

05,08

Применение зондовой микроскопии в изучении роста нанопроволок в порах трековых мембран

© Д.Л. Загорский^{1,3}, Д.А. Бизяев², А.П. Чукланов²

¹ НИЦ „Курчатовский институт“,
Москва, Россия

² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН,
Казань, Россия

³ РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,
Москва, Россия

E-mail: dzagorskiy@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 15 мая 2026 г.

Принята к публикации 22 мая 2026 г.

Изучен процесс роста магнитных нанопроволок из пермендюра ($\text{Fe}_{50}\text{Co}_{50}$) при их получении методом матричного синтеза. Получена серия образцов с различной степенью заполнения пор. Исследование образцов методом зондовой микроскопии показало, что магнитный сигнал начинает детектироваться задолго до появления топографического изображения растущей нанопроволоки. При приближении фронта роста вершущек нанопроволок к поверхности мембраны интенсивность магнитного сигнала возрастает, а размер магнитного изображения приближается к величине геометрического диаметра поры. Изучено изменение интенсивности магнитного сигнала при пошаговом увеличении расстояния от вершины проросшей нанопроволоки, что позволило точнее интерпретировать результаты для нанопроволок, „заглубленных“ в матрице. Проведено компьютерное моделирование магнитного сигнала и показано, что характер изменения сигнала при увеличении расстояния до вершины нанопроволоки — уменьшение интенсивности и увеличение „ширины“ — согласуется с экспериментальными изображениями.

Ключевые слова: матричный синтез, магнитные нанопроволоки, магнитно-силовая микроскопия, моделирование.

DOI: 10.61011/FTT.2026.05.63447.9475

1. Введение

Одномерные нанообъекты интересны как с теоретической точки зрения проявления квантоворазмерных свойств, так и в плане их практического применения [1–3]. Одним из таких объектов являются магнитные нанопроволоки (НП). Их можно применять в качестве элементов электроники, устройств хранения информации, сенсоров, эмиттеров, микромагнитов и т.п. Обзор возможных применений этих объектов приведен в работе [4]. Основной способ получения таких объектов — метод матричного синтеза, который состоит в гальваническом заполнении пор специальной матрицы требуемым веществом [5,6]. Регулируя параметры матрицы (количество пор, их диаметр и геометрическую форму) и характер заполнения (состав электролита и режим гальванического процесса) можно получать различные по геометрии и составу массивы НП [7,8]. Многофакторность процесса роста обуславливает необходимость его тщательного контроля. После получения образцы (как правило, в виде массивов НП) исследуются структурными методами и методами микроскопии. Большой интерес представляет изучение протекания процесса, его различных стадий. В ходе самого процесса электроосаждения проводится запись зависимости тока от времени (для

потенциостатического режима). Эта зависимость является единственным способом контроля *in situ*, при этом она дает интегральные характеристики, усредненные для миллионов НП в образце. На протяжении основной фазы роста процесс проходит в „линейном“ режиме: длина НП примерно пропорциональна времени осаждения. Однако некоторые важные фазы процесса не описываются простыми закономерностями. Так, известно, что на начальной стадии процесса („старт“ электроосаждения металла (сплава) на контактный слой на „дне“ пор) проявляются т.н. переходные процессы, которые могут играть значительную роль для последующего роста и которые до сих пор изучены слабо. Заключительный этап заполнения пор также является весьма сложным, т.к. при приближении фронта роста к поверхности мембраны и выходе части НП за пределы поры, режим может измениться, например из-за образования т.н. „шапочек“. Описанный эффект для большинства задач является нежелательным, и поэтому электроосаждение должно быть прекращено до его начала.

При этом часто бывает важно „дорастить“ НП до максимально возможной длины. В ряде случаев получение максимально длинных НП повышает эффективность использования матрицы за счет максимального коэффициента заполнения пор [9]. В других случаях

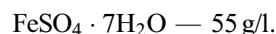
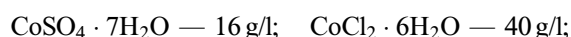
„дорашивание“ НП (желательно большей их части) до уровня „вровень“ с поверхностью матрицы необходимо для образования контактов с пленкой, которая затем наносится на эту поверхность [10].

Таким образом ясно, что изучение последнего этапа заполнения пор представляется весьма важным; при этом задача осложняется тем, что НП остаются „невидимыми“ вплоть до их выхода на поверхность ростовой матрицы. Так как в настоящей работе объекты изучения являются магнитными, то для контроля процесса было предложено использовать метод магнитно-силовой микроскопии (МСМ) как способ контроля на локальном уровне [11]. Так, предполагается, что зонд МСМ позволит детектировать по магнитному сигналу конец НП до того, как растущий сплав заполнит пору до конца. Очевидно, что при этом существует возможность использовать и другую моду сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) — атомно-силовую микроскопию (АСМ). Можно ожидать, что одновременное изучение магнитного сигнала и топографии поверхности на разных стадиях прорастания НП даст дополнительную информацию. Отметим, что метод АСМ/МСМ в изучении НП, полученных методом матричного синтеза, применялся и ранее. Решались задачи изучения НП „вдоль“ их длины и с „торца“; соответственно, использовались два подхода с различными геометриями сканирования. В первом случае НП, отделенные от массива, наносились на поверхность держателя, последующее сканирование зондом АСМ/МСМ проводилось вдоль осей НП. Таким образом были изучены как единичные НП, так и их агломераты [12]. Во втором случае НП исследовались непосредственно в ростовой матрице. При этом НП заполняли всю длину поры и концы НП находились на уровне плоскости матрицы [13]. Это позволяло детектировать НП (точнее их концы), проводя сканирование вдоль поверхности полимерной матрицы. Отметим, что в обоих случаях часть экспериментов проводилась с приложением внешнего магнитного поля, направленного, как правило, вдоль оси НП. Метод использовался для изучения влияния магнитного поля на перемагничивание НП и/или изменение характера их взаимодействия. Во втором случае были изучены магнитные сигналы от НП, которые доросли или даже вышли на поверхность в виде шляпок. При этом магнитный сигнал от „заглубленных“ НП не изучался, однако на текущем этапе именно он представляет основной интерес. Из теории известно, что интенсивность МСМ сигнала сильно зависит от расстояния между зондом и образцом [14–17]. Вопрос в том, как реализуется это на практике, есть ли другие факторы (соседние НП, равномерность заполнения и прочее) которые не учитывались ранее. Решению этого вопроса и посвящена настоящая работа, где метод МСМ использовался для последовательного изучения финальных стадий заполнения пор трековой матрицы с растущими НП. В качестве материала НП был выбран пермендюр [18].

2. Эксперимент: материалы, объекты и методы исследования

Матрица. Для получения массива НП был использован метод матричного синтеза — осаждение сплава металлов в поры матриц. В качестве таких ростовых матриц применялись полимерные трековые мембраны производства ОИЯИ (г. Дубна). Для предварительных экспериментов были использованы матрицы с диаметром пор от 100 nm и более, основные эксперименты проводились на матрицах с диаметром пор 600 nm и поверхностной плотностью пор около $1.7 \cdot 10^7$ pores/cm². Для проведения электроосаждения на одной из поверхностей матрицы был создан сплошной электропроводящий слой меди толщиной 1–2 μm.

Электролит. В качестве материала для осаждения в поры был выбран пермендюр — железо-кобальтовый сплав эквивалентного состава (Fe₅₀Co₅₀). Предполагалось, что его высокая магнитожесткость позволит легче детектировать магнитное поле от НП. Для создания НП из пермендюра применялся электролит следующего состава:



Также в составе электролита использовались добавки: борная кислота H₃BO₃ — 25 g/l (для поддержания кислотности раствора); лаурилсульфат — 1 g/l (для лучшего смачивания полимера и проникновения электролита внутрь пор) и аскорбиновая кислота — 1 g/l (для предотвращения нежелательного окисления двухвалентного железа в трехвалентное). Описанный состав был выбран исходя из ранее полученных результатов. Так, в работах [19,20] было показано, что при электроосаждении НП из сплавов, содержащих железо, происходит преимущественное осаждение этого металла из-за эффекта аномального соосаждения железа. В кобальтсодержащих электролитах этот эффект значительно ниже, чем в никельсодержащих, однако его необходимо принимать во внимание. Именно поэтому для получения сплава с эквивалентным составом был выбран электролит с содержанием ионов железа несколько меньшим, чем содержание ионов кобальта.

Электроосаждение. Процесс проводили при комнатной температуре в гальванической ячейке по двух-электродной схеме. Использовали анод из железа. Ростовое напряжение составляло 1.5 V. Была проведена серия экспериментов с последовательно изменявшимся временем роста с целью получения массивов НП с различной длиной (см. ниже). В ходе процесса были сняты зависимости протекающего тока от времени (т.н. потенциостатические кривые), которые позволяли оценить интегральную характеристику текущего состояния.

Зондовая микроскопия. Метод СЗМ был основным в изучении полученных НП. Использовался атомно-силовой микроскоп Ntegra (Россия) с площадью скани-

рования $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ под программным управлением Nova SPM v.1.2 (Россия). Для изучения поверхности мембраны была использована комбинация двух режимов СЗМ. Режим АСМ в полуконтактной моде сканирования использовался для получения топографии поверхности. Для изучения магнитных свойств НП применяли режим МСМ в однопроходной методике и сканировании по линии с контролируемым подъемом зонда над средней высотой участка поверхности, полученной при АСМ сканировании. В МСМ режиме измерялся сдвиг фазы колебаний кантилевера. В обоих режимах (АСМ и МСМ) использовали один и тот же кантилевер марки Multi75M-G с магнитным покрытием из кобальта (Budget Sensors). Данные кантилеверы обладают жесткостью балки $k = 3 \text{ N/m}$ и резонансной частотой 75 kHz , коэрцитивная сила зондов составляет 30 mT . При изучении серии образцов с различным временем роста расстояние, на которое поднимался зонд над поверхностью, было фиксированным и составляло около 100 nm для большинства образцов (исключение составляли образцы с сильно развитым рельефом поверхности, не позволяющим производить сканирование с данным подъемом). Такой способ сканирования в МСМ режиме позволяет избежать влияния неровностей топографии на получаемый МСМ контраст, который обычно проявляется при двухпроходном режиме [21]. Для увеличения интенсивности сигнала было использовано „подмагничивание“ образца, путем приложения вертикального магнитного поля вдоль оси симметрии НП. Для этого применялся постоянный неодимовый магнит. При этом матрица с НП располагалась непосредственно на поверхности данного магнита, который создавал в образце магнитное поле величиной 40 mT (величина поля контролировалась с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8).

Отдельно была исследована зависимость интенсивности МСМ сигнала от расстояния между зондом и вершиной НП. Для получения этой зависимости был выбран образец с НП, у которых вершина находилась на уровне поверхности матрицы. В этих экспериментах расстояние между зондом и поверхностью пошагово увеличивалось от 50 до 3000 nm , и на каждой высоте проводилось сканирование. Полученная зависимость в последствии была использована для оценки „глубины залегания“ НП в образцах с различными временами роста, полученных на предыдущем этапе. Дополнительные детали этого этапа описаны ниже.

Моделирование. Экспериментальные результаты были сравнены с результатами моделирования. Намагниченность НП рассчитывалась с помощью программы OOMMF [22]. Затем виртуальное МСМ изображение от таких НП, полученное для различных расстояний „зонд — вершина НП“, было промоделировано с помощью программы „виртуальный микроскоп“ [23]. Детально моделирование описано в соответствующем разделе.

3. Результаты

Виды образцов. На предварительном этапе были получены образцы с использованием матриц с различным диаметром пор — от 100 до 600 nm . При последующем изучении было показано, что в матрицах с малыми и средними диаметрами пор МСМ сигналы детектировать достаточно сложно из-за малого межпорового расстояния в этих матрицах, что связано со спецификой их получения. Ввиду этого сигналы от соседних НП часто сливаются. Поэтому дальнейшие исследования проводились только на образцах, выращенных в матрицах с диаметром пор 600 nm .

Была проведена серия экспериментов по электроосаждению НП в поры соответствующей ростовой матрицы с различной длительностью процесса. Было изготовлено 13 образцов, с последовательно увеличивавшимся временем, составлявшим $28, 35, 42, 50, 60, 70, 120, 300, 350, 400, 450, 600$ и 1000 s . Все полученные образцы представляли собой матрицы, заполненные проволоками одинакового диаметра (600 nm) и различной, соответственно возрастающей, длины.

Зондовая микроскопия образцов. Поверхности всех синтезированных образцов были исследованы с помощью СЗМ с использованием АСМ и МСМ режимов сканирования. Было проведено два этапа исследований. На первом изучалось появление МСМ сигнала от залегающих на глубине НП, и как со временем роста НП (с увеличением их высоты) он изменяется. На втором проводились исследования изменения МСМ сигнала при отдалении магнитного зонда от вершины проросшей НП. Другими словами, сначала изучалось как меняется МСМ сигнал по мере приближения вершины НП к зонду за счет увеличения ее времени роста, а затем, по мере удаления зонда от вершины проросшей НП. Сделано это для того, чтобы их сравнить между собой. В первом случае не известна высота НП при данном времени роста и как далеко она находится от поверхности. Во втором случае НП уже находится на поверхности и контролируемо изменяя расстояние до нее можно получить зависимость МСМ сигнала от расстояния. Так как природа взаимодействия в обоих случаях одна и та же, то в результате этого можно их сопоставить друг с другом, и по полученным данным определить, на какой глубине от поверхности находятся НП.

3.1. Зависимость МСМ сигнала от времени роста НП (первый этап)

Для первых семи образцов из серии (т.е. со временем осаждения металлов до 120 s включительно) МСМ сигнал не детектировался. Были получены топографии участков в АСМ-режиме от данных образцов. В качестве примера на рис. 1 представлены типичные АСМ- и МСМ-изображения для поверхности седьмого образца — мембраны со временем осаждения 120 s .

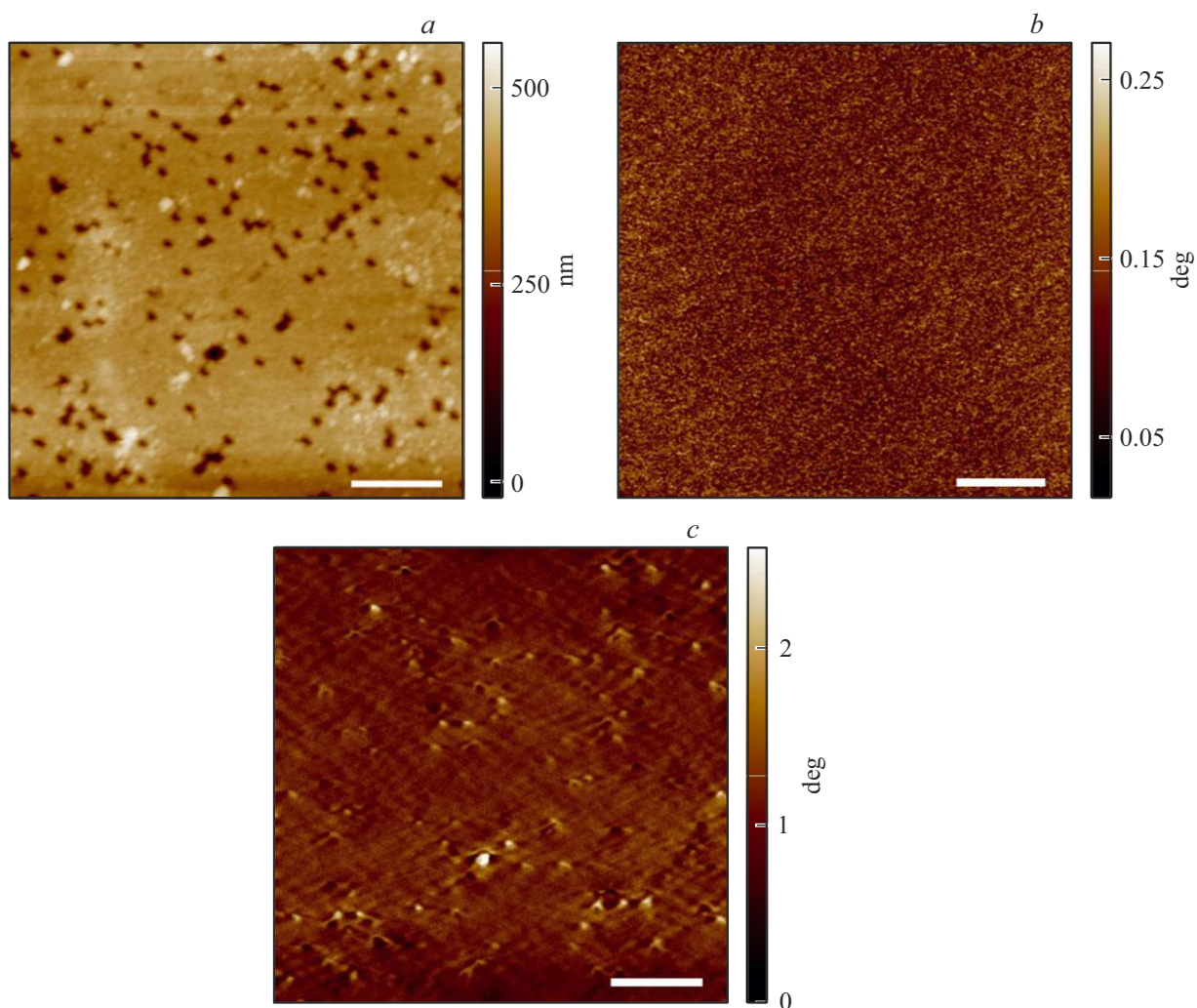


Рис. 1. АСМ-изображение участка поверхности мембраны при времени осаждения в течение 120 s (*a*) и МСМ-изображения этого участка, полученные в однопроводной (*b*) и двухпроводной (*c*) методиках сканирования. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

Как видно по АСМ-изображению (рис. 1, *a*) на поверхности мембраны видны поры диаметром 600 nm. НП внутри пор или выходящих за их пределы („наружу“) на данном изображении не видно. МСМ-изображение, полученное с помощью однопроводной методики сканирования (рис. 1, *b*), демонстрирует отсутствие какого-либо магнитного сигнала. В то время как МСМ-изображение этого же участка поверхности мембраны, полученное с помощью двухпроводной методики сканирования (рис. 1, *c*), демонстрирует наличие светлого контраста, соответствующего месту расположения пор. Это наглядно отражает влияние неровности топографии на получаемое МСМ-изображение и связано, в первую очередь, со способом получения изображения с помощью данной методики. В этом случае зонд повторяет полученный рельеф при сканировании топографии в первом проходе, тем самым опускаясь ближе к поверхности, когда повторяет провалы, связанные с порами.

Из-за приближения к поверхности в этот момент на зонд начинают дополнительно действовать силы Ван-дер-Ваальса, и на изображении получается светлый контраст, который можно принять за магнитный. Отличие заключается в том, что чаще всего получаемый таким образом контраст имеет латеральные размеры немного меньше или полностью совпадает с диаметром пор и имеет хорошую интенсивность. В то время как магнитный сигнал имеет такую интенсивность от близко расположенных к поверхности магнитных объектов (будет показано ниже). Конечно, можно предположить, что в данном случае проволоки могли дорасти до поверхности и поэтому от них регистрируется МСМ сигнал. Однако при использовании однопроводной методики сканирования в таком случае тоже должен наблюдаться МСМ сигнал, но его нет (рис. 1, *b*), что свидетельствует о том, что на рис. 1, *c* наблюдаются артефакты. Поэтому все дальнейшие исследования

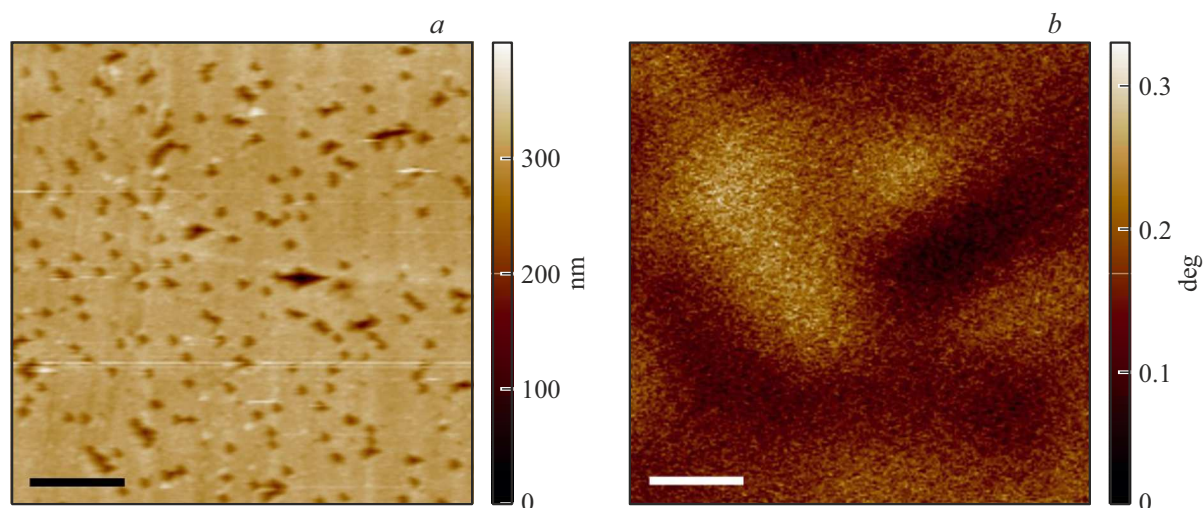


Рис. 2. АСМ — (а) и МСМ — (b) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 300 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

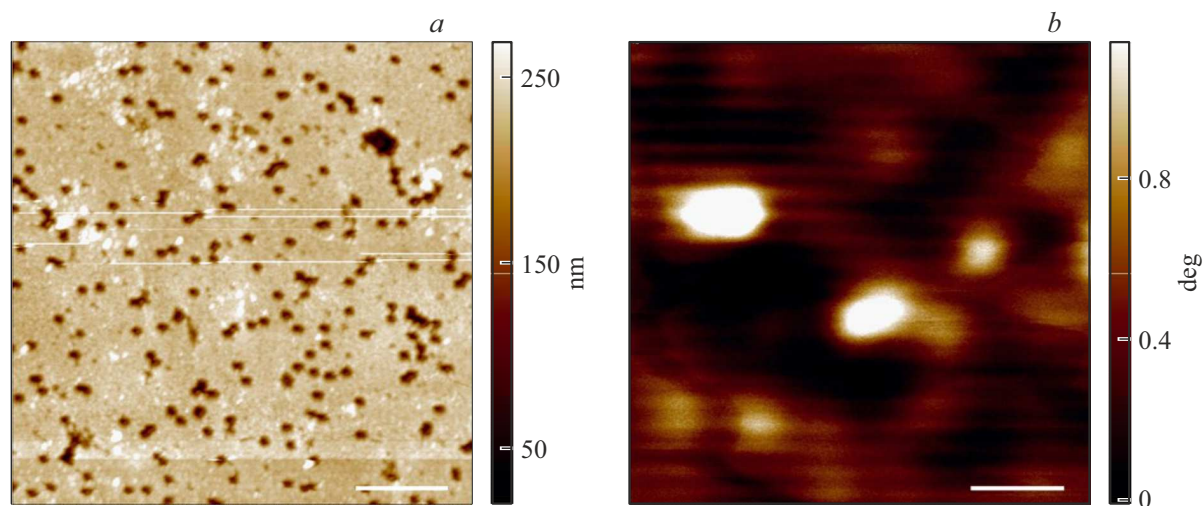


Рис. 3. АСМ- (а) и МСМ- (b) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 350 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

проводились с использованием однопроходной методики сканирования.

На рис. 2 показаны результаты изучения образцов со временем осаждения 300 s. На АСМ-изображении (рис. 2, а) хорошо видно, что изображение поверхности мембраны (топография), как и полученное ранее (см. рис. 1, а), имеет гладкую поверхность с изображением пор без проросших НП. В то же время, на МСМ-изображениях (рис. 2, б) видны светлые области, показывающие появление магнитного сигнала. Можно предположить, что это сигнал от вершин „заглубленных“ НП. Видно, что латеральные размеры светлых и темных областей составляют несколько микрометров, что значительно больше диаметров НП (600 nm). Это может быть обусловлено тем, что НП залегают глубоко от поверхности, и это ослабляет и „размывает“ дипольное взаимодействие между зондом и НП. В связи с этим,

сигнал уширяется и снижается его интенсивность — это подтверждается и слабостью самих сигналов: размах контраста составляет всего 0.3 deg. (Такие сигналы больше похожи не на сигналы от отдельной НП, а на сигналы от агломератов НП). Средняя величина магнитного контраста составляет те же 0.3 deg. Данная величина необходима в дальнейшем для определения залегания НП в толще матрицы. Как будет показано далее, максимальный контраст (его размах от минимума до максимума) может быть обусловлен МСМ сигналом от агломерата, а не от отдельной НП, что повлияет на определение глубины залегания НП.

На рис. 3 представлены АСМ- и МСМ-изображения поверхности следующего образца в серии со временем осаждения 350 s. Топографическое изображение (АСМ, рис. 3, а), как и для предыдущих образцов, демонстрирует только выходы пор, незаполненных сплавом. МСМ-

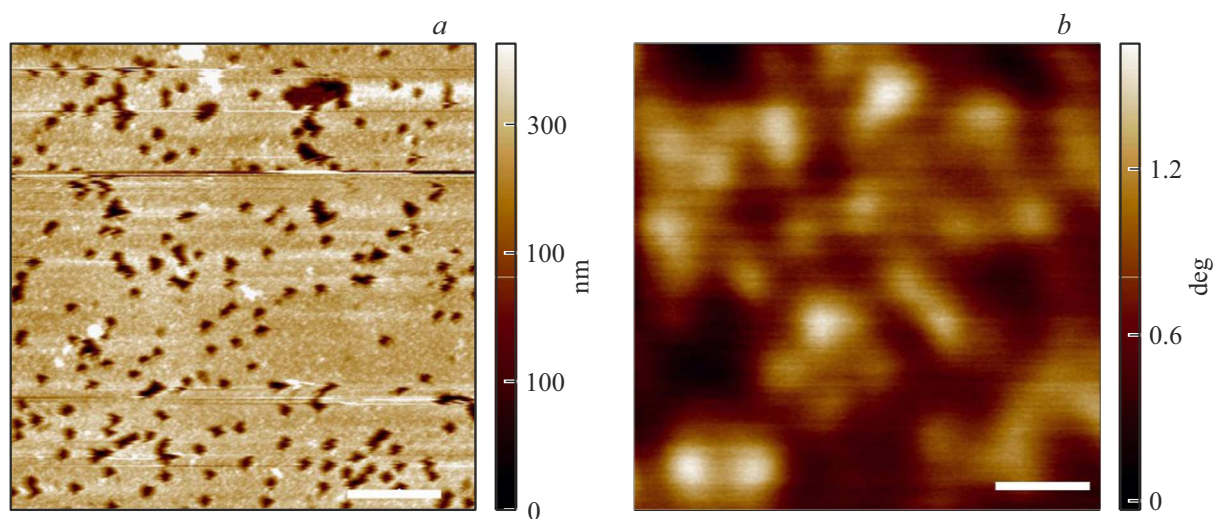


Рис. 4. АСМ- (*a*) и МСМ- (*b*) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 400 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

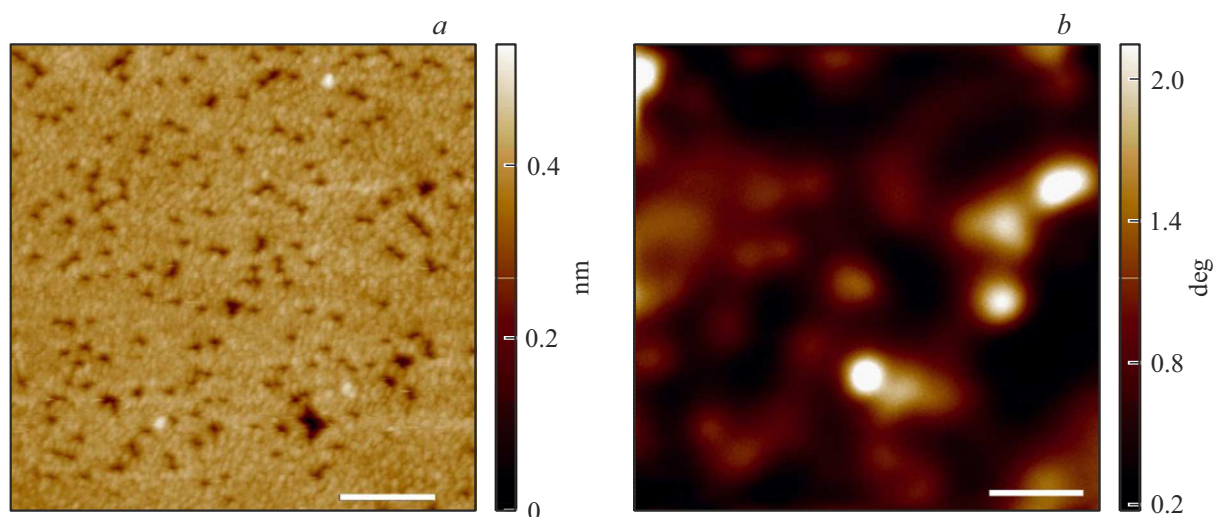


Рис. 5. АСМ- (*a*) и МСМ- (*b*) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 450 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

изображение (рис. 3, *b*) показывает магнитные сигналы (светлые области МСМ контраста), интенсивность которых заметно выросла. Размах контраста составляет до 1.1 deg. Как можно заметить, сигнал детектируется не во всех местах, где расположены поры, а на некоторых участках поверхности, и имеет различную интенсивность и размер. Это может быть связано как с разной высотой полученных НП, так и с взаимодействием между соседними НП, которые могут ослаблять или усиливать друг друга. На МСМ-изображении виден результат этого взаимодействия, а не сигнал от отдельных НП. Ввиду большего времени осаждения, чем на предыдущем (восьмом) образце, НП находятся ближе к поверхности и поэтому средний латеральный размер светлых областей (рис. 3, *b*) заметно меньше, чем для образца с меньшим временем роста (рис. 2, *b*).

На рис. 4 показаны АСМ- и МСМ-изображения поверхности образца, полученного при времени осаждения 400 s. Интенсивность МСМ сигнала выросла: размах контраста на всем участке достиг 1.6 deg (рис. 4, *b*), а его средняя величина равна 0.8 deg, что свидетельствует о большем приближении основного количества НП к поверхности матрицы. Латеральные размеры области сигналов (светлый МСМ контраст) различаются по размерам, однако их средняя величина еще уменьшилась (с $2.2 \mu\text{m}$ наблюдавшихся для образцов со временем роста 350 s до $1.8 \mu\text{m}$ для образцов со временем роста 400 s).

На рис. 5 показаны АСМ- и МСМ-изображения образцов, полученных при времени осаждения 450 s. Величина МСМ контраста (размах от темного до светлого) увеличилась до 1.9 deg (рис. 5, *b*), средняя величина

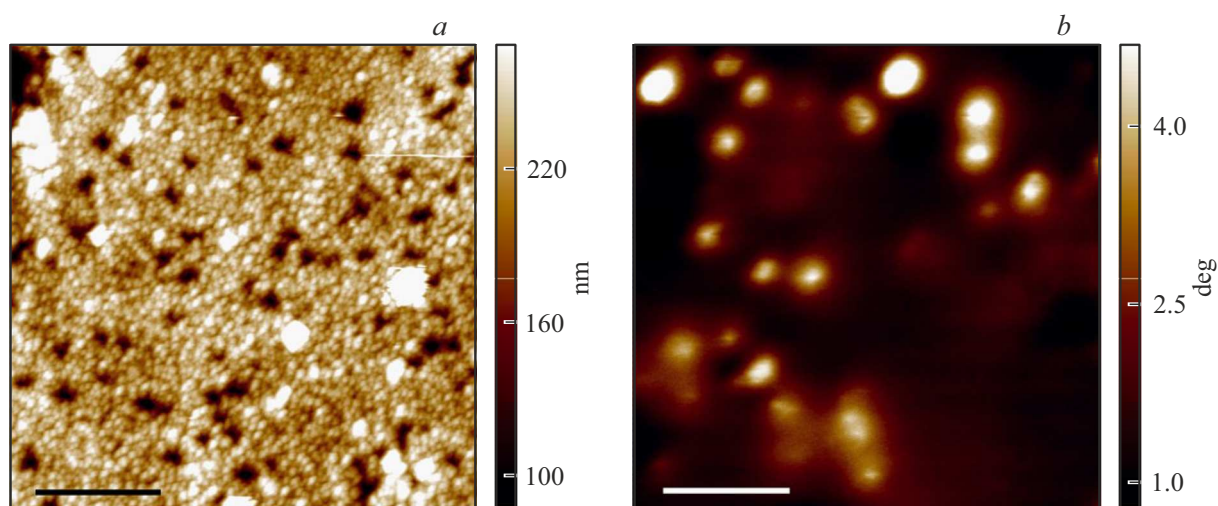


Рис. 6. АСМ- (*a*) и МСМ- (*b*) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 600 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

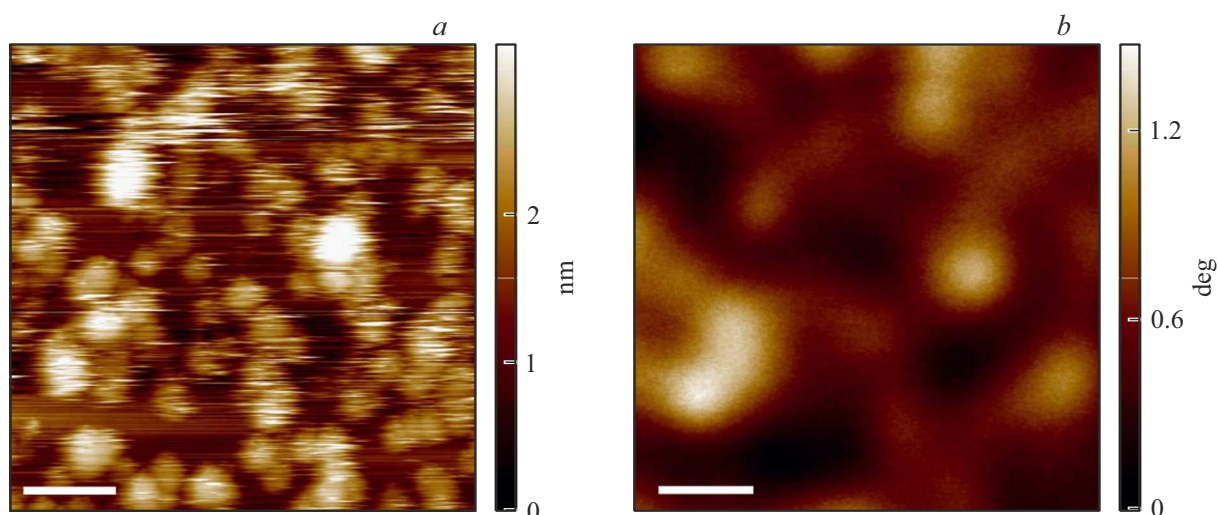


Рис. 7. АСМ- (*a*) и МСМ- (*b*) изображения участка поверхности мембраны при времени осаждения 1000 s. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

составила 1.1 deg. Можно заметить, что кроме роста интенсивности МСМ контраста уменьшается площадь соответствующих светлых областей. По сравнению с рис. 2, *b*, где средний диаметр пятна светлого контраста примерно $5 \mu\text{m}$, на рис. 3, *b* он уже составляет $\sim 2.2 \mu\text{m}$, а на рис. 5, *b* становится менее $1.6 \mu\text{m}$.

Результаты исследования образцов со временем роста 600 s представлены на рис. 6. На топографическом изображении (АСМ, рис. 6, *a*) детектируется уже достаточно много светлых областей с диаметром как 600 nm, так и более одного микрона. Возможно, что это вершины отдельных НП. Рост этих НП происходит уже вне матрицы, вследствие чего на их концах образуются так называемые „шапочки“, диаметр которых уже превышает диаметр пор. Однако, не от всех данных светлых областей на топографии (рис. 6, *a*) есть МСМ сигнал.

Вероятно, что не все они являются выросшими НП, и могут быть каким-либо дефектом поверхности или случайным „мусором“. Наличие проросших НП и пор на одном участке свидетельствует о неравномерном росте НП в полимерной матрице. По МСМ-изображению (рис. 6, *b*) видно, что при этом времени осаждения величина магнитного отклика (размах контраста МСМ) достигает 3.9 deg, средняя величина равна в данном случае 2.5 deg. Средний диаметр пятна светлого контраста приближается к диаметру поры 600 nm (рис. 6, *b*).

Изображения поверхности образцов, полученных со временем осаждения 1000 s представлены на рис. 7. На топографическом изображении (АСМ, рис. 7, *a*) поровых отверстий уже не видно, наблюдаемая картина соответствует ситуации, когда сплав полностью заполнил значительное количество пор, образовавшиеся затем

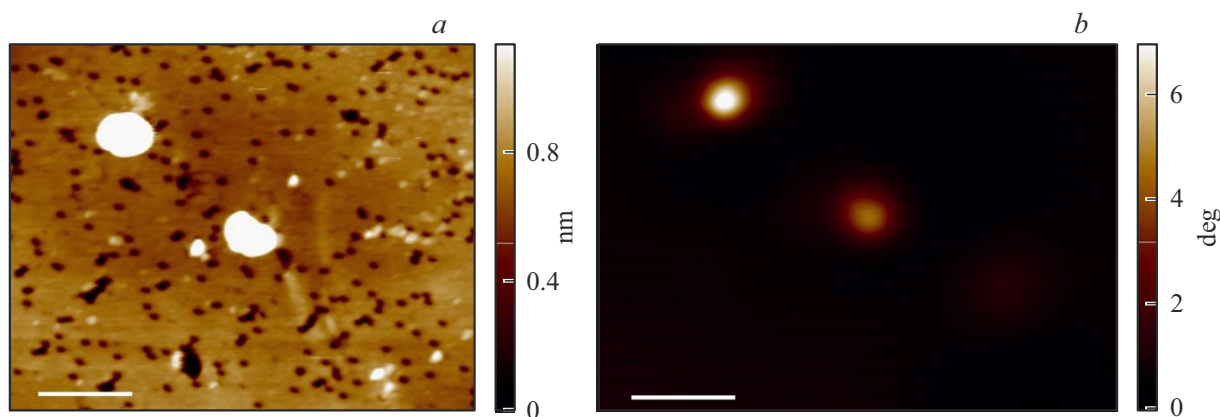


Рис. 8. *a* — АСМ-изображение поверхности мембраны для образца со временем осаждения 600 с; *b* — МСМ-изображения этого участка с высотой подъема зонда над вершиной НП 50 нм и общим подъемом зонда относительно средней высоты (нулевого уровня) 350 нм. Площади сканов составляют $30 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длины размерных меток 5 μm .

„шапочки“ при дальнейшем росте практически полностью срослись, образуя сплошной слой, с развитым (неровным) рельефом.

При этом интенсивность МСМ сигнала уменьшается, а диаметр области МСМ контраста увеличивается (рис. 7, *b*). Общий вид изображения приближается по данным параметрам к МСМ-изображению образца со временем осаждения 350 с (см. рис. 3, *b*). Такой вид изображения может быть обусловлен образованием сплошного слоя металла. Причиной может быть и то, что измерения в этом случае производятся в другом режиме: из-за сильно развитого рельефа образовавшегося металлического слоя (рис. 7, *a*) сканирование проводится при большем подъеме зонда над поверхностью. Последнее приводит к снижению интенсивности сигнала и его „размытию“. Еще одной причиной своеобразия изображения может быть то, что под сплошным слоем с рельефной поверхностью находятся сами НП — длинные „магнитные нити“ полностью заполнившие поры. Отметим, что образование сплошного металлического слоя на поверхности последнего образца также подтверждается методом оптической микроскопии. В силу этого целесообразно последний образец (со временем роста 1000 с) из рассмотрения исключить, и для итогового определения динамики роста сравнивать предыдущие образцы — с седьмого по двенадцатый. Сравнение этих образцов (со временем роста от 120 до 600 с) позволяет выявить ряд закономерностей:

1. МСМ сигнал начинает детектироваться задолго до выхода вершин растущих НП на поверхность (как будет показано ниже, детектирование МСМ сигнала становится возможным при расстоянии порядка 3.5 μm до поверхности мембраны). В начале регистрации сигнал достаточно слаб (0.3 deg), а размер наблюдаемых областей МСМ сигнала значительно больше диаметра НП (несколько микрометров против 600 нм диаметра НП), что можно объяснить рассеиванием магнитных полей как зонда, так и НП.

2. По мере роста и, соответственно, приближения вершин НП к поверхности, интенсивность МСМ сигнала увеличивается (с 0.3 до 3.9 deg), а его размер уменьшается (с нескольких микронов до диаметра НП — 600 нм). При этом МСМ сигнал все больше становится похожим на сигнал от отдельных НП, а не от агломерата.

3. Для образцов со временем роста 600 с небольшая часть растущих НП лидеров выходит на поверхность, давая соответствующее топографическое АСМ-изображение. Большинство НП еще не достигло поверхности, но часть из них дает МСМ сигнал.

3.2. Зависимость МСМ сигнала от расстояния до вершины НП (второй этап)

Для того, чтобы определить, на каком расстоянии от поверхности МСМ зонд начинает чувствовать магнитную НП была проведена серия экспериментов по исследованию образца со временем осаждения 600 с. Как было отмечено ранее, на данном образце имеются как заглубленные НП, так и НП полностью заполнившие пору и выходящие на поверхность матрицы (проросшие). Для исследования на поверхности образца было выбрано место с такими проросшими НП (рис. 8). На АСМ-изображении (рис. 8, *a*) видны два характерных светлых пятна, соответствующие проросшим НП, что подтверждается наличием магнитного сигнала в этих областях (рис. 8, *b*). В эксперименте зонд поэтапно поднимали над поверхностью с шагом 50 нм и на каждом шаге проводилось сканирование. Было установлено, что при расстоянии 300 нм над поверхностью мембраны зонд все еще касается поверхности НП. МСМ-изображение, представленное на рис. 8, *b*, получено при подъеме зонда дополнительно на 50 нм над этим уровнем. При этом уровень поверхности мембраны был выбран в качестве начального („нулевого“), от которого в дальнейшем будет отсчитываться расстояние зонд-вершина НП.

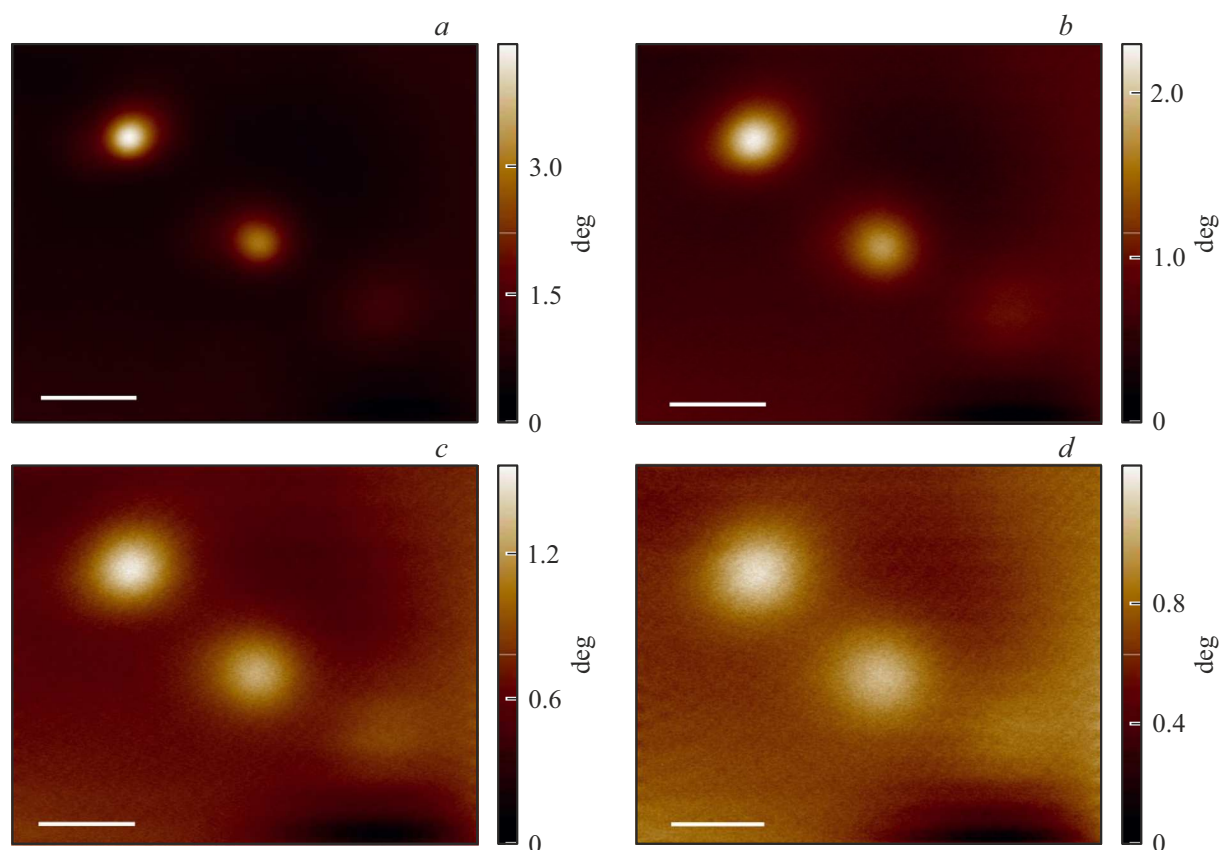


Рис. 9. МСМ-изображения с высотой подъема зонда над вершиной НП, nm: *a* — 300, *b* — 900, *c* — 1500 и *d* — 2100. Площади сканов составляют $30 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $5 \mu\text{m}$.

На следующем этапе высота подъема зонда увеличивалась с фиксированным шагом: на начальном этапе на 100 nm, а затем (из-за слабого изменения интенсивности сигнала) на 200 nm. На каждом шаге производилось сканирование и получалось МСМ изображение. Примеры полученных изображений приведены на рис. 9. Из рис. 9 видно, что с увеличением расстояния зонд-вершина НП интенсивность МСМ сигнала падает, а размер (площадь) соответствующих светлых областей растет. Измерение интенсивности МСМ сигнала производилось для наибольшей из двух проросших НП. Анализ полученных результатов позволил получить зависимость интенсивности МСМ сигнала от высоты подъема зонда над вершиной НП, которая представлена на рис. 10.

Используя полученную зависимость, можно по интенсивности МСМ сигнала оценивать расстояние между НП (во всяком случае ее вершины) и зондом. Зная толщину полимерной матрицы и высоту подъема зонда над ее поверхностью, можно оценить на какую высоту выросла НП при данном времени осаждения. Например, согласно рис. 10, *a*, для образца со временем осаждения материала 300 s (появления МСМ сигнала с интенсивностью 0.3 deg) расстояние от поверхности мембраны до вершины НП составляет около $3.5 \mu\text{m}$. Используя полученные данные (рис. 10, *a*) и экспериментальные средние

значения интенсивности МСМ сигнала исследованных образцов, был построен график зависимости расстояния от поверхности мембраны до вершины НП от времени осаждения (рис. 10, *b*). Нулевое расстояние до вершины НП на данном графике означает, что НП достигла поверхности мембраны или вышла на ее поверхность.

Необходимо отметить, что величина интенсивности МСМ сигнала зависит от типа зонда и материала НП. Поэтому полученную зависимость можно применять только для пермендюра и зонда с кобальтовым покрытием с определенными механическими характеристиками. Однако можно предположить, что общий характер зависимости будет таким же и для других комбинаций „тип зонда — материал НП“.

4. Компьютерное моделирование

Полученные экспериментальные данные (рис. 3–7) показывают, что для разных сканов наблюдаются магнитные сигналы от НП различной интенсивности. Можно предположить, что это обусловлено неравномерным ростом НП в различных порах мембраны. Для проверки этого было проведено компьютерное моделирование магнитного сигнала с помощью программы OOMMF [22].

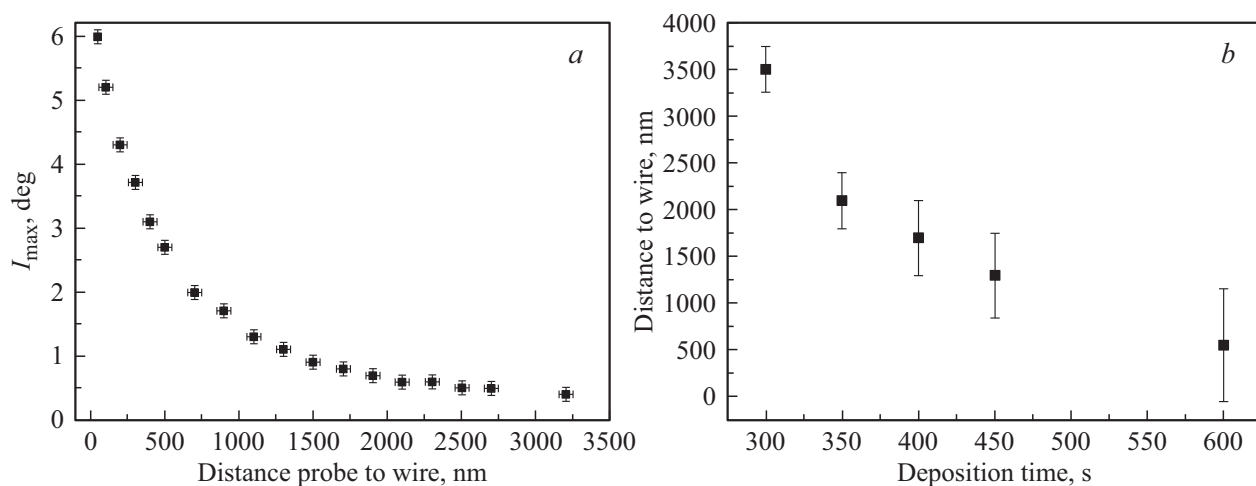


Рис. 10. *a* — экспериментальная зависимость изменения максимальной интенсивности ($I_{\max}$) МСМ сигнала от расстояния до вершины НП; *b* — график расстояния от поверхности мембраны до вершины НП от времени осаждения, построенный с помощью данных МСМ и графика на рис. 10, *a*.

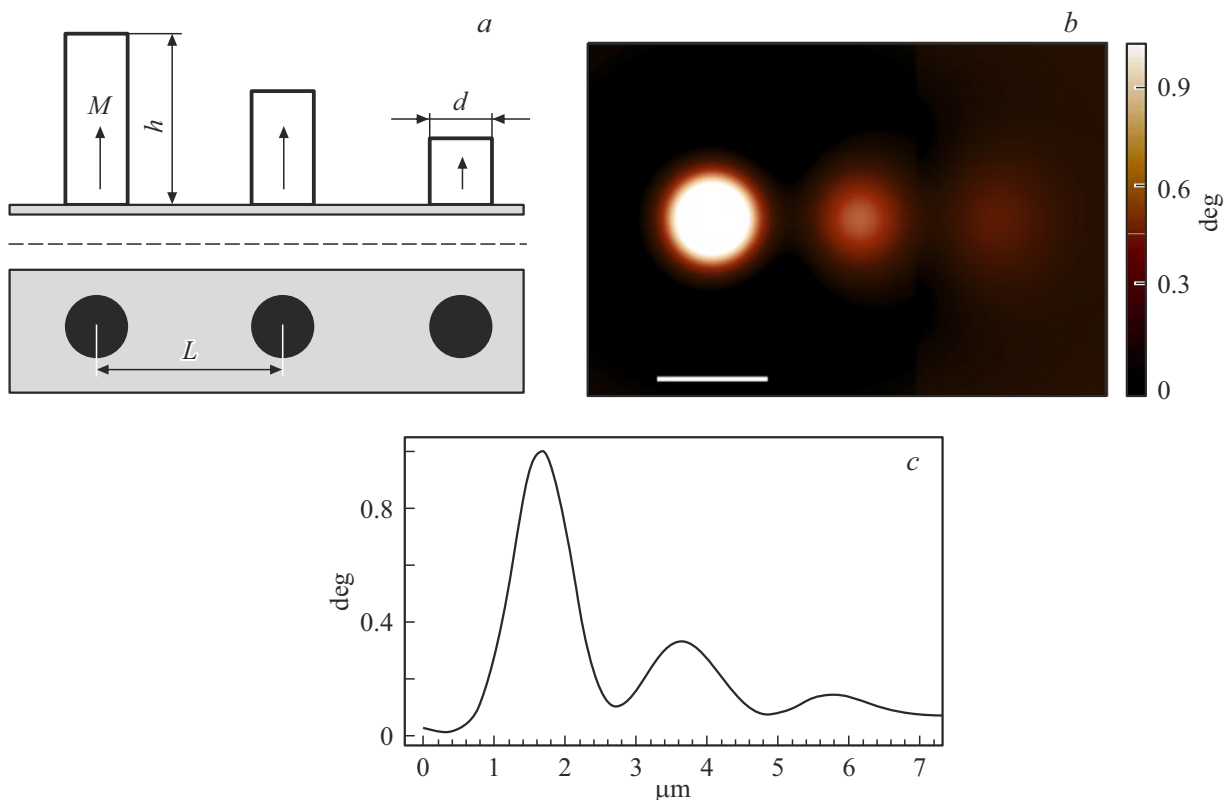


Рис. 11. *a* — первая маска первого типа для моделирования образца: вид сбоку и вид сверху; *b* — виртуальное МСМ-изображение (длина размерной метки $1.5 \mu\text{m}$); *c* — профиль, сделанный по виртуальному МСМ-изображению. Буквами обозначены: M — суммарная намагниченность в НП, направление которой показано черными стрелками, h — высота НП (800, 600 и 400 nm), d — диаметр НП (600 nm) и L — расстояние между центрами НП ($2 \mu\text{m}$).

В компьютерном моделировании МСМ-изображений использовались следующие параметры для всех используемых типов масок: 1 — диаметр НП 600 nm; 2 — материал НП — пермендюр с параметрами, $A = 18 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$ (константа обменного взаимодействия), $M_s = 1850 \text{ kA/m}$ (намагниченность насыщения)

и $K_1 = 0 \text{ J/m}^3$ (константа магнитокристаллической анизотропии, образцы считаются поликристаллическими). Отличие составляло в масках, а именно в геометрических размерах — высота НП, расстояние между НП или агломератами. Также в одной маске была близкая к реальной на эксперименте геометрия. Поэтому было

сделано три типа модельных масок. Первый тип — одиночные не взаимодействующие между собой НП разной высоты, второй тип — НП одной высоты, но с образованием агломератов, не взаимодействующих между собой. Третий тип — реальная, взятая из эксперимента геометрия — расположение НП и их высота. Так как узнать реальную высоту НП в матрице другими способами не удастся, то использовался предложенный выше метод. Все НП были одной высоты — $8.5\text{ }\mu\text{m}$ согласно рис. 10, *b* для времени осаждения 450 s. Допущением является равномерный рост НП.

Было сгенерировано 2 маски первого типа. На маске первого типа №1 высоты НП составляли 800, 600 и 400 nm (рис. 11, *a*). На маске №2 — 800, 700 и 500 nm. НП высотой 800 nm присутствовала в обеих масках первого типа, рассчитанный магнитный сигнал от нее был постоянен и эквивалентен в обоих случаях, что позволило сравнить MCM сигналы от обеих масок между собой. Расстояние (L) между НП в $2\text{ }\mu\text{m}$ заведомо больше h гарантировало отсутствие магнитного взаимодействия между НП.

Отметим, что взятые в модели длины (от 400 до 800 nm) были значительно меньше фактических длин НП (до $10\text{ }\mu\text{m}$). Моделирование НП высотой $8.5\text{ }\mu\text{m}$, как на реальном эксперименте, будет произведено ниже с помощью маски третьего типа. Распределение намагниченности в такой длинной НП было однородным в центре и слегка расходилось на обоих концах НП. В итоге при данных параметрах моделирования (высота НП $8.5\text{ }\mu\text{m}$ и наличие внешнего магнитного поля величиной 40 mT, направленного вдоль длинной стороны НП) все НП были однородно намагниченными вдоль своей оси на расстоянии не менее $6\text{ }\mu\text{m}$. Это давало возможность в моделировании на первых этапах (тип масок 1 и 2) брать НП с меньшей длиной. Последнее позволило значительно уменьшить объем вычислений. В результате моделирования были получены распределения намагниченности в данных (согласно маскам) НП.

Далее при помощи программы „виртуальный микроскоп“ [23] было получено виртуальное MCM-изображение от смоделированных распределений намагниченности. Для примера приведено виртуальное MCM-изображение, сделанное по первой маске (рис. 11, *b*). При этом при моделировании виртуального MCM-изображения использовалась высота подъема зонда над образцом 1400 nm.

Как видно по виртуальному MCM-изображению (рис. 11, *b*) и по сделанному по центру образца профилю (рис. 11, *c*) интенсивность MCM контраста падает с уменьшением высоты столбиков. Также изменяется и площадь пятна MCM контраста — она увеличивается с уменьшением высоты НП. Моделирование по данным параметрам (изменение интенсивности MCM сигнала и размера площади пятна в зависимости от расстояния зонд/вершина НП) совпадает с поведением полученных результатов на эксперименте лишь качественно. На

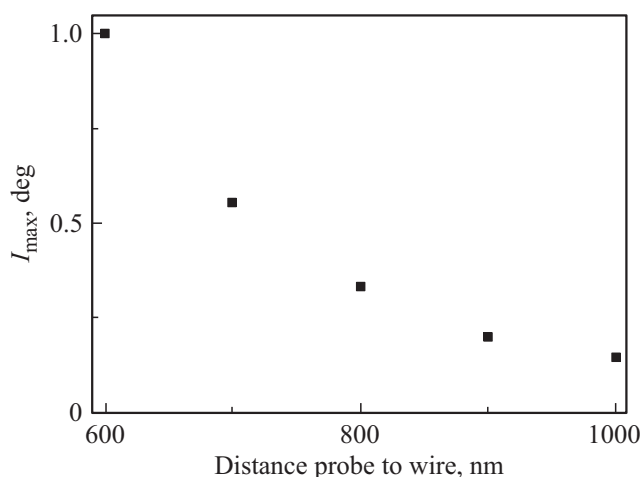


Рис. 12. Смоделированная зависимость изменения максимальной интенсивности ($I_{\max}$) MCM сигнала от расстояния зонд/вершина НП.

виртуальном MCM-изображении (рис. 11, *b*) и его профиле (рис. 11, *c*) хорошо видно, что при разной высоте НП интенсивность разная, что также наблюдается на эксперименте (см. панели *b* на рис. 3–7). Так как виртуальное MCM-изображение строится по принципу взаимодействия магнитных диполей зонда и образца (НП), то можно считать, что интенсивность отклика зависит от диполь-дипольного взаимодействия между ними и аналогичным образом меняется с расстоянием.

Анализируя данные моделирования для НП разной высоты, был построен следующий график зависимости интенсивности MCM сигнала от расстояния (рис. 12) с учетом высоты подъема зонда при моделировании равной 1400 nm. В итоге высота подъема зонда над вершиной самой высокой НП (800 nm) при моделировании составляет 600 nm ($1400 - 800$ nm). Необходимо отметить, что при моделировании производится нормировка интенсивности MCM сигнала, поэтому MCM сигнал от самой высокой НП всегда будет равен 1. Кроме того, при моделировании не учитывается влияние атмосферы и для идеальных (без структурных дефектов) НП. Однако, из-за того, что высота модельных НП была существенно меньше экспериментальной, зависимость интенсивности MCM сигнала от расстояния между зондом и поверхностью образца совпадает с экспериментальными данными лишь качественно: например, интенсивность смоделированного MCM сигнала падала быстрее, чем на эксперименте. Поэтому необходимо было усложнить модельную маску.

В маске второго типа было сгенерировано 4 агломерата НП, расположенных по углам квадратной подложки. Каждый агломерат содержал в себе разное количество НП, от 1 до 4. Высота всех НП была фиксирована и составляла 800 nm, диаметр — 600 nm. Расстояние между НП внутри агломерата было 200 nm, расстояние между агломератами $4\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 13, *a*). Таким

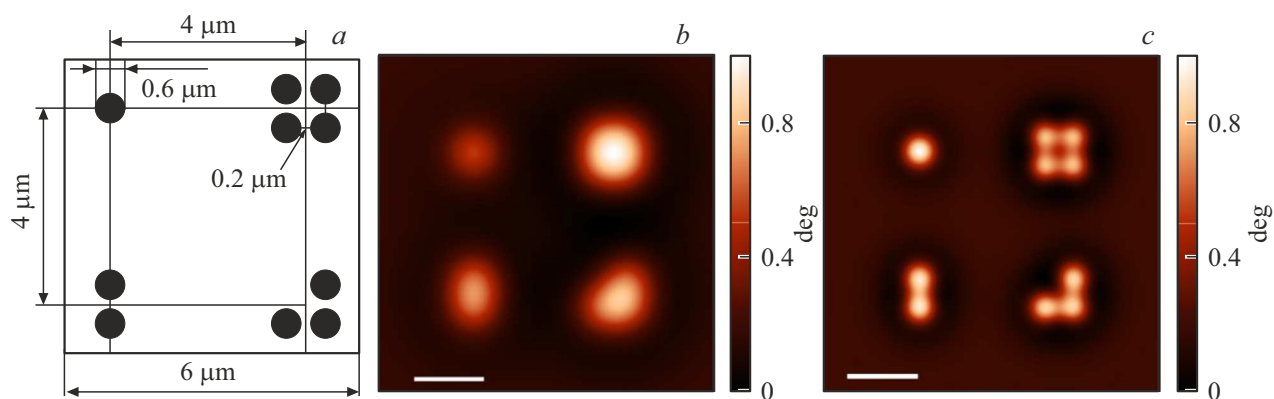


Рис. 13. *a* — маска второго типа для моделирования образца; *b, c* — виртуальные МСМ-изображения при разной высоте подъема зонда над основанием образца: *b* — $2\text{ }\mu\text{m}$, *c* — $1.4\text{ }\mu\text{m}$. Длина размерных меток $2\text{ }\mu\text{m}$.

образом магнитное взаимодействие между агломератами отсутствовало, внутри же агломерата было сильное магнитостатическое взаимодействие. Данный тип маски моделировал наличие близкорасположенных НП в мембране. МСМ сигнал от такого агломерата мог как усиливаться (если НП в агломерате намагничены преимущественно в одну сторону), так и ослабляться (если НП были намагничены противоположно). Моделирование и виртуальные МСМ на рис. 13, *b* и 13, *c* были получены по схеме, описанной выше.

В результате данного моделирования было установлено, что при сканировании зондом на достаточно удаленном расстоянии (при моделировании $2\text{ }\mu\text{m}$ над основанием образца) МСМ сигнал от области с несколькими НП сливался и имел вид как от одной НП, но с более интенсивным сигналом и большим размером площади светлого контраста. Такое поведение характерно для взаимодействующего агломерата из нескольких НП. МСМ сигнал от единичной НП имел наименьшую интенсивность и площадь. Данное качественное поведение МСМ сигнала хорошо согласуется с данными эксперимента (см. рис. 2–6), где на полученных МСМ-изображениях виден МСМ сигнал разной интенсивности от разных НП с гораздо большей площадью светлого контраста, чем диаметр поры. Расположение пор в мембране, по АСМ-изображениям (рис. 2–6), носит хаотичный характер и смоделированная ситуация (см. рис. 13) как с отдельными НП, так и с образованием агломератов, вполне реализуется.

К сожалению, из-за используемой в программе „виртуальный микроскоп“ нормировки смоделированного МСМ-изображения, получить увеличение МСМ сигнала при приближении зонда к вершине НП (как на эксперименте) не удастся (рис. 13, *b* и 13, *c*). Однако, при этом наблюдается уменьшение площади светлого контраста до диаметра НП (рис. 13, *c*), что также наблюдается на эксперименте. Интенсивность МСМ сигнала при этом выравнивается, что отличается от эксперимента. Данное отличие может быть объяснено неравномерным ростом НП в матрице, и они имеют разную высоту.

В заключении было проведено компьютерное моделирование по третьему типу маски, которая является экспериментально полученным с помощью АСМ изображением поверхности участка мембраны со временем осаждения материала 450 s (см. рис. 5, *a*). Данное изображение выступало в качестве маски для компьютерного моделирования (рис. 14, *a*). Поры были заполнены на высоту $8.5\text{ }\mu\text{m}$ ($1.5\text{ }\mu\text{m}$ до поверхности мембраны) согласно графику зависимости расстояния от поверхности мембраны до вершины НП от времени осаждения (рис. 10, *b*). Данное моделирование хорошо совпадает по параметрам (диаметр, длина НП, наличие магнитного поля величиной 40 mT вдоль длинной стороны НП, расположение НП относительно друг друга) с реальным экспериментом. Допущением является одинаковая высота всех НП. Так как ранее проведенное моделирование показало, что в зависимости от расстояния зонд/вершина НП меняется не только интенсивность, но форма МСМ сигнала, то была получена серия виртуальных МСМ-изображений с разной высотой подъема зонда (рис. 14, *b–d*). Шаг подъема при моделировании составлял 500 nm . В результате удалось получить достаточно схожее виртуальное МСМ-изображение (рис. 14, *d*) с экспериментальным (рис. 5, *b*). Отличия заключаются в том, что на модельном изображении видно гораздо больше НП, чем на экспериментальном. Это обусловлено тем, что при моделировании все поры были представлены растущими НП, а на эксперименте могло оказаться, что не все поры были заполнены металлом или, как показали предыдущие моделирования, не все НП имели одинаковую высоту (т.е. был неравномерный рост). Также агломераты из близко расположенных НП имеют большую интенсивность по сравнению с отдельными НП, что хорошо заметно как на эксперименте, так и при моделировании. Совпадение модельного и экспериментального МСМ-изображений (как было сказано ранее — не полное) сводится к тому, что расположение агломератов и их более интенсивный МСМ сигнал находятся на одних и тех же местах. Также имеет место

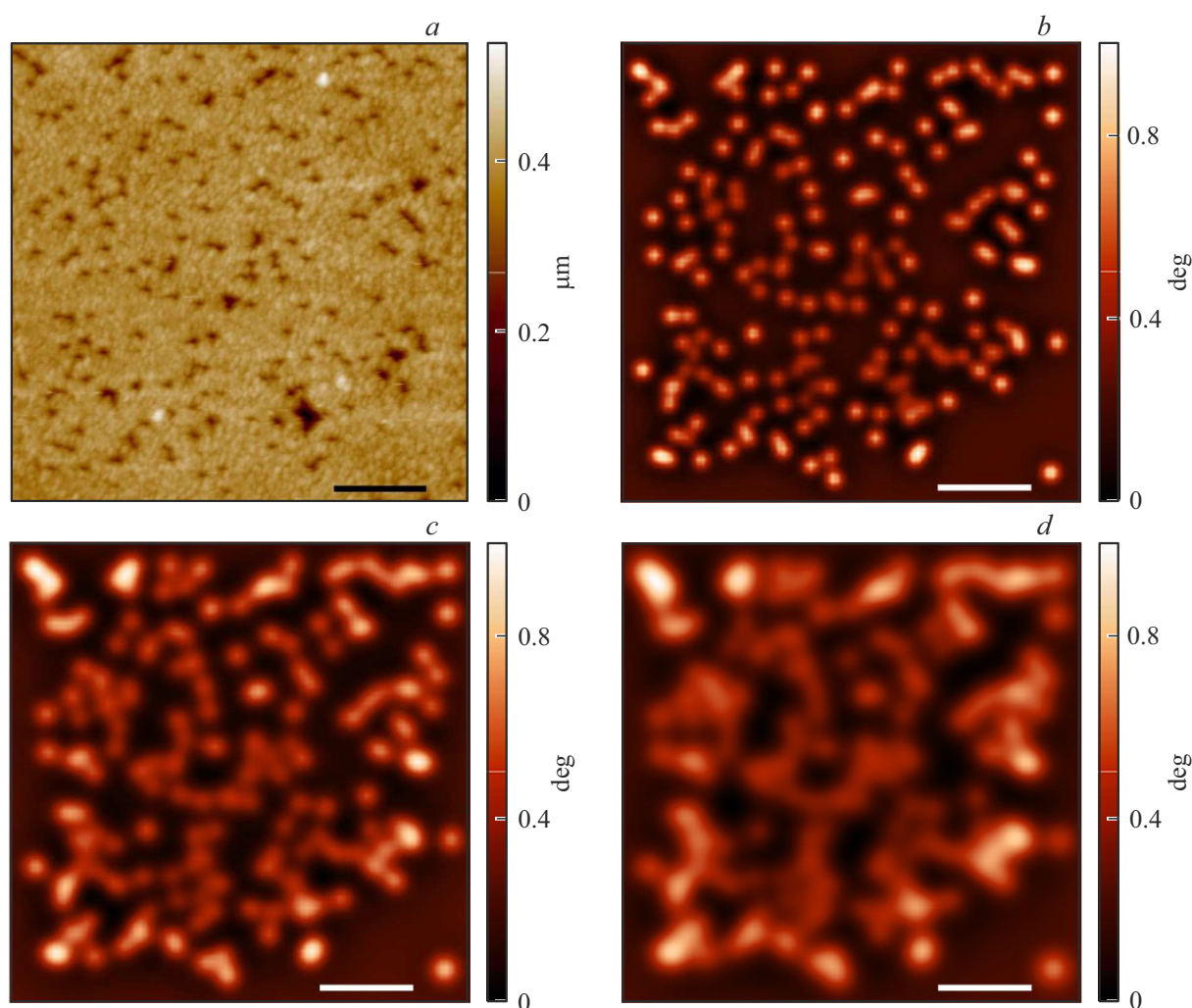


Рис. 14. *a* — АСМ-изображение участка поверхности мембраны при времени осаждения 450 s, которая выступает в качестве маски для моделирования. *b–d* — виртуальные МСМ-изображения при разной высоте подъема зонда над вершиной НП, μm : *b* — 0.5, *c* — 1, *d* — 1.5. Площади сканов составляют $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Длина размерных меток $4 \mu\text{m}$.

быть менее интенсивный сигнал в остальной области изображений (рис. 5, *b* и рис. 14, *d*).

Как показало моделирование по второму и третьему типу масок для агломератов при одинаковой высоте НП и близком расположении зонда к вершинам НП все они хорошо разрешаются. Однако с увеличением высоты подъема зонда у близко расположенных НП начинает постепенно сливаться граница между соседними НП и растет интенсивность МСМ сигнала. Это обусловлено сверткой с объемным зондом из-за дальнедействующего характера магнитного взаимодействия. При малом расстоянии зонд/вершина каждая НП взаимодействует по отдельности с зондом. При больших расстояниях две и более соседних НП (если расстояние между ними меньше расстояния до зонда) уже взаимодействуют с зондом как одно целое. В таком случае и интенсивность растет и размер области МСМ сигнала увеличивается, что наблюдается на эксперименте и при моделировании.

Следует отметить, что визуально видимые на одном образце на поверхности мембраны проросшие НП и участки без них также свидетельствуют о том, что идет неравномерный рост НП. В связи с этим последнее моделирование и по маскам первого типа дополняют данные до полного соответствия с экспериментом.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает их принципиальное качественное поведение. Так, моделирование зависимости интенсивности МСМ сигнала от расстояния зонд/вершина НП и количества находящихся рядом друг с другом столбиков хорошо согласуется с поведением наблюдаемой интенсивности МСМ сигнала на экспериментальных МСМ-изображениях (рис. 2–6). Сходный характер модельных МСМ-изображений с экспериментальными свидетельствует о том, что изменение интенсивности на получаемых МСМ-изображениях определяется несколькими факторами. Первый фактор включает в себя взаимодействие соседних НП между

собой. Второй связан с изменением расстояния между зондом и вершиной НП. Моделирование по маске второго типа показало, что для определения залегания НП в матрице мало знать интенсивность МСМ сигнала от расстояния зонд/вершина НП. Также необходима информация о том, сколько пор расположено под площадью, которую образует светлый контраст. Как видно по АСМ- и МСМ-изображениям (рис. 2–5), чаще всего в данную область входит от 2 до 7 пор, что вполне может быть агломератом (рис. 13). Поэтому для определения глубины залегания НП лучше наблюдать за НП в порах в относительной изоляции или для грубой оценки брать среднюю интенсивность по площади сканирования. Можно также предположить, что после выхода отдельных НП на поверхность („НП лидеры“) неравномерность роста значительно усиливается. Последнее вызвано тем, что вышедшие на поверхность НП начинают расти значительно быстрее из-за отсутствия внутрипоровых ограничений, образования „шапочек“, приводящего к увеличению эффективной площади их поверхности. Этот рост приводит к перераспределению „линий тока“ и соответствующему (большему) замедлению роста НП, оставшихся внутри пор.

5. Заключение

Для изучения этапов роста нанопроволок (НП) из пермендюра в матрице трековой мембраны была сформирована серия образцов с последовательно увеличивающимся временем электроосаждения. Поверхности полученных образцов исследованы методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии (АСМ и МСМ). Показано, что применение МСМ совместно с АСМ дает дополнительную информацию о характере роста НП и позволяет детектировать и изучать „заглубленные“ НП. Исследование серии образцов показало, что МСМ сигнал начинает детектироваться раньше, чем проросшая НП визуализируется методом АСМ. Обнаружение МСМ сигнала от вершины НП удалось получить, начиная с расстояния $3.5\ \mu\text{m}$ от поверхности. Данное расстояние было определено из полученной зависимости интенсивности МСМ сигнала от расстояния между зондом и НП. Эта зависимость была экспериментально получена с помощью пошагового удаления зонда от вершины НП, уже находящейся на поверхности мембраны („проросшей“ НП). В дальнейшем эта зависимость использовалась для оценки основных экспериментов на предмет глубины залегания НП в матрице. На начальном этапе (НП залегает на глубине $3.5\ \mu\text{m}$) интенсивность МСМ сигнала от залегающей НП невелика (0.3 deg), а характерный размер элементов (светлый контраст) на МСМ-изображении в несколько раз превышает диаметр пор ($3.4\ \mu\text{m}$ область светлого контраста против 600 nm поры), что обусловлено рассеянием магнитного поля. С увеличением времени роста интенсивность сигнала возрастает, а размер характерных

элементов приближается к диаметру НП. Компьютерное моделирование магнитного сигнала от отдельно расположенных однородно намагниченных НП различной высоты продемонстрировало увеличение МСМ контраста при уменьшении расстояния между зондом и вершиной НП. Характер изменения интенсивности сигнала качественно согласуется с экспериментальными данными.

Сравнение результатов эксперимента и моделирования позволило установить неравномерность роста НП в соседних порах, которая усиливается на заключительных этапах заполнения пор. При выходе отдельных „лидирующих“ НП за пределы порового канала скорость их роста возрастает, тогда как рост остальных замедляется. Кроме того, моделирование агломератов однородно намагниченных НП показало, что наблюдаемая пространственная неоднородность МСМ контраста может быть обусловлена не только различиями в высоте НП, но и вкладом магнитного взаимодействия между собой близко расположенных НП, а также сверткой с объемным кончиком зонда. Полученные результаты могут быть использованы для контроля степени заполнения пор металлом в процессе матричного синтеза.

Финансирование работы

Работа по получению НП и анализу результатов выполнена в рамках Госзадания НИЦ „Курчатовский институт“. Работа по применению зондовой микроскопии (АСМ и МСМ) и работа по моделированию выполнена в рамках Госзадания ФИЦ КФТИ КазНЦ РАН.

Благодарности

Авторы благодарят П.Ю. Апеля (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов трековых мембран.

Список литературы

- [1] В.Е. Борисенко, А.П. Данилюк, Д.Б. Мигас. Спинтроника. Лаборатория знаний, М. (2017). С. 229.
- [2] А.А. Елисеев, А.В. Лукашин. Функциональные наноматериалы. Физматлит. М. (2010). С. 456.
- [3] В.М. Анишик, В.Е. Борисенко, С.А. Жданок, Н.К. Толочко, В.М. Федосюк. Наноматериалы и нанотехнологии. Изд-во БГУ, Минск (2008). С. 372.
- [4] J.A. Moreno, C. Bran, M. Vazquez, J. Kosel. IEEE Trans. Mag. **57**, 4, 800317 (2021).
- [5] C.R. Martin. Sci. **266**, 5193, 1961 (1994).
- [6] S.K. Chakravarti, J. Vetter. Nucl. Instr. Met. Phys. Res. **62**, 1, 109 (1991).
- [7] N. Lupu. Electrodeposited Nanowires and Their Applications. Intech, Croatia (2010). P. 236.
- [8] M. Vazquez. Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. Elsevier-Woodhead Publishing, Amsterdam (2015). P. 847.
- [9] И.М. Долуденко, А.В. Михеев, И.А. Бурмистров, Д.Б. Трушина, Т.Н. Бородин, Т.В. Букреева, Д.Л. Загорский. ЖТФ **90**, 9, 1435 (2020).

- [10] D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, V.M. Kanevskii, A.I. Panas. IEEE Trans.Mag. **58**, 2, 2300605. (2022).
- [11] С.Н. Вдовичев, Б.А. Грибков, С.А. Гусев, В.Л. Миронов, Д.С. Никитушкин, А.А. Фраерман, В.Б. Шевцов. ФТТ **48**, 10, 1791 (2006).
- [12] Д.А. Бизяев, Д.Р. Хайретдинова, Д.Л. Загорский, И.М. Долуденко, Л.В. Панина, А.А. Бухараев, А. Ризванова. ФММ **124**, 8, 717 (2023)
- [13] Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев., Р.И. Хайбуллин, Н.М. Лядов, Д.Л. Загорский, С.А. Бедин, И.М. Долуденко. Микроэлектроника. **47**, 3, 212 (2018).
- [14] В.Л. Миронов, А.А. Фраерман, Б.А. Грибков, О.Л. Ермолаева, С.А. Гусев, С.Н. Вдовичев. ФТТ **52**, 11, 2153 (2010)
- [15] Th. Kebe, A. Carl. J. Appl. Phys. **95**, 3, 775 (2004).
- [16] D. Rugar, H.J. Mamin, P. Guethner, S.E. Lambert, J.E. Stern, I. McFadyen, T. Yogi. J. Appl. Phys. **68**, 1169 (1990).
- [17] R.D. Gomez, E.R. Burke, I.D. Mayergoyz. J. Appl. Phys. **79**, 6441 (1996)
- [18] I. Shao, M.W. Chen, R.C. Cammarata, P.C. Searson, S.M. Prokes. J. Electrochem. Soc. **154**, 11, D572 (2007).
- [19] N. Mansouri, N. Benbrahim-Cherief, E. Chainet, F. Charlot, T. Encinas, S. Boudinar, B. Benfedda, L. Hamadou, A. Kadri // JMMM. **493**, 1, 165746 (2020).
- [20] И.М. Долуденко, Д.Л. Загорский, К.В. Фролов, И.В. Перунов, М.А. Чусев, В.М. Каневский, Н.С. Ерохина, С.А. Бедин. ФТТ **62**, 9, 1474 (2020).
- [21] D.V. Ovchinnikov, A.A. Bukharaev. AIP Conf. Proc. **696**, 634–641 (2003)
- [22] M.J. Donahue, D.G. Porter. OOMMF User's Guide, Version 1.0 (Natl. Inst. Standards Technol., Gaithersburg, MD, USA, (1999).
- [23] D.V. Ovchinnikov, A.A. Bukharaev. Tech. Phys. **46**, 8, 1014 (2001).

Редактор А.Н. Смирнов