

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Новиков Аркадий Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Исследование магнитных свойств сплавов Гейслера.

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18311

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

« » _____ декабря _____ 2019г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

« » _____ декабря _____ 2019г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка
к.т.н. Астрелин В.Т.

« » _____ декабря _____ 2019г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью работы являлось обнаружение и анализ свойств двух образцов сплава Гейслера, сравнить их фазовую контрастность. Для этой цели обучились методами сканирования зондовым микроскопом и определили, были проведены измерения рельефа поверхности и распределение фазового контраста сканирующим зондовым микроскопом полу-контактным и магнитно-силовым методом. Разработана методика оптимального выбора поверхности для проведения эксперимента. С ее помощью была достигнута минимальная затрата времени на сканирование.

Ключевые слова: сплав Гейслера, магнитно-силовой метод, сканирующий зондовый микроскоп, магнитный домен.

Оглавление

1	Введение	4
2	Теоретическая часть	4
2.1	Магнетизм.....	4
2.2	Сплав Гейслера	8
2.3	Микроскопия	9
2.4	Магнитно-силовая микроскопия	9
3	Экспериментальная часть	13
3.1	Схема эксперимента	13
3.2	Результаты эксперимента.....	14
4	Выводы.....	18
5	Благодарности	19
6	Список литературы	19

1 Введение

Сплавы Гейслера – это интерметаллические соединения (химические соединения двух и более металлов) с формулой XYZ (полу-Гейслер) или X₂YZ (полный Гейслер), они представляют особый научный интерес, так как компоненты сплава по отдельности не проявляют сильных магнитных свойств, но в химическом соединении они демонстрируют магнитные свойства, например, на поверхности металла можно обнаружить магнитный домен. Также они имеют другие физические свойства. Например, они обладают памятью формы и способны увеличивать свой объем до 10%, магнетокалорическим эффектом, который можно применить в холодильных установках, не приносящих вред человеку, спиновой поляризацией вблизи поверхности Ферми, который используется в спинтронике, термоэлектрическими эффектами, позволяющие получить разницу потенциалов при разности температур, сверхпроводимостью и другими магнитными свойствами. В этой работе исследовалась поверхность образца на наличие магнитных доменов. Задачи: 1) обучиться навыкам использования СЗМ. 2) провести сканирования на разных лифт-расстояниях. 3) проанализировать результаты.

2 Теоретическая часть

2.1 Магнетизм

Чтобы понять явление магнетизма, предлагается рассмотреть Боровскую модель атома водорода. Вращение электрона по орбите представляет собой замкнутый ток.

$$I = \frac{-e}{T}, \quad (1)$$

где $-e$ – заряд электрона, а $T = \frac{2\pi R}{v}$ – его период обращения по орбите вокруг атома с радиусом R , и скоростью v . Этим током создается магнитный момент:

$$m_j = \frac{-eRv}{2c}. \quad (2)$$

Помимо этого, движение электрона массой – m описывается механическим моментом импульса:

$$L = mRv. \quad (3)$$

Теория Бора утверждает квантование магнитного и орбитального момента атома, то есть они принимают дискретные значения:

$$m_j = \frac{-enh}{m4\pi c}, \quad (4)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная планка $n = 1, 2, \dots$, n не может быть равным нулю, так как в этом случае электрон будет двигаться вдоль радиуса, что приведет к столкновению с ядром атома.

Электрон обладает собственным магнитным моментом – спином. Его проекция на выбранное направление может принимать только два значения: $\frac{-h}{4\pi}$ и $\frac{+h}{4\pi}$. Магнитный момент атома равняется векторной сумме орбитальных и спиновых моментов. Эти величины в совокупности с током заряженных частиц создают магнитное поле, посредством которого, осуществляется взаимодействие движущихся заряженных частиц. Это поле определяется векторными функциями: вектором напряжённости магнитного поля H и вектором магнитной индукции B в веществе.

Экспериментально обнаружено влияние магнитного поля на движущийся заряд. Закон, определяющий силу этого взаимодействия, выражается формулой:

$$\vec{F} = \frac{q}{c} [\vec{v}\vec{B}], \quad (5)$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции магнитного поля. Магнитное поле порождается токами проводимости и молекулярными (намагничивания). Вектор

$\vec{B}$ характеризует макроскопическое поле, которое получается путем усреднения по малым объемам, поле B возбуждается токами намагничивания и проводимости, в магнетизме вводят вспомогательный вектор $\vec{H}$:

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi\vec{M}, \quad (6)$$

который связан только с токами проводимости, $\vec{M}$ – вектор намагничивания, который определяется удельным дипольным моментом данного объема. Магнитная проницаемость связывает величины $\vec{B}$ и $\vec{H}$,

$$\mu\vec{H} = \vec{B}, \quad (7)$$

$$\mu = 1 + 4\pi X, \quad (8)$$

где X – магнитная восприимчивость.

По магнитным свойствам вещества условно можно разделить на следующие группы:

1) Ферромагнетики – вещества с нелинейной магнитной восприимчивостью X , $X > 0$ и $|X| \gg 1$. Вещество обладает ферромагнитным свойством, если в состав его кристаллической решетки, входят атомы с недостроенными внутренними оболочками. Такие элементы называются переходными. Отличительной особенностью ферромагнетиков является остаточная намагниченность. Ее можно зафиксировать, если предварительно довести образец до насыщения – состояние, в котором вектор намагничивания практически не изменится при увеличении магнитного поля, а затем выключить поле. После этого образец все еще будет обладать намагниченностью.

2) Диамагнетики – вещества с магнитной восприимчивостью X , $|X| \ll 1$ и $X < 0$ то есть диамагнетик в магнитном поле создает такой магнитный момент, который направлен против вектора поля, что является причиной выталкивания диамагнетика из поля.

3) Парамагнетики – вещества, атомы которых обладают магнитным моментом в отсутствии магнитного поля, но в отсутствии поля все магнитные моменты ориентированы хаотично, а при внесении парамагнетика в магнитное поле моменты преимущественно ориентируются вдоль вектора поля. Также парамагнетик имеет магнитную восприимчивость χ , $|\chi| \ll 1$ и $\chi > 0$.

Так же сплав Гейслера обладает спонтанной поляризацией, а это значит, что в металле есть магнитные домены – области макро-размеров (более десятков микрон), обладающие магнитным моментом. Причина дробления на макро-области кроется в стремлении уменьшить полную энергию системы. Если бы ферромагнетик был намагничен в одном направлении, то его магнитное поле обладало бы максимальной энергией, а энергия обменного взаимодействия была бы минимальна для всех электронов, эта добавочная энергия определяется спиновой ориентацией соседних электронов. А само обменное взаимодействие носит чисто квантовомеханический эффект. Дробление ферромагнетика на макро-области позволяет уменьшить энергию поля, но на границе доменов энергия обменного взаимодействия увеличивается за счет разной ориентации моментов. Равенство этих двух энергий определяет размер домена, так как энергия поля прямо пропорциональна объему, а энергия взаимодействия прямо пропорциональна площади домена. При внесении зонда с магнитным моментом $\vec{m}_p$ в магнитное поле домена $\vec{H}_d$ будет возникать сила, действующая на зонд $\vec{F}_{d-p}$ со стороны образца:

$$\vec{F}_{d-p} = -grad(\vec{m}_p \vec{H}_d), \quad (7)$$

где $\vec{H}_d$ – поле диполя имеющий магнитный момент $\vec{m}_d$

$$\vec{H}_d = -\frac{\vec{m}_d}{r^3} + \frac{3(\vec{m}_d \vec{r})\vec{r}}{r^5}. \quad (8)$$

2.2 Сплав Гейслера

Сплав Гейслера – это интерметаллическое соединения с химическим формулами: X_2YZ – полный Гейслер, его кристаллическая решетка состоит из чередующихся слоев атомов X со слоями из атомов Y и Z ; XYZ - полу-Гейслер имеет такой же порядок слоев атомов, но слой из атомов X наполовину заполнен вакантными местами; X_2YZ обратный Гейслер в его кристаллической решетке чередуется два слоя состоящих из атомов XY и XZ . X , Y -переходные металлы, Z -из р-блока таблицы Менделеева.

Ферромагнетизм сплава Гейслера является результатом двойного обмена электронами между соседними магнитными ионами. Чтобы понять механизм двойного ионного обмена рассмотрим систему из 3-ех атомов двух элементов X_1 , X_2 и Y , где X_1 и X_2 расположены на таком расстоянии друг от друга, что не могут взаимодействовать напрямую, но могут обмениваться электронами с атома Y . Пусть X_1 имеет на 1 электрон больше чем X_2 . Электрон со внешней оболочки X_1 перепрыгивает на орбиталь Y , а затем на орбиталь X_2 , сохраняя свой спин.

Электронная оболочка атома заполняется в соответствии с правилом Хунда – максимальному спиновому моменту соответствует минимальная энергия. Это означает, что в каждой из орбиталей атома заполняется сначала один электрон, а только после исчерпания незаполненных орбиталей на эту орбиталь добавляется второй электрон. При этом на одной орбитали находятся два электрона с полуцелыми спинами противоположного знака, которые спариваются и, в результате, суммарный спин орбитали становится равным нулю. Соседние атомы решетки стремятся приобрести максимальный спиновый момент, чтобы занять положение с минимальной энергией. Благодаря этому правилу и механизму двойного ионного обмена происходит ферромагнитное выравнивание между соседними атомами.

2.3 Микроскопия

Микроскопия – это изучение объектов при помощи микроскопа, который позволяет представить объект или его свойства невидимые невооруженным глазом. Существуют разные виды микроскопии, например: оптическая, рентгеновская, электронная, атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая.

В данной работе исследование свойств образца проводится магнитно-силовой микроскопией (МСМ).

2.4 Магнитно-силовая микроскопия

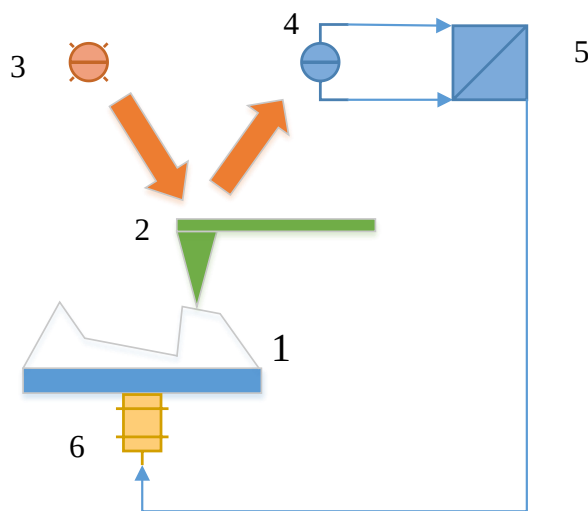


Рис. 1. 1–образец, 2–зонд, 3–лазер, 4–фотоприемник, 5–компьютер, 6–пьезотрубка

На Рис.1 изображен образец и основные рабочие блоки сканирующего зондового микроскопа.

МСМ работает по следующим принципам:

1) Калибровка системы: находится частота, при которой зонд колеблется с нулевой фазой и максимальной амплитудой. Также настраивается положение лазерного луча, который выходит из лазера – 3) и попадает на фотоприемник – 4). Пятно должно попадать точно в центр фотоприемника, это достигается занулением разницы токов для суммы верхних квадрантов относительно нижних и левых квадрантов относительно правых у 4-х секционного фотоприемника.

2) Оператор выбирает область сканирования, которая разбивается на ряды точек, по которым зонд проходит два раза. В первом проходе сканируется рельеф поверхности образца при помощи системы обратной связи и исполнительного блока. Происходит это так: при изменении координаты z зонда на величину z' отраженный от зонда луч отклоняется от начального положения. Компьютер – 5) получает этот сигнал и отправляет соответствующую команду в исполнительный блок, представляющий собой пьезотрубка – 6). Она устанавливает такую координату z зонда, чтобы разность z' устремилась к нулю. Каждой точке (x, y) поверхности образца сопоставляется z , которое установил исполнительный блок.

3) При втором проходе зонд поднимается на высоту h , определяемую оператором, чтобы была возможность пренебречь силами Ван-дер-Ваальса и другие возможные близкодействующие силы, повторяет траекторию пути, которую компьютер зафиксировал в первом проходе. Зонд совершает колебательные движения, на фазу которых влияют дальнедействующие силы: электрические, Ван-дер-Ваальсовы, магнитные и др. силы. В магнитно-силовой микроскопии расстояние h определяется таким образом, чтобы можно было пренебречь всеми силами кроме магнитных, и чтобы они вносили вклад в фазовый сдвиг колебаний. Так каждой точке (x, y) сопоставляется сдвиг по фазе. По итогу сканирования имеется рельеф поверхности и карта фазового контраста.

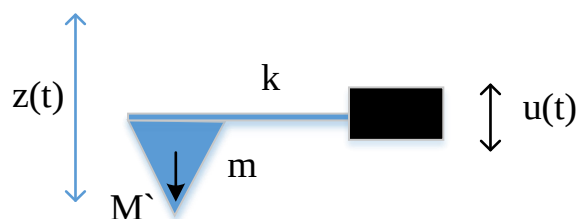


Рис. 2. Модель колебательной системы

Чтобы понять причину сдвига фазы колебаний зонда решим дифференциальное уравнение, которое описывает движение зонда на высоте h от поверхности образца, который имеет магнитные домены, образующие неоднородности магнитного поля:

$$m\ddot{z} = -k(z - u_p) - \alpha\dot{z} + F_0 + F_{0ps} + \vec{F}_z. \quad (9)$$

F_0, F_{0ps} – Сила тяжести и постоянная составляющая силы магнитного притяжения не приносят вклад в сдвиг фазы колебаний. $u_p = u_0 \cos(\omega t)$ – вынужденные колебания пьезовибратора. k – жесткость кантилевера, α – коэффициент силы трения о воздух, m – масса зонда, в простой модели мы представляем систему в виде упругой консоли с массой на конце. $\vec{F}_z$ – градиент силы (6). Сделав замену переменных: $z = \frac{F_0 + F_{0ps}}{k} + z$ и вводя параметр добротности: $Q = \frac{\omega_0 m}{\alpha}$, где ω_0 – резонансная частота колебаний кантилевера, перейдем к комплексным величинам η и получим следующее уравнение.

$$\ddot{\eta} + \frac{\omega_0 \dot{\eta}}{Q} + \eta(\omega_0^2 - \frac{\vec{F}_z}{m}) = u_0 \omega_0^2 e^{-i\omega t} \quad (10)$$

Найдем модуль вынужденных колебаний и фазу колебаний:

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{\vec{F}_z}{m})^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}}, \quad (11)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left[\frac{\omega \omega_0}{Q \left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{\vec{F}_z}{m}\right)}\right]. \quad (12)$$

Чтобы найти резонансную частоту системы, возьмем первую производную $\varphi(\omega)$ по ω^2 и приравняем ее к нулю. Резонансная частота задается следующей формулой:

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2} - \frac{\vec{F}_z}{k}}. \quad (13)$$

Наличие в системе трения о воздух, которое приводит к диссипации энергии, а также градиента силы приводит к сдвигу резонансной частоты:

$$\Delta\omega = \omega_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2} - \frac{\vec{F}_z}{k}} \right). \quad (14)$$

В эксперименте регистрируется сдвиг фазы, причиной которого является присутствие неоднородностей магнитного поля. Такое измерение может дать лишь качественное описание магнитных характеристик образца. Тем не менее данный метод дает возможность определить размеры и форму магнитного домена с высокой точностью (в данной работе порядка микрометров). Сравнение данных рельефа поверхности и распределение фазового контраста, дает возможность обнаружить магнитные домены.

3 Экспериментальная часть

3.1 Схема эксперимента

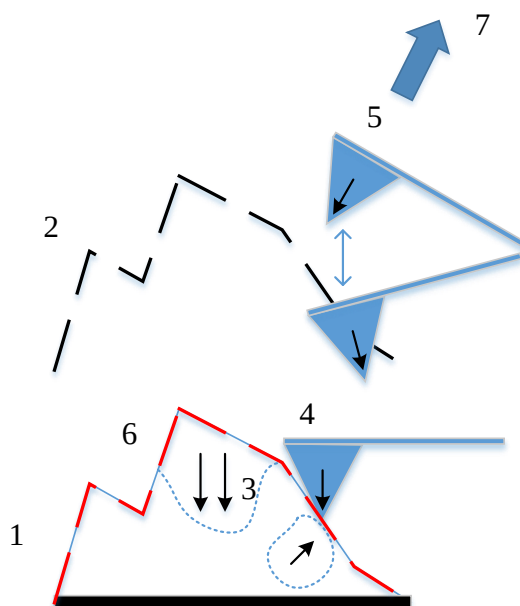


Рис. 3. 1 – траектория зонда в первом проходе, 2 – поднятая на высоту h траектория зонда во втором проходе, 3 – магнитный домен образца, 4 – магнитный зонд (стрелка указывает направление вектора магнитного момента), 5 – колебание зонда во втором проходе, 6 – поверхность образца, 7 – вектор магнитной силы, действующей на зонд со стороны магнитных доменов

Перед проведением измерения кантилевер был откалиброван, на резонансную частоту, которая составила 121,985 кГц. Также зонд и образец намагнитили, чтобы создать магнитный момент. В эксперименте исследовались два образца (1) $\text{Ni}_{45}\text{Cr}_2\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$, (2) $\text{Ni}_{45}\text{Cr}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$.

3.2 Результаты эксперимента

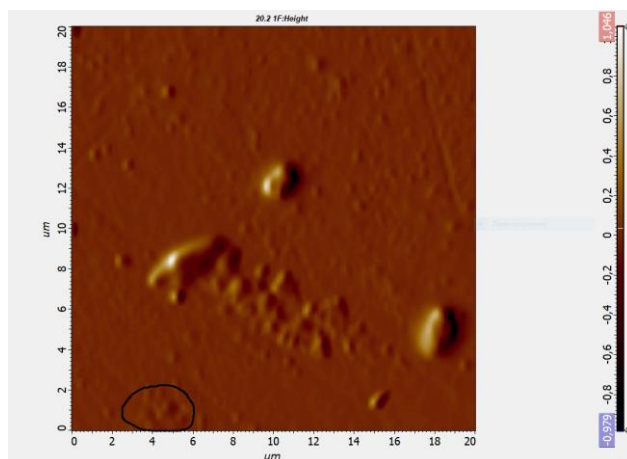


Рис. 4 Рельефа Cr2. 20x20 мкм, разрешение: 128x128 пикселей

Время на первое измерение составило 256 с, такие характеристики сканирования были подобраны для того, чтобы охватить большую поверхность за короткое время, но с потерей качества изображения. При первом сканировании важно исследовать поверхность на наличие доменов и особенности рельефа, чтобы учесть ее при дальнейшем сканировании. Данная методика позволяет выбирать удобную область для исследования.

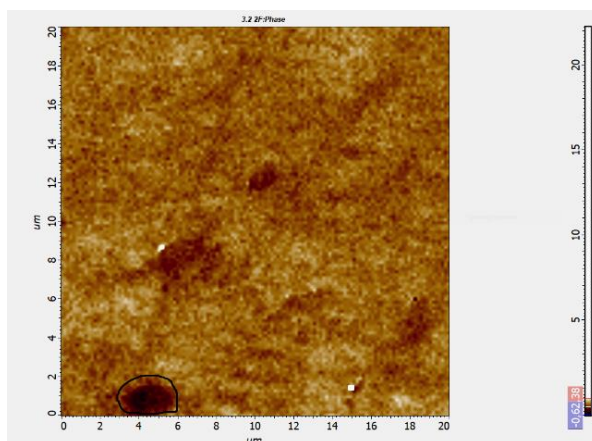


Рис. 5. Фазовый контраст. Cr2. 20x20 мкм, разрешение: 128x128, лифт расстояние - 80 нм

Анализируя Рис. 4 и 5, можно найти область на поверхности с фазовым контрастом. Этот сдвиг по фазе является следствием взаимодействия магнитного поля домена с магнитным зондом, так как в этой области поверхность образца не имеет выступов, которые могли бы повлиять на фазовый сдвиг. После

сделанного вывода, были произведено сканирование участка поверхности, который имеет характерный фазовый контраст.

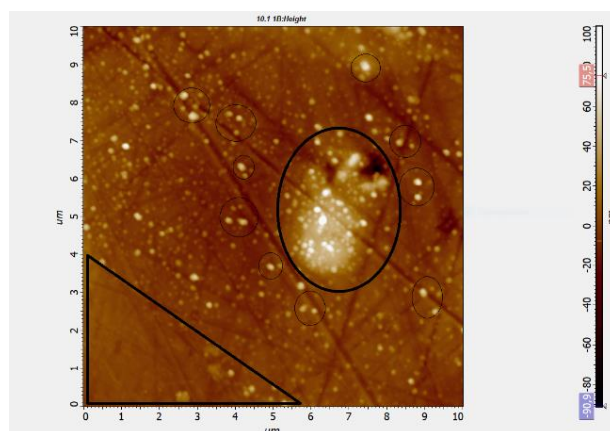


Рис. 6. Рельеф образца (1), 10x10 мкм, разрешение: 256x256 пикселей

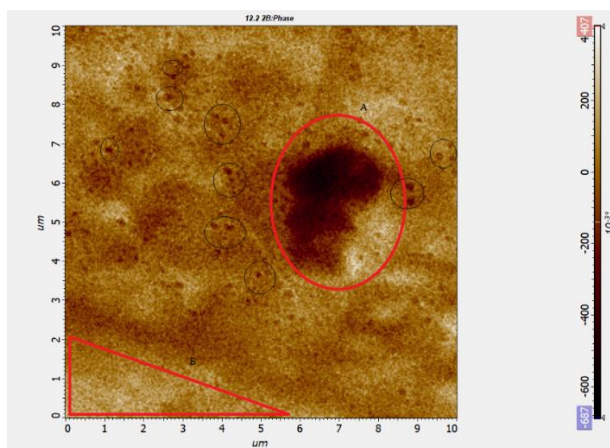


Рис. 7. Фазовый контраст образца (1). 10x10 мкм, разрешение: 256x256 пикселей, лифт-расстояние 60 нм

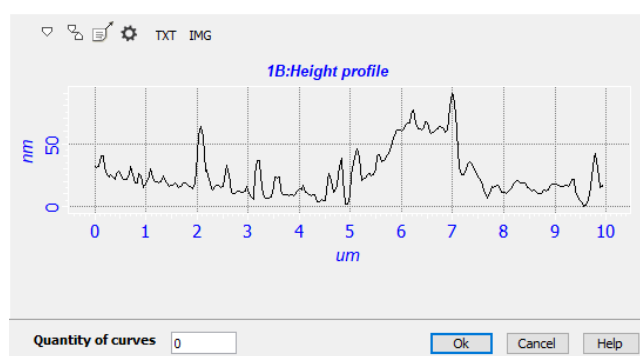


Рис. 8 профиль рельефа, проходящее через прямую $y=4.5$ мкм на Рис. 6

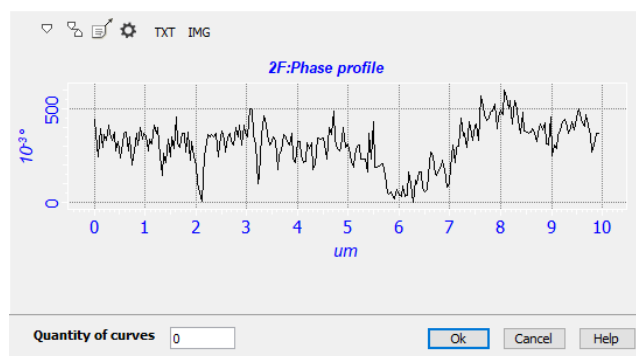


Рис. 9. Профиль фазового контраста, проходящий через прямую $y=4.5$ мкм на Рис. 7

Сравнивая Рис. 6 и рис. 7 можно заметить наличие частиц (обведены в круги), которые в большем количестве можно обнаружить возле магнитного домена (обведен овалом). В области, где фазовый контраст минимален (выделен треугольником), такие частицы не наблюдаются. Можно предположить, что эти частицы являются результатом механических напряжений, которые возникают в результате выращивания кристалла и обработки, следы которой видны на Рис. 6.

Заметим, максимальный фазовый контраст соответствует области, которая располагается на возвышенности порядка 50 нм, см. Рис. 8 и 9. Рельеф в этой области не имеет скачков высот, что могли бы повлиять на фазовый контраст, значит наблюдаемый контраст имеет магнитную природу.

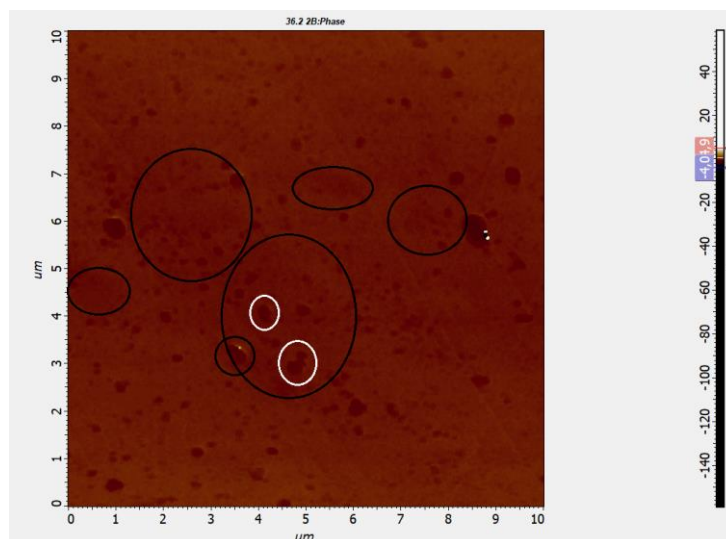


Рис.10. Фазовый контраст образца (2). 10x10 мкм, разрешение: 256x256 пикселей, лифт-расстояние 60 нм

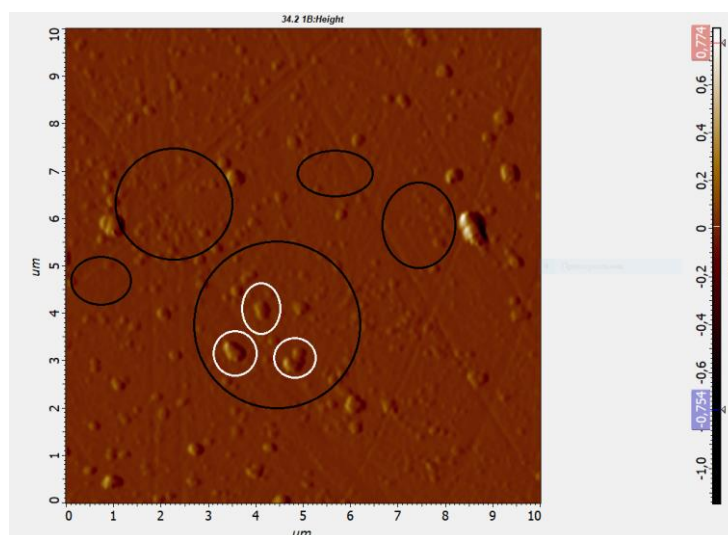


Рис.11. Рельеф поверхности (2). 10x10 мкм, разрешение: 256x256 пикселей

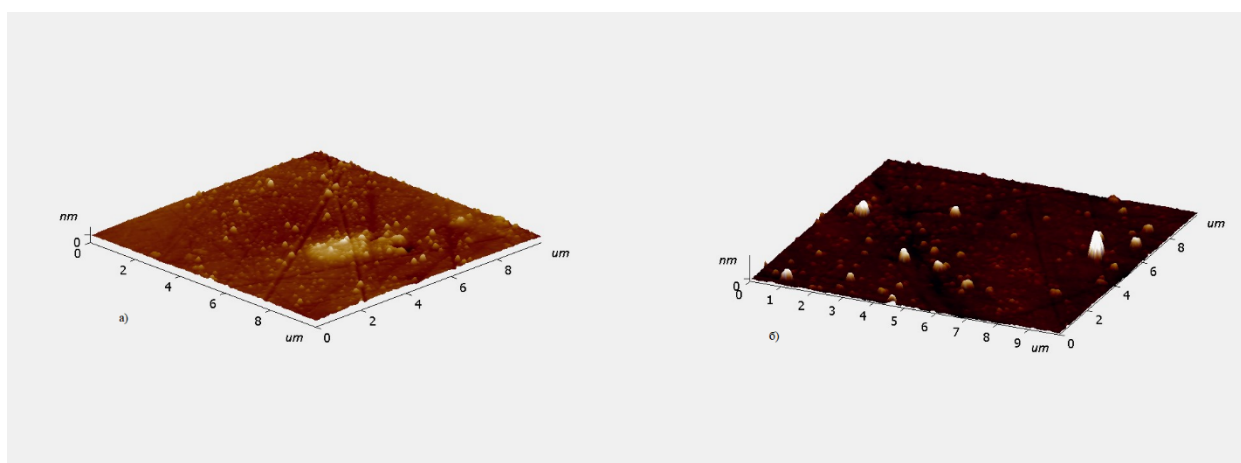


Рис. 12. рельеф образцов: а) – (1), б) – (2)

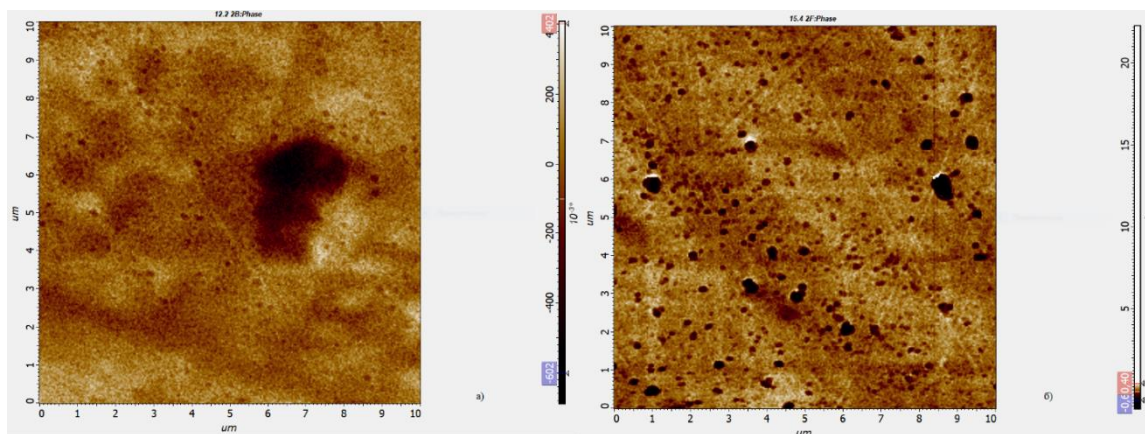


Рис. 13 фазовый контраст образцов: а) – (1), б) – (2)

4 Выводы

Были произведены исследования поверхностей сплавов Гейслера (1) $\text{Ni}_{45}\text{Cr}_2\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$ и (2) $\text{Ni}_{45}\text{Cr}_5\text{Mn}_{37}\text{In}_{13}$ с 1% В, в результате которых были зафиксированы магнитные домены Рис. 7 и 10.

Сравнивая два изображения фазовых контрастов на рис. 12 с одинаковой шкалой сдвига фазы при равных параметрах сканирования: размеры области, разрешение изображения и лифт-расстояние, замечается более выраженный контраст в (1) образце, что может свидетельствовать о большем магнитном моменте чем во (2) образце. Размер доменов в (1) образце варьируется в диапазоне 1-2 мкм, в областях, где расположены магнитные моменты, замечены вкрапления частиц. Можно предположить, что эти частицы являются результатом механических напряжений, которые возникают в результате выращивания кристалла и обработки, следы которой видны на Рис. 6. Механическое напряжение вызвано дефектом в кристаллической решетке, а это в свою очередь может создать не скомпенсированный магнитный момент. То есть по наличию этих частиц можно предсказать наличие/отсутствие магнитного момента в данном месте.

Во (2) образце размеры доменов расположены в диапазоне - 1-3 мкм. Домены имеют вытянутую структуру и упорядоченное расположение.

Стоит отметить, что образец держится в микроскопе на магнитной подложке. Этот постоянный магнит не вносит вклад в картину фазового контраста, так как вблизи его поверхности он создает однородное поле, и сила, с которой он действует на зонд – постоянна, а значит градиент силы отсутствует. Также это магнитное поле может оказывать размагничивающий эффект на зонд и образец. Так как перед сканированием зонд и образец были помещены в однородное поле, то в них образовался свой собственный магнитный момент. Если данный сплав Гейслера обладает низкой коэрцитивной силой, то в поле постоянно магнита он может непредсказуемым образом изменить свою намагниченность. Чтобы учесть этот факт в будущих исследованиях, предлагается провести несколько экспериментов, со сменой ориентации вектора и его модулем внешнего намагничивающего поля. Таким образом возможно исследовать магнитную восприимчивость.

Разработан способ эффективного сканирования образца.

5 Благодарности

За предоставление измерительного оборудования автор выражает благодарность ЦКП «ВТАН» НГУ. Отдельная благодарность моему преподавателю Бондарь Анне Александровне, которая научила решать дифференциальные уравнения. Выражаю слова благодарности за поддержку своим друзьям: Александре Вергулес, Софии Дзюбе, Александру Перепелову, Александру Коровину. Автор благодарит Гейдта Павла Викторовича за обучение основам зондовой микроскопии.

6 Список литературы

1. В. Л. Миронов – Основы сканирующей зондовой микроскопии, Нижний Новгород; издательство «Техносфера», 2005 г., 140 стр.

2. Сивухин Д.В. – Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. III. Электричество. – 4-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
3. Яковлев В.И. – Классическая электродинамика: Часть 1. Электричество и магнетизм. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. – 348 с.
4. https://studwood.ru/1703009/matematika_himiya_fizika/energiya_obmennogo_vzaimodeystviya
5. <https://bigenc.ru/physics/text/1942580>