

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА

УДК 537.635

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ОБМЕННЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН
В ПЛАНАРНЫХ КОМПОЗИТАХ FeNi/Dy/FeNi
В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 4–300 К

© 2025 г. Р. С. Исхаков^а, И. Г. Важенина^{а, *}, С. В. Столяр^б, В. Ю. Яковчук^а

^аИнститут физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Обособленное
подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок, 50, стр. 38, Красноярск, 660036 Россия

^бФедеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО
РАН, Академгородок, 50, Красноярск, 660036 Россия

*e-mail: irina-vazhenina@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2024 г.

После доработки 06.12.2024 г.

Принята к публикации 26.12.2024 г.

Изучен спин-волновой резонанс в магнитном планарном композите FeNi/Dy/FeNi на обменных спиновых волнах с волновым вектором вдоль нормали к поверхности в температурной области 4–290 К. Установлено, что в области 90–290 К наблюдается резонансное поглощение энергии высокочастотного поля на индивидуальных слоях FeNi; связь ферромагнитных слоев проявляется в появлении оптических сателлитов у акустических спин-волновых мод, полевые координаты оптических сателлитов указывают на положительную межслойную связь. В области 4–85 К наблюдается единый спин-волновой спектр планарного нанокompозита, что позволило для него измерить величины спин-волновой жесткости. Особенности спин-волнового спектра обусловлены модификациями магнитной структуры Dy и изменением с температурой доминирующего взаимодействия РЗМ/ПМ на интерфейсах.

Ключевые слова: трехслойные пленки, ферромагнитный и спин-волновой резонанс, взаимодействие Дзялошинского–Мории

DOI: 10.31857/S0015323025020042, EDN: AYZFHT

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия широко исследуют разнообразие гетероструктур. Интерес к этим синтетическим композитам обусловлен рядом физических эффектов, впервые здесь обнаруженных, важных как для фундаментальной науки [1, 2], так и для практических приложений в технических областях [3, 4]. Современными технологиями в планарных композитах легко варьировать материалы, используемые для синтеза индивидуальных слоев, число отдельных слоев и их толщину [5–8]. Однако в связи с наноразмерным масштабом отдельных слоев системы (1–10 нм) возникает новая проблема — изменение структуры, свойств и состояний материала при переходе от массивных (микронных) образцов к ультратонким пленкам. Ярким примером подобных модификаций может являться монокристалл Dy, который, как хорошо известно, имеет три магнитных состояния в зависимости от температуры. Он является парамагнитным при

нулевом магнитном поле выше температуры Нелля ($T_N \approx 180$ К), между ~ 90 К и ~ 180 К в нем наблюдается геликоидальная антиферромагнитная структура и ниже температуры Кюри ($T_C \approx 90$ К) магнитный порядок является ферромагнитным [9]. Приведенные выше значения T_N и T_C становятся иными для наноструктурированных пленок Dy в зависимости от их толщины [10]. Отметим, что точное количественное определение многих параметров ультратонких пленок зачастую затруднено ограничениями чувствительности для большей части существующих методик. Возможным решением для установления модификаций параметров материала является исследование отклика планарной системы, составленной из тестируемого материала и реперных слоев, параметры которых уже известны [11, 12].

Наиболее простыми методами определения фундаментальных констант ферромагнитных тонких пленок (эффективная намагниченность, константа анизотропии, константа обменного

взаимодействия) являются ферромагнитный (ФМР) и спин-волновой (СВР) резонансы. Дополнительное преимущество метода СВР – это возможность определения магнитных характеристик интерфейсов мультислойных пленочных структур [13–17].

Базовой композицией для определения параметров тестируемого материала представляются трехслойные планарные системы ферромагнетик/слабомагнитный материал/ферромагнетик. Фундаментальной магнитной характеристикой данных систем является межслойное магнитное обменное взаимодействие J_{12} ферромагнитных слоев, величина и знак которого определяют качественную и количественную оценку магнитных характеристик всей планарной структуры.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию динамическими методами трехслойной системы FeNi/Dy/FeNi, проведенному с целью определения магнитных характеристик наноразмерного слоя Dy в зависимости от температуры.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ СВЧ-ЭКСПЕРИМЕНТА

Трехслойные пленки Fe₂₀Ni₈₀/Dy/Fe₂₀Ni₈₀ были получены методом термического испарения в вакууме (10⁻⁶ мм рт. ст.) последовательным напылением слоев Fe₂₀Ni₈₀ и Dy из независимых испарителей с кольцевым катодом на стеклянные подложки. Синтезированные образцы исследовали методом электронной микроскопии (сканирующий микроскоп S5500). Толщина каждого ферромагнитного слоя составляла 70 нм, толщина слоя Dy t_{Dy} составляла 10 нм (SEM-изображение торца пленки представлено на рис. 1). С целью выявления новых эффектов была также синтезирована по этой же технологии однослойная пленка сплава Fe₂₀Ni₈₀ на стеклянную подложку такой же толщины 70 нм, как и индивидуальные слои в планарном композите.

Сильное антиферромагнитное взаимодействие на границе раздела Dy с переходным

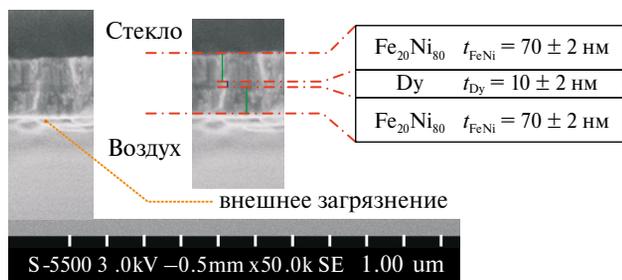


Рис. 1. SEM-изображение трехслойной пленки с $t_{Dy} \approx 10$ нм.

металлом [18], которое проявляет Dy как редкоземельный металл (РЗМ), а также потенциальная возможность реализации взаимодействия Дзялошинского–Мория на интерфейсах стали основаниями для выбора Dy в качестве промежуточного слоя в планарном нанокompозите.

СВЧ-спектры пленок были измерены на оборудовании КРЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН (спектрометр ELEXSYS E580, Bruker, Германия) в диапазоне от 4 до 300 К в X диапазоне (частота накачки резонатора $f=9.48$ ГГц) и при поперечной накачке СВЧ-поля. Образец помещали в пучность переменного магнитного поля h_{\perp} объемного резонатора. Измерения были выполнены при изменении направления постоянного магнитного поля по углу Θ_H (рис. 2). Кривые СВЧ-поглощения были разложены на составляющие с помощью дифференцированной функции Лоренца, выбор которой учитывал отсутствие вклада электрической компоненты (обусловлено конструкцией резонатора и размерами образца).

Обменная связь между ферромагнитными слоями, разделенными слабомагнитной прослойкой и имеющими небольшое отличие в магнитных параметрах, создает условия для возбуждения в СВЧ-спектре как акустической, так и оптической моды (колебания M_i в фазе либо в антифазе) в виде неоднородного ФМР или неоднородного СВР. Заметим, что интенсивность оптической моды достаточна для ее уверенной регистрации вне зависимости от ориентации постоянного и высокочастотного поля [5]. Взаимное положение пиков в СВЧ-спектре позволяет идентифицировать знак и измерить величину обменной связи, образующейся между ферромагнитными слоями [19–24]. В случае

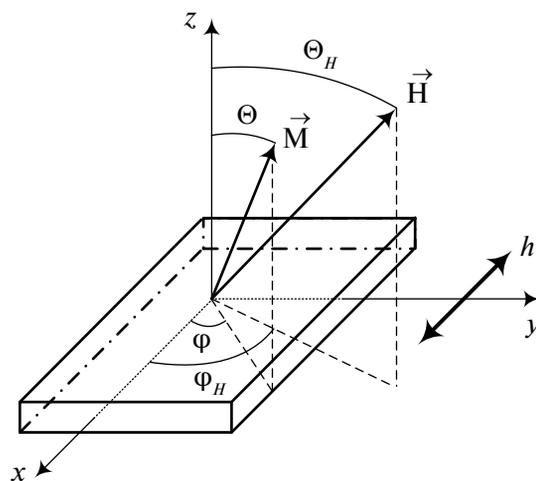


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая геометрию эксперимента.

ферромагнитного взаимодействия **величина** $J_{12} > 0$, и оптическая мода наблюдается в более низких полях по отношению к акустической моде. Антиферромагнитное взаимодействие при $J_{12} < 0$ сопровождается расположением оптической моды при более высоких полях, чем акустическая мода. Таким образом, измерения ФМР позволяют установить не только знак межслойного обменного взаимодействия, но и измерить его величину как разницу полевых координат акустической и оптической мод [5].

Перечень работ, в которых демонстрируется сложносоставной СВЧ-спектр обменно-связанных трехслойных пленок в перпендикулярной геометрии эксперимента [25–33], достаточно мал. Еще меньше количество работ [28–30], в которых экспериментальные кривые идентифицируются как спектры, в которых возбуждаются акустические стоячие спиновые обменные моды в индивидуальном ферромагнитном слое в сопровождении оптических сателлитов. Резонансные поля в этом случае должны описываться модифицированным выражением:

$$H_r^\pm = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M_{eff} - H_E \pm H_E - \frac{2A}{M_S} k^2, \quad (1)$$

где H_r^+ – резонансное поле акустической n -й моды с волновым вектором $k = \pi n/L$, L – толщина индивидуального слоя, H_r^- – резонансное поле оптического сателлита n -й моды, A – константа обменного взаимодействия ферромагнетика, M_{eff} – эффективная намагниченность, M_S – намагниченность насыщения, H_E – однородное обменное поле, определяемое как разница между полями акустическим и оптического пика при $\Theta_H = 90^\circ$. Величина A определяется из спектра СВР по положениям резонансных полей H_i и H_j акустических мод из выражения [34]:

$$A = \frac{M_S}{2} \left(\frac{L^2}{\pi^2} \right) \frac{H_i - H_j}{n_j^2 - n_i^2}. \quad (2)$$

В случае невозможности точного определения толщины слоя пленки, в пределах которой образуются стоячие спиновые волны (L), целесообразно использовать величину эффективной обменной жесткости в полевых координатах:

$$\tilde{\eta}_{eff} = \frac{H_n - H_{n+1}}{(n+1)^2 - n^2}, \quad (3)$$

а при неопределенности величины M_S – спин-волновую жесткость в единицах $[\text{Э}\cdot\text{см}^2]$ η_{eff} полученную путем домножения величины $\tilde{\eta}_{eff}$ на (L^2/π^2) .

Экспериментальные СВЧ-спектры однослойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, в зависимости от угла приложенного внешнего магнитного поля,

характеризуются двумя типа возбуждения – однородным и неоднородным ФМР. Однородная мода в виде единственного пика в спектре как результат измерений методом ФМР регистрируется в диапазоне углов $10^\circ < \Theta_H < 110^\circ$ и $-30^\circ < \Theta_H < -10^\circ$. Стоячие объемные спиновые моды (неоднородные моды ФМР) возбуждаются в диапазоне углов $-9^\circ \leq \Theta_H \leq 9^\circ$. Значения M_{eff} и поля перпендикулярной анизотропии H_\perp однослойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ были определены из расчетной кривой, сопоставленной угловой зависимости экспериментальных положений резонансного поля однородной моды (рис. 3а) и составили $M_{eff} \approx 812$ Гс, $H_\perp \approx 100$ Э. Процедура получения расчетных значений резонансного поля в зависимости от Θ_H представлена в [35]. Константа

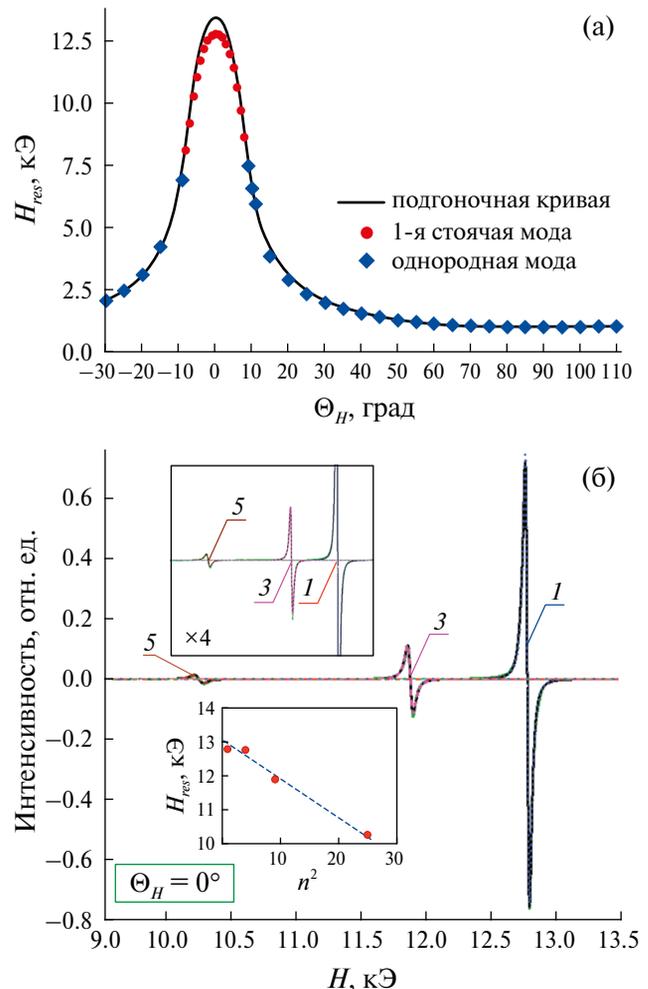


Рис. 3. Угловая зависимость положений резонансных полей для однослойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (а), экспериментальный спектр СВР при $\Theta_H = 0^\circ$ и $T = 290$ К (б), на вставке представлены экспериментальные значения резонансных полей от квадрата номера моды, описываемые линейной зависимостью. Арабскими цифрами на спектре обозначены номера стоячих обменных мод.

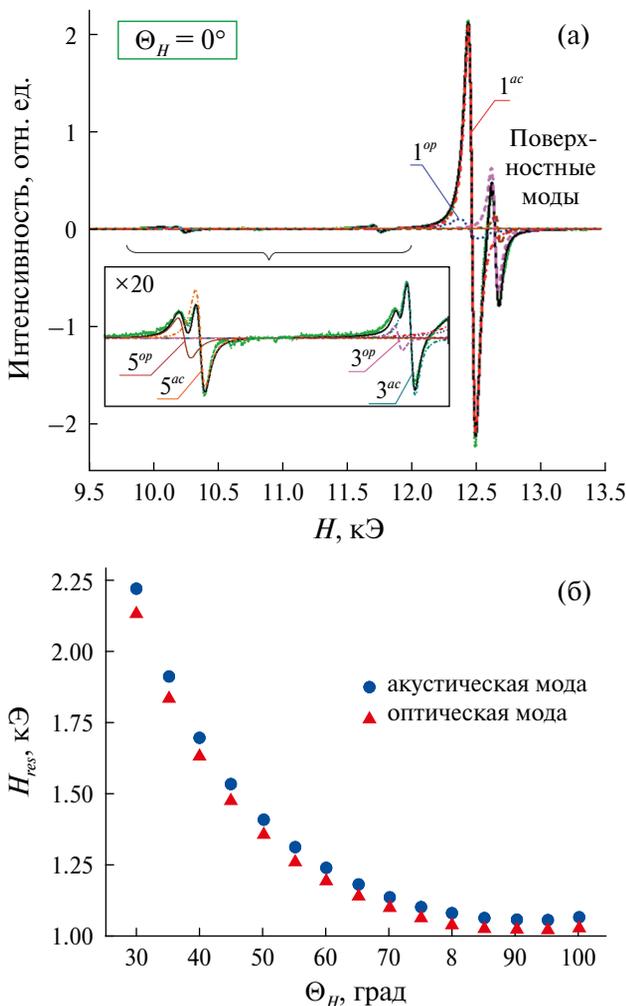


Рис. 4. Экспериментальный спектр СВР трехслойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ при $\Theta_H = 0^\circ$ и $T = 290$ К (а) и угловая зависимость резонансных полей акустического и оптического пиков (б) в спектре ФМР планарного композита.

обменного взаимодействия $A=0.23 \cdot 10^{-6}$ эрг/см для пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ была определена по (2) из анализа СВР-спектра при $\Theta_H = 0^\circ$, который представлен на рис. 3б.

Экспериментальные СВЧ-спектры трехслойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, измеренные в диапазоне углов $10^\circ < \Theta_H < 100^\circ$ при комнатной температуре, демонстрируют возбуждение двух нормальных мод – акустической и оптической (спектр ФМР). Положение мод друг относительно друга свидетельствует о ферромагнитном типе взаимодействия ($J_{12} > 0$) индивидуальных слоев $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. Таким образом, однородный тип колебаний возбуждается в диапазоне углов $10^\circ < \Theta_H < 100^\circ$. Отметим, что неизменное соотношение величин резонансных полей пиков, идентифицированных как акустический и оптический, во всем измеряемом диапазоне углов свидетельствует о правильности их идентификации (рис. 4б).

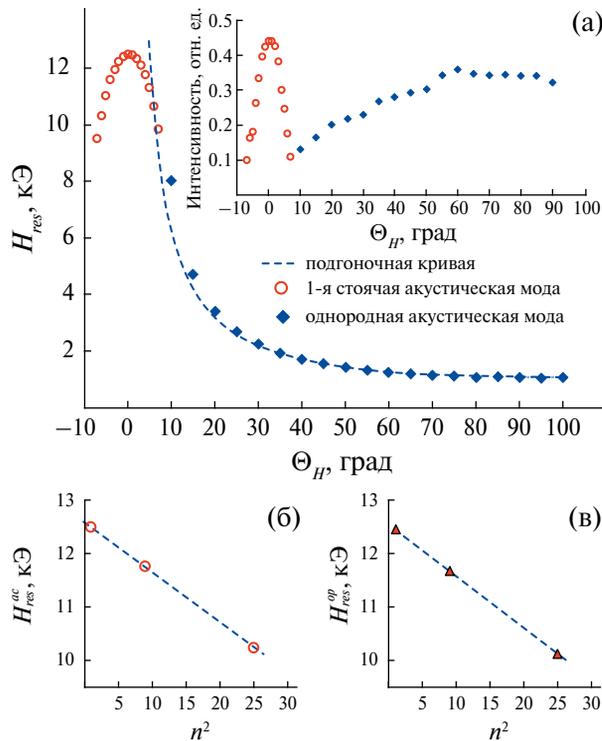


Рис. 5. Угловая зависимость резонансного поля акустической моды и угловая зависимость ее интенсивности на вставке для пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (а), зависимость величин резонансных полей акустических (б) и оптических (в) пиков в спектре от квадрата номера моды при $\Theta_H = 0^\circ$.

Магнитное поле, приложенное при $-10^\circ < \Theta_H < 10^\circ$, способствовало возбуждению спектра СВР, составленного из акустических стоячих спиновых обменных мод в сопровождении оптических сателлитов. Экспериментальный спектр СВР трехслойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ при $\Theta_H = 0^\circ$ представлен на рис. 4а.

Угловая зависимость резонансного поля ФМР (однородная мода) акустических пиков, представленная на рис. 5а, была сопоставлена с расчетной кривой, что позволило оценить значения эффективной намагниченности $M_{\text{eff}} = 720$ Гс и поля перпендикулярной анизотропии ($H_{\perp} = 0$ Э) для планарного композита.

Изменение типа колебания – с однородного (ФМР) на неоднородное (СВР) – фиксировали по двум признакам: изменению структуры спектра и угловой зависимости интенсивности акустической и оптической моды [35]. Наличие двух пиков поверхностных мод в полях выше первой стоячей моды (рис. 4а) свидетельствует о формировании асимметричных граничных условий с типом закрепления “легкая плоскость” на внешней поверхности, граничащей с воздухом, и на интерфейсе с подложкой [36]. Формирование подобного типа закрепления также

подтверждается линейной зависимостью резонансных полей СВР-пиков от квадрата номера моды как для акустических, так и для оптических пиков (рис. 5б и 5в) [30]. Величина A , оцененная по (2), составила $0.23 \cdot 10^{-6}$ эрг/см, константа поверхностной анизотропии $K_S = 0.12$ эрг/см² была определена из положений резонансных полей первого акустического и поверхностного пиков [36].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВР-СПЕКТРОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оба образца, как трехслойная планарная система $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, так и однослойная реперная пленка $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$, измерены в диапазоне температур (4–290) К при $\Theta_H = 0^\circ$. Структура спектра СВР однослойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ сохраняется неизменной во всем температурном диапазоне (три пика СВР – 1, 3, 5). Каждый пик имеет схожую температурную зависимость. Структура интегральных спектров СВР системы $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ представляется двумя принципиально различающимися спектрами в низкотемпературной области I (4–85) К и в области II (90–290) К.

В области II спектр СВР планарного композита, аналогичен спектру СВР реперной пленки (три пика СВР: 1, 3, 5). Однако здесь основной пик СВР сопровождается малоинтенсивным сателлитом, так что спектр может быть описан набором: $1_{ac}^{st} + 1_{op}^{st}$; $3_{ac}^{st} + 3_{op}^{st}$; $5_{ac}^{st} + 5_{op}^{st}$. Полевая

координата оптического сателлита относительно основного смещена влево, что указывает на положительный знак межслойного обменного взаимодействия индивидуальных слоев. Величина обменного поля, тождественная этому взаимодействию, экспериментально определяется как разница полевых координат акустического и оптического пиков. Таким образом, возбуждение акустических стоячих спиновых обменных мод в сопровождении оптических сателлитов для планарного композита наблюдается от комнатной температуры вплоть до 90 К, что особенно ярко фиксируется по 5-й стоячей моде (рис. 6).

В области I происходит существенная трансформация спектра СВР: оптические сателлиты в спектре исчезают, а количество возбуждаемых регистрируемых мод увеличивается вдвое (рис. 7). Экспериментальные кривые СВЧ были экстраполированы набором функций Лоренца (пример спектров при 40 и 80 К приведен на рис. 7).

Идентификация спектров проведена исходя из предположения, что стоячая волна распространяется вдоль толщины всей планарной системы, захватывая как каждый ферромагнитный слой, так и прослойку Dy. Подтверждением этого служат линейная зависимость полевых координат резонансных полей от квадрата номера моды, а также уменьшение интенсивности отдельных пиков с увеличением номера моды как $1/n^2$ [34] (рис. 7).

Температурная зависимость межслойного обменного взаимодействия по мере понижения температуры в области II наглядно иллюстрируется температурными зависимостями разницы полевых координат резонансных полей акустического и оптического пиков и их интенсивностью (рис. 8).

Анализ каждого спектра СВР как для однослойной пленки, так и для трехслойной, измеренного при температуре от 4 до 290 К, позволил по формуле (3) вычислить эффективную обменную жесткость $\hat{\eta}_{eff}$ и спин-волновую жесткость η_{eff} . Температурные зависимости величины $\eta_{eff}(T)$ приведены на рис. 9. Как видно из рисунка, кривая $\eta_{eff}(T)$ для реперной пленки с высокой степенью точности является линейной во всей области температур (4–290 К). Кривая $\eta_{eff}(T)$ трехслойной планарной структуры является составной: в области II она аналогична реперной с некоторыми особенностями, тогда как в области I при $T < 90$ К она демонстрирует другую функциональную зависимость, характеризуемую резким уменьшением обменной жесткости.

Измерения спектров ФМР в планарной геометрии ($\Theta_H = 90^\circ$), выполненные нами ранее для данного трехслойного образца [37],

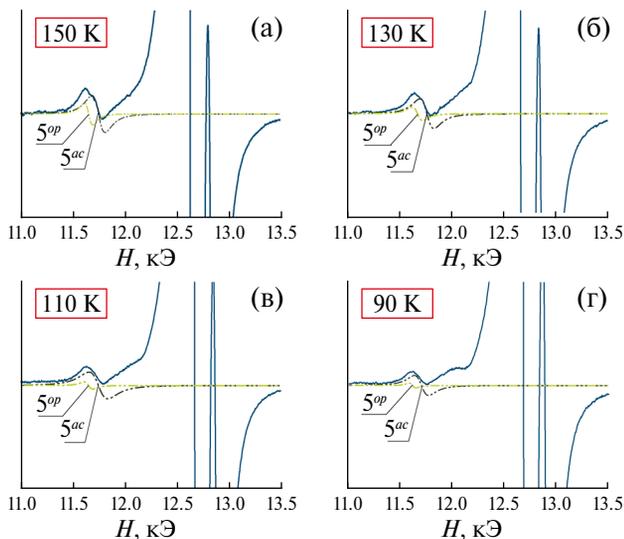


Рис. 6. Примеры отдельных СВЧ-спектров трехслойной системы $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ при различных температурах при наличии межслойного обменного взаимодействия в температурной области II.

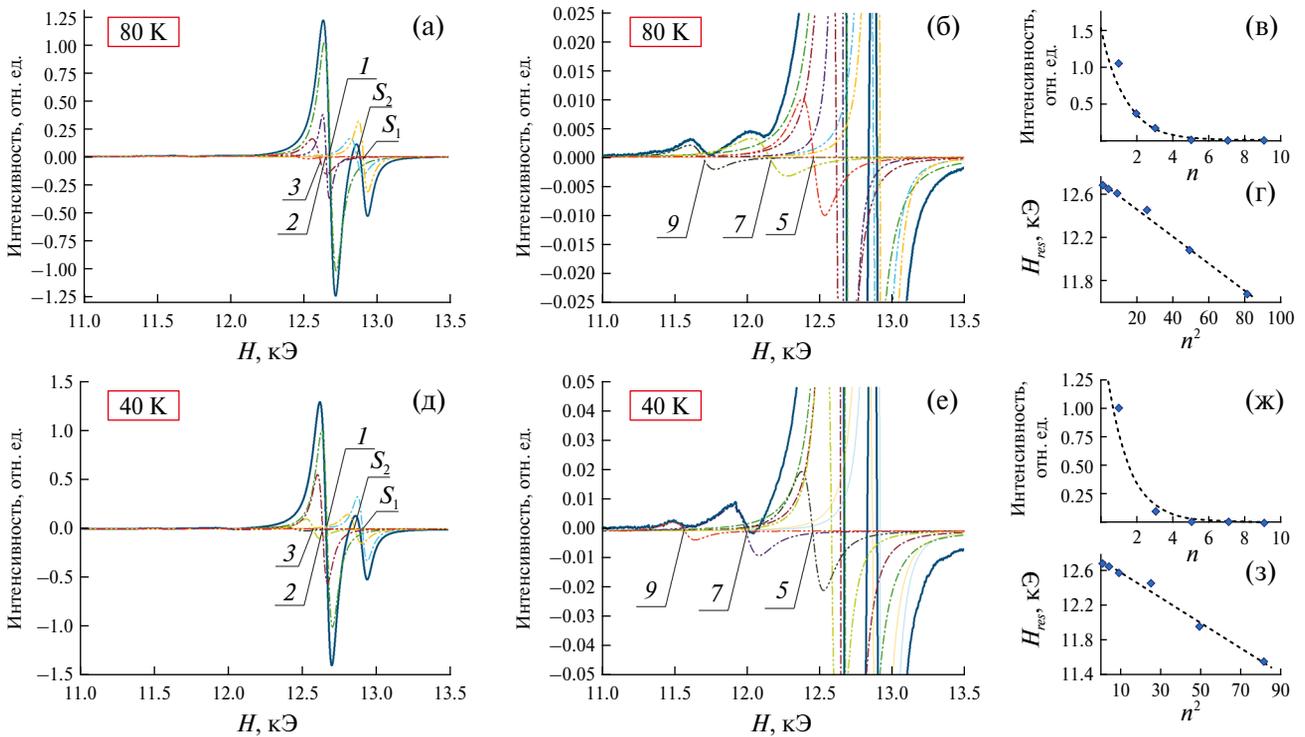


Рис. 7. Примеры СВЧ-спектров трехслойной системы $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ при 40 и 80 К при формировании стоячих волн вдоль всей толщины планарной системы. Кривые на фрагментах (а, б) и (д, е) отличаются коэффициентами усиления. Демонстрируется зависимость интенсивностей мод спектра от номера моды (в, ж), а также линейная зависимость положения резонансных полей от квадрата номера моды (г, з).

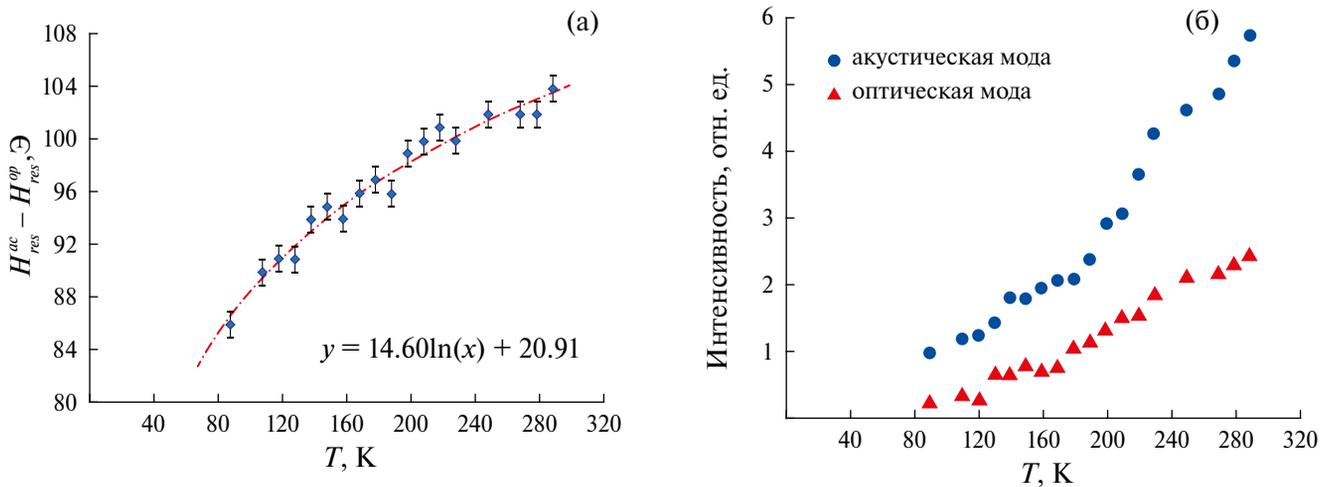


Рис. 8. Температурные зависимости разницы резонансных полей между акустическим и оптическим пиками (а) и их интенсивностью (б).

демонстрировали особенности температурной зависимости константы межслойного обменного взаимодействия $J_{12}(T)$ в схожей области температур. На зависимости $J_{12}(T)$ фиксировали смену знака J_{12} при 60 К ($J_{12} < 0$ при $T < 60$ К; $J_{12} > 0$ при $T > 60$ К) и точку экстремума при 120 К. Мы предложили две причины, вызывающие особенности

$J_{12}(T)$. Во-первых, трансформацию магнитной структуры Dy – изменение ферромагнитного состояния на геликоидальное антиферромагнитное при $T = 60$ К и с геликоидального антиферромагнитного на парамагнитное при $T = 120$ К.

Во-вторых, преобладание взаимодействия Дзялошинского–Мори на интерфейсах FeNi/Dy

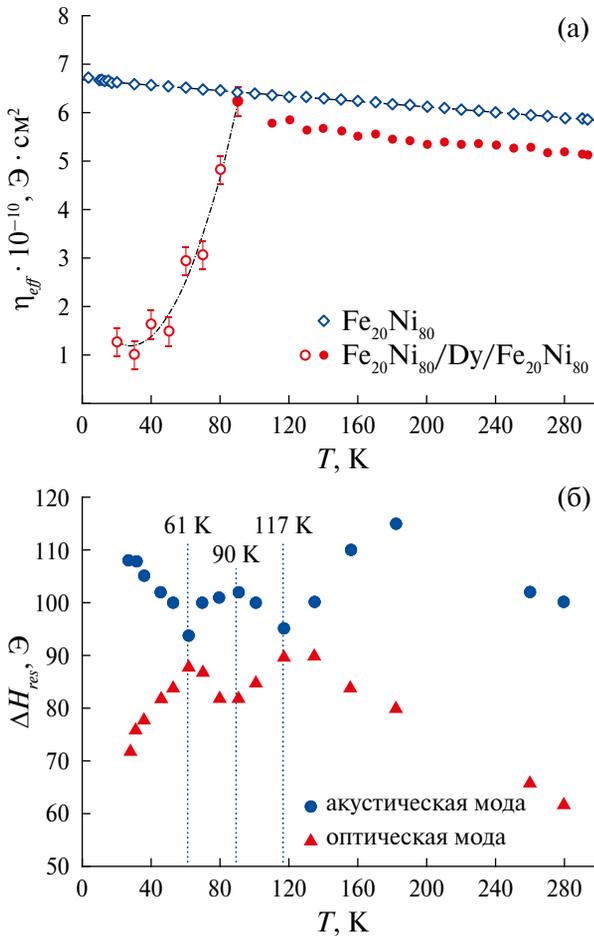


Рис. 9. Температурная зависимость обменной жесткости для однослойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ и трехслойной пленки $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (а). Температурная зависимость ширины линии ФМР для акустического и оптического пика при $\Theta_H = 90^\circ$ (б).

и Dy/FeNi над антиферромагнитным взаимодействием, возникающим на интерфейсах “переходный металл/редкая земля”, при $T < 60 \text{ K}$. Последнее приводило к антиферромагнитному типу межслойного обменного взаимодействия ($J_{12}(T) < 0$) при ферромагнитном порядке Dy в диапазоне температур от 4 К до 60 К. Происходящие изменения в магнитной систем трехслойной пленки в интервале температур от 60 до 120 К можно также фиксировать и по температурной зависимости ширины линии акустического и оптического пика ФМР при $\Theta_H = 90^\circ$ (рис. 9б).

Предполагаем, что интерфейсное взаимодействие Дзялошинского–Мория определило также формирование единых стоячих спиновых волн при $\Theta_H = 0^\circ$ в диапазоне температур от 4 до 80 К. Совместное изменение доминирующего типа взаимодействия на внутренних интерфейсах сэндвича и магнитной структуры Dy (ферромагнитный порядок) в области температур от 4 до 80 К

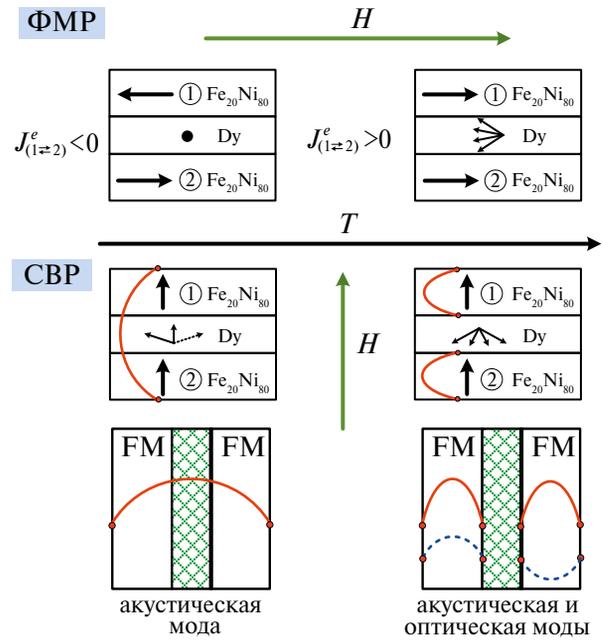


Рис. 10. Схема ориентаций намагниченности в трехслойной структуре при двух геометриях эксперимента (ФМР и СВР) и различном магнитном порядке Dy (ферромагнитном и геликоидальном антиферромагнитном) при разных температурах.

приводит к образованию единой стоячей обменной спиновой волны вдоль всей толщины планарной структуры (см. рис. 7) как альтернатива отдельным связанным спин-волновым возбуждений в индивидуальных ферромагнитных слоях (см. рис. 6). Схема ориентаций намагниченности в трехслойной структуре при двух геометриях эксперимента (ФМР и СВР) и различном магнитном порядке Dy (ферромагнитном и геликоидальном антиферромагнитном) представлена на рис. 10. Отметим, что в области температур ниже 80 К образованию единого спектра СВР способствует наличие небольшого отклонения от ортогональности между магнитными моментами на внутренних интерфейсах слоя Dy и FeNi и, как следствие, формирование малого результирующего магнитного момента в Dy, параллельного магнитным моментам ферромагнитных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен совместный анализ спектров ферромагнитного (ФМР) и спин-волнового (СВР) резонанса планарного нанокompозита FeNi/Dy/FeNi, измеренных в диапазоне температур от 4 до 290 К. Выявлены особенности в схожих интервалах от 4 до 90 К на температурных зависимостях константы межслойного обменного взаимодействия $J_{12}(T)$ и обменной жесткости $\eta_{eff}(T)$.

Доминирующий вклад на интерфейсах FeNi/Dy и Dy/FeNi взаимодействия Дзялошинского–Мория в интервале этих температур способствует формированию ортогонально ориентированных парциальных намагниченностей M_{FeNi} и M_{Dy} обменно-связанных систем, что проявляется как при ФМР, так и при СВР, реализуемых при ортогональной и коллинеарной ориентации внешнего магнитного поля относительно нормали образца ($\vec{H} \perp \vec{n}$, $\vec{H} \parallel \vec{n}$) соответственно. В первом случае, несмотря на ферромагнитный порядок Dy, формируется антиферромагнитный тип ($J_{12} < 0$) межслойного обменного взаимодействия магнитных моментов M_{FeNi} индивидуальных слоев FeNi. Во втором случае образуются моды стоячих обменных спиновых волн вдоль всей толщины планарной трехслойной структуры $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Dy}/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ за счет наличия небольшого результирующего магнитного момента в слое Dy, ориентированного по магнитному полю. Отметим, что магнитный момент Dy за счет взаимодействия Дзялошинского–Мория стремится ориентироваться ортогонально магнитному моменту в слоях пермаллоя. Сдвиг характерных температур в разных геометриях внешнего поля относительно плоскости планарного композита обусловлен разницей внутренних полей в образце в условиях ФМР и СВР [9].

Авторы выражают благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для проведения измерений.

Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания ИФ СО РАН.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuanr B.K., Kuanr A.V., Grünberg P., Nimtz G. Swept-frequency FMR on Fe/Cr/Fe trilayer ultrathin films; microwave giant magnetoresistance // Phys. Lett. A. 1996. V. 221. P. 245–252.
2. Corrêa M.A., Bohn F., da Silva R.B., Sommer R.L. Magnetoimpedance effect at the high frequency range for the thin film geometry: Numerical calculation and experiment // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. P. 243904.
3. Kurlyandskaya G.V., Fernández E., Svalov A., Burgoa Beitia A., García-Arribas A., Larrañaga A. Flexible thin film magnetoimpedance sensors // J. Magn. Mater. 2016. V. 415. P. 91–96.
4. Gardner D.S., Schrom G., Paillet F., Jamieson B., Karnik T., Borkar S. Review of On-Chip Inductor Structures With Magnetic Films // IEEE Trans. Magn. 2009. V. 45. P. 4760–4766.
5. Zhang Z., Zhou L., Wigen P.E., Ounadjela K. Angular dependence of ferromagnetic resonance in exchange-coupled Co/Ru/Co trilayer structures // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 6094–6112.
6. Poimanov V.D., Kuchko A.N., Kruglyak V.V. Scattering of exchange spin waves from a helimagnetic layer sandwiched between two semi-infinite ferromagnetic media // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. P. 104414.
7. Zhang Y., Wu G., Ji Z., Chen X., Jin Q.Y., Zhang Z. Significant and Nonmonotonic Dynamic Magnetic Damping in Asymmetric Co-Fe/Ru/Co-Fe trilayers // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. P. 034033.
8. Naumova L.I., Milyaev M.A., Zavornitsyn R.S., Krinitsina T.P., Proglyado V.V., Ustinov V.V. Spin valve with a composite dysprosium-based pinned layer as a tool for determining Dy nanolayer helimagnetism // Curr. Appl. Phys. 2019. V. 19. P. 1252–1258.
9. Herz R., Kronmüller H. Field-induced magnetic phase transitions in dysprosium // J. Magn. Mater. 1978. V. 9. P. 273–275. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(78\)90069-0](https://doi.org/10.1016/0304-8853(78)90069-0)
10. Dumesnil K., Dufour C., Mangin P., Marchal G., Hennion M. Magnetic structure of dysprosium in epitaxial Dy films and in Dy/Er superlattices // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 6407–6420.
11. Исхаков Р.С., Мороз Ж.М., Чеканова Л.А., Шалыгина Е.Е., Шенета Н.А. Ферромагнитный и спин-волновой резонанс в мультислойных пленках Co/Pd/CoNi // ФТТ. 2003. Т. 45. С. 846–851.
12. Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В., Чеканова Л.А., Яковчук В.Ю. Спин-волновой резонанс в трехслойных пленках $\text{NiFe}/\text{Dy}_x\text{Co}_{1-x}/\text{NiFe}$ как метод регистрации неоднородностей структуры аморфных слоев $\text{Dy}_x\text{Co}_{1-x}$ // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76 (11). С. 779–783.
13. Корчагин Ю.А., Хлебоброс Р.Г., Чистяков Н.С. Спектр спин-волнового резонанса в тонком ферромагнитном слое со смешанными граничными условиями // ФТТ. 1972. Т. 14 (7). С. 2121–2123.
14. Корчагин Ю.А., Хлебоброс Р.Г., Чистяков Н.С. Спин-волновой резонанс в магнитных пленках с дополнительными поверхностными слоями // ФММ. 1972. Т. 34(6). С. 1303–1305.
15. Puzkarski H., Tomczak P. Spin-wave resonance as a tool for probing surface anisotropies in ferromagnetic thin films: Application to the study of (Ga,Mn)As // Surf. Sci. Rep. 2017. V. 72. P. 351–367.
16. Puzkarski H., Tomczak P., Diep H.T. Surface anisotropy energy in terms of magnetocrystalline anisotropy fields in ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As thin films // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. P. 195303.
17. Poimanov V.D., Kuchko A.N., Kruglyak V.V. Magnetic interfaces as sources of coherent spin waves // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. P. 104418.
18. Camley R.E., Stamps R.L. Magnetic multilayers: spin configurations, excitations and giant magnetoresistance // J. Phys. Condens. Matter. 1993. V. 5. P. 3727–3786.
19. Layadi A., Artman J.O. Ferromagnetic resonance in a coupled two-layer system // J. Magn. Mater. 1990. V. 92. P. 143–154.
20. Bloemen P.J.H., van Kesteren H.W., Swagten H.J.M., de Jonge W.J.M. Oscillatory interlayer exchange cou-

- pling in Co/Ru multilayers and bilayers // *Phys. Rev. B*. 1994. V. 50. P. 13505–13514.
21. Ando Y., Koizumi H., Miyazaki T. Exchange coupling energy determined by ferromagnetic resonance in 80Ni-Fe/Cu multilayer films // *J. Magn. Magn. Mater.* 1997. V. 166. P. 75–81.
 22. Heinrich B., Cochran J.F., Kowalewski M., Kirschner J., Celinski Z., Arrott A.S., Myrtle K. Magnetic anisotropies and exchange coupling in ultrathin fcc Co(001) structures // *Phys. Rev. B*. 1991. V. 44. P. 9348–9361.
 23. Fullerton E.E., Stoeffler D., Ounadjela K., Heinrich B., Celinski Z., Bland J.A.C. Structure and magnetism of epitaxially strained Pd(001) films on Fe(001): Experiment and theory // *Phys. Rev. B*. 1995. V. 51. P. 6364–6378.
 24. Celinski Z., Heinrich B. Exchange coupling in Fe/Cu, Pd, Ag, Au/Fe trilayers // *J. Magn. Magn. Mater.* 1991. V. 99. P. L25–L30.
 25. Мещеряков В.Ф. Резонансные моды слоистых ферромагнетиков в поперечном магнитном поле // *Письма в ЖЭТФ*. 2002. Т. 76(12). С. 836–839.
 26. Romano J., da Silva E., Schelp L., Schmidt J., Meckenstock R., Pelzl J. Effects of Ar-ion implantation and thermal treatment on magnetic properties of Co/Pd multilayers: a ferromagnetic resonance study // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 205. P. 161–169.
 27. Ajan A., Prasad S., Krishnan R., Venkataramani N., Tessier M. Ferromagnetic resonance spectra in Co/Nb multilayers with large Co thickness // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. P. 1444–1452.
 28. Исхаков Р.С., Столяр С.В., Чеканова Л.А., Яковчук В.Ю., Чижик М.В. Ферромагнитный и спин-волновой резонансы в трехслойных обменно-связанных структурах NiFe/Cu/NiFe // *Изв. РАН. Сер. Физическая*. 2011. Т. 75 (2). С. 197–199.
 29. Исхаков Р.С., Столяр С.В., Чижик М.В., Чеканова Л.А., Яковчук В.Ю. Спин-волновой резонанс в структурах NiFe/Dy_xCo_{1-x}/NiFe с положительной величиной обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями // *J. SFU. Mathem. & Phys.* 2012. Т. 5 (3). С. 370–381.
 30. Важенина И.Г., Столяр С.В., Яковчук В.Ю., Исхаков Р.С. Спин-волновой резонанс в обменно-связанных трехслойных FeNi/Cu/FeNi планарных структурах // *ФТТ*. 2021. Т. 63 (12). С. 2106–2115.
 31. Yalçın O., Ünlüer Ş., Kazan S., Özdemir M., Öner Y. Temperature evolution of magnetic properties for (Cu/Co)₆₀/Fe multilayer // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. V. 373. P. 144–150.
 32. Alayo W., Landi Jr.S., Pelegrini F., Baggio-Saitovich E. Ferromagnetic resonance study of structure and relaxation of magnetization in NiFe/Ru superlattices // *J. Magn. Magn. Mater.* 2014. V. 350. С. 100–106.
 33. Belmeguenai M., Martin T., Woltersdorf G., Maier M., Bayreuther G. Frequency- and time-domain investigation of the dynamic properties of interlayer-exchange-coupled Ni₈₁Fe₁₉/Ru/ Ni₈₁Fe₁₉ // *Phys. Rev. B*. 2007. V. 76. P.104414.
 34. Kittel C. Excitation of Spin Waves in a Ferromagnet by a Uniform rf Field // *Phys. Rev.* 1958. V. 110. P. 1295–1297.
 35. Важенина И.Г., Исхаков Р.С., Яковчук В.Ю. Особенности угловых зависимостей параметров спектров ферромагнитного и спин-волнового резонанса // *ФММ*. 2022. Т. 123 (11). С. 1153–1160.
 36. Важенина И.Г., Исхаков Р.С., Чеканова Л.А. Спин-волновой резонанс в химически осажденных Fe-Ni пленках: измерения спин-волновой жесткости и константы поверхностной анизотропии // *ФТТ*. 2018. Т. 60 (2). С. 287–293.
 37. Важенина И.Г., Столяр С.В., Яковчук В.Ю., Рауцкий М.В., Исхаков Р.С. Температурные зависимости межслойной обменной константы трехслойных пленок FeNi/Dy/FeNi, исследованные динамическим методом // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48 (10). С. 8–11.

FEATURES OF THE SPECTRUM OF EXCHANGE SPIN WAVES IN PLANAR Fe Ni/Dy/Fe Ni COMPOSITES IN THE TEMPERATURE RANGE 4–300 K

R. S. Iskhakov¹, I. G. Vazhenina^{1,*}, S. V. Stolyar², and V. Yu Yakovchuk¹

¹*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

²*Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Krasnoyarsk, 660036 Russia*

**e-mail: irina-vazhenina@mail.ru*

The spin-wave resonance in a magnetic planar composite FeNi/Dy/FeNi on exchange spin waves with a wave vector along the normal to the surface in the temperature range of 4–290 K. It is established that in the region of 90–290 K, resonant absorption of high-frequency field energy is observed on individual layers of FeNi; the coupling of ferromagnetic layers is manifested in the appearance of optical satellites in acoustic spin-wave modes, the field coordinates of optical satellites indicate a positive interlayer coupling. A single spin-wave spectrum of a planar nanocomposite is observed in the 4–85 K region, which made it possible to measure the values of spin-wave stiffness for it. The features of the spin-wave spectrum are due to modifications of the magnetic structure of Dy and a change in the temperature of the dominant interaction of REM/PM on interfaces.

Keywords: three-layer films, ferromagnetic and spin-wave resonance, Dzyaloshinsky–Moriya interaction