

05

Распределение яркости в магнитооптических изображениях особых точек неоднородного магнитного поля

© В.Е. Иванов

Уральский федеральный университет,
620083 Екатеринбург, Россия
e-mail: vladimir.ivanov@urfu.ru

(Поступило в Редакцию 26 марта 2015 г.)

Показано, что особые точки проекции неоднородного магнитного поля, имеющие различные топологические индексы, на плоскость магнитооптической индикаторной пленки, отображаются особыми точками магнитооптического изображения изменением ориентации угловых зависимостей яркости изображения на окружностях заданного радиуса с центрами в особых точках при поворотах магнитной системы, создающей неоднородное поле.

Топологические методы исследования векторных полей дают инструменты качественного понимания структуры реальных и в частном случае магнитных векторных полей сложной конфигурации [1]. В этом анализе ключевым звеном является количество, расположение и свойства особых точек магнитного поля. Конфигурация магнитного поля вблизи особых точек имеет существенное значение для практических применений в устройствах удержания элементарных частиц для исследования их спектров [2]. Изучение магнитооптических изображений неоднородных магнитных полей в магнитных металлических пленках с плоскостной анизотропией поставило новую проблему исследования топологии микромагнитной структуры и соответствующих магнитооптических изображений, возникающих под действием этих полей [3].

В настоящей работе представлены результаты изучения распределения яркости в окрестности особых точек магнитооптических (МО) изображений, создаваемых проекциями неоднородного магнитного поля (\mathbf{H}_p) на плоскость индикаторных пленок.

МО-изображения сильнонеоднородных магнитных полей в магнитных металлических пленках (FeCo) наблюдались при помощи меридионального эффекта Керра с использованием s - и p -поляризованного света. Разделение МО-изображений плоскостной (\mathbf{H}_p) и нормальной компонент неоднородного поля с последующей оцифровкой углового распределения яркости вблизи особых точек на окружностях заданного радиуса с центром в особых точках проводилось в прикладном пакете MathCAD. Сильнонеоднородное магнитное поле создавалось парой прямоугольных постоянных магнитов (рис. 1, $a = 3.3$, $b = 3.8$, $c = 5.45$, $d = 3$ mm). Магнитные моменты постоянных магнитов ориентировались параллельно плоскости наблюдения (плоскости индикаторной пленки). Яркость в окрестности особых точек изучалась при различных ориентациях оси симметрии магнитной системы относительно плоскости падения света в конфигурациях $\mathbf{M}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{M}_2 \parallel \mathbf{N}$ и $\mathbf{M}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{M}_2 \perp \mathbf{N}$. Здесь \mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_2 — магнитные моменты магнитов, \mathbf{N} — нормаль к плоскости падения света (PI, рис. 1).

В теории компьютерного зрения используют следующее определение особой точки изображения. Особая

точка m — это точка изображения, окрестность которой $O(m)$ можно отличить от окрестности любой другой точки изображения $O(n)$ в некоторой другой окрестности особой точки $O2(m)$. В нашей ситуации это не всегда удавалось сделать, поэтому с целью идентификации МО-изображений особых точек магнитного поля полученные экспериментально МО-изображения сопоставлялись с рассчитанными векторными полями и соответствующими модельными МО-изображениями. Компьютерное моделирование МО-изображений для обеих ориентаций магнитной системы проводилось в предположении, что намагниченность \mathbf{J}_s в индикаторной пленке параллельна \mathbf{H}_p , что реализуется в случае низкоанизотропных пленок.

На рис. 1. представлены МО-изображения плоскостной компоненты поля при двух взаимно перпендикулярных ориентациях оси симметрии магнитной системы относительно плоскости падения света. Сравнение картины векторного поля направлений \mathbf{H}_p

$$\mathbf{h}_p = \frac{H_x}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}} \mathbf{i} + \frac{H_y}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}} \mathbf{j}$$

с его МО-изображениями (рис. 1, a, b) однозначно определяет положение особых точек плоскостного магнитного векторного поля источников (So1, So2) [3], стоков (Si1, Si2) и седлообразных (Sa1, Sa2 — точек, создаваемых встречными потоками поля). Топологические индексы (γ) этих точек определяются вращением векторного поля на замкнутых ориентированных кривых, охватывающих эти точки [4], и, соответственно $\gamma(\text{So1}, \text{So2}, \text{Si1}, \text{Si2}) = 1$, $\gamma(\text{Sa1}, \text{Sa2},) = -1$.

Особые точки типа So и Si контрастно выделяются в случае, когда $\mathbf{M}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{M}_2 \parallel \mathbf{N}$. Это объясняется тем, что в обоих случаях в окрестности этих особых точек реализуется картина из четырех секторов в последовательности „белый“–„серый“–„черный“–„серый“. При этом „серые“ секторы занимают значительную долю в рассматриваемом круге, что в комбинации с контрастными „черным“ и „белым“ секторами точно определяет

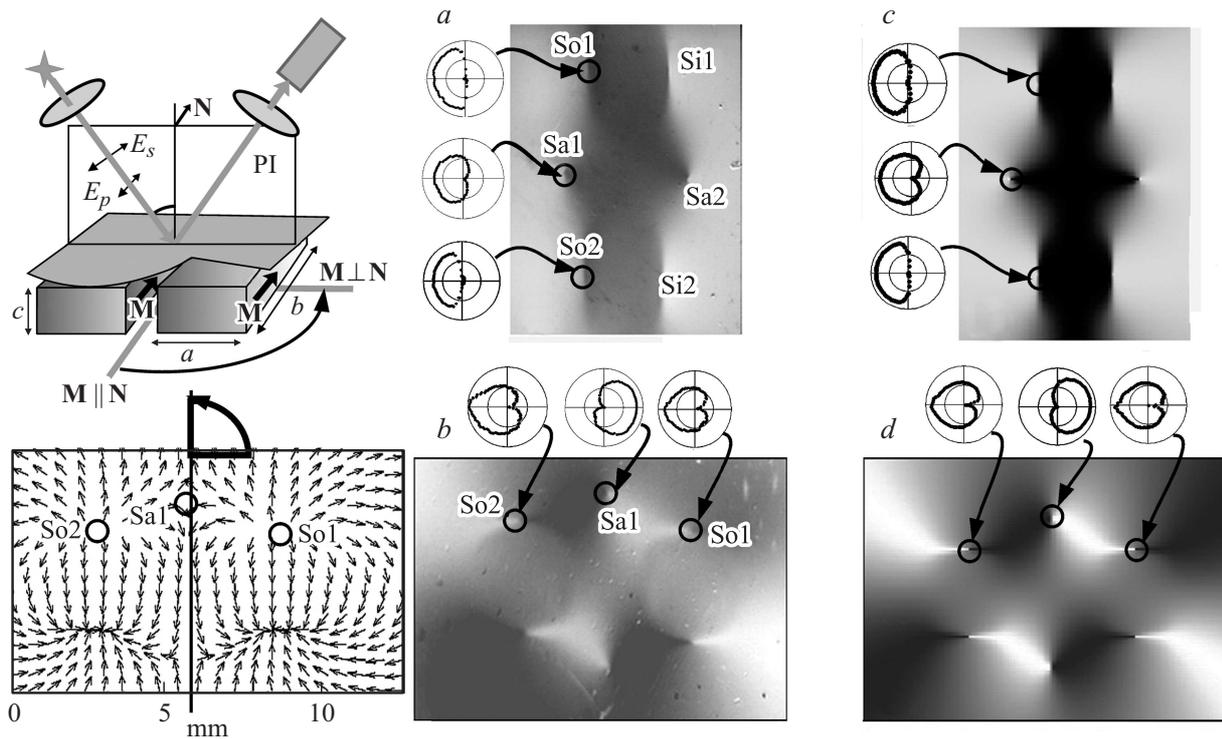


Рис. 1. Схема регистрации МО-изображений неоднородного магнитного поля при двух ориентациях магнитной системы и соответствующие магнитооптические изображения и графики угловых распределений яркости в окрестности особых точек. *a* — МО-изображение поля системы $\mathbf{M}_1 \uparrow\uparrow \mathbf{M}_2 \parallel \mathbf{N}$; *b* — $\mathbf{M}_1 \uparrow\uparrow \mathbf{M}_2 \perp \mathbf{N}$ и соответствующие расчетному векторному полю модельные изображения (*c, d*).

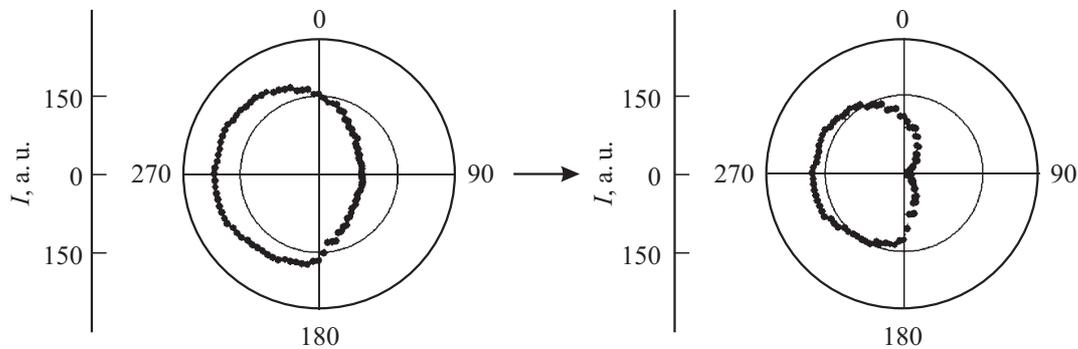


Рис. 2. Результат приведения экспериментальной зависимости $I(\varphi)$ к началу координат.

геометрическое положение для случая $\mathbf{M}_1 \uparrow\uparrow \mathbf{M}_2 \parallel \mathbf{N}$. Для ориентации $\mathbf{M}_1 \uparrow\uparrow \mathbf{M}_2 \perp \mathbf{N}$ „серые“ секторы, соответствующие „пассивной“ компоненте $\mathbf{H}_p(x, y)$, практически не различимы между контрастными „белым“ и „черным“ секторами.

Компьютерное моделирование показало, что наблюдаемые особенности яркости в окрестностях особых точек значительно изменяются в зависимости от конфигурации магнитной системы, вследствие чего указанные особенности не могут быть отличительными признаками топологических свойств. Однако следует отметить, что существует свойство различным образом изменять структуру МО-изображения в окрестности особых точек при поворотах системы источников поля

вокруг нормали к индикаторной пленке. Эти свойства связаны с топологическими инвариантами особых точек типа Si, So и Sa вращением векторного поля и также являются инвариантами для каждой точки, до тех пор пока не изменится ее топологическая структура. Эти свойства заключаются в следующем. Топологическая структура точек So и Si такова, что знак векторного поля \mathbf{H}_p вблизи оси X не меняется при вращениях магнитной системы, в результате чего последовательность чередования сохраняется (ср. рис. 1, *b* и *a*).

Для особых точек типа Sa поворот магнитной системы приводит к тому, что знак проекции поля \mathbf{H}_p , формирующего МО-контраст вблизи оси X, меняется

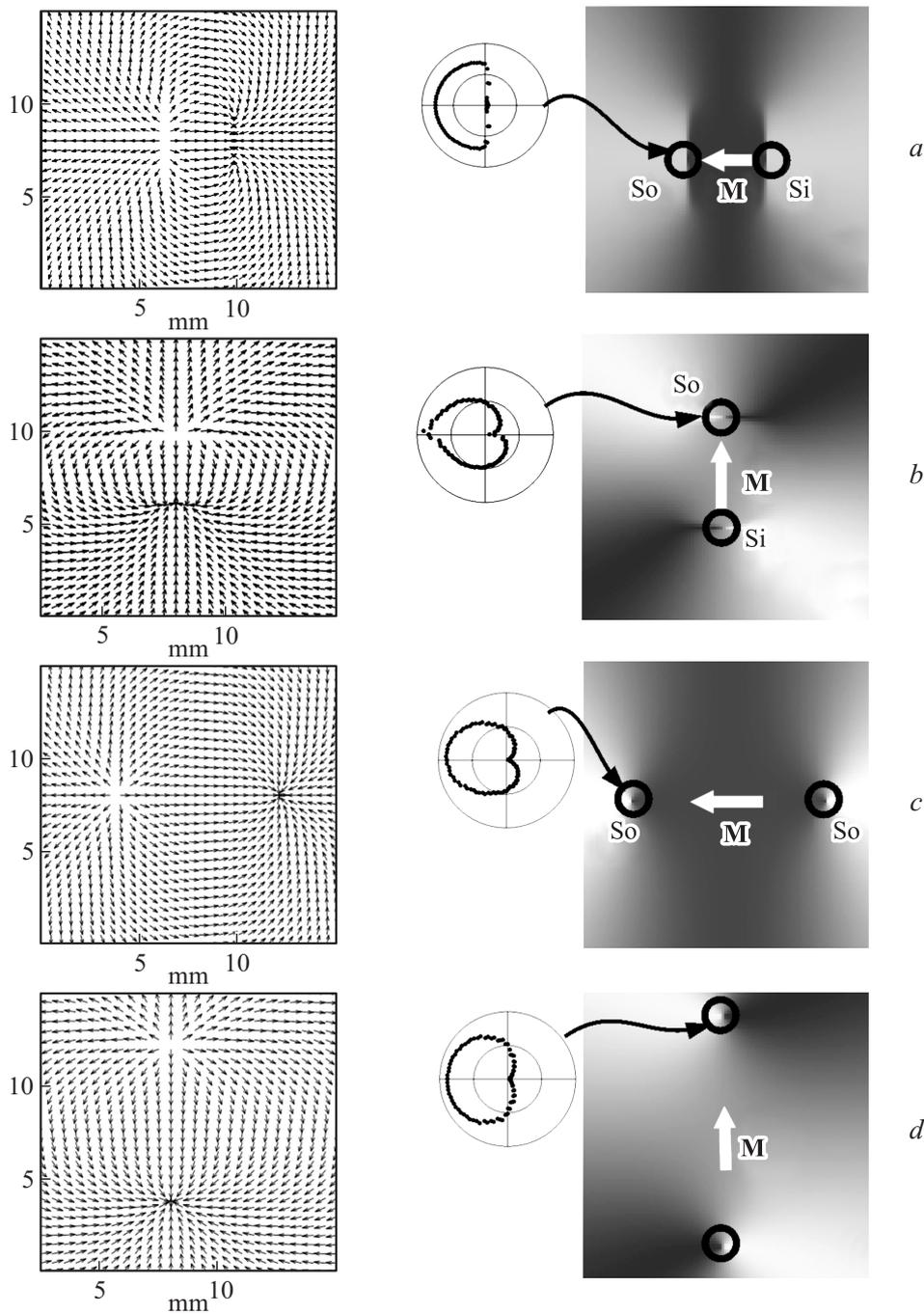


Рис. 3. Векторные поля \mathbf{H}_p в плоскости, совпадающей с плоскостью одиночного магнита для двух ориентаций магнита и соответствующие модельные МО-изображения (*a, b*) и полярные диаграммы яркости для особых точек типа So. Ниже: векторные поля \mathbf{H}_p в плоскости наблюдения, удаленной от плоскости магнита на 1.5 mm и соответствующие МО-изображения (*c, d*) и полярные диаграммы для особых точек типа So.

на противоположный, в результате чего „черный“ и „белый“ сектора меняются местами (ср. рис. 1, *b* и *a*).

Количественной характеристикой структуры изображений вблизи особой точки может служить угловая зависимость интенсивности (яркости) изображения на окружности заданного радиуса с центром в этой точке (рис. 1, *b*). Полученные экспериментально зависимости $I(\varphi)$ приводились к началу координат путем замены

$I(\varphi) \rightarrow I(\varphi) - I_{\min}$ (рис. 2). Такое преобразование приводит кривые $I(\varphi)$ к форме в виде лепестков, форма которых характеризует особенности распределения яркости в окрестности особой точки. В условиях данного эксперимента зависимости $I(\varphi)$ имеют выделенные направления (от точки $I_{\min} = 0$ к точке I_{\max}), которые ориентированы вдоль плоскости падения. Качественные рассуждения об изменении яркости в окрестности осо-

бых точек различной топологии при повороте магнитной системы количественно характеризуются ориентацией „лепестков“. В исходном состоянии кривые $I(\varphi)$, принадлежащие точкам типа S_0 и S_a , согласно графику векторного поля, ориентированы в разные стороны (рис. 1, *b*). После поворота магнитной системы лепестки точек S_0 не изменили своей ориентации, лепесток точки типа S_a изменил ориентацию на π (рис. 1, *a*). Такое свойство полярных диаграмм $I(\varphi)$ характеризует седлообразные точки с $\gamma = -1$.

Особенности формы зависимостей $I(\varphi)$ вблизи для точек S_0 и S_i , а именно более быстрое изменение $I(\varphi)$ вблизи оси Y (рис. 1, *a*) и острые пики на лепестках вблизи максимумов (рис. 1, *b*) обусловлены особенностями распределения векторного поля $\mathbf{H}_p(x, y)$ вблизи магнитов. При удалении от магнитной системы величина неоднородного поля быстро уменьшается. Используемые в эксперименте пленки обладают значительной анизотропией, которая препятствует адекватному отражению распределения поля малой напряженности. Поэтому дальнейшее обсуждение проводится в рамках модельного эксперимента в предположении отсутствия анизотропии в плоскости индикаторной пленки (идеальный магнитомягкий материал). На рис. 3 приведены результаты численного эксперимента, демонстрирующие изменение поля $\mathbf{H}_p(x, y)$ и соответствующие ему МО-изображения и диаграммы яркости при удалении плоскости наблюдения от магнитной системы. График $I(\varphi)$ для точек S_0 , соответствующего векторному полю на поверхности магнита (рис. 3, *a, b*), близок по форме к соответствующим графикам магнитов магнитной системы в эксперименте (рис. 1, *a, b*), что объясняется незначительным возмущающим влиянием второго магнита. Удаление плоскости наблюдения (индикаторной пленки) от магнита на расстояние $h \geq 1.5 \text{ mm}$ приводит к значительному изменению характера поля. На таких расстояниях его конфигурация незначительно отличается от поля одиночного диполя с магнитным моментом $\mu = \mathbf{J}_s V$ (V — объем магнита). Распределение такого векторного поля вблизи особых точек одиночного магнита становится более симметричным, что визуально проявляется в практической неразличимости распределения яркости в их окрестности (рис. 3, *c, d*) при различной ориентации магнитов. Количественно это подтверждается близкой формой лепестков соответствующих зависимостей $I(\varphi)$.

Таким образом, в настоящей работе показано, что магнитооптические изображения магнитными металлическими пленками особых точек плоскостного поля отображают их определенным чередованием секторов различной яркости. Это свойство не меняется (инвариантно) относительно вращения магнитной системы вокруг нормали к пленке для особых точек типа исток, сток, т.е. для областей, имеющих топологический индекс $\gamma = 1$. Для точек, имеющих топологический индекс $\gamma = -1$ (седлообразные) при таких поворотах, контраст меняется на дополнительный. С целью количественного описания углового распределения яркости в окрестности

особых точек применены угловые диаграммы яркости. Диаграммы яркости отражают топологические свойства точек при повороте магнитной системы изменением своей ориентации. Особенности диаграмм яркости зависят от расстояния от системы до индикаторной пленки и детального распределения магнитных моментов в системе.

Список литературы

- [1] Молоденский М.М., Сыроватский С.И. // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 1293–1304.
- [2] Wainsstein J.D., Libbrecht K.G. // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52. P. 4004–4009.
- [3] Ivanov V.E. // J. Magn. and Magn. Mater. 2012. Vol. 324. P. 2572–2578.
- [4] Milnor D., Uolles A. Differential topology. NY, 1968.