

А. П. Губарев, А. С. Кузнецов,  
С. Б. Одинокоев

## МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

*Рассмотрены критерии оценки качества записи/считывания магнитных сигналограмм, при которых происходит адекватное считывание информации. Анализируются искажения, возникающие при визуализации магнитных сигналограмм. Рассчитываются граничные значения пространственных периодов записанных магнитных сигналограмм, которым соответствует неискаженная визуализация. Приводятся рекомендации по выбору параметров двухслойных магнитных сред, согласно которым обеспечиваются заданные уровни оптической эффективности считывания, контраста изображения и диапазон воспроизводимых пространственных периодов.*

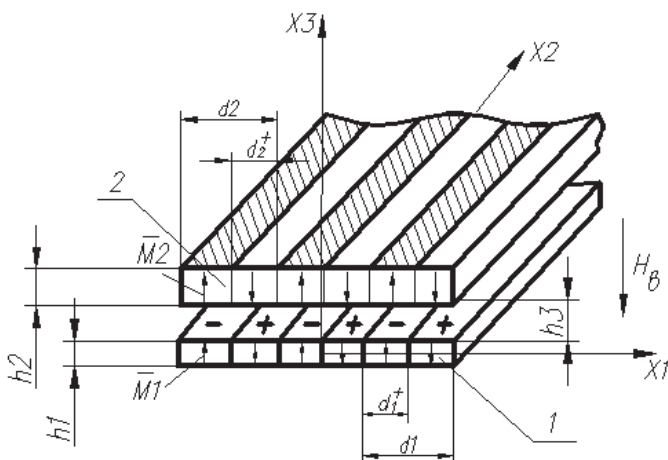
В последнее время появился заметный интерес к магнитооптическим (МО) устройствам хранения, обработки и отображения информации. Это новое направление в оптоэлектронике обязано своим происхождением открытию магнитных материалов, обладающих одновременно достаточно высокой прозрачностью в видимом и ближнем ИК диапазоне, сильными магнитооптическими эффектами (Фарадея и Керра) и управляемой доменной структурой [1].

Эти магнитные материалы позволяют производить уникальные исследования аудио- и видео записей на предмет подлинности и идентификации средств записи; контроль подлинности денежных купюр и других ценных бумаг по магнитному признаку; производить восстановление частично разрушенной или утраченной информации, например, с магнитных лент “черных ящиков”.

При этом наиболее сложным является вопрос об оценке разрешающей способности при визуализации скрытых МО меток. Аналогичные вопросы возникают при изучении МО визуализации с помощью Vi-содержащих магнитных пленок феррит-граната (МПФГ) информации, записанной на плоские носители типа магнитных лент и дисков, когда магнитный носитель и прикладываемая к нему визуализирующая МО пленка образуют двухслойную магнитную структуру [2]. Одной из основных задач, решаемых в данной статье, является определение разрешающей способности двухслойных магнитных структур и разработка методики выбора величин их параметров, при которых обеспечивались бы заданные уровни оптической эффективности и контраста изображения.

**1. Критерий оценки разрешающей способности при считывании магнитных сигналов.** Под двухслойной магнитной средой (ДМС) будем понимать такие среды, которые содержат регистрирующий магнитотвердый слой (РМТС) и визуализирующий магнитомягкий слой (ВММС). В качестве ВММС применяют в основном  $\text{Vi}$ -содержащие МПФГ.

На рис. 1 показана рассматриваемая ДМС, содержащая носитель магнитной записи 1, визуализирующую  $\text{Vi}$ -содержащую МПФГ 2, и возможное распределение намагниченности в ее слоях. Магнитные поля рассеяния, создаваемые доменной структурой носителя магнитной записи, перестраивают доменную структуру МПФГ в точном соответствии с записанной на носителе информацией. Модель ДМС удовлетворяет следующим условиям: 1) оба магнитных слоя имеют фактор качества больше единицы ( $Q_i = H_{A_i}/4\pi M_{S_i} > 1$ , где  $H_{A_i}$  и  $M_{S_i}$  — поле одноосной анизотропии и намагниченность  $i$ -го слоя), так что вектора намагниченности в любой точке пленок направлены перпендикулярно их поверхностям, а толщина доменных границ, где это не выполняется, пренебрежимо мала; 2) коэрцитивность доменных стенок в регистрирующем слое обеспечивает неизменность конфигурации полученного в процессе записи распределения намагниченности в течение сколь угодно длительного времени, напротив, коэрцитивность визуализирующего слоя пренебрежимо мала; 3) одноосная анизотропия в ВММС достаточна для обеспечения бинарного характера распределения намагниченности в нем и сохранения неизменной величины плотности



**Рис. 1. Двухслойная магнитная структура:**

1 — носитель записи; 2 — визуализирующая МПФГ;  $h_1$  — толщина носителя записи,  $h_2$  — толщина МПФГ,  $h_3$  — толщина зазора,  $H_0$  — внешнее магнитное поле,  $\overline{M}_1$ ,  $\overline{M}_2$  — намагниченность носителя магнитной записи и визуализирующего слоя соответственно

энергии доменных границ в магнитомягких решетках (ММР) во внешних полях и полях рассеяния от магнитотвердых решеток (МТР); 4) размеры решеток в направлениях  $X_1$  и  $X_2$  предполагаются бесконечно большими.

Разрешающая способность при считывании магнитных сигналограмм зависит как от магнитных, так и от геометрических параметров двухслойных магнитных сред, и определяется минимальными размерами перемагниченных в регистрирующем слое областей, которые могут быть однозначно отображены в визуализирующем слое в виде определенных доменных конфигураций. Для пленок  $MnVi$  и  $Tb-Fe$  возможно перемагничивание изолированных участков с характерным размером порядка  $0,5 \dots 1,0$  мкм, что соответствует дифракционному пределу, накладываемому оптической системой, формирующей регистрируемое изображение.

В настоящей статье предполагается, что перезапись информации из регистрирующего слоя в визуализирующий и ее оптическое считывание происходят без искажений, если конфигурация доменной структуры, инициируемой в визуализирующем слое, адекватна конфигурации распределения намагниченности, сформированного при записи в регистрирующем слое. Выбор критерия оценки качества записи/считывания в таком виде позволяет не производить непосредственный анализ восстановленного с ВММС изображения, считая, что оно будет во всех отношениях не хуже, чем изображение, получаемое при восстановлении с РМТС, отличаясь от последнего лишь значительно более высокими уровнями интенсивности и контраста (за счет более высокой МО добротности ВММС по сравнению с РМТС).

При уменьшении или увеличении характерных размеров перемагниченных в РМТС областей, начиная с некоторых их значений, адекватность распределений намагниченности в слоях нарушается (оказывается энергетически невыгодной), что, по сути дела, и ограничивает разрешающую способность рассматриваемого способа записи/считывания. Оценим возможность формирования в визуализирующем слое доменных конфигураций, адекватных информационным распределениям намагниченности в РМТС.

***Перезапись бинарной информации из регистрирующего слоя ДМС в визуализирующий слой.*** Для простоты рассуждений предположим, что в регистрирующем слое записана неограниченная МТР, пространственный период, скважность и ориентация которой постоянны в ее плоскости.

В высокоанизотропных магнитоодноосных визуализирующих пленках, каковыми являются рассматриваемые в настоящей статье феррит-гранатовые пленки, также возможно существование только бинарных

распределений намагниченности, в том числе устойчивыми оказываются полосовые доменные структуры, представляющие из себя ММР. Очевидно, что перезапись информации из РМТС в ВММС будет происходить без искажений, если пространственный период, скважность и ориентация ММР совпадают с аналогичными параметрами МТР. В этом случае магнитные решетки являются адекватными с точки зрения зафиксированной в них информации.

Анализ литературных данных показал [3], что совпадение конфигураций ММР и МТР возможно и при заданных параметрах ДМС достигается в определенном диапазоне пространственных периодов  $[d_{1\min}, d_{1\max}]$ . Границы этого диапазона могут служить естественной количественной характеристикой разрешающей способности ДМС. Проведем оценку величин  $d_{1\min}$  и  $d_{1\max}$ .

Основным критерием, определяющим возможность реализации в визуализирующем слое доменной структуры определенного вида является устойчивость ее конфигурации. Устойчивым конфигурациям соответствуют минимумы плотности энергии доменной структуры [4]. Таким образом, условия, при которых возможно образование ММР, адекватных решеткам, записанным в регистрирующем слое, могут быть определены из анализа выражения для плотности энергии ММР, находящейся в полях рассеяния МТР.

Ограничим рассматриваемый класс доменных структур в визуализирующем слое решетками, параллельными решетке, записанной в регистрирующем слое. Такое ограничение не сказывается на общности получаемых выводов, т.к. непосредственное наблюдение доменных структур в визуализирующем слое показывает, что в нем реализуется именно такие ММР, которые, однако, в зависимости от конкретных условий, могут подвергаться определенным видам искажений.

Средняя плотность энергии ММР может быть записана в виде суммы [5]

$$\omega_2 = \omega_\sigma + \omega_{m2} + \omega_H + \omega_{m1} + \omega_{\sigma'}, \quad (1)$$

где  $\omega_\sigma$  — энергия вертикальных доменных стенок ММР с поверхностной плотностью энергии  $\sigma_2$ ;  $\omega_{m2}$  — собственная магнитостатическая энергия ММР;  $\omega_H$  — энергия взаимодействия ММР с внешним магнитным полем  $H_0$ ;  $\omega_{m1}$  — зеемановская энергия взаимодействия ММР с полями рассеяния от распределения намагниченности в регистрирующем слое (т.е. от МТР);  $\omega_{\sigma'}$  — энергия горизонтальных доменных стенок типа “*head to head*” с поверхностной плотностью энергии  $\sigma'_2$ , возникающих на границе раздела магнитных слоев при отсутствии между ними немагнитной прослойки, нарушающих их обменное взаимодействие.

Выражения для первых трех слагаемых в равенстве (1) хорошо известны и могут быть записаны в виде

$$\omega_{\sigma} = \tau_2/\zeta_2, \quad \tau_2 = l_2/h_2, \quad \zeta_2 = d_2/h_2;$$

$$\omega_H = (s_2 - 0,5)(H_e/4\pi M_{s_2});$$

$$\omega_{m2} = \left\{ (s_2 - 0,5)^2 + \frac{\zeta_2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^2(\pi n s_2) [1 - \exp(-2\pi n \zeta_2^{-1})] \right\};$$

где  $l_2 = \sigma_2/4\pi M_{s_2}^2$  — характеристическая длина материала визуализирующего слоя;  $s_2 = d_2^+/d_2$  — скважность ММР;  $H_e$  — вертикальная составляющая внешнего постоянного магнитного поля, в которое помещена ДМС.

Сумма слагаемых  $\omega_{\sigma}$  и  $\omega_{m2}$  описывает энергию ММР с периодом  $d_2$  и скважность  $s_2$  в визуализирующей пленке, свободной от регистрирующего слоя. График зависимости этой суммы от  $d_2$  при  $s_2 = 0,5$  представляет из себя кривую  $\omega_2^0(\zeta_2)$ , изображенную на рис. 2 утолщенной линией. Минимум этой кривой достигается при некоторой величине пространственного периода ММР  $d_2 = d_2^0$  ( $\zeta_2 = \zeta_2^0$ ). ММР (чаще лабиринтная структура) с таким периодом реализуется в визуализирующем слое при отсутствии воздействия на него внешних полей.

Выражения для плотности энергии взаимодействия ММР с полями рассеяния МТР и плотности энергии горизонтальных доменных стенок имеют следующий вид:

$$\omega_{m1} = -\frac{2}{\pi^3} \tilde{m} \zeta_1 \sum_{k,n=1}^{\infty} \frac{1}{nk^2} \sin(\pi n s_2) \sin(\pi k s_1) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi k \varepsilon_1}{\zeta_1}\right) \right] \times \\ \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi k}{\zeta_1}\right) \right] \exp\left(-\frac{2\pi k \varepsilon_3}{\zeta_1}\right) \Delta\left(\zeta_2, \frac{n}{k} \zeta_1\right); \quad (2)$$

$$\omega_{\sigma'} = \frac{\tau_2'}{4} \left\{ 1 - \frac{16}{\pi^2} \sum_{k,n=1}^{\infty} \frac{1}{nk} \sin(\pi n s_2) \sin(\pi k s_1) \Delta\left(\zeta_2, \frac{n}{k} \zeta_1\right) \right\}, \quad (3)$$

где  $\tau_2' = l'/h_2 = \sigma'/4\pi M_{s_2}^2 h_2$ .

Из выражений (2) и (3) следует, что взаимодействие между решетками приводит к изменению средней плотности энергии ММР, если отношение пространственных периодов решеток равно некоторому положительному рациональному числу, т.е. может быть выражено как отношение целых положительных чисел (рис. 2). В этом случае в двойных

суммах отличными от нуля будут слагаемые, соответствующие значениям  $n$  и  $k$ , отношение которых равно тому же рациональному числу. Количество и величина не равных нулю слагаемых определяется видом этого рационального числа:

$$\varsigma_2/\varsigma_1 = d_2/d_1 = n/k = N + \alpha/\beta, \quad (4)$$

где  $N, \alpha, \beta$  — целые взаимнопростые положительные числа,  $\alpha < \beta$ ,  $N$  и  $\alpha$  не одновременно могут быть равны нулю, причем при  $\alpha = 0$   $\beta$  следует считать равным единице.

Слагаемые, остающиеся при этом в двойных суммах, характеризуются величинами  $n$  и  $k$ , удовлетворяющими соотношениям:

$$\begin{cases} n = l\beta, \\ k = l(N\beta + \alpha), \quad l = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

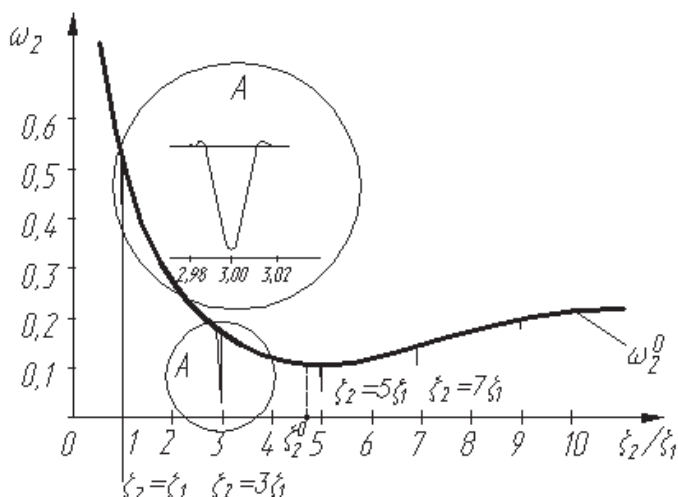
Двойное суммирование по  $n$  и  $k$  в выражениях (2 и 3) при этом сводится к суммированию по индексу  $l$  от 1 до  $\infty$ . Кроме того, можно сделать заключение, что величина двойной суммы оказывается обратно пропорциональной произведению  $(N\beta + \alpha)^2 \beta$  в выражении (2) и произведению  $(N\beta + \alpha)\beta$  в выражении (3). Теперь становится очевидным, что наиболее сильные возмущения кривой плотности энергии ММР  $\omega_2^0$  должны наблюдаться при отношениях пространственных периодов решеток, равных целым числам.

Скачкообразное (локальное) изменение плотности энергии  $\omega_2(\varsigma_2)$  при  $\varsigma_2 = \left(N + \frac{\alpha}{\beta}\right) \varsigma_1$  является следствием неограниченных размеров решеток в плоскости  $X10X2$ . Если же размер взаимодействующих решеток ограничен вдоль оси  $0X1$  и равен  $L$ , то ширина областей возмущения кривой  $\omega_2^0(\varsigma_2)$  перестанет быть равной нулю. Для  $d_2 = N d_1$  она может быть оценена по формуле

$$\delta = \frac{2N d_1^2}{d_1 + 4L} \approx \frac{d_1 d_2}{L}.$$

При  $d_1 = 1$  мкм,  $L \gg 100$  мкм и  $N = 1$  получаем  $\delta \approx -0,5 \cdot 10^{-3}$  мкм. При проведении оценок не учитывалось влияние на величину  $\omega_2$  полей рассеяния от краев магнитных решеток, которое также приводит к уширению минимумов энергии. Конечность ширины областей возмущения кривой  $\omega_2$  отражена на рис. 2. увеличением масштаба вдоль оси пространственных периодов в окрестности точки  $d_2/d_1 = 3$ .

Таким образом, в соответствии с вышеизложенным, в полях рассеяния от МТР оказываются устойчивыми ММР, пространственные периоды которых удовлетворяют соотношению (4). Из указанных решеток



**Рис. 2.** Зависимость плотности энергии ММР от ее пространственного периода ( $\zeta_2 = d_2/h_2$ ,  $\zeta_1 = d_1/h_2$ )

в пленке реализуется та, которой соответствует абсолютный минимум энергии. Для адекватной перезаписи информации из РМТС в ВММС необходимо, чтобы решетке с периодом  $d_2 = d_1$  соответствовал не просто минимум, а абсолютный минимум плотности энергии  $\omega_2$ . Кроме того, необходимо, чтобы он достигался при  $s_2 = s_1$ . В общем случае адекватность воспроизведения не нарушается, если между величинами  $s_1$  и  $s_2$ , соответствующими минимуму  $\omega_2$ , наблюдается близкое к линейному соответствие ( $s_2 = s_1^0 + K s_1$ ) с коэффициентом  $K$ , незначительно меньшим единицы. Эти условия выполняются в определенном диапазоне пространственных периодов МТР  $[d_{1\min}, d_{1\max}]$ , границы которого резко зависят от величины параметров ДМС.

**Искажения, возникающие при визуализации магнитных сигналограмм.** При визуализации магнитных сигналограмм с РМТС возможны следующие виды искажений, которые ограничивают диапазон пространственных периодов  $[d_{1\min}, d_{1\max}]$ :

- “кратное умножение периода”;
- “синусоидальное” искажение доменных стенок;
- искажения типа “перетяжек”.

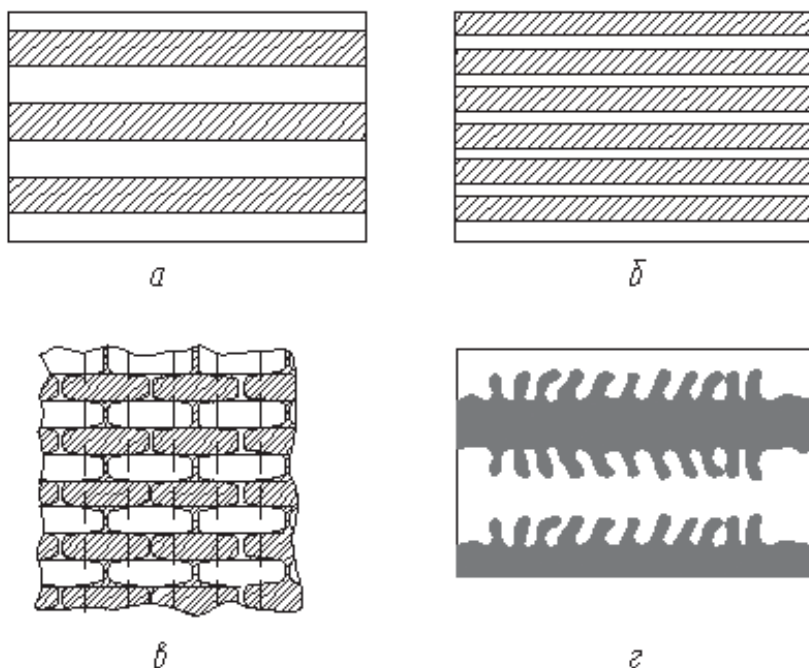
В первом случае данный тип искажений является следствием неравенства  $s_2 \neq s_1$ . Расчет величин  $d'_{1\min}$  и  $d'_{1\max}$  может быть произведен путем численного сравнения локальных минимумов плотностей энергии ММР при значениях  $d_2 = \left(N + \frac{\alpha}{\beta}\right) d_1$  и  $d_2 = d_2^0$ . Результаты численных расчетов приводят к выводу: если  $d_1$  больше  $d'_{1\max}$  или меньше  $d'_{1\min}$ , то плотность энергии ММР с пространственным перио-

дом  $d_2 = d_1$  оказывается не минимально возможной, и в визуализирующей пленке будет реализовываться решетка с  $d_2 \neq d_1$ .

Следует отметить близость величин плотностей энергии ММР с различной кратностью пространственных периодов в окрестности граничных значений диапазона  $[d'_{1\min}, d'_{1\max}]$ . Это говорит о том, что в визуализирующем слое при  $d_1 \leq d'_{1\min}$  и  $d_1 \geq d'_{1\max}$  будут одновременно реализовываться решетки с различными периодами  $d_2 = N d_1$ , располагающиеся по поверхности пленки в хаотическом порядке.

Различие пространственных периодов ММ и МТ решеток является не единственным типом искажений, встречающимся в реальных образцах ДМС (рис. 3).

Несовпадение конфигураций решеток проявляется также в виде волнообразного искривления (синусоидальной нестабильности) (рис. 3, *з*) доменных стенок ММР, которое, как правило, возникает при увеличении периода  $d_1$ , или в виде наблюдаемого по всему полю визуализированной картины большого числа узких участков доменной структуры — “перетяжек”, соединяющих одинаковым образом намагниченные полосовые домены ММР (рис. 3, *в*).



**Рис. 3. Возможные типы искажений конфигурации визуализированных магнитных решеток:**

*a* — неискаженная визуализация; *б* — “кратное умножение периода” визуализированной решетки; *в* — искажения типа “перетяжек”; *з* — “синусоидальное” искажение доменных стенок



Волнообразное искривление плоских доменных границ наблюдалось и раньше и было теоретически обосновано в работах [6]. Причиной его возникновения являются пространственно-неоднородные магнитные поля с малой величиной градиента вертикальной составляющей (в частности, если он равен нулю, конфигурации доменной структуры принимает лабиринтный вид). Критический градиент  $\beta_k$ , при котором энергетически выгодной становится синусоидальная искривленная доменная стенка, может быть найден из соотношений [6]:

$$\beta_k = 4\pi^2 M_{s2} h_2^{-1} (h_2/\lambda_c)^2 [1 + 0,344 (h_2/\lambda_c)^2 - 0,5\pi^2 (h_2/\lambda_c)^2 \ln(\lambda_c/h_2)],$$

$$\pi\tau_2 = \sigma_2/4 h_2 M_{s2}^2 = [1 + 0,5\pi^2 (h_2/\lambda_c)^2 \ln(\lambda_c/h_2) - 1,247 + 0,892 (h_2/\lambda_c)^2],$$

где  $\lambda_c$  — пространственный период возникающей синусоидальной неустойчивости.

На доменные стенки ММР действуют пространственно-неоднородные магнитные поля со стороны МТР. Если величина градиента вертикальной составляющей этого поля оказывается меньше критической — доменные стенки в визуализирующей пленке “синусоидально” искривляются. Диапазон пространственных периодов решетки  $[d''_{1\min}, d''_{1\max}]$ , внутри которого синусоидальная неустойчивость не проявляется, может быть найден путем решения неравенства

$$\frac{\partial \tilde{H}_{m1}(4\pi M_{s1}, d_1, x_1)}{\partial x_1} \geq \beta_k(4\pi M_{s1}, \sigma_2, h_2),$$

где  $\tilde{H}_{m1}(4\pi M_{s1}, d_1, x_1)$  — усредненная величина вертикальной составляющей поля рассеяния от МТР.

Искажения типа “перетяжек” в иницируемой ММР являются следствием неполной перестройки первоначальной полосовой или лабиринтной структуры магнитомягкого слоя в доменную структуру, адекватную МТР. Эксперименты, проведенные ранее, позволяют установить, что перестройка осуществляется путем локального пережима полосовых доменов с намагниченностью, направленной противоположно приложенному в данном месте полю. На рис. 4 показано первоначальное перпендикулярное расположение доменных полосовых решеток в магнитомягких и магнитотвердых слоях. Под действием полей рассеяния от МТР полосовые домены визуализирующего слоя в окрестности точки “А” начинают сжиматься. При достаточной величине поля происходит разрыв перетяжек и образуется полосовая доменная структура,

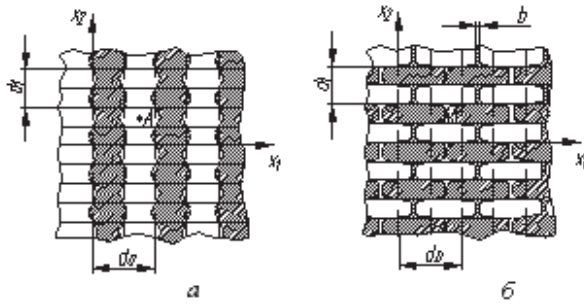


Рис. 4. Действие МТР с периодом  $d_1$  на ММР с периодом  $d_0$  (решетки расположены ортогонально). Сплошными прямыми линиями показаны магнитные стенки в магнитотвердом слое. Сплошными линиями синусоидально искаженной формы — магнитные стенки в магнитомягкой пленке. Пунктирными линиями показано первоначальное положение доменных стенок в визуализирующем слое. Штриховкой выделены области магнитомягкой пленки с положительной намагниченностью:

$a$  — размагничивающие поля от магнитотвердого слоя,  $\tilde{H}_{\max} \ll H_k^l$ ;  $b$  — размагничивающие поля от магнитотвердого слоя близки к полю коллапса полосовых доменов в магнитомягкой решетке,  $\tilde{H}_{\max} \leq H_k^l$

адекватная МТР. В момент разрыва перетяжки представляют собой узкие полосовые домены и поэтому можно считать, что разрыв происходит, если действующее на полосовой домен магнитное поле в окрестности точки “А” (в этих точках вертикальная составляющая поля рассеяния максимальна) больше поля коллапса ( $H_k^l$ ) полосового домена, которое может быть рассчитано из соотношений [5]

$$H_k^l = \left[ 1 - \frac{1}{\pi} (2 \operatorname{arctg} \zeta + \ln(1 - \zeta^2)) \right] 4\pi M_{s2},$$

$$\tau_2 = [(1 + \zeta^2) \ln(1 + \zeta^2) - \zeta^2 \ln \zeta^2] / 2\pi,$$

где  $\zeta = b/h_2$  — относительная ширина полосового домена — “перетяжки” в момент коллапса.

Решая неравенство  $\tilde{H}_{\max} \geq H_k^l(4\pi M_{s2}, \sigma_2, h_2)$ , где  $\tilde{H}_{\max}$  — амплитуда усредненной по толщине магнитомягкой пленки вертикальной составляющей магнитного поля рассеяния от МТР, находим граничные значения  $d'''_{1\min}$  и  $d'''_{1\max}$  диапазонов периодов МТР, внутри которых искажения типа “перетяжек” не наблюдаются.

Выбирая из значений  $d'_{1\max}$ ,  $d''_{1\max}$  и  $d'''_{1\max}$  минимальное, а из  $d'_{1\min}$ ,  $d''_{1\min}$  и  $d'''_{1\min}$  — максимальное, получим соответственно граничные значения  $d_{1\min}$ ,  $d_{1\max}$  диапазонов периодов МТР, в которых будет происходить адекватная перезапись информации из РМТС в ВММС. На рис. 5. приведены графики зависимостей  $d_{1\min}$  и  $d_{1\max}$  от параметров визуализирующего слоя ДМС типа: пленка MnVi–пленка

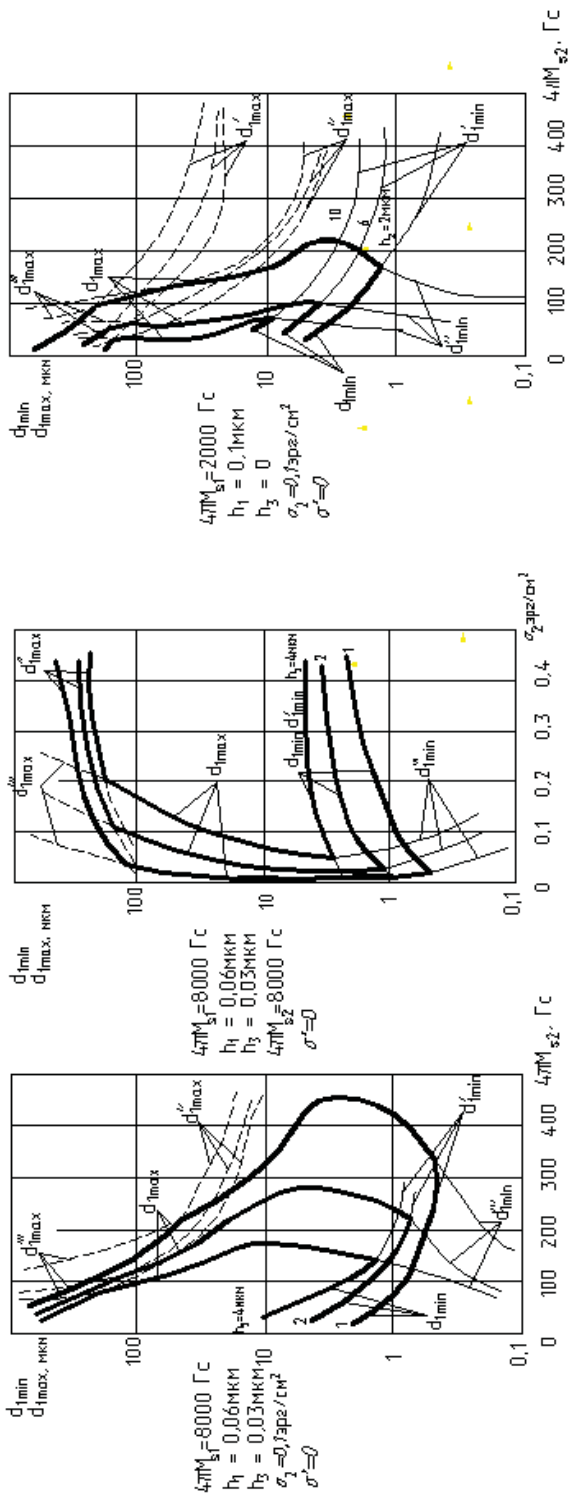


Рис. 5. Граничные значения диапазонов пространственных периодов магнитотвердой решетки, внутри которых происходит адекватная перезапись информации из регистрирующего слоя в визуализирующий слой

Vi-содержащего феррит-граната. Легко видеть, что феррит-гранатовая пленка толщиной порядка 2 мкм может визуализировать МТР, записанные в MnVi слое ( $4\pi M_{s1} = 8000$  Гс,  $h_1 = 0,06$  мкм,  $h_3 = 0,03$  мкм) с периодом от 0,8 до 20 мкм, причем эти уровни разрешающей способности достигаются в пленке с намагниченностью порядка 200 Гс и энергией стенки порядка 0,1 эрг/см<sup>2</sup>.

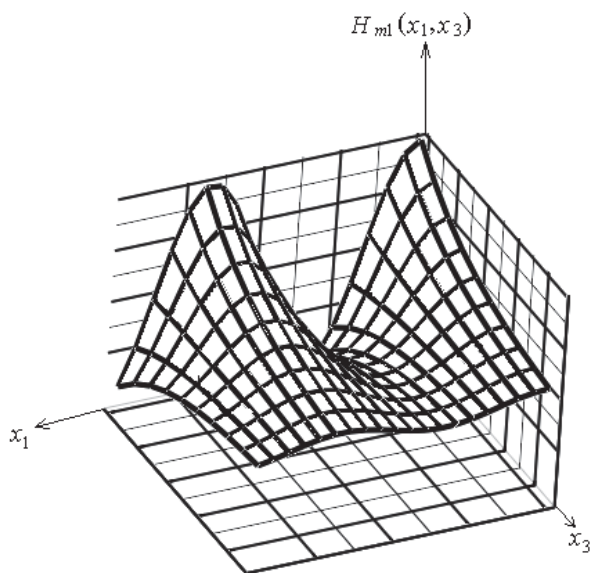
При намагниченности насыщения порядка 100 Гс минимальный период МТР, позволяющий произвести неискаженную перезапись в визуализирующий слой, оказывается уже порядка 1,5 мкм,  $d_{1\max}$  также возрастает до значений порядка 300 мкм.

Аналогичные расчетные зависимости, построенные для ДМС с определенными регистрирующими слоями (с учетом необходимой толщины немагнитной прослойки), позволяют в каждом конкретном случае оценивать предельные значения разрешающей способности рассматриваемой ДМС и определять величины параметров визуализирующего слоя, при которых достигаются заданные уровни  $d_{1\min}$  и  $d_{1\max}$ .

**Визуализация информации с магнитных лент.** Перестройка доменной структуры в визуализирующей феррит-гранатовой пленке под действием магнитных полей рассеяния от прижатой к ней магнитной ленты, в которой записаны сигналограммы в виде дорожек (треков) с периодическим изменением намагниченности вдоль последних, осуществляется аналогично формированию ММР в полях рассеяния от тонких РМТС. Однако следует учитывать, что параметры визуализируемых магнитотвердых решеток в этих двух случаях существенно различаются. Во-первых, толщина магнитного слоя ленты, как правило, значительно превышает толщину магнитотвердых слоев, используемых для регистрации оптической информации. Толщина зазора между магнитными слоями также резко возрастает и в зависимости от качества поверхности ленты и пленки, а также от способа и силы прижима их друг к другу может варьироваться в пределах нескольких микрон. Во-вторых, распределение намагниченности в магнитных сигналограммах в зависимости от способа записи и типа магнитной ленты может носить различных характер. Анализ полей рассеяния от магнитных сигналограмм показывает, что во многих случаях можно аппроксимировать одним из четырех типов магнитотвердых решеток: 1) косинусоидальной ортогонально намагниченной решеткой; 2) косинусоидальной продольно намагниченной решеткой; 3) бинарной продольно намагниченной и 4) бинарной ортогонально намагниченной решетками. С увеличением расстояния от поверхности пленки амплитуда гармоник уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 6):  $H_{m1}(x_1, x_2) \sim \exp(-2\pi k x_3/d_1)$ , где  $k$  — номер гармоники;  $d_1$  — пространственный период сигнала-

граммы;  $x_3$  — удаление точки наблюдения от поверхности магнитной ленты;  $H_{m1}(k)$  — амплитуда вертикальной составляющей  $k$ -й гармоники поля рассеяния. Учитывая, что величина зазора между магнитными слоями пленки во многих случаях оказывается одного порядка с пространственным периодом сигналаграммы, в первом приближении можно не учитывать влияния на визуализирующий слой гармоник с номерами, большими единицы. По этой причине поле рассеяния от любой из магнитных сигналаграмм может рассматриваться как поле некой эквивалентной ортогонально намагниченной решетки с косинусоидальным законом распределения намагниченности (рис. 6).

При пространственных периодах сигналаграммы, меньших 30... 50 мкм, их поля рассеяния оказывались эквивалентными полям рассеяния от продольно намагниченных косинусоидальных решеток с намагниченностью ( $4\pi M_s$ ) от 500 до 1000 Гс. В выражении (1) для плотности энергии ММР в поле рассеяния от магнитной сигналаграммы, эквивалентной косинусоидальной решетке, все слагаемые, кроме четвертого, остаются без изменений (пятое отсутствует, т.к. наличие зазора исключает обменное взаимодействие между магнитными системами пленки и ленты). Вследствие преобладания в поле рассеяния, воздействующего на визуализирующую пленку, лишь одной пространственной гармоники, выражение для четвертого слагаемого значительно упрощается и принимает вид



**Рис. 6.** Распределение вертикальной составляющей поля рассеяния вдоль магнитной сигналаграммы

$$\omega_{m1} = -\frac{2}{\pi^3} \tilde{m} \varsigma_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin(\pi n s_2) \sin(\pi k s_1) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi \varepsilon_1}{\varsigma_1}\right) \right] \times \\ \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{\varsigma_1}\right) \right] \exp\left(-\frac{2\pi \varepsilon_3}{\varsigma_1}\right) \Delta(\varsigma_2, n \varsigma_1).$$

Локальные минимумы плотности полной энергии ММР достигаются теперь только при  $d_2 = d_0$ ,  $d_2 = n d_1$ , где  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Таким образом, в визуализирующем слое возможно образование магнитных решеток только с пространственными периодами, кратными пространственному периоду решетки сигналограммы.

Изменение основных характеристик двухслойной магнитной структуры — визуализирующая пленка–магнитный слой ленты — по сравнению с ДМС, применяемой для термозаписи, приводит к увеличению  $d_{1 \min}$ , равного 10...20 мкм.

**Рекомендации по выбору параметров ДМС.** Величины параметров ДМС должны выбираться таким образом, чтобы обеспечивались определенные требования, предъявляемые к величине эффективности считывания, контрасту визуализированных световых картин, диапазону воспроизводимых пространственных периодов  $d_{1 \min}$  и  $d_{1 \max}$  и т.д.

Намагниченность регистрирующего слоя должна выбираться максимально возможной. На практике она определяется составом выбранной регистрирующей пленки.

Толщина прозрачной немагнитной прослойки  $h_3$  должна быть минимально возможной и выбирается отличной от нуля только вследствие необходимости предотвращения химического взаимодействия между магнитными слоями, которое приводит к ухудшению МО свойств последних.

Целесообразность введения между магнитными слоями отражающей прослойки из алюминия или серебра, толщиной порядка сотни ангстрем, определяется повышенными требованиями, предъявляемыми к ДМС при считывании. Если требуются повышенные уровни оптической эффективности и контраста, а требования к разрешающей способности недостаточно жесткие, введение такого слоя оправдано. Напротив, при визуализации мелкоструктурных информационных изображений введение такого слоя может оказаться недопустимым.

Максимальные уровни оптической эффективности считывания и контраста достигаются в первую очередь путем максимально возможного увеличения магнитооптической добротности визуализирующей пленки.

При выборе длины волны считывающего излучения и толщины МО пленки следует ориентироваться на максимально возможные величины

оптической эффективности  $\eta$ , которые однозначно связаны с величиной МО добротности  $\psi$ .

Намагниченность насыщения визуализирующего слоя выбирается такой, чтобы  $d_{1 \min}$  было минимально возможным. Обычно она равняется 150...200 Гс.

Таким образом, Vi-содержащие МПФГ позволяют проводить, практически независимо, выбор их толщин из соображения максимальной величины МО характеристик считывания, а намагниченности насыщения и плотности энергии доменных стенок — из соображений удовлетворения требований к разрешающей способности.

**Выводы.** 1. На основе изучения устойчивости конфигураций доменных структур в визуализирующем слое, адекватных распределениям намагниченности в регистрирующем слое, получены соотношения, позволяющие определять диапазоны параметров ДМС, при которых возможна неискаженная перезапись информации из регистрирующего слоя в визуализирующий слой.

2. Рассмотрены различные виды искажений конфигурации инициируемой в визуализирующем слое полосовой доменной структуры.

3. Разработаны рекомендации по выбору величин параметров двухслойных магнитных сред, обеспечивающих заданные уровни оптической эффективности и разрешающей способности при считывании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р а н д о ш к и н В. В., Ч е р в о н е н к и с А. Я. Прикладная магнитооптика. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
2. В е д е н с к и й Б. С., Л и с о в с к и й Ф. В., Ч е р в о н е н к и с А. Я. Магнитооптическая визуализация магнитной записи // Техника кино и телевидения. — 1978. — № 6. — С. 11–17.
3. Б а л б а ш о в А. М., Г у б а р е в А. П., Ч е р в о н е н к и с А. Я. Полосовые доменные структуры в двухслойных магнитных пленках. В сб.: Тезисы докладов V Международной конференции по гиромангнитной электронике и электродинамике. — Вильнюс, 1980. Т. 3. — С. 187–195.
4. Б р а у н У. Ф. Микромагнетизм / Пер. с англ. под ред. А. Г. Гуревича. — М.: Наука, 1979. — 160 с.
5. К о о у С. а n d Е u z Н. Experimental and theoretical study of the domain configuration in thin layers of  $BaFe_{12}O_{19}$ . — Philips Res. Reports, 1960. — V. 15. — P. 7–29.
6. S c h l ö m a n n E. Wave propagation along domain walls in magnetic films. — IEEE Trans. on Magn., 1974. — Vol. MAG-10. №. 1. — P. 11–17.

Статья поступила в редакцию 26.01.2005

Анатолий Павлович Губарев родился в 1949 г., окончил в 1970 г. факультет электронной техники МЭИ и в 1985 г. аспирантуру по специальности “Электродиффузия” МЭИ. Канд. техн. наук, ведущий специалист НИИ “Гознака”. Имеет около 50 научных работ в области магнитооптики.

A.P.Gubarev (b. 1949) graduated from “Electronic equipment” department of the Moscow Power Engineering Institute (Technical University) in 1970, postgraduate study of the “Electrical physics” specialization in 1985. Ph.D., now is major specialist of the Scientific Research Institute “Goznak”. Has about 50 publications mainly in the field of magneto-optics.



Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор около 140 научных работ в области оптоэлектронной обработки информации и голографии.

S.B.Odionokov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1973, assistant professor of the “Laser and Optoelectronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Member of the Rozhdestvensky Optical Society. Author of about 140 publications in the field of holography and optoelectronic information processing.



Алексей Станиславович Кузнецов родился в 1979 г., окончил в 2003 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана, аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э.Баумана, имеет 3 научных работы в области магнитооптики.

A.S. Kuznetsov (b. 1979) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003, now – postgraduate of the “Laser and Optoelectronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Has 3 publications in the field of magneto-optics.