# МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

### УДК 535.42

## Исследование метода регистрации магнитных полей рассеяния в магнитооптических приборах

Карев А. В., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: Кузнецов А.С., ассистент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>odinokov@bmstu.ru</u>

#### Введение

Любой ценный документ обеспечен определенным комплексом средств, обычно называемых защитой. Защита документа – это совокупность особенностей, реализуемых при использовании визуальных характеристик и специальных технологий и позволяющих однозначно установить подлинность документа.

Когда идет речь о магнитной защите [1, 2], подразумевается наличие магнитных свойств материалов документа. Чаще всего это красящие вещества, но иногда в качестве защиты используются магнитные свойства защитных нитей. Магнитная защита, связанная с красящими веществами, может быть двух типов. Первый тип предполагает наличие магнитных свойств у какого-либо отдельного реквизита документа – обычно это серийный номер. Защитой такого типа обладает большинство находящихся в обращении банкнот, некоторые из ценных бумаг и другие разновидности документов. Магнитная защита второго типа предполагает локальное распределение магнитных свойств в пределах изображения.

#### 1 Методы регистрации магнитных полей рассеяния.

Для оценки подлинности носителей магнитной информации существуют следующие основные методы исследований:

- метод порошковых фигур (метод Биттера);
- метод магнитной силовой микроскопии (МСМ);
- магнитооптические методы и др.

#### 1.1 Метод Биттера

Чтобы понять суть метода, достаточно вспомнить известный школьный эксперимент, в котором на лист бумаги насыпают железных опилок, а внизу располагают магнит. В результате можно «увидеть» магнитное поле магнита, поскольку опилки выстраиваются вдоль его силовых линий. Биттер применил вместо опилок коллоидную суспензию магнитных частиц, каждая из которых по форме напоминает микроскопическую иглу размерами всего несколько микрон.

Разрешение метода определяется, в основном, размерами магнитных частиц и составом раствора, и в меньшей мере разрешающей способностью используемого микроскопа. Метод Биттера в то же время имеет существенный недостаток – удалить магнитную суспензию с намагниченной поверхности абсолютно невозможно, т.е. метод Биттера является разрушающим.

#### 1.2 Магнитная силовая микроскопия

Работу магнитного силового микроскопа можно легко объяснить, проведя аналогию с патефоном. Как и в патефоне, в таком микроскопе тонкая игла движется по некой «дорожке», цепляясь за «неровности» магнитного рельефа образца. Но, в отличие от патефона, отклонения иглы скрывают в себе не музыку, а картину поля рассеяния.

Типичные магнитносиловые микроскопы имеют разрешение 30 нм, некоторые модели позволяют достичь значения 10 нм. Но такое высокое разрешение имеет и негативную сторону – довольно сложно позиционировать участок измерения на образце, а размеры получаемых изображений составляют всего от единиц до десятков микрон.

Недостатком является высокая стоимость измерительных устройств, которая может доходить до полумиллиона долларов.

#### 1.3 Магнитооптические методы

Магнитооптические методы визуализации основаны на явлении поворота плоскости поляризации отраженного от намагниченного материала (эффект Керра) или проходящего через магнитооптическую среду (эффект Фарадея) света. Среди них наиболее перспективными для исследования магнитных носителей являются методы визуализации магнитных полей носителей при использовании пленок феррит-гранатов.

Основным элементом устройства визуализации на феррит-гранатовых пленках является магнитооптический кристалл [3], осуществляющий преобразование магнитных

полей рассеяния носителя в световое распределение, соответствующее их величине и положению в пространстве. Его структура приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура магнитооптического кристалла

Эффект Керра обладает низкой чувствительностью, поэтому остановимся на рассмотрении магнитооптического метода регистрации полей рассеяния, основанного на эффекте Фарадея.

Эффект Фарадея заключается в том, что при прохождении плоскополяризованного света через вещество, магнитное поле в котором не равно нулю, возникает вращение плоскости поляризации. Направление вращения плоскости поляризации зависит от направления намагниченности в домене. Если при исследовании структуры с антипараллельными доменами поляризатор и анализатор скрещены для доменов одного из направлений намагниченности, т.е. свет от этих доменов не проходит, то для доменов противоположного направления намагниченности вследствие различного направления вращения плоскости поляризации свет через анализатор пройдет. Таким образом, доменная структура будет видна в виде темных и светлых полос доменов противоположной намагниченности.

Рассмотрим принцип работы магнитооптического прибора [4], представленного на рис. 2. Излучение от светодиода 1 проходит через конденсорную линзу 2, матовую пластину 3, поляризатор 4 и становится линейно поляризованным. Далее оно направляется на носитель с магнитной информацией 6. Важным элементом при визуализации информации является магнитооптический кристалл 5, который вращает плоскость поляризации выходного излучения на основе магнитооптического эффекта Фарадея. Магнитные поля рассеяния, создаваемые носителем магнитной информации 6, перестраивают доменную структуру пленки феррит-граната с одноосной магнитной анизотропией. Поэтому поляризованный свет, проходя через магнитооптический кристалл, вследствие эффекта Фарадея поворачивает свою плоскость поляризации в зависимости от того, через какой домен кристалла проходит свет на угол Фарадея [2]

$$F = \theta_F h \cos(\gamma),$$

где  $\theta_{F}$  – удельное фарадеевское вращение, град/мкм,

h – толщина пленки, мкм,

ү – угол падения излучения, град.

Отраженный от зеркального защитного слоя магнитооптического кристалла (МОК) свет снова проходит через МОК, и плоскость его поляризации опять поворачивается на тот же угол и в ту же сторону, что и при первом прохождении. Таким образом, двойное прохождение света через МОК удваивает угол поворота плоскости поляризации света, увеличивая тем самым чувствительность к магнитному полю. Отраженный свет проходит через анализатор 7, преобразующий модуляцию света по плоскости поляризации в модуляцию света по интенсивности. Полученное изображение ФПЗС-матрицей 9 передается для обработки в компьютер.



 1 – светодиод; 2 – конденсор; 3 – матовая пластина; 4 – поляризатор;
5 – магнитооптический кристалл; 6 – носитель магнитной информации;
7 – анализатор; 8 – объектив; 9 – плоскость расположения ФПЗС-матрицы Рис. 2. Схема магнитооптического прибора

#### 2 Оценка параметров качества магнитооптических приборов

Для осуществления оценки параметров качества опишем математическую модель магнитооптического прибора. Это возможно сделать аппаратом поляризационной оптики (метод Мюллера), составив матрицы для каждого элемента схемы прибора [5, 6].

Пучок света описывается вектором Стокса, определяемым четырьмя параметрами *I, M, C, S*, которые связаны с интенсивностью. Этот вектор записывается обычно в виде вертикального столбца или в виде горизонтальной строки

$$\begin{bmatrix} I\\ M\\ C\\ S \end{bmatrix}$$
или  $\begin{bmatrix} I, M, C, S \end{bmatrix}$ 

Параметр I называется интенсивностью, параметры M, C и S называются соответственно параметром преимущественной горизонтальной поляризации, параметром преимущественной поляризации под углом плюс 45 град. И параметром правоциркулярной поляризации. Когда преимущественной параметр имеет отрицательную величину, это значит, что преимущественной является ортогональная форма поляризации.

Поляроид представляет собой однородный нерассеивающий недеполяризующий недвупреломляющий поляризатор с главными значениями пропускания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  с горизонтальной осью пропускания, поэтому его матрица имеет вид:

Если свет проходит три оптических устройства, необходимо использовать три матрицы и произвести три умножения. Если эти три матрицы обозначить через  $[M_1]$ ,  $[M_2]$  и  $[M_3]$ , а через  $[V_i]$  – вектор Стокса падающего света, то процедуру определения вектора Стокса  $[V_e]$  выходящего света схематически можно записать следующим образом:

$$[M_3]M_2[M_1]V_i] = [V_e]$$

Пленку феррит-граната можно представить, как фазовую пластину, описываемую матрицей Мюллера, где *F* – угол Фарадея

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos F & -\sin F & 0 \\ 0 & \sin F & \cos F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Данная часть описывает лишь поляризационный узел. Для описания работы всего прибора воспользуемся следующими выражениями [1, 7, 8].

Интенсивность света I на выходе МО прибора определяется следующим образом

$$I^{\pm} = C(\gamma)I_O \exp(-\alpha h)[(1-\Delta)\sin^2(\Phi_{\Pi a} \pm \theta_F h \cdot \cos(\gamma)) + \Delta],$$

где *С* – коэффициент, учитывающий оптические потери в поляризаторе и анализаторе, а также потери на отражение,

 $I_0$  – интенсивность падающего на поляризатор излучения,

α – коэффициент оптического поглощения МО среды,

*h* – толщина пленки,

 $\Delta$  – коэффициент, учитывающий неполноту погасания в системе поляризатор – МО среда – анализатор,

Фпа – угловое отклонение от положения погасания в системе поляризатор – анализатор,

 $\theta_{\mathbf{F}}$  – удельное фарадеевское вращение,

γ – угол падения излучения.

Контраст изображения К определяется следующим выражением

$$K = \frac{I^{+} - I^{-}}{I^{+} + I^{-}} = \frac{\sin^{2}(\Phi_{\Pi a} + \theta_{F}h \cdot \cos(\gamma)) - \sin^{2}(\Phi_{\Pi a} - \theta_{F}h \cdot \cos(\gamma))}{2\sin^{2}(\Phi_{\Pi a}) + 2\Delta}$$

Оптическая эффективность  $\eta$  определяется выражением

$$\eta = \frac{\Delta I}{I_0} = (1 - \Delta) [\sin^2(\Phi_{na} + \theta_F h \cdot \cos(\gamma)) - \sin^2(\Phi_{na} - \theta_F h \cdot \cos(\gamma))] C(\gamma \gamma \exp(-\alpha h))$$

Приведенные графики зависимости  $K(\Phi_{na})$  на рис. 3 (при толщине пленки *h* равной 4 мкм), и K(h) на рис. 4 (при  $\Phi_{na}$  равным 5 град.) показывают, что контраст получаемого изображения определяется отклонением от положения погасания и достигает максимального значения при значении  $\Phi_{na} = \theta_F h \cdot \cos(\gamma)$ . Максимальная чувствительность к управляющему полю достигается при  $\Phi_{na}$  равной 45 град., при этом оптическая эффективность определяется выражением



Рис. 3. Угловая зависимость контраста изображения К при отклонении

поляризаторов от положения скрещивания при различных значениях  $\theta_F$ 



Рис. 4. Зависимость контраста изображения от толщины пленки феррит-граната

Для получения максимальной чувствительности толщина пленки определяется следующей зависимостью

$$h_{\text{OITT}} = \frac{1}{2\theta_F} \arctan(2\theta_F / \alpha)$$

Оптический коэффициент полезного действия тем выше, чем меньше оптическое поглощение и сильнее эффект Фарадея, другими словами, чем выше магнитооптическая добротность  $\psi$ 

$$\psi = 2\theta_F / \alpha$$

#### Заключение

Сравнивая методы регистрации магнитных полей рассеяния, можно определить, что наиболее подходящим методом является магнитооптический метод. Метод Биттера, или метод порошковых фигур, является разрушающим, имеет невысокое разрешение, по сравнению с магнитооптическим методом. Метод магнитной силовой микроскопии трудно реализуем, дорогостоящий, требует наличия габаритных подсистем. Приборы, основанные на магнитооптических эффектах Фарадея и Керра, имеют малые габариты, низкую стоимость, являются неразрушающими и потому широко могут использоваться для снятия магнитной информации и последующего контроля на подлинность ценных бумаг.

Основными параметрами качества магнитооптического прибора являются контраст, оптическая эффективность и разрешающая способность. Наибольшее влияние на значение контраста и оптической эффективности оказывают угловое отклонение от положения погасания в системе поляризатор – анализатор и толщина пленки. В данной работе представлены выражения для оптимальных значений отклонения и толщины, обеспечивающие максимальный контраст.

Пространственное разрешение магнитооптического метода визуализации на пленках феррит-гранатов лежит в пределах от долей до единиц микрон и достигает максимума при минимальном расстоянии между кристаллом и поверхностью носителя, что объясняется быстрым затуханием поля рассеяния при увеличении этого расстояния.

#### Список литературы

- 1. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- Кузнецов А.С., Одиноков С.Б. Оценка разрешающей способности двуслойных магнитных структур // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 2. Режим доступа: <u>http://technomag.bmstu.ru/doc/339881.html</u> (дата обращения 15.03.2014).
- 3. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука, 1988. 192 с.
- 4. Ураксеев М.А., Авдонина Н.А. Математическая модель магнитооптического преобразователя для автоматизированных технологических процессов // Вестник УГАТУ, 2009. Т. 13. № 2 (35). С. 69-73.

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-0609

- Шерклифф У. Поляризованный свет. Получение и использование: пер. с англ. / под ред. Н.Д. Жевандрова. М: Мир, 1965. 264 с. [William A. Shurkliff. Polarized Licht. Production and Use. Cambridge: Harvard University Press, 1962.]
- Богатырева В.В, Дмитриев А.Л. Оптические методы обработки информации: учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО, 2009. 74 с.
- Иванов В.Е. Смешанный магнитооптический контраст, вызванный неоднородным магнитным полем в пленках с плоскостной анизотропией // Письма в журнал технической физики. 2009. Т 35. Вып. 9. С. 100-110.
- Odinokov S.B., Gubarev A.P., Kuznetsov A.S. Optoelectronic Device for Reading of Hidden Magnetic Information from the Holograms // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. Vol. 17, no 1. P. 15-22. DOI: 10.3103/S1060992X08010037.