

НАКОПИТЕЛИ НА МАГНИТНОМ НОСИТЕЛЕ

ПЕРЕМЕНЫ, ВОЗМОЖНО, БЛИЗКИ

Плотность записи современных накопителей на магнитном носителе (НМН) до последнего времени ежегодно увеличивалась на 100%. Но сегодня, после десятилетий совершенствования технологии, промышленность вынуждена признать, что многие рабочие характеристики достигают своих предельных значений, и темпы увеличения плотности записи уже, скорее всего, составляют 60%. Промышленные эксперты пришли к выводу, что продольная запись данных, до сих пор лежащая в основе развития НМН, вскоре будет заменена перпендикулярной, обеспечивающей сверхвысокую плотность записи и высокую термостабильность распределения намагниченности в рабочем слое носителя. О том, что технические средства перпендикулярной магнитной записи после почти 20 лет исследований вступили в новую стадию разработок, свидетельствуют и возросший интерес специалистов, и поток посвященных им публикаций. Проведенные в последние годы исследования показали, что перпендикулярная магнитная запись с применением высокоэффективных средств записи и воспроизведения может стать основой накопителей информации с плотностью записи до 1 Тбит (10^{12} бит) на 1 дюйм². Что же сделано и что еще надо сделать для этого?

Пока большинство экспертов сходятся во мнении, что накопители на магнитном носителе с перпендикулярной анизотропией появятся в лучшем случае не ранее чем через два года, в худшем — через пять лет. Тем не менее, уже имеются функционирующие опытные образцы. Правда, пока желаемая плотность записи не достигнута. Так, на Международной конференции “Интермаг” 2000 года в Торонто фирма Hitachi продемонстрировала магнитный накопитель с перпендикулярной анизотропией и поверхностной плотностью записи 50 Гбит/дюйм², и пока этот показатель не превзойден. Но чтобы накопители этого типа могли найти применение, их плотность записи должна составлять не менее 100–200 Гбит/дюйм² [1–3].

В основе развития технологии перпендикулярной магнитной записи лежит разработка тонкопленочных магниторезистивных преобразователей с воспроизводящими элементами с гигантским и туннельным магнетосопротивлением, позволяющими считывать записанный с высокой поверхностной плотностью сигнал. Изготовление таких элементов ма-

лой ширины (около 150 нм) — весьма сложная задача, которая может быть решена лишь с помощью последних достижений современной тонкопленочной технологии. Так, для получения высокой плотности записи информации необходимо повышать коэрцитивную силу рабочего слоя носителя. Проведенные исследования показали, что для записи информации с поверхностной плотностью 1 Тбит/дюйм² коэрцитивная сила рабочего слоя магнитного носителя должна быть не менее 12 кЭ при среднем размере кристаллических зерен около 8 нм [4]. А для намагничивания носителя в процессе записи нужны магнитные преобразователи, генерирующие достаточно большое поле записи. При наличии замыкающего слоя в рабочем носителе такое поле можно создать с помощью однополюсных тонкопленочных преобразователей.

Один из перспективных типов такого однополюсного тонкопленочного преобразователя состоит из основного полюса, формирующего остронаправленное поле записи, плоскопараллельной обмотки и замыкающих магнитный поток полюсных наконечников, плоскости которых параллельны плоскостям основного полюса и обмотки. Преобразователь обеспечивает эффективную запись информации с высокой плотностью без ее искажения, даже при воздействии внешнего магнитного поля напряженностью до 20 Э. Тонкопленочные элементы записи преобразователя хорошо сочетаются с магниторезистивными элементами воспроизведения. Небольшая ширина записываемого элемента позволяет получать достаточно высокую поперечную плотность записи. Исследования с помощью электронного микроскопа показали, что переходы в рабочем слое носителя при продольной плотности записи 16000 бит/мм вполне различимы.

На начальном этапе развития перпендикулярной магнитной записи (с 1975 года) рабочий слой носителя, как правило, выполнялся на основе сплава кобальт-хром с гексагональной плотно упакованной структурой. Однако его коэрцитивная сила и, следовательно, плотность записи сравнительно малы.

Сейчас исследуются магнитные накопители с рабочим слоем CoCrPt, осажденным на предварительно напыленный слой Ti или Ti/CoZr. Такая структура имеет сравнительно неплохие магнитные и анизотропные свойства: коэрцитивная сила двухслойного образца CoCrPt/Ti (толщина слоя CoCrPt ~20 нм) составляет ~5 кЭ, а его поле анизотропии — 11 кЭ.

Достаточно высокая коэрцитивная сила (~7,1 кЭ) получена для многослойных структур CoCrPt(40 нм)/CoCrPtTa(20 нм)/Ti(25 нм) [5]. Образцы осаждались магнетронным высокочастотным способом на стеклянные подложки. После осаждения они выдерживались в вакууме $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре 400–600°C в течение 30 мин. Получено, что при увеличении толщины слоя титана с 5 до 25 нм коэрцитивная сила возрастала с 5,5 до 7,1 кЭ (температура термообработки 500°C). При этом значение скважности кривой перемагничивания было относительно большим — 0,98. Очевидно, и такие структуры представляют



С.Карпенков



практический интерес для разработчиков носителей перпендикулярной магнитной записи с высокой плотностью.

Улучшению магнитных свойств и характеристик записи/воспроизведения носителя с однослойным CoCrPtTa и многослойным Co/Pd рабочими слоями способствует введение подслоя из аморфного углерода [6]. Оба вида рабочих слоев формировались магнетронным осаждением при начальном давлении не более $2,7 \cdot 10^{-5}$ Па и температуре подложки 270–290°C. Основной слой Co(73%)Cr(18%)Pt(6%)Ta(3%) толщиной 50 нм формировался на предварительно осажденном слое Co(60%)Cr(40%), напыленном в свою очередь на подслое аморфного углерода, нанесенного на стеклянную подложку. Введение аморфного углеродного слоя толщиной 60 нм привело к увеличению коэрцитивной силы носителя на основе CoCrPtTa с 1,5 до 3,0 кЭ. Следует отметить, что при воспроизведении информации, записанной с продольной плотностью вплоть до 10000 бит/мм, отношение сигнал-шум оставалось в допустимых пределах.

В другом виде рабочего слоя многослойная структура содержала 20 пар чередующихся слоев Co/Pd. Она формировалась также на аморфном углеродном подслое. С увеличением толщины аморфного углеродного слоя до 30 нм коэрцитивная сила H_c рабочего слоя Co/Pd увеличилась с 1,5 до 5,0 кЭ. Дальнейшее увеличение толщины не привело к заметному изменению значения H_c . Улучшение магнитных свойств Co/Pd позволило получить вполне приемлемое отношение сигнал-шум при воспроизведении информации с продольной плотностью записи вплоть до 16000 бит/мм.

Обнадеживающие результаты получены при добавлении к рабочему слою CoCrPt/Ti имплантирующего слоя, задающего структуру следующего слоя NiAl [7]. Многослойная структура CoCrPt/Ti/NiAl формировалась на стеклянной подложке. Вначале осаждался слой NiAl, толщина которого варьировалась до 80 нм, затем слой Ti (18 нм) и основной слой Co(70%)Cr(20%)Pt(10%). Измерения показали, что с увеличением температуры подложки с 200 до 280°C коэрцитивная сила тонкопленочных образцов монотонно возрастала примерно с 3,6 до 4,0 кЭ, при дальнейшем увеличении температуры до 340°C она падала до 2,0 кЭ. Размер кристаллических зерен микроструктуры CoCrPt/Ti/NiAl составлял ~8,2 нм, что существенно меньше, чем у образцов без слоя NiAl. Как упоминалось выше, это весьма важно при создании носителя перпендикулярной записи с высокой плотностью.

В 1977 году на Международной конференции “Интермаг” японский ученый С.Ивасаки доложил о принципах и возможностях перпендикулярной магнитной записи, а в следующем году был предложен магнитный носитель с двойным рабочим слоем – основным с перпендикулярной анизотропией и вспомогательным из магнитомягкого материала, служащего для замыкания перпендикулярной составляющей намагниченности. О перспективности носителей этого типа можно судить по результатам исследования трех многослойных структур рабочего слоя магнитного носителя, состоящих из слоев основного Co(66%)Cr(20%)Nb(4%)Pt(10%), магнитомягкого Ni(80%)Fe(15%)Nb(5%) материалов и промежуточного, расположенного между основным и дополнительными слоями, титана [8]. Это – собственно, CoCrNbPt/NiFeNb; CoCrNbPt/Ti/NiFeNb и CoCrNbPt/NiFeNb/Ti/NiFeNb. Толщина основного слоя CoCrNbPt варьировалась в пределах 20–100 нм. При формировании всех трех структур этот слой осаждался при одном и том же давлении – около 5 Па. Замыкающий и промежуточный (в третьей структуре) магнитомягкие слои NiFeNb и промежуточный слой титана напылялись при давлении 0,2 Па и комнатной температуре. Значения толщины замыкающего слоя и слоя титана во всех структурах были одинаковыми – 300 и 5 нм, соответственно. Для записи использовался шестивитковый преобразователь с тонкопленочным магнитопроводом из FeSiN.

Воспроизводились данные с помощью магниторезистивного преобразователя с гигантским магнетосопротивлением.

Исследования показали, что лучшими магнитными и структурными свойствами обладает третий тип рабочего слоя, содержащий дополнительный слой NiFeNb. Его коэрцитивная сила H_c при увеличении толщины слоя CoCrNbPt с 20 до 40 нм резко возрастала с 0,5 до 3,6 кЭ. При дальнейшем увеличении толщины до 100 нм значение H_c монотонно убывало до ~2,6 кЭ. В микроструктуре этого рабочего слоя преобладали кристаллические зерна размером 10–15 нм. По-видимому, при дальнейшей модернизации этого рабочего слоя удастся реализовать запись информации с плотностью до 100 Гбит/дюйм².

По-видимому, указанным выше требованиям обеспечения высокой коэрцитивной силы и малых размеров кристаллических зерен смогут удовлетворить многослойные материалы Co/Pd и тонкие пленки FePt и CoPt [9]. Весьма перспективна тонкопленочная структура, в которой магнитные частицы FePt распределены в какой-либо немагнитной матрице – SiO₂ или B₂O₃. В частности, коэрцитивная сила тонкопленочных образцов FePt(10 нм)/SiO₂(1,5 нм) достигает 12 кЭ после термической обработки при температуре 650°C. Правда, размер кристаллических зерен такого материала превосходит 40 нм. Размер зерен уменьшается примерно до 10 нм при снижении температуры отжига до 600°C и незначительно изменяется при дальнейшем падении температуры до 450°C. К сожалению, при этом коэрцитивная сила уменьшается до 1 кЭ. Для сравнения, при таком же изменении температуры отжига пленок FePt толщиной 50 нм без диэлектрической SiO₂-матрицы коэрцитивная сила уменьшается с 15 до 8 кЭ, а размер зерен – с 58 до 28 нм, т.е. в структуре данных пленок преобладают кристаллические зерна крупных размеров.

Интерес представляют и структуры, осаждаемые высокочастотным способом на оксидированную кристаллическую подложку с предварительно напыленным слоем MgO. После термообработки в атмосфере аргона при температуре 700°C в течение 30 мин максимальная коэрцитивная сила полученных таким образом тонкопленочных образцов CoPt составила ~10 кЭ. Более высокая коэрцитивная сила (~16 кЭ) получена для тонкопленочных образцов FePt, отожженных при температуре 700°C в атмосфере аргона в течение 20 мин. Изучение обоих видов тонкопленочных образцов с помощью электронного микроскопа показало кластерную магнитную доменную структуру с размерами кластеров в сотни нанометров.

Значение коэрцитивной силы композитных двухслойных пленок FePt-MgO с перпендикулярной магнитной анизотропией достигает 10 кЭ, что примерно на 2 кЭ больше, чем для пленок FePt, FePt-Al₂O₃ и FePt-SiO₂ [10]. Размеры магнитных доменов таких образцов составляют 60–95 нм, при этом с увеличением размера доменов с 60 до 95 нм коэрцитивная сила монотонно возрастает с 0,5 до 10 кЭ. Картины распределения переходов намагниченности носителя на основе тонкопленочной структуры FePt-MgO при различной продольной плотности записи показали, что при 24000 бит/мм переходы намагниченности вполне различимы. Это означает, что такой материал представляет интерес для разработчиков высокоплотных накопителей информации с перпендикулярной магнитной записью. Правда, пока монокристаллические подложки MgO весьма дорогостоящие, а для формирования упорядоченной структуры пленок FePt требуется высокотемпературная (более 600°C) обработка. Тем не менее, ожидается, что с помощью новых технологических приемов удастся реализовать большие потенциальные возможности носителей с FePt-рабочими слоями и создать магнитные накопители с поверхностной плотностью записи информации 1 Тбит/дюйм².

То же можно сказать и о многослойной структуре Co/Pd. Уже сейчас с помощью магнетронной технологии осаждения при сверхвысо-

ком вакууме и внедрения имплантирующего слоя толщиной 2 нм, содержащего индий, коэрцитивную силу многослойной структуры удалось увеличить с 5,1 до 6,3 кЭ. Слои Co/Pd осаждались в атмосфере аргона при давлении 1 Па на алюминиевую подложку с нанесенным на нее слоем пермаллоя толщиной 6 мкм. Начальное давление в камере составляло $10,6 \cdot 10^{-6}$ Па. Имплантирующий слой напылялся в атмосфере аргона при давлении 0,58 Па. Еще большая коэрцитивная сила (около 6,9 кЭ) получена для образцов Co/Pt, осажденных с применением аналогичной для пленок Co/Pd технологии.

Таким образом, сегодня ведутся всесторонние, интенсивные исследования различных тонкопленочных материалов, пригодных для создания высококоэрцитивного магнитного носителя и высокоэффективного преобразователя записи/воспроизведения информации. При этом особое внимание уделяется магнитомягким материалам для тонкопленочного элемента записи и магниторезистивным материалам для воспроизводящего элемента. Для создания перспективных средств перпендикулярной магнитной записи с плотностью записи до 1 Тбит/дюйм² необходимо разработать новые технологические приемы, позволяющие изготавливать сложнейшие конструкции комбинированных преобразователей записи/воспроизведения, состоящих из тонкопленочных элементов размерами в сотни или даже десятки нанометров. В заключение следует отметить, что с 2000 года, когда был создан магнитный накопитель с перпендикулярной записью и показана возможность повышения его плотности записи информации, началось интенсивное развитие этой технологии такими ведущими изготовителями НМН, как Hitachi Global Storage Technologies (HGST), Seagate, Fujitsu America, Read-Rite.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ouchi K.** Recent Advancements in Perpendicular Magnetic Recording. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1217–1221.
2. **Карпенков С.Х.** Материалы для магниторезистивных преобразователей. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, № 2, с. 66–67.
3. **Iwasaki S.** History of Perpendicular Magnetic Recording. – J. Magn. Soc. Japan, 2001, v. 25, № 7, p. 1361–1369.
4. **Selmyer D.J., Luo C.P., Yan M.L.** et al. High-Anisotropy Nanocomposite Films for Magnetic Recording. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1286–1288.
5. **Yamanaka K., Hamamoto T., Nakano Y.** et al. High M_r squareness and Exchange Decoupled Perpendicular Recording Media. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1599–1601.
6. **Onoue T., Asahi T., Kuramochi.** et al. CoCrPtTa and Co/Pd Perpendicular Magnetic Recording Media with Amorphous Underlayers. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1592–1594.
7. **Ikeda Y., Sonode Y., Zeltzer G.** et al. Medium Noise and Grain Size Analysis of CoCrPt/Ti Perpendicular Media. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1583–1585.
8. **Ariake J., Kiya T., Honda N.** et al. Preparation of Double Layerd Perpendicular Recording Media with Extremaly High Resolution. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1573–1576.
9. **Jeong S., Hsu Y.M., Laughlin D.E.,** et al. Atomic Ordering and Coerceiveity Mechanism in FePt and CoPt Polycrystalline Thin Films. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1299–1301.
10. **Suzuki T., Kasuhira O.** Sputter Deposited (Fe-Pt)-MgO Composite Films for Perpendicular Recording Media. – IEEE Trans. Magn., 2001, v. 37, № 4–1, p. 1283–1285.