

05

Формирование доменной структуры в многослойных пленках CoPt с помощью магнитного зонда атомно-силового микроскопа

© А.Г. Темирязов¹, М.П. Темирязева¹, А.В. Здоровейцев², О.В. Вихрова²,
М.В. Дорохин², П.Б. Демина², А.В. Кудрин²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

² Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: temiryazev@gmail.com

Продемонстрирована возможность изменения типа магнитной структуры многослойных пленок CoPt под влиянием магнитного поля зонда атомно-силового микроскопа. Предложен новый метод бесконтактного проведения магнитно-силовых измерений, основанный на искусственном увеличении электростатического взаимодействия зонда и образца. Данный метод позволяет контролируемым образом менять расстояние между зондом и пленкой, регулируя силу магнитного взаимодействия. Используя его, можно из однородно намагниченного состояния создать как лабиринтную доменную структуру, так и изолированные домены, являющиеся, по-видимому, магнитными скирмионами.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания — проект № 8.1751.2017/ПЧ Минобрнауки России и при поддержке РФФИ (гранты 16-07-01102_а и № 17-37-80008_мол_эв_а).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46657.12NN

1. Введение

Тонкие пленки, состоящие из чередующихся слоев магнитных и тяжелых металлов, обладают рядом уникальных свойств, что делает их весьма перспективными для практического применения и крайне интересным объектом физического исследования. В таких пленках при комнатной температуре могут наблюдаться скирмионы — мелкие круговые магнитные вихри, своего рода магнитные солитоны. Подобные образования представляют интерес для спинтроники, поскольку могут двигаться под действием электрического тока и в перспективе использоваться в устройствах хранения и обработки информации [1]. Возможность существования топологически устойчивых магнитных скирмионов привлекает большое внимание теоретиков. Неколлинеарная конфигурация спинов обусловлена хиральным взаимодействием Дзялошинского–Мория, которое, в свою очередь, обычно присуще многослойным структурам с сильным спин-орбитальным взаимодействием при нарушении симметрии по отношению к инверсии на границах слоев. Подробную литературу по данному вопросу можно найти в обзоре [1].

При экспериментальном исследовании скирмионов чаще всего используется рентгеновская микроскопия, позволяющая выявить хиральность неколлинеарных спиновых структур [2–4]. Магнитно-силовая микроскопия (МСМ) не способна разрешить внутреннее строение подобных образований, но может быть использована при изучении процессов зарождения скирмионов и их динамики под действием магнитного поля или тока [5,6]. Следует отметить, что особенностью МСМ является

возможность воздействия магнитного поля зонда на изучаемый объект. Такое воздействие может приводить к существенной перестройке доменной структуры. В ряде случаев этот эффект можно использовать для целенаправленного локального перемагничивания наноструктур [7,8], однако в общем случае он является паразитным и приводит к искажению получаемых данных. В данной работе мы рассмотрим оба случая. Во-первых, покажем, что, воздействуя магнитным зондом атомно-силового микроскопа (АСМ) на однородно намагниченную и неструктурированную пленку CoPt, можно создать в ней как лабиринтную доменную структуру, так и изолированные круглые домены, ассоциируемые в подобных образцах с магнитными скирмионами. Во-вторых, покажем, как можно контролируемым образом регулировать расстояние от зонда до образца, чтобы избежать нежелательного воздействия зонда.

2. Методы МСМ-микроскопии

Рассмотрим некоторые методические особенности МСМ-сканирования. Наиболее распространенным является двухпроходной метод, когда каждая линия скана проходит МСМ-зондом дважды. На первом проходе в полуконтактной моде измеряется профиль поверхности. Далее зонд приподнимается на некоторое расстояние, и выполняется второй проход по измеренному профилю, но уже на некотором удалении от поверхности. Этим устраняется влияние короткодействующих сил, например, упругости или Ван-дер-Ваальса.

Появляется возможность зарегистрировать взаимодействие зонда с образцом, обусловленное дальнедействующими магнитными силами. Регистрация основана на изменении резонансной частоты зонда: при притяжении к поверхности частота уменьшается, при отталкивании возрастает. В зависимости от режима работы прибора можно либо автоматически поддерживать и записывать резонансную частоту зонда, либо зафиксировать частоту колебаний, и следить за изменением фазы. В последнем случае уменьшение резонансной частоты будет приводить к увеличению фазы, то есть область, где зонд притягивается, выглядит темной на частотном изображении и светлой на фазовой картинке.

Основным недостатком двухпроходной методики является то, что на первом проходе зонд близко приближается к образцу, и поле зонда может сильно деформировать магнитную структуру. В некоторых случаях, например при исследовании пленок ферритов-гранатов, это не создает существенных проблем. Доменная структура упруга и быстро релаксирует к исходному состоянию при удалении зонда. Таким образом, подобрав высоту на втором проходе, можно получить МСМ-изображение, отражающее реальное расположение доменов, даже для случая пленок, крайне чувствительных к внешнему полю [9]. Существенно больше трудностей возникает при исследовании тонких магнитно-мягких металлических пленок, особенно если они текстурированы, и характерные размеры отдельных элементов меньше или порядка нескольких микрон. В этом случае зонд на первом проходе может целиком или частично перемагнитить подобный элемент, переведя доменную структуру в новое метастабильное состояние. При проходе следующей линии скана этот процесс может повториться и т.д. Уже вне зависимости от высоты второго прохода мы получим искаженное магнитное изображение, характерной особенностью которого является появление участков, на которых видны четкие линии границ перехода от области отталкивания на одной линии скана к притяжению на следующей линии. Если X — ось быстрого сканирования, а Y — медленного, то на фазовом магнитном изображении это будут горизонтальные линии, ниже которых находится темная область, выше — светлая. Чтобы избежать нежелательного перемагничивания используют однопроходную методику, которая весьма эффективна для достаточно плоских образцов. В этом случае, предварительно определив наклон плоскости образца, проводят сканирование по плоскости (или поверхности второго порядка), расположенной над поверхностью. Это позволяет избежать ситуации, когда в процессе сканирования зонд близко подходит к образцу. Такая методика особенно полезна, когда необходимо провести многократное сканирование одного и того же участка, например, при исследовании процессов перемагничивания во внешнем магнитном поле [10,11].

3. Результаты эксперимента и обсуждение

Объектом нашего исследования являлись тонкие многослойные пленки состава $\text{Co}_{45}\text{Pt}_{55}$. Методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме на подложку Al_2O_3 (или подслоя Al_2O_3 на поверхности GaAs) последовательно наносились несколько чередующихся слоев Pt толщиной 0.5 nm и Co толщиной 0.3 nm. Общая толщина пленки составляет 8 nm. Температура нанесения варьировалась в пределах 200–400°C, некоторые образцы после нанесения подвергались дополнительному отжигу при той же температуре. Пленки обладают перпендикулярной магнитной анизотропией, более подробное описание их магнитных свойств приведено в работе [12]. Исследование проводилось с помощью атомно-силового микроскопа SmartSPM (AIST-NT). При проведении МСМ измерений использовались зонды PPP-LM-MFMR (Nanosensors) с пониженным магнитным моментом. Все эксперименты были выполнены на воздухе при комнатной температуре.

На рис. 1, *a, b* представлены два магнитных изображения пленок CoPt , полученных в однопроходном режиме. На первом фрагменте видна лабиринтная структура, характерная для слоистых пленок, включающих магнитные и тяжелые металлы, и наблюдавшаяся ранее в целом ряде работ [3–6]. Магнитная структура, изображенная на рис. 1, *b*, достаточно необычна. Отдельные круглые домены, представленные здесь, имеют размеры менее 100 nm. Подобные образования часто ассоциируются со скирмионами, хотя, как мы уже упоминали, МСМ не может разрешить их внутреннюю структуру и тем самым доказать, что это скирмион. Но для образования скирмионов, как правило, требуется внешнее воздействие. Необходимо, например, приложить магнитное поле перпендикулярно поверхности пленки, пропустить через структуру импульсы тока или СВЧ-сигнал [2–6,13]. В нашем случае ни один из вышеперечисленных методов не использовался. О наблюдении структур, похожих на скирмионы, мы сообщали ранее в работе [12], но причины их образования были не ясны. Можно предположить, что доменная структура такого типа была сформирована в результате воздействия магнитного поля зонда. Чтобы проверить это, мы просканировали небольшой участок пленки ($2 \times 2 \mu\text{m}$) в двухпроходном режиме. Полученное при этом магнитное изображение показано на рис. 1, *c*. Оно явно свидетельствует о постоянной перестройке магнитной структуры образца в процессе сканирования. Далее большая площадь ($5 \times 5 \mu\text{m}$) была просканирована в однопроходном режиме (рис. 1, *d*). Видно, что на первоначально отсканированной двухмикронной области изменился тип доменной структуры. Наблюдаемое изменение картины МСМ объясняет появление изолированных доменов. Домены, представленные на рис. 1, *b* и в работе [12], образовывались на участках, где до начала однопроходного сканирования выполнялось измерение топографии поверхности пленки

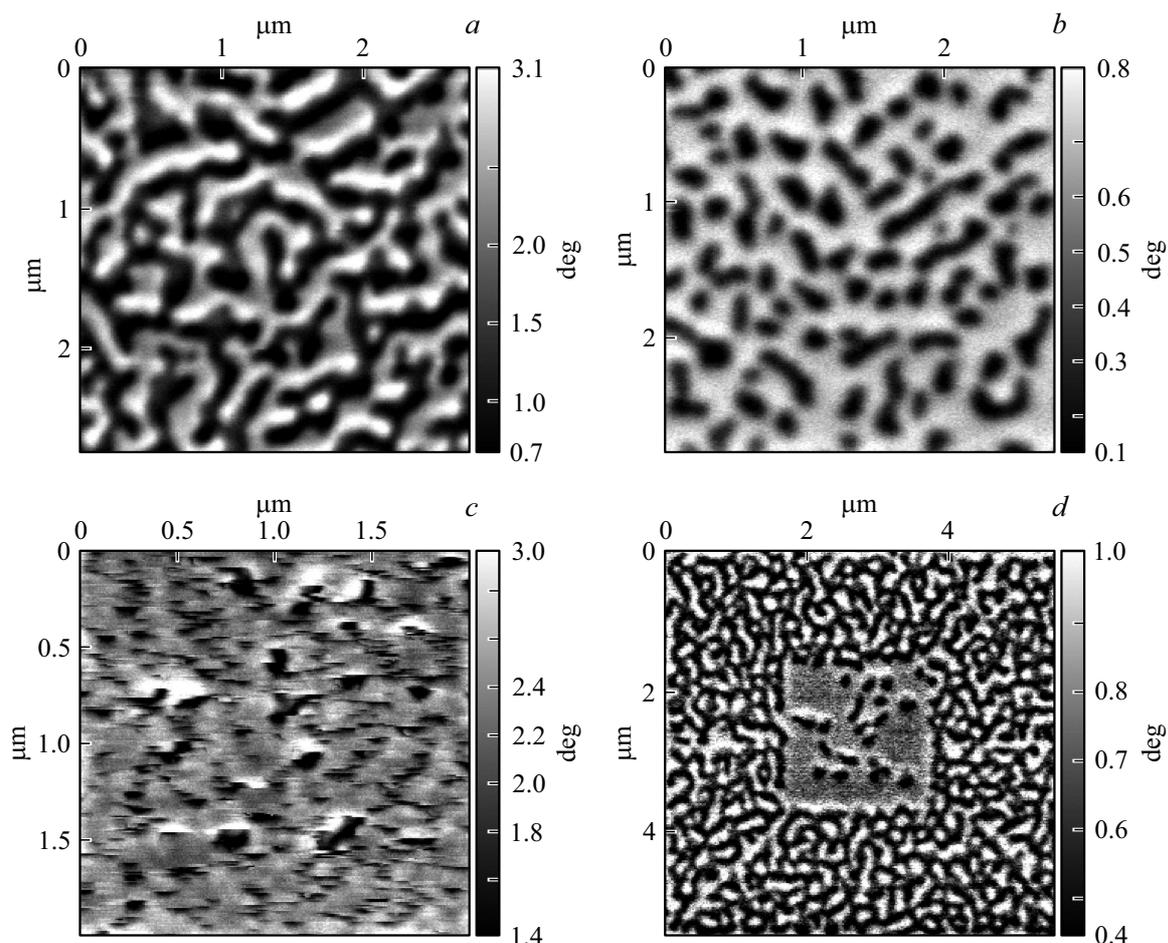


Рис. 1. *a, b* — МСМ-изображения доменных структур в многослойных пленках CoPt; *c* — хаотичное МСМ-изображение, наблюдаемое при двухпроходном сканировании малой области; *d* — МСМ-изображение большей области, внутри которой видна доменная структура, образовавшаяся под влиянием поля зонда.

в полуконтактном режиме. Подобная операция обычно проводится с целью уменьшения вероятности повреждения зонда при однопроходном сканировании. Она позволяет выбрать участок, не имеющий загрязнений или дефектов поверхности. Как правило, в других образцах существенного изменения характера доменной структуры при этом не происходит. Однако, в случае пленок CoPt это не так. Под воздействием пространственно-локализованного магнитного поля зонда в них формируется совершенно новый тип устойчивой в отсутствие внешнего поля доменной структуры. При сканировании зонд „разрывает“ лабиринтную доменную структуру, оставляя за собой изолированные домены. Некоторые из них имеют круглую форму и, по-видимому, структуру скирмионов. Другие же — вытянутые, так называемые „черви“, вероятно, представляют из себя цепочку скирмионов, то есть структуру с большим топологическим зарядом [14].

Покажем далее, что наличие исходной доменной структуры является весьма важным фактором, определяющим возможность дальнейшего формирования изо-

лированных доменов. Пленки, исследуемые нами, при наложении внешнего перпендикулярного к поверхности магнитного поля напряженностью порядка 1–3 кОе переходили в однородно намагниченное состояние, которое сохранялось после снятия поля. Об отсутствии доменной структуры в этом случае можно судить по данным МСМ. Стоит отметить, что подобные измерения имеют определенную специфику — магнитные моменты зонда и пленки должны быть направлены в одну сторону. В противном случае даже при однопроходном режиме провести МСМ-измерения, не нарушив исходное магнитное состояние пленки, достаточно сложно. Рис. 2, *a* иллюстрирует эту ситуацию. На изображении четко видны все следы перемещения зонда до начала сканирования по плоскости. Для того, чтобы определить положение и наклон поверхности образца, нам было необходимо выполнить измерения высоты в нескольких точках, проход к ним осуществлялся по трем горизонтальным линиям. Далее зонд переместился по диагонали в левый нижний угол — точку начала сканирования. В результате пленка оказалась локально

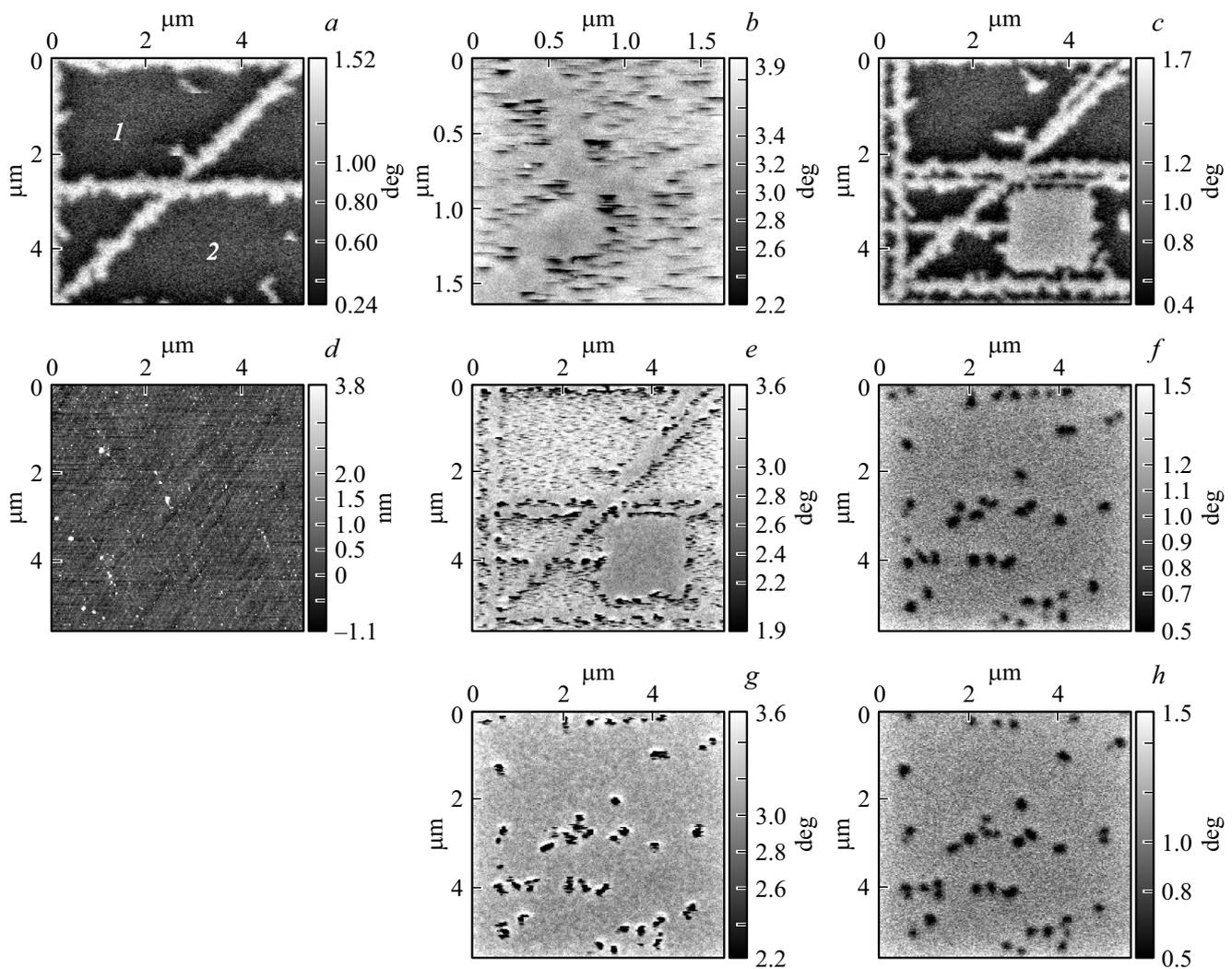


Рис. 2. АСМ — изображения пленки CoPt; *d* — топография поверхности; *a–c, e–h* — МСМ-изображения.

перемагничена практически на всем пути движения зонда в полуконтактном режиме. Цифрами на рис. 2, *a* обозначены две области, внутри которых исходное однородное состояние намагниченности не было нарушено. Внутри одной из них на малой площади $1.7 \times 1.7 \mu\text{m}$ мы провели двухпроходное сканирование. Магнитное изображение, полученное при этом (рис. 2, *b*) не слишком информативно. Оно лишь свидетельствует о постоянном изменении магнитной структуры образца под влиянием поля зонда. Чтобы оценить конечный результат мы вновь отсканировали большую площадь ($5.6 \times 5.6 \mu\text{m}$) в однопроходном режиме — рис. 2, *c*. Видно, что изолированные домены не образовались, зонд однородно перемагнитил область двухпроходного сканирования. Далее мы повторили этот эксперимент, но уже на всей исследуемой площади — выполнили двухпроходное сканирование (рис. 2, *e*) и вслед за ним однопроходное (рис. 2, *f*). На рис. 2, *e* видно, что при первой операции происходило постоянное перемагничивание образца на всей площади за исключением

малого квадрата, где мы заранее изменили направление намагниченности. В результате в пленке образовались изолированные домены (рис. 2, *f*), но лишь в областях, где до этого имелись доменные стенки. В области 1, где пленка была однородно намагничена, произошло лишь изменение направления намагниченности. То есть в случае, когда зонд движется предельно близко к пленке, в которой отсутствуют домены, происходит переворот намагниченности. Если же на пути движения зонда имеются доменные стенки, то под влиянием пространственно локализованного поля зонда могут возникать новые магнитные образования — мелкие изолированные домены. Их внутреннюю магнитную структуру определить из наших экспериментов нельзя, можно лишь предполагать, что она близка к структуре скирмиона. При этом суммарный магнитный момент домена противоположен по направлению магнитному моменту зонда. Мы продолжили эксперимент, повторно выполнив двухпроходное и вслед за ним однопроходное сканирование. Как видно из сопоставления рис. 2, *f* и 2, *h*,

это не привело к существенной перестройке доменной структуры — можно отметить лишь незначительные изменения числа и положения изолированных доменов. Это может быть следствием либо закрепления доменов на дефектах, либо спецификой их взаимодействия с пространственно-неоднородным полем зонда. В пользу последнего предположения можно привести два довода. Во-первых, отсутствие корреляции магнитной структуры с расположением дефектов (скорее всего, загрязнений), видимых на топографии поверхности (рис. 2, *d*). Вблизи выступов можно было бы ожидать ослабления влияния поля зонда за счет большего расстояния до поверхности пленки. Во-вторых, отсутствие самих изолированных доменов в области, где пленка изначально была однородно намагничена. Это говорит о том, что наличие дефектов внутренней структуры пленки, если таковые имеются, не является достаточным условием образования изолированных доменов. Для этого необходимо, чтобы в пленке присутствовали доменные границы. В то же время наши эксперименты, проведенные с различными образцами, показали, что в случае, когда изолированные домены сформировались, дальнейшее воздействие на них полем зонда лишь в редких случаях приводит к уничтожению домена. Перевести зондом пленку в однородно намагниченное состояние уже не удастся.

Возвращаясь к рис. 2, *a*, отметим наличие трех светлых доменов, расположенных вне линий. У них есть одна особенность — резкая граница на нижнем крае. Как мы уже говорили, это свидетельствует о том, что магнитная структура изменилась, причем это произошло непосредственно во время сканирования, в данном случае однопроходного сканирования по плоскости. В результате образовались изолированные светлые (на фазовом изображении) домены. Это прямо противоположно тому, что мы наблюдали на рис. 1, *b, d* и 2, *f, h*, где были темные домены. В случаях, представленных на этих рисунках, зонд перемагнитил основную часть пленки, оставив изолированные домены отталкивания. На рис. 2, *a* видны, изолированные домены притяжения. Для более подробного исследования этого вопроса нужна методика, позволяющая исследовать доменную структуру, постепенно приближая зонд к образцу. Как показано выше, стандартная однопроходная методика не применима, поскольку вносит серьезные искажения. Следовательно, требуется бесконтактный метод, при котором зонд никогда близко не приближается к поверхности, но при этом расстояние до нее можно контролировать.

Мы предлагаем метод на основе дальнего действия электростатического взаимодействия между зондом и образцом. Реализация его может быть различна, представим здесь один из возможных вариантов. На первом этапе проводится градуировка. Зонд опускается на поверхность в полуконтактном режиме в точке, далеко отстоящей от области последующего сканирования. Далее зонд приподнимается на заданное расстояние, прикладывается напряжение в несколько вольт между

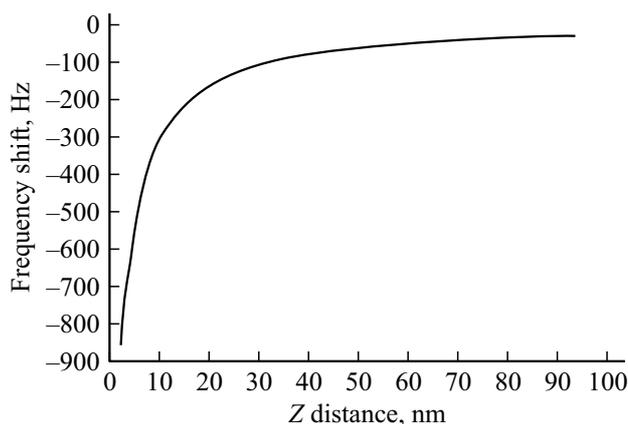


Рис. 3. Зависимость сдвига резонансной частоты зонда от расстояния до поверхности образца при разности их потенциалов, равной 3 В.

зондом и образцом, и включается режим автоподстройки резонансной частоты. За счет электростатического взаимодействия на зонд действует сила притяжения, градиент этой силы вызывает уменьшение резонансной частоты. Чем ближе поверхность, тем сильнее электростатическое взаимодействие. Проведя измерение зависимости смещения резонансной частоты от расстояния до поверхности (рис. 3), мы получили градуировочную кривую. Далее можно сканировать поверхность в режиме частотной модуляции, то есть, используя смещение частоты в качестве входного сигнала обратной связи, поддерживающей постоянное расстояние до поверхности. Если образец электрически однороден, это позволяет зарегистрировать наличие магнитной неоднородности. Вклад магнитного взаимодействия будет либо суммироваться с электростатическим взаимодействием в области притяжения, либо вычитаться в области отталкивания. В результате сканирования получается топографическое изображение, подобное эквипотенциальной поверхности, в которой основной вклад дает электростатика, а магнитное взаимодействие является более слабым возмущением. Светлые участки (более высокие места) на топографии такой „электростатической подушки“ будут соответствовать магнитному притяжению, как и на фазовых изображениях. На рис. 4 представлены результаты эксперимента. Сканирование при сдвиге частоты, соответствующем высоте порядка 100 нм, показывает, что в пленке появились светлые домены (рис. 4, *a*). Домены имеют резкий нижний край, т.е. образовались в процессе сканирования. Повторное сканирование в тех же условиях уже не имеет следов дополнительного перемагничивания, но четко указывает на наличие изолированного мелкого домена круглой формы (рис. 4, *b*). Далее была проведена серия измерений с постепенным приближением зонда к поверхности и наблюдением перехода пленки в размагниченное состояние. После каждого такого шага проводилось

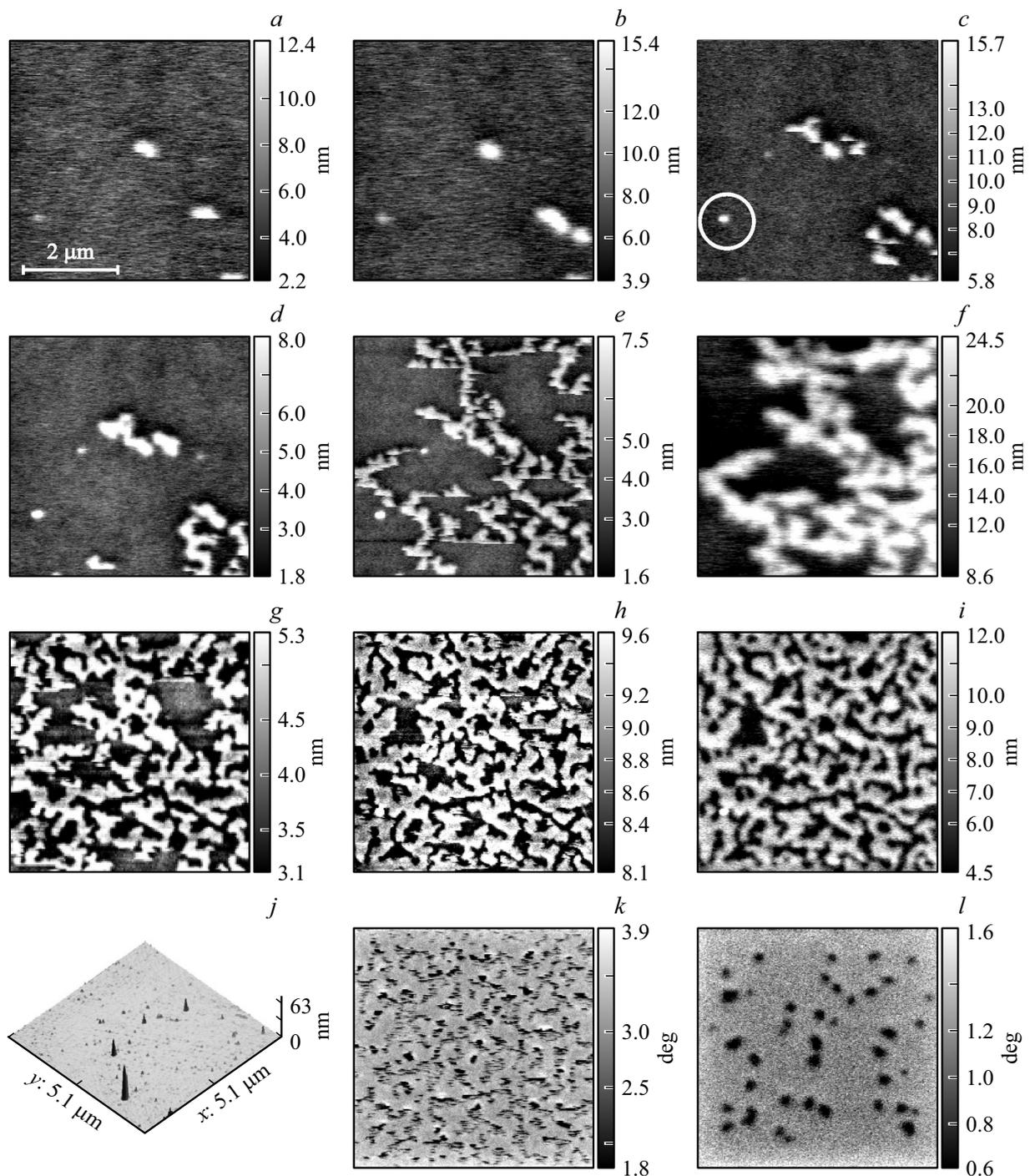


Рис. 4. *a–i* — изображения, полученные в режиме частотной модуляции при сдвиге частоты, равном -20 Hz (*a*), -20 Hz (*b*), -30 Hz (*c*), -40 Hz (*d*), -60 Hz (*e*), -20 Hz (*f*), -80 Hz (*g*), -120 Hz (*h*), -40 Hz (*i*); *j* — топография поверхности пленки; *k* — магнитное изображение при двухпроходном сканировании; (*l*) магнитное изображение при однопроходном сканировании.

контрольное сканирование на большой высоте, примеры двух из них представлены на рис. 4, *f,i*. Следует отметить, что светлая точка, выделенная кружком на рис. 4, *c* и присутствующая на всех сканах рис. 4, не является магнитной неоднородностью. Она обусловлена наличием дефекта или загрязнения на поверхности. В этом мы убедились, завершив измерения сканиро-

ванием в стандартном двухпроходном режиме и получив данные о реальном профиле поверхности образца (рис. 4, *j*). Последующее измерение магнитной структуры в однопроходном режиме продемонстрировало, что после двухпроходного сканирования в пленке, как и в предыдущих случаях (рис. 1, 2), образовались темные изолированные домены (рис. 4, *l*). Данный эксперимент

показывает, что, меняя при сканировании расстояние от зонда до поверхности, мы можем регулировать величину и степень пространственной локализации магнитного поля зонда, воздействующего на образец. Это позволяет формировать ту или иную доменную структуру. При больших расстояниях наблюдается сценарий, характерный для перемагничивания пленки в однородном внешнем поле. В отдельных местах появляются мелкие домены обратной полярности, которые постепенно разрастаются, формируя лабиринтную структуру. При контакте зонда с образцом магнитное поле зонда максимально и предельно локализовано. Под его воздействием лабиринтная структура преобразуется в массив изолированных доменов.

Следует отметить, что все наши эксперименты проводились при комнатной температуре и в отсутствие внешнего магнитного поля. В этом заключается существенное отличие от известных работ, где изолированные домены, трактуемые в этих работах как скирмионы, наблюдались во внешнем магнитном поле, перпендикулярном поверхности пленки. Стартуя с низких значений поля и постепенно увеличивая его напряженность, авторы работ [4,5] показали, что под действием поля происходит постепенное разрушение лабиринтной доменной структуры, и вблизи поля насыщения в пленке остаются отдельные изолированные домены обратной полярности. В работах [14,15] был выполнен эксперимент по перемагничиванию пленки: магнитное поле изменялось в широком диапазоне, соответствующем переходу пленки из одного насыщенного состояния в противоположное. Скирмионы наблюдались в полях, близких к насыщению, при малых значениях магнитного поля образовывалась лабиринтная структура. Вероятно, в данном случае это было связано с низкой коэрцитивностью использованных образцов. В наших экспериментах пленки оставались в насыщенном состоянии после снятия магнитного поля. Размагниченная пленка имела лабиринтную доменную структуру. Это два предельных случая, между которыми существует состояние с изолированными доменами. Вопрос заключается в том, как выполнить переход в данное состояние. На сегодняшний момент не существует четкого протокола, позволяющего с помощью внешнего однородного магнитного поля создать в пленке изолированные домены, устойчивые в отсутствие поля. В работах [2,3] отдельные скирмионы и решетки скирмионов наблюдались без поля в пространственно ограниченных элементах — дисках микронных размеров. В этом случае скорее можно говорить о процессе самоорганизации. Под действием серии коротких биполярных импульсов магнитного поля происходило разбиение полосового домена на достаточно плотный массив скирмионов [3]. В целом же диск как до так и после серии импульсов находился в состоянии близком к размагниченному. Наши эксперименты были выполнены на неструктурированной

поверхности пленки, а изолированные домены формировались на фоне большой площади обратной намагниченности.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что в отсутствии внешнего магнитного поля в многослойных пленках $\text{Co}_{45}\text{Pt}_{55}$, могут существовать различные типы магнитного упорядочения. Пленки могут быть как однородно намагничены, так и иметь различные типы доменных структур. В частности, в них могут существовать мелкие изолированные домены, по форме и размерам подобные магнитным скирмионам. Используя магнитный зонд атомно-силового микроскопа в качестве инструмента, можно перевести пленку из одного метастабильного состояния в другое. При проведении подобных операций может быть полезен метод (назовем его методом электростатической подушки), основанный на искусственном увеличении электростатического взаимодействия зонда и образца, и позволяющий выполнять сканирование в бесконтактном режиме. Дополнительные исследования необходимы для того, чтобы изучить внутреннюю магнитную структуру доменов и сопоставить ее со структурой скирмионов. В этой связи отметим, что результаты работы показывают возможность формирования и последующего изменения магнитной структуры пленки в отдельной, заранее выбранной области образца. Это может быть полезно при проведении и интерпретации результатов различных экспериментов, например по исследованию эффекта Холла в многослойных структурах.

Список литературы

- [1] A. Fert, N. Reyren, V. Cros. *Nature Rev. Mater.* **2**, 17031 (2017).
- [2] O. Boulle, J. Vogel, H. Yang, S. Pizzini, D. de Souza Chaves, A. Locatelli, T.O. Mentès, A. Sala, L.D. Buda-Prejbeanu, O. Klein, M. Belmeguenai, Y. Roussigne, A. Stashkevich, S.M. Cherif, L. Aballe, M. Foerster, M. Chshiev, S. Auffret, I.M. Miron, G. Gaudin. *Nature Nanotechnology* **11**, 449 (2016).
- [3] S. Woo, K. Litzius, B. Kruger, M.Y. Im, L. Caretta, K. Richter, M. Mann, A. Krone, R.M. Reeve, M. Weigand, P. Agrawal, I. Lemes, M.A. Mawass, P. Fischer, M. Kläui, G.S. Beach. *Nature Mater.* **15**, 501 (2016).
- [4] C. Moreau-Luchaire, S.C. Mouta, N. Reyren, J. Sampaio, C.A. Vaz, N. Van Horne, K. Bouzheouane, K. Garcia, C. Deranlot, P. Warnicke, P. Wohlhuter, J.M. George, M. Weigand, J. Raabe, V. Cros, A. Fert. *Nature Nanotech.* **11**, 444 (2016).
- [5] A. Hrabec, J. Sampaio, M. Belmeguenai, I. Gross, R. Weil, S.M. Chérif, A. Stachkevitch, V. Jacques, A. Thiaville, S. Rohart. *Nature Commun.* **8**, 15765 (2017).
- [6] W. Legrand, D. Maccariello, N. Reyren, K. Garcia, C. Moutafis, C. Moreau-Luchaire, S. Collin, K. Bouzheouane, V. Cros, A. Fert. *Nano Lett.* **17**, 2703 (2017).

- [7] J. Chang, V.L. Mironov, B.A. Gribkov, A.A. Fraerman, S.A. Gusev, S.N. Vdovichev. *J. Appl. Phys.* **100**, 104304 (2006).
- [8] V.L. Mironov, B.A. Gribkov, S.N. Vdovichev, S.A. Gusev, A.A. Fraerman, O.L. Ermolaeva, A.B. Shubin, A.M. Alexeev, P.A. Zhdan, C. Binns *J. Appl. Phys.* **106**, 053911 (2009).
- [9] Г.В. Арзамасцева, А.М. Балбашов, Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, А.Г. Темирязов, М.П. Темирязева. *ЖЭТФ* **147**, 793 (2015).
- [10] А.Г. Темирязов, С.А. Саунин, В.Е. Сизов, М.П. Темирязева. *Изв. РАН. Сер. физ.* **78**, 78 (2014)
- [11] А.В. Здоровейщев, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, М.В. Ведь, Ю.А. Данилов, И.В. Ерофеева, Р.Н. Крюков, Д.Е. Николичев. *ФТП* **49**, 1649 (2015).
- [12] А.В. Здоровейщев, М.В. Дорохин, О.В. Вихрова, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, А.Г. Темирязов, М.П. Темирязева. *ФТТ* **58**, 2186 (2016).
- [13] F. Büttner, I. Lemesh, M. Schneider, B. Pfau, C.M. Günther, P. Hessing, J. Geilhufe, L. Caretta, D. Engel, B. Krüger, J. Viehhaus, S. Eisebitt, G.S.D. Beach. *Nature Nanotech.* **12**, 1040 (2017).
- [14] M. Raju, A. Yagil, A. Soumyanarayanan, A.K.C. Tan, A. Almoalem, O.M. Auslaender, C. Panagopoulos. *arXiv* (2017) arXiv:1708.04084v1 (2017).
- [15] A. Soumyanarayanan, M. Raju, A. L. Gonzalez Oyarce, A.K.C. Tan, M.-Y. Im, A.P. Petrović, P. Ho, K.H. Khoo, M. Tran, C.K. Gan, F. Ernult, C. Panagopoulos. *Nature Mater.* **16**, 898 (2017).

Редактор К.В. Емцев