

Магнитные носители информации

Современное состояние и проблемы

С. Карпенков

По оценкам специалистов, к 2000 году поверхностная плотность записи информации на жестких магнитных дисках составит не менее 8 Мбайт/мм². Это означает, что объем информации, хранимой на диске диаметром 65 мм, превысит 2,5 Тбит. Достижению таких результатов способствует применение перспективных материалов рабочего слоя носителя и магнитных головок, в частности материалов с гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом и чрезвычайно высокой чувствительностью для воспроизводящих головок.

Для современных магнитных носителей поверхностная плотность информации составляет 0,20–0,23 Мбит/мм², что соответствует линейной и поперечной плотности 2362 бит/мм и 860–1000 дорожек/мм соответственно [1–6]. Результаты моделирования и численного расчета основных параметров магнитных носителей свидетельствуют о том, что высокую поверхностную плотность записи, скажем 15,5 Мбит/мм², можно получить с помощью множества комбинаций параметров магнитного накопителя (табл.). Как видно из таблицы, для повышения поверхностной плотности записи нецелесообразно увеличивать поперечную плотность записи, поскольку в этом случае заметно снижается скорость передачи данных. Поэтому сейчас работы направлены на совершенствование материала носителя (в том числе многослойного), магнитных головок записи и воспроизведения, электронных схем управления и механических подвижных элементов накопителя. На фирмах IBM и Hitachi уже разработаны магнитные носители с поверхностной плотностью записи 1,5–3,0 Мбит/мм², выполненные из материалов с достаточно высокой коэрцитивной силой. Большое внимание уделяется применению в магнитопроводе головки записи тонкопленочных материалов с высокой намагниченностью насыщения M_s , выполнению головок воспроизведения на ГМР-материалах. Интенсивно изучается возможность применения в качестве рабочего слоя носителя материалов с перпендикулярной анизотропией. Так, на CoCr-носителе при перпендикулярной записи уже получена самая высокая на сегодняшний день линейная плотность записи — 25,6 Кбит/мм. Все эти исследования показывают, что проблема создания магнитного накопителя с высокой плотностью записи хотя и сложна, но разрешима.

Современные магнитные носители

Достоинства жестких магнитных дисков с тонкопленочными носителями признаны сравнительно недавно, хотя дис-

куссия о них ведется уже много лет. Один из основных недостатков таких носителей — относительно высокий уровень шума, обусловленного нерегулярным расположением намагниченных областей рабочего слоя. На уровень шума носителя влияет состав слоев покрытия, технические условия их формирования и т.п. С увеличением чувствительности магнитных головок воспроизведения, используемых в накопителях на базе тонкопленочных и особенно многослойных носителей с высокой плотностью записи информации, возрастают требования к подавлению шума.

С помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) можно обнаружить, что рабочий магнитный слой состоит из кристаллических зерен диаметром 10–50 нм, разделенных промежутками шириной около 1–4 нм. При этом кристаллические зерна и промежутки отличаются степенью сегрегации. Экспериментальные работы и численное моделирование показывают, что основной источник шума — взаимодействие между кристаллическими зернами тонкопленочного рабочего слоя, а уровень шума зависит от сегрегации макроструктуры этого слоя, особенно его нижней части. Кристаллические зерна связаны сильным обменным взаимодействием.

Чтобы обеспечить низкий уровень шума, силу этого взаимодействия необходимо свести к минимуму. Обменное взаимодействие уменьшается по экспоненциальному закону с

увеличением расстояния между зернами. Данные последних исследований показали, что при расстоянии около 4 нм обменное взаимодействие смежных зерен исчезает.

Известны три основных способа эффективного уменьшения уровня шума магнитных носителей: первый — физическая сегрегация кристаллических зерен путем формирования пористой структуры; второй — сегрегация по составу кристаллических зерен и третий — применение многослойной технологии. Именно многослойной технологии в последнее время уделяется повышенное внимание.

Многослойный носитель, как правило, состоит из магнитных слоев, разделенных немагнитными прослойками (хром, хром—ванадий, молибден и др.). Хотя каждый магнитный слой такого покрытия не может обеспечить достаточно высокий уровень сигнала воспроизведения, многослойный носитель позволяет получить сравнительно большое отношение сигнал—шум благодаря относительно низкому уровню шума. Так, отношение сигнал—шум для пленочного носителя типа CoNiCr с одним магнитным слоем при информационной плотности 4000 пер./мм составляет 25 дБ, а с шестью магнитными слоями — 35 дБ [7].

Комбинация параметров для пяти вариантов магнитного накопителя на жестких дисках

Параметр	Вариант накопителя				
	1	2	3	4	5
D_t , дорожек/мм	433	657	984	1237	1574
D_l , Кбит/мм	35,8	23,62	15,7	12,4	9,84
g , нм	40	60	100	100	100
d , нм	20	30	40	60	70
$P_{0,5}$, нм	70	107	157	197	244
H_c , кА/м	360	280	200	200	200
S/N , дБ	36,9	37,2	37,1	37,0	36,8
V_t , Мбит/с	22	150	100	78	62

Примечание. D_t — поперечная плотность записи; D_l — линейная плотность записи; g — рабочий зазор магнитной головки воспроизведения; d — расстояние между магнитной головкой и носителем; $P_{0,5}$ — ширина импульса на половинном уровне; H_c — коэрцитивная сила; S/N — отношение сигнал—шум; V_t — скорость передачи данных

Отношение сигнал—шум в накопителях на базе многослойных носителей существенно зависит от толщины как магнитных, так и немагнитных пленок. Однако характеры этих зависимостей противоположны. Если с увеличением толщины магнитных слоев отношение сигнал—шум монотонно убывает, то с увеличением толщины немагнитного слоя — растет, проходит через максимум и затем падает. Например, при плотности записи 4000 пер./мм с увеличением толщины магнитных слоев в системе CoPtCr с 5 до 30 нм отношение сигнал—шум монотонно снижается примерно с 15 до 1 дБ. В двухслойной системе CoCrTa/Cr с увеличением толщины промежуточного немагнитного слоя хрома с 0 до 2,5 нм отношение сигнал—шум возрастает с 36 до 42,5 дБ, а затем, при дальнейшем увеличении толщины до 30 нм, монотонно снижается до 39 дБ. Результаты исследований различных многослойных систем показали, что оптимальная толщина промежуточного слоя равна 2—5 нм.

Структура многослойного носителя влияет и на его магнитные свойства: с увеличением числа магнитных слоев уменьшаются коэффициент прямоугольности петли гистерезиса и коэрцитивная сила. Эти изменения магнитных свойств полезно учитывать при выборе оптимального числа магнитных слоев покрытия.

Влияние макромагнитных свойств носителя на уровень шума. Для получения относительно хороших характеристик записи—воспроизведения магнитного носителя необходима оптимальная комбинация микро- и макромагнитных свойств рабочего слоя носителя. Макромагнитные свойства: коэрцитивная сила, произведение остаточной намагниченности на толщину слоя, коэффициент прямоугольности петли гистерезиса — в основном определяют качество записи информации. Например, монотонное увеличение остаточной намагниченности пленок CoPtCr с ростом процентного содержания Co и Cr хорошо коррелируют с прямой зависимостью уровня шума от коэффициента прямоугольности петли гистерезиса. С уменьшением процентного содержания Co и Cr уровень шума начинает расти при большем значении коэффициента прямоугольности петли гистерезиса. Для одних и тех же значений этого коэффициента уровень шума у двухслойных пленок заметно ниже, чем у однослойных. Высокая подвижность осаждаемых частиц при напылении рабочего слоя способствует формированию пленки с высоким коэффициентом прямоугольности.

С увеличением числа магнитных слоев носителя коэрцитивная сила существенно уменьшается. Однако чем выше

скорость осаждения, тем она больше (одновременно увеличивается и остаточная намагниченность). Чтобы обеспечить достаточно высокое значение коэрцитивной силы, необходимо увеличивать скорость осаждения многослойных покрытий. Правда, при этом сложнее получить слой малой толщины.

Микромагнитная структура рабочего слоя. Образование магнитных вихрей и доменных границ сложной формы приводит к флуктуации намагниченности даже в центральной части перехода областей намагниченности. Это нужно обязательно учитывать при создании накопителей с высокой информационной емкостью на тонкопленочных носителях. Исследования микромагнитной структуры рабочего слоя на основе полученной с помощью РЭМ картины переходов областей намагниченности, записанных в тонкопленочном рабочем слое CoCrTa/Cr с продольным намагничиванием [8], показали, что по мере увеличения расстояния между рабочей поверхностью тонкопленочной магнитной головки и рабочим слоем носителя длина перехода области намагниченности в продольном направлении дорожки увеличивается. Растет также число захваченной намагниченности и размытие границ переходов.

Проблемы записи—воспроизведения

Проявление краевого эффекта при записи. Важное значение для качества записи на тонкопленочные носители и, следовательно, воспроизведения сигнала имеет распределение намагниченности перехода намагниченности в рабочем слое и поле рассеяния полюсного наконечника. Эти параметры оценивались путем численного моделирования записи узкой дорожки на ориентированном и изотропном рабочих слоях магнитного носителя [9]. Картины распределения намагниченности и поля рассеяния полюсного наконечника в обоих случаях внешне мало отличались друг от друга, хотя для изотропного рабочего слоя они более размыты, чем для ориентированного. На ориентированном рабочем слое в краевых зонах перехода намагниченности появлялись наклонные намагниченные участки, приводящие к уширению дорожки записи. Переход намагниченности в изотропном рабочем слое был менее контрастен, хотя уширение дорожки записи было таким же, что и в первом случае. Это говорит о том, что краевой эффект в изотропном рабочем слое проявляется слабее, чем в ориентированном.

Исследования процессов высокочастотного перемагничивания магнитопровода тонкопленочных магнитных головок с помощью магнитооптического метода

Керра показали, что по мере увеличения частоты области с вращением намагниченности смещаются к центру магнитопровода [10]. На частоте около 20 МГц доменные границы спрямляются, их число возрастает, а область вращения намагниченности расширяется.

При записи информации с высокой поперечной плотностью растет вероятность воспроизведения сигнала, записанного на смежной дорожке, приводя к снижению отношения сигнал—шум. Обычно для оценки такого стороннего воспроизведения ферритовых, тонкопленочных, магниторезистивных головок снимается кривая профиля дорожки. Этот метод обеспечивает высокое разрешение, но не дает информации о фазе. Проблема может быть решена путем использования двух независимых магнитных головок: относительно большой ширины — для записи, и узкой — для воспроизведения [11].

Магниторезистивные головки в меньшей степени, чем тонкопленочные магнитные головки и головки с металлическим заполнением рабочего зазора, реагируют на сигнал смежных дорожек. При записи низкочастотного когерентного сигнала паразитное влияние смежной дорожки возрастает, что проявляется при использовании магнитной головки с относительно узким рабочим зазором.

Характеристики воспроизведения для носителя с рабочим слоем на основе CoCr-пленок приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1а, величина сигнала воспроизведения в сильной степени зависит от коэрцитивной силы рабочего слоя: чем выше последняя, тем больше амплитуда сигнала. При оптимизации параметров носителя и магнитной головки важно учитывать, что увеличение эффективного расстояния d между головкой и носителем ведет к уменьшению амплитуды сигнала воспроизведения (рис. 1б) и линейной информационной плотности D_l (рис. 1в). Зависимость характеристик воспроизведения от эффективного расстояния d при перпендикулярной записи выражена сильнее, чем при продольной. Полученные результаты показывают, что при оптимальном выборе геометрических параметров магнитной головки и носителя даже при весьма малой ширине полюсного наконечника, задающего ширину дорожки, можно получить хорошие характеристики воспроизведения, что очень важно для повышения поперечной плотности записи.

При записи на носитель на основе CoCr-пленки с перпендикулярным намагничиванием увеличение линейной плотности записи D_l не вызывает существенного увеличения среднеквадратичного значения сигнала шума N . Но для того же носителя при продольной записи значе-

ние N возрастает (рис. 1г). Это означает, что переходы намагничённости носителя с перпендикулярной записью являются источниками незначительного шума.

Магнитные и микроструктурные свойства CoCr-рабочего слоя

Одним из лучших материалов для изготовления рабочего слоя носителя с перпендикулярным намагничиванием считается кобальт-хром, поскольку магнитокристаллическая анизотропия пленок этого материала наряду с анизотропией формы обеспечивает их достаточно высокую перпендикулярную анизотропию. Это побуждает исследователей проводить детальный анализ свойств CoCr-пленок. Известно, что магнитные характеристики CoCr-пленок, наносимых ионно-плазменным напылением, зависят от технологических условий, особенно от температуры подложки и давления рабочего газа (как правило, аргона). С увеличением температуры подложки существенно увеличивается коэрцитивная сила (с 16 до 80 кА/м при изменении температуры с 23 до 200°C) и намагнёченность насыщения. Такое изменение магнитных свойств пленок вызвано сегрегацией хрома в граничных областях кристаллических столбиков, ориентированных перпендикулярно плоскости пленки. Можно предположить, что процесс сегрегации в граничных областях кристаллических столбиков CoCr-пленок при определенных условиях осаждения способствует увеличению коэрцитивной силы в перпендикулярном направлении пленок. Правда, экспериментальных данных, подтверждающих такой вывод, пока нет.

Кристаллическая структура CoCr-пленок в значительной степени зависит и от давления рабочего газа при их осаждении: при относительно низком давлении формируется не столбчатая, а гранулированная структура. Исчезновение столбчатых кристаллов может сопровождаться уплотнением структуры. Рентгеноструктурный анализ таких пленок показал когерентность кристаллической решетки, а испытания носителей на их основе — более высокий уровень сигнала воспроизведения даже при относительно низкой коэрцитивной силе. На магнитные и структурные свойства напыляемых пленок влияет и адсорбция остаточных газов на поверхности подложки. Поэтому очистка поверхности и ограничение адсорбции требуют особого внимания.

Чтобы выявить структурные, анизотропные и магнитные свойства, проводились исследования CoCr-пленок, осажденных магнетронным способом на стеклянные подложки (предварительный вакуум — $5 \cdot 10^{-5}$ Па, скорость осаждения — 170 нм/мин) [12]. Магнитные свойства пленок определялись с помощью вибрационного

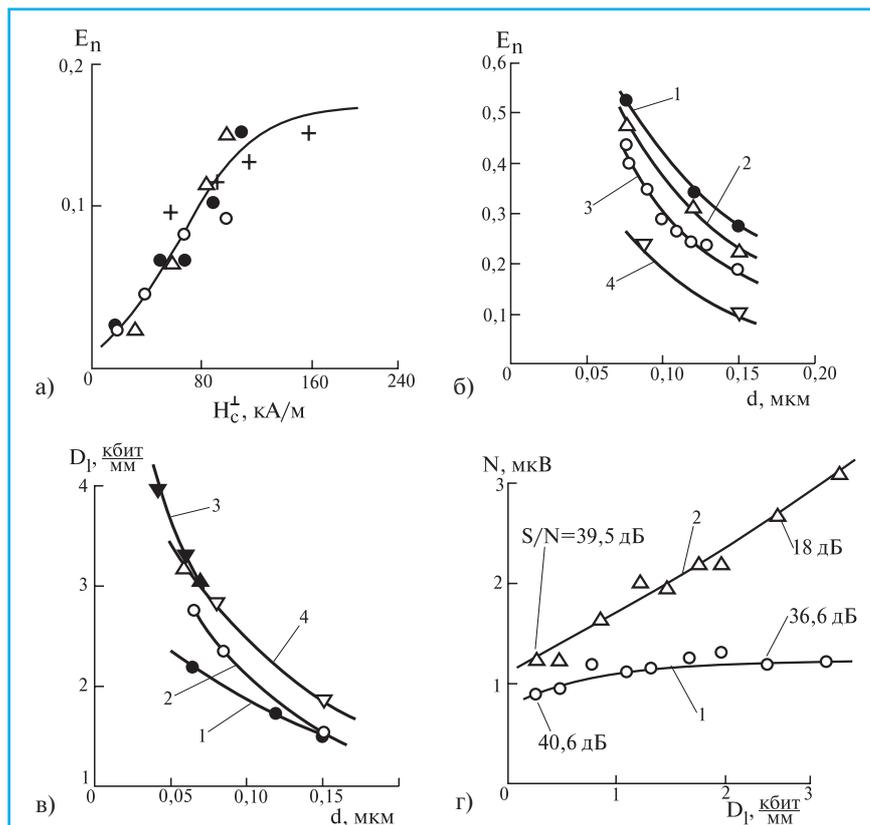


Рис. 1. Характеристики воспроизведения для высокоплотного носителя информации

Зависимости: а) уровня сигнала воспроизведения E_n от величины коэрцитивной силы в перпендикулярном направлении для CoCr-пленок с содержанием хрома 16 ат.% (+), 20 (Δ), 24 (\circ) и 26 ат.% (\bullet); б) E_n от эффективного расстояния между головкой и носителем для пленок толщиной $\tau = 0,15$ мкм, и полного наконечника толщиной $\tau_p = 0,4$ мкм и шириной $w = 1,0$ мкм (кривая 1), $\tau = 0,15$ мкм, $\tau_p = 0,3$ мкм и $w = 2,0$ мкм (кривая 2), $\tau = 0,15$ мкм, $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 10$ мкм (кривая 3) и $\tau = 0,1$ мкм, $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 10$ мкм (кривая 4); в) линейной информационной плотности от d для пленок с $\tau = 0,15$ мкм, и наконечников с $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 1,0$ мкм (кривая 1), $\tau = 0,15$ мкм, $\tau_p = 0,3$ мкм и $w = 2,0$ мкм (кривая 2), $\tau = 0,1$ мкм, $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 10$ мкм (кривая 3) и $\tau = 0,1$ мкм, $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 10$ мкм (кривая 4); г) среднеквадратичного уровня шума от линейной плотности записи с перпендикулярным (кривая 1) и продольным ($\tau = 0,1$ мкм, $\tau_p = 0,4$ мкм и $w = 10$ мкм) намагничиванием

и торсионного магнитометров, а для наблюдения микроструктуры пленок использовались рентгеновский дифрактометр и РЭМ с высоким разрешением. Как показали исследования, увеличение температуры подложки не способствует образованию больших кристаллитов с одинаковым направлением гексагональных S -осей. Чем выше температура подложки, тем больше скорость образования дефектов кристаллической решетки (рис. 2а,б,в). Это подтверждают и снимки CoCr-пленок, полученные с помощью РЭМ: на поверхности пленок, осажденных при комнатной температуре, просматриваются кристаллические зерна с контрастными границами; при температуре подложки 200°C границы зерен становятся более размытыми и принимают закругленную форму. С увеличением температуры подложки растет подвижность атомов и возникает процесс коалесценции, который приводит к образованию дефектов кристаллической решетки. В свою очередь это препятствует упорядочению направлений роста кристаллитов.

Контрастность картины кристаллической структуры ухудшается и при увеличении давления аргона.

Рентгеноструктурный анализ пленок, прошедших термообработку при 400°C, показал асимметрию дифракционного рентгеновского профиля и наличие, помимо основного, дополнительного максимума интенсивности. Степень асимметрии A_n определялась как отношение значений ширины максимума угловой зависимости интенсивности $I_n = f(2\theta)$ на уровне 1/4 ее амплитуды при большом и малом углах дифракции. Из зависимости $A_n = f(T_n)$ (рис. 2г) следует, что при температурах до 100°C значения ширины максимума интенсивности при малом и большом углах дифракции примерно одинаковы. Увеличение температуры подложки способствует возникновению асимметрии дифракционного профиля. Исходя из этого можно предположить, что в CoCr-пленках, осажденных на подложку при относительно высокой температуре, имеются две фазы, отличающиеся кристаллическими свойствами. Это

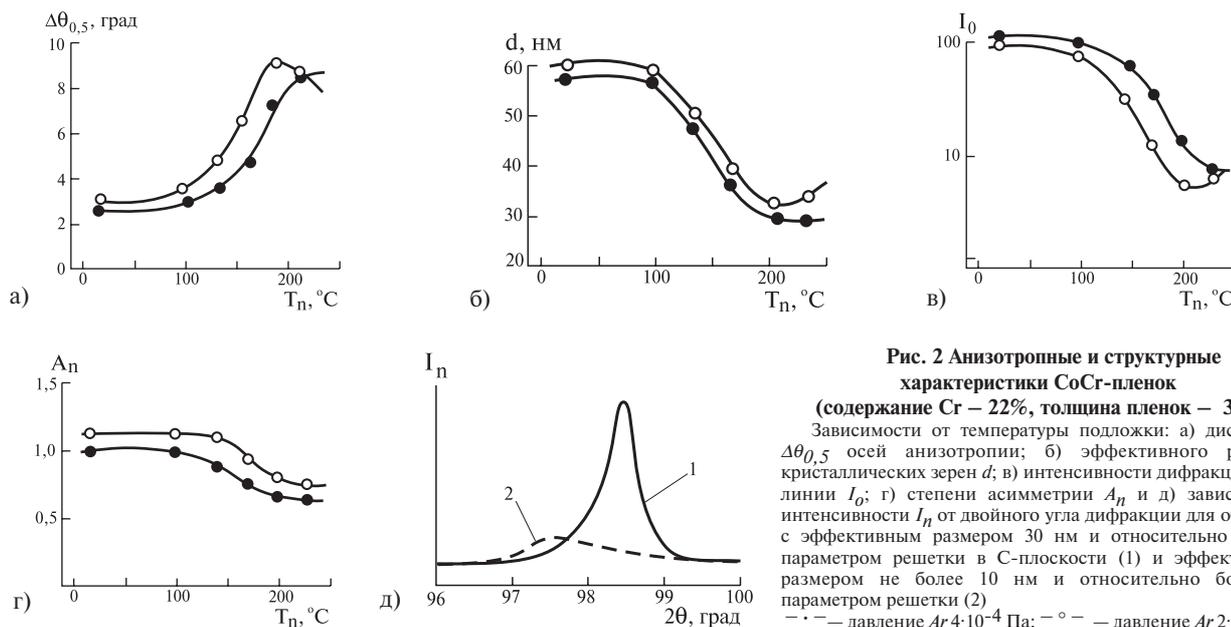


Рис. 2 Анизотропные и структурные характеристики CoCr-пленок

(содержание Cr – 22%, толщина пленок – 300 нм)

Зависимости от температуры подложки: а) дисперсии $\Delta\theta_{0,5}$ осей анизотропии; б) эффективного размера кристаллических зерен d ; в) интенсивности дифракционной линии I_0 ; г) степени асимметрии A_n и д) зависимость интенсивности I_n от двойного угла дифракции для областей с эффективным размером 30 нм и относительно малым параметром решетки в С-плоскости (1) и эффективным размером не более 10 нм и относительно большим параметром решетки (2)
 - · - · - давление $Ar\ 4 \cdot 10^{-4}$ Па; - ° - - давление $Ar\ 2 \cdot 10^{-2}$ Па

предположение подтверждается зависимостью приведенной интенсивности I_n от двойного угла дифракции (рис. 2д).

Из зависимости дисперсии анизотропии $\Delta\theta_{0,5} = f(T_n)$ (см. рис. 2а) следует, что чем выше температура T_n и давление аргона, тем выше кристалличность CoCr-пленок. Однако оценка эффективного размера кристаллитов показывает, что пленки, осажденные при большем давлении аргона, характеризуются той же или худшей кристалличностью, чем напыленные при меньшем давлении. Несоответствие результатов можно объяснить разной степенью асимметрии максимумов интенсивности. Чем выше давление, тем больше асимметрия, что приводит к уменьшению эффективного размера кристаллической области. Оценка дисперсии анизотропии, интенсивности дифракционных линий и эффективных размеров областей с разной кристалличностью показала, что с увеличением температуры подложки кристаллические свойства CoCr-пленок ухудшаются.

В результате анализа магнитных характеристик CoCr-пленок (рис. 3) установлено, что температурные зависимости коэрцитивной силы в перпендикулярном направлении для пленок, напыленных при разных значениях давления аргона, мало отличаются друг от друга (рис. 3а). Большее значение поля перпендикулярной анизотропии пленок, напыляемых при $T_n = 140^\circ\text{C}$ и большем давлении аргона (рис. 3б), объясняется их лучшими кристаллическими свойствами по сравнению с пленками, осаждаемыми при меньшем давлении аргона. В отличие от пленок, напыленных при малом давлении, поле анизотропии пленок, осажденных при давлении аргона $4 \cdot 10^{-4}$ Па, с увеличением температуры под-

несколько растет. Исходя из этого можно предположить, что, помимо основного, существует и дополнительный источник магнитокристаллической анизотропии. Увеличение намагниченности насыщения M_s по мере роста температуры (рис. 3в) свидетельствует об активизации процесса сегрегации обогащенной хромом фазы пленки с увеличением температуры подложки. С ухудшением кристаллических свойств CoCr-пленок сильнее проявляется их неоднородность. Следовательно, увеличение поля анизотропии с ростом температуры под-

ложки можно связать с влиянием сегрегации на магнитные и анизотропные свойства этих пленок. Сегрегация обогащенной хромом фазы влияет и на параметр кристаллической решетки (рис. 3г). Осажденные при относительно низкой температуре подложки CoCr-пленки характеризуются большей упорядоченностью кристаллической структуры, однородностью и меньшей сегрегацией.

Различие свойств слоев CoCr-пленок, т.е. их стратификация, влияет также на анизотропные и магнитные свойства этих

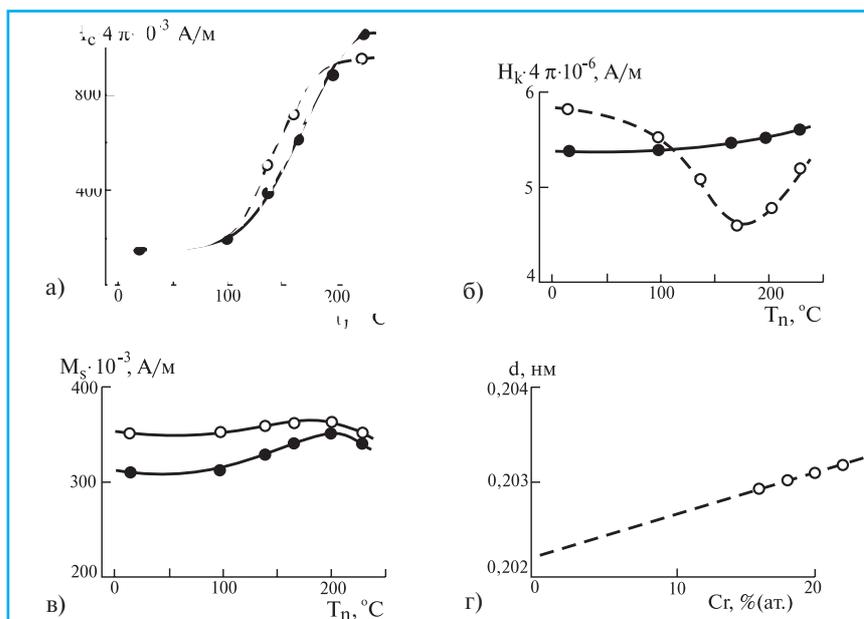


Рис. 3. Магнитные и микроструктурные характеристики CoCr-пленок

Зависимости от температуры подложки: а) коэрцитивной силы в перпендикулярном плоскости пленки направлении; б) поля перпендикулярной анизотропии; в) намагниченности насыщения; г) зависимость параметра решетки от процентного содержания хрома
 - · - · - давление $Ar\ 4 \cdot 10^{-4}$ Па; - ° - - давление $Ar\ 2 \cdot 10^{-2}$ Па

пленок. Можно предположить, что увеличение температуры подложки в основном влияет на кристаллические свойства внутреннего слоя. Для количественной оценки этого воздействия исследовались зависимости магнитных и анизотропных характеристик CoCr-пленок от их толщины (рис. 4). Между толщиной и зависимостями дисперсии анизотропии $\Delta\theta_{0,5}$, намагниченности насыщения M_S и относительной среднеквадратичной величины микронапряжений существует определенная корреляция (рис. 4а,б,в). Из этого следует, что наибольшая плотность дефектов кристаллической структуры CoCr-пленок наблюдается в нижнем слое толщиной в несколько нанометров. В толщинной зависимости намагниченности насыщения пленок небольшой толщины важную роль играет и сегрегация: малые значения M_S при толщине пленок до 20 нм можно объяснить их суперпарамагнитным состоянием. Относительно небольшие микронапряжения CoCr-пленок толщиной менее 20 нм, вероятно, вызваны дискретным состоянием областей зародышеобразования, которое наиболее активно проявляется на начальной стадии формирования пленки. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что критическая толщина CoCr-пленок равна 20 нм. При большей толщине активизируется процесс коалесценции, благодаря чему уменьшается плотность дефектов и деформация кристаллической структуры в граничных зонах областей зародышеобразования. Это вызывает суще-

ственное изменение кристаллической структуры напыляемых пленок. Изменения структурных параметров хорошо описывает процесс роста CoCr-пленок.

Если предположить, что относительно широкий максимум интенсивности рентгеновского дифракционного спектра CoCr-пленок характеризует нижний слой, то с увеличением толщины пленок асимметрия профиля интенсивности должна изменяться. Однако эксперименты не подтверждают такое предположение. Это можно объяснить тем, что размер некоторых областей с увеличением толщины пленок продолжает расти. Как видно из рис. 4г, реальная кривая (1) толщинной зависимости $(M_r/M_s) \cdot \tau$ (M_r/M_s — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса), косвенно характеризующая так называемые скачки в петле гистерезиса, отличается от теоретической кривой (2), соответствующей случаю, когда скачки петли гистерезиса связаны только со свойствами нижнего слоя CoCr-пленок. В то же время эффективный размер кристаллических зерен d пленок толщиной более 100 нм постоянен и равен 30 нм. Полученные результаты объясняются тем, что кристаллическую структуру в перпендикулярном к плоскости пленки направлении могут нарушать некогерентные зоны, которые с увеличением толщины появляются не только в нижнем, но и в верхнем слое пленки. Микрофотографии поперечного сечения CoCr-пленок показывают, что в нижнем слое такие некогерентные зоны расположены хаотически и плотность их достаточно высока. Контрастность мик-

рофотографий не позволяет выявить какого-либо распределения кристаллических зерен в перпендикулярном направлении. На снимках поперечного сечения видна лишь характерная для CoCr-пленок слоистая структура. Это затрудняет объяснение асимметрии интенсивности рентгеновского дифракционного профиля.

В соответствии с моделью преобладающей гранулированной структуры рассматриваемых пленок, напыленных при $T_n = 200^\circ\text{C}$, характеристики записи-воспроизведения зависят и от дискретности кристаллической структуры. С учетом зависимости параметра кристаллической решетки от содержания хрома (см. рис.3г) поперечное сечение пленки можно представить в виде обогащенных кобальтом или хромом зон. В этом случае некогерентные зоны разной длины будут расположены в когерентной области параллельно и перпендикулярно поверхности подложки. В нижнем слое пленки число таких зон и их размеры больше, чем в верхнем. В когерентной области встречаются и хаотически ориентированные клинообразные некогерентные участки. Вследствие слоистости такой структуры на границах между когерентными и некогерентными зонами, где симметрия кристаллической структуры нарушается, возникает поверхностная анизотропия. Этим объясняется тот факт, что для пленок, напыленных на подложку при $T_n = 200^\circ\text{C}$, характерно большее поле анизотропии даже при относительно большой дисперсии анизотропии, т.е. при сравнительно слабой ориентации С-осей.

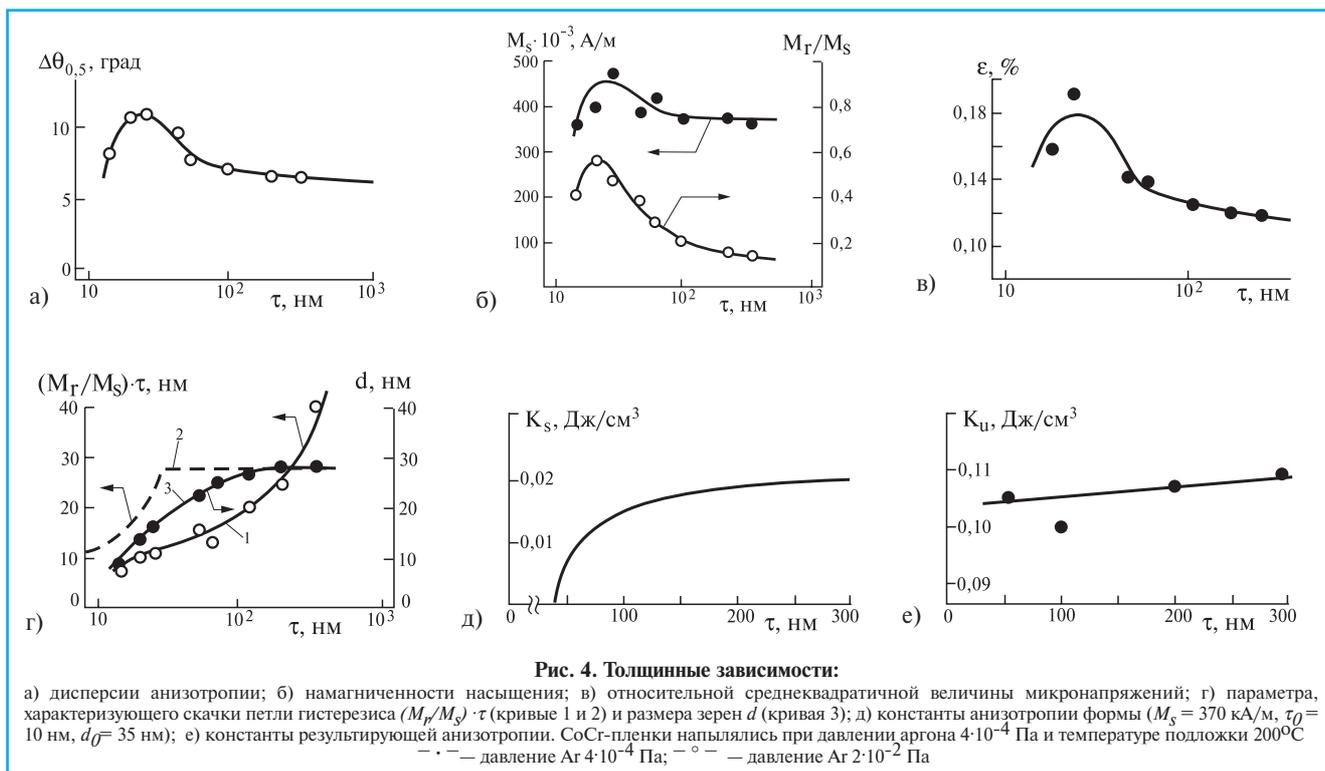


Рис. 4. Толщинные зависимости:

а) дисперсии анизотропии; б) намагниченности насыщения; в) относительной среднеквадратичной величины микронапряжений; г) параметра, характеризующего скачки петли гистерезиса $(M_r/M_s) \cdot \tau$ (кривые 1 и 2) и размера зерен d (кривая 3); д) константы анизотропии формы ($M_S = 370$ кА/м, $\tau_0 = 10$ нм, $d_0 = 35$ нм); е) константы результирующей анизотропии. CoCr-пленки напылялись при давлении аргона $4 \cdot 10^{-4}$ Па и температуре подложки 200°C — \bullet — давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Па; \circ — давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Па

Остановимся и на других составляющих анизотропии: магнитострикционной и связанной с формой кристаллических столбиков с неоднородными свойствами, определяемыми сегрегацией микроструктуры. Как показали эксперименты, магнитострикция вносит сравнительно небольшой вклад в анизотропию. Магнитные моменты двух одинаковых CoCr-пленок, одна из которых отделена от подложки, отличаются не более чем на 10%, что соответствует разности констант анизотропии менее 3%.

Поскольку температурные зависимости константы результирующей анизотропии K_U , а также намагнитченности насыщения и коэрцитивной силы коррелируют, можно предположить наличие кристаллографической анизотропии и анизотропии формы. Формальное разделение двух рассматриваемых составляющих затруднено, так как константа анизотропии формы K_S и поверхностная анизотропия прямо пропорциональны квадрату намагнитченности насыщения. Для решения этой проблемы может быть использована толщинная зависимость K_S (рис. 4д), вычисляемая для CoCr-пленок с полностью сегрегированной структурой в виде кристаллических столбиков с помощью формулы

$$K_S = 2\pi M_s^2 \tau_0 \left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{\tau} \right),$$

где τ_0 — толщина сегрегированного слоя, d_0 — диаметр кристаллических столбиков и τ — толщина пленки, равная высоте кристаллических столбиков.

В отличие от K_S константа результирующей анизотропии K_U слабо реагирует на изменение толщины CoCr-пленки (рис. 4е). Следовательно, анизотропией формы можно пренебречь. Справедливость такого вывода подтверждает отсутствие корреляции между размерами кристаллических зерен и коэрцитивной силой. Таким образом, поверхностная составляющая является важной составляющей перпендикулярной анизотропии.

Как уже отмечалось, некогерентные зоны связаны с сегрегацией микроструктуры. При кристаллизации граничные области жидкого и твердого состояния, в которых преимущественно протекает процесс сегрегации, во внутренних и поверхностных слоях CoCr-пленок имеют существенное отличие: в первых зерна взаимодействуют друг с другом более активно. После напыления пленки в результате нагрева подложки возникает процесс диффузии атомов (преимущественно хрома), которые проникают в поверхностный слой пленки. Вероятность дислокации атомов хрома на дефектах различного вида, по-видимому, больше, чем для атомов кобальта. Из этого следует, что дефекты способствуют формированию обогащенной хромом

фазы. Данный процесс продолжается до образования гексагональной структуры с плотной упаковкой. В результате возникает структура с обогащенными хромом и кобальтом фазами. Таким образом, CoCr-пленки состоят из нижнего слоя с относительно слабо выраженной кристаллической структурой и верхнего сравнительно хорошо ориентированного кристаллического слоя.



Рис. 5. Магнитный носитель и однополюсная магнитная головка:
1 — CoCr- или CoCrTa-слой (содержание Cr — от 0 до 7%, толщина — 0,13 мкм); 2 — пермаллоевый подслои (содержание 82% Ni, толщина — 7 мкм, магнитная проницаемость — 2000); 3 — подложка носителя (NiP/Al); 4 — основной полюс (CoZr); 5 — обмотка (33 витка); 6 — немагнитный элемент; 7 — массивная замыкающая часть (ферритовый элемент); 8 — вектор намагнитченности; 9 — защитный слой углерода (толщина 0,01 мкм)

После ионной очистки подложек кристаллические свойства CoCr-пленок, осажденных при комнатной температуре, заметно улучшаются, а намагнитченность насыщения и коэрцитивная сила в перпендикулярном направлении уменьшаются. Намагнитченность насыщения внутреннего слоя может быть относительно высокой. Несмотря на достаточно хорошие кристаллические свойства CoCr-пленок, осажденных при относительно низком давлении аргона и комнатной температуре подложки, для них характерны дефекты в виде двойниковых кристаллов, определяющие микроструктурное расслоение, но не нарушающие непрерывность когерентности в направлении C-осей. Это позволяет предположить, что процесс сегрегации происходит не только в граничных областях кристаллических столбиков, но и на микроструктурном уровне, вызванном двойниковыми кристаллами. Обобщая полученные результаты, можно сказать, что асимметрия рентгеновского дифракционного профиля и поверхностная анизотропия (одна из существенных составляющих перпендикулярной анизотропии) CoCr-пленок, осажденных при $T_n = 200^\circ\text{C}$, обусловлены микроскопической слоистой структурой.

Тонкопленочные носители с улучшенными показателями

В последнее время внимание специалистов привлекают магнитные носители с

перпендикулярной анизотропией, содержащие двухслойное покрытие CoCr/NiFe. Сравнительно недавние исследования [13—15] показали, что относительно небольшое содержание тантала в двухслойном CoCr-носителе с пермаллоевым нижним слоем позволяет получить более совершенную перпендикулярную кристаллографическую ориентацию и значительно улучшает магнитные свойства рабочего слоя носителя. В свою очередь это способствует увеличению амплитуды сигнала воспроизведения при высокой плотности записи.

В экспериментах с использованием CoCr- и CoCrTa-рабочих слоев носителя (рис. 5) запись—воспроизведение осуществлялись однополюсными магнитными головками двух типов: с толщиной и шириной полюсного наконечника 0,3 и 10 мкм, а также 0,4 и 1 мкм (головка второго типа предназначена для записи с сверхвысокой плотностью — 670 дорожек/мм) [14,15]. Характеристики записи-воспроизведения измерялись в вакуумной камере при давлении $1,33 \cdot 10^4$ Па. При таком давлении высота плавления магнитной головки практически равна нулю. На полученном с помощью РЭМ изображении рабочего слоя с записанной информацией хорошо различимы переходы намагнитченности и дорожки записи, что свидетельствует о высоком качестве записи с высокой плотностью на носители с перпендикулярной анизотропией. В сравнении с CoCr-слоем, микроструктура CoCrTa-слоя характеризуется более высокой однородностью кристаллической структуры. Если микроструктуре слоя CoCr присущи довольно крупные кристаллические зерна, то в слое CoCrTa таких зерен практически нет. В его структуре присутствуют столбики относительно небольшого диаметра (около 20 нм). Благодаря тонкой столбчатой микроструктуре CoCrTa-пленки имеют хорошую перпендикулярную анизотропию.

Результаты изучения характеристик записи-воспроизведения при использовании CoCr- и CoCrTa-рабочих слоев носителя приведены на рис. 6. Полученные данные свидетельствуют о том, что на сигнал воспроизведения данных, записанных на носители с перпендикулярной анизотропией, существенно влияет коэрцитивная сила (рис. 6а). Отношение значений коэрцитивной силы в перпендикулярном и продольном направлениях к плоскости носителя говорит о сравнительно большой перпендикулярной анизотропии пленок CoCr и CoCrTa, причем в последних этот эффект выражен сильнее (рис. 6в). Наибольшая величина коэрцитивной силы в перпендикулярном направлении для последних проявляется слабее (рис. 6д).

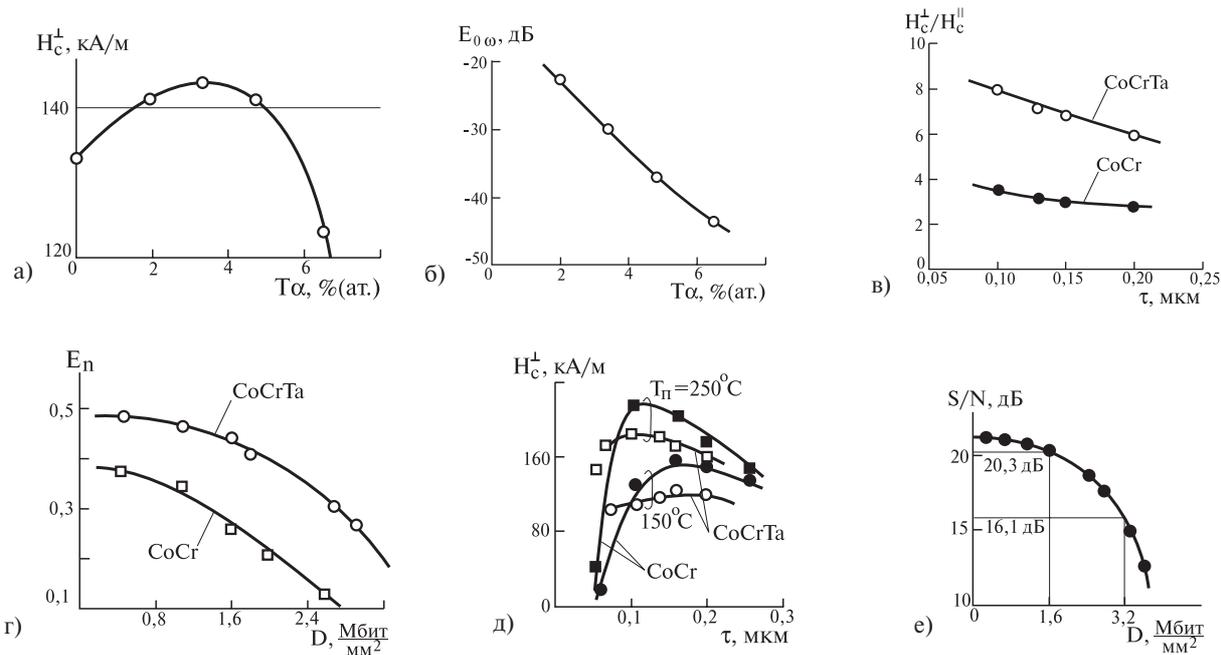


Рис.6. Сравнение магнитных параметров и характеристик записи-воспроизведения носителей с CoCr- и CoCrTa-рабочими слоями
 Зависимости: а) коэрцитивной силы CoCrTa-пленок в перпендикулярном направлении от содержания T_a в CoCrTa-слое толщиной около 130 нм с коэрцитивной силой 144 кА/м; б) уровня сигнала перезаписи E_{ow} , определяемый как ослабление ВЧ (9 МГц) сигнала при перезаписи НЧ (2 МГц) сигнала, с увеличением содержания тантала существенно падает. Измерения зависимости уровня приведенного сигнала воспроизведения E_n от поверхностной информационной плотности D для CoCr- и CoCrTa-пленок (рис. бг) показали, что при всех значениях D E_n для CoCrTa-носителя выше, чем для CoCr-пленки. Значения E_n соответствуют удвоенной амплитуде сигнала воспроизведения, приведенной к единице ширины дорожки, числу витков и относительной скорости движения носителя. Измерения отношения сигнал—шум в зависимости от поверхностной плотности записи (рис. бе) свидетельствуют о том, что при оптимальном кодировании (линейная информационная плотность — около 472 бит/мм) на CoCrTa-носителе с использованием средств перпендикулярной записи с высокой плотностью можно получить достаточно высокую поверхностную плотность записи — 3,2 Мбит/мм².
 Перпендикулярной анизотропией характеризуются и многослойные CoPt-пленки [16]. По мере роста смещающего напряжения константа перпендикуляр-

ной анизотропии таких пленок, осажденных ВЧ-распылением, увеличивается, достигая максимума при 250 В. Представляют интерес и пленки CoPtBe, осажденные ВЧ-распылением на стеклянную подложку. С помощью магнитной головки с металлическим заполнением рабочего зазора величиной 0,35 мкм на них получена линейная плотность записи около 7,87 Кбит/мм [17]. Намагниченность насыщения пленок равна 696 кА/м; коэрцитивная сила в перпендикулярном и продольном направлениях — 167 и 77 кА/м, соответственно; поле анизотропии — 816 кА/м. Такие пленки также могут быть рекомендованы для применения в качестве носителей перпендикулярной записи.

Важный параметр тонкопленочных многослойных носителей — износостойкость. Исследования этого параметра для носителя на основе CoCr-пленки показали, что сохранению рабочего слоя в значительной мере способствует защитный слой углерода. Однако с увеличением трения такой слой начинает разрушаться и на рабочей поверхности магнитной головки появляются неровности.

Разработчики перспективных модификаций накопителей информации большой емкости возлагают большие надежды на тонкопленочные материалы, применение которых существенно улучшит характеристики носителя информации. Поэтому поиск новых материалов для магнитных носителей и преобразователей, а также всесторонние исследования их магнитных, анизотропных и микроструктурных свойств не прекращаются.

Как видно из рис. 6б, уровень сигнала перезаписи E_{ow} , определяемый как ослабление ВЧ (9 МГц) сигнала при перезаписи НЧ (2 МГц) сигнала, с увеличением содержания тантала существенно падает. Значения зависимости уровня приведенного сигнала воспроизведения E_n от поверхностной информационной плотности D для CoCr- и CoCrTa-пленок (рис. бг) показали, что при всех значениях D E_n для CoCrTa-носителя выше, чем для CoCr-пленки. Значения E_n соответствуют удвоенной амплитуде сигнала воспроизведения, приведенной к единице ширины дорожки, числу витков и относительной скорости движения носителя. Измерения отношения сигнал—шум в зависимости от поверхностной плотности записи (рис. бе) свидетельствуют о том, что при оптимальном кодировании (линейная информационная плотность — около 472 бит/мм) на CoCrTa-носителе с использованием средств перпендикулярной записи с высокой плотностью можно получить достаточно высокую поверхностную плотность записи — 3,2 Мбит/мм².

Перпендикулярной анизотропией характеризуются и многослойные CoPt-пленки [16]. По мере роста смещающего напряжения константа перпендикуляр-

ной анизотропии таких пленок, осажденных ВЧ-распылением, увеличивается, достигая максимума при 250 В. Представляют интерес и пленки CoPtBe, осажденные ВЧ-распылением на стеклянную подложку. С помощью магнитной головки с металлическим заполнением рабочего зазора величиной 0,35 мкм на них получена линейная плотность записи около 7,87 Кбит/мм [17]. Намагниченность насыщения пленок равна 696 кА/м; коэрцитивная сила в перпендикулярном и продольном направлениях — 167 и 77 кА/м, соответственно; поле анизотропии — 816 кА/м. Такие пленки также могут быть рекомендованы для применения в качестве носителей перпендикулярной записи.

Литература

1. *IEEE Trans. Magn.*, 1995, в.31, N4, p.2461
2. *Там же*, 1994, в.30, N6, p.3797
3. *Там же*, 1994, в.30, N6, p.3801
4. *Там же*, 1995, в.31, N1, p.795
5. *Там же*, 1996, в.32, N1, p.7
6. *Там же*, 1992, в.28, N5, p.3070
7. *Там же*, 1993, в.29, N1, p.223
8. *Там же*, 1993, в.29, N5, p.2470
9. *Там же*, 1992, в.28, N5, p.2716
10. *J. Magn. Soc. Jap.*, 1992, в.16, N2, p.95
11. *IEEE Trans. Magn.*, 1992, в.28, N5, p.2722
12. *Там же*, 1992, в.28, N5, p.2010
13. *Read/Write*, 1993, N16, p.10
14. *IEEE Trans. Magn.*, 1988, в.24, p.2347
15. *J. Magn. Soc. Jap.*, 1992, в.16, N2, p.231
16. *Там же*, 1992, в.16, N2, p.295
17. *Там же*, 1992, в.16, N2, p.109

26 ноября 1997 года во Всемирный день информации в Государственном Кремлевском Дворце прошел VI-й Международный Форум информатизации (МФИ-97). Организатором выступила Международная академия информатизации — общественно-научная неправительственная организация, учрежденная в 1990 году. Академия выполняет фундаментальные и прикладные исследования в различных областях, связанных с информационными процессами. Под ее руководством выполняются свыше 230 программ и крупных научно-технических проектов.

В работе Форума приняли участие более пяти тысяч специалистов. С приветственными речами выступили заместитель мэра Москвы, заместитель министра иностранных дел РФ, представители ООН, Государственной думы и Федерального собрания РФ, зарубежные гости.

С интересом был воспринят доклад председателя Государственного комитета по связи и информатизации РФ А.Е.Крупнова "Россия и глобальное информационное общество XXI века". Докладчик призвал шире использовать зарубежный опыт при выполнении одной из главных задач, стоящих сегодня перед Госкомитетом — на базе цифровой технологии в течение семи-восьми лет удовлетворить спрос на телефонную связь. Ближайшая же цель — сформировать российскую часть Internet с учетом информационной безопасности страны.

Применению ключевых информационных технологий в военной авиации было посвящено выступление командующего Военно-воздушными силами РФ П.С. Дейнекина "Актуальные проблемы информатизации ВВС". В ВВС на стыке авионики и информатики отрабатываются информационные технологии по таким направлениям, как создание летательных аппаратов нового поколения, интеллектуальные системы, разработка ресурсосберегающих технологий. Создаются интерактивные системы тренажа и моделирования — обучающие среды, построенные на принципах виртуальной реальности.

Проблемы передачи информации на большие расстояния и создания объединенной информационно-расчетной системы "Газпрома" рассмотрел в докладе "Развитие информационных технологий в газовой промышленности" первый заместитель председателя правления РАО "Газпром" В.В.Ремизов.

На Форуме была организована выставка новой продукции, товаров и литературы. Среди наиболее интересных экспонатов можно назвать серно-натриевые аккумуляторы и батареи, которые по сравнению с традиционными источниками питания (щелочными, кислотными, никель-кадмиевыми, никель-водородными и др.) обладают более высокими характеристиками при низкой стоимости реагентов. Можно также отметить металлокерамическую вращающуюся анодную рентгеновскую трубку, используемую в медицине (компьютерная томография и маммография). Высокие энергетические и рабочие характеристики устройства достигнуты благодаря использованию металлокерамики и уникальных монокристаллических материалов, ранее применявшихся в ядерной космической энергетике.

Участники встречи получили приглашение на VII-й (1998 год, Вашингтон) и VIII-й (1999 год, Монреаль) Международные Форумы информатизации.

Собств. инф.

Выпуск накопителей с магниторезистивными головками фирмой WD может спровоцировать войну цен

Популярность магниторезистивной технологии стремительно растет. Ожидают, что к 1999 году магниторезистивные головки практически вытеснят головки индукционного типа. По оценкам фирмы Peripheral Research, из 910 млн. тонкопленочных головок, выпущенных в 1997 году, 481 млн. — магниторезистивные, в 1998-м эти цифры составят соответственно 1,13 млрд. и 852 млн. Вот почему почти все крупные поставщики накопителей на жестких магнитных дисках для настольных компьютеров уже перешли на эту технологию.

Фирма Western Digital (WD), занимающая второе место на рынке накопителей на жестких магнитных дисках для настольных компьютеров, последней приняла решение о переходе на новую технологию, поскольку в отличие от других ведущих изготовителей (IBM Storage Systems, Quantum и Seagate Technology) пока не располагает собственным производством магниторезистивных головок. Впервые эти изделия появились на рынке в начале 1996 года, причем в весьма ограниченных объемах. С наращиванием их производства положение изменилось. Поставлять головки фирме будут Applied Magnetics, IBM, Read-Rite и TDK.

Емкость диска диаметром 8,9 см при использовании магниторезистивных головок составит 2,16 Гбайт. Фирма намерена поставлять накопители с магниторезистивными головками серии Caviar емкостью 2,16-, 4,32- и 6,48 Гбайт. При скорости 5400 оборотов/мин среднее время поиска нужной дорожки составит 9,5 мс, ожидания — 5,5 мс. Стоимость накопителя емкостью 6,48 Гбайт, появившегося на рынке в сентябре 1997 года, — 429 долл. К апрелю 1998 года 50% накопителей семейства Caviar должно быть выполнено с магниторезистивными головками.

WD опередила основных соперников с выпуском 2,16-Гбайт накопителей, поставки которых фирмы Seagate Technology и IBM планируют начать только в 1998 году. Ожидается, что к тому времени на рынке накопителей с магниторезистивными головками появятся и азиатские фирмы — Fujitsu, Maxtor и Samsung. Поскольку на рынке основного потребителя таких накопителей — настольных компьютеров — наблюдается стагнация, в будущем году возможно переизготовление накопителей и объявление войны цен.

Electronic Engineering Times, 1997, N969; <http://techweb.cmp.com/ebn/section/c&m1a.html>

На протяжении последних двух лет на динамичном рынке схем ДОЗУ основное внимание обозревателей привлекала игра цен на эти изделия. В результате многие не заметили феноменального роста сегмента модулей памяти, который начинает существенно влиять на сеть поставок ДОЗУ. По данным фирмы Semico Research, сегодня в модули монтируется около 82% выпускаемых схем ДОЗУ против 31% в 1991 году. Более 90% схем ДОЗУ, используемых в персональных компьютерах, монтируются в виде модулей памяти с однорядным (SIMM) и двухрядным расположением выводов (DIMM). С 1997 по 2001 год объем продаж модулей ДОЗУ увеличится с 4,6 млрд. до 23,5 млрд. Мбайт.

Модули памяти на базе схем ДОЗУ выпускают такие крупные фирмы, как Samsung (доходы от продажи в 1996 году — 3 млрд. долл.), Toshiba (957 млн. долл.), Micron (682 млн. долл.) и Hyundai (597 млн. долл.), а также независимые поставщики модулей — Kingstone Technology и Smart Modular Technology. Поскольку последним на сборку модуля требуется всего один день, они становятся неотъемлемой частью сети сбыта этих устройств. Фирма Samsung отгружает около 15% схем ДОЗУ именно независимым поставщикам модулей.

Electronic Business, Nov. 1997;

<http://www/eb-mag.com/registrd/issues/9711/1197bt.htm>

Винчестер, вмещающий два небоскреба бумаги

Американская компания Seagate Technology, один из ведущих поставщиков технологий хранения информации, разработала самый емкий в мире накопитель на жестких дисках. Модель Elite 47 вмещает 47 Гбайт информации (если ее распечатать на бумаге, получится стопка высотой в два небоскреба Empire State Building), что более чем вдвое превосходит емкость других дисковых накопителей. Elite 47 читает и записывает данные со скоростью 184 Мбит/сек, что позволяет использовать его для обработки цифровых видеозображений в режиме on line в теле- и киностудиях. Серийное производство Elite 47 начнется в первом квартале 1998 года, цена единичных опытных образцов составит 2995 долларов.

Коммерсант-daily 14.11. №196

В Москве состоялся очередной VI Международный Форум информатизации

Новости

Дайджест

Рынок модулей памяти стремительно развивается

Дайджест

Дайджест