

УДК 681.84.083.82

Розорин Г. Н., докт. техн. наук, профессор (Тел.: +380 63 248 95 27. E-mail: rozor46@mail.ru)

Масуд Махдзубіан, аспірант (Тел. +380 44 249 29 27)

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев)

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ДИСКОВЫХ ЦИФРОВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Розорин Г. М., Масуд Махдзубіан. Тонкоплівкові магнітні голівки нового покоління для дисккових цифрових накопичувачів. Розглянуті модифіковані матеріали і багатошарові структури тонких плівок, що дозволяють значно поліпшити експлуатаційні характеристики магнітних головок дисккових накопичувачів, зокрема зменшити полюсне стирання, отже підвищити щільність запису. Для посилення магнітном'яких властивостей робочих шарів носіїв для перпендикулярного запису виду Fe-Co-B рекомендовано використовувати додаткові підшари состава Ni-Fe. Ці підшари ефективно зменшують коерцитивну силу й збільшують площинну магнітну анізотропію.

Ключові слова: високомоментний матеріал, коерцитивна сила, магнітна анізотропія, перпендикулярний запис, поверхнева щільність запису

Розорин Г. Н., Махдзубіан Масуд. Тонкопленочные магнитные головки нового поколения для дисктовых цифровых накопителей. Рассмотрены модифицированные материалы и многослойные структуры тонких пленок, позволяющие значительно улучшить эксплуатационные характеристики магнитных головок дисктовых накопителей, в том числе уменьшить полюсное стирание, следовательно повысить плотность записи. Для усиления магнитномягких свойств рабочих слоев носителей для перпендикулярной записи вида Fe-Co-B рекомендовано использовать дополнительные подслои состава Ni-Fe. Эти подслои эффективно уменьшают коэрцитивную силу и увеличивают поверхностную магнитную анизотропию.

Ключевые слова: высокомоментный материал, коэрцитивная сила, магнитная анизотропия, перпендикулярная запись, поверхностная плотность записи

Rozorynov G. N., Mahjoubian Masoud. A thin-film magnetic heads of new generation for disk digital stores. The modified materials and multilayer thin film structures considered in this work, resulted in a significantly improved performance margin of HDD magnetic heads, including reduced pole erasure; hence enabling higher recording densities. For strengthening of soft magnetic properties of workings layers of magnetic medium for the perpendicular record of Fe-Co-B type it is recommended to utilize the additional Ni-Fe sublayers. These sublayers effectively diminish a coercitivity and increase a surface magnetic anisotropy.

Keywords: high-torque material, coercitivity, magnetic anisotropy, perpendicular record, surface bit density

Введение. В течение длительного периода развития дисктовых магнитных накопителей сравнительно неплохие характеристики записи-воспроизведения обеспечивали магнитные головки с массивным, обычно ферритовым сердечником [1]. Однако, геометрические параметры данных головок, их высокая индуктивность и другие факторы стали сдерживать увеличение информационной емкости и скорости передачи данных. В последнее время в лучших накопителях информации используются тонкопленочные магнитные и магниторезистивные головки разных модификаций [2]. Современные накопители, основанные на перпендикулярной магнитной записи, содержат однополюсные магнитные головки, рабочий элемент которых в виде основного полюса выполнен из высокопроницаемого тонкопленочного материала.

Повышение плотности записи информации сопряжено с уменьшением каждого из параметров записи, а именно: расстояния между дорожками, линейного размера бита информации (длины перехода намагниченности), величины рабочего зазора магнитной головки, толщины рабочего слоя носителя для продольной и перпендикулярной записи, расстояния между головкой и носителем [2, 3].

Существенное увеличение информационной плотности обеспечивает перпендикулярная магнитная запись. С уменьшением расстояния между головкой и носителем преимущества перпендикулярной записи, по сравнению с продольной, становятся очевидными. Это наглядно подтверждается зависимостью уровня сигнала воспроизведения E от расстояния между головкой и носителем h (Рис. 1, а) и функциональной зависимостью $D = f(h)$ (Рис. 1, б) для продольной (кривая 1) и перпендикулярной (кривая 2) записи [2].

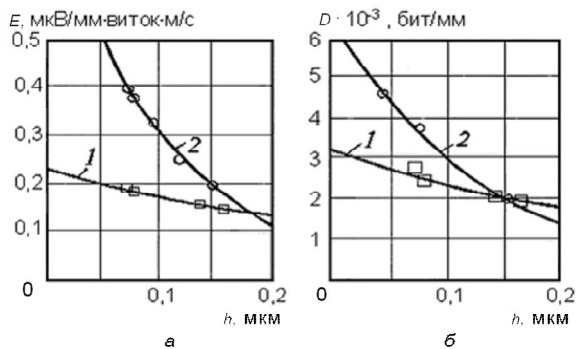


Рис. 1. Характеристики записи-воспроизведения

Динамика роста накопленных знаний о конструктивных возможностях магнитных головок показывает, что для магнитной записи наступил этап активного применения современных технологий с использованием новых конструктивных материалов.

Целью работы является совершенствование тонкопленочных магнитных головок для дисковых накопителей с перпендикулярной цифровой записью на основе модифицированных высокоиндуктивных материалов и многослойных структур тонких пленок.

Основная часть. Магнитная головка (МГ) является связующим звеном между электрическими и магнитными процессами, происходящими при записи и воспроизведении информации.

Для изготовления МГ используются магнитномягкие материалы (пермаллой, альфенол, сендаст, феррит, аморфные сплавы) [1...5].

При воспроизведении записанных с большой плотностью перепадов намагниченности происходит искажение сигнала, которое в зависимости от изменения длины контактной поверхности МГ показывает, что сужение отклика происходит из-за потери низкочастотных составляющих спектра воспроизводимого сигнала, если длина волны больше длины контактной зоны пары носитель записи – МГ. Другой причиной сужения воспроизведенного сигнала является уменьшение протяженности самого перепада намагниченности на носителе за счет повышения градиента поля записи вдоль направления движения носителя.

Современные технологии позволяют изготавливать индукционные тонкопленочные магнитные головки (ТМГ) с относительно толстым магнитопроводом (около 25 мкм) [2]. Такая толщина магнитопровода необходима для исключения его магнитного насыщения. Магнитопровод формируется из кобальт-ниобий-циркониевого материала с магнитной индукцией насыщения 0,9 Тл. Тонкопленочные полюсные наконечники имеют закругленную форму, что обеспечивает оптимальное распределение магнитного потока в области их торцевых поверхностей. По своей конструкции такая ТМГ является вертикальной с двухуровневой тонкопленочной электропроводящей обмоткой с плоскими спиральными витками, расположенными в двух параллельных плоскостях между нижней и верхней частями магнитопровода. Намотанная из меди обмотка содержит более десятка витков. В качестве изолирующего материала используется двуокись кремния. Уровень сигнала воспроизведения при записи с помощью данной головки гораздо выше, чем при записи с помощью ферритовой головки вплоть до 11 МГц [2].

Комбинированная технология, включающая напыление и электроосаждение, позволяет изготавливать ТМГ с двухуровневой 48-витковой обмоткой, т.е. с обмоткой, содержащей относительно большое число витков [2]. Обмотка головки формируется из меди электроосаждением через прецизионную резистивную маску, выполненную при помощи ионного реактивного травления. Данная головка имеет вертикальную конфигурацию с симметричными полюсными наконечниками толщиной 3 мкм, выполненными из пермаллоя, с величиной рабочего зазора 0,4 мкм и шириной полюсных наконечников 6,5 мкм. С помощью такой головки реализована продольная плотность записи около 2165 бит/мм при поперечной плотности, приблизительно равной 110 дор/мм; отношение сигнал/шум при этом примерно на 3 дБ больше, чем в аналогичной 31-витковой ТМГ [2]. Эти характеристики получены при использовании в качестве носителя магнитного диска, имеющего многослойное С/Co-M-Cr/Cr покрытие с коэрцитивной силой 112 кА/м. Относительная скорость движения носителя составляла 8,67 м/с, высота плавания ТМГ 0,15 мкм, амплитуда тока записи 20 мА.

Електроосаженні пленки з високою індукцією насичення B_S широко використовуються для магнітопроводів ТМГ при продольній і перпендикулярній записях. Відомо, що магнітна індукція плінок, отриманих електроосаженням, не перевищує 2,4 Тл. Магнітні властивості таких плінок можуть бути оптимізовані таким чином, щоб отримати низьку коерцитивність і залишкову індукцію B_r .

В Табл. 1 приведені властивості деяких високоіндуктивних плінок [5].

Свойства электроосаженных пленок

Табл. 1

Материал	B_S , Тл	H_{ce} , кЭ	H_{ch} , кЭ	H_k , кЭ	B_r / B_S , Н	Прочность, МПа	$\lambda \cdot 10^{-6}$, отн.ед
Co-Fe (отожженный)	2,35	11,99 6,90	3,44 1,51	25,39 26,14	0,17 0,08	300-400	+65
Co-Ni-Fe (отожженный)	2,25	8,86 5,78	2,54 1,15	21,61 17,71	0,17 0,08	400-500	+60
Ni-Fe (88 %) (отожженный)	2,05	4,63	1,98	10,60	0,73	650	+30
Ni-Fe (71 %) (отожженный)	2,01	4,64 2,73	2,31 0,77	9,33 5,41	0,60 0,19	100-150	+31

Как следует из Табл. 1 высокоиндуктивные пленки Co-Fe с B_S от 2,25 Тл до 2,35 Тл демонстрируют умеренную прочность на растяжение 300...500 МПа и высокую магнитострикцию λ , более $60 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. Важно обеспечить низкую коерцитивную силу и малую остаточную намагниченность, чтобы получить минимальный эффект стирания остаточной намагниченности записывающим полюсом. Отжиг в магнитном поле существенно улучшает магнитномягкие свойства плінок. Отжиг осуществляется при напряженности поля 2 кЭ, ориентированного вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) и температуре около 190 °С. Из Табл. 1 видно, что процесс отжига снижает коерцитивную силу, как по ОЛН H_{ce} , так и по оси трудного намагничивания (ОТН) H_{ch} , а также остаточную намагниченность в направлении ОТН. Между тем, появляющиеся "пульсирующие" домены уменьшаются, а продольные домены растягиваются.

В работе [4] исследовались также Ni-Fe пленки с меньшей индукцией, содержащие 71...88 % Fe. Все Ni-Fe пленки осадились в сульфатных/хлоридных ваннах. Значения B_S этих двух плінок находятся в диапазоне 2,0...2,1 Тл. Они имеют лучшие характеристики полюсного стирания, которые частично обусловлены меньшим значением магнитострикции, около $30 \cdot 10^{-6}$ отн.ед. Однако, Ni-Fe головки имеют невысокое отношение сигнал/шум и хуже перезаписывают данные, из-за относительно низкого значения B_S .

Применение электроосаженных плінок в процессе изготовления записывающих головок позволяет усовершенствовать некоторые технологии производства головок для продольной записи, разработанных в прошлые десятилетия. Однако при этом отсутствует гибкость обеспечения необходимых магнитных свойств, таких как анизотропия H_k , прочность и магнитострикция, которые в осаженных материалах несколько ограничены. Более того, очень трудно сформировать многослойную осаженную структуру, которая должна быть эффективным средством для уменьшения остаточной намагниченности стирающего полюса. С этой точки зрения, анализируемые осаждаемые пленки, как главные материалы для полюсных наконечников, выглядят неубедительно.

Напыленные материалы с высокой B_S обладают большей гибкостью в оптимизации магнитных свойств плінок и повышают эффективность записи. Двухслойное

антиферромагнитное (АФМ) покрытие приводит к расщеплению петли гистерезиса по ОЛН, обеспечивая почти безгистерезисную петлю по ОТН и высокое поле анизотропии H_k . Такой тип магнитной характеристики материала полюса приводит к меньшей остаточной магнитной индукции головки в слабом возбуждающем поле, следовательно, к меньшей остаточной магнитной индукции стирающего полюса.

В настоящей работе установлено, что величина переменного возбуждающего поля и изменения петли гистерезиса по ОЛН сильно зависят от шероховатости пленки.

На Рис. 2 показаны петли гистерезиса магнитной пленки с высоким значением B_S в случае трехслойных АФМ покрытий.

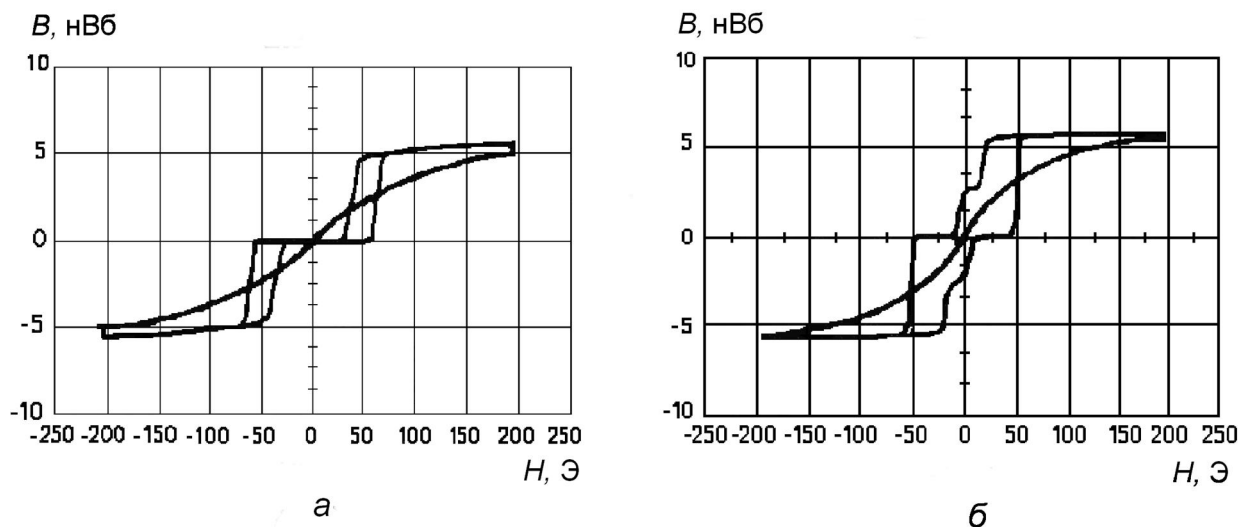


Рис. 2. Петли гистерезиса по ОЛН и ОТН для высокоиндуктивной пленки с трехслойным АФМ покрытием
 а – шероховатость $R_a = 0,5$ нм; б – шероховатость $R_a = 1,4$ нм

Пленка с малой шероховатостью порядка 0,5 нм требует большего значения возбуждающего поля около 50 Э и имеет одноступенчатую петлю гистерезиса по ОЛН, в то время как пленка с шероховатостью 1,4 нм требует возбуждающее поле 25 Э и характеризуется двухступенчатой петлей по ОЛН.

Боле того, оказалось, что магнитные свойства пленок с АФМ напылением зависят от числа слоев покрытия. Кривые петель гистерезиса для пленок с двух-, пяти- и восьмислойным АФМ покрытием показаны на Рис. 3.

Наивысшее значение поля анизотропии H_k и значительное увеличение петли вдоль ОЛН и ОТН наблюдалось у пленок с восьмислойным покрытием.

Можно полагать, что увеличивающаяся шероховатость приводит к ослаблению связей между АФМ покрытиями, повышению коэрцитивной силы, остаточной индукции и разрушению доменной структуры, которые ясно наблюдаются в восьмислойной пленке.

Стирающий эффект магнитных головок с АФМ покрытиями исследовался с помощью контактной сканирующей записи на носителе для перпендикулярной записи [5]. Остаточная магнитная индукция головки оценивалась по магнитным следам на носителе, оставшимся после стирания постоянным током.

Магнитные отпечатки создавались импульсным током записи, подаваемым в неподвижную головку. Головку дискретно перемещали по поверхности магнитного носителя так, чтобы во время изменения местонахождения она была выключена.

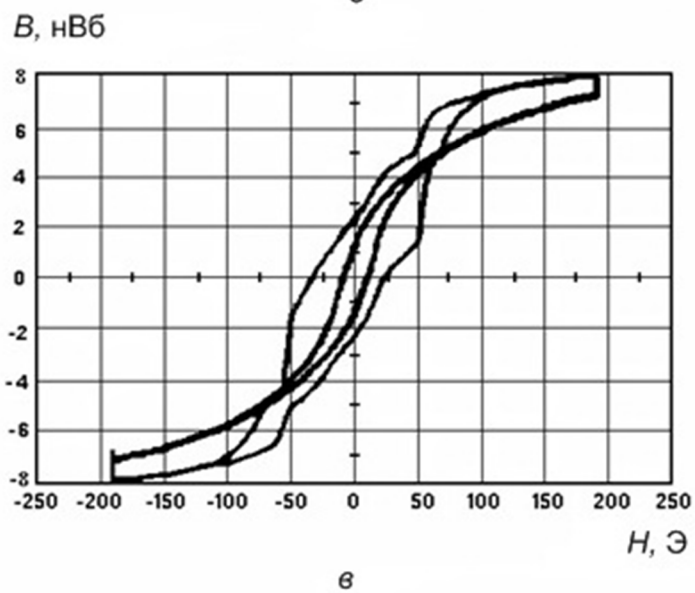
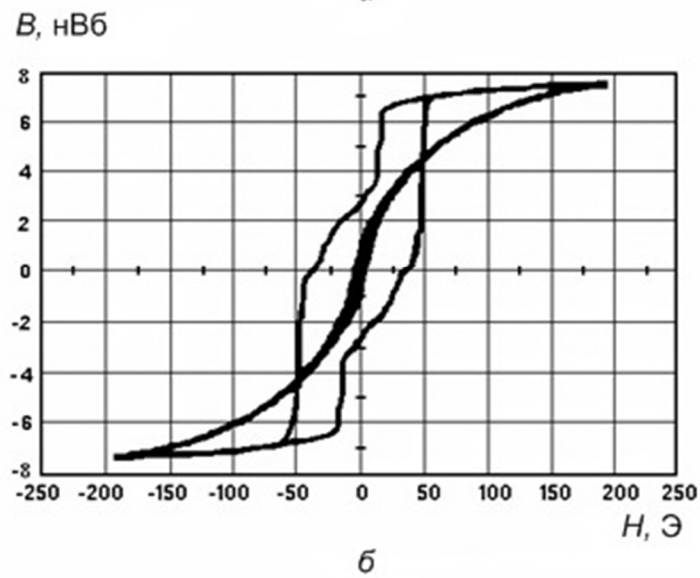
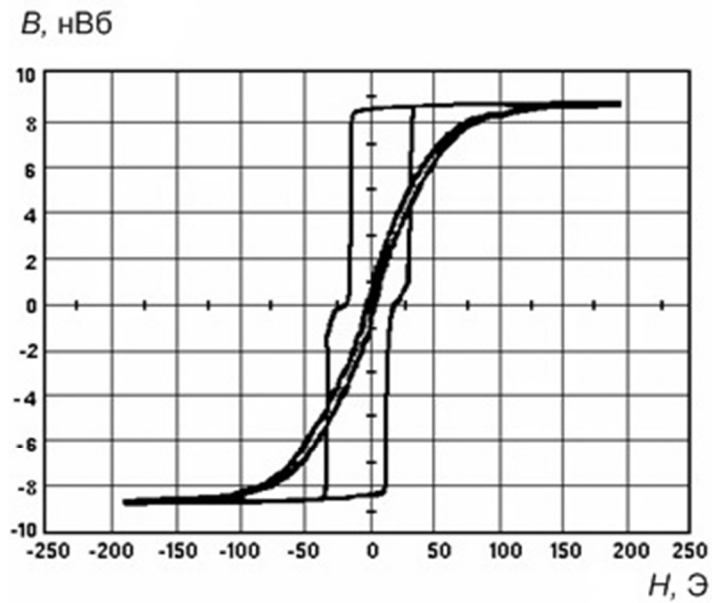


Рис. 3. Петли гистерезиса по ОЛН и ОТН высокоиндуктивных пленок с многослойным АФМ покрытием:
а – два слоя; *б* – пять слоев; *в* – восемь слоев

Ток записи увеличивали по мере перехода с дорожки на дорожку, а вдоль одной дорожки ток записи оставался постоянным. Магнитные отпечатки воспроизводились аналогичной головкой. Результаты такого исследования для магнитной головки с пятислойным АФМ покрытием показаны на Рис. 4. Светлые пятна соответствуют магнитным отпечаткам.

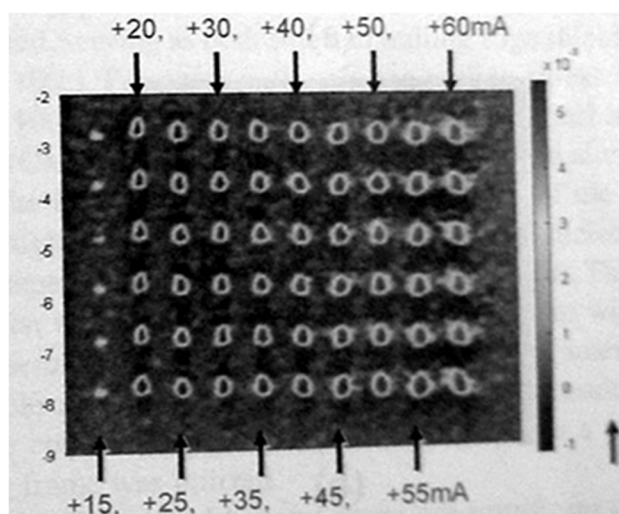


Рис. 4. Результат контактной сканирующей перпендикулярной записи головкой с пятислойным покрытием.

Хорошо определяемые магнитные отпечатки были записаны в тех местах, где ток был включен. Никаких отпечатков не обнаруживается в тех местах, где ток был выключен. Это подтверждает отсутствие стирания записи полюсным наконечником магнитной головки из-за остаточной индукции, вплоть до силы тока 60 мА.

Покрытие полюсного наконечника записывающей магнитной головки существенно (в три раза) уменьшает ее остаточную магнитную индукцию при заданных размерах полюсного наконечника.

Увеличение числа слоев покрытия вплоть до восьми не приводило к уменьшению остаточной магнитной индукции.

На характеристики записи влияет магнитная анизотропия. Изменить анизотропию можно с помощью подложки, которая улучшает структуру доменных конфигураций, следовательно, изменяет характеристики стирания полюсного наконечника из-за остаточной магнитной индукции.

Поле анизотропии, формирующееся в подложке толщиной 152,4 мкм, было исследовано с помощью магнитооптического микроскопа Керра. На Рис. 5, а показан типичный вид подложки для пленки, с недостаточно хорошей ориентацией анизотропии. Для сравнения на Рис. 5, б показана картина хорошо ориентированного поля анизотропии, которое получается при использовании современных технологий нанесения пленок. Каждая линия отображает локальную ориентацию анизотропии на подложке.

Таким образом, покрытие является одним из полезных приемов снижения остаточной магнитной индукции полюсного наконечника. Шероховатость пленки и число слоев покрытия влияют на коэрцитивную силу, остаточную индукцию и обменное взаимодействие в АФМ покрытых пленках.

Для того чтобы гарантировать минимальное стирание полюса, желательно, чтобы направление намагниченности в полюсе было параллельным аэронесущей поверхности. Это особенно важно для поддержания первичного направления индуцированной в пленке анизотропии, где на нее влияют окружающие полюсный наконечник внутренние и внешние магнитные поля.

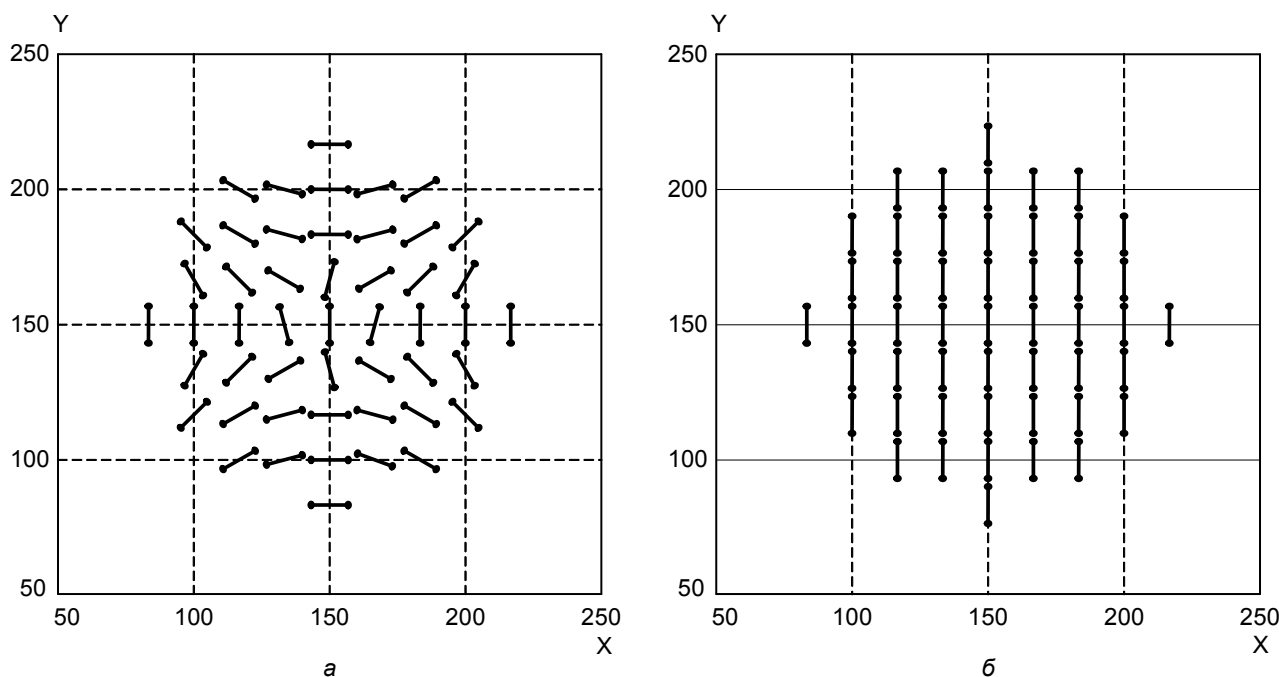


Рис. 5. Увеличенное изображение поля анизотропии пленки по ОЛН (мм):
а – "вращающаяся" анизотропия; **б** – хорошо ориентированная анизотропия

Что касается многослойных Co-Fe/Pd структур, то различные исследования [4, 5] показывают незначительное увеличение значения B_S более 2,45 Тл в полном срезе пленки, хотя возможно, что это зависит от улучшения связи подрешетки Co-Fe, с Pd.

Выводы

1. Пленка с шероховатостью 0,5 нм требует большого значения возбуждающего поля (около 50 Э) и имеет одноступенчатую петлю гистерезиса по ОЛН, в то время как пленка с шероховатостью 1,4 нм требует вдвое меньшего возбуждающего поля и характеризуется двухступенчатой петлей.

2. Магнитные свойства пленок с АФМ напылением зависят от числа слоев покрытия. Наивысшее значение поля анизотропии H_K и значительное увеличение петли вдоль ОЛН и ОТН наблюдается у пленок с восьмислойным покрытием.

3. Применение рассмотренных высокоиндуктивных материалов и многослойных покрытий позволяют уменьшить полюсное стирание магнитных головок, что в итоге повышает плотность записи в дисковых накопителях.

Литература

1. Гитлиц М. В. Магнитная запись сигналов / М. В. Гитлиц. – Москва : Радио и связь, 1990. – 225 с.
2. Карпенков С. Х. Тонкопленочные накопители информации / С. Х. Карпенков. – Москва : Радио и связь, 1993. – 504 с.
3. Розоринов Г. Н. Устройства цифровой магнитной звукозаписи / Г. Н. Розоринов, В. Д. Свяченый. – Київ : Техніка, 1991. – 157 с.
4. Chen Y. High moment materials and fabrication process for shielded perpendicular write head beyond 200 Gb/in² / Y. Chen, et al. // IEEE Trans. Magn. – February 2007. – Vol. 43, № 2. – P. 610-613.
5. Batra S. Investigation of perpendicular write head design for 1 Tb/in² / S. Batra // IEEE Trans. Magn. – January 2004. – Vol. 40, № 1, pt. 2. – P. 319-325.