

## Исследование электроиндуцированного зарождения магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом

А. С. Каминский\*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Статья поступила 31.01.2021; Подписана в печать 07.04.2021)

В работе проводится исследование зарождения с помощью точечного электрически заряженного зонда магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом в плёнках феррита граната с кристаллографической ориентацией (210). Было обнаружено, что изменение магнитооптического контраста при зарождении таких неоднородностей зависит от знака заряда на зонде и не зависит от направления внешних магнитных полей, что говорит о локальном электроиндуцированном изменении магнитной анизотропии образца. Методом оценки изменения нормальной к поверхности плёнки  $M_z$ -компоненты вектора намагниченности по изменению яркости изображения получена оценка относительного изменения константы ромбической анизотропии —  $5 \pm 2\%$  при напряжении на зонде 1.6 кВ.

PACS: 75.85.+t, 75.70.Ak

УДК: 538.9, 537.6

Ключевые слова: ферромагнетика, магнитоэлектрический эффект, магнитные неоднородности, магнитная анизотропия, ферриты граната.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные устройства хранения информации работают на магнитной основе, используя магнитный домен как бит двоичного кода, а направление намагниченности в нём — как его значение. Уменьшение размеров магнитных битов ведёт к увеличению энергозатрат на их переключение (запись) с помощью магнитного поля, поэтому в настоящее время активно исследуются способы управления магнитными неоднородностями нанометровых размеров (например, скирмионов) без привлечения внешнего магнитного поля.

В основном исследуются способы управления магнитными неоднородностями с помощью спинполяризованного тока [1, 2] и с помощью магнитоэлектрических эффектов [3–6].

При исследовании электроиндуцированного зарождения цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) в пленках ферритов гранатов был обнаружен новый вид магнитных неоднородностей — магнитные неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом [7]. Поведение таких неоднородностей при воздействии на них неоднородного электрического поля отличалось от поведения ранее наблюдавшихся ЦМД и доменных границ.

В настоящей работе исследуется электроиндуцированное зарождение магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом, проводится качественный феноменологический анализ магнитооптического контраста таких объектов, из которого можно получить вывод об их природе.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Визуализация доменной структуры осуществлялась с помощью магнитооптического эффекта в геометрии Фарадея: на образец через поляризатор падал белый свет диода, прошедший сквозь образец свет, проходя анализатор, попадал на камеру. Для снятия остаточного электрического заряда с поверхности образца, который остаётся после снятия напряжения с электрода, искажая наблюдаемые эффекты, использовался лазер с длиной волны  $\lambda = 450$  нм, который ионизирует воздух над поверхностью образца.

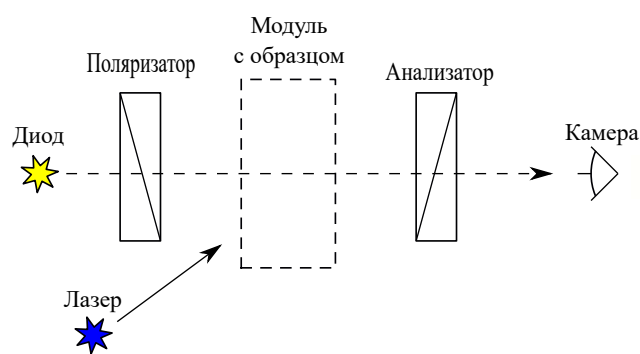


Рис. 1: Принципиальная схема экспериментальной установки: модуль с образцом помещается между поляризатором и анализатором для наблюдения доменной структуры камерой в проходящем свете диода (жёлтая звёздочка) с помощью магнитооптического эффекта в геометрии Фарадея, синяя звёздочка — вспомогательный источник коротковолнового излучения для снятия статических зарядов между измерениями

Образец помещался в систему из двух пар катушек индуктивности (рис. 2), создающих магнитное по-

\*E-mail: kaminskii.as14@physics.msu.ru

ле в плоскости образца и перпендикулярно плоскости образца. Поверхности плёнки касался точечный электрод, на который подавалось напряжение 1.6 кВ.

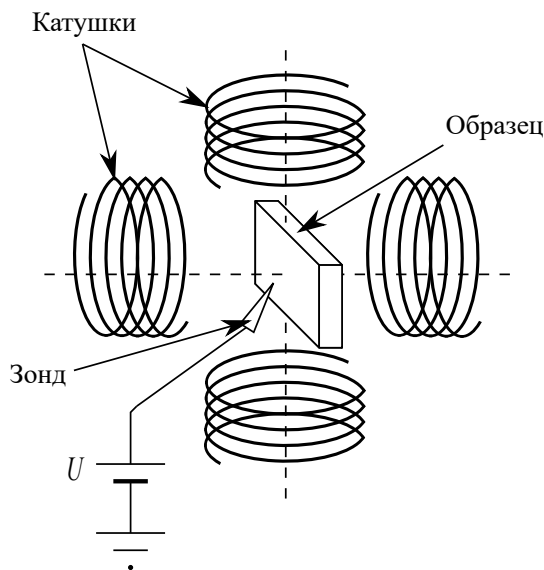


Рис. 2: Модуль с образцом: плёнка помещается в систему из двух пар катушек индуктивности, которые создают магнитные поля (в плоскости образца и перпендикулярно плоскости образца), поверхности образца касается точечный зонд, на который подаётся напряжение  $U = 1.6$  кВ

С помощью создаваемых катушками внешних магнитных полей образец переводился в однодоменное состояние для того, чтобы полосовая доменная структура не мешала наблюдению зарождения магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом.

Изменение магнитооптического контраста при изменении нормальной к магнитной плёнке компоненты намагниченности поясняет рис. 3.

Если образец находится в однодоменном состоянии с направлением намагниченности в сторону диода (рис. 3, а), то при прохождении света через образец плоскость его поляризации будет поворачиваться против часовой стрелки на тем больший угол, чем больше модуль  $z$ -компоненты вектора намагниченности  $\mathbf{M}$ . Тогда при повороте вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  в сторону от плоскости модуль  $z$ -компоненты этого вектора будет увеличиваться, а значит будет увеличиваться угол поворота плоскости поляризации света. Это ведёт к увеличению проекции вектора напряжённости  $\mathbf{E}$  световой волны на плоскость анализатора, следовательно к увеличению интенсивности проходящего через систему света. Наоборот, поворот вектора намагниченности к плоскости ведёт к уменьшению модуля  $z$ -компоненты вектора намагниченности и к уменьшению интенсивности проходящего через систему света.

Аналогичная ситуация происходит, когда образец

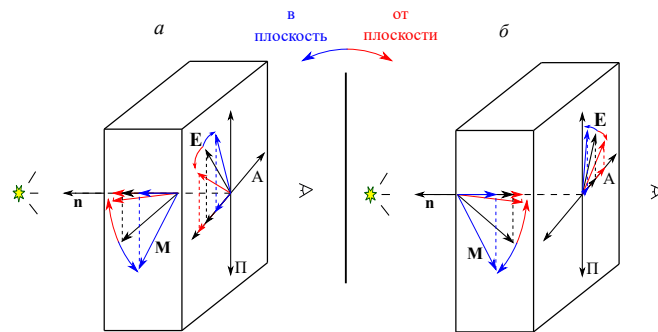


Рис. 3: Схематическое представление поворота вектора напряжённости  $\mathbf{E}$  световой волны относительно плоскости поляризатора и его проекции на плоскость анализатора в зависимости от направления поворота вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  относительно нормали к образцу  $\mathbf{n}$ .  $\Pi$  — плоскость поляризатора;  $A$  — плоскость анализатора. Синим и красным цветами отмечено соответствие ориентации вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  вектору напряжённости  $\mathbf{E}$ : а — при однодоменном состоянии с намагниченностью, направленной в противоположную камеру сторону; б — при однодоменном состоянии с намагниченностью, направленной в сторону камеры

находится в однодоменном состоянии с направлением намагниченности в противоположную диоду сторону (рис. 3, б). В этом случае плоскость поляризации света будет поворачиваться по часовой стрелке, но сохраняется описанная ранее закономерность: стремление вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  к коллинеарности с вектором нормали к плёнке  $\mathbf{n}$  ведёт к увеличению интенсивности проходящего света, а стремление вектора  $\mathbf{M}$  к перпендикулярности с  $\mathbf{n}$  ведёт к уменьшению интенсивности света.

Таким образом, даже в однодоменном состоянии образца по изменению яркости изображения камеры можно определить, как изменяется угол между нормалью к поверхности образца  $\mathbf{n}$  и направлением намагниченности в нём  $\mathbf{M}$ .

В настоящей работе исследовался образец эпитаксиальной плёнки феррита граната  $(\text{BiLi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с кристаллографической ориентацией (210) толщиной 18.7 мкм на галлий-гадолиниевой подложке  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ . Константы анизотропии образца:  $K_u = -312$  эрг/см<sup>3</sup>,  $K_{orth} = 3338$  эрг/см<sup>3</sup>,  $K_c = 1555$  эрг/см<sup>3</sup>; период полосовой структуры образца равен 26.25 мкм; намагниченность насыщения:  $4\pi M_s = 62.17$  Гс.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате настоящей работы было качественно исследовано поведение магнитных неоднородностей диффузного магнитооптического контраста. Данные неоднородности слабо различимы на обычных магнитооптических снимках ввиду того, что вносят очень небольшое изменение яркости изображения, поэтому

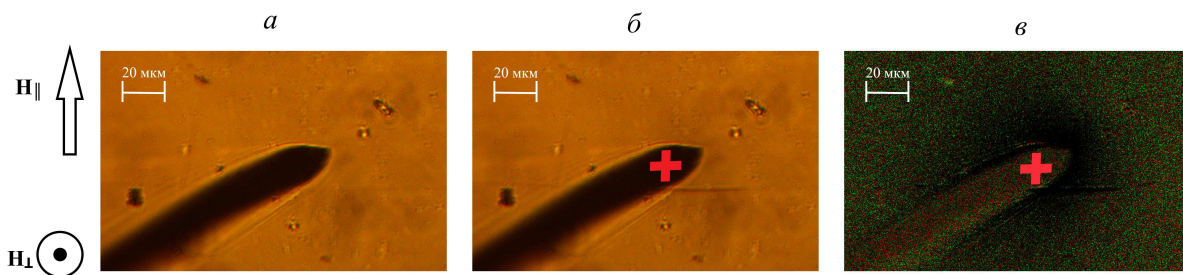


Рис. 4: Серия магнитооптических фотографий, изображающих зарождение магнитной неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом. Стрелками указаны направления магнитных полей. Снимки сделаны при условиях:  $H_{\parallel} = 170$  Э,  $H_{\perp} = 40$  Э. На электрод подаётся напряжение  $U = 1.6$  кВ (положительный заряд на электроде): *a* — снимок до подачи напряжения на электрод; *b* — снимок во время подачи напряжения на электрод; *v* — разностный кадр между снимками *a* и *b*, где светлые области означают просветление изображения при подаче напряжения, тёмные — потемнение, шум означает отсутствие изменений

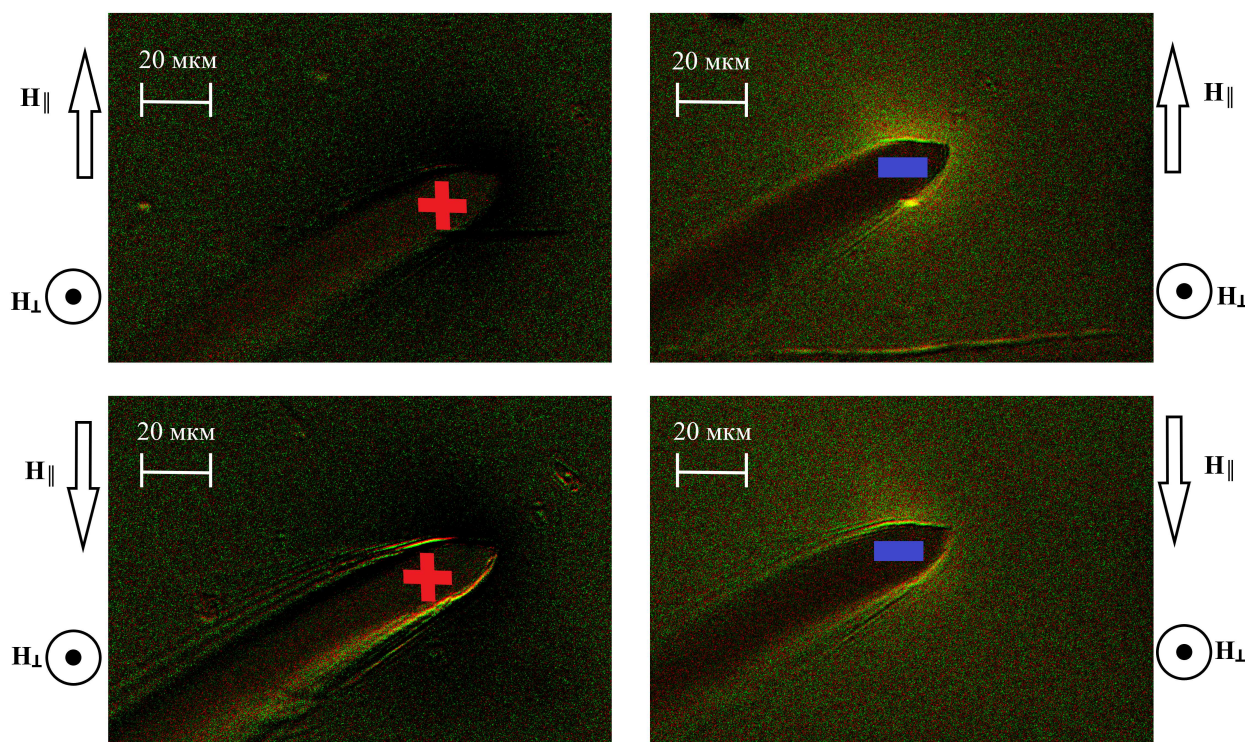


Рис. 5: Серия разностных кадров, изображающих изменение яркости магнитооптического изображения при зарождении магнитной неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом. Тёмные области означают потемнение при подаче напряжения, светлые — просветление, шум означает отсутствие изменений. Стрелками указаны направления магнитных полей. Снимки сделаны при условиях:  $H_{\parallel} = 170$  Э,  $H_{\perp} = 40$  Э,  $U = 1.6$  кВ. Красный плюс означает положительный заряд на зонде, синий минус — отрицательный

они будут показаны в виде разностных кадров между снимками до и во время подачи напряжения на точечный электрод. У таких кадров повышена яркость, на них светлые области обозначают просветление во время подачи напряжения на электрод, а тёмные — потемнение, шум означает отсутствие изменений, красный плюс означает положительный заряд на зонде, синий

минус — отрицательный. Пример зарождения магнитной неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом показан на рис. 4.

Анализ магнитооптических изображений показал, что при положительном заряде на зонде данная магнитная неоднородность затемняет область своего зарождения на изображении, в то время как при отри-

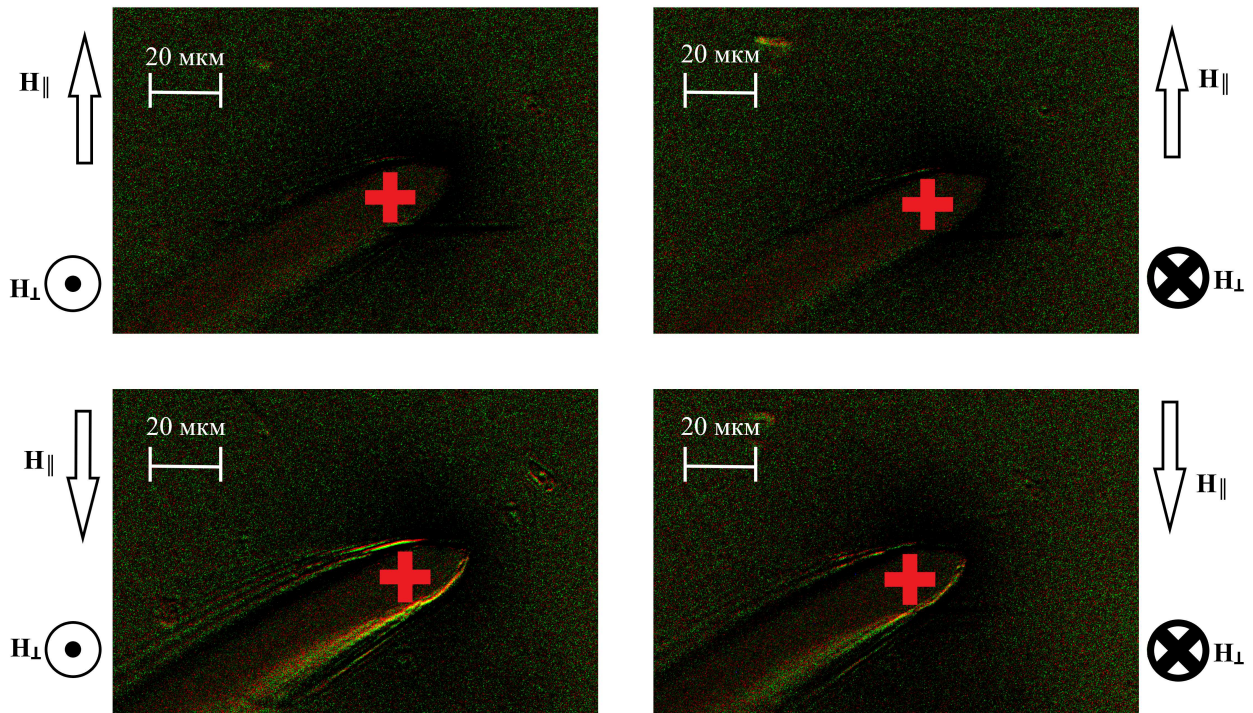


Рис. 6: Серия разностных кадров, изображающих изменение яркости магнитооптического изображения при зарождении магнитной неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом. Тёмные области означают потемнение при подаче напряжения, светлые — просветление, шум означает отсутствие изменений. Стрелками указаны направления магнитных полей. Снимки сделаны при условиях:  $H_{\parallel} = 170$  Э,  $H_{\perp} = 40$  Э,  $U = 1.6$  кВ. Красный плюс означает положительный заряд на зонде

цательном заряде — осветляет. При этом данное поведение не зависит от направления магнитного поля, параллельного плоскости образца (рис. 5).

Более того, такое поведение магнитной неоднородности вообще не зависит от направления внешнего магнитного поля (рис. 6)

Для правильного понимания результатов эксперимента следует вспомнить наблюдаемое ранее электроиндуцированное зарождение ЦМД в работе [5]. Для объяснения эффекта, наблюдавшегося в этой работе, был предложен механизм [6], основанный на неоднородном магнитоэлектрическом взаимодействии [8], причиной которому являлось взаимодействие Дзялошинского-Мория [9–11].

Суть этого механизма состоит в следующем: магнитоэлектрическое взаимодействие вносит дополнительное слагаемое в свободную энергию системы [12]:

$$F_{ME} = \gamma \mathbf{E} \cdot (\mathbf{m} \operatorname{div} \mathbf{m} - (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{m}), \quad (1)$$

где  $\gamma$  — константа магнитоэлектрического взаимодействия,  $\mathbf{E}$  — вектор напряжённости электрического поля,  $\mathbf{m}$  — нормированный вектор намагниченности образца. При некотором значении  $\mathbf{E}$  состояние образца с зародившимся ЦМД оказывается более энергетически выгодным, чем состояние однородной намагниченности, из-за слагаемого (1). Из вида члена (1) можно понять, что электрическая поляризация локализована

непосредственно в месте неоднородной намагниченности, и зарождение ЦМД возможно лишь в неоднородностях с определённой киральностью (определённым направлением поворота намагниченности). В таком случае изменение направления  $\mathbf{H}_{\parallel}$  на противоположное изменяло на противоположную киральность, то есть, эффект был нечётным относительно  $\mathbf{H}_{\parallel}$ .

Как видно из рис. 6, эффект электроиндуцированного зарождения магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом не зависит от  $\mathbf{H}_{\parallel}$ , является нечётным по  $\mathbf{E}$  и не зависит от направления нормальной к поверхности плёнки  $M_z$ -компоненты вектора намагниченности. Отсюда можно предположить, что природой такого зарождения описываемых в настоящей работе неоднородностей является локальное электроиндуцированное изменение магнитной анизотропии образца [13], а не описанный ранее киральный механизм.

Плотность энергии магнитной анизотропии, наведённой из-за некубического упорядочения ионов в процессе эпитаксии, описывается соотношением [14]:

$$w^{(i)} = K_u (\mathbf{m} \mathbf{n}_u)^2 + K_{orth} (\mathbf{m} \mathbf{n}_{orth})^2, \quad (2)$$

где  $K_u$  и  $K_{orth}$  — константы одноосной и ромбической анизотропии соответственно,  $\mathbf{m} = \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|}$  — нормированный вектор намагниченности,  $\mathbf{n}_u$  — орт вдоль оси легчайшего намагничивания (ОЛН), а  $\mathbf{n}_{orth}$  — орт

вдоль направления лёгкого (при  $K_{orth} > 0$ ) или трудного (при  $K_{orth} < 0$ ) намагничивания в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{n}_u$ .

Из соотношения (2), поскольку в исследуемом в настоящей работе образце  $K_{orth}$  по абсолютному значению на порядок больше  $K_u$ , можно сделать вывод, что ромбическая анизотропия является доминирующей. Результаты определения характеризующих анизотропию параметров также показали, что для (210)-ориентаций в большинстве случаев доминирующей является ромбическая анизотропия [15–18]. Таким образом, можно считать, что зарождение магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом определяется изменением ромбической анизотропии.

По изменению яркости магнитооптического изображения при зарождении магнитной неоднородности с диффузным магнитооптическим контрастом можно оценить изменение  $M_z$ -компоненты вектора намагниченности, по которому можно оценить вызванное электрическим полем иглы-электрода изменение констант магнитной анизотропии. Оценка относительного изменения  $K_{orth}$  составила  $5 \pm 2\%$ , что соответствует изменению на  $150 \pm 60$  эрг/см<sup>3</sup>.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящей работы и качественного анализа полученных в ней экспериментальных ре-

зультатов установлена природа обнаруженного недавно нового вида магнитных неоднородностей с диффузным магнитооптическим контрастом. Предполагаемым механизмом образования таких неоднородностей является локальное электроиндуцированное изменение магнитной анизотропии образца. Также были сделаны оценки изменения константы ромбической анизотропии.

### Благодарности

Автор выражает большую признательность профессору кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова А. П. Пятакову за обсуждение работы и научное руководство, а также старшему преподавателю кафедры физики колебаний физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова Е. П. Николаевой за плодотворные дискуссии и ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-02-00828.

- 
- [1] Liu Y., Du H., Jia M., Du A. // Phys. Rev. B. 2015. **91**, 9. 094425.
- [2] Hsu P.J., Kubetzka A., Finco A. et al. // Nature nanotechnology. 2017. **12**, 2. P. 123.
- [3] Schott M., Bernard-Mantel A., Ranno L. et al. // Nano lett. 2017. **17**, 5. P. 3006.
- [4] Pyatakov A. P., Sergeev A. S., Nikolaeva E. P. et al. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2015. **185**, 10. P. 1077.
- [5] Kulikova D. P., Pyatakov A. P., Nikolaeva E. P. et al. // JETP lett. 2016. **104**, 3. P. 197.
- [6] Kulikova D. P., Gareev T. T., Nikolaeva E. P. et al. // Physica Status Solidi - Rapid Research Letters. 2018. **12**, 6. 2-5.
- [7] Pyatakov A., Kaminskiy A., Lomov E. et al. // World Scientific Publishing Company. 2019. **9**, 02. 1940004.
- [8] Bar'yakhtar V. G., L'vov V. A., Yablonskii D. A. // JETP Lett. 1983. **37**, 12. 673.
- [9] Kimura T., Goto T., Shintani H. et al. // Nature. 2003. **426**, 6962. P. 55.
- [10] Sergienko I. A., Dagotto E. // Phys. Rev. B. 2006. **73**, 9. 094434.
- [11] Cheong S. W., Mostovoy M. // Nature materials. 2007. **6**, 1. P. 13.
- [12] Sparavigna A., Strigazzi A., Zvezdin A. // Phys. Rev. B. 1994. **50**, 5. 2953.
- [13] Кабыченков А. Ф., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. // Письма в ЖЭТФ. 2013. **97**, 5. С. 304.
- [14] Hubert A., Malozemoff A. P., DeLuca J. C. // J. of Appl. Phys.. 1974. **45**, 8. P. 3562.
- [15] Балбашов А. М., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. и др. // Свойства пленок ферритов-гранатов с (210)-ориентацией. Препринт 25(500). М.: ИРЭ АН СССР. 1988. 26.
- [16] Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. и др. // Микроэлектроника. 1984. **13**, 4. С. 337.
- [17] Балбашов А. М., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. и др. // Микроэлектроника. 1989. **18**, С. 274.
- [18] Балбашов А. М., Дикштейн И. Е., Лисовский Ф. В. и др. // Микроэлектроника. 1990. **19**, 1. С. 45.

## Electric field-induced nucleation of magnetic inhomogeneities with diffuse magneto-optical contrast

A. S. Kaminskiy

<sup>1</sup>*Department of Oscillation Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: kaminskii.as14@physics.msu.ru*

The nucleation of magnetic inhomogeneities with diffuse magneto-optical contrast in the iron garnet film (210) by the electrically charged point probe was studied. The observation showed that the magneto-optical contrast modulation during this nucleation doesn't depend on the direction of the external magnetic field but it depends on the sign of the charge on the point electrode. So one can conclude that such nucleation is a result of the local electric field-induced magnetic anisotropy modulation. The change in the orthorhombic anisotropy constant at a probe voltage of 1.6 kV was estimated as  $5 \pm 2\%$

PACS: 75.50.Bb, 75.85.+t, 77.55.Nv, 75.30.Gw, 75.50.Gg.

*Keywords:* ferromagnetics, magnetoelectric effect, magnetic inhomogeneities, magnetic anisotropy, iron garnets.

*Received 31 January 2021.*

### Сведения об авторах

Каминский Алексей Сергеевич — студент магистратуры; e-mail: kaminskii.as14@physics.msu.ru.

---