

12,05

## Влияние фрактальности никелевой наносети на ее магнитные свойства

© Е.В. Дворецкая<sup>1</sup>, Р.А. Валеев<sup>2</sup>, М.В. Бурканов<sup>2</sup>, Р.Б. Моргунов<sup>1–3</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ „Курчатовский институт“, Москва, Россия

<sup>3</sup> Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

E-mail: Dvoretzskaya95@yandex.ru

Поступила в Редакцию 23 июня 2023 г.

В окончательной редакции 23 июня 2023 г.

Принята к публикации 3 августа 2023 г.

Исследованы магнитные свойства наносети, состоящей из ультратонких нанопроводов Ni (диаметр  $< 4$  nm) и наночастиц Ni (диаметр  $< 20$  nm), на разных стадиях ее роста, происходящего в процессе лазерной абляции в среде сверхтекучего гелия. Установлено, что на ранних стадиях абляции наносеть состоит в основном из нанопроводов и имеет прямоугольную петлю магнитного гистерезиса. На поздних стадиях абляции растет концентрация наночастиц и их диаметр, а форма петли гистерезиса отклоняется от прямоугольной. Определена фрактальная размерность наносети, которая варьируется от 1 на ранних стадиях абляции, когда имеют место отдельные нанопровода, до 2, когда наносеть становится столь плотной, что представляет собой сплошную пленку. Показано, что намагниченность насыщения меняется при изменении фрактальности наносети, что при постоянных условиях абляции объясняется преобразованием нанопроводов в наночастицы при их сворачивании.

**Ключевые слова:** Нанопровода Ni, лазерная абляция, магнитная анизотропия, фрактальная размерность.

DOI: 10.21883/FTT.2023.09.56258.120

### 1. Введение

Магнитные наноструктуры, такие как нанопровода, наночастицы, наночастицы [1,2], широко применяются в биофизике и медицине [3–6], а также в устройствах магнитной логики и магнитной памяти [7]. В мире активно исследуют различные наноструктуры, которые бы помогли преодолеть противоречие между миниатюризацией магнитной ячейки, ее термостабильностью и скоростью записи информации [8]. Например, предлагается использовать переключение намагниченности электрическим полем или светом — один из возможных способов преодоления этой трилеммы [9,10]. Кроме того, перспективными считаются магнитные наносети, которые обладают фрактальной размерностью и свойствами, которые значительно отличаются, как от единичных наночастиц, так и от одиночных нанопроводов [11–13]. Ферромагнитные нанопровода, образующие наносеть, демонстрируют множественные устойчивые энергетические минимумы с соответствующими значениями относительно стабильных значений магнитного момента [14]. Главным преимуществом и мало изученным свойством наносетей является взаимодействие ее элементов — сегментов нанопроводов. Перенос и передача намагниченности между сегментами осуществляются смещением доменных стенок и диполь-дипольным взаимодействием,

что в целом делает систему довольно сложной. Перенос намагниченности между сегментами нанопроводов делает возможным создание симуляторов нейрофизических систем [15,16]. В частности, с помощью гетероструктур антиферромагнетик/ферромагнетик удалось реализовать искусственный нейрон и синапс [17], которые, будучи включенными в магнитную наносеть, могут работать, как единая нейросеть. Магнитные взаимодействия и множественные устойчивые состояния искусственной наносети могут быть использованы для создания искусственного интеллекта. При этом гальванический сигнал при наличии магнитосопротивления может быть зашифрован с помощью магнитных элементов сети [15,16]. В биологии магнитные наносети применяются для фильтрации магнитомеченных малочисленных клеток с целью их отделения из смеси клеток разных типов [18].

В настоящей работе используются наносети, которые при удлинении сегментов перекрывающихся нанопроводов выше критического размера преобразовываются путем сворачивания нанопроводов в глобулы, которые в результате формируют наночастицы. В [14] нами показано, что при постоянных условиях абляции никеля в жидком гелии на поздних стадиях формирования наносети меняется константа анизотропии, которая в основном соответствует наночастицам, дающим больший вклад в анизотропию, чем нанопровода. Образование глобул (на-

ношаров) позволяет записать информацию в структуру с легким перемагничиванием (отдельные нанопровода) и хранить ее в структуре с трудным размагничиванием (нанопровода). Это может рассматриваться, как путь к преодолению магнитной трилеммы, ограничивающей увеличение плотности и скорости записи при одновременном сохранении или увеличении времени хранения информации.

Цель этой работы заключалась в анализе фрактальной размерности наносети на разных стадиях ее формирования от отдельных нанопроводов до сплошной пленки и в установлении влияния топологических параметров наносети на ее магнитные свойства.

## 2. Образцы и методы

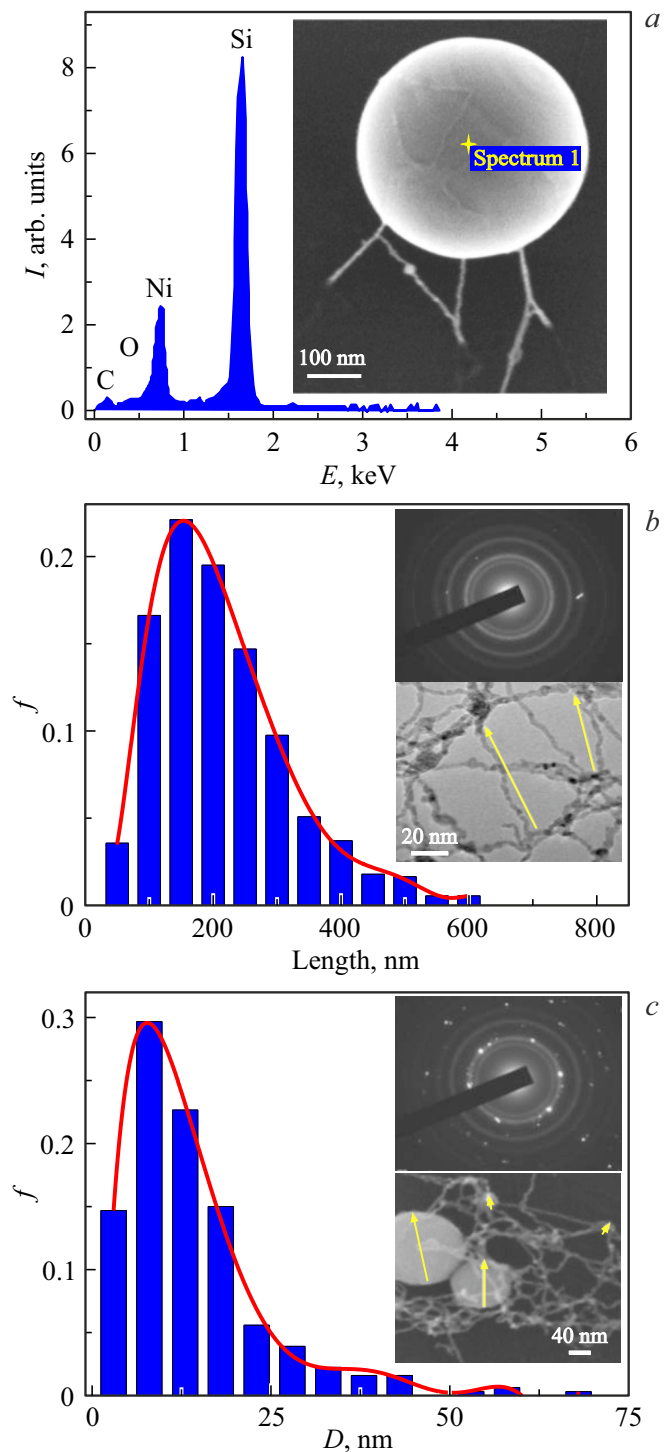
Наносеть создана путем лазерной абляции в среде сверхтекучего гелия (He II), где квантовые вихри, как это подробно описано в [19,20]. Диаметр получаемых нанопроводов переходных металлов составляет  $\sim 2-5$  nm [21,22]. Сегменты нанопроводов пересекаются и образуют сеть, содержащую нанопровода на кремниевой подложке, диамагнитный вклад которой вычитался.

На начальном этапе при низкой концентрации Ni наблюдалась группа индивидуальных нанопроводов, а с увеличением времени абляции растет концентрация нанопроводов, которые в дальнейшем образуют наносеть. На позднем этапе абляции, когда концентрация Ni становится высокой, нанопровода сворачиваются в глобулы (нанопровода). Для морфологического анализа полученной наносети она осаждалась на сетку TEM (Transmission electron microscopy), покрывающую кремниевую подложку размером  $1 \times 1 \times 4$  mm<sup>3</sup>. Морфологический, микроструктурный и локальный элементный анализ наносети проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (TEM) и сканирующего электронного микроскопа Zeiss Supra 25 (SEM) с энергодисперсионным микроанализом (EDX).

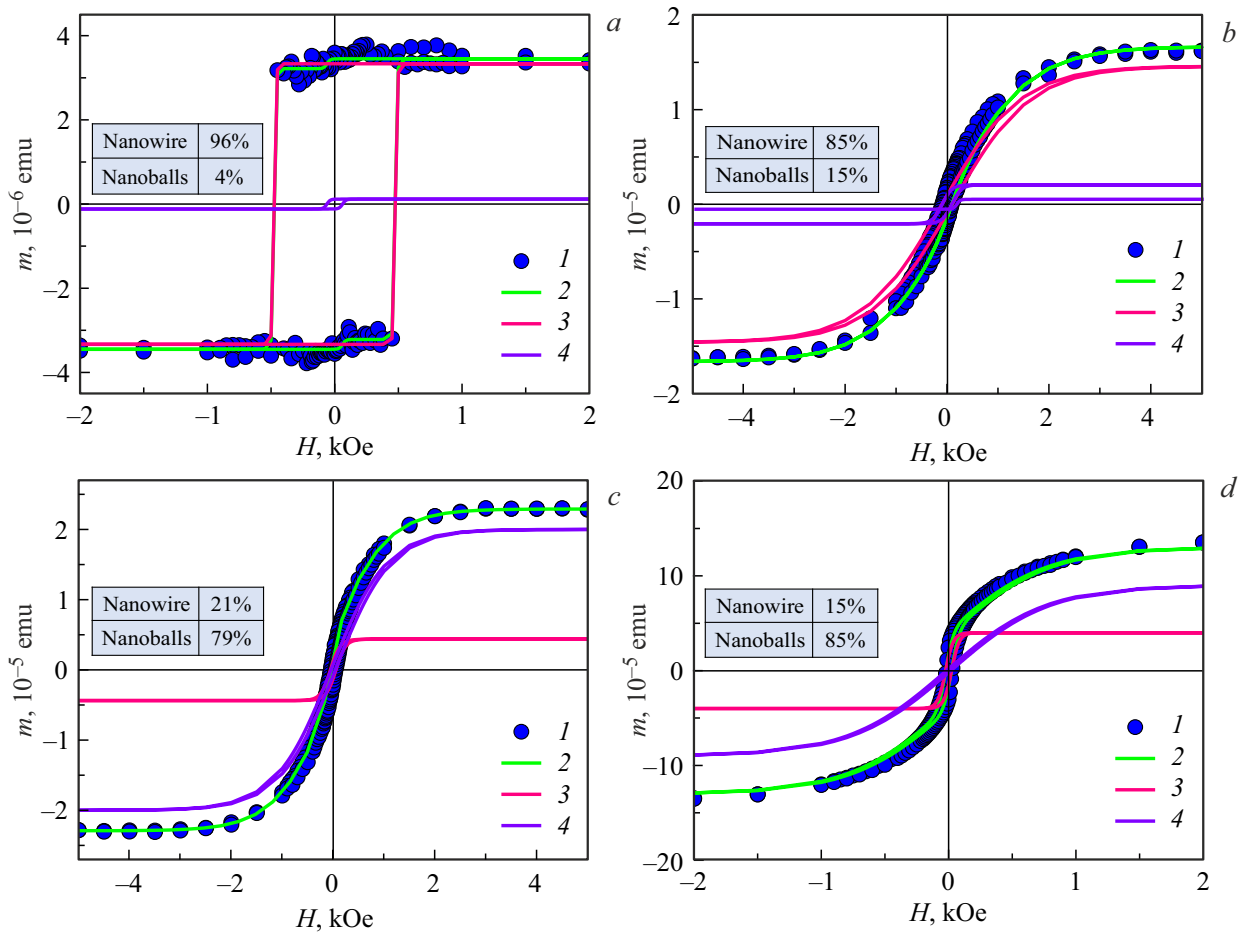
Магнитный момент наносети, нанесенной на кремниевую подложку, измеряли SQUID-магнитометром MPMX 5XL Quantum Design на разных этапах формирования структуры. Магнитный момент одиночного нанопровода регистрировался с помощью атомно-силового микроскопа Integra Aura NT-MDT с ферромагнитным кантилевером на основе кремния, покрытого тонкой пленкой CoCr. Сканирование поверхности образца осуществлялось двухпроходным методом: на первом проходе кантилевера над образцом регистрировался рельеф поверхности (AFM), а на втором — распределение магнитных сил в образце (MFM).

## 3. Экспериментальные результаты

Спектр EDX одиночного нанопровода Ni показал содержание 99% Ni и 1% O в исследуемом образце, а пик Si соответствует Si-подложке (рис. 1, a). На SEM



**Рис. 1.** *a* — EDX-спектр одиночного нанопровода. На вставке показано SEM изображение одиночного нанопровода, образованного нанопроводами. *b* — распределение длин свободных сегментов нанопроводов, нормированное на общее количество на ранней стадии абляции. На вставке представлены электронограмма образца и TEM-изображение нанопроводов Ni на ранней стадии абляции (свободные участки нанопроводов показаны стрелками). *c* — распределение диаметров наносфер, нормированное на общее количество наносфер в образце. На вставке представлены электронограмма и TEM-изображение наносети, состоящей из нанопроводов и наносфер на поздней стадии абляции (диаметры наносфер отмечены стрелками).



**Рис. 2.** Магнитный гистерезис при 300 К: *a* — в образце с низкой концентрацией Ni после короткого лазерного воздействия 10 min; *b* — в образце с промежуточной концентрацией Ni после лазерного воздействия 20 min; *c* — в образце с концентрацией Ni выше среднего уровня после лазерного воздействия 30 min; *d* — в образце с высокой концентрацией Ni после лазерной абляции в течение 60 min. Синие символы (1) — экспериментальные данные; сплошные зеленые линии (2) — аппроксимация двумя гистерезисами. Отдельные магнитные вклады нанопроводов и наночастиц показаны тонкими сплошными розовыми (3) и фиолетовыми (4) линиями, соответственно. Относительные объемные концентрации нанопроводов и наночастиц обозначены на соответствующих рисунках.

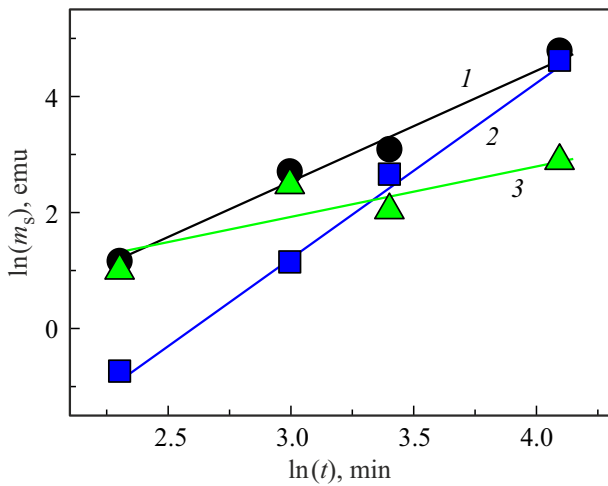
изображении одиночного наночастицы (вставка на рис. 1, *a*) различимы нанопровода, формирующие наночастицу.

Мы наблюдали эволюцию наносети по мере увеличения времени лазерной абляции и прямо пропорционального времени количества Ni. Для этого сравнивали ТЕМ-изображения сети без шаров на ранней стадии 10-минутной абляции (вставка на рис. 1, *b*) и наносети на более позднем этапе 20–60-минутной абляции (вставка на рис. 1, *c*). Из электронограмм участков наносети, состоящих из нанопроводов (вставка на рис. 1, *b*) и наночастиц (вставка на рис. 1, *c*) установлено, что нанопровода имеют сильно разупорядоченную аморфную структуру, а наночастицы имеют поликристаллическую структуру. Статистически было обработано 2200 изображений ТЕМ свободных сегментов нанопроводов и 65 наночастиц. Это позволило построить распределение длин свободных сегментов нанопроводов Ni и распределение диаметров наночастиц и установить, что эти параметры

имеют логнормальное распределение (сплошные линии на рис. 1, *b*, *c*).

Петли магнитного гистерезиса при 300 К и параллельной ориентацией внешнего магнитного поля относительно Si-подложки с продуктами Ni на разных этапах лазерной абляции представлены на рис. 2. Видно, что происходит увеличение магнитного момента наносети  $M$  со временем абляции, что объясняется ростом количества Ni с увеличением времени абляции.

Видно, что на начальной стадии, когда в образце присутствуют в основном нанопровода, петля гистерезиса имеет прямоугольную форму, а на более поздних стадиях, когда появляются наночастицы, она становится наклонной. Принимая, что прямоугольная компонента принадлежит нанопроводам, а наклонная — наночастицам, а также считая, что параметры петель гистерезиса этих компонент в процессе абляции не меняются, мы аппроксимировали экспериментальные петли гистерезиса



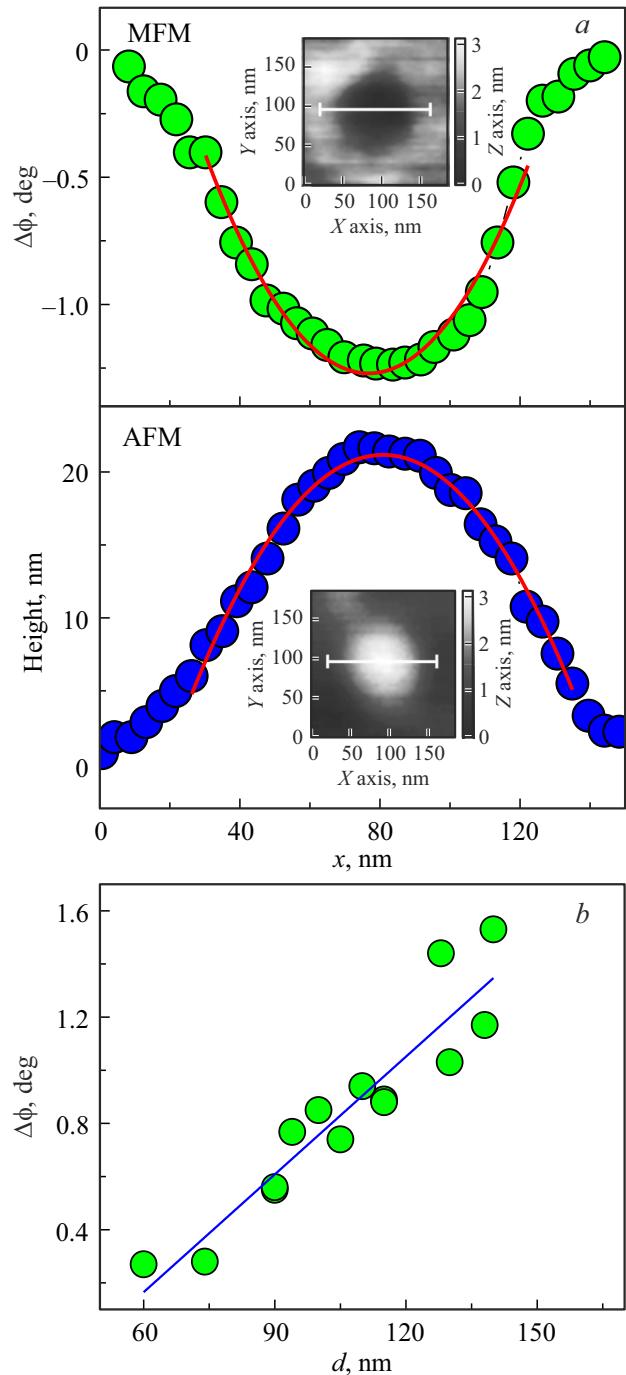
**Рис. 3.** Зависимость магнитного момента насыщения  $m_s$  от продолжительности абляции для всего образца (1), для наночастиц (2) и нанопроводов (3).

двумя вкладками (показаны линиями 3 и 4 на рис. 3) и определили относительно объемное содержание нанопроводов и наночастиц на разных стадиях абляции (см. таблички во вставках на рис. 2, *a–d*). Видно, что с ростом времени абляции наночастицы начинают доминировать. Зависимости магнитного момента насыщения  $m_s$  от продолжительности абляции для всей наносети 1 для нанопроводов 2 и наночастиц 3 приведены на рис. 3. Спрямление этих зависимостей в двойных логарифмических координатах указывает на степенную зависимость магнитного момента от времени  $m(t) \sim t^n$  с разными показателями  $n$  для нанопроводов и наночастиц. Это указывает на диффузионный характер роста нанопроводов и наночастиц.

Для дальнейшего анализа и разделения вкладов наночастиц и нанопроводов подробно исследовали намагниченность единичного наночастицы. Изображения единичного наночастицы были записаны в режимах магнитно-силовой микроскопии (MFM) и атомно-силовой микроскопии (AFM) (вставки рис. 4, *a* соответственно). Режим MFM позволяет определять магнитный момент отдельного наночастицы  $\mu$ , поскольку измеряемая магнитная сила пропорциональна второй производной магнитного поля вблизи поверхности исследуемого образца [23]. Локальное распределение поля рассеяния единичного наночастицы сканировалось в полуконтактном режиме при разной высоте  $h$  между поверхностью образца и острием кантилевера, при этом отклик микроскопа был прямо пропорционален фазовому сдвигу вибрирующего кантилевера. В режиме MFM фазовый сдвиг регистрировался как функция координаты, а в режиме AFM сканировалась высота кантилевера над поверхностью (рис. 4, *a* соответственно).

Аналогичные измерения были выполнены на серии наночастиц различного диаметра. В результате была получена зависимость фазового сдвига  $\Delta\phi$  от диаметра

наночастиц  $d$  (рис. 4, *b*). Эта зависимость позволяла рассчитать магнитный момент единичного шара заданного диаметра. Локальное поле рассеяния единичного наночастицы Ni равно полю рассеяния точечного диполя,



**Рис. 4.** *a* — профили фазовых контрастов наночастицы Ni записанные в режимах MFM (изменение фазы колебаний кантилевера  $\Delta\phi$ ) и AFM (высота геометрического профиля частицы). Соответствующие изображения наночастицы Ni представлены на вставках; *b* — зависимость фазового сдвига  $\Delta\phi$  от диаметра наночастиц  $d$  с одинаковым значением дистанции между поверхностью наночастиц и кантилевером ( $h = 50$  nm). Сплошной линией показана линейная аппроксимация.

расположенного в его центре. Фазовый сдвиг  $\Delta\phi$  вибрирующего кантилевера рассчитывался по формуле

$$\Delta\phi = \frac{M_S \pi d^3}{6c(h)}, \quad (1)$$

где  $c^{-1}(h)$  — неизвестный заранее коэффициент пропорциональности [23]. Исходя из алгоритма калибровки, предложенного в [23], мы рассчитали коэффициент пропорциональности  $c(h)$ . Из зависимостей фазового сдвига  $\Delta\phi$  от диаметра наночастиц  $d$  при  $h = 50 \text{ nm}$  было получено постоянное значение  $c = 0.04 \text{ A} \cdot \text{nm}^2$  (рис. 4, *b*). Таким образом, экспериментально был установлен соответствующий магнитный момент  $\mu = 4.5 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  одиночного наночастицы  $d = 75 \text{ nm}$ , что хорошо согласуется с теоретически рассчитанным значением  $\mu = M_S \pi d^3 / 6 = 4.2 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  однодоменного наночастицы  $d = 75 \text{ nm}$  при табличных значениях намагниченности насыщения никеля  $M_S$ .

#### 4. Обсуждение

Из литературных данных хорошо известно о магнитной бистабильности аморфных нано- и микропроводов при условии, что их магнитная структура однодоменна [24,25]. Бистабильность определяет прямоугольная петля гистерезиса образца при параллельной ориентации внешнего магнитного поля. Это означает, что намагниченность нано- или микропровода резко меняет свое направление при изменении полярности внешнего поля [25].

При рассмотрении магнитных свойств наносети Ni мы учитывали два обстоятельства: 1) наносеть состоит из большого количества сегментов нанопроводов, которые могут оказаться с равной вероятностью, как параллельны, так и перпендикулярны внешнему магнитному полю. При изменении знака внешнего поля резкое переключение намагниченности произойдет лишь в сегментах, ориентированных параллельно полю; 2) наносеть можно рассматривать, как тонкую несплошную пленку никеля, ось легкого намагничивания которой, находится в ее плоскости.

Из экспериментальных данных на рис. 2 (синие символы) хорошо видно влияние времени абляции на намагниченность насыщения  $M_S$  и коэрцитивную силу  $H_C$  в наносети Ni. При увеличении времени абляции  $M_S$  увеличивается, петля гистерезиса наклоняется, а  $H_C$  уменьшается. Модель двух независимых гистерезисов, описанная в [24], позволяет одновременно учесть вклад как нанопроводов, так и наночастиц, которым соответствуют индексы  $i = 1$  и  $i = 2$  при разложении петель гистерезиса наносети

$$m(H) = \sum_{i=1}^2 \left( m_S^i - \frac{2m_S^i}{1 + \exp((H \pm H_C^i)/p^i)} \right), \quad (2)$$

где  $m_S^i$  — намагниченности насыщения компонент,  $H$  — внешнее магнитное поле, знаки „+“ и „-“ — нис-

ходящая и восходящая части петли гистерезиса соответственно,  $H_C^i$  — коэрцитивная сила нанопроводов и наночастиц, соответственно,  $p^i$  — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса нанопроводов ( $p^1 = 0.95$ ) и наночастиц ( $p^2 = 0.45$ ) соответственно.

На рис. 2 зеленые линии представляют собой аппроксимацию выражением (2) экспериментальных данных (синие — символы), а розовые и фиолетовые линии соответствуют прямоугольному компоненту петли гистерезиса, полученной от нанопроводов, и наклонный компонент — от наночастиц. На вставках рис. 2 представлены относительные объемные доли на разных этапах абляции нанопроводов и наночастиц, входящих в состав наносети, рассчитанные с учетом факторов размагничивания  $2/3$  для шара и  $2\pi$  для провода, рассматриваемого в качестве цилиндра. Учитывая вышесказанное можно заключить, что прямоугольность петли гистерезиса уменьшается с увеличением количества наночастиц в наносети Ni.

Масса наносети, нанесенной на Si-подложку, во много раз меньше массы самой Si-подложки и недоступна для измерений прямыми методами. Поэтому единственным способом определения количества Ni является зависимость  $m_S(t)$ , возрастание которой (рис. 3, *b*, кривая 1), в свою очередь, напрямую связано с увеличением количества Ni со временем абляции. Такое предположение справедливо исходя из того, что намагниченность насыщения никеля  $M_S = 58.6 \text{ emu/g}$  ( $522 \text{ emu/cm}^3$ ) хорошо известна [26]. Исходя из процентного соотношения объемов наночастиц и нанопроводов на различных этапах абляции нами построены соответствующие зависимости  $m(t)$  для наночастиц и нанопроводов (рис. 3, *b*, кривые 2 и 3). Как ранее было установлено, с увеличением времени лазерной абляции увеличивается количество и размер наночастиц Ni, которые вносят основной вклад в магнитный момент  $m$  наносети Ni, созданной на поздних этапах лазерной абляции. Спрямление кривых 1–3 на рис. 3, *b* в координатах  $\ln(m) - \ln(t)$  соответствуют степенной зависимости  $m(t)$ :  $m \sim t^n$ ,  $n = 1.36 > 1$  для всего образца. Степенной закон отвечает состоянию, когда между магнитными свойствами и размером системы существует зависимость, как в случае предполагаемого линейного увеличения количества Ni со временем лазерной абляции. Причиной сверхлинейной зависимости  $m(t)$  является постепенное изменение процентного соотношения количества нанопроводов Ni и наночастиц Ni, а также формирование наносети Ni.

Наносеть на изображениях SEM можно охарактеризовать, как фрактал (рис. 5), определяя ее фрактальную размерность на разных этапах абляции.

Анализ изображений наносети Ni проводился в программе Wolfram Mathematica. Для разделения изображения на „объекты“ и „фон“ в градациях серого на первом этапе к изображениям применена локальная адаптивная бинаризация (перевод в двухцветное черно-белое изображение). Подобный метод учитывает для каждого пикселя изображения цвет соседних пикселей,



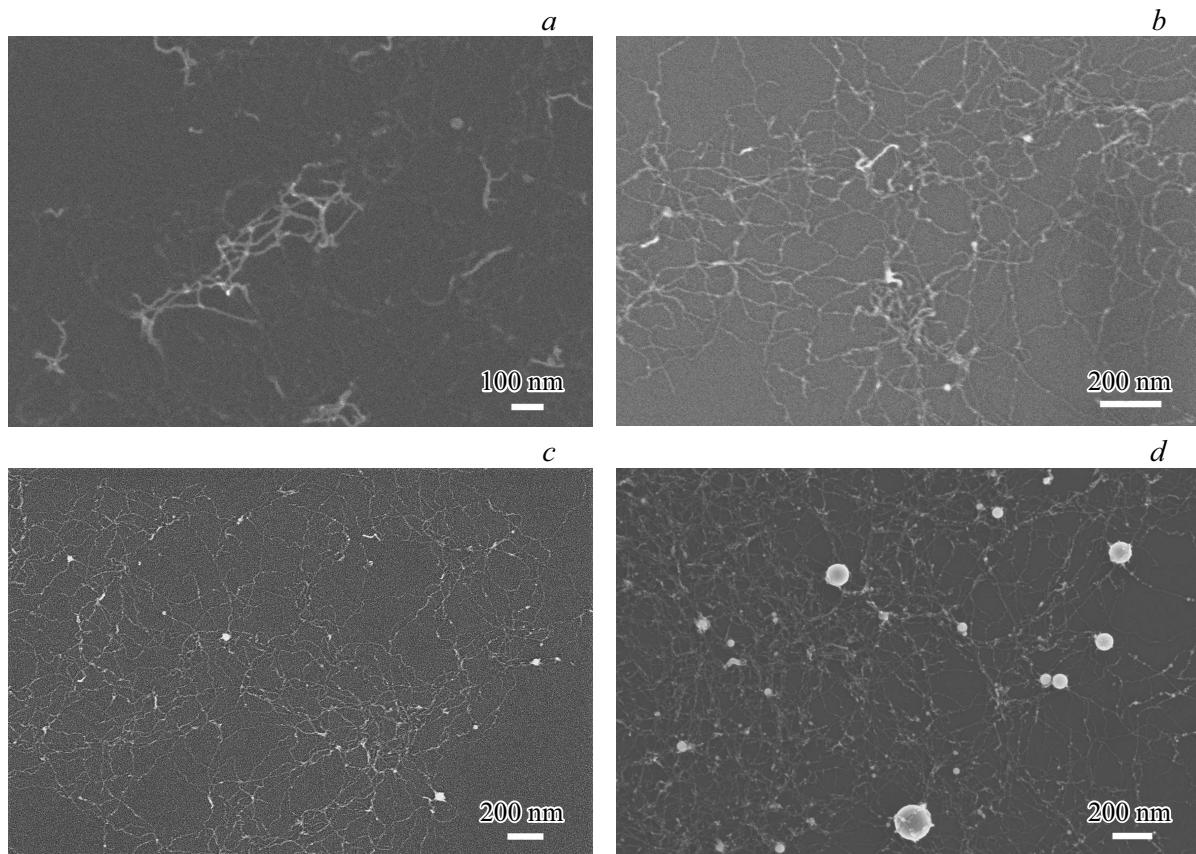


Рис. 5. SEM изображения наносети Ni после абляции длительностью 10 (a), 20 (b), 30 (c), 60 min (d).

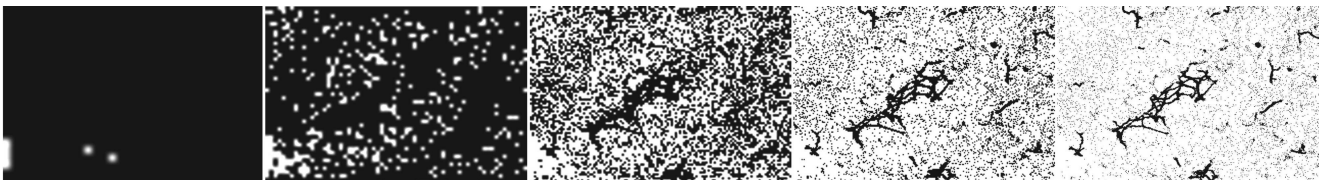


Рис. 6. Последовательные кадры локальной адаптивной бинаризации SEM изображения наносети Ni после 10-минутной абляции.

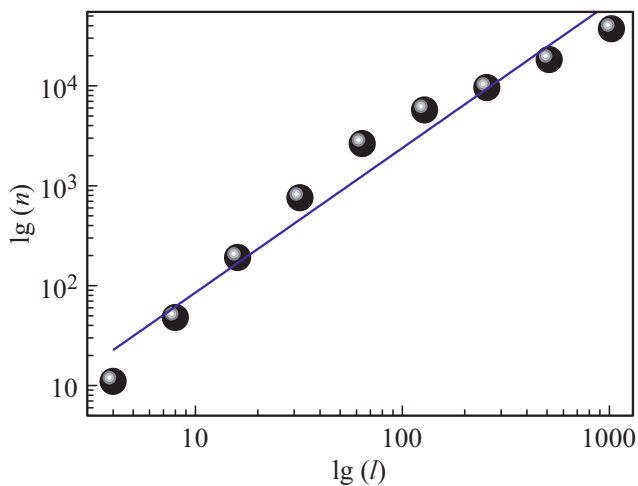
что позволяет максимально сохранить небольшие нанопровода („объект“, который окрашивается черным цветом), отсекая при этом „фон“, который окрашивается белым цветом (рис. 6).

Для определения фрактальной размерности на бинарное SEM-изображение наносети в программе Wolfram Mathematica накладывалась квадратная решетка с ячейками разного размера и определялось количество ячеек решетки, занятой „объектом“. Для  $d$ -размерного объекта, количество квадратов  $n$ , заполненных объектом, будет пропорционально размеру ячейки решетки  $l$ :  $n \sim l^d$ . Для фрактальных объектов  $d$  является дробным числом. Получена зависимость количества черных пикселей  $n$  (объектов) от размера ячейки решетки  $l$ , покрывающей объект (рис. 7). Данная зависимость хорошо спрямляется в логарифмических координатах и является сте-

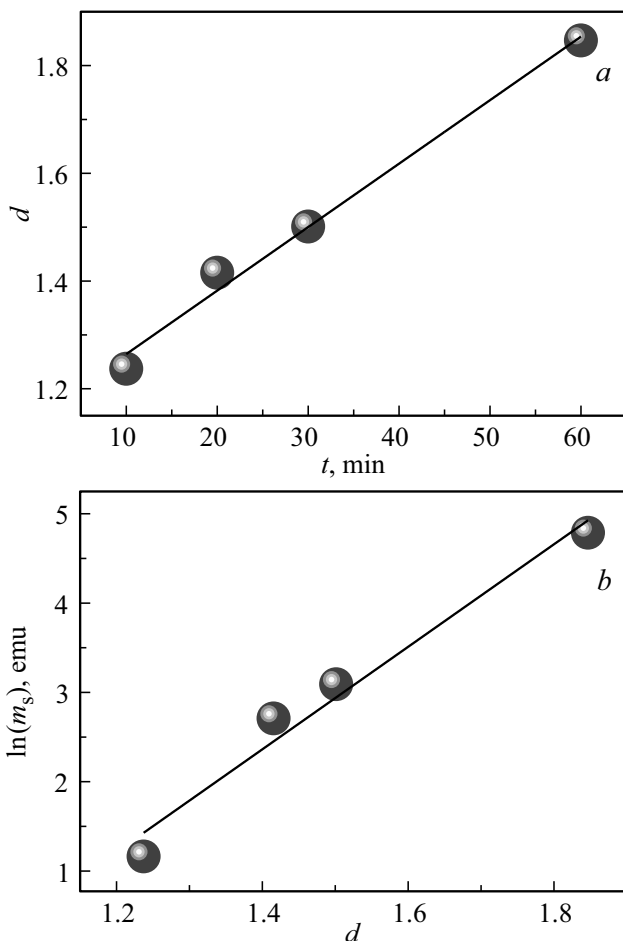
пенной функцией с показателем степени  $d = 1.24$  для наносети Ni после 10-минутной абляции.

Из изображений SEM наносети (рис. 5) с помощью программы для расчета фрактальной размерности получены показатели фрактальности  $d = 1.42$ ,  $d = 1.5$ ,  $d = 1.85$  для 20, 30 и 60 min абляции соответственно. На рис. 8 представлены зависимость показателя фрактальности от времени абляции (рис. 8, a) и зависимость магнитного момента  $m_s$  наносети от показателя фрактальности для наносети Ni на разных этапах абляции (рис. 8, b).

Показатель фрактальности увеличивается с  $n = 1.24$  для 10-минутной абляции до  $n = 1.85$  для 60-минутной абляции, что следовало ожидать при увеличении количества нанопроводов Ni в наносети. Спрявление зависимости  $\ln m_s(d)$  свидетельствует о быстром экспоненциаль-



**Рис. 7.** Двойная логарифмическая зависимость количества черных пикселей  $n$  (объектов) от размера ячейки решетки  $l$ , покрывающей объект, для наносети Ni после 10 min лазерной абляции. Сплошной линией показан степенной закон с показателем степени  $d = 1.24$ .



**Рис. 8.** *a* — временная зависимость показателя фрактальности  $d$  наносети Ni; *b* — зависимость магнитного момента насыщения  $M_s$  от показателя фрактальности для наносети Ni на разных этапах абляции.

ном росте магнитного момента при увеличении фрактальной размерности. Это можно объяснить тем, что каждый новый появившийся элемент наносети является заправкой для ускоренного роста и осаждения никеля на нем.

## 5. Выводы

1. Увеличение времени лазерной абляции приводит к образованию поликристаллических наночастиц Ni, встроенных в наносеть из нанопроводов. Диаметр и количество шаров растут при увеличении времени абляции. При этом рост магнитного момента описывается сверхлинейной степенной зависимостью, характерной для диффузионных процессов.

2. Путем анализа магнитных свойств наносети Ni на разных этапах абляции установлен вклад нанопроводов и наночастиц в магнитный момент наносети. Нанопроводы характеризуются идеальной квадратной петлей гистерезиса, а наночастицы обладают наклонной формой гистерезисной петли.

3. Наносеть Ni представляет собой фрактальную структуру, формирующуюся в несколько стадий с постепенным увеличением показателя фрактальности при увеличении Ni в наносети. Из SEM изображений наносети Ni установлено, что основными элементами, образующими фрактальную структуру являются нанопроводы Ni. Путем изменения времени абляции можно контролировать и создавать самоподобные структуры требуемой формы с заданными магнитными свойствами.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках тематической карты ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН АААА-А19-119092390079-8.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] E.C. Stoner, E.P. Wohlfarth. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. United Kingdom, London (1948). P. 599–642.
- [2] S.A. Nepijko, R. Wiesendanger. *SPQEO* **2**, 5, 9 (1999).
- [3] A. Akbarzadeh, M. Samiei, S. Davaran. *Nanoscale Res. Lett.* **7**, 144 (2012).
- [4] S.K. Murthy. *Int. J. Nanomedicine* **2**, 2, 129 (2007).
- [5] S.P. Gubin, Y.I. Spichkin, G.Y. Yurkov, A.M. Tishin. *Russ. J. Inorg. Chem.* **47**, 1, 32 (2002).
- [6] P. Malik, S. Pandya, V. Katyal. *IJAR* **1**, 1, (2013).
- [7] S. Karmakar, S. Kumar, R. Rinaldi, G. Maruccio. *J. Phys. Conf. Ser.* **292**, 012002 (2011).
- [8] R.C. O'Handley. *Modern magnetic materials: principles and applications*. Wiley, N.Y., USA (2000). 768 p.

- [9] C.-H. Lambert, S. Mangin, B.S.D.Ch.S. Varaprasad, Y.K. Takahashi, M. Hehn, M. Cinchetti, G. Malinowski, K. Hono, Y. Fainman, M. Aeschlimann, E.E. Fullerton. *Science* **345**, 1337 (2014).
- [10] J. Hohlfeld, Th. Gerrits, M. Bilderbeek, Th. Rasing, H. Awano, N. Ohta. *Phys. Rev. B* **65**, 012413 (2001).
- [11] D. Bürger, S. Zhou, M. Höwler, X. Ou, G.J. Kovacs, H. Reuther, A. Mücklich, W. Skorupa, H. Schmidt. Springer International Publishing Switzerland **192**, 15 (2014).
- [12] Y. Lin, S. Zhou, S.W. Sheehan, D. Wang. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 8, 2398 (2011).
- [13] E. Saitoh, M. Tanaka, H. Miyajima, T. Yamaoka. *J. Appl. Phys.* **93**, 7444 (2003).
- [14] S. Labbé, Y. Privat, E. Trélat. *J. Differ. Equ.* **253**, 6, 1709 (2012).
- [15] C. Kittel. *Phys. Rev.* **70**, 965 (1946).
- [16] F. Vajda, E.D. Torre. *J. Appl. Phys.* **73**, 5833 (1993).
- [17] A. Kurenkov, S. DuttaGupta, C. Zhang, S. Fukami, Y. Horio, H. Ohno. *Adv. Mater* **31**, 1900636 (2019).
- [18] C. Lai, W. Tsai, M. Yang, T. Chou, Y. Chang. *Nanoscale* **11**, 21119 (2019).
- [19] E.B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, Y. Okuda. *JETP Lett.* **85**, 581 (2007).
- [20] D. Mateo, J. Eloranta, G.A. Williams. *J. Chem. Phys.* **142**, 064510 (2015).
- [21] E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. *J. Exp. Theor. Phys.* **112**, 1061 (2011).
- [22] E.B. Gordon, M.E. Stepanov, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. *Laser Phys. Lett.* **16**, 026002 (2019).
- [23] S. Sievers, K.-F. Braun, D. Eberbeck, S. Gustafsson, E. Olsson, H. Werner Schumacher, U. Siegner. *Small* **8**, 2675 (2012).
- [24] F. Tian, Z.P. Huang, L. Whitmore. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **14**, 8537 (2012).
- [25] K.M. Razeeb, F.M.F. Rhen, S. Roy. *J. Appl. Phys.* **105**, 083922 (2009).
- [26] H. Danan, A. Herr, A.J.P. Meyer. *J. Appl. Phys.* **39**, 669 (1968).

*Редактор Т.Н. Василевская*