

05

## **Расшифровка цифровой магнитной записи с продольным намагничиванием ленты по магнитооптическому изображению полей рассеяния**

© Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область  
E-mail: list@df.ru

Поступило в Редакцию 1 мая 2016 г.

Для цифровой магнитной записи кодированной информации с продольным намагничиванием ленты изучена связь между доменной структурой носителя и магнито-оптическим изображением его полей рассеяния, полученным с помощью магнитной пленки с перпендикулярной анизотропией и большим фарадеевским вращением. Для двухчастотного двоичного кода без возвращения к нулю разработан алгоритм, позволяющий на основе анализа изображения полей рассеяния однозначно расшифровать записанную на ленте информацию.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.09.44575.16321

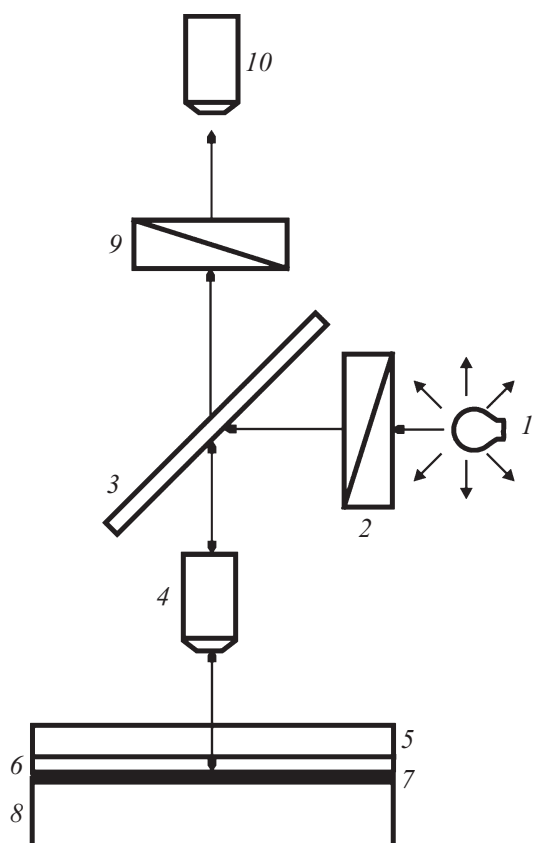
Во многих сферах человеческой деятельности существует необходимость в методах визуализации магнитных полей, создаваемых самыми различными объектами, среди которых важное место занимают носители магнитной записи. Впервые визуализацию магнитной записи на стальной ленте осуществили в 1932 г. (см. [1,2]) порошковым методом, предложенным за год до этого [3]. Модификации порошкового метода используются и сейчас, и не только для анализа магнитной записи, но и в других целях, например в дефектоскопии [4]. Для визуализации записи с продольным намагничиванием на лентах с гибкой основой из полимерных материалов применялось также размягчение рабочего слоя с помощью растворителей [1]. В размягченном рабочем слое магнитные частицы вблизи доменных границ отдалялись от них, в результате чего зрительно наблюдались пластические деформации и даже разрывы ленты.

В настоящее время наиболее распространенным является магнитооптический метод визуализации полей рассеяния магнитной записи, применимый при любом способе намагничивания носителя. Суть метода состоит в том, что на поверхности ленты с записью размещается индикатор в виде магнитной пленки с сильным эффектом Фарадея или Керра. Магнитные поля рассеяния рабочего слоя ленты видоизменяют распределение намагниченности в пленке, что приводит к изменению распределения угла поворота плоскости поляризации проходящего через нее (или отраженного от ее поверхности) света.

Впервые магнитооптический метод с использованием эффекта Фарадея был применен в 1957 г. для визуализации промежуточного состояния в сверхпроводящем диске, на поверхности которого создавался прозрачный стеклообразный слой парамагнетика с большой постоянной Верде на используемой длине волны [5]. Через 20 лет удалось реализовать подобный метод на эффекте Керра в аморфных магнитных пленках сплавов (Gd, Tb, Dy)Fe [6]. О применении для визуализации пленок висмутсодержащих ферритов-гранатов с сильным фарадеевским вращением в видимом диапазоне и анизотропией типа „легкая ось“ и „легкая плоскость“ впервые сообщали авторы работ [7,8].

Визуализация изображения полей рассеяния записи достигается методами поляризационной микроскопии; одна из схем с использованием эпитаксиальных магнитных пленок, выращиваемых на немагнитных подложках, представлена на рис. 1.

Пучок света от источника 1 с конденсором пропускается через поляризатор 2 и полупрозрачное зеркало 3, а затем поступает на объектив 4, направляющий пучок на систему немагнитная подложка 5 — эпитаксиальная магнитная пленка 6, находящуюся в контакте с рабочим слоем магнитной ленты 7, размещенной на предметном столике 8 с микрометрической подачей. Пройдя через пленку 6, световой пучок частично отражается от границы раздела пленки с рабочим слоем ленты и снова попадает на полупрозрачное зеркало 3; при этом плоскость поляризации света испытывает поворот за счет двукратного прохождения через пленку, обладающую эффектом Фарадея. Знак угла поворота плоскости поляризации зависит от локального направления вектора намагниченности в пленке. После отражения от полупрозрачного зеркала 3 свет попадает на анализатор 9, обеспечивающий необходимый контраст изображения доменной структуры эпитаксиальной пленки, и далее — в окуляр 10, снабженный винтовым микрометром. Поля



**Рис. 1.** Схема магнитооптической визуализации изображения полей рассеяния записи на магнитной ленте с помощью эпитаксиальной магнитной пленки.

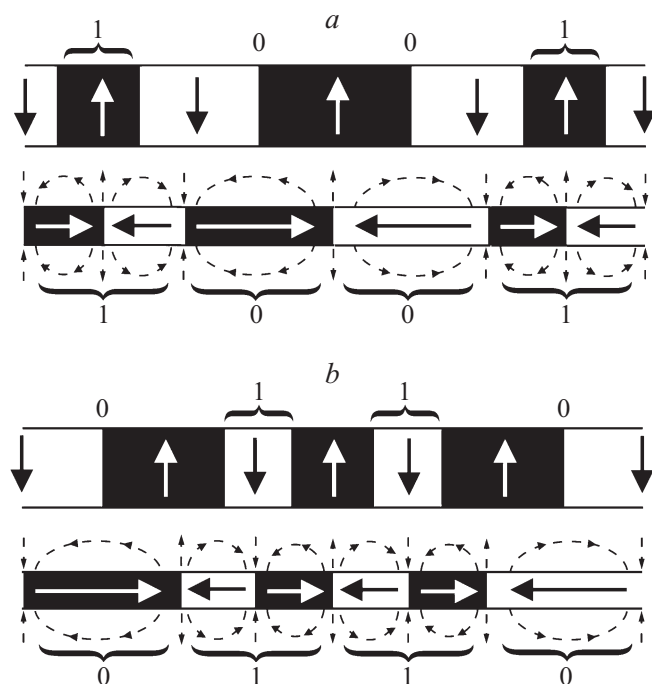
рассеяния записи быстро спадают при удалении от поверхности рабочего слоя, поэтому следует, не нарушая его целостности, обеспечить плотный контакт с поверхностью магнитной пленки. Для этого на предметном столике можно использовать тонкую упругую прокладку, а подложку эпитаксиальной пленки приклеить к массивной шайбе из немагнитного материала.

Несмотря на огромное количество опубликованных ранее работ по способам регистрации и анализа изображений, полученных магнитооптическим методом, изучению связи между распределением намагниченности в исследуемых образцах и изображениями их полей рассеяния должного внимания не уделялось. Между тем знание этой связи в определенных случаях является необходимым, например, при восстановлении информации с поврежденной при летных происшествиях магнитной ленты бортового самописца („черного ящика“), когда считывания с помощью головки воспроизведения невозможны.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма, позволяющего на основе анализа изображения полей рассеяния продольной цифровой магнитной записи в двухчастотном двоичном коде без возвращения к нулю осуществить однозначную расшифровку записанной на ленте информации.

В общем случае связь между магнитооптическим изображением полей рассеяния и записанной на ленте информацией зависит от способа кодирования последней и является далеко не тривиальной. Даже в простейшем случае перпендикулярной записи на магнитную ленту гармонических сигналов с пространственным периодом  $d_s$  для периода вынужденной доменной структуры  $d$  в индикаторной пленке толщиной  $t$  с периодом собственной доменной структуры  $d_0 \ll t/\pi$  в зависимости от соотношения между параметрами ленты и пленки могут выполняться соотношения  $d = nd_s$ , где  $n$  — целое нечетное число, или  $d = d_0$ . В последнем случае доменные структуры пленки и магнитной ленты оказываются смещенными относительно друг друга на расстояние  $d_0/4$  (см. [9]). Еще более сложным становится соотношение между магнитооптическим „образом“ полей рассеяния и распределением намагниченности в магнитной ленте с продольной записью сложного кодированного цифрового сигнала.

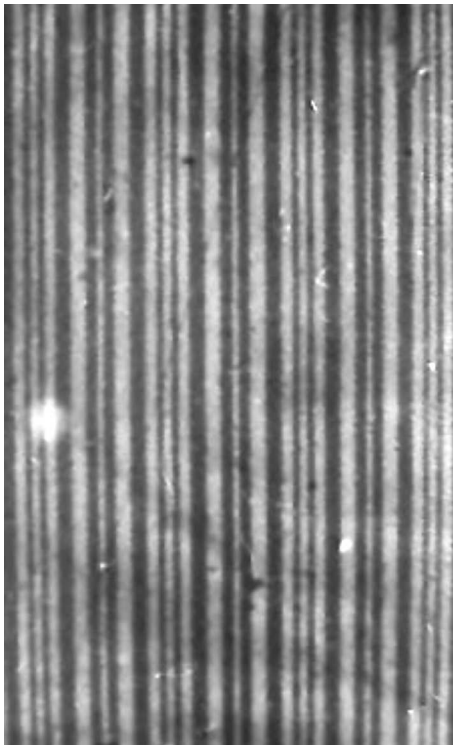
Проиллюстрируем это на примере использования двухчастотного двоичного кода без возвращения к нулю, когда единицы записываются двумя короткими разнополярными импульсами, а нули — одиночными длинными импульсами. Этот метод кодирования используется, например, в системах регистрации параметров полета типа ЗБН 1-1 Санкт-Петербургского АО НПО „Прибор“ [10]. При этом распределение намагниченности в ленте представляет собой совокупность доменов шириной  $L$  и  $L/2$  в окрестности границ, между которыми на поверхности возникает последовательность чередующихся разноименных магнитных



**Рис. 2.** Схематическое изображение распределения намагниченности (сплошные стрелки) и магнитных полей рассеяния (пунктирные стрелки) в рабочем слое ленты (нижняя часть фрагментов) и в индикаторной пленке (верхняя часть фрагментов) для записи чисел 1001 (*a*) и 0110 (*b*).

поллюсов, формирующих поля рассеяния (рис. 2, *a* и *b*). В пленке наряду с доменами шириной  $L$  и  $L/2$  существуют домены с шириной  $\sim 3L/4$ . Центры доменов в пленке располагаются над границами доменов в ленте, где максимальны нормальные компоненты напряженности магнитных полей рассеяния; места обращения этих компонент в нуль задают положение доменных границ в пленке.

Нами был найден достаточно простой алгоритм расшифровки записей с подобной кодировкой, а именно: записанным на носителе нулям соответствуют границы между широкими (шириной  $L$  и  $3L/4$ ) доменами в пленке, а записанным на носителе единицам — черные или



**Рис. 3.** Фотография магнитооптического образа многократной записи числа 110001000 на магнитной ленте. Домены имеют ширину 10,0, 7,5 и 5,0  $\mu\text{m}$ .

белые узкие (шириной  $L/2$ ) домены в пленке. Определение цвета узких доменов, соответствующих единицам, диктуется следующим правилом: необходимо выбирать цвет, отличный от цвета доменов, окаймляющих данную группу единиц. Так, например, на рис. 2, *a* единицам соответствуют черные домены, а на рис. 2, *b* — белые. Единицы, разделенные четным числом нулей, отображаются узкими доменами одинакового цвета, а единицы, разделенные нечетным числом нулей — узкими доменами разного цвета.

На рис. 3 приведена фотография магнитооптического образа полей рассеяния многократной записи числа 110001000 на используемой в

ЗБН 1-1 металлической ленте в двухчастотном коде ( $f_1 = 768$  Hz,  $f_2 = 384$  Hz), когда при скорости записи 7.68 mm/s в ленте существовали домены шириной 5 и 10  $\mu\text{m}$ . В качестве индикатора использовалась пленка состава  $(\text{YGdYbBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$  (толщиной 5  $\mu\text{m}$  с периодом собственной доменной структуры  $\sim 7 \mu\text{m}$ ), выращенная методом эпитаксии на подложке из  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  [11]. Угол поворота плоскости поляризации света после прохождения через пленку на длине волны 0.63  $\mu\text{m}$  составлял около  $3^\circ$ , что обеспечивало достаточно высокий контраст изображения доменов. Считывание информации производилось при перемещении перекрестья окулярного винтового микрометра (рис. 1) вдоль дорожки записи с последовательной фиксацией положения доменных границ в магнитооптическом изображении полей рассеяния.

Изложенным методом была успешно расшифрована запись на металлическом носителе с повреждением (разрыв), полученным при имитации летного происшествия [10].

Метод расшифровки цифровой магнитной записи с продольным намагничиванием ленты с использованием предложенного нами алгоритма, впервые кратко описанного в 1983 г. в сборнике трудов [10] (в настоящее время практически недоступном), и сейчас обладает несомненными преимуществами при восстановлении информации с поврежденного при авиакатастрофах магнитного носителя самописца по сравнению с другими, а именно: порошковым методом [1–3] и методом магнитно-силовой микроскопии [12].

В порошковом методе по ряду причин применяется коллоидный раствор магнетита в керосине, что создает определенные неудобства при практическом использовании. После нанесения коллоида удалить его с поверхности носителя практически невозможно, что исключает возможность повторных исследований. Методу магнитно-силовой микроскопии присущ общий недостаток процессов сканирования, а именно — большая трудоемкость. Кроме того, при сканировании возможно необратимое искажение оригинала записи под действием магнитного поля зонда, а в случае сильных повреждений ленты сканирование поверхности вообще становится практически невозможным.

Хотя в настоящее время наблюдается тенденция к оснащению воздушных судов исключительно твердотельными бортовыми самописцами, многие российские самолеты (типа Ту, Ил, Як и Ан) и вертолеты (типа Ми и Ка) до сих пор используют накопители на магнитной ленте (см. [13]), поэтому затрагиваемая тема не утратила актуальности.

Дальнейшее расширение сферы применения магнитооптических методов визуализации полей рассеяния зависит от прогресса в области оптимизации параметров известных и поиска новых индикаторных сред, а также в повышении контраста и разрешающей способности магнитооптических изображений инструментальными способами (модуляционные методики, использование магнитофотонных сред и др.; см., например, [14–18]).

Таким образом, в результате выполнения данной работы было показано, что для описанного метода визуализации восстановление записанной на магнитной ленте цифровой информации по магнитооптическому изображению полей рассеяния сигналаграммы возможно лишь с помощью специфического алгоритма, зависящего от способа кодирования при записи. Приведен пример такого алгоритма для случая записи информации в двухчастотном двоичном коде без возвращения к нулю.

## Список литературы

- [1] *Гукенбург В.* // Техника магнитной записи. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 103–114.
- [2] *Meyer E., Schüller E.* // Z. Techn. Physik. 1932. В. 13. N 12. S. 593–597.
- [3] *Bitter F.* // Phys. Rev. 1931. V. 38. N 10. P. 1903–1905.
- [4] *Шелихов Г.С.* Магнитопорошковая дефектоскопия. М.: Изд. дом „Спектр“, 2010. 336 с.
- [5] *Alers P.B.* // Phys. Rev. 1957. V. 105. N 1. P. 104–108.
- [6] *Imamura N., Mimura Y., Kobayashi T.* // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 6. P. 2634–2637.
- [7] *Введенский Б.С., Лисовский Ф.В., Червоненкис А.Я.* Техника кино и телевидения. 1978. № 6. С. 11–17.
- [8] *Grechishkin R.M., Goosev M.Yu., Ilyashenko S.E., Neustroev N.S.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 157/158. P. 305–306.
- [9] *Герус С.В., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г.* // Микроэлектроника. 1981. Т. 10. № 6. С. 506–515.
- [10] *Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Першина К.Н.* и др. // Тез. докл. VI Всесоюзн. объедин. сем. „Средства памяти на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД): Физические свойства, характеристики и технические применения“ (Симферополь). ЦНИИТЭИ приборостроения. Сер. ТС-12 Научно-техническая пропаганда". В. 7. М., 1983. С. 68–69.



- [11] *Аваева И.Г., Кравченко В.Б., Лисовский Ф.В.* и др. // Кристаллография. 1977. Т. 22. В. 4. С. 835–840.
- [12] *Freeman M.R., Choi B.C.* // Science. 2001. V. 294. Iss. 5546. P. 1484–1488.
- [13] <http://ppvzlet.ru/modernizatsiya/zbn/>
- [14] *Ishibashi T., Kuang Z., Yufune S.* et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. N 9. P. 093903 (1–6).
- [15] *Vasiliev M., Kotov V.A., Alameh K.E.* et al. // IEEE Trans. Magn. 2008. V. 44. N 3. P. 323–328.
- [16] *Рандошкин В.В., Васильева Н.В., Дурасова Ю.А.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. астрон. 2009. В. 6. С. 80–85.
- [17] *Цирулев А.Н., Ильяшенко С.Е., Михайлова О.О., Гурьева Т.Е.* // Вестник Тверского ГУ. Сер. 4. 2009. Т. 3. В. 4. С. 22–30.
- [18] *Ivanov V.E.* // J. Magn. Magn. Mater. 2016. V. 401. P. 200–208.