

Фазовый компаратор спиновых волн на основе антиферромагнитной пленки со слабым ферромагнетизмом

О. Ю. Архипова^{1,2}✉, А. А. Матвеев^{1,2}, А. Р. Сафин^{1,2,3}, С. А. Никитов^{1,2,4}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11/7

²Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

⁴Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д.83

E-mail: ✉olyuar@gmail.com, maa.box@yandex.ru, arsafin@gmail.com, nikitov@cplire.ru

Поступила в редакцию 10.06.2026, принята к публикации 10.07.2026,
опубликована онлайн 10.07.2026

Аннотация. Цель настоящей работы — получить выражение для дискриминационной характеристики фазового компаратора спиновых волн, представляющей собой зависимость амплитуды выходного напряжения от разности фаз возбуждающих микроволновых колебаний. Данный компаратор выполнен на основе антиферромагнитной пленки и трех микрополосковых антенн, в две из которых подаются микроволновые сигналы, фазы которых требуется сравнить, а с третьей снимается выходное напряжение. Кроме того, в данной работе исследуется поведение дискриминационной характеристики для различных положений приемной антенны. **Методы.** Для описания антиферромагнитного волновода была составлена эквивалентная электрическая схема на сосредоточенных элементах. Радиотехническая модель рассматривалась в виде активного и реактивного сопротивлений антенн возбуждения и приема спиновых волн, а также активных и реактивных сопротивлений, характеризующих распространение спиновых волн в антиферромагнитной пленке. Из уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта получены компоненты тензора магнитной восприимчивости антиферромагнетика, что позволило описать связь электрической и магнитной систем. Теоретические результаты подтверждались при помощи микромагнитного моделирования. **Результаты.** Описан принцип работы фазового компаратора спиновых волн, выполненного на основе антиферромагнитной пленки. С помощью эквивалентной электрической схемы получена основная характеристика компаратора — зависимость амплитуды выходного напряжения на приемной антенне от разности фаз возбуждающих микроволновых сигналов. Также, построена зависимость амплитуды выходного напряжения от положения приемной антенны. Проведено микромагнитное моделирование для проверки теоретически полученных результатов. **Заключение.** В работе получено выражение для дискриминационной характеристики компаратора на основе антиферромагнитной пленки при произвольном расположении приемной антенны. Показано, что дискриминационная характеристика зависит от пространственного расположения приемной антенны. Наибольшая эффективность работы компаратора достигается в том случае, если детектор расположен по середине между возбуждающими антеннами.

Ключевые слова: антиферромагнитная пленка, спиновые волны, фазовый компаратор, дискриминационная характеристика

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-538).

Для цитирования: Архипова О. Ю., Матвеев А. А., Сафин А. Р., Никитов С. А. Фазовый компаратор спиновых волн на основе антиферромагнитной пленки со слабым ферромагнетизмом // Известия вузов.

Spin wave phase comparator based on antiferromagnetic film with weak ferromagnetism

O. Yu. Arkhipova^{1,2}✉, A. A. Matveev^{1,2}, A. R. Safin^{1,2,3}, S. A. Nikitov^{1,2,4}

¹Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, 11/7 Mokhovaya st., Moscow, 125009, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia.

³Moscow Power Engineering Institute, 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia

⁴Saratov Chernyshevsky State University, 83 Astrakhanskaya st., Saratov, 410012, Russia

E-mail: ✉olyuar@gmail.com, maa.box@yandex.ru, arsafer@gmail.com, nikitov@cplire.ru

Received 10.06.2026, accepted 10.07.2026, available online 10.07.2026

Abstract. The purpose of this work is to obtain an expression for the discriminative characteristic of the spin wave phase comparator, which is the dependence of the amplitude of the output voltage on the phase difference of the exciting microwave oscillations. This comparator is based on an antiferromagnetic film and three microstrip antennas, two of which receive microwave signals, the phases of which need to be compared, and the output voltage is removed from the third. In addition, this paper examines the behavior of the discriminative characteristic for various positions of the receiving antenna. *Methods.* To describe an antiferromagnetic waveguide, an equivalent electrical circuit based on concentrated elements was compiled. The radio engineering model was considered in the form of active and reactive resistances of spin wave excitation and reception antennas, as well as active and reactive resistances characterizing the propagation of spin waves in an antiferromagnetic film. The components of the magnetic susceptibility tensor of an antiferromagnet are derived from the Landau-Lifshitz-Hilbert equations, which made it possible to describe the relationship between the electric and magnetic systems. The theoretical results were confirmed using micromagnetic modeling. *Results.* The principle of operation of a spin wave phase comparator based on an antiferromagnetic film is described. Using an equivalent electrical circuit, the main characteristic of the comparator is obtained - the dependence of the amplitude of the output voltage at the receiving antenna on the phase difference of the exciting microwave signals. Also, the dependence of the amplitude of the output voltage on the position of the receiving antenna is constructed. Micromagnetic modeling was carried out to verify the theoretically obtained results. *Conclusion.* In this paper, an expression is obtained for the discriminatory characteristic of an antiferromagnetic film-based comparator with an arbitrary location of the receiving antenna. It is shown that the discriminative characteristic depends on the spatial location of the receiving antenna. The highest efficiency of the comparator is achieved if the detector is located in the middle between the exciting antennas.

Keywords: antiferromagnetic film, spin waves, phase comparator, discriminative characteristic

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement no. 075-15-2024-538).

For citation: Arkhipova OYu, Matveev AA, Safin AR, Nikitov SA. Spin wave phase comparator based on antiferromagnetic film with weak ferromagnetism. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2026. DOI: 10.18500/0869-6632-003228

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В современной спинтронике активно исследуется возможность использования магнитных структур в качестве компонентов для устройств обработки информации [1, 2]. Их использование позволяет осуществлять передачу информации посредством переноса спи-

нового момента электрона, а не его заряда [3]. Таким образом, в устройствах спинтроники носителями информации являются кванты спин-волновых возбуждений – магноны, и благодаря этому процесс её преобразования происходит без тепловых потерь, в отличие от электронных устройств. Среди составных элементов устройств магноники для передачи и обработки информации можно выделить, например, сенсоры магнитных полей [4, 5], линии задержки [6], квантовые, нейроморфные и гибридные вычислители [7–11]. Однако, поскольку передаваемая информация может содержаться, например, в фазе колебаний, то при преобразовании данных важнейшую роль играет сравнение фаз. Для этого может использоваться фазовый компаратор на основе ферромагнитной пленки [12]. Отметим, что для спинтронных приложений перспективными считаются антиферромагнетики [13, 14]. Распространение спиновых волн в этих материалах возможно на частотах более высоких по сравнению с ферромагнетиками [15, 16]. В данной работе теоретически описывается модель фазового компаратора на основе антиферромагнитной тонкой пленки. Исследуется зависимость дискриминационной характеристики от пространственного расположения приемной антенны. Теоретически полученные результаты сопоставляются с данными, полученными микромагнитным моделированием.

1. Методика

1.1. Модель фазового компаратора. Рассмотрим структуру фазового компаратора в виде антиферромагнитной пленки, поверх которой расположены линии передачи, состоящие из трех микрополосковых антенн (см. рис. 1). Микроволновые сигналы с мощно-

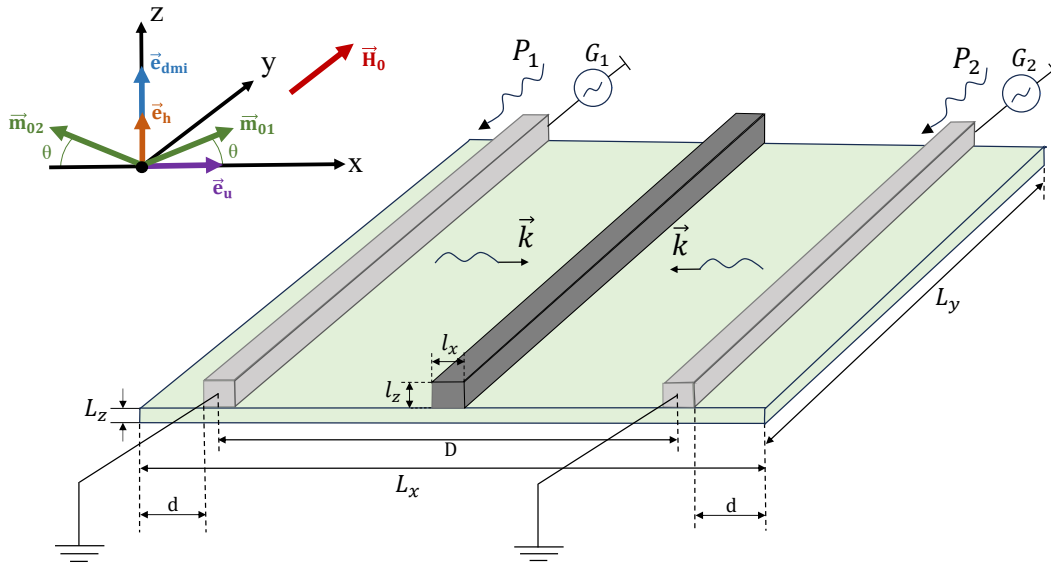


Рис. 1. Схематическое представление исследуемого фазового компаратора на основе антиферромагнитной пленки. Её длина равна $L_x = 20$ мкм, ширина $L_y = 10$ мкм и толщина $L_z = 1$ мкм. Каждая из трех антенн имеет длину $l_y = 10$ мкм, ширину $l_x = 0.25$ мкм и толщину $l_z = l_x/2$ мкм.

Fig. 1. Schematic representation of the phase comparator under study based on an antiferromagnetic film. Its length is $L_x = 20$ mkm, width $L_y = 10$ mkm and thickness $L_z = 1$ mkm. Each of the three antennas has a length of $l_y = 10$ mkm, a width of $l_x = 0.25$ mkm and a thickness of $l_z = l_x/2$ mkm.

стями P_1, P_2 и фазами φ_1, φ_2 подаются на проводящие полосковые антенны, расположенные на краях пленки. Протекающие по ним электрические токи порождают переменные магнитные поля, которые вызывают в антиферромагнитном слое прецессию магнитных моментов и расходящиеся от антенн спиновые волны вдоль оси Ох. Эти волны интерферируют и в результате, на приемной антенне возникает ЭДС. Для расчетов далее предполагается, что длина пленки равна $L_x = 20$ мкм, ширина $L_y = 10$ мкм и толщина $L_z = 1$ мкм. Соответствующие размеры для каждой из трех антенн выбраны одинаковыми: длина $l_y = 10$ мкм, ширина $l_x = 0.25$ мкм и толщина $l_z = 0.125$ мкм.

В качестве материала рассмотрим двухподрешеточный антиферромагнетик со слабым ферромагнетизмом – гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [15, 17]. Спиновые волны в таком случае могут быть описаны при помощи двух связанных уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта [18–20] для намагниченностей подрешеток $\mathbf{m}_{1,2}$. Запишем эти уравнения в следующем виде [21]

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{m}_1}{dt} &= -\gamma\mathbf{m}_1 \times \mathbf{H}_{\text{eff}1} + \alpha\mathbf{m}_1 \times \frac{d\mathbf{m}_1}{dt}, \\ \frac{d\mathbf{m}_2}{dt} &= -\gamma\mathbf{m}_2 \times \mathbf{H}_{\text{eff}2} + \alpha\mathbf{m}_2 \times \frac{d\mathbf{m}_2}{dt},\end{aligned}\quad (1)$$

где γ - гиромагнитное отношение, α - константа затухания Гильберта, $\mathbf{H}_{\text{eff}1,2}$ - эффективные магнитные поля, представляемые как

$$\mathbf{H}_{\text{eff}1,2} = \mathbf{H}_0 + H_u(\mathbf{m}_{1,2} \cdot \mathbf{e}_u)\mathbf{e}_u - H_h(\mathbf{m}_{1,2} \cdot \mathbf{e}_h)\mathbf{e}_h \mp H_{\text{dmi}}\mathbf{e}_{\text{dmi}} \times \mathbf{m}_{2,1} - H_{\text{ex}}\mathbf{m}_{2,1} + 2\frac{A_{\text{ex}}}{\mu_0 M_s} \Delta \mathbf{m}_{1,2} + \mathbf{h}_{ac}.\quad (2)$$

Здесь $\mathbf{H}_0$ - внешнее постоянное магнитное поле, H_u - поле анизотропии типа "легкая ось" H_h - поле анизотропии типа "трудная" ось, A_{ex} - константа неоднородного обмена, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная, H_{ex} - поле однородного антиферромагнитного обмена, H_{dmi} - поле Дзялошинского-Мория [22], $\mathbf{h}_{ac} = \mathbf{h}e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$ - внешнее микроволновое магнитное поле. На рис. 1 показано взаимное расположение ортов легкой $\mathbf{e}_u$ и трудной $\mathbf{e}_h$ осей, вектора Дзялошинского-Мория $\mathbf{e}_{\text{dmi}}$ и постоянного внешнего магнитного поля $\mathbf{H}_0$. Найдем тензор восприимчивости $\hat{\chi}_\omega$ рассматриваемого антиферромагнитного образца, представив намагниченности подрешеток как

$$\mathbf{m}_{1,2} = \mathbf{m}_{01,02} + \mathbf{s}_{1,2}e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}.\quad (3)$$

Здесь $\mathbf{m}_{01,02}$ - стационарные направления намагниченностей подрешеток, $\mathbf{s}_{1,2}$ - комплексные амплитуды спиновых волн. Поиск стационарных направлений $\mathbf{m}_{01,02}$, являющихся решением системы (1) при условии равенства нулю производных по времени, дает следующую оценку для синуса угла скоса

$$\sin(\Theta) \approx \frac{H_0 + H_{\text{dmi}}}{2H_{\text{ex}}}.\quad (4)$$

Подстановка (3) в (1) с учетом $\mathbf{m}_{01,02} = (\pm \cos(\Theta), \sin(\Theta), 0)$ в линейном по амплитудам спиновых волн приближении позволяет получить следующее соотношение

$$M_s(\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2) = M_s \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & 0 & \chi_{xz} \\ 0 & \chi_{yy} & 0 \\ -\chi_{xz} & 0 & \chi_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} = \hat{\chi}_\omega \mathbf{h},\quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}\chi_{xx} &= \frac{2\omega_M(\omega_0 + \omega_{\text{dmi}})^2/\omega_{\text{ex}}}{\left[\omega_{\text{q-FM}}^2 - \omega^2\right] - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}}, & \chi_{xz} &= \frac{2i\omega\omega_M(\omega_0 + \omega_{\text{dmi}})/\omega_{\text{ex}}}{\left[\omega_{\text{q-FM}}^2 - \omega^2\right] - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}}, \\ \chi_{yy} &= \frac{2\omega_M/\omega_{\text{ex}} \left[\omega_{\text{q-AFM}}^2 - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}\right]}{\left[\omega_{\text{q-AFM}}^2 - \omega^2\right] - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}}, & \chi_{zz} &= \frac{2\omega_M/\omega_{\text{ex}} \left[\omega_{\text{q-FM}}^2 - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}\right]}{\left[\omega_{\text{q-FM}}^2 - \omega^2\right] - i\alpha\omega\omega_{\text{ex}}}.\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned}\omega_{\text{q-FM}}^2 &= \omega_0 \cdot (\omega_0 + \omega_{\text{dmi}}) + \omega_u \cdot \omega_{\text{ex}} + c_s^2 \cdot k^2, \\ \omega_{\text{q-AFM}}^2 &= \omega_{\text{dmi}} \cdot (\omega_0 + \omega_{\text{dmi}}) + (\omega_u + \omega_h) \cdot \omega_{\text{ex}} + c_s^2 \cdot k^2.\end{aligned}\quad (7)$$

В (6) и (7) введены следующие обозначения: $\omega_0 = \gamma H_0$, $\omega_M = \gamma M_s$, $\omega_{\text{ex}} = 2\gamma H_{\text{ex}}$, $\omega_{\text{dmi}} = \gamma H_{\text{dmi}}$, $\omega_u = \gamma H_u$, $\omega_h = \gamma H_h$, $c_s = \sqrt{2\gamma H_{\text{ex}} \cdot \gamma(2A_{\text{ex}}^{\text{FM}}/(\mu_0 \cdot M_s))}$ – скорость спиновых волн в антиферромагнетике.

1.2. Эквивалентная электрическая схема линии передачи на антиферромагнитной плёнке. Будем считать, что длина антенны l_y намного меньше длины электромагнитной волны, распространяющейся вдоль антенны. Благодаря этому допущению линию передачи на антиферромагнитной плёнке можно описывать эквивалентной схемой на сосредоточенных, а не на распределённых элементах [23], изображение которой представлено на рис 2. Обозначим через Z_{00} полное сопротивление приемной антенны, а через Z_{11}, Z_{22} – полные сопротивления возбуждающих антенн. Сопротивление $Z_{00} = U_0/i_0$ можно записать в виде

$$Z_{00} = R_{\Omega}^0 + V_{\text{ind}}/i_0, \quad (8)$$

где R_{Ω}^0 – омическое сопротивление материала антенны – детектора, а V_{ind} – напряжение, индуцированное на ней. Из уравнения Максвелла – Фарадея можно получить выражение для V_{ind} в виде $V_{\text{ind}} = -i\omega\Phi$, где $\Phi = \Phi_0 + \Phi_m$ – полный магнитный поток. Он складывается из потока Φ_0 , возникающего из-за тока, и Φ_m , появляющегося в результате распространения спиновых волн в антиферромагнитной пленке.

Выразив Φ через собственную индуктивность L_0 выходной антенны, а также активное и реактивное сопротивления, получим полный импеданс приемной антенны в виде

$$Z_{00} = -i\omega L_0 + Z_0, \quad (9)$$

где $Z_0 = R_{\Omega}^0 - R_m^0 - iX_m^0$. Активное R_m^0 и реактивное X_m^0 сопротивления записываются следующим образом [23]

$$\begin{aligned}R_m^0 &= \frac{\omega\mu_0 L_z L_y}{2\pi} \int \mathbf{h}_{ac}(k)^T \hat{\chi}_{\omega}''(k) \mathbf{h}_{ac}(k) dk, \\ X_m^0 &= \frac{\omega\mu_0 L_z L_y}{2\pi} \int \mathbf{h}_{ac}(k)^T \hat{\chi}_{\omega}'(k) \mathbf{h}_{ac}(k) dk.\end{aligned}\quad (10)$$

Здесь $\hat{\chi}_{\omega}'$ и $\hat{\chi}_{\omega}''(k)$ – действительная и мнимая части восприимчивости $\hat{\chi} = \chi_{\omega}' - i\chi_{\omega}''$ (5). В формулах (10) $\mathbf{h}_{ac}(k) = 1/(kl_x) \cdot \sin(kl_x/2) \cdot \mathbf{e}_k$ пространственный Фурье-образ микроволнового магнитного поля, генерируемого возбуждающими антеннами [23]. При пропускании тока через каждую из таких антенн, на второй антенне также индуцируется напряжение. Поэтому их полные сопротивления Z_{11} и Z_{22} вычисляются аналогично Z_{00} (см. формулу (9)). Между каждой парой антенн существует взаимная индуктивность, которая зависит не только от поля антенны и тензора восприимчивости, но также и от расстояния между

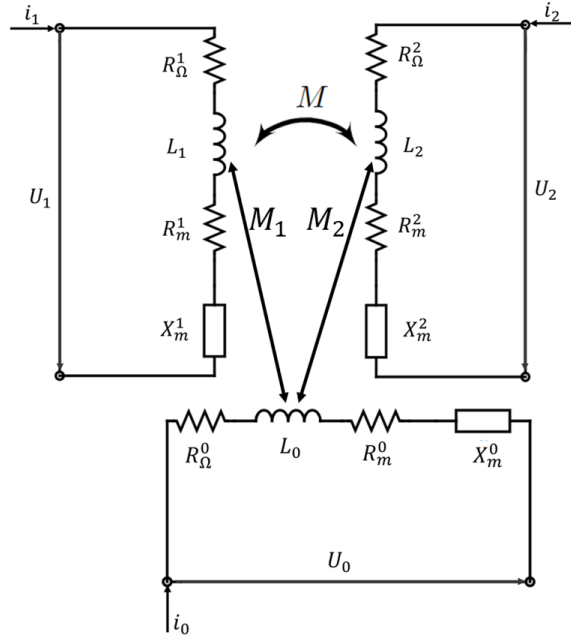


Рис. 2. Электрическая схема, эквивалентная фазовому компаратору спиновых волн.

Fig. 2. Electrical circuit equivalent to a spin wave phase comparator

антеннами. Через M обозначена индуктивность между возбуждающими антеннами, через M_1 – индуктивность между левой возбуждающей и приемной, а через M_2 – индуктивность между правой возбуждающей и приемной. Так как возбуждающие антенны имеют одинаковые размеры, то и Фурье-образы полей $\mathbf{h}_{ac}(k)$ этих антенн тоже одинаковы с точностью до фазовых множителей вида e^{ikl} , где l расстояние между антеннами. Соответственно для M расстояние $l = D$, для M_1, M_2 учитываем $l = x, D - x$ соответственно. Таким образом, индуктивности M, M_1, M_2 принимают следующий вид [23]

$$\begin{aligned} M &= \frac{\mu_0 L_z L_y}{2\pi} \int e^{ikD} \mathbf{h}_{ac}(k)^T \hat{\chi}_\omega(k) \mathbf{h}_{ac}^*(k) dk, \\ M_1 &= \frac{\mu_0 L_z L_y}{2\pi} \int e^{ikx} \mathbf{h}_{ac}(k)^T \hat{\chi}_\omega(k) \mathbf{h}_{ac}^*(k) dk, \\ M_2 &= \frac{\mu_0 L_z L_y}{2\pi} \int e^{ik(D-x)} \mathbf{h}_{ac}(k)^T \hat{\chi}_\omega(k) \mathbf{h}_{ac}^*(k) dk, \end{aligned} \quad (11)$$

где D – расстояние между центрами возбуждающих антенн (рис. 1). Таким образом, на основе анализа, выполненного в данном разделе, получена эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами (рис. 2).

1.3. Дискриминационная характеристика фазового компаратора. Рассмотрим полученную эквивалентную схему на сосредоточенных элементах (рис. 2). В этой схеме i_0, i_1, i_2 это силы микроволновых токов, протекающих по антеннам, а $U_1 = V_1 e^{-i(\omega t + \varphi_1)}$ и $U_2 = V_2 e^{-i(\omega t + \varphi_2)}$ – напряжения входных сигналов, где V_1, V_2 и φ_1, φ_2 это вещественные амплитуды и фазы этих сигналов соответственно. Будем искать выходное напряжение на приемной антенне как функцию амплитуд и фаз входных колебаний

$$U_0 = f(V_1, V_2, \varphi_1, \varphi_2). \quad (12)$$

Запишем дифференциальные уравнения Кирхгофа для каждой части эквивалентной схемы. Пусть $p = d/dt = -i\omega$ – оператор дифференцирования. Тогда получим систему уравнений следующего вида

$$\begin{cases} U_1 = (pL_1 + Z_1)i_1 - pMi_2 - pM_1i_0, \\ U_2 = -pMi_1 + (pL_2 + Z_2)i_2 - pM_2i_0, \\ U_0 = -pM_1i_1 - pM_2i_2 + (pL_0 + Z_0)i_0. \end{cases} \quad (13)$$

Рассмотрим режим холостого хода $i_0 = 0$. Тогда (13) можно преобразовать к виду

$$\begin{cases} U_1 = (pL_1 + Z_1)i_1 - pMi_2, \\ U_2 = -pMi_1 + (pL_2 + Z_2)i_2, \\ U_0 = -pM_1i_1 - pM_2i_2. \end{cases} \quad (14)$$

Из первых двух уравнений системы (14) найдем входные токи i_1 и i_2 считая, что $L_1 = L_2 = L$ и $Z_1 = Z_2 = Z$. Получим

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\det \hat{Z}} \begin{pmatrix} pL + Z & pM \\ pM & pL + Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где $\det \hat{Z} = (pL + Z)^2 - (pM)^2$. Подставляя токи из (15) в третье уравнение системы (14), получим выражение для выходного напряжения U_0 на приемной антенне

$$U_0 = -\frac{pM_1 \cdot ((pL + Z) \cdot U_1 + pM \cdot U_2) + pM_2 \cdot (pMU_1 + (pL + Z) \cdot U_2)}{(pL + Z)^2 - (pM)^2}. \quad (16)$$

Пусть $\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = 0$ и отношение амплитуд входных колебаний $V_2/V_1 = n$. Тогда, после подстановки выражений для напряжений в (16) получим следующее выражение для U_0

$$\begin{aligned} U_0 = & -V_1 \frac{pM_1 \cdot ((pL + Z) \cdot (\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)) + pM \cdot n)}{(pL + Z)^2 - (pM)^2} e^{-i\omega t} \\ & - V_1 \frac{pM_2 \cdot (pM \cdot (\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)) + (pL + Z) \cdot n)}{(pL + Z)^2 - (pM)^2} e^{-i\omega t} = V_0 e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$V_0 = pV_1 \frac{(pM_2M + M_1 \cdot (pL + Z)) \cdot (\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)) + n(pM_1M + M_2(pL + Z))}{(pM)^2 - (pL + Z)^2}. \quad (18)$$

Модуль комплексной величины V_0 характеризует амплитуду напряжения на приемной антенне.

1.4. Микромагнитное моделирование. Для проверки теоретических расчетов было проведено микромагнитное моделирование в программном пакете *BORIS* [24]. Расчетная область представляла собой одномерную цепочку из $N_x = 4096$ узлов с шагом $\Delta x = L_x/N_x = 20\text{мкм}/4096 \approx 4.9\text{ нм}$. Пренебрежение пространственным разбиением вдоль толщины и ширины волновода отвечает приближению тонкой и неограниченной в плоскости XOY антиферромагнитной пленки. Для возбуждения спиновых волн переменные магнитные поля вида $\mathbf{h}_{r,l} = h_0 \sin(\omega t + \varphi_{r,l}) \mathbf{e}_x$ задавались в прикраевых областях размером $l_x = 0.25\text{ мкм}$. Для $\mathbf{h}_r$ такая область была сдвинута на $d = l_x$ от правого конца моделируемой цепочки, а для $\mathbf{h}_l$ на то же расстояние от левого конца. Во время расчетов полагалось, что $\varphi_l = 0$, а φ_r изменялось от 0 до 2π с шагом $\pi/6$. Для каждого значения φ_r

динамика намагниченности рассчитывалась для отрезка времени в 5 нс. Параметры материала соответствовали гематиту $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [25]. Намагниченность насыщения $M_s = 8.4 \cdot 10^5$ А/м, поле антиферромагнитного обмена $\mu_0 H_{\text{ex}} = 1100$ Т, поле анизотропии типа легкая ось $\mu_0 H_u = 6 \cdot 10^{-5}$ Т, поле анизотропии типа трудная ось $H_h = 14 \cdot 10^{-3}$ Т, поле Дзялошинского-Мория $\mu_0 H_{\text{dmi}} = 2.7$ Т, обменная константа $A_{\text{ex}} = 6.7 \cdot 10^{-12}$ Дж/м, коэффициент затухания $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$. Расчеты проводились при внешнем постоянном магнитном поле $B_0 = 10$ мТл и частоте $f = \omega / (2\pi) = 20$ ГГц.

2. Результаты

Рассмотрим зависимости выходного напряжения от пространственного расположения приемной антенны при различных фазах входных сигналов, показанные на рис. 3. Результаты моделирования визуально повторяют построенную по теории кривую в нормированном масштабе. Для простоты восприятия амплитуда, полученная при обработке данных моделирования, отображена только для каждого 10 узла. Отметим, что для центрального положения приемной антенны ($X = 0$) и нулевого сдвига фаз амплитуда $|V_0|$ оказывается максимальна за счет интерференции спиновых волн, пришедших в эту координату в фазе. Соответственно, для сдвига фаз входных источников равного π происходит гашение амплитуды колебаний магнитных моментов. Однако, для $X \neq 0$ гашения не наблюдается. Действительно, у антиферромагнетика есть собственное затухание и амплитуда спиновой волны, возбужденной левым источником, для точек из области $X > 0$ оказывается меньше чем у волн от правого источника в этой же области, и, следовательно, полного гашения не наблюдается. Рассмотрим дискриминационную характеристику исследуемого фазового

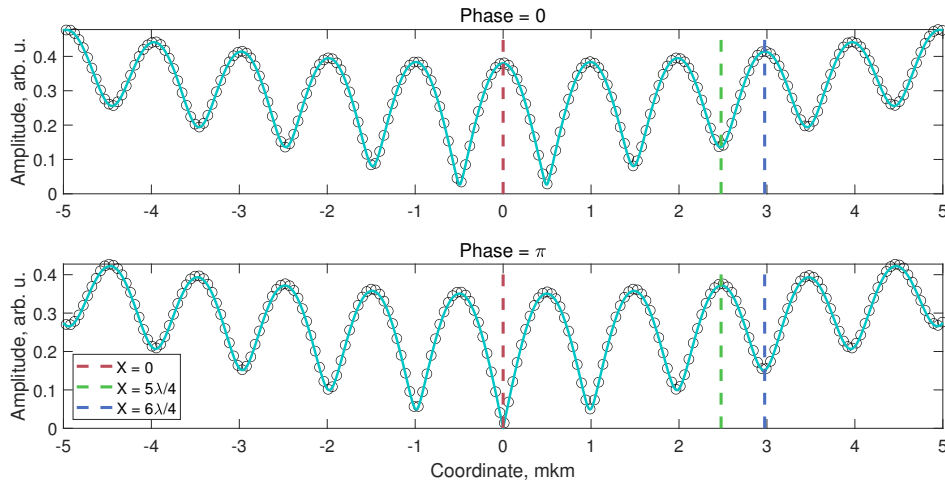


Рис. 3. Зависимости амплитуды выходного напряжения от координаты при разностях фаз входных колебаний 0 и π . Круги отражают результаты микромагнитного моделирования, а сплошная линия построена при помощи теоретических расчетов.

Fig. 3. Dependences of the amplitude of the output voltage on the coordinate at the phase differences of the input oscillations 0 and π . The circles reflect the results of micromagnetic simulations, and the solid line is plotted using theoretical calculations.

компаратора для положений приемной антенны $X = 5\lambda/4$ и $X = 6\lambda/4$, где $\lambda \approx 2$ мкм - длина спиновой волны в гематите на частоте 20 ГГц (см. рис. 4). Сдвиг на нечетное число четверть волн привел к тому, что в отличие от случаев $X = 0$, максимум дискриминационной характеристики наблюдаем в случае сдвига фаз равного π . Кроме того, видно что

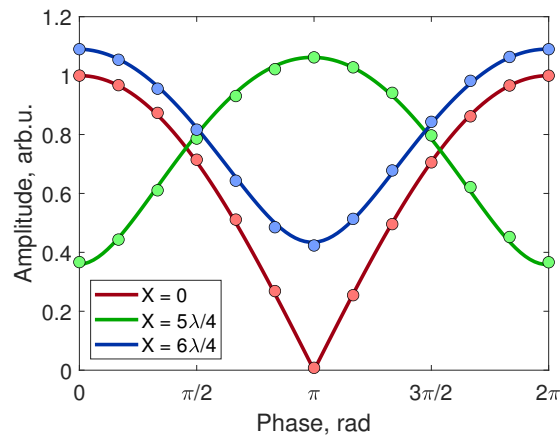


Рис. 4. Дискриминационные характеристики фазового компаратора при различных положениях приемной антенны.

Fig. 4. Discriminative characteristics of the phase comparator at different positions of the receiving antenna.

разница между амплитудами для $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$ при удалении от центра уменьшилась, что объяснено наличием собственного затухания антиферромагнетика. Следовательно, для наиболее эффективной работы фазового компаратора желательно располагать детектор по середине между входными антеннами. Смещение от такого центрального положения помимо снижения упомянутой разности амплитуд приведет и к отличному от нуля значению напряжения в минимуме дискриминационной характеристики.

Заключение

В данной работе описана структура фазового компаратора спиновых волн на основе антиферромагнитной пленки. Получено выражение для дискриминационной характеристики компаратора как функции амплитуд и фаз входных микроволновых сигналов. Также, построена зависимость амплитуды выходного напряжения от расположения приемной антенны. В работе было показано, что для нахождения дискриминационной характеристики при произвольном расположении приемной антенны можно использовать эквивалентную электрическую схему на сосредоточенных элементах. Для верификации теоретически полученных результатов было проведено микромагнитное моделирование распространения спиновых волн в антиферромагнитной пленке. Результаты численного и теоретического расчетов качественно совпадают. Анализ полученных зависимостей показал, что работа компаратора будет более эффективной, если приемная антенна расположена посередине между возбуждающими антеннами: в этом случае разница амплитуд в фазе и противофазе будет наибольшей. Результаты, полученные в работе, могут иметь практическое значение при проектировании магнанных устройств для обработки данных, логических элементов а также датчиков магнитных полей.

Список литературы

1. Никитов С. А., Сафин А. Р., Калябин Д. В., Садовников А. В., Бегинин Е. Н., Логунов М. В., Морозова М. А., Одинцов С. А., Осокин С. А., Шараевская А. Ю., Шараевский Ю. П., Кирилюк А. И. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // УФН. 2020. Т. 190. С. 1009—1040. DOI: 10.3367/UFNe.2019.07.038609.
2. Shao Q., Li P., Liu L., Yang H., Fukami S., Razavi A., Wu H., Wang K., Freimuth F.,

- Mokrousov Y., Stiles M. D., Emori S., Hoffmann A., Åkerman J., Roy K., Wang J.-P., Yang S.-H., Garello K., Zhang W.* Roadmap of Spin–Orbit Torques // *IEEE Trans. Magn.* 2021. Vol. 57. no. 7. P. 1–39. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3078583.
3. *Фетусов Ю. К., Сузов Ф. С.* Спинтроника: физические основы и устройства // *РЭН-СИТ*. 2018. Т. 10, № 3. С. 343–356.
 4. *Gattringer M., Abert C., Wang Q., Chumak A. V., Suess D.* Offset-Free Magnetic Field Sensor Based on a Standing Spin Wave // *Phys. Rev. Appl.* 2023. Vol. 20. 044083.
 5. *Vysotskii S., Kozhevnikov A., Balinskiy M., Khitun A., Filimonov Y.* Giant sensitivity to magnetic field variation in the spin wave interferometer based on the system of exchange-coupled films of yttrium iron garnet // *J. Appl. Phys.* 2022. Vol. 132. no. 8. 084504.
 6. *Rumyantsev S., Balinskiy M., Kargar F., Khitun A., Balandin A. A.* Amplitude and Phase Noise of Magnons // *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 114. no. 9. 090601. DOI: 10.48550/arXiv.1909.00085.
 7. *Самойленко Д., Габриелян Д. А., Сафин А. Р., Никитов С. А.* Магнон-фотонная гибридизация мод в структуре электромагнитный резонатор/ферромагнитная пленка // *Письма в ЖЭТФ*. 2025. Т. 122, № 9. С. 572–579. DOI: 10.31857/S0370274X25110082.
 8. *Dols M., Sharma S., Bechara L., Blanter Y. M., Kounalakis M., Kusminskiy S. V.* Magnon-mediated quantum gates for superconducting qubits // *Phys. Rev. B*. 2024. Vol. 110. 104416. DOI: 10.1103/PhysRevB.110.104416.
 9. *Fukami M., Candido D. R., Awschalom D. D., Flatté M. E.* Opportunities for Long-Range Magnon-Mediated Entanglement of Spin Qubits via On- and Off-Resonant Coupling // *PRX Quantum*. 2021. Vol. 2. 040314. DOI: 10.1103/PRXQuantum.2.040314.
 10. *Grollier J., Querlioz D., Camsari K., Everschor-Sitte K., Fukami S., Stiles M. D.* Neuromorphic spintronics // *Nat. Electron.* 2020. Vol. 3. no. 7. P. 360–370. DOI: 10.1038/s41928-019-0360-9.
 11. *Stuart W., Kostylev M., Ustinov A. B., Kalinikos B. A.* Implementing a Magnonic Reservoir Computer Model Based on Time-Delay Multiplexing // *Phys. Rev. Appl.* 2021. Vol. 15. 064060. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064060.
 12. *Ya X., H. Chen, S. Oyabu, B. Peng, H. Otsuki, T. Tanaka, and K. Matsuyama* Interferometric properties of standing spin waves and the application to a phase comparator // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 117. 17A719. DOI: 10.1063/1.4914366.
 13. *Han J., Cheng R., Liu L., Ohno H., Fukami S.* Coherent antiferromagnetic spintronics // *Nat. Mater.* 2023. Vol. 22. no. 6. P. 684–695. DOI: 10.1038/s41563-023-01492-6.
 14. *Самойленко К. Д., Мутрофанова А. Ю., Сафин А. Р., Никитов С. А.* Влияние топологии связанных антиферромагнитных осцилляторов на их взаимную синхронизацию // *Известия вузов. ПНД*. 2025. Т. 33, № 3. С. 307–321. DOI: 10.18500/0869-6632-003154.
 15. *Kanj A., Gomonay H., Boventer I., Bortolotti P., Cros V., Anane A., Lebrun R.* Antiferromagnetic magnon spintronic based on nonreciprocal and nondegenerated ultra-fast spin-waves in the canted antiferromagnet α -Fe₂O₃ // *Sci. Adv.* 2023. Vol. 9. eadh1601. DOI: 10.1126/sciadv.adh1601.
 16. *Hortensius J., Afanasiev D., Matthiesen M., Leenders R., Citro R., Kimel A., Mikhaylovskiy R., Ivanov B. A., Caviglia A. D.* Coherent spin-wave transport in an antiferromagnet // *Nat. Phys.* 2021. Vol. 17. no. 9. P. 1001–1006.
 17. *Velikov L. V., Rudashevskii E. G.* Antiferromagnetic Resonance in Hematite in the Weakly Ferromagnetic State // *JETP*. 1969. Vol. 29. no. 5. P. 836.
 18. *Гуревич А.; Г., Мелков Г. А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит. 1994. 464 с.
 19. *Landau L., Lifshitz E.* On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies // *Phys. Z. Sowjetunion*. 1935. Vol. 8. P. 101.
 20. *Gilbert T. L.* A Phenomenological Theory of Damping in Ferromagnetic Materials // *IEEE Trans. Magn.* 2004. Vol. 40. no. 6. P. 3443–3449.

21. *Gomonay O. V., Loktev V. M.* Using generalized Landau-Lifshitz equations to describe the dynamics of multi-sublattice antiferromagnets induced by spin-polarized current // *Journal of Low Temp. Phys.* 2015. Vol. 41. no. 9. P. 698–704.
22. *Moriya T.* Anisotropic Superexchange Interaction and Weak Ferromagnetism // *Physical Review.* 1960. Vol. 120. no. 1, P. 91–98.
23. *Vanderveken F., Tyberkevych V., Talmelli G., Soree B., Ciubotaru F., Adelman C.* Lumped circuit model for inductive antenna spin-wave transducers // *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12. no. 1. 3796. DOI: 10.48550/arXiv.2110.01318.
24. *Lepadatu S.* Boris computational spintronics—High performance multi-mesh magnetic and spin transport modeling software // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 128. no. 24. 243902.
25. *Brehm V., Gomonay O., Lepadatu S., Kläui M., Sinova J., Brataas A., Qaiumzadeh A.* Micromagnetic study of spin transport in easy-plane antiferromagnetic insulators // *Phys. Rev. B.* 2023. Vol. 107. 184404. DOI: 10.1103/PhysRevB.107.184404.

References

1. Nikitov SA, Safin AR, Kalyabin DV, Sadovnikov AV, Beginin EN, Logunov MV, Morozova MA, Odintsov SA, Osokin SA, Sharaevskaya AY, Sharaevsky YuP, Kirilyuk AI. Dielectric magnonics: from gigahertz to terahertz. *Phys. Usp.* 2020;63(10):945–974.
2. Shao Q., Li P., Liu L., Yang H., Fukami S., Razavi A., Wu H., Wang K., Freimuth F., Mokrousov Y., Stiles M. D., Emori S., Hoffmann A., Åkerman J., Roy K., Wang J.-P., Yang S.-H., Garello K., Zhang W. Roadmap of Spin–Orbit Torques // *IEEE Trans. Magn.* 2021. Vol. 57. no. 7. P. 1–39. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3078583.
3. Fetisov YV, Sigov AS. Spintronics: Physical foundations and devices. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii.* 2018;10(3):343–356.
4. Gattringer M, Abert C, Wang Q, Chumak AV, Suess D. Offset-Free Magnetic Field Sensor Based on a Standing Spin Wave. *Phys. Rev. Appl.* 2023;20:044083.
5. Vysotskii S, Kozhevnikov A, Balinskiy M, Khitun A, Filimonov Y. Giant sensitivity to magnetic field variation in the spin wave interferometer based on the system of exchange-coupled films of yttrium iron garnet. *J. Appl. Phys.* 2022;132(8):084504.
6. Rumyantsev S, Balinskiy M, Kargar F, Khitun A, Balandin AA. Amplitude and Phase Noise of Magnons. *J. Appl. Phys.* 2019;114(9):090601. DOI: 10.48550/arXiv.1909.00085.
7. Samoilenko KD, Gabrielyan DA, Safin AR, Nikitov SA. Magnon–Photon Mode Hybridization in an Electromagnetic Resonator/Ferromagnetic Film Structure. *JETP Lett.* 2025;122(9):592–599. DOI: 10.1134/S0021364025608188.
8. Dols M., Sharma S., Bechara L., Blanter Y. M., Kounalakis M., Kusminskiy S. V. Magnon-mediated quantum gates for superconducting qubits // *Phys. Rev. B.* 2024. Vol. 110. 104416. DOI: 10.1103/PhysRevB.110.104416
9. Fukami M, Candido DR, Awschalom DD, Flatté ME. Opportunities for Long-Range Magnon-Mediated Entanglement of Spin Qubits via On- and Off-Resonant Coupling. *PRX Quantum.* 2021;2:040314. DOI: 10.1103/PRXQuantum.2.040314.
10. Grollier J, Querlioz D, Camsari KY, Everschor-Sitte K, Fukami S, Stiles MD. Neuromorphic spintronics. *Nat. Electron.* 2020;3(7):360–370. DOI: 10.1038/s41928-019-0360-9.
11. Stuart W, Kostylev M, Ustinov AB, Kalinikos BA. Implementing a Magnonic Reservoir Computer Model Based on Time-Delay Multiplexing. *Phys. Rev. Appl.* 2021;15:064060. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064060.
12. Ya X, Chen H, Oyabu S, Peng B, Otsuki H, Tanaka T, Matsuyama K. Interferometric properties of standing spin waves and the application to a phase comparator. *J. Appl. Phys.* 2015;117:17A719. DOI: 10.1063/1.4914366.

13. Han J, Cheng R, Liu L, Ohno H, Fukami S. Coherent antiferromagnetic spintronics. *Nat. Mater.* 2023;22(6):684–695.DOI: 10.1038/s41563-023-01492-6.
14. Samoylenko KD, Mitrofanova AY, Safin AR, Nikitov SA. Influence of the topology of coupled antiferromagnetic oscillators on their mutual synchronization. *Izvestiya VUZ. Appl. Nonlinear Dyn.* 2025;33(3):307–321.DOI: 10.18500/0869-6632-003154. (in Russian)
15. Kanj A, Gomonay H, Boventer I, Bortolotti P, Cros V, Anane A, Lebrun R. Antiferromagnetic magnon spintronic based on nonreciprocal and nondegenerated ultra-fast spin-waves in the canted antiferromagnet α -Fe₂O₃. *Sci. Adv.* 2023;9:eadh1601.DOI: 10.1126/sciadv.adh1601.
16. Hortensius JR, Afanasiev D, Matthiesen M, Leenders R, Citro R, Kimel AV, Mikhaylovskiy RV, Ivanov BA, Caviglia AD. Coherent spin-wave transport in an antiferromagnet. *Nat. Phys.* 2021;17(9):1001–1006.
17. Velikov LV, Rudashevskii EG. Antiferromagnetic Resonance in Hematite in the Weakly Ferromagnetic State. *JETP.* 1969;29(5):836.
18. Gurevich AG, Melkov GA. *Magnetization Oscillations and Waves.* Moscow: Fizmatlit. 1994. 464 p. (in Russian)
19. Landau L, Lifshitz E. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjetunion.* 1935;8:101.
20. Gilbert TL. A Phenomenological Theory of Damping in Ferromagnetic Materials. *IEEE Trans. Magn.* 2004;40(6):3443–3449.
21. Gomonay OV, Loktev VM. Using generalized Landau-Lifshitz equations to describe the dynamics of multi-sublattice antiferromagnets induced by spin-polarized current. *Journal of Low Temp. Phys.* 2015;41(9):698–704.
22. Moriya T. Anisotropic Superexchange Interaction and Weak Ferromagnetism. *Physical Review.* 1960;120(1):91–98.
23. Vanderveken F, Tyberkevych V, Talmelli G, Soree B, Ciubotaru F, Adelmann C. Lumped circuit model for inductive antenna spin-wave transducers. *Scientific Reports.* 2022;12(1):3796. DOI: 10.48550/arXiv.2110.01318.
24. Lepadatu S. Boris computational spintronics—High performance multi-mesh magnetic and spin transport modeling software. *J. Appl. Phys.* 2020;128(24):243902.
25. Brehm V, Gomonay O, Lepadatu S, Kläui M, Sinova J, Brataas A, Qaiumzadeh A. Micromagnetic study of spin transport in easy-plane antiferromagnetic insulators. *Phys. Rev. B.* 2023;107:184404.DOI: 10.1103/PhysRevB.107.184404.



Архипова Ольга Юрьевна — аспирант кафедры электроники Московского физико-технического института. С 2022 года работает в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в должности инженера. Научные интересы — математическое моделирование, волновые явления, спинтроника.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: olyuar@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3078-531X
AuthorID (eLibrary.Ru): 1317779



Матвеев Артем Андреевич — аспирант кафедры электроники Московского физико-технического института. С 2022 года работает в ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН в должности инженера. Научные интересы — нелинейная динамика, микромагнитное моделирование, спинтроника.

Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: maa.box@yandex.ru
ORCID: 0009-0006-8670-5432
AuthorID (eLibrary.Ru): 1323698



Сафин Ансар Ризаевич — доктор физико-математических наук (2023), профессор РАН. Руководитель лаборатории «Антиферромагнитная спинтроника» Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, профессор кафедры «Формирование и обработка радиосигналов» Национального исследовательского университета Московского энергетического института, Россия. Автор более 50 научных публикаций. Научные интересы — радиофизика и электроника, физика магнитных явлений и спинтроника.

Россия, 125009, г.Москва, ул. Моховая, 11, стр.7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: arsafin@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6507-6573
AuthorID (eLibrary.Ru): 525831



Никитов Сергей Аполлонович — академик РАН (2022), директор Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия, доктор физико-математических наук (1991), профессор (1995) Московского физико-технического института, г. Долгопрудный, Россия. Автор более 400 научных работ. Научные интересы — радиофизика и физическая электроника; физика магнитных явлений; спинтроника и магноника.

Россия, 125009, г.Москва, ул. Моховая, 11, стр.7
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
E-mail: nikitov@cplire.ru
ORCID: 0000-0002-2413-7218
AuthorID (eLibrary.Ru): 121644