

05

## Магнитно-резонансная силовая спектроскопия колебаний магнитного вихря

© В.Л. Миронов,<sup>1,2</sup> Е.В. Скороходов,<sup>1</sup> Д.А. Татарский,<sup>1,2</sup> И.Ю. Пашенькин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН,  
607680 Афонино, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: mironov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2020 г.

В окончательной редакции 31 марта 2020 г.

Принято к публикации 31 марта 2020 г.

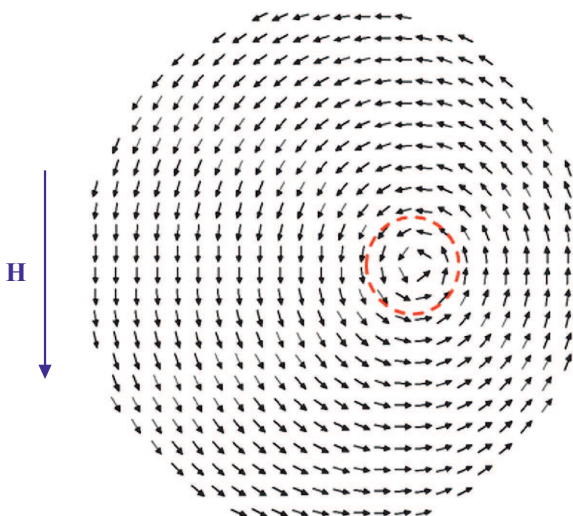
Приведены результаты микромагнитного моделирования и экспериментальных исследований методом магнитно-резонансной силовой спектроскопии вынужденных колебаний намагниченности круглого диска NiFe во внешнем продольном магнитном поле. Основное внимание уделено низкочастотному резонансу, связанному с гиротропным движением кора магнитного вихря. Показано, что приложение внешнего магнитного поля в плоскости образца приводит к значительному сдвигу резонансной частоты гиромоды. Обсуждено влияние неоднородного магнитного поля зонда на характер колебаний намагниченности.

**Ключевые слова:** магнитный вихрь, гиротропная мода, магнитно-резонансная силовая микроскопия, наноосциллятор.

DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49968.105-20

### Введение

В круглых ферромагнитных дисках распределение намагниченности представляет собой магнитный вихрь [1] (рис. 1). Оболочка вихря лежит в плоскости диска и имеет завихренность либо по часовой, либо против часовой стрелки. В центре вихря расположена узкая область — кор, имеющая направление намагниченности, выходящее из плоскости диска. Низшая частота колебаний такой системы соответствует гиротропной моде, в



**Рис. 1.** Модельное распределение намагниченности диска в виде магнитного вихря во внешнем магнитном поле. Пунктиром схематически показано движение центра вихря, соответствующее низкочастотному резонансу — гиротропной моде.

которой центр вихря движется по окружности вокруг состояния равновесия. В целом интерес к исследованию гиротропной моды связан, прежде всего, с возможностью изменения ее частоты под действием внешнего магнитного поля, а следовательно, и возможным применением вихревых дисков для разработки перестраиваемых по частоте наноосцилляторов или субмикронных детекторов поля [2,3].

Низкочастотный резонанс, связанный с гиротропным движением кора магнитного вихря в ферромагнитном диске, был предсказан теоретически [4,5] и измерен с помощью полярного эффекта Керра [6] и рентгеновской фотоэмиссионной электронной микроскопии [7,8]. Также были проведены измерения резонансов в массиве дисков, высаженных на сигнальном электроде копланарной линии [9,10], и в одиночных дисках методом магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ) [11]. В данных работах были исследованы зависимости резонансной частоты гиротропной моды движения кора вихря от аспектного соотношения диска [6–8] и от величины внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно плоскости [10–12]. В настоящей работе мы использовали метод МРСМ для исследования зависимости резонансных колебаний кора вихря в круглых пермалловых дисках от внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости образца.

### 1. Эксперимент

В эксперименте исследовались круглые диски из пермаллоя ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ), изготовленные методом взрывной

(„lift-off“) литографии. Вначале на стеклянной подложке (толщиной  $170\ \mu\text{m}$ ) выращивался слой пермаллоя толщиной  $60\ \text{nm}$ . Затем сверху наносился слой (толщиной  $150\ \text{nm}$ ) позитивного электронного резиста полиметилметакрилата (ПММА 495 С2) методом центрифугирования. Начальная маска в виде массива кругов диаметром  $1\ \mu\text{m}$  формировалась в резисте посредством экспонирования электронным пучком в микроскопе SUPRA 50VP с литографической приставкой ELPHY PLUS (компания „CarlZeiss“, Jena). Затем облученные области резиста, соответствующие будущим дискам, удалялись в органическом растворителе. После этого методом магнетронного напыления на образец наносился тонкий (толщиной  $30\ \text{nm}$ ) слой ванадия. Затем была проведена операция „lift-off“ в ацетоне с применением ультразвука, в результате чего были сформированы диски ванадия на пермаллое, которые служили защитной маской при ионном  $\text{Ag}^+$  травлении образца. В итоге был сформирован массив дисков диаметром  $1\ \mu\text{m}$  и толщиной  $60\ \text{nm}$ , упорядоченный на квадратной решетке с периодом  $15\ \mu\text{m}$ . Процедура изготовления образцов с использованием ионного травления позволяет получить структуры с более совершенными границами, чем при обычной процедуре „lift-off“ что позволяет лучше управлять магнитными свойствами полученных образцов. Для минимизации электростатических эффектов образец дополнительно покрывался тонкой (толщиной  $5\ \text{nm}$ ) пленкой платины.

Вынужденные колебания намагниченности дисков исследовались с помощью магнитно резонансного силового микроскопа (MPCМ), созданного в ИФМ РАН на базе сканирующего зондового микроскопа „Solver HV“ [13–15]. Данная установка позволяет проводить исследования спектров колебаний намагниченности в диапазоне частот  $0.01\text{--}20\ \text{GHz}$  и в магнитных полях до  $3\ \text{kOe}$ . В качестве зондового датчика использовался специальный мягкий кантилевер с резонансной частотой  $6.7\ \text{kHz}$  и жесткостью  $0.03\ \text{N/m}$ , на который наклеивалась частица  $\text{SmCo}$  размером  $\sim 10\ \mu\text{m}$ . Для СВЧ накачки образцов использовался перестраиваемый генератор „SPS-20“ (компания „Спектран“, г. Саратов). Мощность накачки составляла  $-2\ \text{dBm}$  ( $0.63\ \text{mW}$ ). Образец располагался на планарной закороченной полосковой линии в пучности магнитного СВЧ поля, направленного в плоскости диска. Внешнее подмагничивающее поле  $H$  создавалось с помощью электромагнита постоянного тока и было направлено в плоскости образца перпендикулярно переменному полю. Измерения проводились в вакууме ( $0.1\ \text{Pa}$ ), при этом добротность механических колебаний кантилевера составляла 950.

## 2. Моделирование

Микромагнитное моделирование динамики намагниченности диска проводилось на основе численного интегрирования уравнения Ландау–Лифшица для магнитного

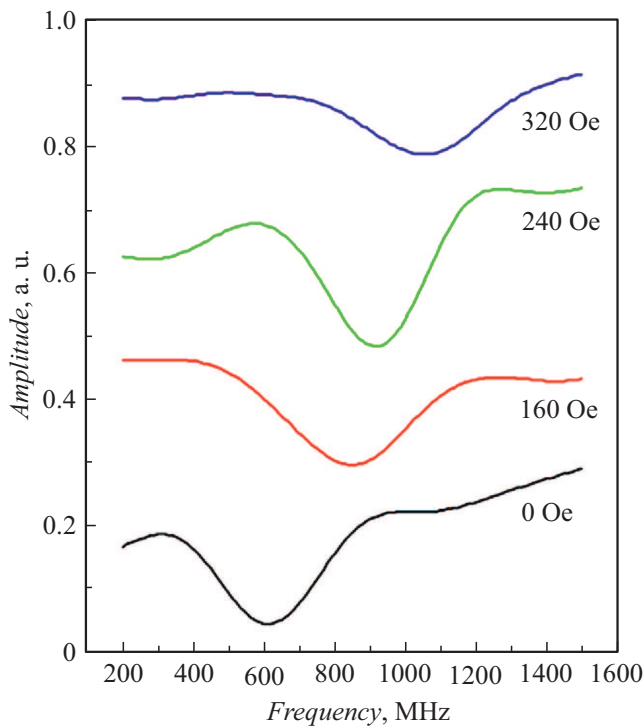
момента с использованием симулятора MuMax3 [16]. Ферромагнитный резонанс рассчитывался в цилиндрическом диске диаметром  $1\ \mu\text{m}$  и толщиной  $60\ \text{nm}$ . Нами были использованы следующие материальные параметры: намагниченность насыщения  $M_s = 800\ \text{kA/m}$ , обменная константа  $J = 13\ \text{pJ/m}$ , параметр затухания  $\alpha = 0.015$  [17]. Расчеты проводились на прямоугольной сетке, содержащей  $256 \times 256 \times 1$  узлов, шаг сетки в плоскости составлял  $4\ \text{nm}$ . Сетка в плоскости выбрана таким образом, чтобы ее шаг был меньше обменной длины  $L_{\text{ex}} \approx 10\ \text{nm}$ . Дополнительное моделирование показало, что увеличение числа узлов по толщине диска не приводит к изменению спектров и для получения корректных результатов достаточно считать намагниченность однородной по толщине. Для определения резонансной частоты колебаний вихря на систему подавался кратковременный (длительностью  $0.1\ \text{ns}$ ) импульс магнитного поля амплитудой  $1\ \text{Oe}$ , направленного в плоскости диска. Затем записывалась осциллограмма ( $100\text{--}150$  периодов) релаксационных колебаний среднего значения намагниченности. Низшая резонансная частота колебаний, соответствующая гиротропной моде, выделялась посредством быстрого преобразования Фурье. В численном эксперименте исследовался сдвиг резонансной частоты от внешнего поля.

## 3. Результаты и обсуждение

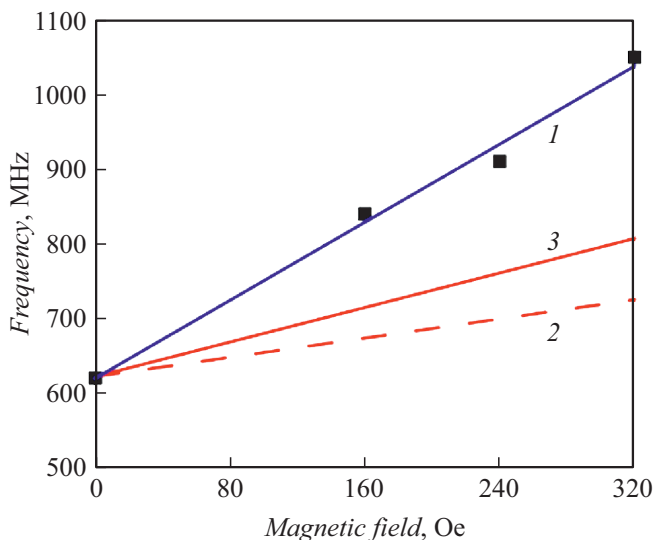
В MPCМ экспериментах снимались зависимости амплитуды колебаний кантилевера от частоты излучения СВЧ накачки во внешнем продольном подмагничивающем поле. Зондовый датчик располагался над центральной частью диска. Расстояние зонд–образец составляло  $3\ \mu\text{m}$ . Частота накачки перестраивалась в диапазоне  $0.1\text{--}2\ \text{GHz}$ . На рис. 2 приведены MPCМ спектры диска в различных магнитных полях. Резонансу соответствуют провалы на зависимостях амплитуды колебаний кантилевера от частоты. Из рисунка видно, что ширина резонансных кривых более  $150\ \text{MHz}$ , что может быть связано с неоднородностью поля зонда.

Зависимость резонансной частоты гиротропной моды от величины внешнего магнитного поля приведена на рис. 3 (кривая 1). Видно, что в данной области полей зависимость линейная.

Микромагнитное моделирование показало, что в нулевом внешнем продольном поле расчетная ( $\sim 450\ \text{MHz}$ ) и экспериментальная ( $\sim 620\ \text{MHz}$ ) частоты гиротропной моды не совпадают. Известно, что приложение внешнего поля вдоль оси  $z$  параллельно намагниченности кора вихря увеличивает собственную частоту гиротропной моды [18]. Источником такого поля в MPCМ эксперименте является частица  $\text{SmCo}$ , расположенная на конце кантилевера [19,20]. Для учета поля MPCМ зонда мы использовали простейшую модель, в которой поле зонда рассчитывалось как эффективное поле магнитного



**Рис. 2.** Экспериментальные МРСМ спектры, соответствующие гиротропной моде колебаний магнитного вихря во внешнем магнитном поле. Спектры сдвинуты в вертикальном направлении для лучшего восприятия.

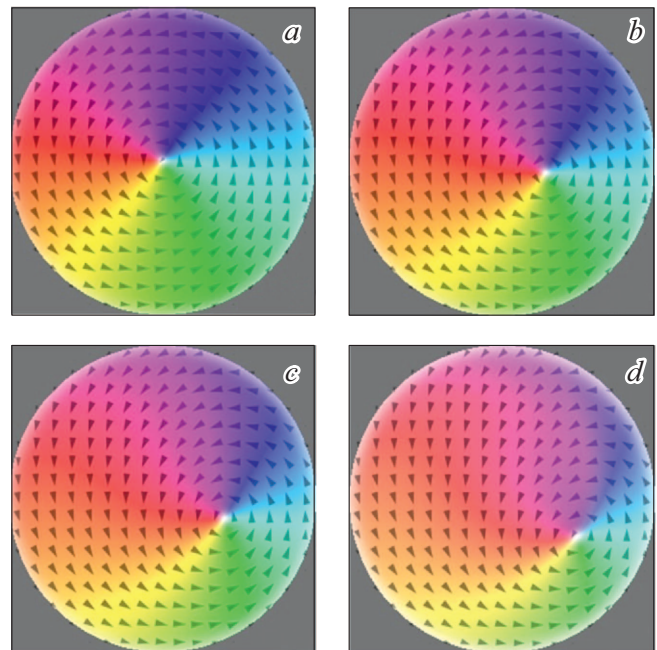


**Рис. 3.** Зависимости резонансной частоты гиротропной моды от продольного магнитного поля: 1 — экспериментальная зависимость (квадратами показаны экспериментально измеренные значения резонансной частоты); 2 — модельная зависимость с учетом поля зонда, но без учета изменения его высоты; 3 — модельная зависимость с учетом поля зонда и изменения его высоты.

монополя, расположенного над диском [21]. Расстояние между монополем и диском выбиралось в соот-

ветствие с экспериментальным значением расстояния зонд—образец, заряд монополя служил подгоночным параметром.

Приложение внешнего продольного поля приводит к сдвигу кора вихря относительно центра диска, что сопровождается изменением профиля потенциальной энергии для вихря внутри диска и приводит к увеличению резонансной частоты гиротропной моды [22]. При этом кор сдвигается не перпендикулярно внешнему полю из-за наличия радиальной компоненты поля зонда (рис. 4). Микромагнитное моделирование показало, что такого элементарного учета поля зонда недостаточно для объяснения экспериментально наблюдаемого сдвига резонансной частоты (рис. 3, кривая 2). Дополнительный сдвиг связан с изменением высоты зонда из-за действия силы на частицу SmCo со стороны внешнего поля. Зависимость резонансной частоты в этом случае приведена на рис. 3 (кривая 3). Высота зонда при расчетах изменялась с  $3.5 \mu\text{m}$  при  $H = 0 \text{ Oe}$  до  $2.8 \mu\text{m}$  для внешнего поля  $H = 320 \text{ Oe}$ . Отметим, что мы использовали наиболее простую модель системы зонд—образец—внешнее поле. В используемой нами модели не учитывались такие факторы как наклон магнитного зонда по отношению к плоскости образца, смещение зонда относительно центра диска, а также возможное более сложное распределение поля зонда вследствие сложной формы, наклона магнитного момента и неоднородной намагниченности SmCo частицы.



**Рис. 4.** Модельные распределения намагниченности для вихря в однородном продольном поле с учетом влияния поля  $H$  и высоты зонда  $d$ . Поле прикладывается вертикально, сверху вниз:  $a$  —  $H = 0 \text{ Oe}$ ,  $d = 3.5 \mu\text{m}$ ;  $b$  —  $H = 160 \text{ Oe}$ ,  $d = 3.3 \mu\text{m}$ ;  $c$  —  $H = 240 \text{ Oe}$ ,  $d = 3.1 \mu\text{m}$ ;  $d$  —  $H = 320 \text{ Oe}$ ,  $d = 2.8 \mu\text{m}$ .

## Заклучение

Таким образом, были проведены МРСМ исследования гиротропной моды колебаний магнитного вихря в оди-ночном диске диаметром  $1\ \mu\text{m}$  и толщиной  $60\ \text{nm}$  в про-дольном внешнем магнитном поле. Показано, что зави-симость резонансной частоты данной моды от внешнего магнитного поля имеет линейный характер в диапазоне полей  $0\text{--}300\ \text{Oe}$ . Сравнение экспериментальных резуль-татов и результатов микромагнитного моделирования показало, что на резонансные свойства вихря большое влияние оказывает неоднородного поля МРСМ зонда. В дальнейшем планируется изучение особенностей коле-баний вихря в сильно неоднородном магнитном поле и построение более реалистичной модели взаимодействия зонда с образцом.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность Р.В. Гореву за по-мощь в моделировании и В.В. Рогову за помощь в при-готовлении образца.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-02-00247) и в рамках государственного здания (контракт № 0035-2019-0022-С-01). В экспериментах ис-пользовалось оборудование центра коллективного поль-зования „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Lebrun R., Locatelli N., Tsunegi S., Grollier J., Cros V., Abreu Araujo F., Kubota H., Yakushiji K., Fukushima A., Yuasa S. // *Phys. Rev. App.* 2014. Vol. 2. P. 061001-1–061001-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.061001>
- [2] Braganca P.M., Gurney B.A., Wilson B.A., Katine J.A., Maat S., Childress J.R. // *Nanotechnology*. 2010. Vol. 21. P. 235202-1–235202-6. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/23/235202>
- [3] Metlov K.L., Lee Y. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. P. 112506-1–112506-3. <https://doi.org/10.1063/1.2898888>
- [4] Usov N.A., Kurkina L.G. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. Vol. 242. P. 1005–1008. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)01363-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)01363-4)
- [5] Guslienko K.Yu., Ivanov B.A., Novosad V., Otani Y., Shima H., Fukamichi K. // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. P. 8037–8039. <https://doi.org/10.1063/1.1450816>
- [6] Park J.P., Eames P., Engebretson D.M., Berezovsky J., Crowell P.A. // *Phys. Rev. B.* 2003. Vol. 67. P. 020403-1–020403-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.020403>
- [7] Guslienko K.Yu., Han X.F., Keavney D.J., Divan R., Bader S.D. // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 96. P. 067205-1–067205-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.067205>
- [8] Choe S.-B., Acremann Y., Scholl A., Bauer A., Doran A., Stohr J., Padmore H.A. // *Science*. 2004. Vol. 304. P. 420–422. <https://doi.org/10.1126/science.1095068>
- [9] Novosad V., Fradin F., Roy P., Buchanan K., Guslienko K.Y., Bader S.D. // *Phys. Rev. B.* 2005. Vol. 72. P. 024455-1–024455-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.024455>
- [10] Ким П.Д., Орлов В.А., Прокопенко В.С., Замай С.С., Принц В.Я., Руденко Р.Ю., Руденко Т.В. // *ФТТ*. 2015. Т. 57. Вып. 1. С. 29–36. [Kim P.D., Orlov V.A., Prokopenko V.S., Zamaic S.S., Prints V.Ya., Rudenko R.Yu., Rudenko T.V. // *Phys. Sol. State*. 2015. Vol. 57. P. 30–37.]
- [11] Pigeau B., de Loubens G., Klein O., Riegler A., Lochner F., Schmidt G., Molenkamp L.W., Tiberkevich V.S., Slavin A.N. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. P. 132506-1–132506-3. <https://doi.org/10.1063/1.3373833>
- [12] Guslienko K.Yu. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 022510-1–022510-2. <https://doi.org/10.1063/1.2221904>
- [13] Скороходов Е.В., Сапожников М.В., Резник А.Н., Поляков В.В., Быков В.А., Володин А.П., Миронов В.Л. // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. № 5. С. 140–145.
- [14] Скороходов Е.В., Сапожников М.В., Горев Р.В., Володин А.П., Миронов В.Л. // *ФТТ*. 2018. Т. 60. Вып. 11. С. 2213–2218. <https://doi.org/10.21883/ФТТ.2018.11.46665.25NN> [Skorokhodov E.V., Sapozhnikov M.V., Gorev R.V., Volodin A.P., Mironov V.L. // *Phys. Sol. State*. 2015. Vol. 60. N 11. P. 2254–2258. <https://doi.org/10.1134/S1063783418110306>]
- [15] Горев Р.В., Скороходов Е.В., Миронов В.Л. // *ЖТФ*. 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1646–1649. <https://doi.org/10.21883/ЖТФ.2019.11.48322.126-19> [Gorev R.V., Skorokhodov E.V., Mironov V.L. // *Tech. Phys.* 2019. Vol. 64. P. 1556–1559. <https://doi.org/10.1134/S1063784219110112>]
- [16] Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberg B. // *AIP Advances*. 2014. Vol. 4. P. 107133-1–107133-22. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
- [17] Liu Y., Jia M., Li H., An Du // *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. Vol. 401. P. 806–811. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.10.136>
- [18] Fried J.P., Metaxas P.J. // *Phys. Rev. B.* 2016. Vol. 93. P. 064422-1–064422-8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.064422>
- [19] Mironov V.L., Fraerman A.A., Gribkov B.A., Ermolayeva O.L., Klimov A.Yu., Gusev S.A., Nefedov I.M., Shereshevskii I.A. // *Phys. Met. Metall.* 2010. Vol. 110. N 7. P. 708–734.]
- [20] Миронов В.Л., Ермолаева О.Л. // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2007. № 8. С. 37–41. [Mironov V.L., Yermolaeva O.L. // *J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniq.* 2007. Vol. 1. P. 466–470.]
- [21] Lohau J., Kirsch S., Carl A., Dumpich G., Wassermann E.F. // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. P. 3410–3417. <https://doi.org/10.1063/1.371222>
- [22] Buchanan K.S., Roy P.E., Grimsditch M., Fradin F.Y., Guslienko K.Yu., Bader S.D., Novosad V. // *Phys. Rev. B.* 2006. Vol. 74. P. 064404-1–064404-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.064404>