

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Исследования ферромагнитного резонанса в трехслойных структурах NiFe/IrMn/NiFe с обменным смещениемИ. О. Джунь,^{1,а} Г. В. Бабайцев,¹ А. В. Макунин,¹ И. Л. Ромашкина,¹ М. Г. Козин,¹ Н. Г. Чеченин^{1,б}¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

Поступила в редакцию 21.04.2022, после доработки 09.05.2022, принята к публикации 13.05.2022.

Трехслойные тонкопленочные магнитные структуры NiFe/IrMn/NiFe, полученные методом магнетронного распыления на постоянном токе в присутствии постоянного магнитного поля 420 Э, исследованы методом ферромагнитного резонанса (ФМР). Для образцов с жесткими Ni₄₀Fe₆₀ и мягкими Ni₇₅Fe₂₅ ферромагнитными слоями одинаковой толщины 10 нм проведено сравнение зависимостей обменного смещения, угла рассогласования между одноосной и однонаправленной анизотропией и ширины линии ФМР от толщины антиферромагнитного слоя IrMn в диапазоне от 2 до 50 нм. Возможные причины наблюдаемых зависимостей обсуждаются с использованием данных других авторов, а также наших предыдущих данных для двухслойных структур.

Ключевые слова: наномангнетики, обменное смещение, ферромагнитный резонанс, трехслойные тонкопленочные структуры, одноосная анизотропия, однонаправленная анизотропия, ферромагнетик/антиферромагнетик.

УДК: 537.622.4, 537.622.5. PACS: 75.70.-i, 75.70.Cn, 75.30.Gw, 68.65.Ac.

ВВЕДЕНИЕ

Явление обменного смещения проявляется в смещении петли гистерезиса вдоль оси магнитного поля. Обычно оно наблюдается в системах, состоящих из ферромагнитных (Ф) и антиферромагнитных (АФ) слоев, и обусловлено обменным взаимодействием на границе Ф/АФ [1]. Исследование обменного смещения представляет интерес в связи с его применением в магнитных сенсорных устройствах и спин-вентильных структурах, основанных на эффекте гигантского магнитосопротивления (ГМС) [2]. Оно обычно исследуется в двухслойных структурах Ф/АФ в зависимости от толщины слоев и последовательности их нанесения (Ф/АФ и АФ/Ф) [3]. В то же время обменное смещение в более сложных трехслойных структурах Ф/АФ/Ф [4] и АФ/Ф/АФ [5], содержащих два магнитных интерфейса, исследовано не так широко.

Состав Ф-слоев важен для придания системам с обменным смещением свойств, необходимых для технических приложений. Оказываются важными как магнитные свойства ферромагнетика, такие как намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, анизотропия, так и коррозионная, механическая и термическая стабильность.

Изучение динамики намагниченности в таких структурах занимает важное место еще и потому, что в магнитных устройствах на основе ГМС ключевым фактором является скорость переориентации намагниченности слоев. Эта динамика оценивается по затуханию прецессии намагниченности относительно ее равновесного состояния [6].

Метод ферромагнитного резонанса для структур с обменным смещением позволяет получить резо-

нансное поле и, следовательно, величину обменного смещения. Ширина линии ФМР определяется спиновым демпфированием и является важной характеристикой для проектирования магнитных устройств.

Величина затухания зависит от ряда факторов, которые можно разделить на внутренние (затухание Гильберта, наблюдаемое в идеальных объемных ферромагнетиках) и внешние (обусловленные морфологией поверхности, текстурой, дефектами структуры, одноосной и однонаправленной анизотропией). В работах [7, 8] показано, что двухмагнетонный механизм спиновой релаксации, обусловленный структурными несовершенствами, дает наиболее существенный вклад в ширину линии ФМР, в то время как вклад собственного затухания Гильберта мал и им можно пренебречь в большинстве практических случаев анализа данных для тонких пленок.

Здесь мы сообщаем о наших исследованиях угловой зависимости спектров ФМР от толщины антиферромагнитного слоя трехслойных структур NiFe/IrMn/NiFe (Ф/АФ/Ф) с низким и высоким содержанием Ni в ферромагнитных слоях, причем толщина ферромагнитных слоев структуры была одинаковой и фиксированной. Это позволило определить обменное смещение, ширину линии ФМР и рассогласование одноосной и однонаправленной анизотропии, а также выявить особенности поведения этих характеристик в зависимости от толщины АФ для двух разных относительных содержаний Ni в Ф-слоях.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**1.1. Экспериментальные образцы**

Экспериментальные образцы Si/Ta/NiFe/IrMn/NiFe/Ta с относительно жесткими ферромагнитными слоями Ni₄₀Fe₆₀ (называемые здесь «жесткими») были нанесены на подложку из Si с ориентацией

^а E-mail: irina.dzhun@gmail.com^б E-mail: chechenin@yandex.ru

(100) методом магнетронного напыления на постоянном токе в аргоне при давлении 3×10^{-3} Торр в присутствии магнитного поля 420 Э, создаваемого двумя пластинами с постоянными магнитами, установленными на держателе подложки. Ферромагнитные слои $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$ были получены совместным напылением мишеней Ni и Fe, тогда как слои АФ $\text{Ir}_{45}\text{Mn}_{55}$ были нанесены из одной мишени с соответствующим составом сплава. Толщина затравочного и буферного слоев Ta составляла 30 нм, толщина обоих слоев NiFe составляла 10 нм, а толщина слоя АФ IrMn (t_{AF}) варьировалась от 2 до 12 нм с шагом 2 нм и от 20 до 50 нм с шагом 10 нм. Для сравнения также был изготовлен набор трехслойных пленок Si/Ta/NiFe/IrMn/NiFe/Ta с общим составом пермаллоя $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ («мягких»). При этом толщина слоя АФ варьировалась от 2 до 10 нм с шагом 2 нм. Как было показано ранее [9], в образцах с мягкими слоями $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ существенного изменения обменного смещения для более толстых (20–50 нм) слоев АФ не наблюдалось. Толщины слоев определялись по скоростям осаждения для каждой мишени, а скорости осаждения калибровались с использованием метода обратного рассеяния Резерфорда. Составы Ф-слоев $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$, $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$ и АФ-слоев $\text{Ir}_{45}\text{Mn}_{55}$ проверены методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (XEDS).

1.2. Ферромагнитный резонанс

Магнитные свойства полученных образцов исследовались методом ферромагнитного резонанса с частотой 9.65 ГГц. Уравнение для поля ФМР для различных ориентаций легкой оси образцов по отношению к направлению поля осаждения можно получить из выражения для свободной энергии [10] и записать в виде:

$$H_r = H_{r0} - H_{EB} \cos(\alpha - \beta - \eta) - H_K \cos(\alpha - \eta). \quad (1)$$

Здесь $H_{r0} = (\omega/\gamma)^2/4\pi MS$ — собственное резонансное поле, H_{EB} и H_K — однонаправленная (обменное смещение) и одноосная анизотропия соответственно. Ориентация полей и намагниченности схематически показаны на рис. 1. Аналогичное уравнение было получено в работе [11], где также было отмечено наличие угла рассогласования между одноосной и однонаправленной анизотропией ($|\eta - \beta|$). Кроме того, это уравнение также часто используется без учета угла смещения, например в [5].

Типичный спектр ФМР и угловая зависимость поля ФМР для трехслойного $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}/\text{IrMn}/\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$ с толщиной слоя IrMn 6 нм показаны на рис. 2, а, б соответственно. Из рис. 2, б видно, что угловая зависимость поля ФМР имеет несимметричный колоколообразный вид, что указывает на наличие рассогласования между одноосной и однонаправленной анизотропией. Сплошная линия на рис. 2, б представляет собой аппроксимацию экспериментальных точек уравнением (1), дающим, наряду с величиной обменного смещения, значения β и η . Получено, что угол η равен нулю, что означает коллинеарность между легкой осью Ф-слоя и направлением магнитного поля, приложенного во время осаждения образца для всех исследованных образцов. Наличие угла несоосности β будет рассмотрено ниже.

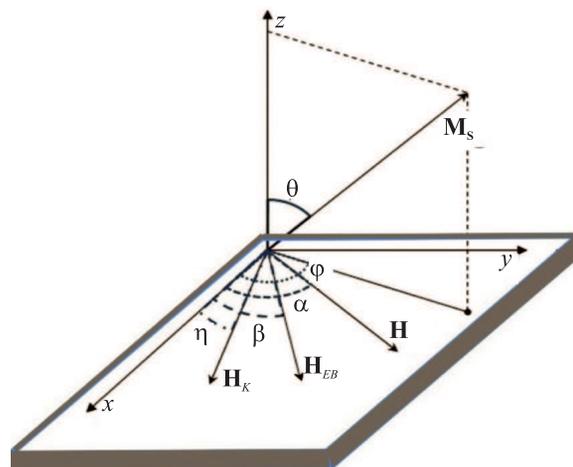


Рис. 1. Ориентация полей и намагниченности в ферромагнитном слое

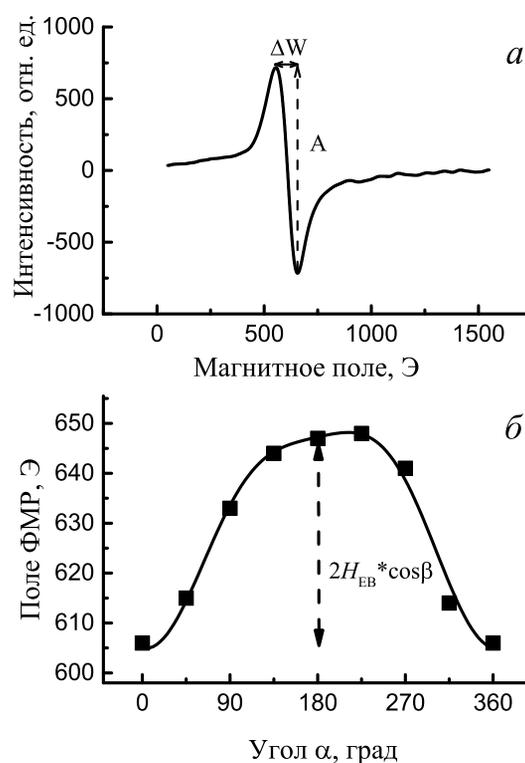


Рис. 2. Спектр ФМР (а) и угловая зависимость поля ФМР (б) для трехслойного $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}/\text{IrMn}/\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$ с толщиной слоя АФ 6 нм

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Обменное смещение и ширина линии ФМР в образцах с Ф-слоями $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$

Зависимости обменного смещения и угла несоосности β от толщины слоя АФ представлены на рис. 3, а, б соответственно. Обменное смещение появляется при $t_{AF} = 4$ нм, увеличивается, проходит через пик и затем при толщинах АФ 8–12 нм резко падает, затем вновь возрастает от 22 Э при $t_{AF} = 20$ нм до 48 Э при $t_{AF} = 50$ нм. Происхождение пика H_{EB} при малых t_{AF} обсуждалось в нашей предыдущей статье [12]. Там мы связываем

пик с компенсацией усиления короткодействующей ферромагнитной связи через слой АФ и уменьшением обменной энергии из-за меньшего размера зерен АФ и более низкой температуры Нееля при малых t_{AF} [13]. Угол неколлинеарности одноосной и однонаправленной анизотропии имеет максимальное значение при $t_{AF} = 4$ нм, что соответствует толщине слоя АФ, при которой появляется ненулевое обменное смещение. При дальнейшем увеличении толщины слоя АФ угол неколлинеарности β уменьшается и стремится к нулю при $t_{AF} = 15$ нм.

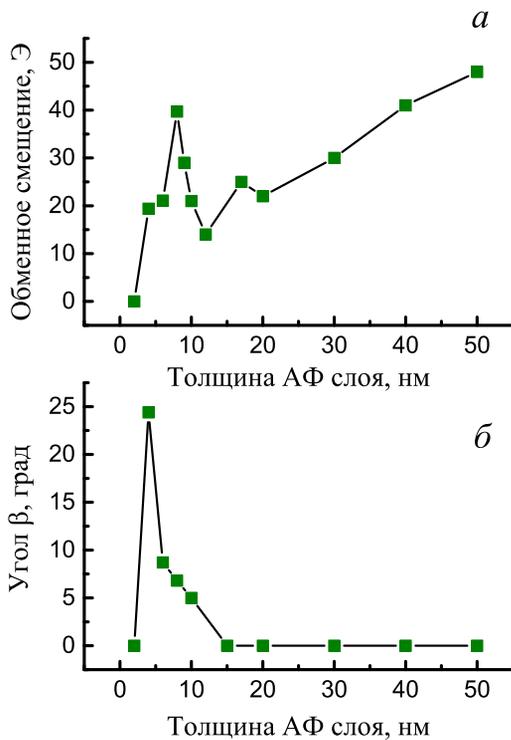


Рис. 3. Зависимость обменного смещения (а) и угла рассогласования β от толщины слоя АФ для образцов $Ni_{40}Fe_{60}/IrMn/Ni_{40}Fe_{60}$

Зависимости ширины линии ФМР (ΔW , указанная на рис. 2, а) от толщины слоя АФ для параллельной и перпендикулярной ориентаций легкой оси образца относительно внешнего поля ФМР представлены на рис. 4.

Эти зависимости на рис. 4 имеют схожий качественный вид с небольшими количественными отличиями. Показано, что с появлением обменного смещения при толщине слоя АФ 4 нм происходит резкое увеличение ширины пика ФМР. В дальнейшем по мере увеличения толщины слоя АФ ширина линии немонотонно уменьшается до $t_{AF} = 30$ нм, а затем несколько увеличивается. Можно заметить нечто общее в поведении зависимостей ширины линии, обменного смещения и угла рассогласования β от толщины АФ при малых толщинах (наличие пика при 4–10 нм). Общие черты в зависимости от АФ-толщины, возможно, могут быть связаны с тем же, что и рассмотренная выше конкуренция противоположных тенденций: ферромагнитной связи

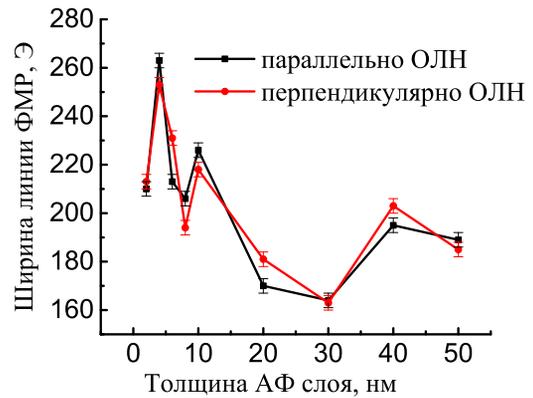


Рис. 4. Зависимость ширины линии ФМР от толщины слоя АФ при параллельной (квадраты) и перпендикулярной (кружки) ориентациях образца по отношению к внешнему магнитному полю для $Ni_{40}Fe_{60}/IrMn/Ni_{40}Fe_{60}$

через АФ-слой и температурного низкоразмерного эффекта Нееля. Межслойная ферромагнитная связь, возможно, также может быть причиной ярко выраженного изменения ширины линии с толщиной АФ, показанного на рис. 4.

Угловые зависимости ширины линии ФМР для образца с толщиной слоя АФ 4 нм, соответствующие толщине, при которой появляются обменное смещение и угол рассогласования β , и для образца с толщиной АФ 50 нм показаны на рис. 5. Они характеризуются аналогичным периодическим угловым изменением, хотя абсолютное значение этого изменения больше (около 70 Э) для образца с тонким слоем АФ и меньше (около 10 Э) для образца с толстым слоем АФ.

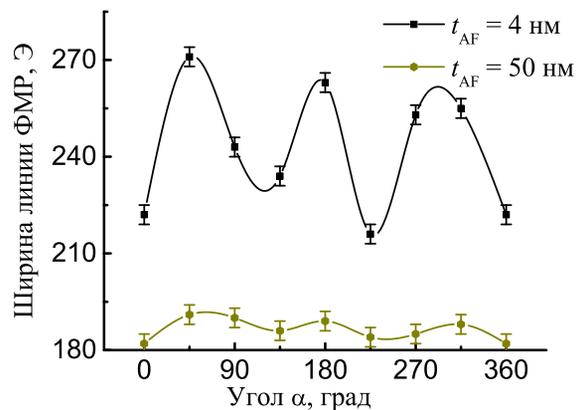


Рис. 5. Угловая зависимость ширины линии ФМР для образцов $Ni_{40}Fe_{60}/IrMn/Ni_{40}Fe_{60}$ с тонким 4 нм (квадраты) и толстым 50 нм (кружки) слоями АФ

2.2. Сравнение с трехслойными структурами $Ni_{75}Fe_{25}/IrMn/Ni_{75}Fe_{25}$

В отличие от трехслойных структур с жесткими Ф-слоями $Ni_{40}Fe_{60}$, типичный спектр ФМР для трехслойных структур с мягкими слоями $Ni_{75}Fe_{25}$ (рис. 6) демонстрирует два разделенных пика при

толщинах слоев АФ от 4 нм и более. Следовательно, для каждого из этих образцов были получены две различные угловые зависимости ФМР, соответствующие нижнему (1-й интерфейс, граница Ф/АФ) и верхнему (2-й интерфейс, граница АФ/Ф) слоям Ф.

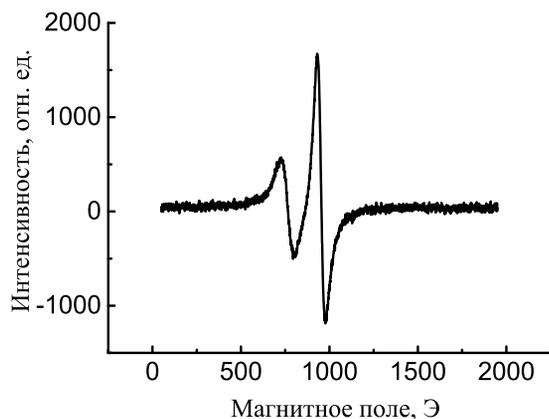


Рис. 6. Спектр ФМР для трехслойной структуры с мягкими Ф-слоями $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ при $t_{AF} = 10$ нм

Интенсивности поглощения как для левых, так и для правых пиков в спектрах ФМР были рассчитаны как $I = (\Delta W)^2 \times A$, где A — амплитуда поглощения (показана на рис. 2, а) [14]. Угловая зависимость интенсивности коэффициента поглощения I_{left}/I_{right} для образца с толщиной слоя АФ 4 нм показана на рис. 7.

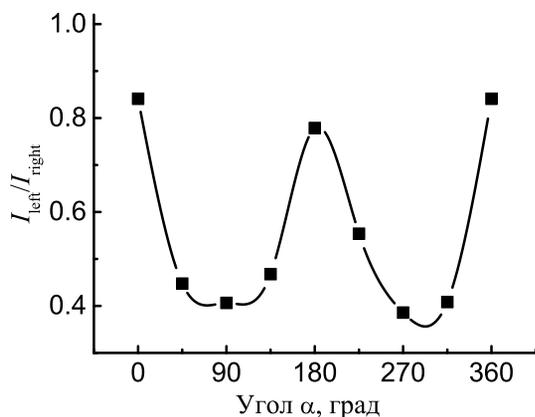


Рис. 7. Угловая зависимость коэффициента поглощения ФМР для трехслойной структуры с мягкими Ф-слоями $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ с толщиной слоя АФ 4 нм

Эта зависимость носит периодический характер и имеет максимум при параллельной ориентации образца. В то время как интенсивность поглощения пропорциональна намагниченности насыщения слоев Ф [14], коэффициент поглощения дает нам отношение между намагниченностью насыщения слоев. В предположении, что Ф-слои не связаны магнитным полем, оно должно быть равно единице, так как слои имеют одинаковый состав и толщину.

В действительности это отношение стремится, но не равно единице только при параллельной ориентации образца, а при перпендикулярной ориентации образца оно уменьшается. Это указывает на возможную магнитную связь Ф-слоев. Наложение двух пиков ФМР при перпендикулярной ориентации также наблюдалось в [4]. На рис. 8, а, б, в представлены зависимости обменного смещения, угла рассогласования β и ширины линии ФМР для обоих интерфейсов Ф/АФ от толщины слоя АФ. Учитывая наши предыдущие результаты для двухслойных структур АФ/Ф и Ф/АФ [15], мы относим кривую с более высоким H_{EV} к слою Ф, находящемуся сверху на АФ, т.е. с интерфейсом АФ/Ф, как показано на рис. 8, а.

Обменное смещение появляется при толщине слоя АФ 8 нм, что больше, чем у образцов с жестким NiFe. Затем величина обменного смещения увеличивается с увеличением толщины слоя АФ. В исследованном диапазоне толщин слоев АФ обменное смещение, наблюдаемое на границе АФ/Ф, больше, чем обменное смещение на границе Ф/АФ. Аналогично трехслойным структурам с жесткими слоями $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$, в структурах с мягкими слоями $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ максимум угла неколлинеарности β также соответствует толщине слоя АФ, при которой появляется обменное смещение. При дальнейшем увеличении толщины слоя АФ угол неколлинеарности уменьшается (рис. 8, б).

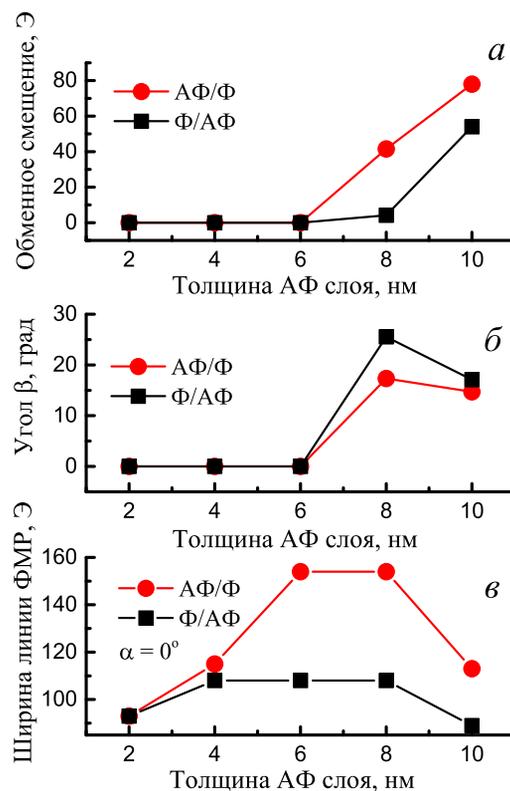


Рис. 8. Зависимость обменного смещения (а), угла рассогласования β (б) и ширины линии ФМР (в) от толщины слоя АФ для трехслойных структур с мягкими Ф-слоями $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$

В отличие от трехслойных структур с жестким NiFe в мягких мы наблюдаем уширение линии ФМР до появления ненулевого обменного смещения. Трехслойные структуры с мягким Ni₇₅Fe₂₅ также характеризуются более узкой линией ФМР: ширина линии ФМР в этом случае изменяется от 90 до 155 Э, тогда как для трехслойных структур с жестким Ni₄₀Fe₆₀ ширина линии ФМР изменяется в диапазоне 160–260 Э. Большая ширина линии в образцах с жесткими Ф–слоями размывает двухпиковую структуру ФМР, наблюдаемую в мягких Ф-образцах. Кроме того, более сильное магнитное упорядочение в трехслойной структуре с жестким Ф, обсуждаемое в [12], может минимизировать разницу в обменном смещении и расщеплении линий ФМР для этих двух слоев.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В образцах как с жесткими ферромагнитными слоями Ni₄₀Fe₆₀, так и с мягкими Ni₇₅Fe₂₅ рассогласование между обменным смещением и одноосной анизотропией наблюдается при тонких слоях АФ. Величина этого угла смещения проходит пик и затем уменьшается с толщиной слоя АФ. Это согласуется с результатами, полученными ранее для трехслойной [11] и двухслойной [10] структур. Существование неколлинеарной одноосной и однонаправленной анизотропии в тонкопленочных структурах с обменным смещением можно объяснить слабой анизотропией слоя АФ и магнитными фрустрациями на границе АФ/Ф.

Для образцов с обоими материалами Ф–слоев Ni₄₀Fe₆₀ и Ni₇₅Fe₂₅ ширина линии ФМР максимальна при толщине слоя АФ, соответствующей появлению ненулевого обменного смещения. Однако ярко выраженной корреляции между шириной линии ФМР и величиной обменного смещения не наблюдается. В то же время изменение ширины линии ФМР может быть связано с межфазным характером обменной связи [5], что приводит к уширению линии ФМР в случае тонких (<10 нм) слоев АФ, что и наблюдалось в данной работе.

Ширина линии ФМР уменьшается с уменьшением угла рассогласования β. Это можно объяснить относительно слабой магнитной упорядоченностью слоя АФ при малых толщинах, где существенную роль играют дефекты и локальные структурные неоднородности, приводящие к локальной разориентации магнитных моментов и неоднородной поверхностной анизотропии, описанной в модели Малоземова [16].

Вклад одноосной анизотропии в уширение линии ФМР должен проявляться при перпендикулярной (α = 90° и 270°) ориентации образца по сравнению с параллельной (α = 0° и 180°). В настоящей работе значительные осцилляции ширины линии ФМР с изменением α наблюдались для тонких слоев АФ, как на рис. 5, при толщине слоя АФ 4 нм. Однако максимальная и минимальная ширина линии ФМР соответствуют углам α 45° и 225°. Сдвиг, вероятно, может быть связан с неколлинеарностью одноосной

и однонаправленной анизотропии, а также с осцилляцией одноосной анизотропии из-за нескомпенсированной магнитокристаллической анизотропии слоев.

Тот факт, что мягкие трехслойные структуры Ni₇₅Fe₂₅ характеризуются более узкой линией ФМР, согласуется с результатами, полученными в [14, 17], где жесткий слой Со имел более широкую линию ФМР по сравнению с мягким слоем Ni₇₅Fe₂₅. Это можно также связать с различной неоднородностью и шероховатостью слоев [17–20].

Более широкая линия ФМР для верхней границы раздела АФ/Ф в трехслойных структурах с мягкими Ф–слоями может быть обусловлена взаимной диффузией атомов, что приводит к увеличению шероховатости. Этот эффект более заметен на верхнем интерфейсе АФ/Ф [4], а также подтверждается отличием от единицы отношения интенсивностей поглощения I_{left}/I_{right} , т. е. разностью намагниченности насыщения верхнего и нижнего Ф–слоев при параллельной ориентации образца. Кроме того, следует принимать во внимание связь слоев Ф через тонкий слой АФ, но этот вопрос открыт для обсуждения и требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meiklejohn W.H., Bean C.P. // *Phys. Rev.* 1957. **105**. P. 904.
2. Nogués J., Schuller I.K. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. **192**. P. 203.
3. Malinowski G., Hehn M., Panissod P. // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2006. **18**. P. 3385.
4. Nascimento V.P., Passamani E.C., Alvarenga A.D. et al. // *Appl. Surf. Science.* 2008. **254**. P. 2114.
5. Yoo Yong-Goo, Min Seong-Gi, Ryu Ho-Jun et al. // *JMMM.* 2006. **303**. P. e188.
6. Cramer N., Lucic D., Camley R.E., Celinski Z. // *J. Appl. Phys.* 2000. **87**. P. 6911.
7. Kuanr B.K., Camley R.E., Celinski Z. // *J. Appl. Phys.* 2003. **93**. P. 7723.
8. Rezende S.M., Azevedo A., Lucena M.A., de Aguiar F.M. // *Phys. Rev. B.* 2001. **63**. P. 214418.
9. Rodionova V., Dzhun I., Chichay K. et al. // *Solid State phenomena.* 2015. **233**. P. 427.
10. Джунь И.О., Бабайцев Г.В., Козин М.Г. и др. // *ФТТ.* 2021. **63**, № 6. С. 693. (Dzhun I.O., Babaitsev G.V., Kozin M.G. et al. // *Phys. of the Sol. State.* **63**, N 6. P. 807.)
11. Choi H.-C., You C.-Y., Kim K.-Y. et al. // *Phys. Rev. B.* 2010. **81**. P. 224410.
12. Dzhun I.O., Babaytsev G.V., Chechenin N.G. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2019. **470**. P. 151.
13. Ambrose T., Chien C.L. // *J. Appl. Phys.* 1996. **79**. P. 5920.
14. Alayo W., Sousa M. A., Pelegrini F., Baggio-Saitovitch E. // *J. Appl. Phys.* 2011. **109**. P. 083917.
15. Gritsenko Ch., Dzhun I., Babaytsev G. et al. // *Phys. Proc.* 2016. **82**. P. 51.
16. Speriosu V., Parkin S., Wilts C. // *IEEE Trans. Mag. MAG.* 1987. **23**, N 5. P. 2999.
17. Castro I.L., Nascimento V.P., Passaman E.C. et al. // *J. Appl. Phys.* 2013. **113**. P. 203903.
18. Platow W., Anisimov A.N., Dunifer G.L. et al. // *Phys. Rev. B.* 1998. **58**, N 9. P. 5611.
19. Alayo W., Baggio-Saitovitch E., Pelegrini F., Nascimento V.P. // *Phys. Rev. B.* 2008. **78**. P. 134417.
20. Shanova E.I., Dzhun I.O., Chechenin N.G. // *EPJ Web of Conf.* 2014. **75**. P. 05010.

Ferromagnetic Resonance Investigations of Exchange Biased NiFe/IrMn/NiFe Trilayer Structures

I. O. Dzhun^a, G. V. Babaytsev, A. V. Makunin, I. L. Romashkina, M. G. Kozin, N. G. Chechenin^b

ISkobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia
E-mail: ^airina.dzhun@gmail.com, ^bchechenin@yandex.ru

Trilayer thin-film magnetic structures NiFe/IrMn/NiFe obtained by DC magnetron sputtering in the presence of a constant magnetic field 420 Oe were investigated by ferromagnetic resonance (FMR) technique. The dependences of the exchange bias, misalignment angle between the uniaxial and unidirectional anisotropies, and the FMR linewidth on the thickness of the antiferromagnetic IrMn layer in the range from 2 to 50 nm are compared for samples with hard Ni₄₀Fe₆₀ and soft Ni₇₅Fe₂₅ ferromagnetic layers of the same 10 nm thickness. Using the data of other authors and our previous data for bilayer structures, possible reasons of the observed dependences are discussed.

Keywords: nanomagnetism, exchange bias, ferromagnetic resonance, trilayer thin film structures, uniaxial anisotropy, unidirectional anisotropy, ferromagnet/antiferromagnet.

PACS: 75.70.-i, 75.70.Cn, 75.30.Gw, 68.65.Ac.

Received 21 April 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 4. Pp. 639–644.

Сведения об авторах

1. Джунь Ирина Олеговна — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: irina.dzhun@gmail.com.
2. Бабайцев Георгий Владимирович — вед. инженер; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: kyvg-george93@mail.ru.
3. Макунин Алексей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: avmtchem@mail.ru.
4. Ромашкина Ирина Леонидовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: irom@srd.sinp.msu.ru.
5. Козин Михаил Германович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: kozin@srd.sinp.msu.ru.
6. Чеченин Николай Гаврилович — доктор физ.-мат. наук, зав. отделом, профессор; тел.: (495) 939-18-18, e-mail: chechenin@yandex.ru.