

Обменное смещение в двухслойных системах ферромагнетик/антиферромагнетик с различной микроструктурой и порядком осаждения слоев

Е. И. Шанова, И. О. Джунь, Н. Г. Чеченин

С помощью угловой зависимости резонансного поля ферромагнитного резонанса (ФМР) исследованы корреляция величины обменного смещения и шероховатости поверхности в двухслойных структурах типа ферромагнетик ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$)/антиферромагнетик ($\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$) (Ф/АФ-структуры) с различной толщиной и очередностью нанесения АФ-слоя. Установлено, что шероховатость образцов в структурах с АФ-слоем поверх Ф-слоя (TS-типа) больше, чем для структур с Ф-слоем поверх АФ-слоя (BS-типа). Рассмотрены возможные причины отличия в поведении величины обменного смещения в зависимости от шероховатости поверхности в образцах с различным расположением АФ слоя.

Ключевые слова: обменное смещение, поверхностная шероховатость, ферромагнитный резонанс, поверхностные эффекты.

We employed two materials to form structures of ferromagnetic-antiferromagnetic (F-AF) type, using ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) ferromagnetic and ($\text{Ir}_{25}\text{Mn}_{75}$) antiferromagnetic. For structures of varied thickness and order of sputtering, we used angular distribution of FMR field to correlate exchange bias shift value with surface roughness. We have established that structures with AF layer put on top, that is (TS) type, showed higher roughness than the ones with bottom location of AF layer (BS). We have further discussed possible explanations for distinct values of exchange bias in these two different structure types.

Key words: exchange bias, surface roughness, FMR, interface effects.

Введение

Двуслойные структуры типа Ф/АФ вызывают значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В таких структурах за счет обменного взаимодействия на границе Ф- и АФ-слоев возникает однонаправленная магнитная анизотропия, проявляющаяся в сдвиге петли гистерезиса ферромагнитного слоя на величину обменного смещения H_{EB} [1, 2].

Значительная часть исследований роли шероховатости в обменном смещении в текстурированных тонких плёнках показывает, что величина смещения падает с увеличением степени шероховатости [1, 3 – 5]. В других работах не было обнаружено существенной зависимости H_{EB} от шероховатости [6, 7]. Однако, в ряде работ наблюдали и противоположный

эффект — увеличение H_{EB} с ростом шероховатости [1, 4, 8], например, для монокристаллического АФ (с компенсированной или некомпенсированной поверхностью), покрытого Ф-слоем. В работах [1, 4] наблюдали для одних образцов уменьшение, в для других — увеличение величины обменного смещения при увеличении их шероховатости. Это свидетельствует о важной роли морфологии поверхности границы раздела. Для некомпенсированного АФ, уменьшение H_{EB} с увеличением шероховатости можно объяснить появлением на границе раздела Ф/АФ-областей с различной ориентацией спина, что приводит к уменьшению числа спинов, направленных в одном направлении, и, соответственно, к уменьшению результирующего однонаправленного поля обменного взаимодействия. Скомпенсированные же АФ могут остаться статистически скомпенсирован-

ными при повышении степени шероховатости, и величина H_{EB} будет оставаться неизменной, либо могут проявляться преимущественные отклонения в одном из направлений под действием каких-либо однонаправленных сил, например сил, обусловленных намагничиванием нижележащего ферромагнетика и в этом случае H_{EB} может возрасти.

Исследование факторов, влияющих на обменное смещение, помимо фундаментальных вопросов связи структурных и магнитных свойств в многослойных тонкопленочных системах, имеет также большой практический интерес, так как формирование таких структур проводится в различных условиях и режимах, приводящих к вариации структурных и композиционных характеристик. Пределы допустимых отклонений таких характеристик, в которых сохраняются требуемые свойства устройств магнитной сенсорики и спинтроники определяют качественные и стоимостные показатели таких устройств.

Цель данной работы — исследование влияния толщины АФ-слоя, порядка его нанесения на шероховатость поверхности и на обменное смещение, определяемое из угловой зависимости ФМР, анализ возможных причин наблюдаемых особенностей.

Методика получения и исследования структур

Экспериментальные образцы представляют собой структуру из 4-х слоев Ta/NiFe/IrMn/Ta, нанесенных на кремниевую подложку, где слой Ta несет буферную и защитную функцию. Образцы были изготовлены путем магнетронного напыления на установке АТС ORION-5 НИИЯФ МГУ. Базовое давление до осаждения составляло 10^{-7} Торр, давление в атмосфере аргона при осаждении — около 2,5 мТорр. Напыление проводили при комнатной температуре. Столик с держателем образца приводился во вращательное движение во время напыления для обеспечения равномерного нанесения материалов на кремниевую подложку.

Процентное соотношение Ni и Fe в составе сплава NiFe регулировали при помощи изменения мощности, подаваемой на мишени Ni и Fe при напылении. Для получения $Ni_{80}Fe_{20}$ мощность на мишени Ni составляла 112,5 Вт, что составляет 15% от максимальной мощности магнетрона, на мишени Fe — 37,5 Вт, что составляет 5% от максимальной мощности. Скорость напыления сплава NiFe — 3,75 нм/мин. В качестве мишени IrMn использовали сплав $Ir_{25}Mn_{75}$, состав которого проверяли методом дисперсионного анализа рентгеновского излучения на сканирующем электронном микроскопе TESCAN НИИЯФ МГУ. Результирующая скорость напыления сплава IrMn —

3,7 нм/мин. Толщину слоев и точный состава определяли методом обратного резерфордовского рассеяния на базе ускорительного комплекса НИИЯФ МГУ [9].

Для магнитного упорядочения АФ слоя в данной работе использовали метод осаждения структур в присутствии магнитного поля, приложенного в плоскости подложки. Для этого на держатель подложки были прикреплены постоянные магниты, магнитное поле между которыми составляло 420 Э.

Были проведены исследования двух типов образцов: TS-образцы — АФ (IrMn) слой расположен поверх Ф (NiFe) слоя и BS-образцы — АФ-слой расположен под Ф-слоем. Толщины АФ-слоев для обеих серий составляли 10, 20, 30 и 40 нм. Толщины Ф (10 нм), буферного и защитного Ta (30 нм) слоев во всех образцах были одинаковыми и осаждались с одинаковой скоростью.

Магнитные свойства структур исследовали методом ФМР на установке BRUKER ELEXSYS e500 с частотой поля 9,65 ГГц. Работе был использован резонатор прямоугольного типа E_{102} .

Метод ФМР характеризуется высокой чувствительностью, простотой и возможностью исследования Ф-слоев, покрытых изолирующим, или диамагнитным АФ-слоем. ФМР используется для определения высокочастотных свойств ферромагнитных материалов [10], их анизотропии и намагниченности насыщения [11, 12]. ФМР метод может быть также эффективно использован для исследования явления обменного смещения [13 – 15].

В этом методе измеряется поглощенная энергия СВЧ-излучения, направленного перпендикулярно внешнему постоянному магнитному полю. Резонанс в поглощенной энергии проявляется либо при сканировании частотой СВЧ-излучения, либо величиной постоянного магнитного поля. В нашем эксперименте частота СВЧ-излучения была фиксированной (9,65 ГГц), а изменялось поле электромагнита. Намагниченность насыщения M_s и поле одноосной анизотропии H_K могут быть получены из значений резонансного поля H_r , направленного вдоль легкой (EA) и жесткой (HA) осей с использованием соотношений Киттеля [16]:

$$\omega^2 = \gamma^2 (H_r^{EA} + H_K) (H_r^{EA} + H_K + 4\pi M_s), \quad (1a)$$

$$\omega^2 = \gamma^2 (H_r^{HA} - H_K) (H_r^{HA} - H_K + 4\pi M_s), \quad (1b)$$

где $\omega = 2\pi f$ — частота СВЧ-поля, $\gamma = ge/(2mc) \approx g \cdot 8,79 \cdot 10^6$ (Гс·с) $^{-1}$ — гиромагнитное отношение, g — множитель Ланде (g -фактор), e — элементарный заряд электрона, m — масса электрона, c — скорость света, H_r^{EA} , H_r^{HA} — значения резонансных полей

вдоль легкой и жесткой осей. Эти уравнения могут быть также обобщены на случай произвольной ориентации постоянного внешнего поля ФМР относительно направления одноосной анизотропии свободного ферромагнетика, а также на случай присутствия в Ф-слое поля однонаправленной анизотропии, обусловленной обменным взаимодействием в бинарной системе на границе Ф- и АФ-слоев и приводящей к смещению петли гистерезиса ферромагнитного слоя на величину поля обменного смещения H_{EB} [13, 14, 17].

Если поле обменного смещения параллельно ЕА Ф-слоя и образует угол θ с направлением внешнего магнитного поля ФМР, то для случая $4\pi M_s \gg H_r$ положение резонансного поля H_r определяется

$$H_{r0} = \frac{(\omega/\gamma)^2}{4\pi M_s}$$

Ф-слоя, величинами H_K и H_{EB} и углом θ , в соответствии с выражением [4, 5]:

$$H_r = \frac{\omega^2/\gamma^2}{4\pi M_s} - H_{EB} \cos \theta - H_K \cos 2\theta. \quad (2)$$

Поскольку направление ЕА в наших образцах устанавливается направлением поля в процессе осаждения, θ представляет собой угол между постоянным магнитным полем ФМР и направлением поля при осаждении (рис. 1).

Таким образом, исследование угловой зависимости резонансного поля позволяет определять величины одноосной H_K и однонаправленной H_{EB} анизотропий [13 – 15].

Морфологию поверхности образцов исследовали с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием атомно-силового микро-

скопа ИНТЕГРА Спектра производства NT-MDT. Измерение проводили полуконтактной методикой при высоте кантилевера над поверхностью $\Delta Z = 20 \pm 5$ нм на втором проходе кантилевера. Эти исследования позволяли определять величину среднеквадратичной шероховатости $\sigma_{rms} = \langle \Delta h^2 \rangle^{1/2}$, где Δh — отклонение от средней высоты в точке раstra зондируемой поверхности.

Результаты

Зависимости величины обменного смещения H_{EB} от толщины АФ-слоя в TS- и BS-образцах представлены на рис. 2. Видно, что зависимости ведут себя немонотонным образом, но практически синхронно изменяются в TS- и BS-образцах, за исключением малых толщин АФ-слоя t_{AF} . Максимальное смещение формируется при $t_{AF}=30$ нм, а с уменьшением толщины величина H_{EB} снижается. При $t_{AF}=10$ нм в BS-образце H_{EB} продолжает падение, в то время как в TS обменное смещение резко возрастает. Необходимо отметить, что условия формирования обменного смещения в TS- и BS-образцах принципиально отличаются. В TS-образцах АФ-слоем формируется на Ф-слое в условиях его магнитного насыщения и действия соответствующего сильного магнитного поля. В BS-образцах же АФ-слоем растет в условиях действия только сравнительно слабого внешнего постоянного магнитного поля. Последующий Ф-слой уже не способен привести к изменению микромагнитного упорядочения АФ-слоя. Таким образом, само присутствие обменного смещения в BS-образцах свидетельствует о том, что для формирования однонаправленной магнитокристаллической анизотропии в АФ-слое достаточно сравнительно небольшого внешнего поля. Однако при малой толщине

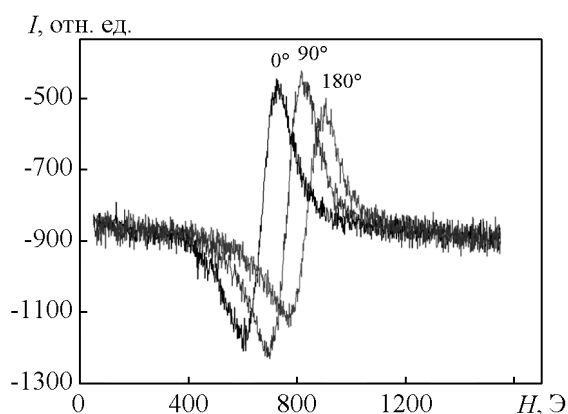


Рис. 1. Спектры ФМР для углов 0°, 90° и 180° между направлением внешнего поля и осью легкого намагничивания образца.

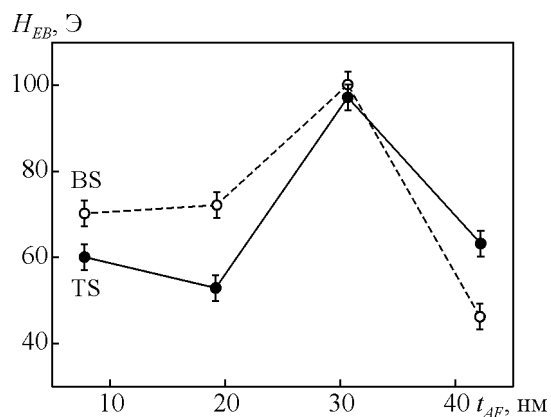


Рис. 2. Зависимость величины обменного смещения в TS- и BS-образцах от толщины АФ-слоя.

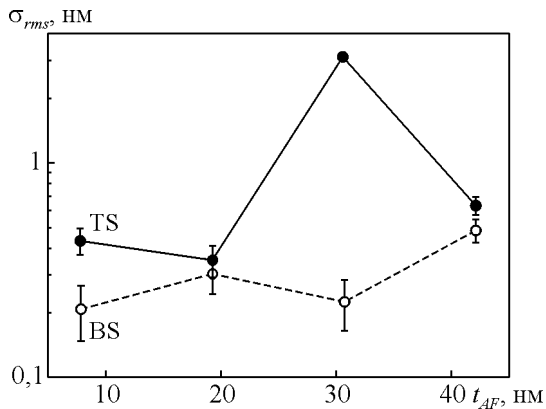


Рис. 3. Среднее значение шероховатости для различных толщин АФ-слоя в TS- и BS-образцах.

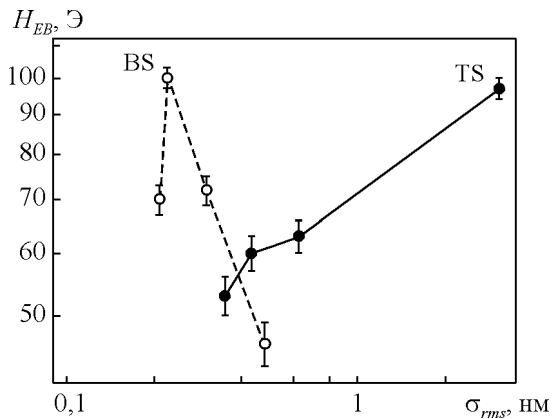


Рис. 4. Зависимость величины обменного смещения от шероховатости для TS- и BS-образцов.

АФ-слоя однонаправленная магнитокристаллическая анизотропия в BS-образцах не высока.

Зависимость среднеквадратичной шероховатости σ_{rms} от толщины АФ-слоя t_{AF} для TS- и BS-образцов представлена на рис. 3. Как видно, для обеих структур с альтернативным порядком осаждения Ф- и АФ-слоев σ_{rms} ведет себя немонокотным образом с изменением толщины АФ-слоя. При этом изменения σ_{rms} с толщиной в TS- и BS-образцах происходят в противофазе. При всей немонокотности изменений, как видно из рис. 3, шероховатость TS-образцов значительно больше, чем BS.

Попытка напрямую установить корреляцию между шероховатостью поверхности и обменным смещением предпринята на рис. 4 путем соответствующего объединения рис. 2 и 3. На первый взгляд, этот рисунок демонстрирует отсутствие всякой корреляции. Действительно, несмотря на то, что шероховатости TS- и BS-образцов отличаются,

значения обменного смещения изменяются в общем для них коридоре. Однако, этот вывод был бы неправомерным упрощением ситуации.

Обсуждение

Обменное смещение

Зависимость обменного смещения от толщины АФ-слоя исследовали в ряде работ в бинарных Ф/АФ и тройных Ф₁/АФ/Ф₂ системах для различных комбинаций Ф- и АФ-слоев, их структуры и состава. Достаточно общей тенденцией является резкое падение H_{EB} при малых толщинах t_{AF} и отсутствие обменного смещения при t_{AF} меньше некоторой критической t_C , величина которой зависит от свойств АФ- и Ф-слоев. Такое поведение может быть интерпретировано как проявление размерного эффекта, приводящего к снижению температуры блокировки по отношению к температуре Нееля при малых толщинах [18], и, соответственно, к снижению энергии кристаллической анизотропии K_{AF} и поля обменного смещения. При $t_{AF} < t_C$ энергия кристаллической анизотропии на единицу площади границы раздела становится меньше обменной энергии пары Ф-АФ, $K_{AF} t_{AF} < K_{AF} t_C = J_{INT}$. В этом случае, магнитный момент АФ на границе раздела будет следовать за магнитным моментом Ф, то есть смещение будет отсутствовать. При $t_{AF} > t_C$ H_{EB} растет с толщиной и достигает максимума при $t_{AF} = t_{max}$, а при больших толщинах либо наступает насыщение, либо снижение H_{EB} [19 – 24]. В модели Малоземова [25] толщины АФ-слоя подразделяются на три области. Смещение возникает, когда обменная энергия на границе раздела Ф/АФ становится достаточно большой для образования доменной структуры со стенками доменов, ориентированными перпендикулярно границе раздела. Домены имеют конечные размеры, поэтому возникает случайно ориентированное поле, однако, не усредняющееся до нуля в пересчете на единицу площади даже для скомпенсированных и неровных границ. При некоторой толщине энергия доменной стенки и обменная энергия выравниваются и при $t_{AF} < t_{AF,1}$ возникает обменное смещение. При $t_{AF,2} < t_{AF} < t_{AF,1}$ площадь доменов и, соответственно, поле смещения остаются практически постоянными. При $t_{AF} < t_{AF,2}$ размер доменов уменьшается, а H_{EB} возрастет с уменьшением толщины АФ-слоя вплоть до некоторого значения $t_{AF,3}$. При $t_{AF} < t_{AF,3}$ доменная структура становится нестабильной, доменные стенки смещаются вместе с реверсируемой намагниченностью в Ф-слое, H_{EB} резко уменьшается до нуля.

Близкий по смыслу подход недавно развит в серии работ Йоркской группы [26]. Этот подход базируется на идее, что обменное смещение возникает за счет АФ-зёрен с размером (объемом) в некотором диапазоне. Зёрна малого размера являются термически неустойчивыми, и не могут обеспечить необходимую энергию анизотропии для устойчивости при реверсировании внешнего магнитного поля. Зёрна же большого размера обладают слишком большой энергией анизотропии, так что требуются слишком большие поля, чтобы индуцировать в них однонаправленную анизотропию. В [27] показано, что концентрация зерен с объемом в оптимальном диапазоне, а, следовательно, и обменное смещение, является функцией толщины АФ-слоя с максимумом.

Наши результаты по зависимости H_{EB} от толщины для BS-структур качественно согласуются со сценарием в модели Малоземова [25] и в Йоркской модели [26]: H_{EB} возрастает при малых толщинах, достигает максимальных значений, а затем уменьшается. Но поведение H_{EB} в BS-структуре при малых толщинах (10 нм) противоречит такой картине — H_{EB} вместо ожидаемого падения, наоборот, показывает рост. Очевидно модели [25, 26] не учитывают другие важные механизмы формирования обменного смещения в Ф/АФ-системе.

Среди таких механизмов, прежде всего, следует учесть вариацию размеров зерен, текстуры и шероховатости с толщиной АФ-слоя и порядком осаждения Ф- и АФ-слоев.

Шероховатость в TS- и BS-структурах

Из представленных данных на рис. 3 видно, что величина шероховатости в TS, несмотря на значительную немонотонность, существенно превосходит шероховатость в BS-образцах. Обращает на себя внимание и тот факт, что осцилляции немонотонностей в TS- и BS-образцах, находятся в очевидной противофазе. Расхождение начинается с толщины $t_{AF} = 10$ нм. В этом случае толщины Ф- и АФ-слоев одинаковы и образцы отличаются только порядком осаждения слоев. И то, что результирующая шероховатость образцов отличается, свидетельствует о различном механизме роста в альтернативной последовательности слоев в TS- и BS-структурах.

Важно также отметить, что изменение шероховатости с толщиной АФ-слоя в TS-образце коррелирует с изменением в обменном смещении (ср. кривые TS на рис. 2 и 3): увеличение t_{AF} сопровождается ростом H_{EB} , и наоборот. Это приводит к выводу о том, что

1) шероховатость, измеряемая на поверхности образца, действительно соответствует шероховатости на границе раздела, таким образом, обеспечивая нескомпенсированность магнитных моментов на приграничном слое АФ с Ф. И 2), рельеф формируется в результате конкуренции двух противоположно направленных процессов — усиления и сглаживания неоднородностей рельефа, с переменным успехом доминирующих при росте АФ-слоя. На основании данных на рис. 3 можно предположить, что характерный масштаб неоднородности рельефа составляет около 20 нм, что, видимо, соответствует размеру зёрен. При этом, при осаждении АФ минимальной толщины 10 нм в BS-образцах, очевидно, доминирует процесс сглаживания, а в TS — усиления шероховатости.

Величина обменного смещения определяется действием нескольких факторов. Вариации H_{EB} в BS в значительной мере обусловлены изменениями размеров зёрен с толщиной, а в TS — вариацией в шероховатости границы раздела Ф/АФ.

Выводы

Исследованы корреляционные зависимости обменного смещения H_{EB} и средне-квадратичной шероховатости σ_{rms} поверхности образцов в структурах с альтернативным порядком осаждения Ф- и АФ-слоев в $Ni_{80}Fe_{20}/Ir_{25}Mn_{75}$ (Ф/АФ) бинарных структурах для различных толщин АФ-слоя в диапазоне 10 – 40 нм.

Установлено, что обменное смещение принимает близкие значения для TS- (АФ-слой на Ф-слое) и BS-образцов (АФ-слой под Ф-слоем) и изменяется с толщиной АФ-слоя синхронным образом за исключением области малых толщин (10 нм).

Величина σ_{rms} в TS-образцах существенно превышает соответствующие значения в BS-образцах, а изменения σ_{rms} с толщиной АФ-слоя в TS- и BS-образцах имеют противоположные тенденции.

Наблюдаемые различия в образцах с альтернативным порядком осаждения Ф- и АФ-слоев отнесены за счет различия в условиях формирования микроструктуры в этих слоях в TS- и BS-образцах, приводящие к отличиям в размерах зерен, текстуры, и, в результате, к различной степени скомпенсированности и величине анизотропии АФ слоя.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки, госконтракт № 14.15.11.0116, РФФИ грант № 12-02-31541.

Литература

1. Nogués J., Schuller I. K. Exchange bias. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, v. 192, p. 203 – 232.
2. Чеченин Н. Г. Магнитные наноструктуры и их применение. М.: Грант Виктория, 2006, 166 с.
3. Lederman D., Nogués J., Schuller I.K. Exchange anisotropy and the antiferromagnetic surface order parameter. *Physical Review B*, 1997, v. 56, p. 2332 – 2335.
4. Shen J.X., Kief M.T. Exchange coupling between NiO and NiFe thin films. *J. Appl. Phys.*, 1996, v. 79, p. 5008 – 5010.
5. Nascimento V.P., Passamani E.C., Alvarenga A.D., Pelegrini F., Biondo A., Baggio Saitovitch E. Influence of the roughness on the exchange bias effect of NiFe/FeMn/NiFe trilayers. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2008, v. 320, p. 272 – 274.
6. Han D., Zhu J., Judy J.H. NiFe/NiO bilayers with high exchange coupling and low coercive fields. *J. Appl. Phys.*, 1997, v. 81, p. 4996 – 4998.
7. Cyrille M. C., Kim S., Gomez M. E., Santamaria J., Krishnan K.M., Schuller I.K. Enhancement of perpendicular and parallel giant magnetoresistance with the number of bilayers in Fe/Cr superlattices. *Physical Review B*, 2000, v. 62, p. 3361 – 3367.
8. Maitre A., Ledue D., Patt R. Interfacial roughness and temperature effects on exchange bias properties in coupled ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2012, v. 324, p. 403 – 409.
9. Черных П.Н., Куликаускас В.С., Хоменко Е.В., Узбяков А.С., Чеченин Н.Г. Исследование магнитомягких пленок Co – Fe – Ni методом POP и ERD. *Физика и химия обработки материалов*, 2006, № 2, с. 70 – 73.
10. Chechenin N.G. Effect of internal stray fields on the high-frequency properties of magnetic thin films. *Phys. of the Sol. State*, 2004, v. 46, p. 466 – 470.
11. Хоменко Е.В., Шалыгина Е.Е., Поляков С.Н., Чеченин Н.Г. Электрохимическое осаждение и свойства ферромагнитных плёнок Co – Fe – Ni с толщиной до 500 нм. *Перспективные материалы*, 2006, № 2, с. 66 – 72.
12. Chechenin N.G., Khomenko E.V., Vainchtein D.I., De Hosson J.Th.M. Nonlinearities in composition dependence of structure parameters and magnetic properties of nanocrystalline fcc/bcc-mixed Co–Ni–Fe thin films. *J. Appl. Phys.*, 2008, v. 103, iss. 7, p. 07E738-1 – 07E738-3.
13. Layadi A.A., Cain W.C., Lee J.-W., Artman J.O. Investigation of anisotropy by ferromagnetic resonance (FMR) in exchange coupled bilayer films. *IEEE Trans. Magn. MAG*, 1987, v. 23, p. 2993 – 2995.
14. Khomenko E.V., Chechenin N.G., Goikhman A.Yu., Zenkevich A.V. Exchange Bias in the IrMn/Co Structures with Alternative Sequences of Antiferromagnetic and Ferromagnetic Layers. *JETP Lett.*, 2008, v. 88, p. 693 – 697.
15. Dzhun I.O., Dushenko S.A., Chechenin N.G., Konstantinova E.A. Temperature dependence of exchange bias in Co/FeMn-structure induced by heating and cooling in magnetic field. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, v. 303, p. 012103(1 – 6).
16. Kittel Ch. On the theory of ferromagnetic resonance absorption. *Physical Review*, 1948, v. 73, p. 155 – 162.
17. Scott J.C. Ferromagnetic resonance studies in the bilayer system Ni_{0.80}Fe_{0.20}/Mn_{0.50}Fe_{0.50}: Exchange anisotropy. *J. Appl. Phys.*, 1985, v. 57, iss. 1, p. 3681 – 3683.
18. Ambrose T., Chien C. L. Finite-size scaling in thin antiferromagnetic CoO layers. *J. Appl. Phys.*, 1996, v. 79, iss. 8, p. 5920 – 5922.
19. Ambrose T., Chien C.L. Dependence of exchange coupling on antiferromagnetic layer thickness in NiFe/CoO bilayers. *J. Appl. Phys.*, 1998, v. 83, iss. 11, p. 6822 – 6824, doi: 10.1063/1.367863.
20. Sang H., Du Y. W., Chien C. L. Exchange coupling in Fe50Mn50/Ni81Fe19 bilayer: Dependence on antiferromagnetic layer thickness. *J. Appl. Phys.*, 1999, v. 85, iss. 8, p. 4931 – 4933.
21. Xi H., Mountfield K. R., White R. M. Ferromagnetic resonance studies of exchange biasing in Ni81Fe19 / Pt10Mn90 bilayers. *J. Appl. Phys.*, 2000, v. 87, iss. 9, p. 4367 – 4374.
22. Lin T., Tsang C., Fontana R.E., Howard J.K. Exchange-Coupled Ni-Fe-Mn, Ni-Fe-N-Mn and NiO/Ni-Fe Films for Stabilization of Magnetoresistive Sensors. *IEEE Trans. Magn. MAG*, 1995, v. 31, iss. 6, p. 2585 – 2590.
23. Fuke H. N., Saito K., Yoshikawa M., Iwasaki H., Sahashi M. Influence of crystal structure and oxygen content on exchange-coupling properties of IrMn/CoFe spin-valve films. *J. Appl. Phys.*, 1999, v. 75, iss. 23, p. 3689 – 3682.
24. Van Driel J., de Boer F.R., Lenssen K.-M.H., Coehoorn R. Exchange biasing by Ir19Mn81: Dependence on temperature, microstructure and antiferromagnetic layer thickness. *J. Appl. Phys.*, 2000, v. 88, iss. 2, p. 975 – 982. doi: 10.1063/1.373764;
25. Malozemoff A.P. Heisenberg-to-Ising crossover in a random-field model with uniaxial anisotropy. *Physical Review B*, 1988, v. 37, p. 7673 – 3682.
26. O’Grady K., Fernandez-Outon L.E., Vallejo-Fernandez G. A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2010, v. 322, p. 883 – 899.
27. Vallejo-Fernandez G., Fernandez-Outon L. E., O’Grady K. Antiferromagnetic grain volume effects in metallic polycrystalline exchange bias systems. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, v. 41, p. 112001 (5p). doi:10.1088/0022-3727/41/11/112001.

Статья поступила в редакцию 3.09.2013 г.

Шанова Елена Игоревна — Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, студентка. Специализируется в области магнетизма наноструктур. E-mail: elena_shanova@rambler.ru.

Джунь Ирина Олеговна — Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, младший научный сотрудник. Специалист в области магнетизма наноструктур.

Чеченин Николай Гаврилович — Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, профессор, заведующий Отделением физики атомного ядра. Специалист в области магнетизма наноструктур, спинтроники, физики наноструктур, радиационных эффектов в веществе. E-mail: chechenin@sinp.msu.ru.