

05

Влияние профиля дискового магнитного элемента на поле насыщения и шум магнитомодуляционного сенсора магнитного поля

© П.М. Ветошко^{1,2}, А.К. Звездин^{1,3}, В.А. Скиданов⁴,
И.И. Сыворотка⁵, И.М. Сыворотка⁵, В.И. Белотелов^{1,3,6}

¹ Российский квантовый центр, Москва, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁴ Институт проблем проектирования в микроэлектронике, Москва, Россия

⁵ Научно-исследовательский центр Карат, Львов, Украина

⁶ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

E-mail: belotelov@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2014 г.

Микромагнитное моделирование методом конечных элементов показало, что приближение полуэллиптического профиля толщины магнитного диска ступенчатым снижает поле насыщения. Уменьшение поля насыщения приводит к улучшению чувствительности магнитомодуляционных сенсоров, что подтверждено экспериментами по измерению шумов сенсоров магнитного поля с сердечником со ступенчатым профилем. Полученные значения шумов магнитного сенсора для четырехступенчатого профиля сердечника ($1.5 \cdot 10^{-9}$ Ое/Гц^{1/2}) более чем на порядок превосходят современный уровень.

Особое место среди средств регистрации магнитных полей занимают магнитомодуляционные сенсоры — феррозонды, в которых используют магнитоупорядоченные материалы. Феррозонды обеспечивают наибольшую энергию взаимодействия с исследуемым полем и потенциально чрезвычайно высокую чувствительность, не требуют охлаждения, дешевы и технологичны [1]. Однако чувствительность феррозондов ограничена флуктуациями магнитной энергии его сердечника, возникающими в процессе перемагничивания, которые зачастую на много порядков превышают энергию взаимодействия сердечника с измеряемым магнит-

ным полем [2,3]. Причина этого состоит в том, что физическая картина процесса перемагничивания сердечника феррозонда чрезвычайно сложна. Это нестационарный процесс, сопровождающийся трансформацией доменной структуры и формированием динамических неустойчивостей намагниченности под действием собственного размагничивающего поля диска [4]. Традиционным способом решения этой проблемы является использование магнитных сердечников с высокой намагниченностью и малой анизотропией на основе железо-никелевых сплавов [2]. Это позволяет уменьшить размер и увеличить число доменов в пределах магнетика и тем самым получить более гладкое усреднение кривой перемагничивания. Однако сохраняется стохастический характер возникновения и уничтожения доменов в процессе перемагничивания, при этом кривая зависимости намагниченности от приложенного магнитного поля состоит из множества ступенек, связанных с процессами перестройки доменной структуры — скачками Баркгаузена [3].

Таким образом, насыщенное (т.е. монодоменное) состояние магнитного элемента является основным условием для достижения предельных параметров магнитомодуляционных сенсоров магнитного поля [5]. Монодоменное состояние магнетика достижимо при приложении внешнего поля насыщения $H_s = 4\pi M_s$. Однако, чтобы вклад в шумы магнитного сенсора от электромагнитной системы не превалировал над собственными шумами сердечника, необходимо, чтобы сердечник обладал достаточной магнитной восприимчивостью [6]. Магнитная восприимчивость, в свою очередь, обратно пропорциональна величине поля насыщения H_s . Следовательно, необходимо искать пути уменьшения полей насыщения сердечников магнитных сенсоров.

Наименьшим полем насыщения при заданном отношении толщины к диаметру обладают магнетики в форме сплюснутого эллипсоида, однако реализация такого профиля является очень сложной технологической задачей. Чтобы обойти эти сложности, был развит относительно простой технологический подход аппроксимации полуэллиптического профиля ступенчатым посредством многослойной фотолитографии [7]. При этом оценки эффективности снижения поля насыщения проводились методом микромагнитного моделирования, в котором, ввиду использованного метода конечных разностей, был рассмотрен только идеализированный ступенчатый профиль, т.е. не был учтен наклон ступенек, который с неизбежностью присутствует при химическом травлении.

В данной работе теоретически и экспериментально рассмотрена эффективность аппроксимации полуэллиптического профиля магнитного дискового сердечника ступенчатым. Расчеты проведены методом конечных элементов [8]. При этом учтены характеристики травления, наклон ступенек аппроксимирующего профиля, а также произведено сравнение с непрерывным полуэллиптическим профилем. В качестве сердечника использована эпитаксиальная пленка феррита-граната номинального состава $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$ с ориентацией (111). Как показано в [9], пленки этого состава обладают уменьшенной на порядок по отношению к неразбавленному железо-иттриевому гранату константой кубической анизотропии. Кроме того, их эффективная анизотропия в плоскости (111) снижена на два порядка величины. Сочетание малой анизотропии и высокого структурного совершенства, присущего эпитаксиальным пленкам ферритов-гранатов, обеспечивает необходимый набор свойств материала для построения магнитных сенсоров, работающих в режиме однородного вращения намагниченности.

Расчет распределения намагниченности в объеме чувствительного элемента проведен методом минимизации полной энергии

$$E = E_{exch} + E_{ani} + E_{mag} + E_{Zee},$$

где E_{exch} — обменная энергия, E_{ani} — энергия магнитной анизотропии, E_{mag} — энергия поля размагничивания и E_{Zee} — энергия взаимодействия образца с внешним магнитным полем. При этом рассмотрен магнитный элемент в форме диска диаметром 1 мм и толщиной $1 \mu m$ (I, рис. 1, а), находящийся на немагнитной подложке гадолиний-галлиевого граната II). В случае ступенчатого профиля угол наклона ступенек составлял $\alpha = 45^\circ$. Внешнее магнитное поле направлено в плоскости диска вдоль оси Ox (рис. 1, а).

Параметры магнитного материала, использованные при расчете, следующие: $H_s = 1000$ Ое, обменная энергия $A = 3$ рJ/m, константы одноосной и кубической анизотропии K_u и K_1 приняты нулевыми, что с достаточной точностью соответствует параметрам состава $Tm_3Fe_{4.3}Sc_{0.7}O_{12}$, использованного в эксперименте.

Для оптимизации профиля края диска использован метод конечных элементов, реализованный в пакете MAGPAR [8]. Разбиение диска на конечные тетраэдрические элементы проведено с переменным размером тетраэдров, с уменьшением размера по мере приближения к краю элемента или ступеньки. Средний размер тетраэдра составлял $0.03 \mu m$.

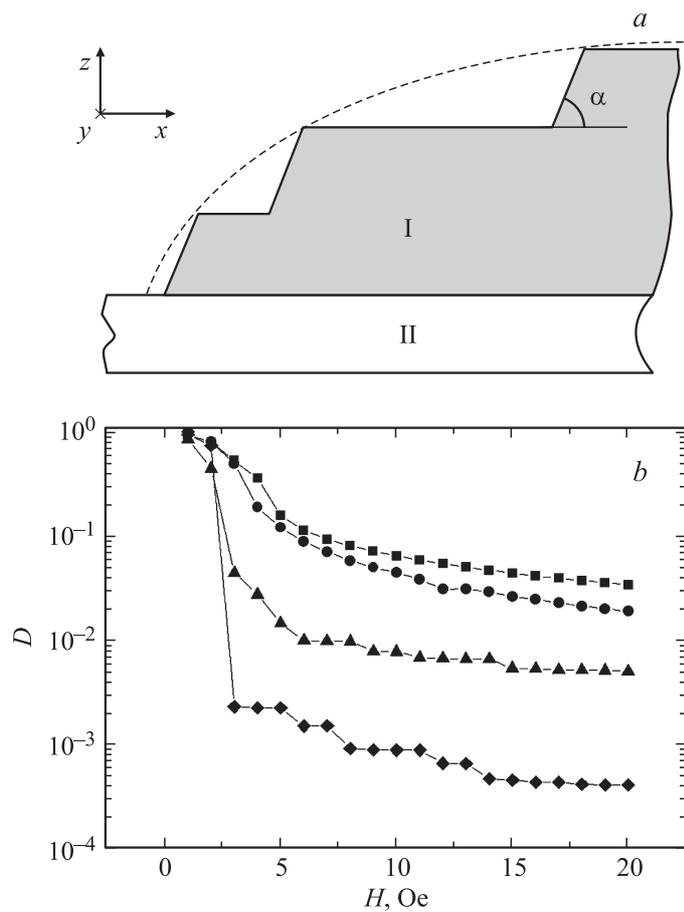


Рис. 1. *a* — ступенчатый профиль с наклонными ступеньками равной высоты, аппроксимирующий полуэллиптический профиль. Полуэллиптический профиль аппроксимирован соответствующим выбором длины ступенек. *b* — зависимость фактора деполяризации дисков разного профиля от внешнего магнитного поля: квадратный маркер — одноступенчатый диск с вертикальным краем, круглый маркер — одноступенчатый диск с наклоном 45° , треугольный маркер — пятиступенчатый диск с наклоном 45° , ромбовидный маркер — диск с непрерывным полуэллиптическим профилем.

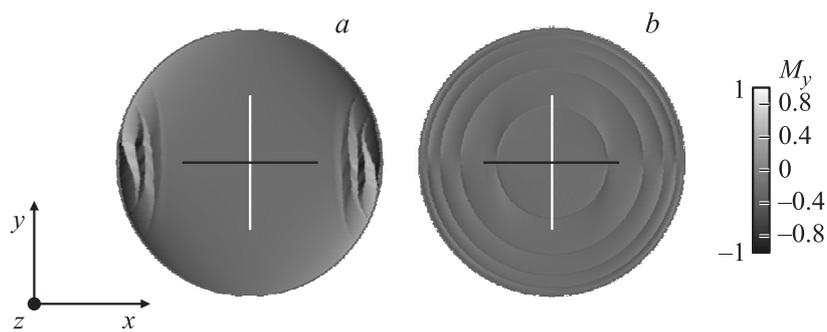


Рис. 2. Распределение поперечной компоненты намагниченности M_y в одноступенчатом (a) и пятиступенчатом (b) дисках во внешнем магнитном поле $H = 5$ Ое. Градациями серого показана величина M_y , нормированная на намагниченность насыщения.

Расчеты выполнены в диапазоне величин внешнего магнитного поля H от 0 до 20 Ое. Степень однородности распределения намагниченности можно оценить фактором деполяризации $D = 1 - (M_x/M_s)^2$, где M_x — средняя проекция вектора намагниченности всех элементов разбиения диска на направление OX , вдоль которого приложено внешнее магнитное поле, M_s — намагниченность насыщения. При приближении состояния намагниченности магнитной пленки к однородному фактор деполяризации стремится к нулю.

Расчет показывает, что наклон ступеньки одноступенчатого профиля уменьшает фактор деполяризации в несколько раз (рис. 1, b, круги). В то же время пятиступенчатая аппроксимация полуэллиптического профиля (рис. 1, b, треугольники) на порядок величины улучшает однородность распределения намагниченности в сравнении с одноступенчатым с вертикальным краем (рис. 1, b, квадраты).

Это иллюстрируют распределения поперечной компоненты намагниченности M_y во внешнем магнитном поле $H = 5$ Ое для одноступенчатого и пятиступенчатого дисков (рис. 2). Хотя в одноступенчатом диске при таком поле еще образуются замыкающие домены, распределение намагниченности в пятиступенчатом уже становится однородным.

По результатам моделирования были выращены методом жидкофазной эпитаксии на горизонтально вращающуюся подложку гадолиний-

галлиевого граната из раствора-расплава на основе $PbO-B_2O_3$ магнитные диски диаметром 22 mm и толщиной $9 \mu m$ с одноступенчатым и четырехступенчатым профилями. Для получения ступенчатого профиля применялся процесс многослойной фотолитографии с использованием фотомасок с элементами круглой формы. После каждого этапа фотолитографии пленка подвергалась травлению в ортофосфорной кислоте при температуре $200^\circ C$, в результате чего были получены образцы в форме дисков с одноступенчатым и четырехступенчатым профилем. Профиль полученных образцов исследовался с помощью профилометра (Sloan Dektak IIА) и оптического микроскопа (Eclipse LV100 Pol, Nikon). Тангенс угла наклона полученных ступенек был в диапазоне 0.2–0.25. Высота каждой ступеньки для четырехступенчатого диска составила $2.25 \mu m$.

При экспериментальной оценке влияния профиля магнитного элемента на собственный магнитный шум сенсора возбуждение магнитного элемента производилось во вращающемся магнитном поле H , как описано в [6]. Поле в плоскости пленки возбуждалось посредством двух ортогональных гауссовых катушек. Полезный сигнал измерялся по второй гармонике отклика. Измерения проводились в четырехслойном пермалловом экране с коэффициентом подавления 60 dB на частоте 1 Hz. Измеренная спектральная плотность магнитного шума была усреднена в полосе частот 1–10 Hz.

Из сравнения зависимостей собственного шума магнитных сенсоров (рис. 3) и фактора деполяризации (рис. 1, *b*) от величины вращающегося магнитного поля H можно сделать вывод, что по мере приближения профиля сердечника сенсора магнитного поля к полуэллиптическому падают как величина насыщающего поля, так и собственный магнитный шум сенсора. Также из рис. 1, *b* видно, что отношение величин поля насыщения для профилированного и одноступенчатого дисков достигает двух порядков.

Таким образом, использование ступенчатой аппроксимации полуэллиптического профиля магнитных дисков существенно уменьшает поле насыщения и, как следствие, снижает уровень шума соответствующего магнитного сенсора до величин $\sim 10^{-9} Oe/Hz^{1/2}$. Следует ожидать, что еще более точное приближение ступенчатого профиля диска к полуэллиптическому, т.е. использование большего числа ступенек, приведет к дальнейшему снижению уровня шума магнитного сенсора и к увеличению его чувствительности вплоть до $10^{-10} Oe/Hz^{1/2}$. Таким

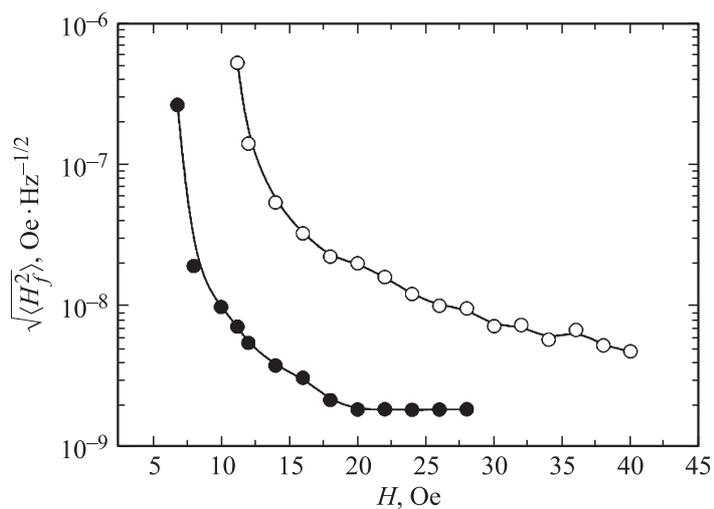


Рис. 3. Зависимость величины плотности магнитного шума сенсора, усредненного в полосе частот 1–10 Hz, от величины внешнего вращающегося магнитного поля для образцов с одноступенчатым (белые маркеры) и трехступенчатым профилем (черные маркеры).

образом, данный подход может позволить создать новое поколение магнетометров, работающих при комнатной температуре и сравнимых по чувствительности со СКВИД-магнетометрами.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 14-32-00010.

Список литературы

- [1] *Tumanski S.* Handbook of magnetic measurements. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 2011.
- [2] *Korepanov V., Marusenkov A.* // Surveys in Geophysics. 2012. V. 33. P. 1059–1079.
- [3] *Колачевский Н.Н.* Флуктуационные явления в ферромагнитных материалах. М.: Наука, 1985.

- [4] *Petta J.R., Weissman M.B., O'brien K.P.* // Physical Review. E. 1996. V. 54. P. R1029.
- [5] *Deak J., Miklich A.H., Slonczewski J.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1157–1159.
- [6] *Vetoshko P.M., Valeiko M.V., Nikitin P.I.* // Sensors and Actuators. A: Physical. 2003. V. 106. P. 270–273.
- [7] *Vetoshko P., Skidanov V., Stempkovskiy A.* // Sensor Letters. 2013. V. 11. P. 59–61.
- [8] *Scholz W., Fidler J., Schrefl T.* et al. // Computational Materials Science. 2003. V. 28. P. 366–383.
- [9] *Syvorotka I.I., Syvorotka I.M., Shavrov V.G.* et al. In-plane Transverse Susceptibility of (111)-oriented Iron Garnet Films. EMSA-2014 Book of Abstracts. Vienna, Austria, 2014. P. 153.