Таким образом, исследование электронной структуры поверхности NaCl, облученной ионами аргона, показало, что: 1) эффект ионного облучения немонотонно зависит от энергии ионов; он максимален при энергиях 300, 1100 и 2000 эВ; 2) при энергиях 300 и 1100 эВ облучение вызывает образование дырок в валентной зоне, которые при $T = 180^{\circ}$ С отжигаются с образованием V_2 -центров; 3) при энергиях облучения выше 700 эВ дефекты образуются в анионной подрешетке (*F*-и *M*-центры); 4) *M*-центры отжигаются в два этапа: необратимо при $T < 60^{\circ}$ С и обратимо при 60° С < *T* < 180°С.

Немонотонная зависимость от энергии ионов скорости образования дефектов характерна для резонансных процессов при взаимодействии ионов с поверхностью и подтверждает ранее предложенную модель [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гусева М. Б.//Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. 50, № 3. С. 459. [2] Ваваеv V. G., Вукоv Yu. V., Guseva M. В.//Тhin. Solid Films. 1976. 38, N 1. Р. 1. [3] Пайнс Дж. Элементарные возбуждения в твердых телах. М., 1961. [4] Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М., 1976. С. 637. [5] Тееgarden К., Baldini G.//Phys. Rev. 1967. B153. P. 896. [6] Roy G., Singh G., Gallon T. E.// //Surf. Sci. 1985. 152—153. P. 1042. [7] Dorendorf H.//Z. f. Phys. 1951. 129. P. 317.

Поступила в редакцию 04.07.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 6

УДК 538.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ЗАЗОРА МАГНИТОПРОВОДА НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

В. Е. Зубов, Г. С. Кринчик

(кафедра магнетизма)

С помощью магнитооптического метода наблюдалось резкое расширение зоны перемагничивания поверхности в проводящем ферромагнетике в окрестности зазора при росте частоты. Установлено различие механизмов перемагничивания горизонтальной и нормальной к поверхности составляющих намагниченности.

1. Введение. В связи с тенденцией к уменьшению размеров устройств магнитной электроники возрастает роль приповерхностной области магнетика в формировании рабочих характеристик этих устройств. Велико значение приповерхностной области магнитопровода в видеоголовках из ферромагнитных сплавов из-за влияния скин-эффекта. На высоких частотах в таких видеоголовках происходит перемагничивание относительно малой части магнитопровода, прилегающей к поверхности и определяемой глубиной скин-слоя. Эффективным методом исследования намагниченности на поверхности магнетиков является магнитооптический метод. Во-первых, магнитооптические эффекты в отраженном свете позволяют получить информацию о магнитном состоянии приповерхностного слоя глубиной порядка нескольких сотых микрометра [1, 2] (здесь и далее, говоря об исследовании поверхности магнитопровода, мы имеем в виду изучение свойств приповерхностного слоя, в котором формируется отраженный свет). Во-вторых, использование микроскопа с большой разрешающей силой дает возможность исследовать магнитные свойства образца на участке площадью ~1 мкм². В-третьих,

малое время формирования отраженного света (∆t≤10⁻¹² с [1]) позволяет изучать процессы перемагничивания вещества на очень высоких частотах. В работе [3] с помощью магнитооптического микромагнитометра было изучено локальное распределение намагниченности вблизи микрозазора на рабочей поверхности пермаллоевых головок, используемых в звукозаписи. В работе [4] тем же методом были исследованы универсальные видеоголовки из сендаста. Перемагничивание головок осуществлялось с частотой до 1 кГц. На рабочей поверхности магнитопровода видеоголовок были обнаружены паразитные магнитные зазоры. В ферритовых головках также могут существовать дополнительные, или «ложные», магнитные зазоры (микротрещины), возникающие при обработке рабочей поверхности и создающие повышенный шум при записи и воспроизведении [5]. Большой интерес представляет локальное исследование рабочей поверхности магнитопровода видеоголовок на рабочих частотах (т. е. при частотах 1÷10 МГц) и выше.

В настоящей работе представлены результаты магнитооптического исследования процессов намагничивания приповерхностного слоя магнитопровода из различных магнитных материалов — сендаста, горячепрессованного и монокристаллического ферритов — вблизи немагнитного зазора в частотном диапазоне 20 Гц—20 МГц.

2. Методика измерений и образцы. Для исследования магнитных свойств микроучастков ферромагнетиков применяется магнитооптический микромагнитометр [6]. Измерение параллельной и перпендикулярной к поверхности магнитопровода составляющих намагниченности производится с помощью экваториального и полярного эффектов Керра соответственно. Эффекты Керра заключаются в изменении интенсивности или состояния поляризации отраженного света при намагничивании обравца. С целью изучения процессов намагничивания поверхности магнетиков в широком диапазоне частот (20 Гц — 20 МГц) в настоящей работе был создан высокочастотный фазочувствительный магнитооптический микромагнитометр. Для определения амплитуды и фазы намагниченности измерялись составляющая намагниченности Іо, совпадающая по фазе с намагничивающим током в обмотке магнитопровода, а следовательно, и с магнитным полем, и составляющая I₉₀, сдвинутая по фазе по отношению к току на 90°.

Магнитопровод вблизи зазора схематически показан на рис. 1. Ширина магнитопровода d из сендаста составляла 250 мкм, размер lв узкой части у зазора — 60 мкм, размер зазора — 2 мкм. Для образцов из феррита соответствующие размеры 70, 70 и 1 мкм. Магнитные характеристики образцов из сендаста исследовались на участках поверхности с размерами 0,3×7 мкм (длинная сторона прямоугольника была параллельна зазору), образцов из феррита — на участках диаметром 30 мкм. Поведение намагниченности в объеме образцов с зазором и сендастовых колец, исследованных с целью получения количественной оценки поверхностной коэрицитивной силы в сендасте, контролировалось путем измерения напряжения, индуцируемого в проволочном витке, намотанном на магнитопровод вблизи зазора или на кольцо.

3. Результаты измерений. Были исследованы процессы намагничивания поверхности и объема магнитопровода из сендаста во внешнем поле звуковой частоты. Измерялись кривые намагничивания компоненты I_x в поле, параллельном оси x. Выбранная система координат изображена на рис. 1. Величина поля, при котором начинается перемагничивание объема колец, соответствовала литературным данным для коэрцитивной силы в сендасте $(0,1 \ \Im)$ [7]. Установлено, что коэрцитивная сила на поверхности сендастовых колец (~1 \Im) на порядок превосходит коэрцитивную силу в объеме, что обусловлено, по-видимому, механическими напряжениями, возникающими в результате полировки.

На рис. 2 приведены результаты магнитооптического исследования горизонтальной составляющей намагниченности I_x в магнитопроводе из сендаста, проведенного с помощью экваториального эффекта Керра при различных частотах. Величина тока в намагничивающей обмотке была выбрана таким образом, чтобы объем магнитопровода вблизи зазора намагничивался до насыщения. С увеличением частоты происхо-



Рис. 1. Часть магнитопровода вблизи зазора: распределение линий магнитной индукции при низких частотах в сендастовых образцах и при всех частотах в исследованном диапазоне изменения *f* в ферритовых (*a*) и сендастовых образцах при высоких частотах (*б*). Пунктирными линиями ограничены области локализации «магнитных зарядов»

Рис. 2. Переменная часть горизонтальной составляющей намагниченности (I_x) на поверхности образца из сендаста при различных частотах. Кривые сняты в одном из сечений шириной 7 мкм, перпендикулярном зазору. $I_{x,0}$, $I_{x,90}$ — компоненты I_x , различающиеся по фазе на 90° (см. текст); I_s — намагниченность насыщения

дят некоторое уменьшение величины I_x и небольшое возрастание сдвига ее фазы. На измеренных кривых имеются участки резкого изменения I_x в зависимости от x, причем на некоторых участках I_x изменяется от нуля до максимального значения на расстояниях, сравнимых с шириной зазора. Из рис. 2 видно, что с увеличением частоты область перемагничивания составляющей I_x растет. Область или зона перемагничивания — это область от зазора до края перемагничиваемого участка на поверхности магнитопровода. При увеличения зоны перемагничивания растет число участков с большими градиентами намагниченности, причем с ростом частоты положение этих участков может изменяться.

На рис. З представлены зависимости нормальной составляющей намагниченности $I_z(x)$ при различных частотах, измеренные на повсрхности магнитопровода из сендаста с помощью полярного эффекта Керра. Видно, что величина I_z и область, в которой наблюдается перемагничивание, быстро уменьшаются при увеличении частоты.

Магнитооптическое исследование локальных магнитных свойств ферритов представляет определенные трудности, связанные с относительно малой величиной магнитооптических эффектов и значительно меньшим коэффициентом отражения света в этих материалах по сравнению с ферромагнитными металлами. Для увеличения отраженного светового потока и повышения чувствительности измерений исследование ферритовых образцов проводилось на участках магнитопровода



Рис. 3. Нормальная составляющая намагниченности I_z (компонента $I_{z,0}$) на поверхности образца из сендаста вблизи зазора при различных частотах: f=20 Гц (1), 500 кГц (2), 1 МГц (3), 10 МГц (4) и 20 МГц (5)

диаметром 30 мкм, т. е. площадь исследуемых участков была существенно больше, чем на образцах из сендаста. В ферритовых образцах, как и в сендастовых, коэрцитивная сила для компоненты I_x на поверхности оказалась значительно выше, чем в объеме. При возрастании частоты f от 20 Гц до 20 МГц амплитуда I_x спадает примерно на порядок. Отставание фазы I_x от фазы тока составляло 10—20° и слабо увеличивалось с ростом f. Расширение зоны перемагничивания I_x не наблюдалось. Составляющую I_z в ферритовых образцах зафиксировать не удалось. Это связано с малой величиной I_z и малыми размерами зоны перемагничивания I_z .

4. Обсуждение результатов. На измеренных кривых зависимостей компоненты I_x от x в образцах из сендаста существуют особенности, причем в некоторых местах величина градиента $I_x(x)$ сравнима c ero величиной вблизи зазора. В работе [8] с помощью порошкового метода было установлено, что градиенты намагниченности на поверхности магнитопровода видеоголовок связаны с механическими и кристаллографическими дефектами в сердечнике. Исследования на студийном видеомагнитофоне показали [8], что участки с большими градиентами намагниченности на поверхности магнитопровода видеоголовок выполняют роль дополнительных магнитных зазоров в режимах как записи, так и воспроизведения. В работе [4] с помощью магнитооптического метода было показано, что скачки намагниченности локализуются, как правило, вблизи границ кристаллических зерен. На тех участках магнитопровода, где имеются большие градиенты I_x, появляются значительные «магнитные заряды» и, следовательно, возникают поля рассеяния, т. е. такие участки поверхности могут играть роль эффективных магнитных зазоров. В работе [4] на участках резкого изменения $I_x(x)$ наблюдались зависимости $I_z(x)$, аналогичные поведению компоненты I_z в районе основного зазора, т. е. «провалы» в зависимости $I_x(x)$ со-провождались «всплесками» $I_z(x)$. Исследование характеристик образцов в широком диапазоне частот позволило получить следующую информацию относительно дополнительных магнитных зазоров. Во-первых, с ростом f увеличивается зона перемагничивания поверхности образцов. Из-за этого в процесс перемагничивания включается большее

число кристаллических зерен на поверхности магнитопровода, и число дополнительных зазоров увеличивается. Во-вторых, с ростом f градиенты намагниченности изменяют свою величину и могут появляться новые участки с большими градиентами I_x . Появление новых дополнительных зазоров можно объяснить тем, что напряженность магнитного поля вблизи зазора при увеличении f уменьшается (причина уменьшения поля обсуждается ниже). Возникновение новых участков со скачками намагниченности при уменьшении поля наблюдалось в работе [4].

Расширение зоны перемагничивания І_х в образцах из сендаста можно объяснить при учете существования повышенной коэрцитивной силы приповерхностного слоя магнитопровода и действия скин-эффекта. Глубина проникновения поля в сендаст, например, при f = 100 кГц составляет $\delta = 16$ мкм, а при f = 10 МГц $\delta = 1,6$ мкм (для сендаста удельное сопротивление $\rho = 0,9$ мкОм/м, магнитная проницаемость $\mu =$ =10000 [7]). На низкой частоте зона перемагничивания формируется вблизи зазора, где результирующая напряженность поля превышает коэрцитивную силу. Поле вблизи зазора больше, чем на других участках магнитопровода, благодаря сужению магнитопровода и появлению вследствие этого отличной от нуля поверхностной и объемной дивергенции намагниченности (или, другими словами, появлению «магнитных зарядов»). На рис. 1 прилегающие к зазору участки магнитопровода, в которых сконцентрированы «магнитные заряды», ограничены штриховыми линиями. Поле, создаваемое «магнитными зарядами», усиливает суммарное магнитное поле над зазором и вблизи него и ослабляет поле на поверхности магнитопровода за пределами области, в которой локализованы «магнитные заряды». Наличие поля, создаваемого «магнитными зарядами», приводит к появлению нормальной составляющей поля *H*, и компоненты *I*, вблизи зазора.

С увеличением f глубина скин-слоя уменьшается. Когда б становится меньше поперечного размера магнитопровода ($\delta \leq l$), геометрическое сужение магнитопровода вблизи зазора слабо способствует концентрации магнитного потока и усилению магнитного поля в зазоре. Уменьшение эффективности сужения обусловлено тем, что с ростом *i* магнитный поток все больше вытесняется из объема магнитопровода и локализуется в приповерхностном слое (рис. 1, δ), а «магнитные заряды» в области сужения магнитопровода уменьшаются. При этом величины полей на поверхности образцов вблизи и вдали от зазора постепенно выравниваются, т. е. вдали от зазора H_x увеличивается, а вблизи уменьшается, что и приводит к расширению зоны перемагничивания $I_{\mathbf{x}}$. Уменьшение «магнитных зарядов» при повышении f должно вызывать уменьшение составляющей поля H_z вблизи зазора и, следовательно, уменьшение величины Iz, что действительно наблюдалось в эксперименте. В магнетиках с высоким удельным электросопротивлением из-за отсутствия скин-эффекта расширение зоны перемагничивания I_x происходить не должно, и это согласуется с результатами исследования ферритовых образцов.

5. Заключение. При изменении f от 20 Гц до 20 МГц зона перемагничивания компоненты I_x вблизи зазора на поверхности магнитопровода из сендаста увеличивается на порядок, а величина I_z и зона перемагничивания I_z при этом на порядок уменьшаются. В ферритовых образцах зона перемагничивания I_x с ростом f не изменяется. Увеличение зоны перемагничивания I_x , уменьшение аналогичной зоны I_z , а также уменьшение амплитуды I_z с ростом f в сендастовых образцах можно объяснить совместным действием двух факторов: существованием повышенной поверхностной коэрцитивной силы и скин-эффекта. Уменьшение величины I_z и зоны перемагничивания I_z при повышении частоты приводит к уменьшению плотности «магнитных зарядов» и сокращению эффективной площади поверхности магнитопровода вблизи зазора, на которой заряды появляются. Вследствие этого должно происходить заметное ослабление напряженности поля над зазором, особенно при изменении f от 0,5 до 20 МГц. Предложенный механизм расширения зоны перемагничивания I_x предполагает изменение распределения поля H_x в приповерхностном слое магнитопровода с ростом f. Дополнительной проверкой правильности этого механизма могло бы служить локальное исследование поля H_x при разных f.

При возрастании f увеличивается число дополнительных эффективных магнитных зазоров на поверхности магнитопровода из сендаста. Это можно объяснить тем, что увеличивается зона перемагничивания I_x и уменьшается поле Н_x вблизи зазора. Дополнительные зазоры в магнитных видеоголовках приводят к появлению интерференционных помех в записываемом и воспроизводимом видеомагнитофоном сигналах [8]. При увеличении числа дополнительных магнитных зазоров в видеоголовках с ростом f происходит усиление искажений видеосигнала. Кроме того, изменение числа и локализации дополнительных зазоров усложняет идентификацию интерференционных помех, что нужно иметь в виду при анализе видеопомех. Одним из способов подавления интерференционных помех в видеосигнале, вызываемых дополнительными магнитными зазорами, может служить уменьшение размера кристаллических зерен в материале магнитопровода.

Обнаруженные особенности в процессах перемагничивания поверхности магнитопровода из сендаста и ферритов должны учитываться при анализе работы и конструировании магнитных видеоголовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Кизель В. А. Отражение света. М., 1973. [2] Кринчик Г. С., Зубов В. Е., Лысков В. А.//Опт. и спектр. 1983. 55, № 1. С. 204. [3] Кринчик Г. С., Гиршовичус С. Х., Хребтов А. П., Розовский Н. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1975. 16, № 1. С. 66. [4] Кринчик Г. С., Никаноров С. И., Грибков В. Л. и др.//Гехника кино и телевидения. 1984. № 10. С. 52; Кринчик Г. С., Никаноров С. И., Грибков В. Л. и др.//Матер. Всесоюз. конф. «Основные вопросы техники магнитной записи». Вильнюс, 1984. С. 44. [5] Крюкова В. С., Смирнов А. Д.//Электронная техника. Сер. 6, Материалы. 1986. № 3. С. 38. [6] Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М., 1985. [7] Ясинавичус Р.// //Радио. 1985. № 1. С. 28. [8] Мучиев С. Г. Исследование искажений магнитной видеозаписи, используемой в кинотелевизионной аппаратуре: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. (НИКФИ), 1981.

Поступила в редакцию 22.07.88