

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОДНООСНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНООБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Н. А. Манаков¹, А. М. Ерёмин², Г. С. Шилинг², П. В. Захаров²

¹ Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

² Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина, г. Бийск, Россия

В работе проводится краткий обзор результатов теоретического анализа возможного влияния поверхностного слоя и поверхностной магнитной анизотропии на свойства ферромагнитных нанобъектов в виде сферических и цилиндрических частиц, а также тонких пластинок. Показан характер зависимости критических параметров (абсолютной однодоменности, критического поля разрушения однодоменного состояния) квазидоменных частиц от толщины низко- и высокоанизотропного поверхностного слоя. Установлено, что учет поверхностного слоя меняет функциональный вид зависимости критерия абсолютной однодоменности для квазидоменных частиц. При определенных условиях это может приводить к существенному изменению их радиуса абсолютной однодоменности и резкому увеличению или уменьшению их коэрцитивной силы. В статье освещен вопрос о том, как изменяется величина критического поля разрушения однодоменного состояния в зависимости от материала поверхностного слоя. Показана зависимость распределения намагниченности в прямоугольных нанопластинках от типа поверхностной магнитной анизотропии. Установлено, что влияние поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» не существенно в случаях чрезвычайно низкой или чрезвычайно высокой внутриобъемной анизотропии образца. Оно играет значительную роль при некоторых промежуточных значениях внутриобъемной анизотропии. Указана значимость поверхностной анизотропии типа «легкая ось» для материалов с любыми значениями внутриобъемной анизотропии.

Также в работе проведен анализ возможности магнитной записи на блоховских доменных границах. Описан механизм такой записи, указаны возможные пути уменьшения отрицательного влияния поверхности на процесс магнитной записи. Теоретические выводы подтверждаются результатами численного эксперимента. Вопросы, освещенные в работе, могут быть полезны широкому кругу исследователей и разработчиков в области микроэлектроники.

Ключевые слова: ферромагнетик, однородно намагниченное состояние, поверхностная анизотропия, доменная структура, блоховская граница

ВВЕДЕНИЕ

Наличие поверхности приводит к формированию поверхностной магнитной анизотропии у любого магнетика. Поверхностная анизотропия формируется в связи с технологическими поверхностными нарушениями структуры и снижением локальной кристаллографической симметрии атомов поверхностного слоя материала. Именно влиянием поверхностной анизотропии можно объяснить часто наблюдаемое существенное различие между теоретически возможными и реализуемыми на практике функциональными параметрами изделий из магнитных материалов.

С уменьшением размера магнетиков увеличивается удельный вес поверхности, а, следовательно, возрастает роль поверхностной магнитной анизотропии. Учет ее возможного влияния на микромагнитное поведение магнитных материалов особенно важен в случае мелких частиц и тонких пленок, в частности, в случае все более тонких слоев используемых для магнитной записи.

Кроме магнитной записи, частицы малых размеров достаточно широко используются и в рабочих узлах других технических устройств. Поверхность, являясь

естественным дефектом структуры, вносит весомый вклад в характеристики этих достаточно мелких рабочих узлов.

Несмотря на то, что к вопросу влияния поверхности на магнитные характеристики материалов приковано внимание физиков-теоретиков и физиков-практиков уже достаточно длительное время, изучение вклада поверхностной анизотропии в формирование доменных структур в магнетиках требуют уточнения. С развитием вычислительной техники в современной физике твердого тела при изучении различных физических систем становится все более приоритетным использование компьютерного моделирования. Создание адекватных физических и математических моделей и эффективных численных методик, позволяющих получить достаточно обоснованное представление об исследуемом объекте, представляется в настоящее время принципиально важным.

К настоящему времени влияние размеров и формы на свойства ферромагнитных объектов изучены достаточно подробно на примерах тонких пленок и мелких частиц. При этом наибольшее внимание было уделено эффектам, связанным с собственно

размерами ферромагнетика и с магнитной анизотропией формы образцов. Относительно слабо изучено влияние поверхности на микромагнетизм нанообъектов. Сложившиеся к настоящему времени представления о микромагнетизме ферромагнитных нанообъектов, как правило, не учитывают влияние поверхностного слоя и поверхностной анизотропии на их магнитные свойства. Обычно считается, что влияние поверхности распространяется на приповерхностный слой, толщина которого определяется многими факторами и варьируется от единиц до сотен тысяч атомных слоев. Еще Л. Неель [1] и У.Ф. Браун [2] указали на существование особой поверхностной магнитной анизотропии в ферромагнетиках, вызванной нарушением симметрии окружения приповерхностных атомов. Однако проявление этой сравнительно слабой анизотропии обычно подавляется размагничивающими полями и значительной кристаллографической анизотропией. По оценкам Л. Нееля поверхностная анизотропия может проявляться только в очень малых ферромагнитных частицах ~ 100 Å. Именно по этой причине особые поверхностные магнитные свойства в большей степени характерны для нанообъектов [3, 4].

Как указывает Стругацкий М.Б с соавторами [5–8], существует класс магнитных материалов, в которых поверхностная анизотропия должна активно проявляться не только в пленках, но даже в приповерхностной области массивных монокристаллов. Это антиферромагнетик со слабым ферромагнетизмом и магнитной анизотропией типа «легкая плоскость», к которым принадлежит, например, борат железа. Влияние поверхности в таких кристаллах не будет подавляться ввиду малости размагничивающих полей, пропорциональных слабой намагниченности, и практического отсутствия кристаллографической анизотропии в базисной плоскости. На существование поверхностной магнитной анизотропии на небазисных гранях таких кристаллов было указано в работах [5–8] при магнитных исследованиях гематита изоструктурного борату железа. Поверхностная анизотропия приводит к образованию в приповерхностной области кристалла неоднородного магнитного слоя. Как указывает Б. Стругацкий, в случае слабых ферромагнетиков поверхностный магнетизм проявляется по существу в виде некоего переходного слоя. Условия для образования переходного слоя возникают и в приповерхностной области ортоферритов эрбия и тербия вблизи температуры ориентационного перехода [5, 7].

Изучению вопроса о влиянии поверхности на различные процессы, проходящие в магнетиках и их характеристики, в современной специализированной литературе уделяется достаточное внимание. В работе [9] авторы изучают магнитную анизотропию системы нанокристаллических частиц феррита бария. Как

указано, поверхностная анизотропия обусловлена наличием структурно-дефектной открытой поверхности. При этом ее влияние тем значительнее, чем меньше частица.

Авторы определяют эффективную константу анизотропии как сумму констант различных анизотропий – магнитостатической, поверхностной и анизотропии формы. При этом авторы подчеркивают, что «... величина вклада поверхностной анизотропии неоднозначна и может быть выяснена лишь путем анализа результатов экспериментального исследования эффективной анизотропии» [9]. В работе был учтен вклад поверхностной анизотропии в эффективную константу анизотропии: для рассматриваемого образца установлен ее отрицательный вклад в эффективную константу анизотропии.

Важным результатом работы [9] является то, что дана оценка доли интегрального вклада поверхностной магнитной анизотропии (17% от эффективной константы при 300 К) и это «... не отражает в достаточной степени ее значимость». Поэтому в работе рассчитывалась «... зависимость вклада поверхностной анизотропии в K_{ef} от дисперсности системы» (прим. K_{ef} – константа эффективной анизотропии). Сопоставление распределения частиц по полям анизотропии и размерам позволило авторам оценить зависимость вклада поверхности в эффективной константе от дисперсности системы. Установлено, что для частиц толщиной в 20 нм при 300 К, этот вклад составляет около 60% , а в диапазоне 40-160 нм он монотонно убывает, изменяясь практически на порядок.

Во многих работах влияние поверхностной анизотропии не учитывается [10–12]. При этом одни авторы считают, что присутствие поверхности не оказывает существенного влияния на рассматриваемую характеристику, или влияние распространяется лишь на отдельные элементы (например, лишь на доменную границу [10, 12]); другие же утверждают, что включение поверхностной энергии в расчетные формулы достаточно сложно, а порой и невозможно, по ряду причин. В работе [9] сказано, что эффекты поверхностной анизотропии проявляются лишь в очень тонких пленках.

Таким образом, приведенный здесь фрагмент анализа библиографии дает возможность судить о том, что изучение вопроса о влиянии поверхности на магнитные свойства нанообъекта носит точечный характер. При этом такое изучение обычно ограничивается частными случаями, не давая полной картины характера влияния поверхности. Нередко полученные результаты не согласуются между собой, а иногда и противоречат друг другу. Поэтому адекватно оценивать потенциальные возможности их использования в устройствах микроэлектроники достаточно сложно.

Одним из примеров прикладной задачи, приведенных в работе моделей, является моделирование магнитной записи на доменных границах монокристаллической пленки. Идея такой магнитной записи в общем виде была высказана еще в 80-х годах прошлого столетия М. Сиаккоу [13] в монографии «Физические основы записи информации», однако работ, в которых эта идея получила свое развитие, не было до 2009 года. Нашей научной группой впервые проведено микромагнитное моделирование магнитной записи на доменных границах в присутствии поверхностной анизотропии. Установлено, что поверхностная анизотропия обеих типов приводит к увеличению внешнего поля, необходимого для формирования информационных битов в дорожке записи, а поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» понижает плотность записи. Смоделированы способы устранения этих и ряда других негативных факторов. Так для устранения эффекта внешнего записывающего поля, предлагаем изменить его направление, отклонив от ортогонального к плоскости дорожки направления к продольному. Это снижает поле записи для всех типов поверхностной анизотропии, причем для анизотропии типа «легкая плоскость», более чем в 10 раз.

В связи с этим целью настоящей работы стала попытка обобщить значимые результаты нашей научной группы в области изучения эффектов, связанные с поверхностным слоем и поверхностной магнитной анизотропией ферромагнитных нанообъектов.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СВОЙСТВА ЧАСТИЦ СФЕРИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

В наших первых работах [14–24] влияние поверхностного слоя на свойства ферромагнитных наночастиц сферической и цилиндрической формы рассматривалось на основе представлений, разработанных У.Ф. Брауном и Е.И. Кондорским [25]. Вариационная задача решалась посредством минимизации полного термодинамического потенциала частиц методом Ритца и точными численными расчетами. Критическое поле разрушения однородно намагниченного состояния (ОНС) определялось как поле, в котором происходит разрушение локального минимума полного термодинамического потенциала. При достаточно тонком поверхностном слое и малом изменении в нем магнитных параметров были получены приближенные аналитические выражения для радиуса абсолютной однодоменности R_c и критического поля разрушения однородно намагниченного состояния H_0 [17, 20, 24]. В случае изменения в поверхностном слое лишь константы магнитной анизотропии для сферических частиц:

$$R_c \approx R_{c0} (1 - 0,12 \Delta K / (M_s \sqrt{A}) - l), \quad (1)$$

$$H_0 \approx H_{00} + 7,4 \Delta K / M_s R, \quad (2)$$

где R_{c0} и H_{00} – радиус абсолютной однодоменности и критическое поле разрушения однородно намагниченного состояния для однородной частицы соответственно, l – толщина поверхностного слоя, R – радиус частицы, A – константа обменного взаимодействия, ΔK – изменение константы магнитной анизотропии в поверхностном слое, M_s – константа намагниченности насыщения. Таким образом, учет поверхностного слоя меняет функциональный вид зависимости критерия абсолютной однодоменности ($R_{c0} \approx 1,4\sqrt{A}/M_s$ [26]).

В таблице 1 показано влияние аморфизации поверхностного слоя на критические поля разрушения ОНС сферических частиц SmCo_5 .

Табл. 1. Критические поля разрушения ОНС (в кЭ) для сферических частиц SmCo_5 радиуса 18 нм с аморфным поверхностным слоем разной толщины l

l/R	0,00	0,01	0,05	0,10	0,30	0,50
H_0 , кЭ	400	370	170	67	6,5	0,35

Из таблицы видно, что даже очень тонкий менее анизотропный поверхностный слой значительно облегчает разрушение ОНС и формирование развитого зародыша обратной намагниченности. При этом радиус абсолютной однодоменности резко уменьшается.

В таблицах 2, 3 показано влияние более высокоанизотропного поверхностного слоя на значения H_0 .

Табл. 2. Критические поля разрушения ОНС (в кЭ) для сферических частиц радиуса R (в нм) при объемной концентрации высокоанизотропного слоя 0,19 (оси легкого намагничивания ядра и поверхностного слоя частицы совпадают) [21]

Ядро частицы	Поверхностный слой	R , нм			
		20	50	100	300
Co	SmCo_5	4,59	0,77	0,19	0,02
Co	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	3,78	0,74	0,19	0,02
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	SmCo_5	15,49	2,85	0,74	0,08
Fe	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	6,23	1,50	0,41	0,05

Таблица 3. Критические поля разрушения ОНС (в кЭ) для цилиндрических частиц Co радиуса R с поверхностным слоем SmCo_5 (оси легкого намагничивания ядра и поверхностного слоя направлены вдоль оси симметрии частицы) [21]

R , нм	20	50	75	100
l , нм				
0	6,855	6,113	6,035	6,008
1	9,607	6,572	6,240	6,124
2	9,608	6,572	6,240	6,124
19	9,608	6,572	6,240	6,124

Видно, что влияние более анизотропного поверхностного слоя выражено слабее. Поверхностный слой толщиной в несколько атомных слоев вызывает определенное изменение критического поля разрушения ОНС, но дальнейшее

увеличение его толщины слабо сказывается на величине H_0 до тех пор, пока радиус низкоанизотропного ядра частицы не станет много меньше радиуса действия обменного взаимодействия.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОВЕРХНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ДОМЕННУЮ СТРУКТУРУ

Разработка численной (математической) методики расчета распределения намагниченности в одноосных магнетиках с учетом различных типов поверхностной магнитной анизотропии была проведена в работах [17, 27, 28, 29]. Величина поверхностной магнитной анизотропии определялась по формуле, предложенной Неелем [1]:

$$K_s = l_0 \pi M_s^2, \quad (3)$$

где $l_0 = 10^{-6}$ см. Для иллюстрации влияния поверхностной анизотропии на доменную структуру можно рассмотреть нанопластинку с параметрами $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($A=1.7 \times 10^{-6}$ Эрг/см, $M_s = 1275$ Гс, $K_1 = 4.5 \times 10^7$ Эрг/см³, $K_2 = 6.6 \times 10^6$ Эрг/см³) и размерами по координатным осям x , y и z - $40 \times 20 \times 5$ нм соответственно. Ось легкого намагничивания (ОЛН) ориентирована по оси z . Величина внутриобъемной анизотропии нанопластинки варьировалась путем умножения констант K_1 и K_2 , характерных для $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, на коэффициент $N > 0$. В случае низкой внутриобъемной анизотропии (при $N = 10^{-4}$), из размагниченого начального состояния, которое моделировалось случайным выбором ориентации векторов намагниченности в узлах сетки, большинство выборок при $K_s = 0$ приводят к двухдоменной вихревой структуре (рисунок 1 сверху). Если в этом состоянии «включить» поверхностную анизотропию типа «легкая плоскость», то вид доменной структуры практически не меняется. Включение же поверхностной анизотропии типа «легкая ось» приводит к существенным изменениям: происходит образование двух доменов с ориентацией намагниченности вдоль ОЛН (рисунок 1 снизу). Кроме структуры, показанной на рисунке 1 сверху, при $N = 10^{-4}$ возможно также существование равновесных структур, подобных структуре Ландау и квазидоменных структур с намагниченностью, ориентированной преимущественно параллельно плоскости пластинки (поперек ОЛН). И в этих случаях включение поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» (снизу) существенного влияния на поле намагниченности не оказывает. Включение поверхностной анизотропии типа «легкая ось» приводит к формированию однодоменной структуры, векторы намагниченности в которой ориентированы вдоль ОЛН.

В случае более высокой внутриобъемной анизотропии ($N = 0.5$) при $K_s = 0$ случайные выборки после установления равновесия приводят к однодоменной, двухдоменной или трехдоменной

полосовым структурам с блоховскими границами и ориентацией намагниченности в доменах вдоль ОЛН. Причем в последнем случае, возможно вращение векторов намагниченности в доменных границах, как в одном направлении, так и в противоположных.

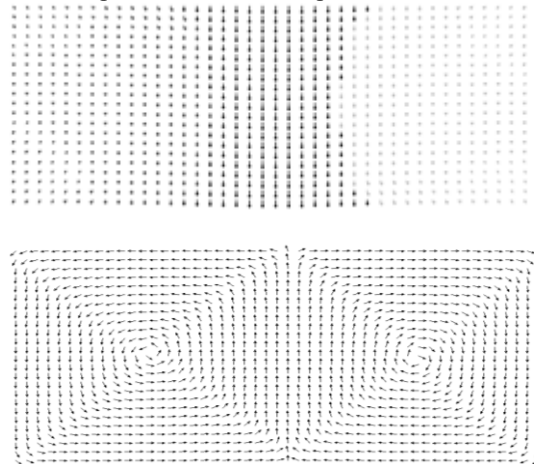


Рис. 1. Доменные структуры при $N = 10^{-4}$ без учета (сверху) и с учетом поверхностной анизотропии типа «легкая ось»

При «включении» поверхностной анизотропии любого типа однодоменная структура не изменяется. В двухдоменной структуре при «включении» поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» изменяется тип доменной границы с блоховской на неелевскую, а анизотропия типа «легкая ось» существенных изменений не вносит.

Изменение в трехдоменной структуре при «включении» поверхностной анизотропии происходит по-разному. Если вращение векторов в блоховских границах имеет противоположное направление, то «включение» поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» приводит систему в двухдоменное состояние с неелевской границей. Легкоосная поверхностная анизотропия в таком случае существенного влияния не оказывает. Если вращение векторов в доменных границах имеет одинаковое направление, то при «включении» поверхностной анизотропии любого типа система переходит в однодоменное состояние.

Качественно отличающееся поведение почти одинаковых трехдоменных структур объясняется различной устойчивостью этих структур в зависимости от направлений вращения векторов намагниченности в доменных границах к возмущению, которое вносится включением поверхностной анизотропии.

В случае высокой внутриобъемной анизотропии ($N = 5$) получаются доменные структуры, подобные тем, что получены для $N = 0.5$, но с более узкими доменными границами. В отличие от предыдущего случая, включение поверхностной анизотропии любого типа ни на одну из них заметного влияния не оказывает.

Таким образом, влияние поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» на доменные структуры не существенно в случаях низкой или очень высокой внутриобъемной анизотропии. Если же параметры внутриобъемной анизотропии имеют некоторые промежуточные значения, то поверхностная анизотропия типа «легкая плоскость» может оказаться важным фактором, и должна учитываться при расчетах доменных структур. Влияние поверхностной анизотропии типа «легкая ось» существенно для материалов как с умеренными значениями внутриобъемной анизотропии, так и для материалов с малыми ее значениями.

МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ В ПРИСУТСТВИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

В работах [29, 30] мы провели анализ возможности магнитной записи на блоховских доменных границах монокристаллической нанопластики $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ без учета поверхностной анизотропии ($K_s = 0$). Наличие достаточно большой поверхностной анизотропии $K_s > 0$ приводит к модификации равновесной доменной структуры: наряду с блоховскими в пластинке формируются неелевские доменные границы не пригодные для магнитной записи (см. рисунок 2). На рисунке 2 вторая слева граница вихревая, а остальные неелевские.

Неелевские границы можно превратить в блоховские, если над ними включить ортогонально плоскости пластинки сравнительно небольшое внешнее поле H_z . Для перемагничивания блоховских границ при $K_s > 0$ (при формировании магнитной записи) требуется поле примерно в 10 раз больше, чем соответствующее поле при $K_s = 0$.

Это объясняется разными механизмами перемагничивания доменных границ [31, 32]. При $K_s = 0$ под действием внешнего поля блоховская граница вытесняется на одну из сторон пластинки. Затем появляется перемагниченный участок блоховской границы (рисунок 3 а, б).

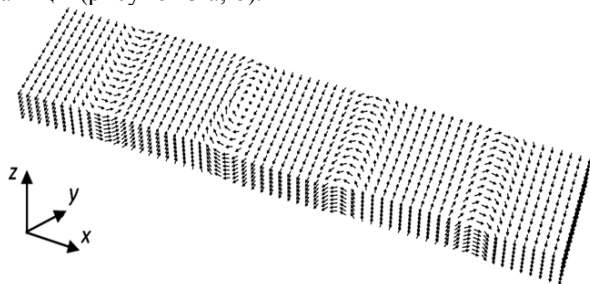


Рис. 2. Доменная структура в пластинке $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ размером $100 \times 20 \times 10$ нм при $K_s > 0$

Это объясняется разными механизмами перемагничивания доменных границ [31, 32]. При $K_s = 0$ под действием внешнего поля блоховская граница вытесняется на одну из сторон пластинки. Затем

появляется перемагниченный участок блоховской границы (рисунок 3 а, б).

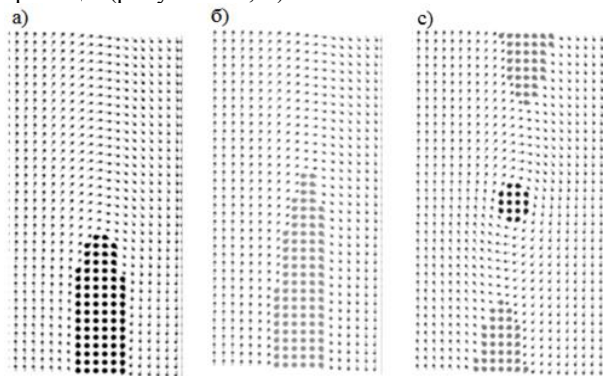


Рис. 3. Перемагничивание блоховской границы при $K_s = 0$ во внешнем поле H_z : (а) – выдавливание старой границы; (б) – появление новой; (в) при $K_s > 0$ в поле H_z (темные точки - направление векторов намагниченности против поля H_z , а серые - по полю H_z)

При $K_s > 0$ ядро перемагничиваемой блоховской границы остается в центре пластинки, а зародыши перемагничивания появляются сразу с двух сторон, сжимая границу (рисунок 3 в). Такое перемагничивание сопровождается значительным ростом плотности обменной энергии границы по сравнению со случаем $K_s = 0$ (более, чем в 10 раз), поэтому для её перемагничивания требуется большое внешнее поле.

Если вектор напряженности внешнего поля отклонить от ортогонального положения на 10 градусов к оси Ox , то величина напряженности поля, необходимого для перемагничивания границы, во всех трех случаях уменьшается (при $K_s < 0$, $K_s = 0$, $K_s > 0$). В первых двух случаях уменьшение напряженности незначительно, в третьем же случае, напряженность уменьшилась более чем в 10 раз. Такой эффект объясняется появлением x -компоненты внешнего поля, под действием которой часть вихревой границы, ориентированная по этой компоненте, возрастает за счет части, ориентированной в противоположном направлении. В результате реализуется механизм вытеснения границы, для случая $K_s = 0$.

Таким образом, мы видим, что в данном случае поверхностная магнитная анизотропия существенно влияет на микромагнитное поведение нанопластики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении работы можно выделить несколько важных тезисов:

1. Учет поверхностного слоя меняет функциональный вид зависимости критерия абсолютной однодоменности для квазиоднодоменных частиц. При определенных условиях это может приводить к существенному изменению их радиуса абсолютной однодоменности и резкому увеличению или уменьшению их коэрцитивной силы.

2. Даже очень тонкий менее анизотропный поверхностный слой значительно облегчает разрушение ОНС (см. таблицу 1) и формирование развитого зародыша обратной намагниченности. При этом радиус абсолютной однодоменности резко уменьшается.

3. Влияние более анизотропного поверхностного слоя выражено слабее (см. таблицу 2, 3). Поверхностный слой в несколько атомных слоев вызывает определенное изменение критического поля разрушения ОНС, но дальнейшее увеличение его толщины слабо сказывается на величине H_0 до тех пор, пока радиус низкоанизотропного ядра частицы не станет много меньше радиуса действия обменного взаимодействия.

4. Поверхностная анизотропия K_s способна существенно изменять микромагнитное поведение частиц. При $K_s < 0$ заметно облегчается разрушение ОНС и формирование зародыша обратной намагниченности возможно до достижения поля магнитной анизотропии материала. В этом случае предел коэрцитивной силы недостижим даже на идеальных монокристаллических частицах.

5. Влияние поверхностного слоя и поверхностной анизотропии не исчезает даже при стремлении внешнего радиуса частицы к бесконечности. Поэтому поверхностные эффекты вполне могут конкурировать с влиянием объемных неоднородностей материала в случае крупных частиц и массивных образцов.

6. Перечисленные выше выводы качественно подобны как для сферических, так и для цилиндрических частиц. Поэтому их можно использовать при анализе свойств реальных порошковых ансамблей.

7. Учет влияния поверхностного слоя позволяет объяснить существенное отличие реально достижимых значений коэрцитивной силы постоянных магнитов от теоретического предела.

8. В случае прямоугольных тонких пластин с осью легкого намагничивания направленной нормально плоскости образцов, установлено, что учет поверхностной анизотропии типа может приводить к качественному изменению вида доменных границ и самих доменных структур. Причем, если поверхностная анизотропия имеет тип «легкая плоскость», влияние не существенно в случаях малой или очень большой внутриобъемной анизотропии образца. Если же параметры внутриобъемной анизотропии имеют некоторые умеренные значения, то поверхностная анизотропия такого типа может оказаться важным фактором и должна учитываться при расчетах доменных структур. Влияние поверхностной анизотропии типа «легкая ось» существенно для материалов с низкой и умеренной внутриобъемной анизотропии.

9. Установлено, что магнитная запись на доменных границах монокристаллической пленки

возможна и в присутствии поверхностной анизотропии разных типов. Основным негативным фактором влияния поверхностной анизотропии типа «легкая плоскость» является тенденция к увеличению размера доменов в дорожке записи. Также в случаях присутствия поверхностной анизотропии обоих типов существенным недостатком является увеличение напряженности внешнего локального поля, необходимого для перемагничивания доменной границы.

Выводы, представленные в данной работе, обладают новизной, могут представлять интерес как для разработчиков новых магнитных материалов и устройств на их основе, так и для специалистов, занимающихся проблемами микромагнетизма. Следует ожидать, что предложенные авторами результаты исследования магнитной записи на доменных границах будут полезны для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в этой области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neel, L., "Anisotropie magnetique superficielle et surstructures d'orientation," *Journal de Physique et Le Radium*, 1954, vol. 15, no. 4, pp. 225–239.
2. Браун, У.Ф. Микромагнетизм [Текст] / У.Ф. Браун // Пер. с англ. А.Г. Гуревич. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 160 с.
3. Зубов, В.Е. Поверхностная перпендикулярная магнитная анизотропия в аморфном ферромагнетике, индуцируемая адсорбцией, протекающей по механизму образования водородных связей [Текст] / В.Е. Зубов, Н.Л. Левшин // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 90, вып. 4. – С. 292–296.
4. Ольховик, Л.П. Эффекты взаимодействующих наночастиц высокоанизотропного ферромагнетика [Текст] / Л.П. Ольховик, З.И. Сизова, Е.В. Шуринова, А.С. Камзин // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, вып. 2. – С. 365–369.
5. Кринчик, Г.С. Поверхностный магнетизм бората железа [Текст] / Г.С. Кринчик, В.Е. Зубов, В.Н. Селезнев, М.Б. Стругацкий // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1988. – Т. 94, № 10. – С. 290–300.
6. Панкратов, А.К. Газотранспортный синтез и морфология изометричных монокристаллов бората железа [Текст] / А.К. Панкратов, М.Б. Стругацкий, С.В. Ягупов // Ученые записки Таврического Национального Университета. Физика. – 2007. – Т. 20(59), №1. – С. 64–73.
7. Прокопов, А.Р. Наблюдение доменной структуры на небазисных гранях кристаллов

- FeBO₃ [Текст] / А.Р. Прокопов, В.Н. Селезнев, М.Б. Стругацкий, С.В. Ягулов // Журнал технической физики. – 1987. – Т. 57, № 10. – С. 2051–2053.
8. Стругацкий, М.Б. Изометричные кристаллы бората железа: магнитные и магнитоакустические эффекты [Текст] / М.Б. Стругацкий // Автореферат дисс. на соискание уч. степени д. ф.-м. н. – М. – 2008. – 42 с.
9. Голубенко, З.В. Магнитная анизотропия системы нанокристаллических частиц BaO₆Fe₂O₃ [Текст] / З.В. Голубенко, А.С. Камзин, Л.П. Ольховик, Ю.А. Попков, З.И. Сизова // Физика твёрдого тела. – 1998. – Т. 40, № 10. – С. 1894–1897.
10. Береснев, В.И. Влияние магнитной анизотропии на подвижность доменных границ в тонких магнитных пленках [Текст] / В.И. Береснев, Б.Н. Филиппов, Л.Г. Корзунин // Письма в журнал технической физики. – 1998. – Т. 24, № 2. – С. 42–47.
11. Корзунин, Л.Г. Статические свойства асимметричных вихреподобных доменных стенок в магнитно-одноосных пленках больших толщин [Текст] / Л.Г. Корзунин, Б.Н. Филиппов, Ф.А. Кассан-Оглы, И.А. Чайковский // Физика твёрдого тела. – 2006. – Т. 48, вып. 9. – С. 1636–1640.
12. Филиппов, Б.Н. О новых сценариях нелинейной динамической перестройки доменных границ в магнитно-одноосных пленках с плоскостной анизотропией [Текст] / Б.Н. Филиппов, Л.Г. Корзунин // Письма в журнал технической физики. – 2001. – Т. 27, вып. 9. – С. 36–41.
13. Сиаккоу, М. Физические основы записи информации [Текст] / М. Сиаккоу // Перевод с немецкого. – М.: Связь. – 1980. – 192 с.
14. Ерёмин, А.М. Моделирование гистерезиса одноосного высокоанизотропного магнетика с некогерентным игольчатым выделением с учётом магнитостатических взаимодействий [Текст] / А.М. Ерёмин, Н.А. Манаков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2006. – Т. 3, № 4. – С. 22–27.
15. Ерёмин, А.М. Численное моделирование зародышеобразования обратных доменов на дефектах в высокоанизотропных магнетиках [Текст] / А.М. Ерёмин, Н.А. Манаков, Ю.В. Толстобров // Материалы Всероссийской школы-семинара "Магнитная анизотропия и гистерезисные свойства редкоземельных сплавов". – Тверь, 2003. – С. 3–10.
16. Ерёмин, А.М. Численное моделирование зародышеобразования обратных доменов в высокоанизотропных магнетиках [Текст] / А.М. Ерёмин, Н.А. Манаков, Ю.В. Толстобров // Известия вузов. Физика. – 2002. – Т. 44, № 8 (Приложение). – С. 26–29.
17. Крюков, И.И. Микромагнетизм двухфазных квазиоднодоменных частиц [Текст] / И.И. Крюков, Н.А. Манаков // Физика металлов и металловедение. – 1983. – Т. 56, вып. 1. – С. 5–8.
18. Крюков, И.И. Микромагнетизм двухфазных квазиоднодоменных частиц [Текст] / И.И. Крюков, Н.А. Манаков // Физика магнитных материалов. – Калинин: Изд-во Калинин. ун-та, 1982. – С. 38–43.
19. Крюков, И.И. Влияние поверхностной неоднородности на магнитное поведение мелких частиц [Текст] / И.И. Крюков, Н.А. Манаков, В.Б. Садков // Физика магнитных материалов. – Калинин: Изд-во Калинин. ун-та, 1988. – С. 4–18.
20. Крюков, И.И. Микромагнетизм двухфазных квазиоднодоменных сферических частиц [Текст] / И.И. Крюков, Н.А. Манаков, В.Б. Садков // Физика металлов и металловедение. – 1985. – Т. 59, вып. 3. – С. 455–462.
21. Крюков, И.И. Влияние высокоанизотропного поверхностного слоя на перемагничивание квазиоднодоменных частиц [Текст] / И.И. Крюков, Н.А. Манаков, В.Б. Садков, В.Н. Шелковников // Физика магнитных материалов. – Калинин: Изд-во Калинин. ун-та, 1986. – С. 36–40.
22. Манаков, Н.А. Численное моделирование процесса перемагничивания неоднородных цилиндрических квазиоднодоменных частиц [Текст] / Н.А. Манаков, И.В. Лебедева, Ю.В. Толстобров // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2004. – № 10. – С. 119–122.
23. Krjukov, I.I., and Manakov, N.A., "To the question about the quasi – single domain state of two – phase particles," Abstracts The 10 th International colloquium on magnetic films and surfaces, Yokohama, Japan, September 13–16, 1982, pp. 9–15.
24. Krjukov, I.I., and Manakov, N.A., Sadkov, V.B., "Micromagnetism of two-phase quasi-single domain particles," Proceedings International Conference on Magnetism of rare-earths and actinides, Bucharest, 1983, pp. 257–260.
25. Кондорский, Е.И. Микромагнетизм и перемагничивание квазиоднодоменных частиц [Текст] / Е.И. Кондорский // Известия АН СССР, серия Физика. – 1978. – Т. 42. – С. 1638–1645.
26. Манаков, Н.А. Микромагнитное моделирование влияния поверхностной

- анизотропии на доменные структуры в нанопластинке [Текст] / Н.А. Манаков, Ю.В. Толстобров, Г.С. Шилинг // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 10. – С. 130–133.
27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012613793 «Расчет трехмерного поля намагниченности в пластинке с поверхностной анизотропией (Ks_3D)» от 23.04.2012. Авторы: Ю. В. Толстобров, Г.С. Шилинг, Д.Ю. Коротких
 28. Шилинг, Г.С. Математическое и компьютерное моделирование при решении задач о распределении намагниченности в кристаллах [Текст] / Г.С. Шилинг // Естественные и технические науки. – 2007. – №2(28). – С. 252–253.
 29. Шилинг, Г.С. Влияние поверхностной анизотропии на формирование доменных структур в одноосных магнетиках [Текст] / Г.С. Шилинг // Автореферат канд. дисс. – Санкт-Петербургский государственный университет: Санкт Петербург. – 2013. – 18 с.
 30. Шилинг, Г.С. Возможность магнитной записи на доменных границах монокристаллической пленки [Текст] / Г.С. Шилинг // Новое слово в науке: стратегии развития: материалы VIII Междунар. науч.- практ. конф. (Чебоксары, 7 март 2019 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2019. – С. 9–11.
 31. Толстобров, Ю.В. Влияние поверхностной анизотропии типа " легкая плоскость" на магнитную запись на доменных границах [Текст] / Ю.В. Толстобров, Н.А. Манаков, Г.С. Шилинг // Письма в журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, вып. 5. – С. 38–42.
 32. Tolstobrov, Yu.V., and Manakov, N.A., Shiling, G.S., Korotkih, D.Yu., “Stability of Magnetic Recording on Domain Walls,” Technical Physics Letters, 2012, vol. 38, no. 12, pp. 1070–1072.

Сведения об авторах:

Манаков Николай Александрович
 профессор кафедры физики и методики преподавания физики
 Оренбургского государственного университета, доктор физико-математических наук, 01.04.11, профессор
 460018, г. Оренбург, ул. Терешковой, 10/2, кв. 131
 Тел. +7 961 934 31 70
 E-mail: manakov2004@mail.ru

Ерёмин Александр Михайлович
 доцент кафедры математики, физики, информатики Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина, кандидат физико-математических наук, 01.04.07, доцент
 659300, г. Бийск, ул. Петра Мерлина, 2, кв. 331.
 Тел. + 7 923 711 26 24
 E-mail: eam77@yandex.ru

Шилинг Галина Сергеевна
 доцент кафедры математики, физики, информатики Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина, кандидат физико-математических наук, 01.04.11
 659335, г. Бийск, пер. Коммунарский, 31, кв. 32
 Тел. +7 913 099 20 80
 E-mail: shilinggs@mail.ru

Захаров Павел Васильевич
 профессор кафедры математики, физики, информатики Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина, доктор физико-математических наук, 01.04.07, доцент
 659316, г. Бийск, ул. Михаила Ломоносова, 40, кв. 99
 Тел. +7 923 648 06 74
 E-mail: zakharovpvl@rambler.ru

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SURFACE INFLUENCE ON MAGNETIC PROPERTIES OF SINGLE-AXIAL FERROMAGNETIC NANO OBJECTS USING THE IMPROVED THREE-DIMENSIONAL MODEL

N. A. Manakov¹, A. M. Eremin², G. S. Shiling², P. V. Zakharov²

¹Orenburg State University, Orenburg, Russia

²The Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Biysk, Russia

The work briefly reviews the results of theoretical analysis of the possible influence of the surface layer and surface magnetic anisotropy on the properties of ferromagnetic nano-objects in the form of spherical and cylindrical particles, as well as thin plates. Shows the dependence of the critical parameters (absolute single-domain, single domain critical field failure state) quasidomain particles of low anisotropic and high anisotropic surface layer. It was found that the inclusion of the surface layer changes depending on the functional form of the absolute single-domain criterion for quasidomain particles. Under certain conditions this may lead to a significant change of their radius of absolute single-domain and a sharp increase or decrease of the coercive force. The article blessed question about how the field changes the critical fracture single-domain state, depending on the surface layer material.

The dependence of the magnetization distribution in a rectangular nanoplatelets on the type of surface magnetic anisotropy. It is found that the influence of surface anisotropy of the «easy-plane» is not essential in cases of extremely low or extremely high anisotropy of intra sample. It plays a significant role in some of the intermediate values of intra anisotropy. It contains the importance of surface anisotropy of the «easy axis» for materials with any values of intra anisotropy.

The paper also analyzes the possibility of magnetic recording at the Bloch domain boundaries. The mechanism of such a recording is described, possible ways to reduce the negative effect of the surface on the magnetic recording process are indicated. The theoretical conclusions are confirmed by the results of the numerical experiment. The issues consecrated in the work can be useful to a wide range of researchers and developers in the field of microelectronics.

Keywords: ferromagnetic, homogeneously magnetized state, surface anisotropy, domain structure, Bloch boundary.

References

1. Neel, L., "Anisotropie magnetique superficielle et surstructures d'orientation," Journal de Physique et Le Radium, 1954, vol. 15, no. 4, pp. 225–239.
2. Brown, W.F., "Micromagnetism," Per. from English A.G. Gurevich, M.: Science, The main edition of the physical and mathematical literature, 1979, 160 p.
3. Zubov, V.E., and Levshin, N.L., "Surface perpendicular magnetic anisotropy in an amorphous ferromagnet induced by adsorption proceeding by the formation of hydrogen bonds," Letters in the journal of experimental and theoretical physics, 2009, v. 90, no. 4, pp. 292–296.
4. Olkhovik, L.P., and Sizova, Z.I., Shurinova, E.V., Kamzin, A.S., "Effects of interacting nanoparticles of a highly anisotropic ferrimagnet," Solid state physics, 2010, v. 52, no. 2, pp. 365–369.
5. Krinchik, G.S., and Zubov, V.E., Seleznev, V.N., Strugatsky, M.B., "Surface magnetism of iron borate," Journal of experimental and theoretical physics, 1988, v. 94, no. 10, pp. 290–300.
6. Pankratov, A.K., and Strugatsky, M.B., Yagupov, S.V., "Gas transport synthesis and morphology of isometric iron borate single crystals," Scientific notes of the Taurida National University, Physics, 2007, v.20 (59), no. 1, pp. 64–73.
7. Prokopov, A.R., and Seleznev, V.N., Strugatsky, M.B., Yagupov, S.V., "Observation of the domain structure on nonbasic faces of FeBO₃ crystals," Journal of Technical Physics, 1987, v. 57, no. 10, pp. 2051–2053.
8. Strugatsky, M.B., "Isometric crystals of iron borate: magnetic and magnetoacoustic effects," Abstract diss. for the competition degrees d.f.-m. n, M., 2008, 42 p.
9. Golubenko, Z.V., and Kamzin, A.S., Olkhovik, L.P., Popkov, Yu.A., Sizova, Z.I., "Magnetic anisotropy of a system of nanocrystalline particles BaO 6Fe₂O₃," Solid State Physics, 1998, v. 40, no. 10, pp. 1894–1897.
10. Beresnev, V.I., and Filippov, B.N., Korzunin, L.G., "The effect of magnetic anisotropy on the mobility of domain walls in thin magnetic films," Letters in the journal of technical physics, 1998, v. 24, no. 2, pp. 42–47.

11. Korzunin, L.G., and Filippov, B.N., Kassan-Ogly, F.A., Tchaikovsky, I.A., "Static properties of asymmetric vortex-like domain walls in magnetically uniaxial films of large thickness," *Solid State Physics*, 2006, v. 48, no. 9, pp. 1636–1640.
12. Filippov, B.N., and Korzunin, L.G., "About new scenarios of nonlinear dynamic reconstruction of domain walls in magnetically uniaxial films with planar anisotropy," *Letters in the journal of technical physics*, 2001, v. 27, no. 9, pp. 36–41.
13. Siakkou, M., "Physical basis for recording information," Translation from German, M.: Communication, 1980, 192 p.
14. Eremin, A.M., and Manakov, N.A., "Simulation of the hysteresis of a uniaxial highly anisotropic magnet with incoherent needle-like excretion taking into account magnetostatic interactions," *Fundamental problems of modern materials science*, 2006, v. 3, no. 4, pp. 22–27.
15. Eremin, A.M., and Manakov, N.A., Tolstobrov, Yu.V., "Numerical modeling of nucleation of reverse domains on defects in highly anisotropic magnets," *Materials of the All-Russian school-seminar "Magnetic anisotropy and hysteresis properties of rare-earth alloys"*, Tver, 2003, pp. 3–10.
16. Eremin, A.M., and Manakov, N.A., Tolstobrov, Yu.V., "Numerical modeling of nucleation of reverse domains in highly anisotropic magnets," *University proceedings, Physics*, 2002, v. 44, no. 8 (Appendix), pp. 26–29.
17. Kryukov, I.I., and Manakov, N.A., "Micromagnetism of two-phase quasi-single-domain particles," *Physics of metals and metal science*, 1983, v. 56, no. 1, pp. 5–8.
18. Kryukov, I.I., and Manakov, N.A., "Micromagnetism of two-phase quasi-single-domain particles," *Physics of Magnetic Materials*, Kalinin, Publishing house Kalinin, University, 1982, pp. 38–43.
19. Kryukov, I.I., and Manakov, N.A., Sadkov, V.B., "The effect of surface heterogeneity on the magnetic behavior of small particles," *Physics of Magnetic Materials*, Kalinin, Publishing house Kalinin, University, 1988, pp. 4–18.
20. Kryukov, I.I., and Manakov, N.A., Sadkov, V.B., "Micromagnetism of two-phase quasi-single-domain spherical particles," *Physics of metals and metal science*, 1985, v. 59, no. 3, pp. 455–462.
21. Kryukov, I.I., and Manakov, N.A., Sadkov, V.B., Shelkovnikov, V.N., "The effect of a highly anisotropic surface layer on the magnetization reversal of quasi-single domain particles," *Physics of Magnetic Materials*, Kalinin, Publishing house Kalinin, University, 1986, pp. 36–40.
22. Manakov, N.A., and Lebedeva, I.V., Tolstobrov, Yu.V., "Numerical modeling of the magnetization reversal process of inhomogeneous cylindrical quasi-single domain particles," *Bulletin of the Orenburg State University*, 2004, no. 10, pp. 119–122.
23. Krjukov, I.I., and Manakov, N.A., "To the question about the quasi – single domain state of two – phase particles," *Abstracts The 10 th International colloquium on magnetic films and surfaces*, Yokohama, Japan, September 13–16, 1982, pp. 9–15.
24. Krjukov, I.I., and Manakov, N.A., Sadkov, V.B., "Micromagnetism of two-phase quasi-single domain particles," *Proceedings International Conference on Magnetism of rare-earths and actinides*, Bucharest, 1983, pp. 257–260.
25. Kondorsky, E.I., "Micromagnetism and magnetization reversal of quasi-single-domain particles," *Bulletin of the USSR Academy of Sciences, series Physics*, 1978, v. 42, pp. 1638–1645.
26. Manakov, N.A., and Tolstobrov, Yu.V., Shiling, G.S., "Micromagnetic modeling of the effect of surface anisotropy on domain structures in a nanoplate," *Bulletin of the Orenburg State University*, 2009, no. 10, pp. 130–133.
27. Certificate of state registration of a computer program No. 2012613793 "Calculation of a three-dimensional magnetization field in a plate with surface anisotropy (Ks_3D)," dated 23.04.2012. Authors: Tolstobrov Yu.V., Shiling G.S., Korotkikh D.Yu.
28. Shiling, G.S., "Mathematical and computer modeling in solving problems of the distribution of magnetization in crystals," *Natural and technical sciences*, 2007, no. 2 (28), pp. 252–253.
29. Shiling, G.S., "The effect of surface anisotropy on the formation of domain structures in uniaxial magnets," *Abstract of Cand. diss.*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, 2013, 18 p.
30. Shiling, G.S., "The possibility of magnetic recording on the domain walls of a single-crystal film," *A new word in science: development strategies: materials of the VIII Intern. scientific and practical conf. (Cheboksary, March 7, 2019)*, editorial: Shirokov, O.N. [et al.], Cheboksary, Central nervous system "Interactive plus", 2019, pp. 9–11.
31. Tolstobrov, Yu.V., and Manakov, N.A., Shiling, G.S., "The effect of surface anisotropy of the "light plane" type on magnetic recording at domain walls," *Letters in the journal of technical physics*, 2011, v. 37, no. 5, pp. 38–42.

32. Tolstobrov, Yu.V., and Manakov, N.A., Shiling, G.S., Korotkih, D.Yu., “Stability of Magnetic Recording on Domain Walls,” Technical Physics Letters, 2012, vol. 38, no. 12, pp. 1070–1072.

Information about authors:

Manakov Nikolay Alexandrovich

Professor of Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Orenburg State University, Dr. Sci. (Phys.-math), 01.04.11, Full Professor 460018, Orenburg, st. Tereshkova, 10/2, apt. 131

Тел. +7 961 934 31 70

E-mail: manakov2004@mail.ru

Eremin Alexander Mikhailovich

Associate professor of Department of Mathematics, Physics, Informatics, Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, 01.04.07, Associate professor

659300, Biysk, st. Peter Merlin, 2, apt. 331.

Тел. + 7 923 711 26 24

E-mail: eam77@yandex.ru

Shiling Galina Sergeevna

Associate professor of Department of Mathematics, Physics, Informatics, Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, 01.04.07, Associate professor

659335, Biysk, per. Kommunarsky, 31, apt. 32

Тел. +7 913 099 20 80

E-mail: shilingqs@mail.ru

Zakharov Pavel Vasilievich

Professor of Department of Mathematics, Physics, Informatics, Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, Dr. Sci. (Phys.-math), 01.04.11, Associate professor

659316, Biysk, st. Mikhail Lomonosov, 40, apt. 99

Тел. +7 923 648 06 74

E-mail: zakharovpvl@rambler.ru