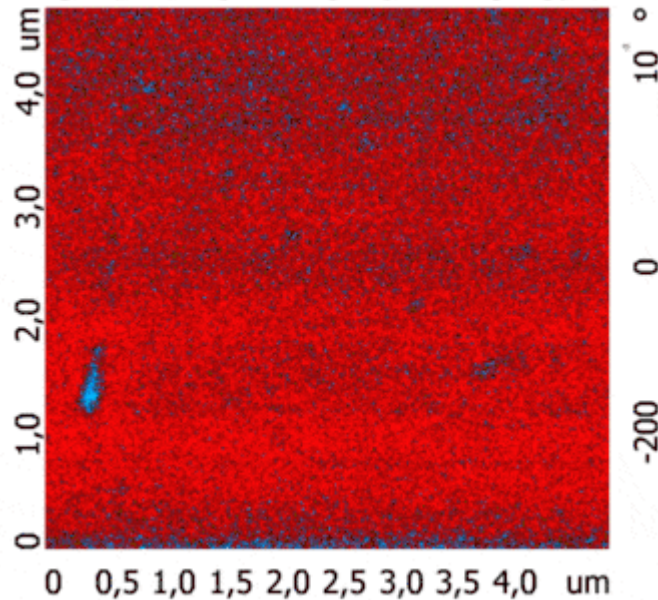
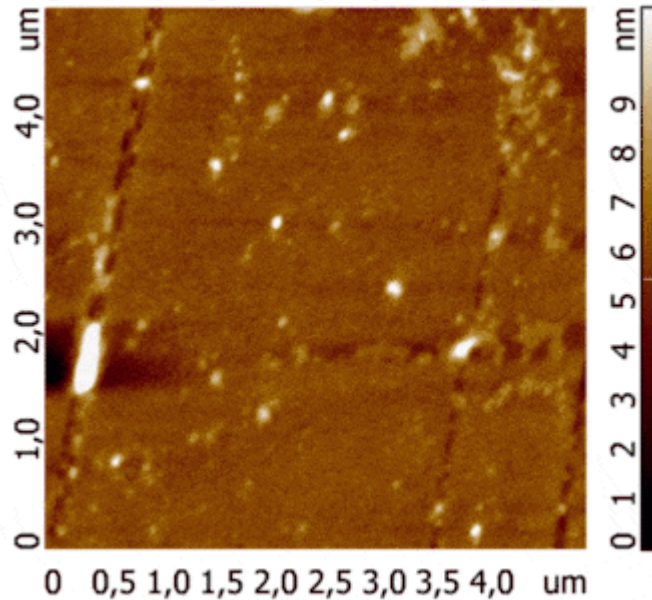
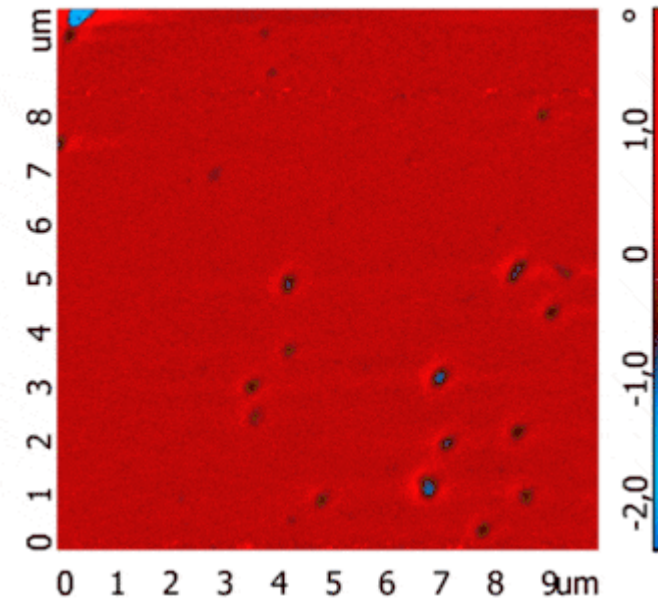
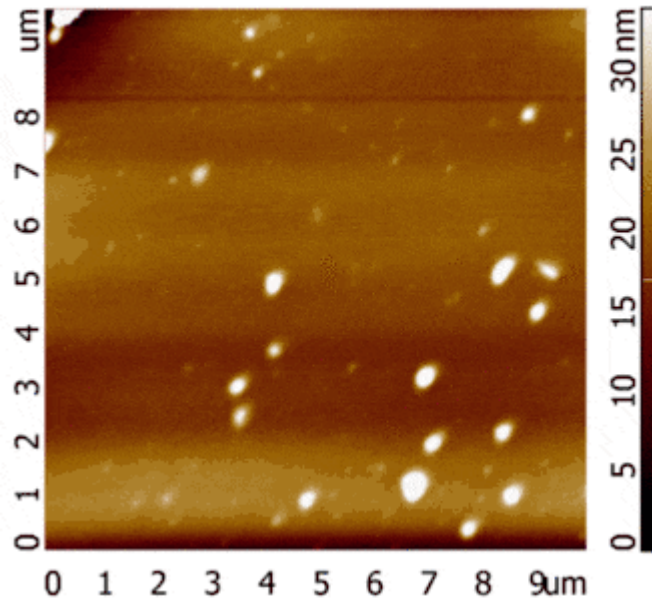
Рамановские исследования



Позиции детектированных пиков в интервале 600-680 см⁻¹ для исследуемых образцов пленок Fe₂O₃ в зависимости от температуры обработки.

Магнитно-силовая микроскопия образцов Fe_2O_3

873 К

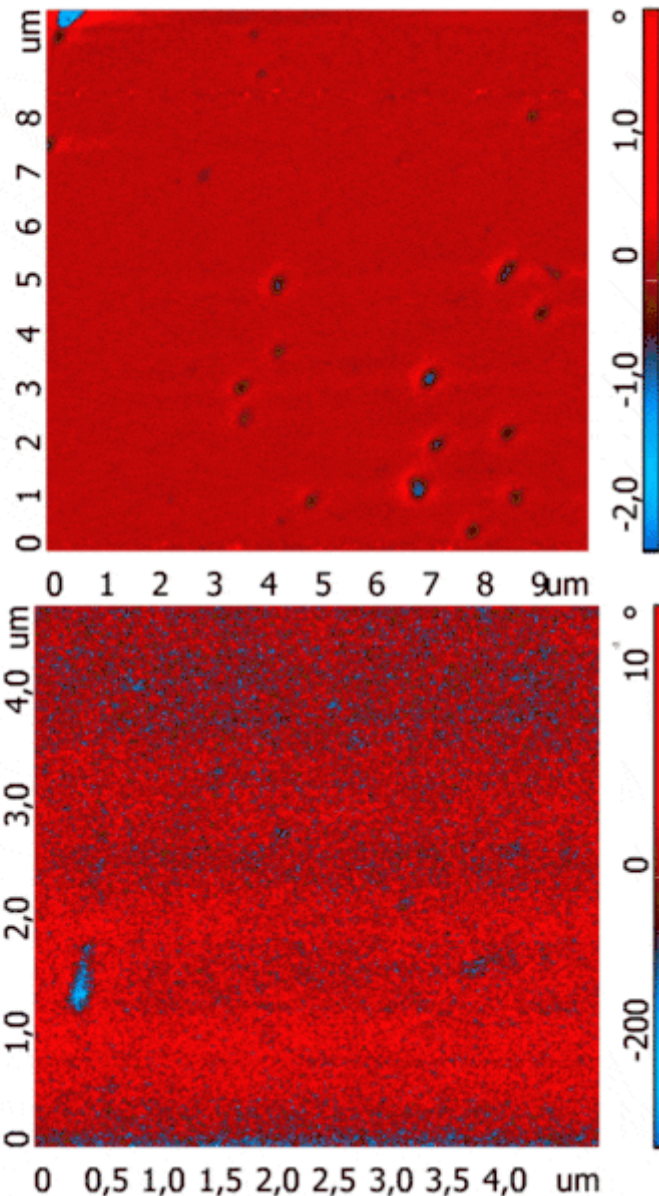


Топография

Магнитно-силовое изображение

Магнитно-силовая микроскопия образцов Fe_2O_3

873 К



Синий цвет на магнитно-силовых изображениях соответствует меньшему фазовому сдвигу (т.е. участкам, где сканирующий магнитный зонд испытывает силу отталкивания), красные участки соответствуют большему изменению фазы результирующего сигнала (зонд притягивается к поверхности образца в данной точке).

Выводы:

Исследовано влияние термообработки на фазовый состав пленок гематита. По результатам проведенного ранее рентгеноструктурного анализа было установлено, что при термообработке до 973 К образцы являются однофазными (единственная фаза гематит). Последующий отжиг (с 1023 К до 1173К) приводит к формированию дополнительной фазы магнетита Fe_3O_4 .

Рамановская спектроскопия подтвердила что для пленок Fe_2O_3 , отожженных при температуре 1023, 1123 и 1173 К, кроме спектров, соответствующих фазе $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, обнаружены спектральные линии, соответствующие фазе магнетита Fe_3O_4 .

Результаты магнитно-силовой микроскопии также показывают, что при температурах термообработки 873, 923 и 973 К в пленках Fe_2O_3 магнитно-силовое изображение (доменная структура) типично для антиферромагнетика. А при температуре отжига 1023 К и выше в пленках Fe_2O_3 появляются ферромагнитные компоненты.



**Спасибо за
внимание**



Список литературы

- R.M. Cornell, U. Schwertmann, The Iron Oxides, Wiley, 2003.
<https://doi.org/10.1002/3527602097>.
- P. Sangaiya, R. Jayaprakash, A Review on Iron Oxide Nanoparticles and Their Biomedical Applications, J. Supercond. Nov. Magn. 31 (2018) 3397–3413. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4841-2>.
- X. Liu, W. Si, J. Zhang, X. Sun, J. Deng, S. Baunack, S. Oswald, L. Liu, C. Yan, O.G. Schmidt, Free-standing Fe₂O₃ nanomembranes enabling ultra-long cycling life and high rate capability for Li-ion batteries, Sci. Rep. 4 (2014) 1–8.
<https://doi.org/10.1038/srep07452>.
- V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono, Y. Tserkovnyak, Antiferromagnetic spintronics, Rev. Mod. Phys. 90 (2018) 15005.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.015005>.
- D. Kan, T. Moriyama, R. Aso, S. Horai, Y. Shimakawa, Triaxial magnetic anisotropy and Morin transition in α -Fe₂O₃ epitaxial films characterized by spin Hall magnetoresistance, Appl. Phys. Lett. 120 (2022).
<https://doi.org/10.1063/5.0087643>.
- G. Segev, H. Dotan, K.D. Malviya, A. Kay, M.T. Mayer, M. Grätzel, A. Rothschild, High Solar Flux Concentration Water Splitting with Hematite (α -Fe₂O₃) Photoanodes, Adv. Energy Mater. 6 (2016) 1–7.
<https://doi.org/10.1002/aenm.201500817>.



Список литературы

- H. Wang, Y. Xiao, M. Guo, E. Lee-Wong, G.Q. Yan, R. Cheng, C.R. Du, Spin Pumping of an Easy-Plane Antiferromagnet Enhanced by Dzyaloshinskii-Moriya Interaction, *Phys. Rev. Lett.* 127 (2021) 117202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.117202>.
- α -Fe₂O₃ hematite (Fe₂O₃ hem) Crystal Structure, ©Springer Mater. Phases Data Syst. (2016). https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1628103.
- Dzialoshinskii I. E., Thermodynamic Theory of “Weak” Ferromagnetism In Antiferromagnetic Substances, *Sov Phys. JETP.* 5 (1957) 1259–1272. http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_005_06_1259.pdf.
- T. Moriya, Anisotropic superexchange interaction and weak ferromagnetism, *Phys. Rev.* 120 (1960) 91–98. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.120.91>.
- H.G.M. Edwards, Modern Raman spectroscopy—a practical approach. Ewen Smith and Geoffrey Dent. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 2005. Pp. 210. ISBN 0 471 49668 5 (cloth, hb); 0 471 49794 0 (pbk), 2005. <https://doi.org/10.1002/jrs.1320>.
- M. Giarola, G. Mariotto, D. Ajò, Micro-Raman investigations on inclusions of unusual habit in a commercial tanzanite gemstone, *J. Raman Spectrosc.* 43 (2012) 556–558. <https://doi.org/10.1002/jrs.3059>.



Список литературы

- C. Guo, Y. Hu, H. Qian, J. Ning, S. Xu, Magnetite (Fe_3O_4) tetraikaidecahedral microcrystals : Synthesis , characterization , and micro-Raman study, Mater. Charact. 62 (2010) 148–151.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.10.016>.

