

05,01

Изменение спектров ферромагнитного резонанса и магнитной анизотропии многослойных гетероструктур $[\text{CoFeB}/\text{SiO}_2|\text{Bi}_2\text{Te}_3]_{47}$ при нанесении наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ на их поверхность

© А.И. Безверхний^{1,2}, Р.Б. Моргунов^{1,2,¶}

¹ Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия

² Первый московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

¶ E-mail: morgunov2005@yandex.ru

Поступила в Редакцию 12 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 12 апреля 2022 г.

Принята к публикации 19 апреля 2022 г.

Методом ферромагнитного резонанса обнаружено увеличение константы анизотропии гетероструктуры $[\text{CoFeB}/\text{SiO}_2|\text{Bi}_2\text{Te}_3]_{47}$ под действием магнитных наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, нанесенных на поверхность гетероструктуры, на 20%. Установлено, что слой наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ толщиной ~ 27 nm на диамагнитной подложке GaAs обладает собственной магнитной анизотропией, вызванной магнитным дипольным взаимодействием между частицами. Слой наночастиц, связанных магнитным дипольным взаимодействием, образует эквивалентную магнитную пленку, поле рассеяния которой изменяет эффективную магнитную анизотропию гетероструктуры $[\text{CoFeB}/\text{SiO}_2|\text{Bi}_2\text{Te}_3]_{47}$.

Ключевые слова: ферромагнитный резонанс, магнитная анизотропия, многослойные гетероструктуры, магнитное дипольное взаимодействие, наночастицы.

DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52693.344

1. Введение

Одним из современных направлений в развитии спинтроники является создание датчиков магнитных наночастиц, которые присутствуют в живых клетках или тканях организмов. Высокая чувствительность спиновых вентиля к локальным магнитным полям наночастиц делает возможным детектирование относительно небольшого количества магнитомеченных клеток (см. например обзоры [1,2]). В качестве магнитных маркеров в медицине широко распространены наночастицы $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, проявляющие значительный потенциал биосовместимости с различными объектами [3]. Локальное магнитное поле рассеяния, создаваемое отдельной ферромагнитной наночастицей, способно переключать направление намагниченности тонких ферромагнитных слоев спинового вентиля, и, таким образом, локально изменять магнитосопротивление, чувствительное к намагниченностям этих слоев. Эффективность преобразования локального поля частицы в изменение сопротивления сенсора определяет пригодность многослойных платформ к их использованию в качестве сенсоров в биологии и медицине. Однако эта эффективность зависит не только от качества спинового вентиля и величины его магнитосопротивления, как может показаться на первый взгляд. Значительную роль играет баланс между величиной локального поля наночастицы и магнитной анизотропией слоев сенсора, которая определяет эффективность переключения их локальной намагниченности. Поэтому сенсор с очень высоким магнитосопротивлением может

оказаться непригодным, потому что наночастицы плохо переключают намагниченность его слоев. И наоборот, выигрыш в эффективности сенсора можно получить даже при его небольшом магнитосопротивлении, но высокой способности переключать намагниченность под действием частиц. Поэтому индустрия сенсоров нуждается в подборе таких спин-вентильных платформ, которые демонстрировали бы как можно более низкий коэффициент „число частиц/изменение сопротивления“.

В подавляющем большинстве случаев в качестве спин-вентильной платформы используется многослойная структура, в которой сплошные ультратонкие (~ 1 nm) слои ферромагнитного металла (часто CoFeB) разделены тонкими слоями диэлектрика (TMR-сенсоры $\text{CoFeB}|\text{MgO}|\text{CoFeB}$ [4]) или немагнитного металла (GMR-сенсоры $\text{CoFeB}|\text{Ta}|\text{CoFeB}$ [5]). В этих условиях сплошных пленок локальное перемагничивание слоев CoFeB под наночастицей было обнаружено экспериментально, и полученные результаты были подтверждены с помощью моделирования [6,7].

Существуют и такие структуры, в которых ферромагнитные слои не являются сплошными, а состоят из островков CoFeB , разделенных диэлектриком SiO_2 в плоскости пленки. Между такими слоями имеется слой другого материала, например Bi_2Te_3 . Подобные структуры были подробно исследованы в серии работ [8–15]. Они обладают магнитосопротивлением на уровне 6% и проявляют мемристивные и другие интересные свойства. Несмотря на невысокое значение магнитосопротивления, которое почти в 100 раз меньше максимально

достигнутого значения в структурах $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}$, они могут представлять интерес в качестве платформ магниторезистивных сенсоров. Переключение локальной намагниченности в сенсорах со сплошной пленкой вовлекает в этот процесс большую долю материала ферромагнитной пленки, т.е. все спины локального участка сплошной пленки должны изменить свою ориентацию [6,7]. Барьер перемагничивания в этом случае определяется величиной магнитной анизотропии материала пленки. В островковых пленках может возникнуть ситуация, когда отдельный кластер пленки (островок) может быть перемагничен в значительно меньшем поле наночастицы, чем это необходимо в сплошной пленке. Это может происходить потому, что эффективная магнитная анизотропия островка может быть значительно понижена поверхностной и интерфейсной анизотропией, а также анизотропией формы. В этом случае проигрыш в магнитосопротивлении может окупиться выигрышем в эффективности переключения намагниченности.

В данной работе мы не решали вопрос достижения низкого коэффициента „число частиц/изменение сопротивления“; мы попытались определить эффективность влияния наночастиц на переключение намагниченности островковых многослойных гетероструктур, в которых тонкие ферромагнитные пленки не являются сплошными, а состоят из кластеров сплава CoFeB . Целью работы было обнаружение и анализ изменений в спектрах ферромагнитного резонанса (ФМР) в гетероструктурах $[\text{CoFeB}/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3]_{47}$, при нанесении на них ферромагнитных наночастиц Fe_3O_4 .

2. Методика и образцы

В опытах были использованы четыре образца.

I. Первый образец является контрольным и представляет собой диамагнитный монокристалл GaAs , размерами $2.5 \times 4 \text{ mm}$ и толщиной 1 mm . Было заранее проверено, что этот образец и возможные примеси в нем не дают сигнала магнитного резонанса в исследуемом диапазоне полей, в котором записывались спектры.

II. Второй образец состоит из вышеописанной подложки GaAs с осажденными на ее поверхности наночастицами $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$. Для осаждения использовался коллоидный раствор наночастиц в толуоле с концентрацией 10^{-2} g/ml . На поверхность образца было нанесено $15 \mu\text{l}$ раствора, так что $\sim 5 \cdot 10^{11}$ частиц образовывали пленку толщиной $\sim 27 \text{ nm}$.

III. Третий образец имеет вид пластинки размером $3 \times 4 \text{ mm}$ и представляет собой многослойную гетероструктуру $[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}/\text{Bi}_2\text{Te}_3]_{47}$ из 47 чередующихся пар слоев $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ и Bi_2Te_3 . Слой $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2$ состоит из наночастиц сплава CoFeB , распределенных в матрице SiO_2 . Массовые доли сплава CoFeB : $\text{Co} - 41\%$, $\text{Fe} - 39\%$, $\text{B} - 20\%$. Толщина слоя $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2/\text{CoFeB} = 5.2 \text{ nm}$, а слоя $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Te}_3 = 1.7 \text{ nm}$. Методика приготовления и аттестации этого образца подробно описана в [8].

IV. Четвертый образец представляет собой образец III с нанесенными на его поверхность наночастицами $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$. Концентрация наночастиц на поверхности платформы $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ и способ их нанесения были аналогичны случаю, описанному для образца II.

Наночастицы $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, диспергированные в толуоле, были коммерчески приготовлены и аттестованы в НИТУ МИСИС. На рис. 1 показано изображение наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ на подложке GaAs , полученное в просвечивающем электронном микроскопе (ТЕМ). Средний размер наночастиц составляет $d = 24 \text{ nm}$, согласно гистограмме распределения размеров (см. врезку на рис. 1).

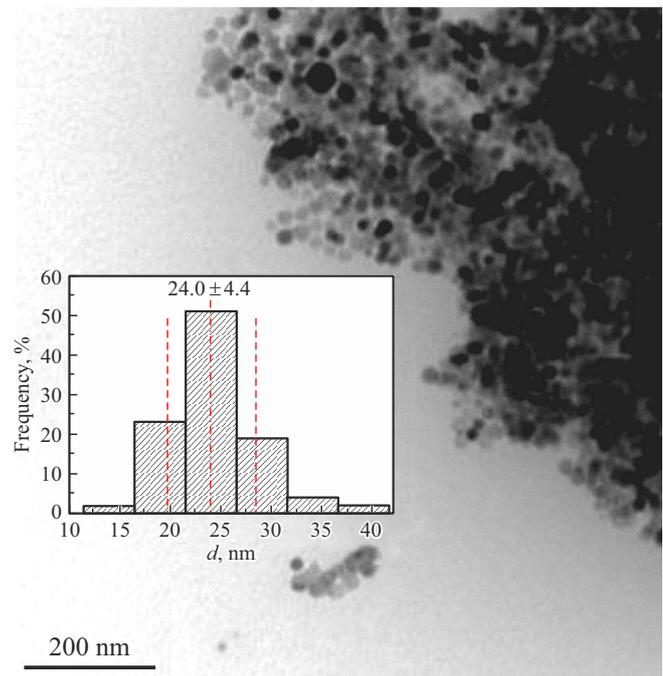


Рис. 1. ТЭМ-изображение наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$. На врезке приведена гистограмма распределения частиц по размерам.

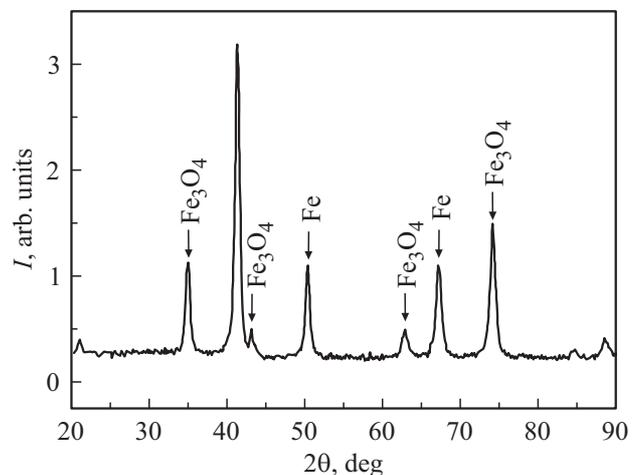


Рис. 2. Спектр рентгеновской дифракции наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$.

Спектр рентгеновской дифракции наночастиц Fe/Fe₃O₄ на подложке GaAs (рис. 2) содержал максимумы, которые относятся к ядру наночастиц, состоящему из Fe, и максимумы, которые относятся к оболочке Fe₃O₄. Это подтверждает структуру наночастиц, стандартизованную в медико-биологических исследованиях.

Ферромагнитный резонанс был исследован с помощью спектрометра электронного спинового резонанса X-диапазона EPR10-MINI. Частота микроволнового поля для всех образцов составляла 9.46 GHz, мощность микроволнового излучения 5 mW, амплитуда модулирующего поля 1 Oe, частота модуляции 100 kHz, добротность резонатора 4000.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3,а показаны спектры ФМР для четырех образцов, записанные в поле, перпендикулярном образцу, т.е. при значении полярного угла $\theta = 0^\circ$ (θ — угол между нормалью к поверхности образца и полем спектрометра). У образца I (чистый GaAs) не было обнаружено сигнала во всем диапазоне углов θ . Спектр ФМР образца II (GaAs с наночастицами) содержал две линии II.1 и II.2. В спектре образца III (гетероструктура без частиц) была одна линия. Спектр образца IV (гетероструктура с наночастицами) содержал линии IV.1 и IV.2. Пара линий в спектре наночастиц Fe/Fe₃O₄ хорошо известна из литературы и отвечает спин-волновым модам, возникающим при взаимодействии ядра и оболочки наночастиц [16].

Небольшое изменение полярного угла до $\theta = 10^\circ$ приводит к значительному сдвигу всех линий спектра, за исключением фонового спектра образца I (рис. 3, б). Анизотропными оказываются не только спектры гетероструктуры и гетероструктуры с частицами, но и спектр наночастиц Fe/Fe₃O₄ на подложке GaAs. Это указывает на то, что плотность частиц на подложке достаточно высока, чтобы они образовывали слой с магнитной анизотропией на диамагнитной подложке.

Угловые зависимости резонансного поля $H_{\text{res}}(\theta)$ для линий II.1 и II.2 показаны на рис. 4. Хотя резонансное поле определяли разложением спектра на линии Лоренца, выполнение этого алгоритма было затруднено в области перекрытия линий, где возникала неоднозначность аппроксимации спектра. Поэтому часть точек на угловой зависимости линии II.1 отсутствует. Для анализа угловых зависимостей была применена формула, описывающая магнитную анизотропию пленки с кубической симметрией [17]:

$$(\omega_0/\gamma)^2 = (H_{\text{res}} \cdot \cos(\theta_M - \theta) - 4\pi M_{\text{eff}} \cdot \cos^2 \theta) \times (H_{\text{res}} \cdot \cos(\theta_M - \theta) - 4\pi M_{\text{eff}} \cdot \cos(2\theta_M) + H_{2\parallel}), \quad (1)$$

где $\omega_0 = 9.46$ GHz — резонансная частота спектрометра, γ — гиромагнитное отношение, H_{res} — резонансное поле линии ФМР, $4\pi M_{\text{eff}} = -2(K_b + K_S)/M_S + 4\pi M_S$ —

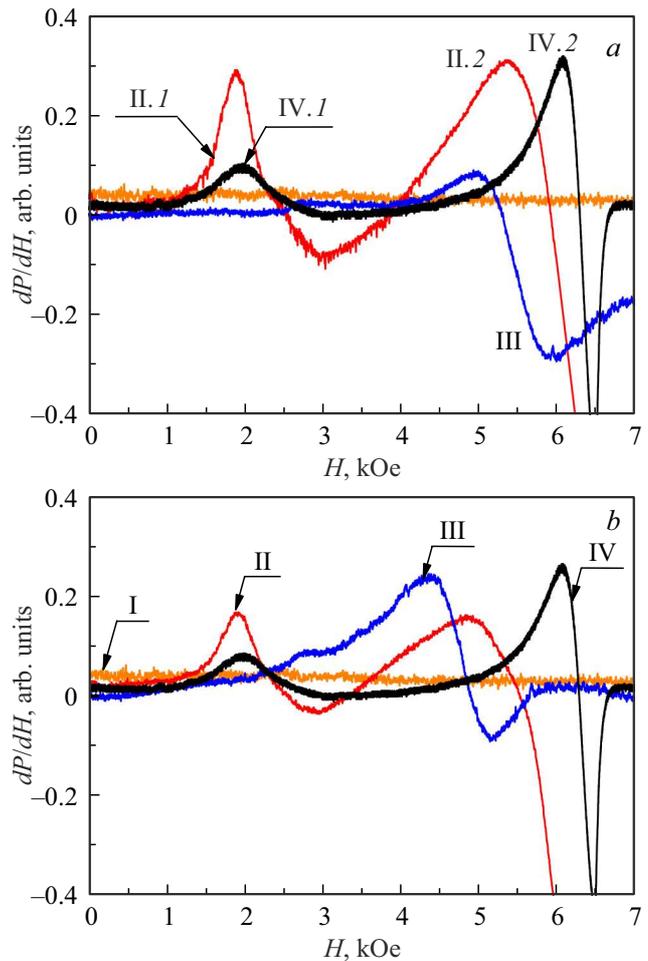


Рис. 3. Спектры ФМР: I — GaAs, II — наночастиц Fe₃O₄ на подложке GaAs, III — образца CoFeB/SiO₂/Bi₂Te₃, IV — образца CoFeB/SiO₂/Bi₂Te₃ с нанесенными на поверхность наночастицами Fe₃O₄, (a) для полярного угла $\theta = 0^\circ$; (b) для полярного угла $\theta = 10^\circ$. На рис. 4, а — I и 2 две резонансные линии спектра I; A и B две резонансные линии спектра IV. Линии I, 2, A и B обсуждаются в тексте.

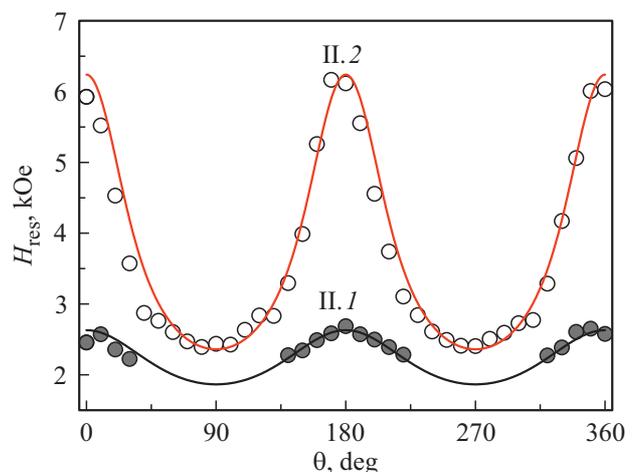


Рис. 4. Зависимости резонансного поля H_{res} для линий II.1 и II.2 от полярного угла θ для слоя наночастиц Fe₃O₄ на подложке GaAs (образец II). Сплошными линиями показаны симуляции уравнением (1).

эффективное поле, $K_b + K_S = K_{\text{eff}}$ (где K_b — константа объемной анизотропии, K_S — константа поверхностной анизотропии), θ — угол между нормалью к поверхности образца и направлением магнитного поля спектрометра, θ_M — угол между нормалью к поверхности образца и вектором намагниченности, $H_{2\parallel}$ — поле анизотропии первого порядка в плоскости пленки. Наличие магнитной анизотропии слоя наночастиц на диамагнитной подложке говорит о том, что для описания системы нужно применять соотношение для пленок, а не для отдельных частиц, хотя условность такого приближения имеет место.

В качестве намагниченности насыщения в уравнении (1) можно было бы использовать значение $M_S = 340 \text{ emu/cm}^3$, установленное нами для наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ на подложке GaAs методом СКВИД-магнитометрии в независимых опытах. Это значение было промежуточным между известной намагниченностью насыщения $M_S = 220 \text{ emu/cm}^3$ для наночастиц Fe_3O_4 [18], и намагниченностью насыщения $M_S = 440 \text{ emu/cm}^3$, известной для наночастиц железа аналогичных размеров [19]. Хотя установленное нами значение $M_S = 340 \text{ emu/cm}^3$ вполне согласуется с наличием ядра Fe и оболочки Fe_2O_4 в наночастицах $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_4$, возникает вопрос, какую из двух линий следует симулировать уравнением (1) с упомянутым значением намагниченности насыщения. Из исследований наночастиц $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_4$ известно, что их ФМР-спектры содержат две линии, наличие которых обусловлено спин-волновыми модами, возникающими вследствие взаимодействия ядра и оболочки [16]. Поэтому мы предположили, что линии II.1 и II.2 на рис. 4 соответствуют сигналам ядра железа и оксидной оболочке, соответственно. Отметим, что различие наших экспериментов с [16] заключается в том, что в наших экспериментах плотность и количество наночастиц были достаточно высоки, чтобы магнитное дипольное взаимодействие между ними приводило к анизотропии слоя наночастиц даже на диамагнитной подложке.

При симуляции угловой зависимости линии II.1 использовали $M_S = 440 \text{ emu/cm}^3$ для Fe , получив при этом константу анизотропии $K_{\text{eff}} = 1.04 \cdot 10^5 \text{ erg/cm}^3$ и $g = 3.6$. При симуляции угловой зависимости линии II.2 использовали $M_{S2} = 220 \text{ emu/cm}^3$ для Fe_2O_4 , получив константу анизотропии $K_{\text{eff}} = 3.9 \cdot 10^5 \text{ erg/cm}^3$ и $g = 1.94$. Полученные значения близки к известному из литературы значению магнитной анизотропии для наночастиц Fe_2O_4 , которые находятся в диапазоне $K_{\text{eff}} = 3.2\text{--}3.5 \cdot 10^5 \text{ erg/cm}^3$ [20]. Вероятно, в системе ядро-оболочка нельзя механистически приписать эти линии ядру и оболочке, как невзаимодействующим изолированным подсистемам. На наш взгляд, более корректно говорить о спин-волновых модах, возникающих в сложной составной частице.

Образец III имеет одну резонансную линию на спектре ФМР (см. рис. 3). Угловая зависимость резонансного

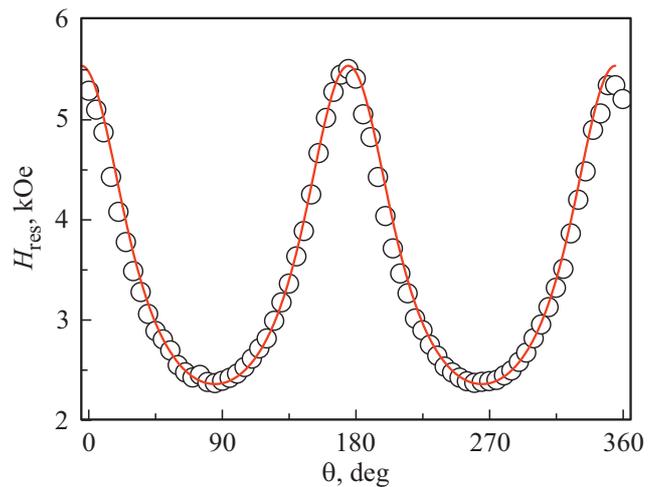


Рис. 5. Зависимость резонансного поля H_{res} от полярного угла θ для образца III. Сплошной линией показана симуляция уравнением (1).

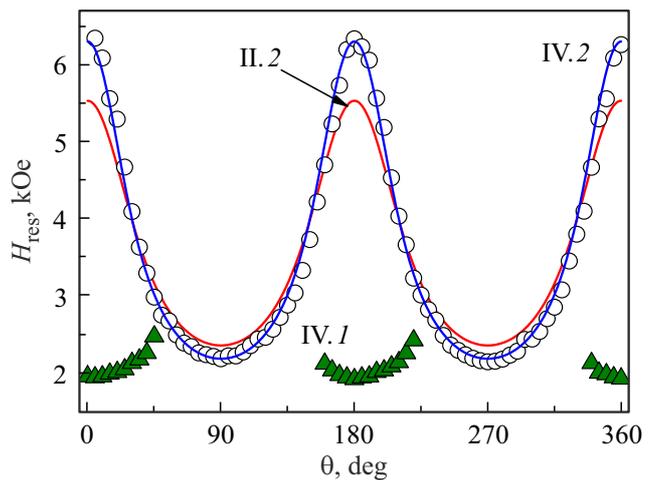


Рис. 6. Зависимости резонансных полей H_{res} от полярного угла θ для линий IV.1 и IV.2, для образца IV ($\text{CoFeB}/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$, покрытый наночастицами Fe_3O_4). Сплошной синей линией показана симуляция угловой зависимости линии IV.2 уравнением (1) и для сравнения показана симуляция линии II.2 для наночастиц на диамагнитной подложке (рис. 4).

поля этой линии $H_{\text{res}}(\theta)$ и ее симуляция уравнением (1) показаны на рис. 5. Намагниченность насыщения $M_S = 500 \text{ emu/cm}^3$ для образца $\text{CoFeB}/\text{SiO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ (образец III) была ранее получена в [21]. Из симуляции зависимости $H_{\text{res}}(\theta)$ для образца III были извлечены следующие параметры $K_{\text{eff}} = 6.2 \cdot 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $g = 1.98$, характерные для пленок CoFeB .

Главным предметом интереса является образец IV, который представляет собой многослойную платформу со слоем наночастиц. В этой системе можно было бы ожидать сложения сигналов от слоя наночастиц (линии II.1 и II.2) и сигнала от платформы (линия III). Однако

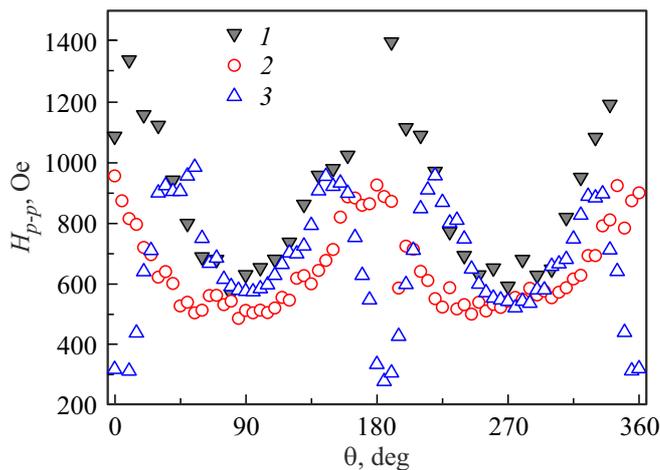


Рис. 7. Зависимости ширины линий ФМР от полярного угла θ : 1 — наночастиц на поверхности GaAs (образец II), 2 — для чистой ферромагнитной платформы (образец III), 3 — для резонансной линии VI.2 ферромагнитной платформы, покрытой наночастицами.

образец IV имеет всего две резонансные линии IV.1 и IV.2 (см. рис. 3, а). Резонансное поле линии IV.1 слабо зависит от угла θ , тогда как резонансное поле линии IV.2 зависит от угла сильно (рис. 6). В целом спектр и его угловая зависимость ФМР линий этого образца напоминают спектр и угловую зависимость резонансных полей линий ФМР образца II. Сравнение угловых зависимостей линий II.1 и IV.1 (см. рис. 6) приводит к выводу, что резонансные поля этих линий близки во всем диапазоне исследуемых углов. Можно было бы предполагать, что имеет место аддитивное сложение линий II.2 от слоя наночастиц и линии III самой платформы. Однако значительное изменение ориентационной зависимости линии IV.1 (рис. 6) по сравнению с зависимостью II.1 (рис. 4) не позволяют принять эту точку зрения. Таким образом, в образце с ферромагнитной платформой и наночастицами наблюдается неаддитивное сложение сигналов, свидетельствующее о взаимодействии слоя наночастиц и платформы.

Наиболее сильные изменения, свидетельствующие о неаддитивности сложения спектров слоя наночастиц и ферромагнитной платформы, были обнаружены при сравнении угловых зависимостей ширины линий спектров $H_{p-p}(\theta)$ (рис. 7). Видно, что, хотя ориентационные зависимости ширины линии II.1, принадлежащей наночастицам (зависимость 1 на рис. 7), и линии III, принадлежащей ферромагнитной платформе (зависимость 2 на рис. 7), сходны, в комбинированной системе частиц и платформы (зависимость 3 на рис. 7) наблюдается зависимость $H_{p-p}(\theta)$, которая не может быть объяснена сложением ориентационных зависимостей ширины линий исходных компонент системы.

В работе [7] сообщалось о влиянии наночастиц на спектры ФМР в монокристаллических сплошных плат-

формах CoFeB|Ta|CoFeB. Эффект заключался лишь в изменении амплитуды угловой зависимости резонансного поля линии ФМР платформы на 20%. Это сравнительно небольшой эффект, который трудно использовать на практике для создания сенсоров частиц на платформе. Результаты, полученные в данной работе, показывают, что при подборе рабочего поля в области резонанса таким образом, что изменение ширины линии может многократно менять микроволновое поглощение системы „платформа—частица“, можно достигнуть значительно большей чувствительности. Полученные результаты относятся к случаю высоких концентраций наночастиц и, вероятно, не могут быть применены для случая, когда редкие магнито-меченные биологические объекты располагаются на поверхности сенсора. Однако из сравнения со случаем сплошных платформ видно, что в этой работе достигается большая чувствительность и более радикальные изменения угловых зависимостей линий ФМР, чем при использовании сплошных платформ. Мы объясняем это тем, что ферромагнитные островки пленок CoFeB легче перемагничиваются полем рассеяния наночастиц. Определенный вклад в увеличение эффекта могла также внести многослойность платформ, использованных в наших опытах.

4. Выводы

1. Наночастицы Fe/Fe₂O₄ имеют две резонансные линии с $g = 3.6$ и $g = 1.94$, которые возникают вследствие возбуждения спин-волновых мод в сложной системе оболочка—ядро. Между наночастицами в слое имеет место магнитное дипольное взаимодействие, которое приводит к магнитной анизотропии слоя, даже если он нанесен на диамагнитную подложку.

2. Нанесение слоя наночастиц Fe/Fe₂O₄ на ферромагнитную подложку CoFeB/SiO₂|Bi₂Te₃ приводит к изменению ориентационной зависимости резонансного поля линий ФМР, принадлежащей частицам, что указывает на влияние ферромагнитной платформы на спектр ФМР самих частиц.

3. В образце, состоящем из ферромагнитной подложки с нанесенным на нее слоем наночастиц наблюдается такое изменение угловой зависимости ширины линии, которое не может быть объяснено наложением линий подложки и слоя наночастиц. Это говорит о влиянии наночастиц на ФМР в подложке. Результирующая константа анизотропии платформы с наночастицами на $\sim 20\%$ больше, чем константа анизотропии чистой подложки CoFeB/SiO₂|Bi₂Te₃.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках тематической карты Института проблем химической физики АААА-А19-119092390079-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Koh, L. Josephson. *Sensors* **9**, *10*, 8130 (2009).
- [2] V. Fernandes Cardoso, A. Francesko, C. Ribeiro, M. Bañobre-López, P. Martins, S. Lanceros-Mendez. *Adv. Healthcare Mater.* **7**, *5*, 1700845 (2017).
- [3] A. Van de Walle, J.E. Perez, A. Abou-Hassan, M. Hemadi, N. Luciani, C. Wilhelm. *Mater. Today Nano* **11**, 100084 (2020).
- [4] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y.M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, H. Ohno. *Appl. Phys. Lett.* **93**, *8*, 082508 (2008).
- [5] R.B. Morgunov, G.L. L'vova, A.D. Talantsev, Y. Lu, X. Devaux, S. Migot, O.V. Koplak, O.S. Dmitriev, S. Mangin. *Thin Solid Films* **640**, *8* (2017).
- [6] R.B. Morgunov, O.V. Koplak, R.S. Allayarov, E.I. Kunitsyna, S. Mangin. *Appl. Surf. Sci.* **527**, 146836 (2020).
- [7] E.I. Kunitsyna, R.S. Allayarov, O.V. Koplak, R.B. Morgunov, S. Mangin. *ACS Sens.* **6**, *12*, 4315 (2021).
- [8] О.В. Дунец, Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, А.В. Ситников. *ЖТФ* **83**, *9*, 114 (2013).
- [9] Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, В.П. Пискорский, Д.В. Королев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Е.И. Куницына, А.Д. Таланцев, В.Л. Бердинский, Р.Б. Моргунов. *ФТТ* **58**, *6*, 1086 (2016).
- [10] Э.П. Домашевская, Н.С. Буйлов, В.А. Терехов, К.А. Барков, В.Г. Ситников. *ФТТ* **59**, *1*, 161 (2017).
- [11] О.В. Герашченко, В.А. Уклеев, Е.А. Дядькина, А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин. *ФТТ* **59**, *1*, 157 (2017).
- [12] V.V. Rylkov, S.N. Nikolaev, V.A. Demin, A.V. Emelyanov, A.V. Sitnikov, K.E. Nikiruy, V.A. Levanov, M.Yu. Presnyakov, A.N. Taldenkov, A.L. Vasiliev, K.Yu. Chernoglazov, A.S. Vedenev, Yu.E. Kalinin, A.B. Granovsky, V.V. Tugushev, A.S. Bugaev. *J. Exp. Theor. Phys.* **126**, *3*, 353 (2018).
- [13] К.Э. Никируй, А.В. Емельянов, В.А. Демин, В.В. Рыльков, А.В. Ситников, П.К. Кашкаров. *Письма в ЖТФ* **44**, *10*, 20 (2018).
- [14] H. Al Azzawi, Yu. Kalinin, A. Sitnikov, O. Tarasova. *Solid State Phenomena* **233–234**, 467 (2015).
- [15] V. Ukleev, E. Dyadkina, A. Vorobiev, O.V. Gerashchenko, L. Carond, A.V. Sitnikov. *J. Non-Cryst. Solids* **432**, 499 (2016).
- [16] P.V. Finotelli, M.A. Morales, M.H. Rocha-Leão, E.M. Baggio-Saitovitch, A.M. Rossi. *Mater. Sci. Eng. C* **24**, *5*, 625 (2004).
- [17] C. Kittel. *Phys. Rev.* **73**, *2*, 155 (1948).
- [18] G.S. Shahane, K.V. Zipare, R.P. Pant. *Magnetohydrodynamics* **49**, *3–4*, 317 (2013).
- [19] A. Matsumoto, T. Sugiura, M. Kobashi, S. Yamamoto. *Mater. Transact.* **61**, *7*, 1404 (2020).
- [20] E. Lima Jr, A.L. Brandl, A.D. Arelaro, G.F. Goya. *J. Appl. Phys.* **99**, *8*, 083908 (2006).
- [21] А.И. Безверхний, А.Д. Таланцев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.А. Никитенко, О.В. Коплак, О.С. Дмитриев, Р.Б. Моргунов. *ФТТ* **61**, *2*, 266 (2019).

Редактор Е.В. Толстякова