

на правах рукописи

Середкин Виталий Александрович

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МАГНИТНОЙ И  
МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2004

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В.Киренского  
СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Фролов Г.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Архипкин В.Г.  
кандидат физико-математических наук  
Чернов В.К.

Ведущая организация: Институт автоматики и электрометрии  
Сибирского Отделения Российской  
Академии Наук (СО РАН), г. Новосибирск

Защита состоится 28.10.2004 г. в 14.30 часов на заседании  
специализированного совета Д 003.55.02 при Институте физики им.  
Л.В.Киренского СО РАН по адресу: 660036 Красноярск, Академгородок,  
ИФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им.  
Л.В.Киренского СО РАН

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " 2004 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Аплеснин С.С.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В последнее время большое внимание уделяется поиску возможности существенного повышения пропускной способности информационных систем путем использования оптических методов обработки информации. Однако использование оптоэлектронных систем, имеющих существенные преимущества по сравнению с обычными электронными системами, во многих случаях сдерживается отсутствием эффективных оптических сред, обладающих достаточно полным комплексом необходимых характеристик. Например, фотоэмульсионные среды не допускают многократной перезаписи, электроннооптические преобразователи не обеспечивают высокой плотности записи и др.

Одним из путей повышения пропускной способности является поиск перспективных регистрирующих материалов, обеспечивающих высокую плотность и скорость записи, неразрушающее считывание, а также практически неограниченное число циклов перезаписи с возможностью оперативной обработки больших объемов информации, являются тонкие магнитные пленки (МП) различных классов.

Основы реверсивной оптической памяти были заложены в 1975-1985 гг., когда была обнаружена перпендикулярная магнитная анизотропия в пленках MnVi и в аморфных пленках сплавов редкая земля – переходной металл (РЗМ-ПМ). В результате интенсивных исследований этих материалов были созданы реверсивные магнитооптические запоминающие устройства (ЗУ) с плотностью записи  $\sim 10^8$  бит/см<sup>2</sup> термомагнитным способом (ТМЗ). В настоящее время магнитооптические ЗУ заняли достойную нишу на рынке сбыта вычислительной техники. При этом на повестку дня стал вопрос об улучшении параметров магнитооптических дисков (МОД) - уменьшения энергопотребления при записи/стирании информации, увеличения отношения сигнал/шум, быстродействия, архивоспособности и др., чтобы они могли успешно конкурировать с имеющимися новыми разработками магнитооптических ЗУ.

В связи с этим возрастает интерес к дальнейшему изучению фотоиндуцированных процессов в твердом теле, лежащих в основе процессов записи/стирания термомагнитным способом информации, и к созданию магнитопленочных материалов с новыми свойствами, максимально удовлетворяющими требованиям современной техники. Для решения этой задачи могут быть использованы как магнитопленочные материалы с неоднородной структурой (аморфное и нанокристаллическое состояние), так и многослойные пленочные структуры, в которых необычные магнитные свойства возникают за счет эффектов взаимодействия между слоями. Оба подхода были использованы в данной работе, что определяет ее актуальность и научную значимость.

**Цель работы.** Изучение особенностей механизмов термомагнитной записи информации в аморфных ферромагнитных пленках и в пленочных структурах с однонаправленной (ОА) обменной анизотропией, установить их корреляцию с магнитными свойствами исследуемых получаемых пленок и пленочных структур.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Исследовать особенности процессов термомагнитной записи дискретной и аналоговой информации на пленках TbFe, DyCo с перпендикулярной магнитной анизотропией.
2. Исследовать особенности формирования микродоменных структур при локальном воздействии на систему пленка-подложка импульсов светового излучения различной формы и длительности.
3. Исследовать процессы перемагничивания и особенности термомагнитной записи на двухслойных пленках MnNiFe-NiFe и P3M-ПМ/NiFe с однонаправленной обменной анизотропией.

**Данные положения, совместно с конкретными экспериментальными результатами и сформулированными на их основе выводами, выносятся автором на защиту.**

### **Научная новизна**

1. Впервые разработаны физические принципы и получены магнитооптические материалы для записи аналоговой информации.
2. Проведено численное и экспериментальное исследование особенностей ТМЗ информации в аморфных ферромагнитных пленках при воздействии коротких импульсов лазерного излучения ( $\tau_{ii} < 10$  нс), показана зависимость энергетической чувствительности от формы и длительности световых импульсов записи/стирания.
3. Впервые обнаружена однонаправленная анизотропия в обменносвязанной ферри-ферромагнитной пленочной структуре с ортогональным расположением эффективных намагниченностей в слоях, предложен один из механизмов ее формирования.
4. Исследованы особенности термомагнитной записи информации в пленочных структурах с однонаправленной обменной магнитной анизотропией.

### **Практическая ценность**

1. Разработана многослойная магнитооптическая структура для термомагнитной записи информации и создан макет магнитооптического диска с рабочими параметрами, отвечающими международным стандартам ISO.
2. На базе разработанного термомагнитного метода записи аналоговой информации создан прибор для визуализации и фотометрирования световых импульсных излучений в диапазоне длин волн 200-2500 нм в реальном масштабе времени.

3. Предложен новый механизм ТМЗ информации в аморфных ферромагнитных пленках при температурах много меньших температуры Кюри.
4. Предложен новый принцип ТМЗ информации на пленочных структурах РЗМ-ПМ/NiFe с однонаправленной анизотропией, позволяющий уменьшить энергозатраты при записи/стирании более чем в 100 раз.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы представлялись на конференциях и школах-семинарах различного уровня: IX Всесоюзная школа-семинар "Новые магнитные материалы для микроэлектроники", 1984г., Саранск; Международный симпозиум "Поверхностные волны в твердых телах и слоистых структурах", 1986г., Новосибирск; XXII Всесоюзная конференция по физике магнитных явлений, 1988 г., Калинин; XI Всесоюзная школа-семинар "Новые магнитные материалы микроэлектроники", 1988г., Ташкент; VII Всесоюзная конференция "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры", 1990г., Ленинград; I Байкальская международная конференция. "Магнитные материалы" (VICMM) 2001г., Иркутск; "Новые магнитные материалы для микроэлектроники". Международная школа-семинар, 2002г., Москва. "Новые магнитные материалы для микроэлектроники" Международная школа-семинар, 2004г., Москва; Euro-asian symposium "Trends in magnetism", Krasnoyarsk, Russia.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, приложения и заключения. Общий объем работы изложен на \_\_\_ страницах, включая \_\_\_ рисунков и \_\_\_ таблицы. Библиография включает в себя \_\_\_\_\_ наименований.

### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы задачи, показана практическая значимость проведенных исследований.

## **Глава I. Особенности магнитных и магнитооптических свойств пленочных систем для термомагнитного формирования микродоменных структур.**

В первой главе приведен анализ имеющихся литературных данных по теоретическим и экспериментальным исследованиям аморфных ферромагнитных пленок РЗМ-ПМ в области компенсационных составов с перпендикулярной магнитной анизотропией и некоторых многослойных магнитопленочных структур, в том числе и структур с обменным

взаимодействием. При этом основное внимание уделялось исследованию основных, **с точки зрения термомагнитной записи**, структурных, магнитных, магнитооптических свойств пленок РЗМ-ПМ, процессам ТМЗ в них, а также технологическим методам получения многослойных пленочных структур. В частности, большое внимание в рассматриваемых работах уделяется кристаллической структуре, магнитному упорядочению в сплавах РЗМ-ПМ, температуре Кюри, магнитной анизотропии, коэрцитивной силе и др. Показано, что особенности магнитных свойств аморфных пленок РЗ-ПМ определяются: 1) свойствами входящих в состав компонентов и их соотношением; 2) спецификой аморфного состояния; 3) технологическими условиями получения.

Показано, что аморфное состояние сплавов РЗМ-ПМ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими аморфными системами, т.к. не требует включения в состав стеклообразующей компоненты для стабилизации аморфной фазы; отличается высокой термостабильностью; легко реализуется в пленочном состоянии без криогенных температур; может быть получено в широком интервале составов. Считается, что его возникновение обеспечивается большим различием в размерах атомов РЗ и ПМ. Большое количество работ посвящено исследованиям магнитооптических (МО) свойств пленок РЗМ-ПМ (в том числе многослойных) с целью получения их максимальных значений. В большинстве случаев исследуется полярный МО эффект Керра.

Как следует из анализа опубликованных материалов, магнито пленочные структуры РЗМ-ПМ являются пригодными (на данном этапе) для использования в реверсивных магнитооптических ЗУ с записью и стиранием информации термомагнитным способом, в то же время ряд вопросов остались вне внимания исследователей (влияние длительности и формы импульсов лазерного излучения на энергетический порог ТМЗ, изучение возможности записи аналоговой информации, изучение возможности использования многослойных структур с обменным взаимодействием и др.).

## **Глава. 2. Термомагнитная запись на пленочных сплавах редкоземельных и переходных металлов.**

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований по использованию ферромагнитных пленок РЗМ-ПМ(TbFe,DyCo) для термомагнитной записи дискретной и аналоговой информации, а также для визуализации локальных неоднородностей магнитных и температурных полей.

Принцип термомагнитной записи заключается в нагреве локальных участков среды до пороговых температур в присутствии внешнего подмагничивающего поля записи ( $H_3$ ). Считывание магнитооптическое

(эффекты Керра и Фарадея). Это направление создания устройств внешней памяти получило название - магнитооптическая память.

Если локальные участки носителя имеют только два устойчивых состояния намагниченности, то запись производится двоичным кодом (запись информации дискретного вида). При этом возможна пороговая регистрация информации: во всех точках, где интенсивность света превышает некоторое пороговое значение, происходит переключение намагниченности в соответствии с подмагничивающим полем. Для записи дискретной информации в работе использовались однослойные и многослойные пленки РЗМ-ПМ с прямоугольной петлей гистерезиса.

Длительность светового излучения в процессе записи изменялась в пределах  $10^{-5} - 10^{-11}$  с. Проведен расчет необходимой энергии для нагрева локального участка пленки сплава TbFe до температуры Кюри ( $T_c \approx 150^\circ\text{C}$ ). Например при длительности импульса засветки  $t_u = 10^{-8}$  с необходимая энергия  $E = J_o \cdot t_u = 5 \cdot 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>. В работе проведены эксперименты по термомагнитной записи информации на пленках Tb-Fe толщиной 40 нм. Использовался лазер мощностью 10 мВт,  $t_u = 10$  нс. Получена энергетическая чувствительность  $\approx 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>. Так как в расчетах не учитывались потери на отражение и прохождение света, то сравнение экспериментальных данных можно считать удовлетворительным.

Пример записанной на пленках РЗМ-ПМ дискретной информации приведен на рис.1.

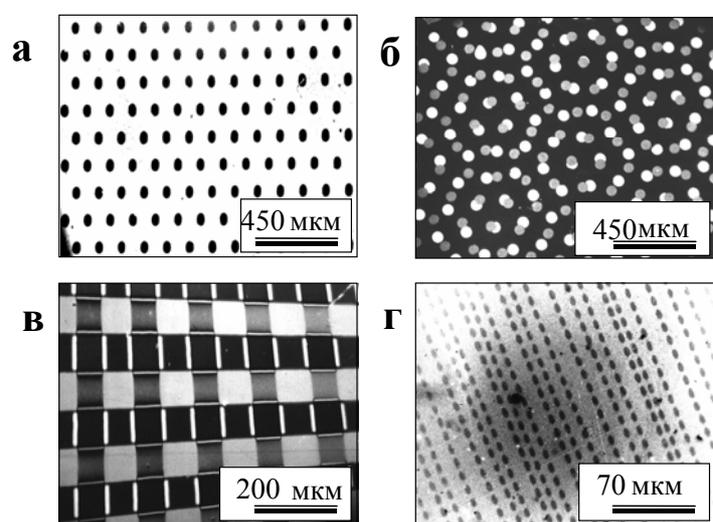


Рис.1. Доменная структура сформированная методом ТМЗ на пленках РЗМ-ПМ; а,б,в - параллельная запись через соответствующие трафареты, г - запись на вращающемся МО диске. Размеры битов  $\sim 5 \times 3$  мкм<sup>2</sup>.

По результатам проведенных исследований были созданы макеты МО дисков и осуществлена ТМЗ битовой информации. Полученные макеты многослойных магнитооптических дисков использовались для отработки систем записи и считывания информации в цифровых устройствах специального назначения в ИАиЭМ СО РАН, г. Новосибирск и Институте химической физики РАН, г. Москва, НИИ "Полус", г. Москва.

В отличие от дискретной, аналоговая запись предполагает запоминание различных уровней световой энергии в каждой точке изображения, т.е. передачу полутонов. Такая запись возможна, когда локальные участки магнитной среды имеют непрерывный ряд устойчивых состояний. Для осуществления термомагнитной записи аналоговой информации нами были получены РЗМ-ПМ пленки с "наклонной" петлей гистерезиса, в которых величина магнитного момента прямо пропорциональна амплитуде внешнего магнитного поля, а коэрцитивная сила линейно уменьшается с ростом температуры. При этом  $M$  и  $H_c$  совпадают по величине для предельной и частной петель гистерезиса (рис. 2, а,б). Для пленок в размагниченном состоянии увеличение внешнего магнитного поля  $H$  ( $H \parallel$  ОЛН) вплоть до  $H \sim H_c$  не приводит к изменению эффективной намагниченности (отрезок ОА). Дальнейшее увеличение поля сопровождается линейным ростом намагниченности (АВ). При снятии поля достигнутое значение  $M$  не изменяется (ВС). Частные и предельная петли гистерезиса отличаются только "раскрытием" по оси  $M$ .

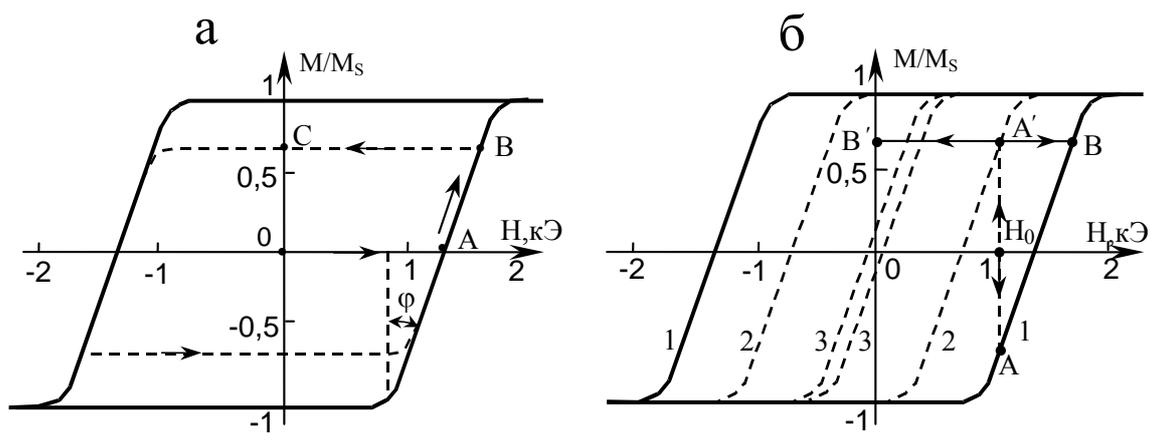


Рис.2. Петли гистерезиса пленок  $Tb_{0,24}Fe_{0,76}$ : а - предельная и частные петли при  $T = \text{const}$ ; б - предельные петли при температурах  $T_1 = 20$  (1),  $T_2 = 60$  (2),  $T_3 = 95^\circ\text{C}$  (3).

При увеличении температуры величина раскрытия предельной петли гистерезиса по оси  $H$  уменьшается, а форма ее сохраняется (кривые 1-3 на рис.2,б). Отметим также, что если при  $T = T_1$  и  $H = H_0$  пленка находится в состоянии А (рис.2,б), то при увеличении температуры  $T = T_2$  она переходит в состояние А'. Уменьшение температуры до  $T = T_1$  не переводит магнитную систему ТМП обратно в состояние А, состояние А' сохраняется.

При этом увеличение внешнего магнитного поля не меняет величину относительной намагниченности (отрезок АВ) до тех пор, пока мы не дойдем до предельной петли гистерезиса (точка В), а при уменьшении поля до нуля магнитная система оказывается в состоянии В'.

Проведен также математический анализ процесса ТМЗ аналоговой информации на таких пленках. Для интерпретации использовалась модель высоко-анизотропных слабовзаимодействующих областей малых размеров (~150-300 нм).

Вид тонального магнитооптического изображения, записанного на пленке Tb-Fe при положениях анализатора  $+3,5^\circ$ (а),  $0^\circ$ (б) и  $-3,5^\circ$ (в) приведен на рис.3.

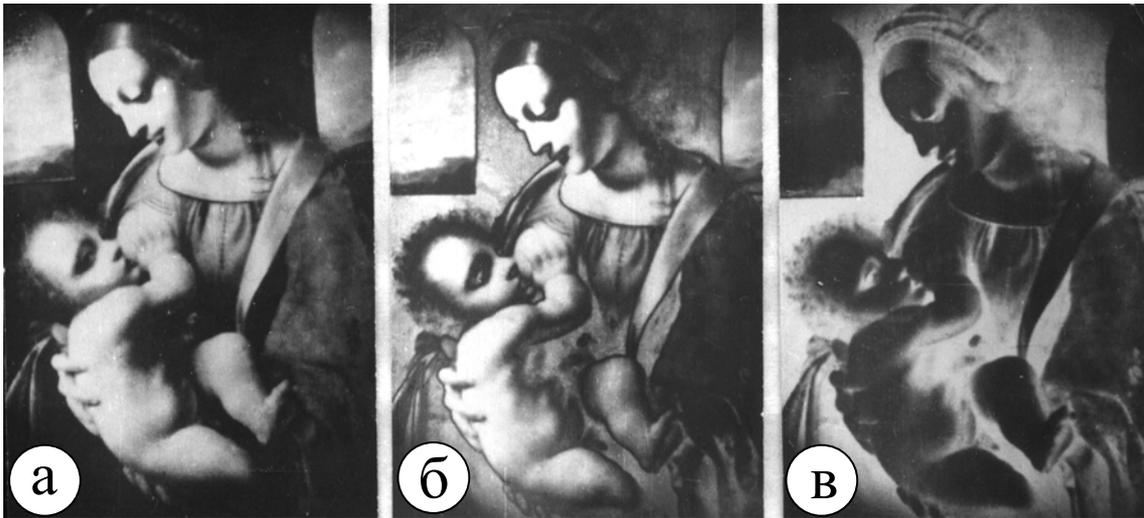


Рис.3. Вид тонального магнитооптического изображения, записанного на пленке TbFe при положениях анализатора  $+3,5^\circ$ (а),  $0^\circ$ (б) и  $-3,5^\circ$ (в).

Для увеличения МО эффектов (контраста), при использовании полярного магнитооптического эффекта Керра, был проведен расчет и экспериментально получены многослойные РЗМ-ПМ структуры с интерфе-

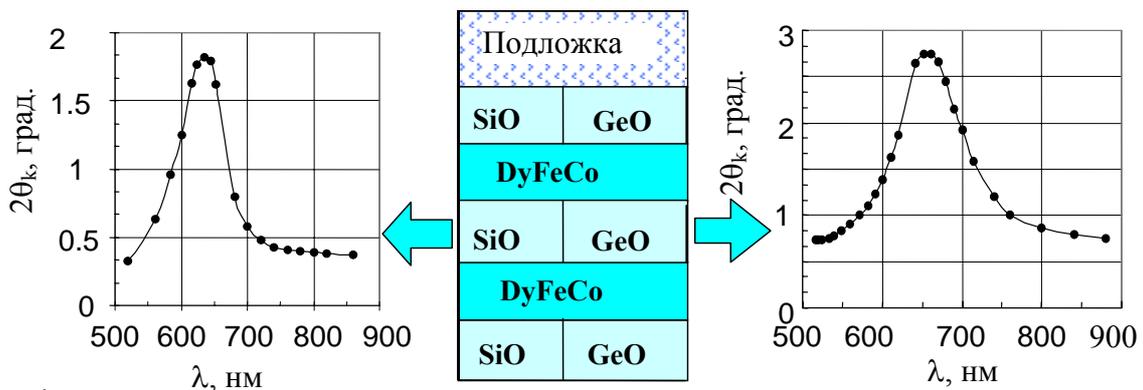


Рис.4

ренционными диэлектрическими (SiO,GeO) слоями. Соответствующие дисперсионные кривые приведены на рис.4.

На полученных пленочных структурах на основе РЗМ-ПМ были про-

ведены исследования (с использованием корреляционного анализа) магнитных неоднородностей в магнитных лентах и дисках путем регистрации.

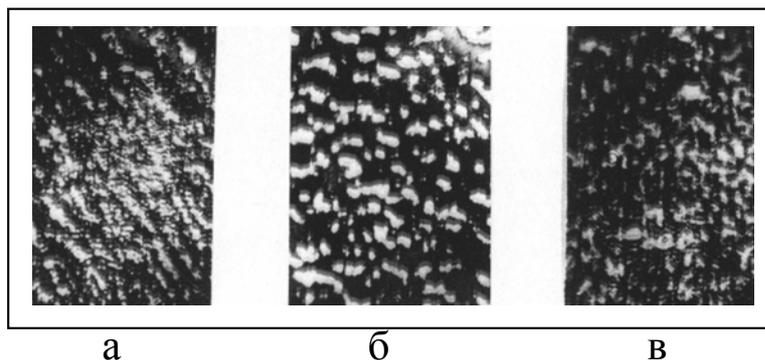


Рис.5. Доменная структура пленок РЗМ-ПМ после термомагнитного копирования остаточного состояния лент после их предварительного размагничивания: а - В

4502-12; б - ORWO; в - BASF.

Показана связь микродоменной структуры магнитных носителей информации с их эксплуатационными характеристиками.

Были проведены исследования структуры оптических излучений лазеров в невидимой области оптического спектра (рис.6).

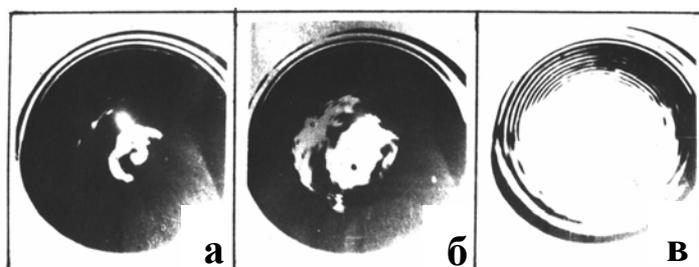


Рис.6. Структура излучения импульсного лазера ЛГИ-21 при различных режимах накачки.

Также были проведены исследования по обращению волнового фронта (ОВФ) на  $\lambda = 10,6$  мкм (рис.7).

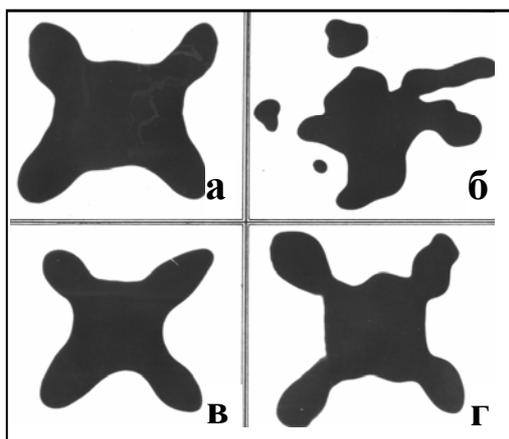


Рис.7. Пространственное распределение ИК излучения лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) при ОВФ.

На рис.7 приведено изображение пространственного распределения ИК излучения лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) в дальней зоне сигнальной волны - без фазовой пластинки (а), с фазовой пластинкой (б) и обращенной волны - без фазовой пластинки (в), с фазовой пластинкой (г) при обращении волнового фронта.

Таким образом можно сделать вывод, что использование пленок РЗМ-ПМ с перпендикулярной магнитной анизотропией открывает широкие возможности создания устройств для оптической обработки информации.

### **Глава 3. Особенности записи информации на пленках РЗМ-ПМ импульсами светового излучения**

В третьей главе приведены результаты расчетов динамики температуры в системе пленка-подложка при воздействии на пленку импульсов лазерного излучения различной формы и длительности. Проведено сопоставление расчетов с экспериментальными данными. Показано, что при длительности импульса  $\sim 10^{-8}$  с основным механизмом записи информации на магнитных пленках РЗМ-ПМ является термомагнитный. При более коротких импульсах эффект увеличения энергетической чувствительности при записи, наблюдаемый экспериментально, объяснить термомагнитным механизмом не предоставляется возможным. Оценка энергетической чувствительности связана с нахождением температурного поля, возникающего в облученном участке образца, которое играет роль переходной физической модели записываемого изображения (как дискретного, так и аналогового).

При взаимодействии лазерного излучения с веществом пленки часть энергии поглощается, что приводит в общем случае к возникновению пространственно-неоднородного и нестационарного распределения термодинамических параметров. Изучение этого взаимодействия, в нашем случае, основывалось на предположении, что лазерный импульс может рассматриваться как тепловой источник. В этом случае, в пренебрежении вязкостью и гидродинамической скоростью вещества пленки, условие баланса тепла (уравнение теплопроводности) имеет вид

$$\rho T \frac{\partial S}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q(\vec{r}, t) \quad (1)$$

В (1)  $\rho = \rho(\vec{r}, t)$  - плотность вещества пленки;  $S = S(\vec{r}, t)$  - энтропия единицы объема;  $T = T(\vec{r}, t)$  - температура;  $k$  - теплопроводность, которая в дальнейшем считается постоянной;  $Q(\vec{r}, t)$  - количество тепла, выделяемое лазерным импульсом в единице объема пленки в единицу времени.

В работе рассмотрены различные механизмы передачи тепла, соответственно и различные варианты упрощения уравнения (1). Распределение плотности энергии в поперечном сечении лазерного излучения в расчетах принималось гауссовским. Приведена оценка основных термодинамических параметров взаимодействия лазерного излучения с пленкой в случае  $\tau = 3 \cdot 10^{-11}$  с и поглощаемой в объеме  $V = \pi r_0^2 h$  энергии  $\Delta U = 5 \cdot 10^{-12}$  Дж для различных термодинамических процессов.

В случае **изохорического** процесса. Для  $h = h_0$ , ( $\alpha = 10^{-5}$  град $^{-1}$ ;  
 $E = 3 \cdot 10^{11}$  Н/м $^2$ ) имеем:

$$\Delta T = \Delta U / \rho V C = 20^\circ \quad (2)$$

$$P = - E \alpha \Delta T = - 600 \text{ кг/см}^2 \quad (3)$$

Знак (-) в (3) означает, что давление направлено внутрь объема  $V$ .

Для случая **изобарического процесса** ( $P = \text{const}$ ) имеем:

$$\Delta T \approx \Delta U / \rho V C = 20^\circ \quad (4)$$

$$\Delta h / h_0 = \alpha \Delta T = 2 \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

В случае **изотермического** процесса ( $T = T_0$ ):

$$P = E (\Delta h / h_0) = 6 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2 \quad (6)$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \sqrt{\frac{2 \Delta U}{E V}} = 2 \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

и выполняется соотношение:

$$\Delta U = \frac{\Delta h}{2 h_0} P V. \quad (8)$$

В случае **адиабатического** процесса ( $S = \text{const}$ ) и при условии  
 $|\Delta h / h_0| \ll 1$  и  $|\Delta T / T_0| \ll 1$  имеем:

$$\Delta T \approx \frac{T_0 \alpha}{\rho C} \sqrt{\frac{E \Delta U}{V}} = 4,1^\circ \text{C} \quad (9)$$

$$P \approx - 4,3 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2 ; \quad \frac{\Delta h}{h_0} \approx \frac{\rho C \Delta T}{T_0 \alpha E} \approx 1,3 \cdot 10^{-2}$$

(Отрицательное значение величины  $\Delta h / h_0$  соответствует адиабатическому сжатию).

И выполняется также соотношение:

$$\Delta U \approx \frac{\Delta h}{h_0} P V \quad (10)$$

Как следует из приведенного рассмотрения для численных параметров  $\tau$  и  $\Delta U$  средние достижимые температуры  $\Delta T \ll T_C$ . Это означает, что механизм ТМЗ в указанной области параметров  $\tau$  и  $\Delta U$  отсутствует.

Для объяснения возможности записи при  $\Delta T \ll T_C$  использованы магнитоупругие константы пленок РЗМ-ПМ. Проведены оценки магнитоупругой энергии  $U = - \lambda_S P$  вызванной давлением, т.е. величина  $U$  должна быть сравнима с энергией одноосной магнитной анизотропии  $K_u$ . Из расчета следует, что необходимое давление  $P = K_u / \lambda_S \approx 10^3 \text{ кг/см}^3$ . Таким образом, при облучении локального участка коротким импульсом оптического излучения при определенных значениях энергии можно практически без нагрева получить в нем давления, достаточные для компенсации энергии магнитной анизотропии. В результате произойдет

его перемагничивание. Такой способ записи в работе назван упругомагнитной записью (УМЗ).

Из предложенной модели можно сделать следующие два вывода:

1. Запись информации на пленках ПМ-РЗМ можно проводить при постоянной температуре, накладывая на них определенное статическое давление.
2. В диапазоне длительностей импульсов световых излучений  $\tau$  от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  с энергетическая чувствительность среды  $E_{min}$  будет тем выше чем короче импульс излучения.

Эти выводы были нами экспериментально проверены. На рис.8 представлен пример записи немагнитным наконечником на пленке TbFe.

При изменении длительности лазерного импульса, нами экспериментально были получены следующие энергетические значения по чувствительности:



Рис.8. Запись на пленке TbFe, произведенная немагнитным наконечником.

$$\begin{array}{lll}
 (\lambda = 1,06 \text{ мкм}) & \tau = 10^{-7} \text{ с;} & E_{min}^{(1)} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2 \\
 (\lambda = 0,35 \text{ мкм}) & \tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с;} & E_{min}^{(2)} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2 \\
 (\lambda = 0,53 \text{ мкм}) & \tau = 3 \cdot 10^{-11} \text{ с;} & E_{min}^{(3)} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2
 \end{array} \quad (11)$$

Отметим, что использование явления УМЗ повышает функциональные возможности устройств оптической памяти на пленках РЗМ-ПМ, т.к. при этом значительно сокращается время цикла запись/стирание, и увеличивается их количество без изменения магнитных и магнитооптических характеристик пленок.

В рамках задач диссертационной работы рассмотрены также вопросы математического моделирования процесса термомагнитной записи в пленках РЗМ-ПМ. При этом процесс ТМЗ описывается в две ступени:

I. Расчет пространственно-временного распределения температуры в тонкой металлической пленке при воздействии импульсного лазерного

излучения.

2. Расчет устойчивых доменных структур в магнитной пленке при воздействии лазерного излучения и слабого магнитного поля.

В данной работе приведены также результаты расчетов динамики температуры в системе пленка-подложка при воздействии на пленку пико- и наносекундных импульсов различной временной формы. Проведен численный анализ устойчивых состояний в двумерных магнитных системах при неоднородном нагреве в присутствии слабого внешнего магнитного поля, дипольного взаимодействия и др.

Показано, что в системе с обменным и дипольным взаимодействиями в качестве основного состояния при  $1 \leq |J|/D \leq 4$  ( $D$  - константа дипольного взаимодействия) реализуется решетка из макровихрей. Дипольные взаимодействия в двумерной системе создают анизотропию типа "легкая плоскость".

При учете наведенной магнитной анизотропии  $K_0/D_0 \leq 4$  динамически устойчивыми состояниями остаются плоские структуры. При  $5 \geq |K_0|/D_0 \geq 4$  плоские структуры переходят в неоднородную наклонную фазу. При  $K_0/D_0 \geq 5$  динамически устойчивыми являются перпендикулярные магнитные структуры. Показано, что процесс образования перпендикулярных доменных структур имеет место при  $|J|/D_0 \leq 5$ . При  $|J|/D_0 \geq 5$  многодоменные структуры в численном эксперименте не образовывались. Рассмотрен процесс образования устойчивых структур в различных областях параметров модели при неоднородном нагреве в присутствии слабого внешнего магнитного поля. Показано, что в области параметров  $K_0/D_0 \geq 5$ ,  $|J|/D_0 \leq 5$  процесс перемагничивания приводит к образованию неоднородных случайных структур. **Это обстоятельство необходимо учитывать при изучении процессов оптической записи в магнитооптических носителях.**

#### **Глава 4. Термомагнитная запись информации на пленочных структурах с однонаправленной анизотропией.**

В четвертой главе приведены результаты теоретического исследования влияния магнитного поля на доменную структуру двухслойных магнитных пленках NiFe/NiFeMn с ферро-антиферромагнитным обменным взаимодействием, обладающих однонаправленной анизотропией (ОА) без учета и с учетом одноосной анизотропии ( $\beta$ ) ферромагнитной пленки.

Было получено распределение намагниченности как по толщине пленки, так и в плоскости ФП. Показано, что кривые перемагничивания таких пленок, в отсутствие одноосной анизотропии, носят безгистерезисный характер.

Проведены также исследования доменной структуры и процессов перемагничивания пленок, обладающих одновременно однонаправленной и

одноосной анизотропией. Пространственное распределение спинов и внешнего магнитного поля  $H$ , используемое в расчетах, приведено на рис.9.

Принято, что спины на нижней поверхности ФП ( $z = 0$ ) жестко закреплены.

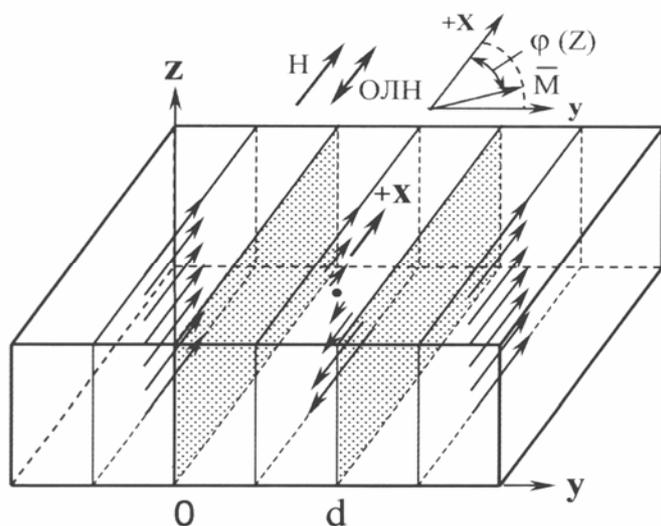


Рис. 9. Распределение намагниченности в домене ФП с однонаправленной и одноосной анизотропией ( $H > -H_0$ ).

В результате показано, что для полей  $h$ , когда  $\varphi_m \neq 0$ , вдоль толщины домена образуется спиральная конфигурация спиновой системы типа блоховской стенки, в которой угол  $\varphi(z)$  постепенно изменяется от значения

$\varphi = \pi$  при  $z = 0$  до  $\varphi = \varphi_m$  при  $z = L$ .

На таких структурах Глазером А.А. была показана принципиальная возможность термомагнитной записи доменов с помощью нагретой иглы.

Нами проведены эксперименты по формированию микродоменных структур в слое NiFe путем термомагнитной записи соответствующих доменных конфигураций импульсами светового излучения. Исследованы особенности их статического и импульсного перемагничивания.

Используя явление стабилизации доменной структуры в пленках NiFe/NiFeMn, а также зависимость  $\Delta H(l, h)$  были проведены исследования по возможности формирования "низкокоэрцитивных каналов" (НК) для продвижения плоских магнитных доменов (ПМД) с малыми полями управления и более широкими функциональными возможностями (реверсивное и однонаправленное движение ПМД в НК в зависимости от их ширины и толщины ФП). При этом, варьируя толщиной ферромагнитного слоя (ФС) и шириной НК можно сознательно задавать необходимое положение петли гистерезиса на оси полей, т.е. выбирать требуемый режим по величине управляющих полей.

В настоящей главе приведены также результаты исследований впервые полученных нами двухслойных пленочных структур TbFe/NiFe DyCo/NiFe с ортогональной ориентацией эффективных намагниченностей в слоях, обладающих однонаправленной анизотропией (см. рис.10).

Показано, что взаимодействие между слоями в таких системах носит также обменный характер. Исследовано влияние однонаправленной анизотропии на процессы квазистатического перемагничивания и спектры спин-волнового резонанса (СВР). Показан значительный вклад механиз-

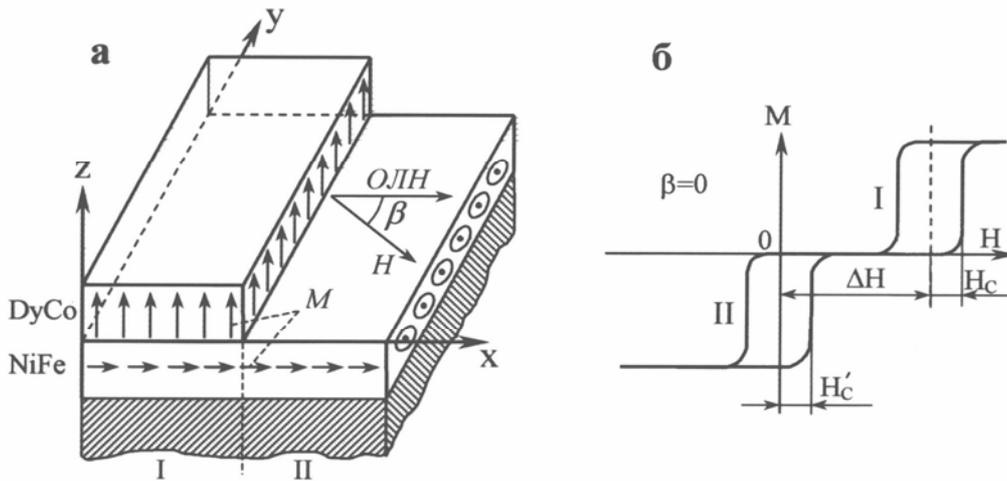


Рис. 10. Поперечный разрез (а) и типичная петля гистерезиса (б) исследуемых образцов.

мов вращения магнитного момента в ФП при перемагничивании под малыми углами к оси ОА и проведен анализ полученных результатов на основе модели когерентного вращения. Обнаружена инверсия направления ОА в пленке NiFe при перемагничивании слоя РЗМ-ПМ.

Поведенные исследования методами спин-волнового и ферромагнитного резонанса показали, что слой ферримагнетика DyCo(TbFe), характеризующийся интегральной перпендикулярной магнитной анизотропией, представляет собой гетерофазную нанокристаллическую систему, состоящую как минимум из двух фаз  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (рис.11). Вектор намагниченности подрешетки  $3d$  металла одной из составляющих гетерофазного ферримагнитного сплава параллелен плоскости пленки. Наличие обменного взаимодействия между намагниченностью слоя NiFe и плоскостной составляющей вектора намагниченности гетерофазного слоя РЗМ-ПМ  $\Phi_2$ , на наш взгляд, является причиной существования однонаправленной анизотропии в таких системах, которая и в данном случае имеет обменную

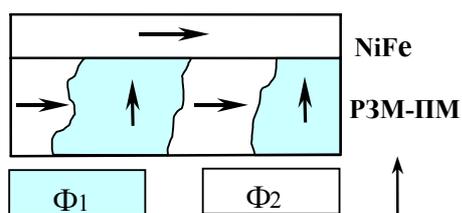


Рис.11. Предполагаемая конфигурация векторов намагниченности фаз  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в системе РЗМ-ПМ/NiFe.

природу.

Для анализа квазистатического перемагничивания такой структуры проведен расчет петель гистерезиса по теории когерентного вращения намагниченности. Показано, что эта модель хорошо объясняет угловые зависимости петель гистерезиса.

Проведены также температурные исследования зависимостей коэрцитивной силы  $H_c$  и поля смещения  $\Delta H$  для двухслойных структур (РЗМ-ПМ)/NiFe с однонаправленной анизотропией в диапазоне температур от 20 до 230°C. Соответствующие зависимости приведены на рис.12.

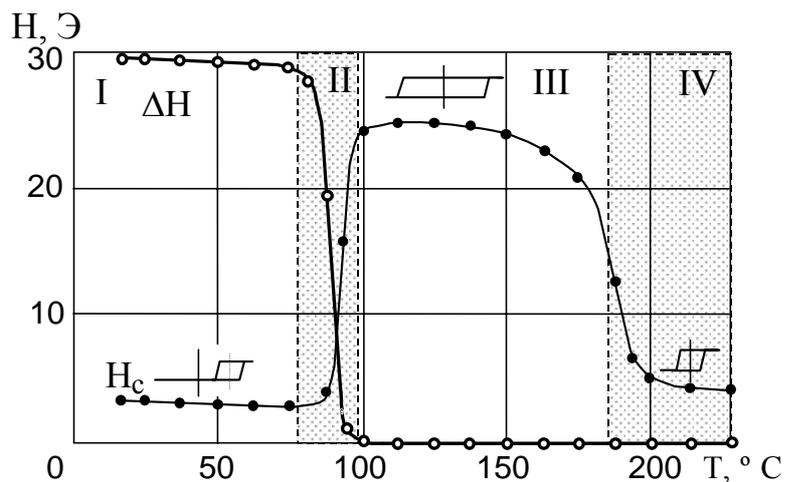


Рис.12. Температурные зависимости  $H_c$  и  $\Delta H$  пленок DyCo/NiFe с обменной однонаправленной анизотропией. Для пленочных структур TbFe/NiFe наблюдаемые зависимости аналогичны.

Показано, что при температурах 100 - 190°C (область III) обменное взаимодействие между слоями РЗМ-ПМ и NiFe еще сохраняется, а коэрцитивная сила РЗМ-ПМ слоя с температурой уменьшается до такой величины, что энергии обменного взаимодействия между слоями достаточно, чтобы при перемагничивании NiFe слоя в его плоскости происходило перемагничивание РЗМ-ПМ слоя нормально плоскости. **Именно этот факт положен в основу принципа термомагнитной записи и стирания информации в двухслойных структурах (РЗМ-ПМ)/NiFe с обменной однонаправленной анизотропией.**

Таким образом, на этом основании, впервые была осуществлена запись магнитооптической информации в РЗМ-ПМ слое импульсами оптического излучения с использованием энергии обменного взаимодействия с NiFe слоем, позволяющей более чем на два порядка снизить энергетические затраты на процессы записи/стирания информации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые осуществлена термомагнитная запись полутоновых оптических изображений на аморфных пленках РЗМ-ПМ с перпендикулярной магнитной анизотропией. Для объяснения процесса записи предложена структурная модель пленки, состоящей из ансамбля высокоанизотропных

слабовзаимодействующих областей (магнитных микродоменов) размером  $\sim 50$  нм .

2. Проведены численные и экспериментальные исследования влияния длительности и формы импульсов светового излучения на процессы термомагнитной записи информации в пленках РЗМ-ПМ. Показано, что при длительности импульса  $\tau_u > 10^{-8}$  с основным механизмом записи является запись в области температуры Кюри. При  $\tau_u = 10^{-8} - 10^{-11}$  с обнаружен новый механизм записи, в основе которого лежат упругомагнитные эффекты; энергетическая чувствительность данного механизма примерно на два порядка выше чем при записи в точке Кюри.

3. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния магнитного поля на доменную структуру двухслойных пленок NiFe/NiFeMn с однонаправленной анизотропией для случаев отсутствия и наличия одноосной анизотропии в слое NiFe.

4. Осуществлено формирование микродоменных структур в слое NiFe путем термомагнитной записи соответствующих доменных конфигураций. Показана возможность создания "каналов" для продвижения плоских магнитных доменов и исследованы особенности их статического и импульсного перемагничивания.

5. Впервые обнаружена обменная однонаправленная анизотропия в магнитомягком слое в двухслойных ферро-ферритмагнитных пленочных структурах DyCo/NiFe(TbFe/NiFe) с ортогональной ориентацией осей легкого намагничивания. Предложен механизм формирования этой анизотропии. Исследованы особенности квазистатического перемагничивания этих структур.

6. Впервые показана возможность термомагнитной записи информации в двухслойных пленках РЗМ-ПМ/NiFe с использованием энергии обменного взаимодействия между слоями. При этом энергетические затраты на процессы записи/стирания снижаются более чем на два порядка.

7. В результате проведенных исследований создан макет магнитооптического диска на основе аморфных пленок РЗМ-ПМ. Создан прибор для регистрации пространственного распределения интенсивности оптических излучений в большом динамическом и спектральном диапазонах в реальном масштабе времени.

### **Материалы диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Ерухимов М.Ш., Середкин В.А. Влияние магнитного поля на доменную структуру пленок с однонаправленной анизотропией // ФММ.-1977.-Т.44, В.4.- С.757-761.

2. Ерухимов М.Ш., Середкин В.А., Яковчук В.Ю. Доменная структура и перемагничивание пленок с однонаправленной и одноосной анизотропией // ФММ.- 1981.-Т.52, В.1.- С.57-62.

3. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Однонаправленная магнитная анизотропия в слоистой пленочной структуре NiFe/TbFe // Письма в ЖТФ.-1983.-Т.9, В.23.-С.1446-1449.
4. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Термомагнитная запись полутонковых оптических изображений на пленках R-Fe (R-Tb,Dy) // ЖТФ.-1984.-Т.54, В.6 -С.1183-1186.
5. Середкин В.А., Буркова Л.В., Ерухимов М.Ш., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Термомагнитная запись аналоговой информации на пленках R-Fe (R-Tb,Fe) // ЖТФ.- 1985.-Т.55, В.4.- С.707-713.
6. Попов Г.В., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Статическое перемагничивание аморфных пленок DyCo // ФММ.-1990, №2.-С.61-70.
7. Александров К.С., Болотских Л.Т., Попков В.Г., Середкин В.А., Попов А.К., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Исследование качества обращения волнового фронта ИК излучения методом термомагнитной записи изображения // ДАН.-1986.-Т.286, В.3.- С.610-612.
8. Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Квазистатическое перемагничивание пленок с ферро-ферритмагнитным обменным взаимодействием // ФММ.-1987.-Т.63, В.3.-С.457-462.
9. Александров К.С., Середкин В.А., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Оптическая запись в аморфных ферритмагнитных пленках // Автоматрия.-1988.-№4.-С.59-67.
10. Берман Г.П., Фролов Г.И., Середкин В.А., Яковчук В.Ю. Analysis of interaction of laser radiation pulses with metal magnetostrictive film // Solid State Communications.-1988/-Т.67, №12.- Р.1203-1207.
11. Белошапкин В.В., Берман Г.П., Третьяков А.Г., Середкин В.А., Фролов Г.И., Цыбина Ж.Б. Процессы структурообразования и термомагнитная запись в двумерных магнитных системах // ФТТ.-1991.-Т.33, №9.- С.2554-2560.
12. Исхаков Р.С., Яковчук В.Ю., Столяр С.В., Чеканова Л.А., Середкин В.А. Ферромагнитный и спин-волновой резонанс в двухслойных пленках Ni<sub>0,8</sub>Fe<sub>0,2</sub>/Dy<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub> // ФТТ.-2001.-Т.43, В.8.-С. 1462-1467.
13. Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В., Чеканова Л.А., Яковчук В.Ю. Спин-волновой резонанс в трехслойных пленках NiFe/Dy<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub>/NiFe как метод регистрации неоднородностей структуры аморфных слоев Dy<sub>x</sub>Co<sub>1-x</sub> // Письма в ЖЭТФ.-2002.-Т.76, В.11.-С.779-783.
14. Середкин В.А., Исхаков Р.С., Яковчук В.Ю., Столяр С.В., Мягков В.Г. Однонаправленная анизотропия в пленочных системах (RE - TM)/NiFe //ФТТ.-2003.-Т.45, В.5.-С.882-886.
15. Середкин В.А., Столяр С.В., Фролов Г.И., Яковчук В.Ю. Термомагнитная запись и стирание информации в пленочных структурах DyCo/NiFe(TbFe/NiFe) // Письма в ЖТФ.-2004/- Т.30, В.19/- С.46-52.
16. Яковчук В.Ю., Середкин В.А., Фролов Г.И. Магнитный носитель информации А.с № 1124381 по заявке № 3526108, СССР, 1984.

Подписано в печать 22.06.2004 г.  
Формат 60 x 84/16 Усл. п.л. 1.  
Тираж 60 экз. Заказ №

---

Отпечатано в типографии Института  
Физики СО РАН.