

УДК 539.2

## МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И РАБОЧЕГО ПОЛЯ МИНИАТЮРНЫХ МНОГОПОЛЮСНЫХ РОТОРОВ

С.С. Сошин, С.Е. Ильяшенко, С.А. Чигиринский, А.Б. Залётов  
Кафедра прикладной физики

С целью контроля процесса намагничивания многополюсных роторов миниатюрных микродвигателей нового поколения изучено пространственное распределение их рабочего поля и намагниченности поверхностного слоя методами эффекта Керра и магнитооптических индикаторных плёнок ферритов-гранатов. Продемонстрирована высокая разрешающая способность и информативность указанных методов для изучения характеристик материалов и устройств микромагнитоэлектроники.

**Введение.** В работах Г.С. Кринчика с соавторами [1; 2] были развиты методы магнитооптической микромагнитометрии, позволяющей проводить измерение локальных характеристик магнитных материалов в объёмах порядка  $10^{-13}$  см<sup>3</sup>. Ими же предложен метод исследования микрораспределений магнитного поля с помощью ферромагнитного образца (плёнки) с известной зависимостью  $M(H)$ , используемого в качестве магнитооптического датчика магнитного поля [3]. За прошедшее время значение этих методов неуклонно возрастало, а их развитию уделялось большое внимание, т.к. они оказались незаменимыми при решении ряда задач контроля свойств миниатюрных элементов и устройств магнитоэлектроники.

В настоящей работе приводятся результаты магнитооптического исследования распределений намагниченности и рабочего поля роторов для миниатюрных трёхфазных двигателей и микротурбин [4]. Предварительно проделанные с помощью дискретных датчиков Холла измерения оказались неэффективными из-за малой разрешающей способности, длительности процесса сканирования и невозможности получения информации о магнитной структуре поверхности роторов.

**Методика эксперимента.** Исследовались 30-полюсные сплошные роторы с внешним диаметром 8 мм и толщиной 450 мкм (рис. 1). Роторы вырезались с помощью программируемого электроискрового станка из массивных постоянных магнитов из сплава Resoma 25. Для намагничивания роторов была изготовлена импульсная намагничивающая система с пятнадцатью наконечниками из сплава FeCo (пермендюр), имеющем индукцию насыщения около 2,4 Т. Аксиальное знакопеременное намагничивание проводилось в два этапа: сначала намагничивались в одну сторону все нечётные полюса, затем ротор поворачивался в намагничивающей системе вокруг своей оси на  $12^\circ$  и импульсом тока противоположного направления намагничивались все чётные полюса. Такая технология намагничивания была принята потому, что из-за малости размеров при конструировании устройства одновременного намагничивания всех полюсов встретились большие трудности.

Магнитная структура поверхности роторов изучалась с помощью полярного эффекта Керра. Для изучения распределения рабочего поля на разных расстояниях от поверхности применялись одноосные и планарные феррит-гранатовые индикаторные плёнки [5; 6].

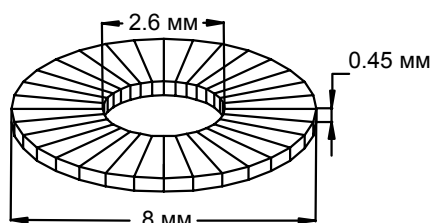


Рис. 1. Эскиз ротора плоского 30-полюсного микродвигателя. Вектора намагниченности соседних полюсов антипараллельны и направлены вдоль оси ротора

**Полученные результаты.** На рис. 2 представлена магнитооптическая визуализация поля ротора с помощью одноосной индикаторной плёнки, дающей общую качественную картину распределения поля в рабочем пространстве.



Рис. 2. Визуализация рабочего поля ротора (внешний диаметр 8 мм) с помощью одноосной индикаторной плёнки на расстоянии 50 мкм от поверхности

Особенностью визуализации с помощью одноосных плёнок является зависимость формы образующихся в них доменных границ (ДГ) от значений градиента измеряемого поля  $\beta = dB/dz$  ( $z$  - координата нормали к плоскости

образца) [6; 7]. При  $\beta$  меньших некоторого критического значения  $\beta_c$  возникает синусоидальная неустойчивость ДГ, амплитуда и период которой зависят от  $\beta$ . Образование такой неустойчивости у внутреннего круга ротора, представленного на рис. 2, свидетельствует об уменьшении градиента поля в этой области. Градиент уменьшается также на участках с малыми радиусами кривизны, как показано на рис. 3, представляющем собой увеличенный фрагмент рис. 2.



Рис. 3. Увеличенный фрагмент рис. 2, иллюстрирующий развитие синусоидальной неустойчивости при уменьшении градиента поля

На рис. 4 представлены доменные конфигурации одноосной индикаторной плёнки для разных расстояний до поверхности ротора. На больших расстояниях (0.3 мм) градиент рабочего поля относительно невелик; периодичность в расположении участков с противоположной ориентацией нормальной компоненты поля проявляется достаточно чётко, хотя в местах смены знака поля видны остатки собственной лабиринтной структуры плёнки. На расстоянии 0.1 мм полюсы чётко очерчены и соответствуют заданной симметрии магнитного потока. Однако на минимальном расстоянии 0.01 мм становятся заметными нерегулярности, обусловленные неоднородной намагниченностью материала ротора.

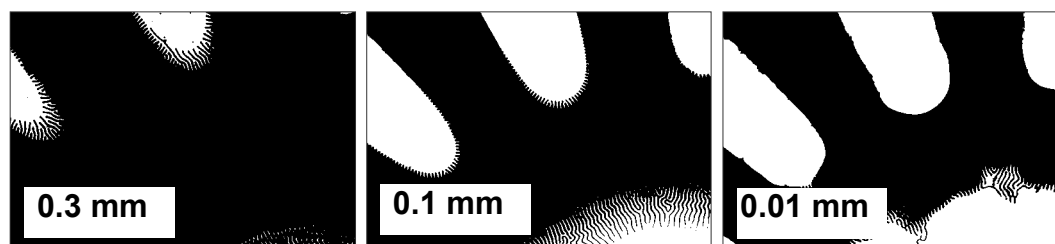


Рис. 4. Визуализация рабочего поля ротора с помощью одноосной индикаторной плёнки на расстояниях 0.3, 0.1 и 0.01 мм от поверхности

Дальнейшие прямые наблюдения поверхности ротора с помощью полярного эффекта Керра без использования индикаторных плёнок подтвердили вывод о неоднородности намагниченности ротора. На рис. 5

представлены наблюдения распределения нормальной компоненты вектора  $\mathbf{M}$  на поверхности фрагмента ротора с пятью полюсами. Для повышения контраста изображения и уменьшения мешающего действия шлифовочных царапин наблюдения проводились в дифференциальном режиме [8].

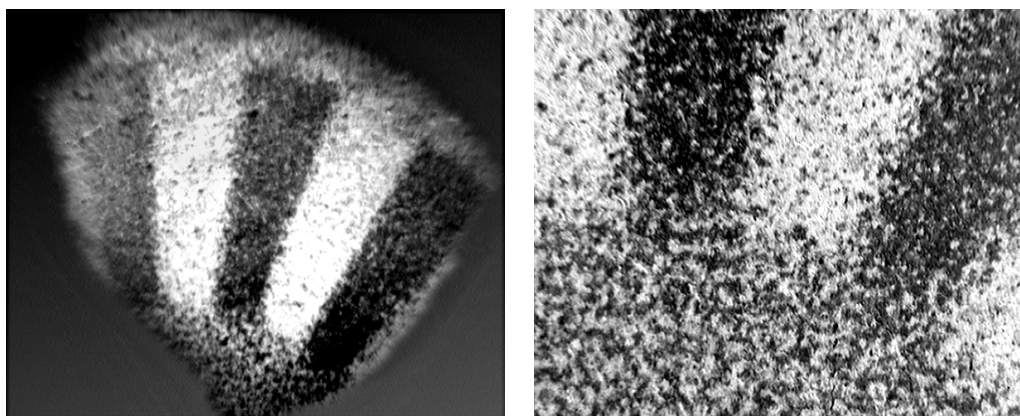


Рис. 5. Распределения нормальной компоненты вектора намагниченности на рабочей поверхности ротора с помощью полярного эффекта Керра при малом и среднем увеличении

Из рис. 5 видно, что симметрия распределения намагниченности в целом отвечает заданной периодической 30-полюсной структуре ротора. Вместе с тем видна зернистость изображения, которая может быть обусловлена как неполностью намагниченными зёрнами материала, так и порами и включениями. Для получения более полной информации о магнитной микроструктуре были проведены наблюдения при больших увеличениях с использованием иммерсионного объектива с числовой апертурой 1,25.

Наблюдения показали, что намагничивание поверхностного слоя не является полным - на общем тёмном фоне полюсов с условно положительным направлением намагничивания встречаются участки со светлыми магнитными доменами; для условно отрицательного полюса картина повторяется с тем отличием, что контраст изображений фона и доменов меняет знак.

Следует отметить, что эффект Керра даёт информацию о магнитном состоянии тонкого поверхностного слоя, поведение которого может отличаться от основного объёма материала из-за действия остаточных напряжений, обусловленных механической и электроискровой обработкой [9; 10]. Для массивных магнитов вклад подобного слоя в результирующее поле незначителен и им обычно пренебрегают, но для микромагнитов его доля существенно возрастает и должна учитываться. В частности, следует рекомендовать механическую или химико-механическую полировку, устраняющую поверхностный деформированный слой.

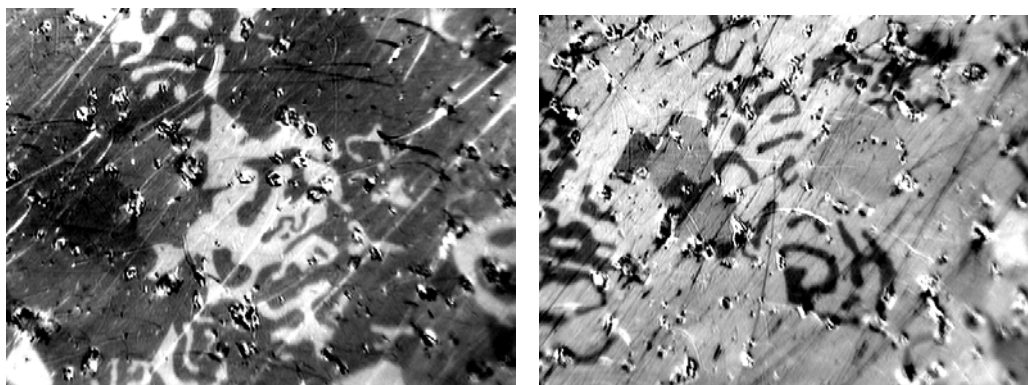


Рис. 6. Наблюдение распределения намагниченности в области положительного и отрицательного полюса при большом увеличении

Визуализация и количественная оценка распределения магнитного поля в рабочем объеме ротора с помощью феррит-гранатовых плёнок с планарной анизотропией в целом показала хорошее соответствие с расчётными данными (рис. 7). Вместе с тем экспериментальные данные дают заниженные (на 10-20 %) значения поля по сравнению с расчётами, в которых остаточная индукция использованного материала Resoma 25 бралась в соответствии с данными завода-изготовителя равной 1,3 Т. Судя по всем полученным данным, это занижение объясняется в первую очередь недостаточно полным намагничиванием ротора.

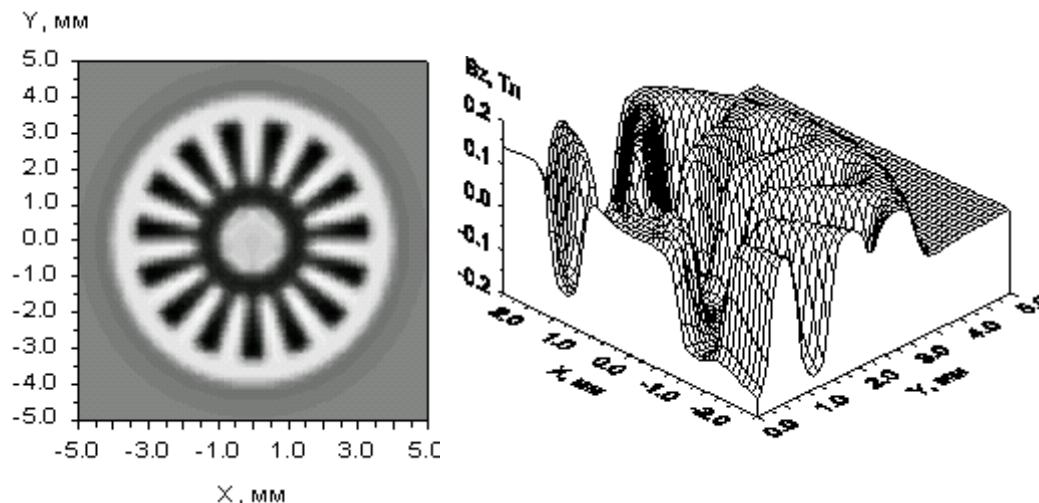


Рис. 7. Распределение нормальной компоненты в рабочем объеме открытой магнитной системы 30-полюсного ротора на расстоянии 0.3 мм от его поверхности

**Заключение.** В результате проведённого магнитооптического исследования выяснены особенности магнитного состояния опытных образцов миниатюрных многополюсных магнитов и создаваемого ими рабочего поля, что необходимо для оптимизации конструкции создаваемых на их основе микротурбин и генераторов нового поколения. Комбинация непосредственных магнитооптических наблюдений распределения намагниченности на поверхности многополюсных постоянных магнитов и контроля создаваемого ими внешнего поля с помощью индикаторных плёнок даёт важную информацию, получение которой другими способами невозможно или затруднено. Значение указанных методов будет повышаться в ходе дальнейшей миниатюризации магнитных электромеханических систем.

Работа выполнена при поддержке гранта Е02-3.4-351 Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области естественных и точных наук.

#### **Литература**

1. Кринчик Г.С. Новый магнитооптический метод изучения доменной структуры ферромагнетиков /В сб.: Магнитная структура ферромагнетиков. СО АН СССР. 1960. С. 51-52.
2. Кринчик Г.С. Магнитооптические явления в ферромагнетиках. /В сб.: Проблемы магнетизма. М.: Наука, 1972. С. 132-148.
3. Кринчик Г.С., Чёткин М.В., Дудко Д.И., Михалец П.М., Золотарёв В.П., Хребтов А.П., Петраш З.П. // ПТЭ. 1968. № 6. С. 182-184.
4. Cugat O., Delamare J., Reune G. Magnetic Micro-Actuator & Systems MAGMAS // IEEE Trans. Magn. 2003. V. 39. P. 3608-3612.
5. Grechishkin R.M., Goosev M.Yu., Ilyashenko S.E., Neustroev N.S. High resolution sensitive magneto optic ferrite-garnet films with planar anisotropy // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 157/158. P. 305-306.
6. Гусев М.Ю., Гречишкин Р.М., Козлов Ю.Ф., Неустроев Н.С. Магнитооптическая визуализация магнитного поля с помощью монокристаллических плёнок ферритов-гранатов // Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники. 2000. № 1. С. 27-37.
7. Кубраков Н.Ф. Метод магнитооптической визуализации и топографирования пространственно-неоднородных магнитных полей // Труды ИОФАН. 1992. Т. 35. С. 136-164.
8. Сошин С.С., Ильяшенко С.Е., Гусев М.Ю., Неустроев Н.С., Быков Д.А., Залётов А.Б., Чигиринский С.А.. Количественная оценка пространственных микрораспределений магнитного поля с помощью магнитооптических индикаторных плёнок // Вестник ТвГУ. 2004. № 4(6). С. 94-99.
9. Adler E., Hilzinger H.-R., Wagner R. The influence of surface conditions on magnetic properties of sintered Co<sub>5</sub>Sm magnets // J. Magn. Magn. Mater. 1978. V. 9. P. 188-190.
10. Neudecker M.K., Bookmann K., Hubert A. A representative hard surface layer prepared and investigated on a cobalt-samarium magnet // IEEE Trans. Magn. 1990. V. 26. P. 2664-2666.