

# Наноматериалы и нанотехнологии

УДК 537.62+621.318

## Излучательные и магнитные свойства псевдооднородной микро- и нанопаттернированной магнитной среды

Б. А. Гурович, К. Е. Приходько, Е. А. Кулешова, А. Г. Домантовский, К. И. Маслаков  
РНИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

*Исследованы спектры электромагнитных импульсов излучения, возникающих при перемагничивании паттернированных сред, полученных методом селективного удаления атомов и состоящих из псевдооднородных (однородных в намагниченном состоянии) магнитных битов. Выявлены зависимость коэрцитивной силы битов от коэффициента анизотропии формы и расстояния между ними и других факторов. Изучено влияние магнитомягкого подслоя. Методом магнитосилового микроскопии изучены особенности магнитной структуры битов.*

Двухмерные периодические паттернированные магнитные структуры представляют не только научный, но и прикладной интерес. Это связано с тем, что сигнал, излучаемый ими при перемагничивании во внешнем магнитном поле (эффект Баркгаузена), используется в промышленных масштабах при создании однобитовых антикражных меток, бесчиповых дистанционных многобитовых меток различного назначения для электромагнитной идентификации (ЭМИД-меток), а также может быть применим для дистанционного считывания информации с магнитных носителей. Очевидно, что потенциал возможных применений таких магнитных паттернированных структур предопределяет повышенный интерес к их изучению, так как традиционные непрерывные магнитные среды для таких целей непригодны. К наиболее важным направлениям исследований паттернированных сред можно отнести следующие:

- исследование возможностей управляемого изменения коэрцитивной силы среды при использовании одного и того же материала;
- поиск возможностей увеличения амплитуды сигнала, излучаемого средой при перемагничивании;
- исследование факторов, влияющих на форму и качество сигнала, излучаемого средой при перемагничивании.

Рассмотрим возможные способы управления коэрцитивной силой. Традиционные приемы изменения коэрцитивной силы магнитных материалов основаны, главным образом, на изменении их состава и/или текстуры. В случае магнитной паттернированной среды теория предсказывает возможность изменения коэрцитивной силы среды за счет изменения анизотропии формы битов. Однако существующие теории неплохо предсказывают

коэрцитивные силы и влияние анизотропии формы для малых (с максимальными размерами не более ~200—300 нм) однородных битов [1], качественно правильно описывают свойства одиночных многобитовых битов, но непригодны в ситуациях, когда становится существенным взаимодействие битов друг с другом, а также с подложкой. Кроме того, из теории следует, что применительно к магнитной паттернированной среде (для заданного материала) величину коэрцитивной силы можно регулировать выбором размеров битов, ориентацией относительно осей легкого намагничивания, степенью их взаимодействия, управляемого как взаимным расположением битов, так и магнитными свойствами подложки (подслоя) [2]. Конкретные пределы этого регулирования подлежат определению экспериментальным путем, что и было сделано в данной работе.

Один из способов управления коэрцитивной силой битов, а значит и полями генерации сигналов, связан с использованием так называемой кристаллической магнитной анизотропии. Энергия намагниченного псевдооднородного бита зависит от направления вектора его намагниченности относительно кристаллографических направлений и геометрических осей бита. Поэтому магнитная энергия кристалла является анизотропной, хотя, как правило, энергия такой магнитной анизотропии (под которой понимается различие магнитных энергий, соответствующих намагничиванию вдоль трудной и легкой осей) существенно меньше изотропной обменной энергии (т. е. энергии взаимодействия упорядоченных спинов друг с другом), именно она определяет направление намагниченности.

Константа магнитной анизотропии кобальта на порядок больше соответствующих констант для

таких ферромагнитных материалов, как железо и никель. Диапазон регулирования коэрцитивной силы пропорционален константе анизотропии, что и обусловило выбор этого материала в качестве материала для исследования.

### Методика эксперимента

В данной работе использовались магнитные паттернированные среды, представляющие собой тонкопленочные структуры, в которых в матрице из немагнитного материала — оксида кобальта — располагались двухмерные периодические массивы битов прямоугольной формы из кобальта. Каждый из массивов состоял из битов определенных размера, формы и значений периода. Изменение коэрцитивной силы массива осуществлялось за счет изменения анизотропии формы битов. Структуры формировались методом селективного удаления атомов (СУА) [3] в комбинации с оптической или электронной литографией. После формирования резистной маски на пленке оксида кобальта образец облучался ускоренными протонами для осуществления селективного удаления атомов кислорода. В результате в пленке оксида кобальта формировалась паттернированная структура кобальтовых битов. При этом размеры отверстий, геометрия и характерные значения периодов структуры резистной маски соответствовали параметрам создаваемой магнитной паттернированной структуры битов.

Суть метода СУА состоит в возможности прямого изменения атомного состава твердых тел под действием ионных пучков определенных энергий. Такая модификация приводит: к радикальным изменениям физических свойств материала, например к переходу изоляторов в металлы или полупроводники, немагнитных материалов — в магнитные; к изменению оптических свойств материалов; к созданию заданного рельефа на поверхности твердых тел и т. д. [3—5]. Важно отметить, что селективное удаление атомов при необходимости позволяет одновременно изменять физические свойства каждого из слоев в многослойной структуре.

При подготовке образцов для экспериментов по исследованию влияния на коэрцитивную силу анизотропии формы битов, образующих двухмерные периодические паттернированные магнитные структуры, учитывалось то, что коэрцитивная сила материалов является структурно-чувствительным параметром. Для данного материала на ее значения могут оказывать влияние такие структурные параметры как размер зерна, текстура, наличие дефектов кристаллической решетки, примесей и т. д.

В случае тонкопленочных магнитных паттернированных структур влияние также могут оказы-

вать материалы подложки и окружения, в котором формируются магнитные биты, а также условия формирования магнитных битов, например интенсивность облучения, температура. Все перечисленные параметры могут влиять на размер зерна и другие характеристики материала магнитных битов при их создании в процессе селективного удаления атомов.

Измерение статических магнитных свойств образцов проводили с использованием магнитометра (ВНУ-50) в направлениях вдоль длинной и короткой осей битов, что обусловлено наличием магнитной анизотропии паттернированной среды, связанной с анизотропией формы битов. Однако эти измерения, при которых изменение напряженности магнитного поля происходит очень медленно, не дают возможности изучать излучательные характеристики паттернированных магнитных сред при динамическом перемагничивании в переменных магнитных полях. К определяющим динамическим характеристикам магнитных паттернированных сред относятся динамическая коэрцитивная сила, определяемая как мгновенное значение внешнего поля, при котором происходит поворот вектора намагниченности образца; длительность импульса, возникающего при перемагничивании образца, определяемая как полуширина пика сигнала, регистрируемого антенной; а также интенсивность импульса, определяемая как амплитуда импульса перемагничивания, регистрируемого антенной.

Возможность разделения сигналов от двух и более массивов определяется разницей динамических коэрцитивных сил различных массивов с учетом длительности сигналов, возникающих при перемагничивании.

Методика экспериментального определения динамических характеристик магнитных паттернированных сред заключается в изучении формы и параметров сигнала, формируемого совокупностью битов в момент изменения направления вектора намагниченности в переменном магнитном поле.

Для измерения динамических характеристик были созданы:

экспериментальные установки для генерации переменного магнитного поля с частотой 50 Гц и напряженностью магнитного поля до 500 Э, а также поля с частотой от 50 до 200 Гц и напряженностью магнитного поля до 60 Э;

антенны различных конфигураций, позволяющие регистрировать импульс перемагничивания магнитных паттернированных структур с поперечным размером до 15 и длиной до 50 мм;

аппаратный комплекс регистрации сигнала перемагничивания магнитных паттернированных структур, в состав которого входят антенна, широ-

кополосный усилитель и цифровой осциллограф на базе АЦП (12 бит).

Такая конструкция позволила определять значение внешнего поля в момент перемагничивания массивов битов и, таким образом, определять его коэрцитивную силу.

Особенности магнитной структуры битов исследовали с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47 фирмы НТ-МДТ (Россия). Магнитные изображения были получены в магнито-силовом режиме работы микроскопа с использованием кантилеверов (игл) с магнитным покрытием – пленкой кобальта. Перед исследованием кантилеверы намагничивались вдоль оси иглы в магнитном поле 5 кЭ.

## Результаты и обсуждение

### Статические измерения коэрцитивной силы магнитных паттернированных сред

Измерения коэрцитивной силы исследованных однослойных образцов, проведенные на магнито-

метре (табл. 1), показали, что наблюдается явный рост коэрцитивной силы битов с увеличением коэффициента анизотропии формы, при этом диапазон значений изменения коэрцитивной силы битов, расположенных на оксиде кремния, значительно больше, чем для битов на монокристаллическом кремнии. Доза облучения протонами —  $10^{20}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>.

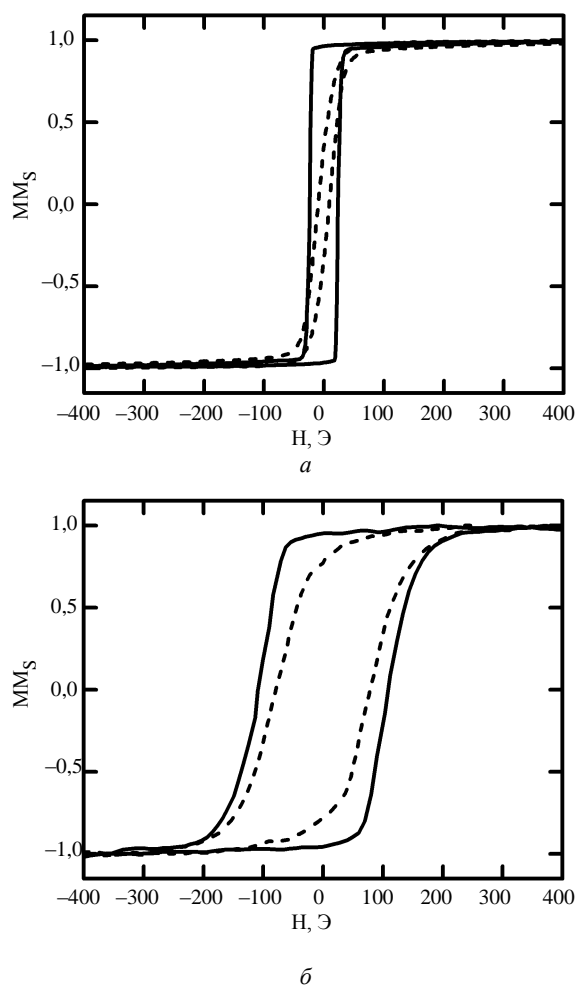
Анализ кривой магнитного гистерезиса позволяет оценить излучательные характеристики образцов при динамическом перемагничивании. Очевидно, что одним из важнейших факторов, определяющих излучательные характеристики, является "квадратичность" кривой гистерезиса, которая характеризуется коэффициентом  $k$ , равным отношению остаточной намагниченности к намагниченности насыщения. Чем выше  $k$ , тем быстрее происходит поворот вектора намагниченности, тем больше амплитуда и меньше длительность сигнала, излучаемого материалом в переменном магнитном поле.

Таблица 1

Экспериментальные результаты измерения на магнитометре коэрцитивной силы однослойных образцов

Размер битов, мкм	Анизотропия формы	Расстояние между битами, мкм		Коэрцитивная сила, Э		Толщина исходного оксида кобальта, нм
		вдоль	поперек	вдоль	поперек	
Группа 1 (Подложка — Si+SiO <sub>2</sub> )						
0,3×0,6	2	2	2	142	104	70
0,3×0,9	3	2	2	210	191	70
0,3×1,8	6	2	2	319	276	70
Группа 2 (Подложка — Si+SiO <sub>2</sub> )						
0,5×1,0	2	2	2	138	99	70
0,5×2,0	4	2	2	159	78	70
0,5×3,0	6	2	2	318	241	70
0,5×3,0	6	2	2	356	300	70
Группа 3 (Подложка — Si)						
5,0×5,0	1	7	7	91	86	80
5,0×10	2	7	7	96	70	80
5,0×15	3	7	7	108	77	80
5,0×20	4	7	7	108	75	80
5,0×30	6	7	7	112	76	80
Группа 4 (Подложка – Si)						
10×10	1	7	7	81	74	80
10×20	2	7	7	107	75	80
10×30	3	7	7	112	80	80
10×40	4	7	7	115	68	80
Группа 5 (Подложка — Si+SiO <sub>2</sub> )						
10×10	1	7	7	76	86	80
10×20	2	7	7	84	65	80
10×20	2	7	7	88	72	80
10×30	3	7	7	152	120	80
10×40	4	7	7	160	113	80
10×60	6	7	7	262	241	80
10×60	6	7	7	275	238	80
Группа 6 (Подложка — Si+SiO <sub>2</sub> )						
50×50	1	7	7	90	78	80
50×30	1,7	7	7	217	166	80
50×20	2,5	7	7	242	187	80

В качестве примера на рис. 1, *а* приведены кривые магнитного гистерезиса пленки кобальта толщиной 50 нм вдоль и перпендикулярно направлению оси легкого намагничивания. Низкое значение коэффициента  $k$  для пленки кобальта в перпендикулярном направлении не позволяет наблюдать импульс при динамическом перемагничивании в этом направлении, в то время как при перемагничивании вдоль оси легкого намагничивания фиксируется узкий интенсивный пик. На рис. 1, *б* представлены кривые магнитного гистерезиса системы  $\text{Co}$  магнитных битов толщиной 30 нм с размерами  $30 \times 10$  мкм через 7 мкм вдоль длинной и короткой сторон битов. Толщина  $\text{Co}_3\text{O}_4$  — 80 нм.



**Рис. 1. Кривая магнитного гистерезиса:**

- а* — пленки кобальта толщиной 50 нм, измеренная:
  - вдоль направления оси легкого намагничивания,  $k = 0,97$ ; - - - - перпендикулярно к ней,  $k = 0,35$ ;
- б* — системы магнитных битов из  $\text{Co}$  толщиной 30 нм, измеренная:
  - вдоль длинной стороны битов,  $k = 0,95$ ;
  - - - - перпендикулярно к ней,  $k = 0,77$

Опыт регистрации сигнала перемагничивания однослойных массивов битов показал, что несмотря на относительно большое значение коэффициента  $k$  вдоль битов, квадратичность кривой магнитного гистерезиса битов, как правило, недоста-

точно высока для наблюдения импульса динамического перемагничивания при данном количестве магнитного материала в паттернированных образцах в рамках использованного оборудования. В то же время импульс перемагничивания подслоя вдоль оси легкого намагничивания имеет заметную интенсивность. Этот факт лег в основу рассмотренной ниже идеи магнитного усиления сигнала от битов.

Амплитуда сигнала от однослойных (расположенных на оксиде кремния) паттернированных сред мала из-за малой величины коэффициента заполнения битами пространства на подложке и их малой толщины. Поэтому зафиксировать импульс перемагничивания массивов — достаточно трудная экспериментальная задача. Несмотря на указанные обстоятельства сигнал от однослойных паттернированных кодовых элементов в сильных полях был получен на ряде образцов. Тем не менее эти измерения показали настоятельную необходимость в увеличении удельной интенсивности излучения массивов, состоящих из совокупности битов (на единицу объема магнитного материала или на единицу площади).

Для решения этой задачи в данной работе была впервые предложена и реализована идея магнитного усиления, т. е. существенного увеличения амплитуды сигнала от битов за счет использования магнитомягкого подслоя. Идея заключалась в том, чтобы управлять моментом перемагничивания подслоя путем наложения на него системы магнитожестких битов. Эта идея получила экспериментальное подтверждение.

***Зависимость амплитуды и длительности сигнала от величины амплитуды внешнего перемагничивающего поля***

В работе были проведены измерения параметров сигнала, излучаемого массивами с битами и подслоем кобальта в зависимости от амплитуды внешнего синусоидального магнитного поля при неизменной ориентации относительно вектора магнитной индукции. Скорость перемагничивания оказывает влияние на параметры излучаемого сигнала. При этом увеличение амплитуды перемагничивающего поля при неизменной частоте эквивалентно изменению частоты при неизменной амплитуде, поскольку как в первом случае, так и во втором увеличивается скорость изменения магнитного поля в момент перемагничивания битов.

На рис. 2, *а* показана зависимость амплитуды излучаемого сигнала от амплитуды внешнего поля для битов  $5 \times 5$  мкм с подслоем кобальта 50 нм, а также для битов  $60 \times 10$  мкм с магнитомягким подслоем кобальта толщиной 100 нм; на рис. 2, *б* — зависимость длительности импульса перемагни-

чивания для битов  $5 \times 5$  мкм с магнитомягким подслоем кобальта 50 нм.

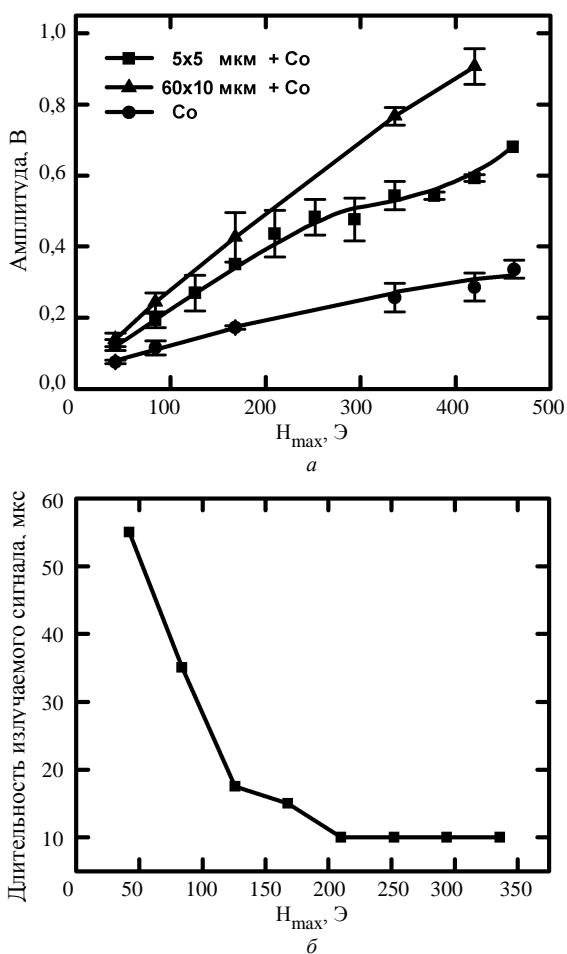


Рис. 2. Зависимость:

*a* — амплитуды излучаемого сигнала от амплитуды внешнего поля для битов  $5 \times 5$  мкм с подслоем кобальта 50 нм, а также для битов  $60 \times 10$  мкм с магнитомягким подслоем кобальта 100 нм; *б* — длины излучаемого сигнала от величины амплитуды внешнего поля для битов  $5 \times 5$  мкм с магнитомягким подслоем кобальта 50 нм

Из данных рис. 2, *a*, *б* следует:

- амплитуда сигнала, формируемого двухслойными паттернированными магнитными структурами с подслоем кобальта, при перемагничивании возрастает с увеличением амплитуды внешнего магнитного поля без признаков насыщения;
- излучаемый сигнал от двухслойных структур в 1,5—2 раза превышает сигнал от магнитомягкого подслоя при небольшой разнице значений коэрцитивных сил двухслойных массивов с битами и подслоя. Увеличение разницы коэрцитивных сил может приводить к снижению отличий интенсивности сигналов, излучаемых подслоем и двухслойным массивом при неизменной амплитуде и частоте перемагничивающего поля. Это обусловлено уменьшением скорости перемагничивания двухслойного бита с большей коэрцитивной силой за счет смещения его момента перемагничивания в сторону максимума перемагничивающего поля;

- данные измерений показали, что амплитуда сигнала от магнитомягкого подслоя кобальта толщиной 50 нм имеет тенденцию к насыщению и отстает от амплитуды соответствующего "сэндвича" с битами тем больше, чем больше амплитуда внешнего магнитного поля;

- результаты экспериментов свидетельствуют о том, что длительность сигнала (полуширина излучаемого импульса) уменьшается с увеличением амплитуды внешнего магнитного поля, что эквивалентно увеличению скорости перемагничивания. Насыщение длительности сигнала с увеличением амплитуды перемагничивающего поля, наблюдаемое на рис. 2, *б*, по-видимому, является методическим артефактом и обусловлено тем, что длительность излучаемого импульса становится сравнимой с минимальными характерными временами оцифровки АЦП (максимальная частота оцифровки используемого АЦП составляла 250 кГц).

Одним из значимых результатов, полученных при анализе зависимости параметров сигнала динамического перемагничивания от амплитуды переменного магнитного поля, является линейная зависимость как динамической коэрцитивной силы, так и скорости изменения магнитного поля в момент перемагничивания битов от амплитуды внешнего синусоидального поля. Данные линейные зависимости позволяют пересчитывать параметры сигналов перемагничивания битов, которые должны наблюдаться при фиксированной скорости изменения магнитного поля. Скорость может быть реализована при линейном характере нарастания перемагничивающего поля.

Линейный закон изменения внешнего поля не был реализован в данной работе, но рассматривался как весьма перспективный, поскольку он, по-видимому, позволяет получать равномерно интенсивный сигнал от разных систем битов в широком диапазоне коэрцитивных сил.

Авторами работы исследован импульс динамического перемагничивания от системы битов и подслоя при частоте внешнего поля 200 Гц. Был продемонстрирован эффект увеличения амплитуды сигнала и уменьшения его длительности, аналогичный эффекту увеличения амплитуды поля при частоте 50 Гц.

#### Экспериментальное определение динамических характеристик магнитных паттернированных сред

В табл. 2 приведены экспериментальные параметры импульсов перемагничивания, генерируемые однослойной системой битов с размерами  $30 \times 10$  и  $55 \times 10$  мкм, магнитомягкого подслоя кобальта толщиной 50 нм, а также двухслойных образцов, состоящих из подслоя и системы лежащих на нем битов указанных размеров.

Таблица 2

Параметры импульсов динамического перемагничивания

Тип структуры	Экспериментальные параметры			Расчетные параметры*	
	амплитуда, мВ	длительность, мкс	динамическая коэрцитивная сила, Э	амплитуда, мВ	длительность, мкс
30×10 мкм**	21	160	33,9	23	146
30×10 мкм + Со***	255	90	29,2	267	86
55×10 мкм	5	100	39,4	6	83
55×10 мкм + Со	340	60	32,9	372	55
Со	212	90	24,2	212	90

\* Параметры для линейного закона изменения внешнего поля.

\*\* Размер битов в паттернированной магнитной среде.

\*\*\* Мягкий Со, магнитный подслоя толщиной 50 нм.

Регистрация сигнала от образцов проводилась при ориентации внешнего магнитного поля вдоль длинной стороны битов. Чувствительность аппаратуры не позволила выявить сигнал перемагничивания при ориентации битов перпендикулярно магнитному полю как для однослойных, так и для двухслойных образцов, что говорит о том, что он меньше сигнала от параллельной ориентации, по крайней мере, на порядок величины.

В табл. 2 даны также расчетные значения параметров сигнала, ожидаемые при фиксированной скорости изменения магнитного поля, равной 17 Э/мкс (в данном случае использована максимальная скорость, характерная для перемагничивания магнитомягкого подслоя). Эти данные можно рассматривать как экстраполяцию для случая линейного закона изменения внешнего поля.

Из анализа данных табл. 2 следует, что, во-первых, происходит сдвиг коэрцитивной силы системы битов с подслоем относительно чистого подслоя в сторону больших значений, во-вторых, наблюдается существенный рост амплитуды сигнала от сэндвича по сравнению с сигналом от магнитных битов. Следует отметить, что амплитуда сигнала от сэндвича больше, чем сумма сигналов от системы битов и магнитомягкого подслоя по отдельности. Кроме того, как видно из расчетных значений амплитуд, эффект усиления сигнала с помощью магнитомягкого подслоя ожидается еще больше при использовании линейного закона изменения внешнего поля, в то время как положение пиков перемагничивания определяется значениями коэрцитивных сил.

В целом можно отметить, что в большинстве случаев сигнал от образцов, состоящих только из различных систем битов, не удается зарегистрировать из-за недостаточной амплитуды. Это означает (с учетом характеристик средств регистрации), что при использовании систем битов в комбинации с подслоем происходит усиление сигнала примерно в 10–100 раз в зависимости от геометрических характеристик двумерной периодической структуры, образованной битами.

Таким образом, применение магнитных паттернированных структур с магнитомягким подслоем открывает ряд потенциальных преимуществ по сравнению с однослойными структурами, а именно, способствует увеличению расстояний, на которых они могут быть зарегистрированы; снижает уровень требований к перемагничивающим устройствам, включая источники питания, что также облегчает увеличение объема зоны детектирования паттернированных сред.

Измерения сигналов от магнитных нанопаттернированных структур показали, что:

- большинство исследованных образцов с битами на подслое демонстрирует превышение сигнала вдоль битов относительно сигнала поперек битов примерно на порядок величины;
- образцы с битами и подслоем (при оптимальной толщине магнитомягкого подслоя) с учетом разброса значений демонстрируют большую амплитуду сигнала, чем сумма амплитуд сигналов от битов и подслоя по отдельности;
- для однотипных магнитных структур в некотором интервале толщин подслоя большую амплитуду сигнала демонстрируют образцы с большей толщиной подслоя. При дальнейшем увеличении толщины подслоя наблюдается уменьшение эффекта усиления, обусловленное ограниченностью объема подслоя, процесс перемагничивания которого регулируется влиянием магнитных битов.

Таким образом показано, что существует оптимальная толщина магнитомягкого подслоя, позволяющая реализовать в полной степени эффект усиления динамического сигнала перемагничивания паттернированных массивов с битами.

Авторами работы была предпринята попытка создания прототипа многобитовой ЭМИД-метки методом селективного удаления атомов. На рис. 3 показана временная последовательность импульсов излучения при перемагничивании совокупности расположенных на магнитомягком подслое двумерных периодических магнитных массивов, каждый из которых характеризуется своей коэрцитивной силой. Видно, что подобная структура мо-

жет служить прототипом многобитовой ЭМИД-метки.

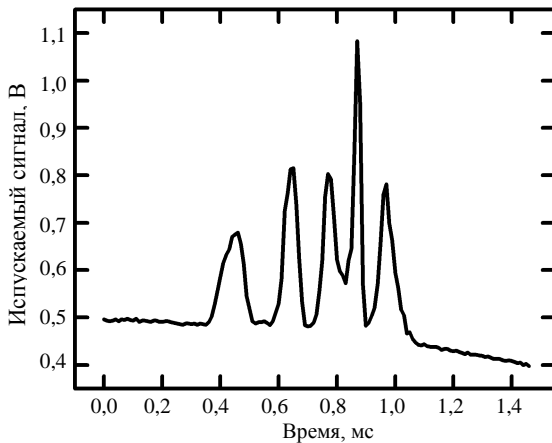


Рис. 3. Временная последовательность импульсов излучения при перемагничивании совокупности расположенных на магнитомягком подслое двумерных периодических магнитных массивов

#### Зависимость динамической коэрцитивной силы системы битов на подслое от геометрии структуры

Одна из основных практических задач — это обеспечение контролируемого сдвига коэрцитивных сил битов для обеспечения разделения сигналов. Среди возможных способов регулирования коэрцитивной силы есть способ вариации геометрии расположения магнитомягких битов в массиве, расположенном на подслое.

Для демонстрации эффекта влияния геометрии и взаимного расположения битов на коэрцитивную силу были изготовлены образцы паттернированных сред с магнитными массивами, содержащие одинаковые биты с размерами  $40 \times 10$  мкм, но с разным расстоянием между битами вдоль длинной стороны битов ( $d_B$ ) и поперек битов ( $d_s$ ). Габаритные размеры массивов с битами составляли 35 мм в длину и 100 мкм в ширину. На одном из образцов было реализовано смещение соседних строк относительно друг друга на расстояние  $\sim 10$  мкм вдоль битов. Ширина области массива на этом образце составляла 300 мкм. Общий размер образцов с массивом равнялся 40 мм в длину и 4 — в ширину. Магнитомягкий подслои напыляли на весь образец, т. е. значительную долю площади занимал подслои без битов. Качественный результат влияния геометрии расположения битов на коэрцитивную силу представлен на рис. 4.

Анализ рис. 4 показывает, что коэрцитивная сила меток увеличивается с увеличением расстояния между битами. При этом большее влияние, по-видимому, оказывает расстояние  $d_s$  между битами в направлении поперек их. Однако видно, что этот сдвиг небольшой и составляет величину  $\sim 1$  Э.

Значительно бóльший сдвиг наблюдается для образца, в котором расстояние между битами изменяется в направлении их длины (на  $4,5$  Э).

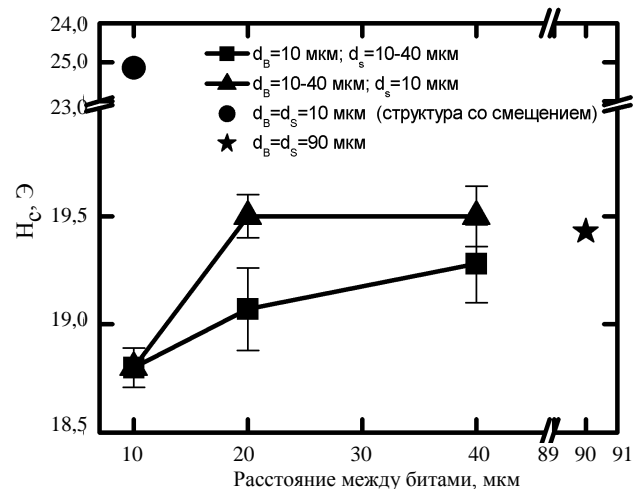


Рис. 4. Зависимость динамической коэрцитивной силы от расстояния между массивами вдоль битов ( $d_B$ ) и поперек битов ( $d_s$ ), а также для образца со смещенной геометрией расположения битов. Размеры массива  $40 \times 10$  мкм, ширина области с битами 100 мкм (со смещением — 300 мкм), длина области с битами 35 мм, толщина подслоя кобальта 50 нм

#### Особенности магнитной структуры однослойных битов и битов на магнитомягком подслое

Влияние анизотропии формы и геометрии на коэрцитивную силу магнитных паттернированных структур наиболее эффективно в области размеров элементарных магнитных битов (паттернов), когда последние являются однодоменными. Верхняя граница размеров, при которых биты остаются однодоменными, до настоящего времени точно не установлена, но, по-видимому, лежит в районе  $\sim 0,2$ — $0,3$  мкм. При бóльших размерах битов они перестают быть однодоменными. Неизвестны экспериментальные и теоретические работы, в которых исследовались бы эффекты влияния анизотропии формы битов на коэрцитивную силу по мере возрастания их размеров и после потери однодоменности. В данной работе исследовали особенности магнитной структуры кобальтовых битов (в интервале размеров от  $80 \times 400$  нм до  $10 \times 40$  мкм), полученных облучением оксида кобальта протонами.

На рис. 5, а, б, в показана нанопаттернированная магнитная структура с размерами битов  $80 \times 400$  нм. Из магнитосиловых изображений видно, что биты таких размеров являются однодоменными в исходном состоянии и после перемагничивания.

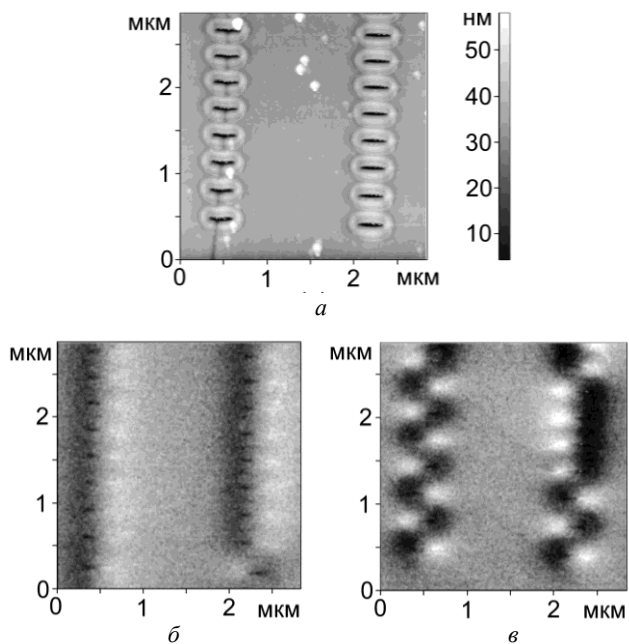


Рис. 5. Пример нанопаттернированной магнитной среды с размером битов  $80 \times 400$  нм: а — топографическое магнитосиловое изображение; б, в — магнитосиловые изображения

Исследование образцов с микронными размерами битов непосредственно после облучения показало, что биты такого размера являются по своей природе многодоменными, что и следовало ожидать, исходя литературных данных по максимальным размерам однодоменных частиц. На рис. 6, а, б приведено топографическое и магнитосиловое изображения магнитных битов размером  $2 \times 12$  мкм непосредственно после облучения без намагничивания. Хорошо видно, что данные биты в размагниченном состоянии являются многодоменными.

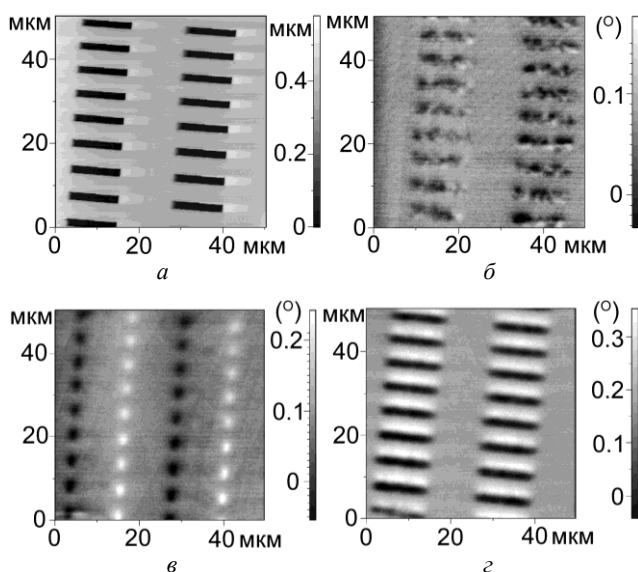


Рис. 6. Топографическое (а) и магнитосиловые (б–г) изображения магнитных битов размером  $2 \times 12$  мкм непосредственно после облучения (без дополнительного намагничивания) (б) и после намагничивания вдоль длинной (в) и короткой (г) сторон битов

Эти же магнитные биты были исследованы после намагничивания во внешнем магнитном поле вдоль и поперек их длинной стороны (см. рис. 6, в, г). Магнитосиловые изображения в данном случае имеют псевдооднодоменный вид (однодоменный в намагниченном состоянии), т. е. каждый бит имеет два четко выраженных полюса, при этом никакой доменной структуры внутри бита не наблюдается.

Намагниченные таким образом биты выдерживали несколько дней для определения стабильности их магнитного состояния. Установлено, что при такой выдержке получаемое магнитосиловое изображение не изменяется и свидетельствует о стабильности данного магнитного состояния битов.

Аналогичная картина наблюдалась и для битов размером  $8 \times 48$  мкм (рис. 7). При их намагничивании отмечалась псевдооднодоменная структура. Однако при поперечном намагничивании (см. рис. 7, г) видна некоторая неравномерность контраста магнитных полюсов, особенно для бита, расположенного в нижней части этого рисунка, что, вероятно, связано с меньшей устойчивостью поперечно-намагниченного состояния бита к распаду на многодоменную структуру.

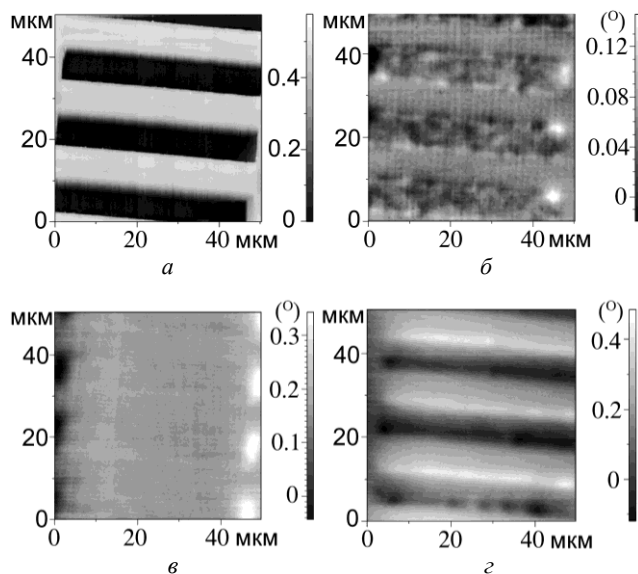
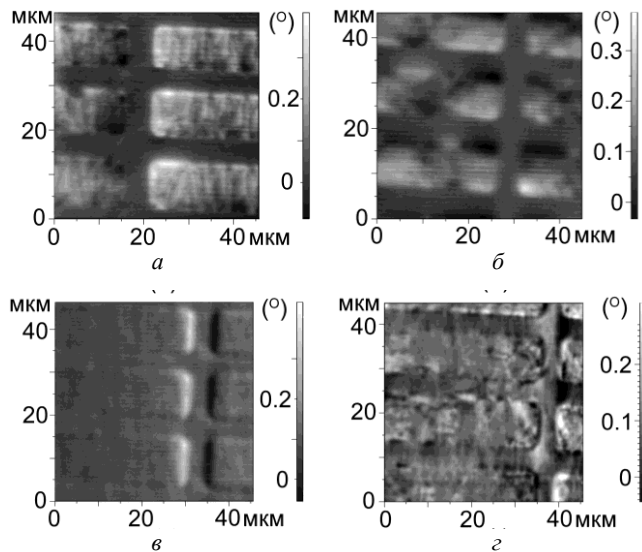


Рис. 7. Топографическое (а) и магнитосиловые (б–г) изображения магнитных битов размером  $8 \times 48$  мкм непосредственно после облучения (б) и после намагничивания вдоль длинной (в) и короткой (г) сторон битов. Толщина исходного оксида кобальта — 70 нм

При исследовании битов бóльшего объема (размером  $10 \times 40$  мкм и толщиной исходного оксида кобальта 120 нм) обнаружено, что они имеют многодоменную магнитную структуру при намагничивании как вдоль длинной стороны битов, так и вдоль короткой (рис. 8, а, б). Отметим, что в данном случае полюсы более ярко выражены при поперечном направлении намагничивания, чем



при продольном. Этот эксперимент показывает, что псевдооднодоменная структура битов в намагниченном состоянии свойственна им только тогда, когда их объем не превышает некоторой критической величины. Исчезновение псевдооднодоменной структуры при достижении битами критического объема обусловлено соответствующим ростом запасенной энергии. Для таких же битов, но созданных на магнитомягком подслое кобальта, полученные магнитосиловые изображения существенно отличались от аналогичных изображений битов без подслоя (см. рис. 8, в, г).



**Рис. 8. Магнитосиловые изображения магнитных битов размером  $10 \times 40$  мкм без подслоя (а, б) и с магнитомягким подслоем кобальта толщиной 50 нм (в, г) после намагничивания:**

а, в — вдоль длинной стороны битов;  
б, г — вдоль короткой стороны битов.

Толщина исходного оксида кобальта — 120 нм

Так, при намагничивании битов вдоль длинного направления наблюдался контраст, близкий к псевдооднодоменному (см. рис. 8, в), а при намагничивании поперек длинного направления битов — контраст имеет ярко выраженную многодоменную структуру (см. рис. 8, г).

Таким образом, присутствие магнитомягкого подслоя стабилизирует псевдооднодоменную структуру вдоль длинной стороны магнитных битов.

### Заключение

Показано, что метод селективного удаления атомов позволяет изготавливать псевдооднодоменные магнитные биты и массивы на их основе с широким диапазоном значений коэрцитивных сил. Обнаружено влияние материала и структурного состояния подложки на величину коэрцитивной

силы битов и рост последней с увеличением коэффициента анизотропии формы битов.

Использование магнитомягкого подслоя приводит к сильному (до  $\sim 100$  раз) увеличению амплитуды сигнала от перемагничиваемых битов и позволяет сохранить квазиоднодоменное состояние битов после их намагничивания вдоль длинной стороны даже при их большом объеме, что способствует увеличению расстояний, на которых они могут быть зарегистрированы, и снижает уровень требований к перемагничивающим устройствам, включая источники питания. Сигнал от битов с подслоем, перемагничиваемых вдоль длинного направления, более чем на порядок превышает сигнал от битов, перемагничиваемых поперек длинного направления битов.

Амплитуда сигнала, формируемого двухслойными магнитными паттернированными средами, при перемагничивании возрастает с увеличением амплитуды внешнего магнитного поля без признаков насыщения и с увеличением частоты внешнего магнитного поля. При этом длительность сигнала уменьшается с ростом амплитуды или частоты внешнего магнитного поля, что в обоих случаях эквивалентно увеличению скорости перемагничивания (изменения внешнего магнитного поля).

Продемонстрирована возможность создания многобитовой ЭМИД-метки за счет получения временной последовательности импульсов излучения при перемагничивании совокупности, расположенных на магнитомягком подслое, двумерных периодических магнитных массивов с разной коэрцитивной силой.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках гранта 06-080-08046 офи и Федеральным агентством по науке и инновациям в рамках контракта № 02.513.11.3192.*

### Литература

1. Kittel C. // Phys. Rev. 1946. V. 70. P. 965.
2. Nogues J., Schuller I. K. // J. Magn. Magn. Mat. 1999. V. 192. P. 203.
3. Гурович Б. А., Долгий Д. И., Кулешова Е. А. и др. // УФН. 2001. Т. 171. С. 105.
4. Gurovich B., Kuleshova E., Meilikhov E., et al. // J. Magn. Magn. Mat. 2004. V. 272—276. P. 1629.
5. Gurovich B., Kuleshova E., Dolgy D. et al. // Nanostructured Magnetic Materials and their Applications / Eds.: B. Aktas et al. Kluwer Academic Publishers. 2004. P. 13.

Статья поступила в редакцию 29 октября 2007 г.

## **Emitting and magnetic properties of the pseudo-single domain micro and nanopatterned magnetic media**

*B. A. Gurovich, K. E. Prikhodko, E. A. Kuleshova, A. G. Domantovsky, K. I. Maslakov*  
Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*The spectra of electromagnetic emitting pulses arising at magnetization reversal of magnetic patterned medias, produced by the method of selective removal of atoms and consisting of pseudo-single domain bits (single-domains in the magnetized state). An obvious dependence of bit coercivity on anisotropy factor of their form and on the distance between them was found. The effects of magnetically-soft underlayer were studied. Magnetic force microscopy was used to reveal the peculiarities of magnetic structure of bits.*

\* \* \*