Письма в ЖЭТФ, том 97, вып. 3, с. 161 – 164 © 2013 г. 10 февраля

Определение температуры Кюри отдельной Ni нанопроволоки на основе анализа вольт-амперных характеристик

Н. И. Нургазизов[1]*, Д. А. Бизяев, А. А. Бухараев, В. Н. Лисин, А. П. Чукланов*

Казанский физико-технический институт им. Завойского РАН, 420029 Казань, Россия

Поступила в редакцию 27 декабря 2012 г.

В работе предлагается новый метод измерения температуры Кюри отдельной нанопроволоки, лежащей на поверхности непроводящей подложки. Метод основан на анализе вольт-амперных характеристик нанопроволоки, полученных при различных начальных температурах образца. На зависимости первой производной сопротивления от приложенной мощности наблюдается максимум, положение которого с увеличением начальной температуры смещается в сторону меньших мощностей. Значение температуры Кюри определяется графически как температура при нулевом значении мощности. Измерена температура Кюри никелевой нанопроволоки, сформированной на поверхности SiO_2/Si методом сканирующей зондовой литографии. Проведена оценка критической плотности тока, при которой происходит переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

DOI: 10.7868/S0370274X13030053

В последнее время уделяется много внимания изучению процесса протекания спин-поляризованного тока высокой плотности через ферромагнитные наноструктуры. В частности, показано, что ток плотностью свыше 10^9 А/м^2 может изменять магнитную структуру нанопроволок [1–3]. Это изменение может происходить за счет передачи магнитного момента от спин-поляризованных электронов к атомам решетки [1] (*spin transfer torques*) или за счет нагрева нанопроволоки протекающим током выше температуры Кюри и ее остывания после окончания импульса тока [2, 3]. Последние исследования, выполненные на массиве никелевых нанопроволок круглого сечения, показывают, что температура Кюри начинает уменьшаться для проволок диаметром менее 200 нм. Для проволок никеля диаметром 20 нм наблюдается снижение температуры Кюри на 90 K по сравнению с объемным металлом [4]. В более ранних исследованиях для массива проволок квадратного сечения наблюдалась такая же зависимость температуры Кюри от сечения проволоки [5]. В то же время для никелевых пленок снижение температуры Кюри наблюдается только при толщине меньше 20 нм [6, 7]. Поэтому остается открытым вопрос о том, как изменится температура Кюри отдельной нанопроволоки прямоугольного сечения, которая обычно используется для исследования процесса протекания тока высокой плотности, и при какой критической плотности тока происходит фазовый переход.

В данной работе мы предлагаем методику, которая позволяет измерить температуру Кюри отдельной нанопроволоки, лежащей на непроводящей подложке. Как будет показано ниже, импульсом тока высокой плотности можно нагреть нанопроволоку выше температуры Кюри и зафиксировать момент перехода в парамагнитное состояние по вольт-амперной характеристике (ВАХ), получаемой на этой проволоке. Кроме того, используя ВАХ и данные атомно-силовой микроскопии, можно найти критическую плотность тока, необходимую для нагрева нанопроволоки до температуры Кюри, что невозможно сделать методами классического измерения сопротивления [4] или магнитометрии [5].

Обычно при исследовании влияния тока высокой плотности на магнитную структуру образца используется последовательность прямоугольных импульсов с возрастающей амплитудой. После каждого импульса визуализируется магнитная структура образца. Такой подход не позволяет оперативно получать информацию о переходе вещества из ферромагнитного в парамагнитное состояние. В данной работе мы демонстрируем, что отдельную нанопроволоку можно нагреть при помощи пилообразного импульса напряжения. При этом амплитуда каждого следующего импульса должна немного увеличивается до того момента, пока на ВАХ не будет зафиксирован перегиб. Этот перегиб соответствует переходу нанопроволоки из ферромагнитного в парамагнитное состояние за

[1]e-mail: niazn@mail.ru

счет ее нагрева протекающим током [8, 9]. Как будет показано ниже, на основе анализа ВАХ, полученных за счет внешнего нагрева при разных начальных температурах образца, можно экспериментально установить температуру Кюри отдельной нанопроволоки.

Предназначенные для проведения измерений Ni нанопроволоки были приготовлены методом сканирующей зондовой литографии. В качестве подложки для формирования структуры использовалась пластина Si, покрытая слоем SiO_2 толщиной 260 нм. Для формирования маски использовался раствор полиметилметакрилата (ПММА) в хлорбензоле, который наносился на поверхность вращающегося образца. После его высыхания на поверхности SiO_2 оставался слой ПММА толщиной 30–50 нм. Далее при помощи сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver P47 (NT–MDT) в слое ПММА формировалась литографическая маска, состоящая из собственно нанопроволоки и двух контактных площадок. Для работы использовались кантиливеры NSG20 (NT–MDT) с жесткостью 48 Н/м и NSC15 (MikroMasch) с жесткостью 46 Н/м и радиусами закругления игл 10 нм. Толщина пленки ПММА, нанесенной на поверхность, определялась с помощью СЗМ по высоте ступеньки на краю пленки.

На полученную структуру напылялся слой Ni. Для этого использовалась установка Multiprobe P (Omicron), в которой мишень из Ni чистотой 99.9% распылялась электронным лучом в вакууме порядка 10^{-6} Па. Скорость напыления металла составляла примерно 0.1 нм/мин. После этого образец помещался в ультразвуковую ванну с хлорбензолом для растворения оставшегося полимера и удаления лишнего металла. Более подробно методика приготовления проволок описана в [10]. Размеры и форма полученной нанопроволоки контролировались с помощью СЗМ Solver P47. Таким методом были получены нанопроволоки высотой 23 нм, шириной от 230 до 610 нм и длиной от 4 до 10 мкм. Полученное в атомно-силовом режиме (АСМ) изображение одной из нанопроволок (ширина 610 нм, длина 4.5 мкм) представлено на рис. 1.

Изучение процессов протекания тока через полученную Ni проволоку проводилось в условиях вакуума 10^{-3} Па в камере СЗМ Solver HV (NT–MDT) для предотвращения процесса окисления проволоки при нагреве до высоких температур. Измерения ВАХ осуществлялись классическим методом амперметра-вольтметра согласно схеме, представленной на рис. 1. На образец с генератора подавался одиночный импульс пилообразного напряжения с частотой 10 Гц. С помощью двух мультиметров Agilent 34410A про-

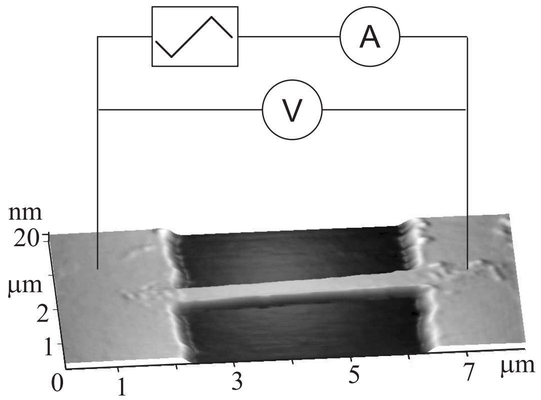

Рис.1. АСМ-изображение Ni нанопроволоки сечением 610×23 нм^2 с длиной 4.5 мкм и схема измерения вольт-амперных характеристик

изводилось одновременное считывание значения напряжения, падающего на проволоке, и тока, текущего через нее. Регистрация сигналов осуществлялась с частотой выборки 5 кГц. В промежутках между измерениями ВАХ на образец подавалось напряжение примерно −40 мВ, для того чтобы контролировать текущее сопротивление образца и отслеживать его изменение при нагреве подложки. Во время измерения ВАХ на образец подавался возрастающий в положительную область пилообразный импульс. Это было сделано для минимизации нагрева нанопроволоки протекающим током в промежутках между измерениями ВАХ. Для каждой температуры подложки снималось не менее 10 ВАХ с перерывом между измерениями 5 с. Совпадение ВАХ, получаемых последовательно друг за другом при одной и той же температуре подложки, служило критерием того, что структура проволоки не изменяется.

Одна из ВАХ, полученных по такой методике, приведена на рис. 2a. Критический ток J_{cr}, при котором происходит фазовый переход, можно точно определить по экстремуму на зависимости производной напряжения по току от тока, $dU(J)/dJ$. Исходя из геометрических размеров нанопроволоки, найденных при АСМ-измерениях, этот критический ток можно пересчитать в критическую плотность тока, при которой происходит фазовый переход. Для проволоки с размерами 23×610 нм^2 и длиной 4.5 мкм критическая плотность тока составила $5.6 \cdot 10^{11}$ А/м^2.

Полученную ВАХ легко пересчитать в зависимость сопротивления от выделяемой мощности. На зависимости сопротивления от мощности также наблюдается перегиб, обусловленный переходом никеля из ферромагнитного в парамагнитное состояние (рис. 2b). Точно определить значение крити-

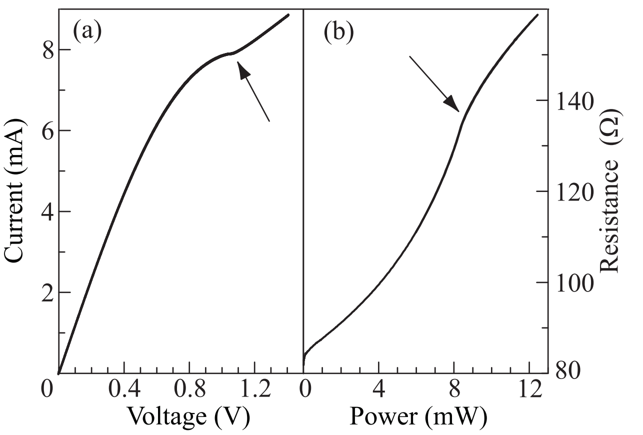

Рис. 2. (a) – Вольт-амперная характеристика, полученная на Ni нанопроволоке при температуре 305 K. (b) – Зависимость сопротивления этой проволоки от рассеиваемой током мощности при той же температуре. Стрелкой указано место перегиба, которое соответствует фазовому переходу

ческой мощности P_{cr}, при которой происходит нагрев до температуры Кюри, можно по зависимости производной сопротивления по мощности от мощности, $dR(P)/dP$ (рис. 3a). Если предварительно подогреть подложку, то значение критической мощности уменьшится (рис. 3a). Соответственно если знать форму зависимости температуры нанопроволоки от мощности, рассеиваемой протекающим током, то можно аппроксимировать экспериментальные данные по критической мощности для разных начальных температур подложки и найти температуру Кюри нанопроволоки. Другими словами, если нагревать подложку и измерять ВАХ, то температура, при которой критическая мощность станет равной нулю (на ВАХ отсутствует перегиб), будет температурой Кюри нанопроволоки.

Зависимость температуры нанопроволоки от протекающего тока была теоретически исследована в работах [11–13]. Во всех этих работах рассматривается случай, когда проволока прямоугольного сечения расположена на поверхности подложки, состоящей из тонкого слоя диэлектрика на поверхности массивного полупроводника, и на проволоку подается импульс напряжения прямоугольной формы. При этом время установления стационарного состояния определяется суммой времени диффузии тепла через диэлектрик и времени диффузии тепла в полупроводнике на расстояние порядка длины проволоки. В условиях эксперимента значения этих времен, по нашим оценкам, сравнимы друг с другом. Для системы Ni нанопроволока на поверхности SiO_2/Si время установления стационарного состоя-

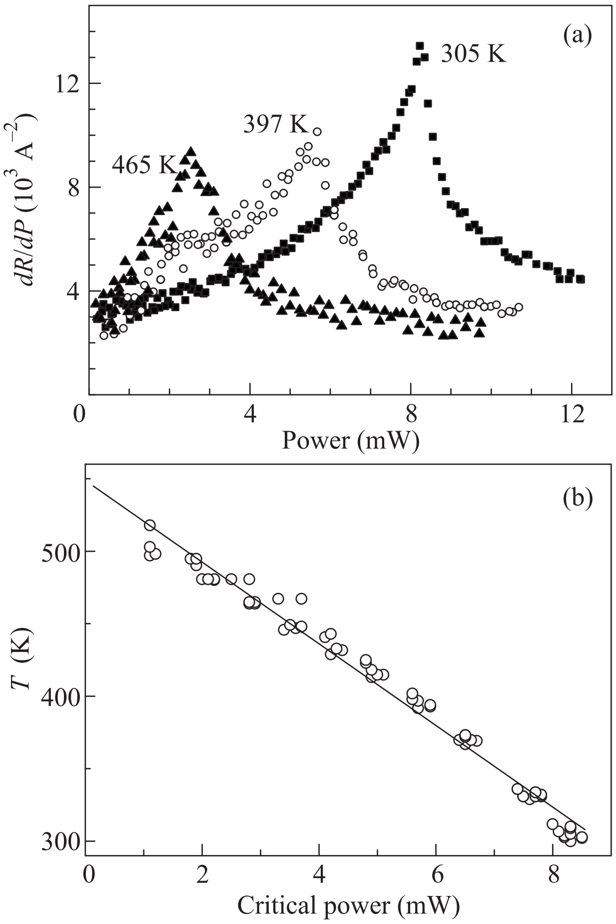

Рис. 3. (a) – Зависимость производной сопротивления от мощности, рассеиваемой в Ni нанопроволоке, для различных начальных температур образца. (b) – Экспериментальная зависимость критической мощности от начальной температуры образца и ее аппроксимация прямой. Точка пересечения этой прямой с осью температуры – искомая температура Кюри (548 K)

ния составляет порядка 200 нс. В экспериментальных работах [2, 3] на примере нанопроволоки NiFe на поверхности SiO_2/Si также было показано, что стационарное состояние в проволоке устанавливается меньше чем через 1 мкс после начала прямоугольного импульса напряжения.

Работа [13] обобщает модели, предложенные в работах [11, 12], и рассматривает их как частные случаи для различных соотношений ширины нанопроволоки и толщины диэлектрического слоя. Ввиду того что теплопроводность полупроводника существенно выше теплопроводности диэлектрика, можно пренебречь увеличением температуры в диэлектрике и считать температуру границы раздела диэлектрик/полупроводник равной начальному значению. В этом приближении согласно [13] изменение температуры проволоки в зависимости от мощности, выделяемой протекающим током, определяется следующим выражением:

$$T - T_0 = \frac{P}{L\chi}\xi\Big(\frac{w}{2d}\Big), \qquad (1)$$

где T_0 — начальная температура проволоки, P — мощность, выделяемая протекающим током в нанопроволоке, L и w — длина и ширина нанопроволоки, d и χ — толщина и коэффициент теплопроводности диэлектрика. При этом функция $\xi(\alpha)$ определяется как

$$\xi(\alpha) = \frac{1}{\pi\alpha}\Big[\tan^{-1}\alpha + \frac{\alpha\ln(1+\alpha^{-2})}{4} + \frac{\ln(1+\alpha^2)}{4\alpha}\Big].$$

В наших экспериментах частота подаваемого пилообразного импульса напряжения составляет 10 Гц. Каждая точка на ВАХ усредняется по времени 20 мс. При этом время установления стационарного значения составляет меньше 1 мкс. Соответственно можно считать температуру проволоки при каждом измерении постоянной и использовать формулу (1). Если построить экспериментальную зависимость критической мощности P_{cr} от начальной температуры образца T_0 и аппроксимировать ее прямой, то точка пересечения этой прямой с осью температуры и будет температурой Кюри нанопроволоки. На рис. 3b приведена такая зависимость для Ni проволоки с сечением 23×610 нм^2 и длиной 4.5 мкм. Температура Кюри здесь составила 548 K, что существенно меньше температуры Кюри массивного никеля (630 K). Данная температура близка по значению к температуре Кюри круглых Ni нанопроволок диаметром 20 нм [7]. По всей видимости, температура Кюри для исследуемых проволок прямоугольного сечения, в отличие от пленок, обусловливается наименьшим линейным размером и связана с большими напряжениями, возникающими в решетке нанопроволоки, сформированной на поверхности SiO_2.

Таким образом, разработанная оригинальная методика позволяет измерить температуру Кюри отдельной нанопроволоки и сопоставить ее с критической мощностью и с критической плотностью тока, протекающего по этой проволоке. Температура Кюри Ni нанопроволоки (высота 23 нм, ширина 610 нм, длина 4.5 мкм), лежащей на подложке SiO_2/Si, составила 548 K, что существенно ниже температуры Кюри массивного Ni (630 K). При этом критическая плотность тока, необходимая для нагрева этой проволоки до температуры Кюри, составила $5.6\cdot10^{11}$ А/м^2.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект # 12-02-00820) и программ Российской академии наук.

1. D.C. Ralph and M.D. Stiles, J. Magn. Magn. Mater. **320**, 1190 (2008).
2. A. Yamaguchi, S. Nasu, H. Tanigawa et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 012511 (2005).
3. A. Yamaguchi, A. Hirohata, T. Ono, and H. Miyajima, J. Phys.: Condens. Matter **24**, 024201 (2012).
4. M.V. Kamalakar and A.K. Raychaudhuri, Phys. Rev. B **82**, 195425 (2010).
5. L. Sun, P.C. Searson, and C.L. Chien, Phys. Rev. B. **61**, R6463 (2000).
6. F. Huang, G.J. Mankey, M.T. Kief, and R.F. Willis, J. Appl. Phys. **73**, 6760 (1993).
7. R. Zhangand and R.F. Willis, Phys. Rev. Lett. **86**, 2665 (2001).
8. O. Kallback, S.G. Humble, and G. Malmstrom, Phys. Rev. B **24**, 5214 (1981).
9. D.L. Decker and W. Chen, Phys. Rev. B, **46**, 8237, (1992).
10. D.A. Bizyaev, A.A. Bukharaev, D.V. Lebedev et al., Technical Physics Letters. **38**(7), 645 (2012).
11. C.Y. You, I.M. Sung, and B.K. Joe, Appl. Phys. Lett. **89**, 222513 (2006).
12. C.Y. You and S.S. Ha, Appl. Phys. Lett. **91**, 022507 (2007).
13. K.J. Kim, J.C. Lee, S.B. Choe, and K.H. Shin, Appl. Phys. Lett. **92**, 192509 (2008).