

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Гриценко Кристины Александровны «Особенности процессов перемагничивания магнитостатически- и обменно-связанных тонкопленочных структур на основе пермаллоев», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Успехи физики магнитных явлений демонстрируют важность получаемых результатов для развития новых технологий хранения информации, сенсорики, энергоэффективных вычислительных и логических систем и т.д. Открытие эффекта обменного смещения позволило создать магнитные материалы с асимметричным ходом процессов перемагничивания. Обменное смещение связано с однонаправленной обменной анизотропией, которая, в отличие от одноосной анизотропии, позволяет задать единственное энергетически выгодное направление магнитных моментов. Это уникальное явление определяется обменным взаимодействием между магнитными моментами ферромагнетика (ФМ) и антиферромагнетика (АФМ), возникающим на межфазной границе (интерфейсе). Исследование влияния качества интерфейсов и структуры слоев на процессы перемагничивания многослойных систем, состоящих из ФМ и АФМ, является **важной и актуальной** задачей физики магнитных явлений. Для выполнения возрастающих требований к энергоэффективности базовых элементов магнитоэлектроники исследователи используют низкокоэрцитивные материалы. В данной работе изучены системы на основе пермалловых сплавов, что добавляет **значимости** результатам диссертации.

Диссертационная работа Гриценко Кристины Александровны посвящена исследованию особенностей процесса перемагничивания и механизмов, обуславливающих наблюдаемые свойства, в обменно-связанных тонкопленочных структурах на основе высоко- и низконикелевого пермаллоев.

Структура и содержания диссертации: диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы, которые изложены на 143

страницах. В тексте диссертации содержится 52 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 198 статей.

Во введении отображена актуальность темы исследования, научная новизна и практическая ценность работы, сформулирована ее цель и задачи, указаны основные защищаемые положения, представлена информация об апробации и достоверности результатов работы, публикациях автора и его личном вкладе, а также даны краткие сведения об объеме и структуре диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор, в котором рассмотрены особенности обменного смещения в тонкопленочных структурах. В обзоре описаны актуальные модели, объясняющие эффект обменного смещения. Показана роль магнитостатического взаимодействия в обменно-связанных системах, а также освещены особенности практического использования структур с обменным смещением. По результатам проведенного обзора сформулирована цель диссертационного исследования и поставлены задачи для ее достижения.

Вторая глава носит методический характер и содержит описание методов и подходов, которые применялись в ходе диссертационного исследования. Автор использовал современное экспериментальное оборудование: сверхвысоковакуумную систему ORION SERIES SPUTTERING SYSTEMS, сканирующий зондовый микроскоп Smart SPM, рентгеновский дифрактометр D8 DISCOVER, просвечивающий электронный микроскоп Hitachi HT7700, вибрационный магнитометр LAKE SHORE Series 7400. В главе описаны методики, которые применялись для исследования образцов на данном оборудовании.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты исследования особенностей формирования свойств обменно-связанных тонкопленочных структур на основе высоко - или низконикелевого пермаллоя.

В первом разделе представлены результаты анализа данных о морфологии и структуре образцов, полученные методом атомной силовой микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурной дифрактометрии.

В следующих пунктах главы представлены результаты исследования особенностей процессов перемагничивания трёхслойных структур с одним или двумя

обменно-связанными интерфейсами на основе высоко- или низконикелевого пермаллоя, а также предложена модель и проведены расчеты петель гистерезиса трёхслойных структур с обменным смещением. Проведены исследования магнитных свойств пленок с обменным смещением в диапазоне температур от 80 К до 420 К. Показано влияние неоднородного внешнего магнитного поля при напылении на магнитные свойства двухслойных структур ФМ/АФМ.

В заключении приводятся общие выводы по диссертации. По моему мнению, наибольший интерес представляют следующие результаты работы, которые характеризуют её **научную значимость**:

1. Установлено, что магнитные свойства двухслойных структур NiFe-IrMn определяют состав пермаллоя, толщина антиферромагнитного слоя и порядок осаждения слоев. Для объяснения найденных особенностей предложена феноменологическая модель, учитывающая как механизм частичного отклонения в плоскости пленки оси легкого намагничивания высоко- и низконикелевого пермаллоя относительно направления, заданного внешним магнитным полем при осаждении, так и выход магнитного момента из плоскости пленки для низконикелевого пермаллоя.

2. Обнаружено, что механизм формирования магнитных свойств и особенностей перемагничивания тонкопленочных трехслойных обменно-связанных структур NiFe/IrMn/NiFe, в том числе, последовательность перемагничивания ферромагнитных слоев, определяется конкуренцией магнитостатического взаимодействия ферромагнитных слоев материала и обменного взаимодействия между антиферромагнитным и ферромагнитными слоями.

3. Установлено, что понижение температуры, влекущее за собой усиление вклада обменного взаимодействия ферромагнетик-антиферромагнетик, приводит к реализации механизма перемагничивания, наблюдаемого с ростом толщины антиферромагнитного слоя для образцов на основе высоко- и низконикелевого пермаллоя. Определена температура блокировки обменного смещения для структур с тонким слоем АФМ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, а также **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается

использованием современных методик, в том числе, теоретических методов, тщательным анализом полученных данных и их сопоставлением с результатами независимых исследований.

В целом по диссертации можно отметить, что поставленные задачи и полученные результаты являются новыми, данные оригинальны и вносят существенный вклад в понимание процессов происходящих в обменно-связанных пленках на основе высоко- и низконикелевого пермаллоя.

Новизна работы определяется решением новых задач и комплексным экспериментальным и теоретическим исследованием, результаты которого расширяют существующие представления о механизмах перемагничивания и магнитных свойствах обменно-связанных тонкопленочных систем на основе пермаллоя с высокой и низкой концентрацией никеля.

Практическая значимость полученных результатов: Результаты диссертационной работы Гриценко К.А. в части исследования процессов перемагничивания в тонкопленочных структурах с одним интерфейсом, могут быть использованы для повышения чувствительности и увеличения степени надежности пассивных магнитных меток. Установление причин наблюдаемых особенностей процессов перемагничивания двух ферромагнитных слоев, разделенных слоем антиферромагнетика, позволит спрогнозировать и достичь оптимальные магнитные свойств, необходимые при создании обменно-смещенных структур для устройств электроники, в частности, сенсоров магнитного поля.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В уравнение (1) автор обозначает кристаллографическую анизотропию K_F , затем на рис. 1.3 тем же символом обозначается наведенная магнитная анизотропия. Следовало бы разделить обозначения для этих двух типов анизотропий.
2. На стр. 14 автор приводит неверное условие, при котором возможно индуцирование обменного смещения $T_C < T < T_N$. Должно быть $T_N < T < T_C$ [Exchange Bias, Josep Nogues and Ivan K. Schuller, J. Magn. Magn. Mater. 192, 203 (1999)]

3. В тексте автор часто использует терминологию и обороты, которые, вероятно, заимствованы из зарубежных источников, но требует пояснения в русскоязычных материалах. Так, необходимо пояснить, что имел в виду автор употребляя следующие обороты: «Макроскопическое наблюдение смещения петли гистерезиса» (стр. 14); «длина поперечного отклика магнитного слоя» (стр. 30); «магнитостатическая связь ... расходится/отклоняется вблизи краев образца» (стр. 32); «низкий размер зерна IrMn» (стр. 64).
4. Из описания результатов МСМ на стр. 75 и далее не ясно, в каком состоянии проводили сканирование: размагниченном или в состоянии с остаточной намагниченностью.
5. На стр. 77 автор делает вывод о том, что доменные стенки не 180° т.к. магнитный фазовый контраст не изменяется в доменах. Однако, стандартные магнитные зонды регистрируют преимущественно поля рассеивания от перпендикулярной к плоскости компоненты намагниченности. В случае пленок с о.л.н. в плоскости образца контраст от доменов с разной ориентацией намагниченности будет одинаковый, что не позволяет сделать вывод о типе доменной границы.
6. На стр. 78 сделан вывод о различии микромагнитных структур на интерфейсах образцов с различным порядком осаждения ферро- и антиферромагнитного слоёв. Требуется пояснить о каких микромагнитных структурах идет речь.
7. На рис. 3.10 автор приводит данные для образца HNiPy/IrMn(10нм), петля гистерезиса которого отличаются малым значением коэрцитивной силы, но в тексте про эту особенность ничего не сказано.
8. Замечания по оформлению диссертации:
 - на стр. 38 некорректно указана размерность намагниченности насыщения emu/cm^3 , а не $\text{эме}/\text{см}^3$;
 - На рис. 1.8. после номера рисунка указана лишняя ссылка на источник [2]. В подписи к рисунку неправильно указан тип анизотропии: не кристаллическая анизотропия, а магнитная кристаллографическая анизотропия K_1 ;

- на стр. 28 автор неправильно сокращает термин «магнитная силовая микроскопия» - МФМ;
- в таблице 1 на стр. 42 не указаны ссылки на источники данных;
- в подписи к рисунку 2.4 (стр. 53) приводится обозначение LNiPy, которое расшифровывается только на стр. 61.
- в подписи к рис. 3.10 указано, что приводятся петли гистерезиса, полученные при перемагничивании вдоль (красные линии) и перпендикулярно (черные линии) оси однонаправленной анизотропии тонкопленочных структур на основе высоко- и низконикелевого пермаллоя с различным порядком осаждения слоев, но представлены данные только для высоконикелевого пермаллоя.

9. В тексте диссертации встречаются грамматические и пунктуационные ошибки:

- Грамматические ошибки на страницах: 18, 19, 21, 22, 24, 32, 35, 39, 49, 58, 78, 81, 87.
- Лишние пробелы и пропущенные запятые между словами на страницах: 5, 9, 12, 41.

Несмотря на замечания, результаты, приведенные в диссертационной работе, представляют цельное и завершённое научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты прошли необходимую апробацию и были представлены лично автором на российских и международных конференциях. Основное содержание работы опубликовано в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах Scopus и Web of Science.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, полностью отражает полученные в работе результаты.

Таким образом, диссертационная работа Гриценко К.А. «Особенности процессов перемагничивания магнитостатически- и обменно-связанных тонкопленочных структур на основе пермаллоев», является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в рамках актуального направления физики магнитных явлений.

Полученные результаты характеризуются высоким уровнем новизны, в должной степени обоснованы, имеют важную научную и практическую значимость для развития физики обменно-связанных пленок с однонаправленной анизотропией.

Диссертация соответствует специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Считаю, что диссертационная работа «Особенности процессов перемангничивания магнитостатически- и обменно-связанных тонкопленочных структур на основе пермаллоев», полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Гриценко Кристина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник кафедры физики низкоразмерных структур ШЕН
ФГАОУВО Дальневосточный федеральный университет,
доктор физико-математических наук, доцент

« 9 » ноября 2018 г.

Огнев Алексей Вячеславович

Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Телефон: (423) 265-24-29

Факс (423) 243-23-15

ognev.av@dvfu.ru