



www.volsu.ru

**ФИЗИКА**

---

---

DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu1.2016.1.6>

УДК 537.636

ББК 22.334

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА С ЛИНЕЙНЫМ ДЕФЕКТОМ СТРУКТУРЫ ТИПА ПРЯМОЙ СКВОЗНОЙ ТРЕЩИНЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ <sup>1</sup>**

**Сергей Александрович Судоргин**

Кандидат физико-математических наук,  
ассистент кафедры теоретической физики и волновых процессов,  
Волгоградский государственный университет  
sergsud@mail.ru, tf@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Николай Геннадьевич Лебедев**

Доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теоретической физики и волновых процессов,  
Волгоградский государственный университет  
lebedev.ng@mail.ru, tf@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Геннадий Сергеевич Иванченко**

Кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,  
Волгоградский государственный университет  
genaivanchenko@yandex.ru, infomod@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Вячеслав Константинович Игнатъев**

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики,  
Волгоградский государственный университет  
ignatjev@vlpost.ru, gf@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

© Судоргин С.А., Лебедев Н.Г., Иванченко Г.С., Игнатъев В.К., 2016

**Аннотация.** Предложена методика расчета магнитной восприимчивости пленок железо-иттриевого граната с линейными дефектами структуры типа прямой сквозной трещины. Проведены численные расчеты пленок железо-иттриевого граната без дефектов структуры, с линейными дефектами структуры в виде прямой сквозной трещины различной ширины и с различным положением относительно края пленки. Для исследования магнетизма коллективизированных электронов в пленках железо-иттриевого граната используется модель Хаббарда, которая описывает движение электронов на решетке и их локальное кулоновское взаимодействие, когда электроны оказываются на одном узле.

**Ключевые слова:** железо-иттриевый гранат, динамическая магнитная восприимчивость, модель Хаббарда, дефекты структуры, внешнее магнитное поле.

### Введение

В последнее десятилетие развитие методов напыления сверхтонких пленок и нанолитографии привело к активному изучению магнитных наноструктур и открытию новых физических явлений: эффекта гигантского магнитосопротивления, туннелирования магнитного момента в сверхмалых ферромагнитных частицах, высокотемпературного ферромагнетизма. Разрабатываются новые магнитные наноматериалы с уникальными характеристиками, которые планируется в будущем применять для сверхплотной записи и хранения информации, при создании новых датчиков магнитного поля, а также для разработки элементной базы квантовых компьютеров. Кроме того, изучение магнитных характеристик низкоразмерных наноструктур является одной из наиболее актуальных фундаментальных задач физики конденсированного состояния вещества [2; 11].

Помимо теоретического интереса актуальной практической задачей является обнаружение и оценка местонахождения и геометрических параметров дефектов сплошности, которые необходимо выявлять для диагностики технического состояния изделий. Для решения этой задачи необходимо рассчитывать поля рассеяния для разного типа нарушений сплошности с учетом их геометрических размеров, магнитных свойств материала и конфигурации изделия, в котором находится дефект. В данной работе акцент сделан на исследовании влияния наноразмерных дефектов в пленочных структурах ферромагнитных материалов [3; 6].

### Модель Хаббарда для неоднородной ферромагнитной пленки

Железо-иттриевый гранат (ЖИГ) является одним из ферромагнитных материалов, имеющих широкие перспективы практического применения. ЖИГ используется в микроволновых и магнитооптических устройствах, например, в ЖИГ-резонаторах, перестраиваемых генераторах и фильтрах СВЧ-диапазона, широкополосных умножителях частоты [3; 8; 11]. В общем случае гранаты – минералы, относящиеся к силикатам, с общим типом химической формулы  $R_3^{2+}R_3^{3+}(SiO_4)_3$ , где  $R^{2+}$  – атомы Mg, Fe, Mn Ca;  $R^{3+}$  – атомы Al, Fe, Cr, обладающие сложной кристаллической структурой [9]. Железо-иттриевый гранат имеет химическую формулу вида  $Y_3Fe_2(FeO_4)_3$ , и представляет собой красно-бурые кристаллы. Ионы железа  $Fe^{3+}$  занимают октаэдрические и тетраэдрические позиции в соотношении 2 : 3 и формируют две магнитные подрешетки с противоположно направленными спинами. Температура Нееля равна примерно 555 К [16].

Для практического применения наиболее важны ЖИГ в виде монокристаллов и эпитаксиальных пленок. В последние годы исследуется также ЖИГ в наноструктурном состоянии [5; 12; 14; 15]. Интерес к наноструктурным материалам на основе ЖИГ обусловлен как фундаментальными вопросами физики нанокристаллических магнетиков, так и перспективами их использования в покрытиях, нанокompозитах, феррожидкостях и пр. [4].

Наиболее широко применимой моделью для исследования магнетизма коллективизированных электронов является модель Хаббарда [13], которая описывает движение электронов на

решетке и их локальное кулоновское взаимодействие, когда они оказываются на одном узле. Гамильтониан модели в терминах вторичного квантования имеет вид:

$$H = \sum_{ij\sigma} t_{ij} c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} + \sum_{i\sigma} \varepsilon_{\sigma} n_{i\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}. \quad (1)$$

В гамильтониане (1) электронные состояния не вырождены, поэтому два электрона могут оказаться на одном узле, если их спины противоположны. Здесь  $c_{i\sigma}$  и  $c_{i\sigma}^+$  – ферми-операторы уничтожения и рождения электрона на узле  $i$  со спином  $\sigma$ , который принимает два значения:  $\uparrow$  и  $\downarrow$ ,  $n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^+ c_{i\sigma}$  – число электронов со спином  $\sigma$  на узле  $i$ ,  $\varepsilon_{\sigma}$  – атомный электронный уровень,  $t_{ij}$  – матричный элемент перескока электрона с узла на узел. Обычно предполагают, что последний отличен от нуля только для ближайших соседей. Модель Хаббарда является частным случаем полярной модели Вонсовского, в которой наряду с кулоновским взаимодействием на одном узле учитывается взаимодействие электронов на соседних узлах. Диагональность того или иного члена в гамильтониане дает возможность построения теории возмущений в двух предельных случаях:  $U \ll W$  и  $U \gg W$ , которые называются пределами слабой и сильной связи соответственно. Используем приближение сильной связи, так как пленки ЖИГ являются ферромагнитным материалом.

В пределе  $U \ll W$  система представляет собой ферми-жидкость, в которой возможно возникновение магнитного дальнего порядка: ферромагнитного ( $F$ ) или типа волны спиновой плотности ( $SDW$ ) с волновым вектором  $Q$ . Это – режим коллективизированного магнетизма без локализованных магнитных моментов.

Оператор кинетической энергии диагонализуется при помощи фурье-преобразования электронных операторов:

$$c_{i\sigma} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{kR}_i} c_{\mathbf{k}\sigma}, \quad c_{i\sigma}^+ = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{k}} e^{-i\mathbf{kR}_i} c_{\mathbf{k}\sigma}^+. \quad (2)$$

где  $N$  – число узлов в кристалле.

Динамическая магнитная восприимчивость в приближении хаотических фаз определяется выражением [13]:

$$\chi(k, \omega) = \frac{\chi^0(k, \omega)}{1 - U\chi^0(k, \omega)}, \quad (3)$$

где  $\chi^0(k, \omega) = \frac{1}{N} \sum_{k_1} \frac{f(\varepsilon(k_1)) - f(\varepsilon(k_1 - k))}{\varepsilon(k_1 - k) - \varepsilon(k_1) + \omega + i\delta}$  – «затравочная» восприимчивость свободных (зонных) электронов;  $f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp((\varepsilon - E_F)/T) + 1}$  – фермиевская функция распределения,  $E_F$  – энергия уровня Ферми.

Приближенно кристаллическую решетку ЖИГ можно считать кубической [1], зонная структура для ЖИГ пленки имеет вид:

$$\varepsilon(k_x, k_y) = t(\cos(k_x a) + \cos(k_y a)), \quad (4)$$

где  $t = 1.7$  эВ – интеграл перескока между соседними узлами решетки кристалла;  $a = 1,2376$  нм – параметр кристаллической решетки ЖИГ.

Рассмотрим пленку ЖИГ с линейным дефектом – трещиной, параллельной границам пленки, как показано на рисунке 1. Здесь обозначено:  $x_d$  – координата расположения дефекта,  $2d$  – ширина линейного дефекта

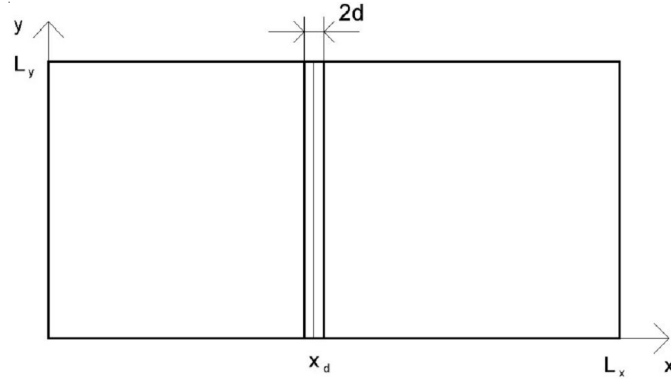


Рис. 1. Пленка ЖИГ с линейным дефектом, параллельным оси  $y$

Для учета дефекта дисперсионное соотношение запишем в виде системы уравнений:

$$\varepsilon(k_x, k_y) = \begin{cases} t(\cos(k_x a) + \cos(k_y a)), & 0 \leq x \leq x_d - d, \\ 0, & x_d - d < x < x_d + d, \\ t(\cos(k_x a) + \cos(k_y a)), & x_d + d \leq x \leq L_x, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_d$  – координата дефекта по оси  $x$ ;  $2d$  – ширина дефекта;  $L_x$  – ширина пленки (по оси  $x$ );  $L_y$  – длина пленки (по оси  $y$ ). Значения волновых чисел находятся в диапазоне  $\frac{2\pi}{x_d - d} \leq k_x \leq \frac{2\pi}{a}$  при  $0 \leq x \leq x_d - d$ ;  $\frac{2\pi}{L_x - x_d - d} \leq k_x \leq \frac{2\pi}{a}$  при  $x_d + d \leq x \leq L_x$ ;  $\frac{2\pi}{L_y} \leq k_y \leq \frac{2\pi}{a}$  при  $0 \leq y \leq L_y$ . Волновые числа  $k_x$  и  $k_y$  могут принимать дискретные разрешенные значения:

$$k_y = \frac{2\pi n}{L_y}, \quad n \in Z, \quad k_y \leq \frac{2\pi}{a};$$

$$k_x = \frac{2\pi n}{x_d - d}, \quad n \in Z, \quad k_x \leq \frac{2\pi}{a} \text{ при } 0 \leq x \leq x_d - d;$$

$$k_x = \frac{2\pi n}{L_x - x_d - d}, \quad n \in Z, \quad k_x \leq \frac{2\pi}{a} \text{ при } x_d + d \leq x \leq L_x.$$

Используя приближение хаотических фаз (ПХФ), находим выражение для продольной динамической магнитной восприимчивости:

$$2\chi_{\parallel}(\mathbf{k}, \omega) = \chi_{\perp}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{\chi^0(\mathbf{k}, \omega)}{1 - U\chi^0(\mathbf{k}, \omega)}. \quad (6)$$

Зависимость продольной динамической магнитной восприимчивости от координат можно получить, применяя преобразование Фурье к  $\chi_{\parallel}(\mathbf{k}, \omega)$ :

$$\chi_{\parallel}(\mathbf{r}, T) = \frac{1}{2\pi} \int \chi_{\parallel}(\mathbf{k}, \omega) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} d\mathbf{k} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3a}} \int_0^{\frac{\pi}{3a}} \chi_{\parallel}(k_x, k_y, \omega) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} dk_x dk_y. \quad (7)$$

Намагниченность во внешнем магнитном поле выражается формулой:

$$M_{\parallel}(\mathbf{r}, T) = \chi_{\parallel}(\mathbf{r}, T) H_0, \quad (8)$$

где  $H_0$  – напряженность внешнего магнитного поля. Для численного моделирования было выбрано значение напряженности внешнего магнитного поля  $H_0 = 1$  Тл.

Результаты численного моделирования

На рисунке 2 представлено распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки без дефектов. Геометрические размеры пленки: по координате  $x$  – 100 усл. ед., по координате  $y$  – 10 усл. ед. Величина одной условной единицы равна 1 усл. ед. = 1,2376 нм.

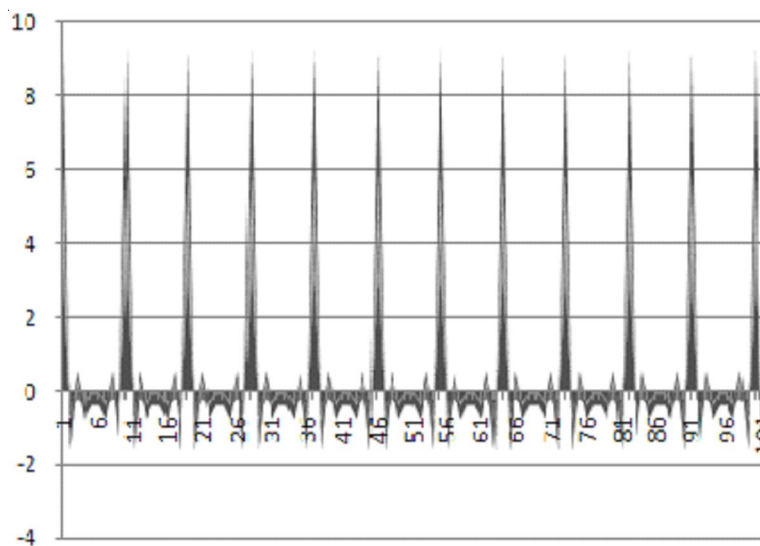


Рис. 2. Распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки без дефектов

На рисунке 3 представлено распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 6 усл. ед., расположенным на расстоянии 50 усл. ед. от края пленки.

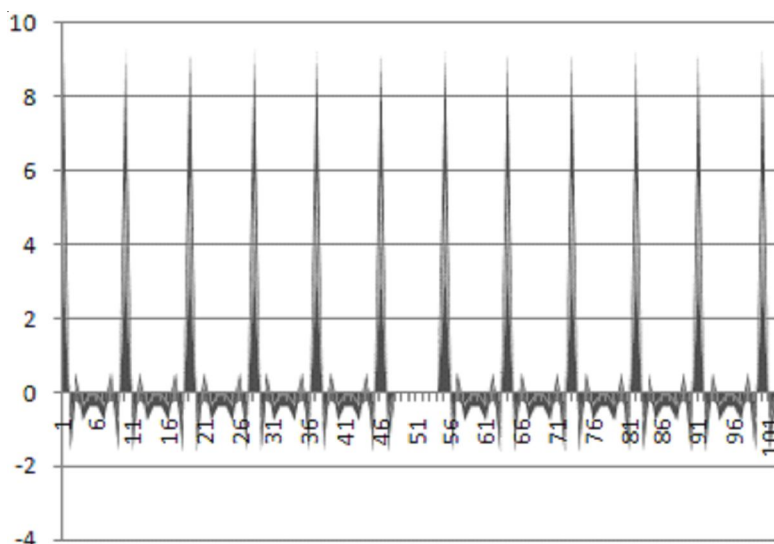


Рис. 3. Распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 6 усл. ед., расположенным на расстоянии 50 усл. ед. от края пленки

На рисунке 4 представлено распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 10 усл. ед., расположенным на расстоянии 50 усл. ед. от края пленки.

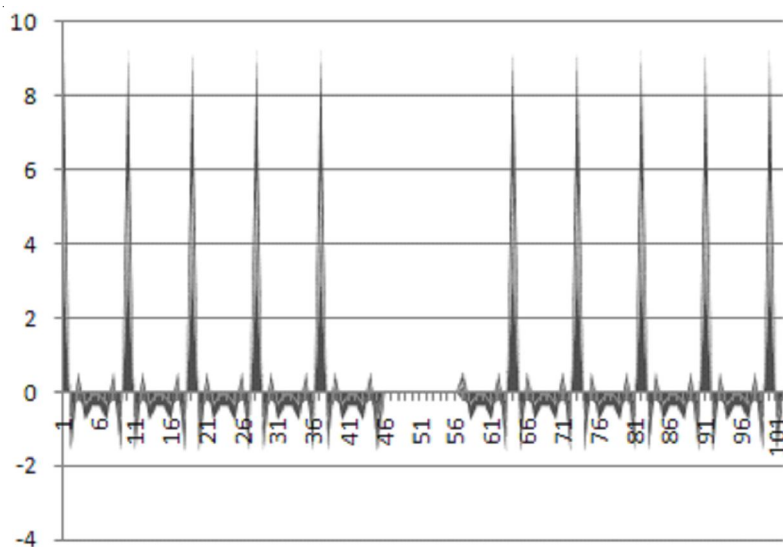


Рис. 4. Распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 10 усл. ед., расположенным на расстоянии 50 усл. ед. от края пленки

На рисунке 5 представлено распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 6 усл. ед., расположенным на расстоянии 70 усл. ед. от края пленки.

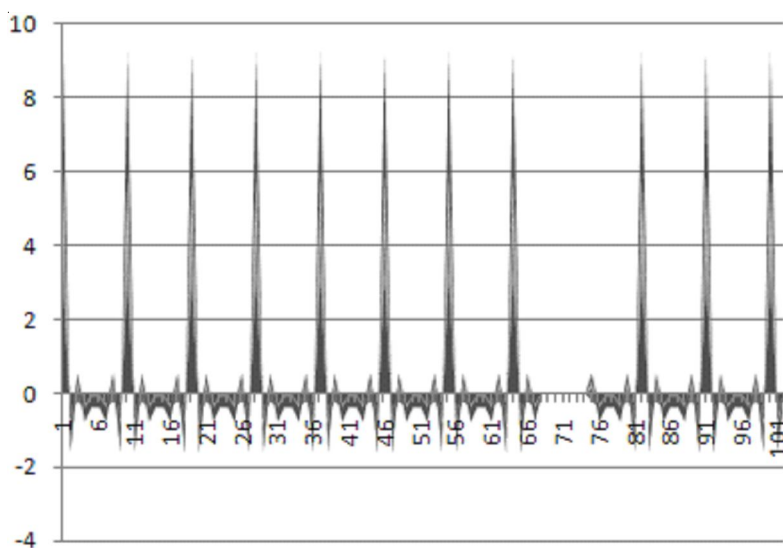


Рис. 5. Распределение продольной магнитной восприимчивости для ЖИГ пленки с линейным дефектом шириной 6 усл. ед., расположенным на расстоянии 70 усл. ед. от края пленки

### Заключение

Разработана методика для расчета поля рассеяния и его характеристик линейных наноразмерных дефектов в ферромагнитных пленках. Создана программа, вычисляющая продольную и поперечную динамическую магнитную восприимчивость тонких квазиодномерных пленок, содержащих линейные дефекты. Рассчитаны распределения магнитной восприимчивости в ЖИГ пленках с дефектом в виде трещины. Распределения магнитной восприимчивости проанализированы для ЖИГ пленок без дефектов, для пленок с дефектами различной ширины. Произведено моделирование для различного пространственного расположения линейных дефектов в ЖИГ плен-

ках. Изучено влияние геометрических размеров ферромагнитных пленок на их магнитную восприимчивость, которая позволяет рассчитать характеристики поля рассеяния.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-31801), Российского научного фонда (грант № 15-19-00028).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, Г. Г. Термостабилизация двух частот спектра магнитостатической спиновой волны в пленке кубического феррита / Г. Г. Бондаренко, В. В. Шагаев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – № 1/2. – С. 85–90.
2. Загидулин, Р. В. Расчет магнитостатического поля внутреннего дефекта и дефекта внутренней поверхности в ферромагнитной пластине. 1. Магнитное поле дефекта внутри ферромагнетика / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужижкий, В. П. Курозаев // Дефектоскопия. – 1997. – № 1. – С. 46–54.
3. Коржова, Л. В. Теоретические и экспериментальные исследования магнитостатических полей дефектов / Л. В. Коржова // Физические методы и средства неразрушающего контроля. – Минск : Наука и техника, 1976. – С. 74–92.
4. Оптические и магнитооптические свойства наноструктурного железо-иттриевого граната / Б. А. Гижевский, Ю. П. Сухоруков, Е. А. Ганьшина [и др.] // ФТГ. – 2009. – № 51. – С. 1729–1734.
5. Паняев, И. С. Техника измерений спектральных и материальных параметров тонких пленок ЖИГ / И. С. Паняев, Д. Г. Санников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – № 14. – С. 1092–1095.
6. Печенков, А. Н. Алгоритмы расчетов и моделирования прямых и обратных задач магнитостатической дефектоскопии и устройств технической магнитостатики : дис. д-ра техн. наук / Печенков Александр Николаевич. – Екатеринбург, 2007. – 271 с.
7. Рандошкин, В. В. Прикладная магнитооптика / В. В. Рандошкин, А. Я. Червоненкис. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
8. Сазонов, Д. М. Перестраиваемые ферритовые фильтры. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 434 с.
9. Смит, Я. Ферриты / Я. Смит, Х. Вейн. – М. : Иностран. лит., 1962. – 504 с.
10. Структура и свойства напыленных пленок железо-иттриевого граната / В. Ф. Шкарь, Е. И. Николаев, В. Н. Саяпин [и др.] // ФТГ. – 2005. – № 47. – С. 1071–1074.
11. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1983. – 302 с.
12. Anisotropic hyperfine field fluctuation in  $\text{La}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  / H. M. Lee, S. J. Kim, I. B. Shim, S. B. Kim, C. S. Kim // J. Magn. Magn. Mater. – 2004. – № 272. – P. 1764–1766.
13. Hubbard, J. Electron correlations in narrow energy bands / J. Hubbard // Proc. Roy. Soc. A. – 1963. – № 276. – P. 238–257.
14. Phase and microstructure evolution in precursor plasma-sprayed YIG coatings / X. Z. Guo, B. G. Ravi, Q. Y. Yan [et al.] // Ceramics International. – 2006. – № 32. – P. 61–66.
15. Particle size effects on magnetic garnets prepared by a properties of yttrium iron sol-gel method / R. D. Sanchez, J. Rivas, P. Vaqueiro, M. A. Lopez-Quintela, D. Caeiro // J. Magn. Magn. Mater. – 2002. – № 247. – P. 92–98.
16. Wood, D. L. Effect of Impurities on the Optical Properties of Yttrium Iron Garnet / D. L. Wood, J. P. Remeika // J. Appl. Phys. – 1967. – № 247. – P. 92–98.

### REFERENCES

1. Bondarenko G.G., Shagaev V.V. Termostabilizatsiya dvukh chastot spektra magnitostaticheskoy spinovoy volny v plenke kubicheskogo ferrita [Thermal Stabilization of the Two Frequencies of Spectrum of the Magnetostatic Spin Wave in Cubic Ferrite Film]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2011, no. 1/2, pp. 85-90.

2. Zagidulin R.V., Muzhitskiy V.F., Kurozaev V.P. Raschet magnitostateskogo polya vnutrennego defekta i defekta vnutrenney poverkhnosti v ferromagnitnoy plastine. 1. Magnitnoe pole defekta vnutri ferromagnetika [The Calculation of the Magnetostatic Field of the Internal Defect and a Defect in the Inner Surface of the Ferromagnetic Plate. 1. The Magnetic Field Inside the Ferromagnetic Material Defect]. *Defektoskopiya*, 1997, no. 1, pp. 46-54.
3. Korzhova L.V. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya magnitostateskikh poley defektov [Theoretical and Experimental Studies of Magnetostatic Field Defects]. *Fizicheskie metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya* [Physical Methods and Means of Non-Destructing Control]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976, pp. 74-92.
4. Gizhevskiy B.A., Sukhorukov Yu.P., Ganshina E.A., et al. Opticheskie i magnitoopticheskie svoystva nanostruktornogo zhelezo-ittrievogo granata [Optical and Magneto-Optical Properties of Nanostructured Yttrium Iron Garnet]. *FTT*, 2009, no. 51, pp. 1729-1734.
5. Panyaev I.S., Sannikov D.G. Tekhnika izmereniy spektralnykh i materialnykh parametrov tonkikh plenok ZhIG [The Technique of Measurement of Spectral and Physical Parameters of Thin Films of YIG]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, no. 14, pp. 1092-1095.
6. Pechenkov A.N. *Algoritmy raschetov i modelirovaniya pryamykh i obratnykh zadach magnitostateskoy defektoskopii i ustroystv tekhnicheskoy magnitostatiki: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Algorithms of Calculations and Simulation of Direct and Inverse Problems of Magnetostatic Technical Inspection and Magnetostatic Devices. Dr. techn. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2007. 271 p.
7. Randoshkin V.V., Chervonenkis A.Ya. *Prikladnaya magnitooptika* [Applied Magneto-optics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.
8. Sazonov D.M. *Perestraivaemye ferritovye filtry. Antenny i ustroystva SVCh* [Tunable Ferrites. Antennas and Microwave Devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 434 p.
9. Smit Ya., Veyn Kh. *Ferrity* [Ferrites]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1962. 504 p.
10. Shkar V.F., Nikolaev E.I., Sayapin V.N., et al. Struktura i svoystva napylenykh plenok zhelezo-ittrievogo granata [The Structure and Properties of the Deposited Films of Yttrium Iron Garnet]. *FTT*, 2005, no. 47, pp. 1071-1074.
11. Tikadzumi S. *Fizika ferromagnetizma. Magnitnye svoystva veshchestva* [The Physics of Ferromagnetism. Magnetic Properties of Matter]. Moscow, Mir Publ., 1983. 302 p.
12. Lee H.M., Kim S.J., Shim I.B., Kim S.B., Kim C.S. Anisotropic Hyperfine Field Fluctuation in  $\text{La}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ . *J. Magn. Magn. Mater*, 2004, no. 272, pp. 1764-1766.
13. Hubbard J. Electron Correlations in Narrow Energy Bands. *Proc. Roy. Soc. A.*, 1963, no. 276, pp. 238-257.
14. Guo X.Z., Ravi B.G., Yan Q.Y., Gambino R.J., Sampath S., Margolies J., Parise J.B. Phase and Microstructure Evolution in Precursor Plasma-Sprayed YIG Coatings. *Ceramics International*, 2006, no. 32, pp. 61-66.
15. Sanchez R.D., Rivas J., Vaqueiro P., Lopez-Quintela M.A., Caeiro D. Particle-Size Effects on Magnetic Garnets Prepared by Properties of Yttrium Iron Sol-Gel Method. *J. Magn. Magn. Mater*, 2002, no. 247, pp. 92-98.
16. Wood D.L., Remeika J.P. Effect of Impurities on the Optical Properties of Yttrium Iron Garnet. *J. Appl. Phys.*, 1967, no. 247, pp. 92-98.

**CALCULATION OF THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY  
OF YTTRIUM IRON GARNET FILMS  
WITH LINEAR STRUCTURAL DEFECTS  
SUCH AS STRAIGHT-THROUGH CRACK  
IN AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD**

**Sergey Aleksandrovich Sudorgin**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant,  
Department of Theoretical Physics and Wave Processes,  
Volgograd State University  
sergsud@mail.ru, tf@volsu.ru  
Prospect Universitetskiy, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation



**Nikolay Gennadyevich Lebedev**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Department of Theoretical Physics and Wave Processes,  
Volgograd State University  
lebedev.ng@mail.ru, tf@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Gennadiy Sergeevich Ivanchenko**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Department of Information Systems and Computer Modeling,  
Volgograd State University  
genaiivanchenko@yandex.ru, infomod@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Vyacheslav Konstantinovich Ignatyev**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Department of Radiophysics,  
Volgograd State University  
ignatjev@vlpost.ru, rf@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The authors propose the method of calculating the scattering field and its linear characteristics of nanoscale defects in ferromagnetic films on the basis of the Hubbard model which describes the movement of electrons on the grid and the local Coulomb interaction when they are on the same node. Yttrium iron garnet (YIG) in the form of single crystals and epitaxial films is the most important for practical applications.

We use the strong coupling approximation for the calculation of the yttrium iron garnet films magnetic susceptibility. We obtained the analytical expression for the dynamic magnetic susceptibility in the random phase approximation. Longitudinal and transverse dynamics of magnetic susceptibility of quasi thin films containing linear defects was calculated. Distributions of the magnetic susceptibility were analyzed in the films of yttrium iron garnet with a linear structural defect such as straight-through crack.

Distribution of magnetic susceptibility was analyzed for YIG films without defects, and for films with defects of varying widths. The yttrium iron garnet crystal lattice can be approximately considered as cubic. The dependence of the longitudinal dynamic magnetic susceptibility of the coordinates was obtained using the Fourier transform. Simulation for different spatial arrangement of linear structural defect such as straight-through crack in YIG films was produced. The influence of the geometric dimensions of the ferromagnetic films was investigated according to the characteristics of the stray field.

**Key words:** yttrium iron garnet, dynamic magnetic susceptibility, Hubbard model, structural defects, external magnetic field.