

05,08

Демультиплексирования спиновых волн в структуре ферромагнитная пленка|сегнетоэлектрик|магнетонный кристалл

© М.А. Морозова¹, О.В. Матвеев¹, Ю.П. Шараевский¹, С.А. Никитов^{1,2}

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

E-mail: mamorozovama@yandex.ru

Поступила в Редакцию 23 октября 2024 г.

В окончательной редакции 26 октября 2024 г.

Принята к публикации 27 октября 2024 г.

Статья посвящена принципу мультимплексирования/демультимплексирования микроволновых сигналов на основе структуры ферромагнитная пленка|сегнетоэлектрик|магнетонный кристалл. Обнаружено формирование пяти запрещенных зон — полос непропускания спиновых волн в такой структуре. Показано, что в зависимости от частоты, сигнал выходит через разные порты структуры, т.е. имеет место частотное разделение каналов. Диапазон частот, поступающий на данный порт, определяется величиной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя (которое определяется приложенным электрическим полем) и величиной магнитного поля, приложенного к ферромагнитным слоям.

Ключевые слова: магнетоника, мультиферроики, частотное разделение каналов, спиновый ток.

DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59328.275

1. Введение

Одними из наиболее перспективных материалов, в которых возможно распространение спиновых волн, являются мультиферроидные материалы, свойствами спиновых волн в которых можно управлять с помощью не только магнитного, но и электрического поля [1,2]. Искусственные мультиферроики включают ферромагнитные и сегнетоэлектрические слои и проявляют как свойства, характерные для каждого из слоев в отдельности, так и новые свойства, связанные с взаимодействием магнитной и электрической подсистем [3,4]. При больших значениях диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, который зависит от приложенного электрического поля, электромагнитные волны в сегнетоэлектрике оказываются сильно замедленными. В этом случае гибридные электромагнитно-спиновые волны (ГЭСВ) возникают в структуре ферромагнитная пленка|сегнетоэлектрик (ФП|СЭ — FF|FE) на частотах, близких к частоте фазового синхронизма между электромагнитной (ЭМВ) и магнитостатической (МСВ) волнами [5,6].

В свою очередь, периодические структуры на основе мультиферроидных материалов — магнетонные мультиферроидные кристаллы, за счет существования брэгговских резонансов открывают большие возможности по управлению волнами, по сравнению с однородными структурами. Брэгговские резонансы в таких структурах наблюдаются на длинах волн, удовлетворяющих как условию Брэгга, так и условию фазового синхронизма магнитостатических и электромагнитных волн [7–9].

На частотах, соответствующих брэгговским резонансам, формируются запрещенные зоны (ЗЗ, band gap — BG) — полосы непропускания в спектре ГЭСВ [9,10]. Данный эффект позволяет рассматривать такие структуры в качестве базового элемента фильтрации спиноволнового сигнала с электрическим и магнитным управлением [7,8,10–12]. Однако следует ожидать, что наличие запрещенных зон и несимметричность структуры (например, для структуры с магнетонным кристаллом (МК, МС) — ФП|СЭ|МК) откроют более широкие возможности применения такой структуры для функциональной обработки сигналов. В настоящей работе рассматривается возможность частотного разделения сигнала между слоями структуры — демультимплексирования.

Заметим, что одиночный МК также позволяет выделять сигнал на частотах вне ЗЗ. Однако в этом случае сигнал на частотах ЗЗ выходит через входной порт структуры, и его сложно отделить от входного сигнала. Как было показано в [13], в структуре МК-1|диэлектрик|МК-2 также возможно демультимплексирование. Однако механизм в этом случае принципиально отличается: сигнал на частотах ЗЗ поступает во второй слой и отражается от него, в то время, как ожидается, в структуре ФП|СЭ|МК сигнал на частоте ЗЗ не может перекачаться во второй слой (в данном случае — МК), так как условия распространения в слое ФП более „благоприятные“ (отсутствует решетка). В результате в структуре МК-1|диэлектрик|МК-2 разделяемые сигналы на разных частотах распространяются в одном слое в разных направлениях и выходят через разные порты. В структуре ФП|СЭ|МК разделяемые сигналы на

разных частотах будут распространяться в разных слоях (ФП и МК соответственно) в одном направлении и выходят через разные порты, что позволяет эффективнее разделять сигналы.

Известно также, что в слоистой структуре на основе ФП-1|диэлектрик|ФП-2 также существует возможность частотного разделения каналов [14,15]. Однако механизм частотного разделения в данном случае принципиально отличается от механизма для периодических структур и связан и зависимостью длины перекачки от частоты. Недостатком использования структуры ФП-1|диэлектрик|ФП-2, по сравнению со структурой ФП|СЭ|МК, является то, что эффективно разделяться будут только сигналы, для которых длина перекачки отличается вдвое. Использование Y-образного волновода также позволяет осуществлять частотное разделение сигналов за счет действия электрического тока в металлической подложке, однако в этом случае для реализации разделения необходимо менять направление магнитного поля [16]. В работах [17,18] предложен демультимплексор, основанный на магнотном переносе между двумя цепочками магнитных кластеров, соединенных резонансной структурой. В [19] было продемонстрировано, что можно генерировать и контролировать конфигурируемый наноканал с помощью управляемой напряжением магнитной анизотропии. Представлен переключатель (вкл/выкл), который является основой для реализации демультимплексоров с несколькими выходами, которые фильтруют спиновые волны с одинаковыми или разными частотами в зависимости от необходимости, а также с внешним магнитным полем или без него. В [20] теоретически предложен четырехканальный демультимплексор на магнитных волноводах, конструкция которого включает систему резонаторов. В работе [21] предложен магнотный демультимплексор, действие которого основано на резонансах Фано. Магнотные мультиферроидные кристаллы также обладают резонансными свойствами, а значит, могут быть полезны при создании демультимплексоров.

В настоящей работе получены волновые уравнения и дисперсионные соотношения для ГЭСВ в структуре ФП|СЭ|МК. Рассчитаны дисперсионные характеристики и коэффициенты пропускания ГЭСВ. Выявлен механизм мультиплексирования/демультимплексирования спин-волнового сигнала на основе такой структуры. Установлена возможность управления частотным разделением каналов с помощью электрического поля, приложенного к СЭ и магнитного поля, приложенного к ФП и МК.

2. Модель структуры и основные соотношения

Для начала рассмотрим слоистую структуру, состоящую из ферромагнитных пленок ФП-1 и ФП-2 толщины $d_{1,2}$ с намагниченностью насыщения $M_{0,1,2}$, разделенных

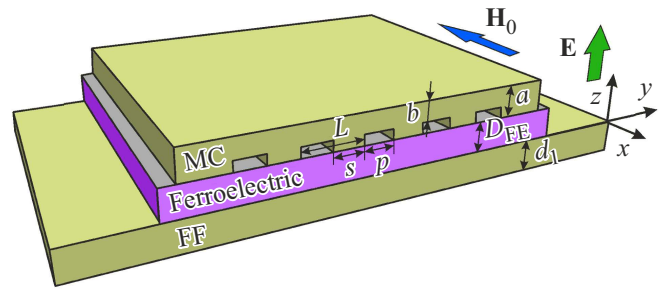


Рис. 1. Схема структуры ФП|СЭ|МК.

слоем СЭ толщиной D_{FE} . Внешнее магнитное поле \vec{H}_0 приложено касательно к поверхности пленок вдоль оси x , а к слою СЭ с диэлектрической проницаемостью ϵ приложено внешнее электрическое поле напряженности \vec{E} вдоль оси z . Структура бесконечна в направлении осей x и y (рис. 1).

Волновое уравнение для ГЭСВ в одной ФП толщиной d с намагниченностью насыщения M_0 , нагруженной слоем СЭ, имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 m}{\partial t^4} - \omega_{\perp}^2 \frac{\partial^2 m}{\partial t^2} + \omega_M^2 d \left(-jS \frac{1}{2} \frac{\partial^3}{\partial t^2 \partial y} - \frac{c^2}{\epsilon D_{FE}} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) m \\ - j \frac{2c^2}{\epsilon D_{FE}} \frac{\partial m}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 m}{\partial t^2} - \omega_{\perp}^2 \right) + \frac{\epsilon d \omega_M}{c^2} \left(\frac{\partial m}{\partial y} \right)^{-1} \\ \times \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) \right) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $m = m_x/M_0$ — нормализованная высокочастотная составляющая намагниченности, $S = \pm 1$ (знак „-“ относится к волне, распространяющейся в положительном направлении x , „+“ — в отрицательном направлении x), $\omega_{\perp}^2 = \omega_H(\omega_H + \omega_M)$, $\omega_H = \gamma H_0$, $\omega_M = 4\pi\gamma M_0$, γ — гиромагнитное отношение, c — скорость света. Последний член в уравнении (1)

$$\theta = \frac{\epsilon d \omega_M}{c^2} \left(\frac{\partial m}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) \right)$$

описывает связь между поверхностной магнотостатической волной (ПМСВ) в ФП и электромагнитной волной (ЭМВ) в СЭ.

Будем считать, что в структуре, состоящей из двух ФП, разделенных слоем СЭ, происходит возбуждение двух связанных ГЭСВ, одна из которых (ГЭСВ-1) распространяется в структуре ФП-1|СЭ, а вторая (ГЭСВ-2) в структуре ФП-2|СЭ. Связь между ГЭСВ осуществляется только через слой СЭ. В этом случае волновые уравнения для каждой ГЭСВ с амплитудами огибающей $m_{1,2}$, в отсутствие связи между ними, будут иметь вид, аналогичный уравнению (1), с точностью до замены $d \rightarrow d_{1,2}$, $\omega_M \rightarrow \omega_{M_{1,2}}$ соответственно. Тогда последнее

слагаемое в уравнении (1), записанном для ГЭСВ-1, имеет вид

$$\theta_1 = \frac{\varepsilon d_{1,2} \omega_{M_1}}{c^2} \left(\frac{\partial m}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_{M_1}}{2} \right) \right)$$

и определяет влияние ПМСВ, распространяющейся в ФП-1 на ЭМВ в СЭ (а также обратное влияние ЭМВ на МСВ). В структуре ФП-1|СЭ|ФП-2 на ЭМВ в СЭ будет также оказывать влияние на ПМСВ, распространяющаяся в ФП-2. Величина такого влияния будет определяться величиной связи между ПМСВ в ФП-2 и ЭМВ в СЭ. Связь между ПМСВ в ФП-2 и ЭМВ в СЭ, в свою очередь, описывается последним членом в уравнении (1), записанном для ГЭСВ-2 и имеющим вид

$$\theta_2 = \frac{\varepsilon d_{2,1} \omega_{M_2}}{c^2} \left(\frac{\partial m}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_{M_2}}{2} \right) \right).$$

Таким образом, взаимное влияние ГЭСВ-1 и ГЭСВ-2 будет определяться суперпозицией данных слагаемых в каждом из уравнений для ГЭСВ-1 и ГЭСВ-2.

С учетом сделанных предположений и уравнения (1) система волновых уравнений для структуры ФП-1|СЭ|ФП-2 будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^4 m_{1,2}}{\partial t^4} - \omega_{1,2}^2 \frac{\partial^2 m_{1,2}}{\partial t^2} \\ & + \omega_{M_{1,2}}^2 d_{1,2} \left(-jS \frac{1}{2} \frac{\partial^3}{\partial t^2 \partial y} - \frac{c^2}{\varepsilon D_{FE}} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) m_{1,2} \\ & - j \frac{2c^2}{\varepsilon D_{FE}} \frac{\partial m_{1,2}}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 m_{1,2}}{\partial t^2} - \omega_{1,2}^2 \right) + \frac{\varepsilon d_{1,2} \omega_{M_{1,2}}}{c^2} \\ & \times \left(\frac{\partial m_{1,2}}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m_{1,2}}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_{M_{1,2}}}{2} \right) \right) \\ & + \frac{\varepsilon d_{2,1} \omega_{M_{2,1}}}{c^2} \left(\frac{\partial m_{2,1}}{\partial y} \right)^{-1} \\ & \times \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(-\frac{\partial m_{2,1}}{\partial t} + j \left(\omega_H + \frac{\omega_{M_{2,1}}}{2} \right) \right) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Как следует из уравнения (2), при $\varepsilon \rightarrow 0$ выполняется предельный переход, и уравнения для ФП-1 и ФП-2 оказываются развязанными. Это связано с тем, что в данном случае ГЭСВ в слое СЭ не могут распространяться, связь между МСВ через слой СЭ пропадает, и таким образом, ПМСВ в ФП-1 и ФП-2 распространяются независимо. Заметим, что при построении данной модели не учитывалась связь между ПМСВ в ФП-1 и ФП-2 через микроволновые электромагнитные поля, а учитывалась связь через слой СЭ. Данный вид связи оказывается превалирующим при большой толщине СЭ ($D_{FE} > 10^2 \mu\text{m}$) и больших значениях ε ($\varepsilon > 10^3$), которые и будут рассматриваться далее.

На следующем этапе будем считать, что на поверхности ФП-2 создана периодическая система канавок глубиной Δ , расположенных с периодом L , p — ширина канавок, s — ширина столбиков, a — толщина пленки в области столбиков, b — толщина пленки в области канавок. В этом случае ФП-2 представляет собой МК. Толщину МК можно представить в виде периодической функции [22]:

$$d_{1,2} = d_{0,2} \left[1 + \delta_{d_{1,2}} \cos \left(\frac{2\pi}{L} y \right) \right], \quad (3)$$

где для МК-2 $\delta_d = \frac{2\Delta}{\pi d_{0,2}} \sin \left(\frac{\pi s}{L} \right)$, $d_{0,2} = b + \frac{\Delta s}{L}$ — эффективная толщина МК. Для ФП имеем $\Delta = 0$, тогда $\delta_d = 0$ и $d_{0,1} = d_1$.

Решение волнового уравнения (2) с помощью (3) может быть представлено в виде суммы пространственных гармоник [23]: $m = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[jk_n y]$, где A_n — комплексные амплитуды гармоник, k_n — постоянные распространения. В первой зоне Бриллюэна $0 \leq k_n L \leq 2\pi$, $n = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, будут учтены только нулевые гармоники прямых волн ($n = 0$) и „-1“-е волновые гармоники волн, отраженных от пространственных неоднородностей ($n = -1$). В таком случае решение волнового уравнения (1) может быть представлено в виде суммы прямой и отраженной волн:

$$m = A \exp[j(\omega t - k_0 y)] + B \exp[j(\omega t + k_{-1} y)], \quad (4)$$

где A и B — медленно меняющиеся комплексные амплитуды огибающих прямой и отраженной волн, k_0 — постоянная распространения нулевой гармоники, k_{-1} относится к „-1“-й гармонике, $\omega = 2\pi f$ — частота входного сигнала (несущая частота). Постоянные распространения k_0 и k_{-1} связаны условием Брэгга: $k_{-1} = -k_0 + 2\pi/L$.

Подставляя (3) и (4) в систему (2), получим систему уравнений для огибающих прямых и отраженных волн в исследуемой структуре в виде

$$\begin{cases} j \left(\frac{\partial A_{1,2}}{\partial t} + V_{1,2} \frac{\partial A_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta_{1,2,0} A_{1,2} + \chi_{1,2,0} A_{2,1} \\ \quad + \kappa_{1,2,0} B_{1,2} + \vartheta_{1,2,0} B_{2,1} = 0, \\ j \left(\frac{\partial B_{1,2}}{\partial t} - V_{1,2} \frac{\partial B_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta_{1,2,-1} B_{1,2} + \chi_{1,2,-1} B_{2,1} \\ \quad + \kappa_{1,2,-1} A_{1,2} + \vartheta_{1,2,-1} A_{2,1} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения для величин с индексом „1“ будут описывать ГЭСВ в ФП, а уравнения для величин с индексом „2“ — в МК. В уравнениях (5) $V_{1,2}$ — групповые скорости; $\chi_{1,2,0}$ — коэффициенты связи между прямой волной в ФП-1 (МК-2) и прямой волной в МК-2 (ФП-1); $\chi_{1,2,-1}$ — коэффициенты связи между отраженной волной в ФП-1 (МК-2) и отраженной волной в МК-2 (ФП-1); $\kappa_{1,2,0}$ — коэффициенты связи между прямой волной в ФП-1 (МК-2) и отраженной волной в ФП-1 (МК-2);

$\kappa_{1,2,-1}$ — коэффициенты связи между отраженной волной в ФП-1 (МК-2) и прямой волной в ФП-1 (МК-2); $\vartheta_{1,2,0}$ — коэффициенты связи между прямой волной в ФП-1 и отраженной волной в МК-2, а также между прямой волной в МК-2 и отраженной волной в ФП-1; $\vartheta_{1,2,-1}$ — коэффициенты связи между отраженной волной в ФП-1 и прямой волной в МК-2, а также между отраженной волной в МК-2 и прямой волной в ФП-1; $\eta_{1,2,0}$ — приравненные к нулю, представляют собой нормированные дисперсионные соотношения для прямых МСВ в однородных пленках 1 и 2; $\eta_{1,2,-1}$ — приравненные к нулю, представляют собой нормированные дисперсионные соотношения для отраженных МСВ в однородных пленках 1 и 2.

Коэффициенты в (5) имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 V_{1,2} &= \frac{\omega_{M_{1,2}}^2 d_{0,1,2}}{4\omega^3} \left(\frac{\omega^2}{2} + \frac{2c^2 k_{0,-1}}{\varepsilon D_{FE}} \right) \\
 &\quad + \frac{2c^2}{4\omega^3 \varepsilon D_{FE}} (\omega^2 + \omega_{\perp 1,2}^2) \\
 \eta_{1,2,0,-1} &= \frac{\Omega_{1,2,0,-1}^{FE}}{4\omega^3} \\
 \chi_{1,2,0,-1} &= \chi_{1,2} = -\frac{\varepsilon \omega_{M_{2,1}} d_{0,1,2} \omega^2}{c^2 k_0} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_{M_{2,1}}}{2} \right) \\
 \kappa_{2,0} &= \frac{\delta_d}{8\omega^3} \omega_{M_2} d_{0,1,2} \left(\frac{c^2 \omega_{M_2}}{\varepsilon D_{FE}} k_{-1}^2 - \frac{\omega_{M_2}}{2} \omega^2 k_{-1} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2 k_{-1}} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_{M_2}}{2} \right) \right) \\
 \kappa_{2,-1} &= \frac{\delta_d}{8\omega^3} \omega_{M_2} d_{0,1,2} \left(\frac{c^2 \omega_{M_2}}{\varepsilon D_{FE}} k_0^2 - \frac{\omega_{M_2}}{2} \omega^2 k_0 \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2 k_0} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_{M_2}}{2} \right) \right) \\
 \vartheta_{1,0} &= \frac{\delta_d}{2} \chi_{1,-1}, \quad \vartheta_{1,-1} = \frac{\delta_d}{2} \chi_{1,0} \\
 \kappa_{1,0,-1} &= 0, \quad \vartheta_{2,0,-1} = 0,
 \end{aligned} \right\} (6)$$

где компоненты $\Omega_{1,2,0}^{FE}$, приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные соотношения для прямой ГЭСВ и определяются соотношением $\Omega_{1,2,0}^{FE} = \Omega_{0,1,2} \Omega_0^E - \frac{\varepsilon d_{1,2} \omega_{M_{1,2}} d_{0,1,2} \omega^2}{c^2 k_0} \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_{M_{1,2}}}{2} \right)$ при $kd_{1,2} \ll 1$. $\Omega_0^E = -\omega^2 + c^2 \frac{2k}{\varepsilon D_{FE}}$, приравненное к нулю, представляет собой дисперсионное соотношение для первой моды ЭМВ ($i = 1$) в изолированном СЭ при $k \rightarrow k_0$ [6,24]. $\Omega_{1,2,0} = \omega^2 - \omega_{\perp 1,2}^2 - \frac{\omega_{M_{1,2}}^2 k d_{0,1,2}}{2}$, приравненное к нулю, представляет собой дисперсионное соотношение для ПМСВ в изолированной ФП при $k \rightarrow k_0$ [25,26]. Компоненты $\Omega_{1,2,-1}^{FE}$, приравненные к нулю, представляют собой дисперсионные

соотношения для отраженной ГЭСВ и определяются аналогичным соотношением при $k \rightarrow k_{-1}$.

Из условия совместности системы (5) с коэффициентами (6) можно получить дисперсионное соотношение для ГЭСВ в структуре ФП|СЭ|МК в виде

$$\begin{bmatrix} \eta_{1,0}^{FE} & \kappa_{1,0}^{FE} & \chi_{1,0}^{FE} & \vartheta_{1,0}^{FE} \\ \kappa_{1,-1}^{FE} & \eta_{1,-1}^{FE} & \vartheta_{1,-1}^{FE} & \chi_{1,-1}^{FE} \\ \chi_{2,0}^{FE} & \vartheta_{2,0}^{FE} & \eta_{2,0}^{FE} & \kappa_{2,0}^{FE} \\ \vartheta_{2,-1}^{FE} & \chi_{2,-1}^{FE} & \kappa_{2,-1}^{FE} & \eta_{2,-1}^{FE} \end{bmatrix} = 0. \quad (7)$$

Предельным переходом из соотношения (7) может быть получено дисперсионное соотношение для ГЭСВ в структуре ФП-1|СЭ|ФП-2. В этом случае, полагая $\delta_d = 0$ (так как $\Delta = 0$), имеем $\kappa_{1,2,0,-1}^{FE} = \vartheta_{1,2,0,-1}^{FE} = 0$, $\eta_{1,2,-1}^{FE} = 0$, и дисперсионное соотношение (7) примет вид

$$\begin{bmatrix} \eta_{1,0}^{FE} & \chi_{2,0}^{FE} \\ \chi_{1,-1}^{FE} & \eta_{2,0}^{FE} \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

3. Дисперсионные характеристики

Рассмотрим механизм гибридизации ЭМВ с ПМСВ в структуре ФП-1|СЭ|ФП-2. На рис. 2 показана дисперсионная характеристика первой моды ЭМВ ($i = 1$) изолированного СЭ слоя (пунктирная прямая), а также закон дисперсии ПМСВ в изолированных ФП-1 и ФП-2 (штриховые прямые). Механизм гибридизации в этом

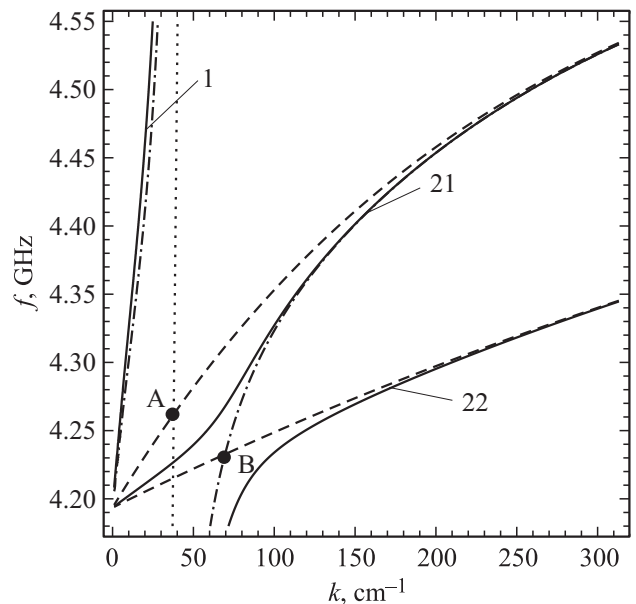


Рис. 2. Дисперсионные характеристики ГЭСВ в структуре ФП-1|СЭ|ФП-2 (сплошные кривые), ГЭСВ-1 (штрихпунктирные кривые), ЭМВ изолированного слоя СЭ (точечная кривая), ПМСВ в структуре ФП-1|ФП-2 (пунктирные кривые) ($d_1 = 26 \mu\text{m}$, $a_2 = 12 \mu\text{m}$, $D_{FE} = 500 \mu\text{m}$, $\varepsilon = 3000$, $H_0 = 860 \text{ Oe}$, $M_0 = 140 \text{ G}$).

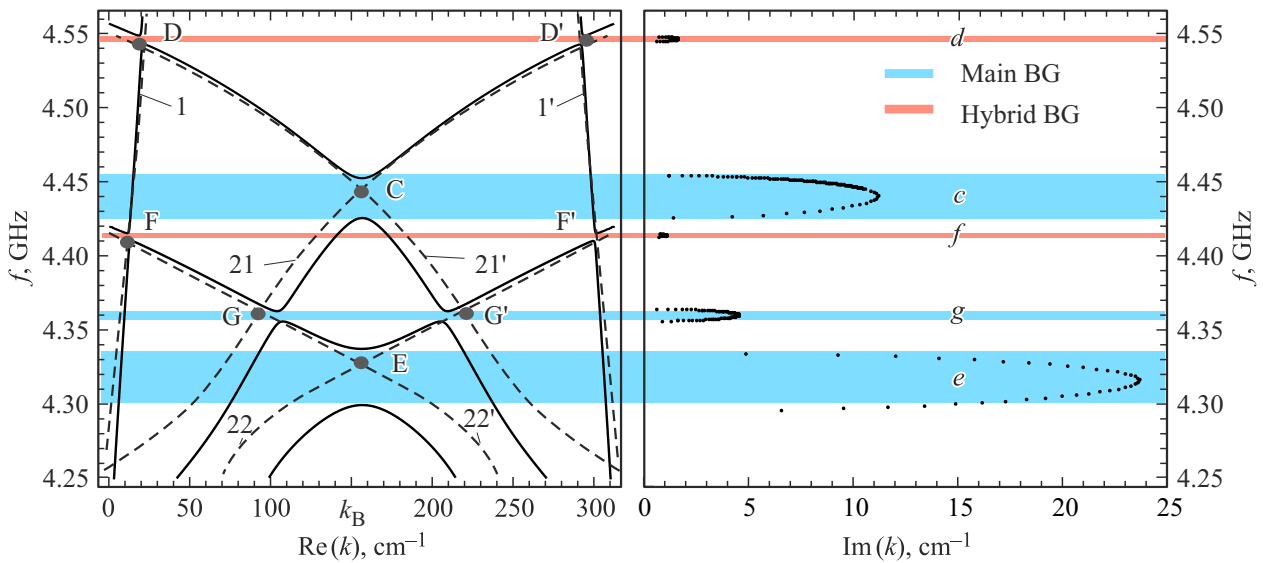


Рис. 3. Дисперсионные характеристики ГЭСВ в МК-1|СЭ|МК-2 в отсутствие связи между прямыми и отраженными волнами (пунктирные кривые) и при наличии связи между волнами (сплошные кривые) ($d_1 = 26 \mu\text{m}$, $\Delta_1 = 2 \mu\text{m}$, $a_2 = 1 \mu\text{m}$, остальные параметры как на рис. 2).

случае следующий: в первую очередь происходит гибридизация ЭМВ и ПМСВ в толстой пленке ФП-1 (в точке А). Это объясняется тем, что максимумы магнитных полей ПМСВ располагаются на верхних поверхностях ФП-1 и ФП-2, в результате наиболее эффективное взаимодействие между ЭМВ и ПМСВ происходит в толстой пленке ФП-1 (при распространении ПМСВ в противоположном направлении последовательность гибридизации будет обратной). В результате гибридизации образуется первичная ГЭСВ (штрих-пунктирные кривые), фазовая скорость ее низкочастотной ветви оказывается близкой к скорости ПМСВ в тонкой пленке ФП-2, и происходит дополнительное расталкивание дисперсионных кривых (в точке В). Результирующая ГЭСВ, возникающая при взаимодействии ЭМВ с ФП-1 и ФП-2, имеет три ветви дисперсии (сплошные кривые): быстрая ГЭСВ (ГЭСВ-б, ветвь 1) и 2 медленные ГЭСВ (ГЭСВ-м1, ветвь 21 и ГЭСВ-м2, ветвь 22).

Следует отметить, что точное дисперсионное соотношение для ГЭСВ в структуре ФП-1|СЭ|ФП-2 было получено в работе [27] на основе решения уравнений Максвелла и сшивания компонент электрических и магнитных полей на границах раздела сред. Механизм гибридизации волн в структуре ФП-1|СЭ|ФП-2 на основе построенной модели, согласуется с результатами работы [27]. Однако имеет место количественное расхождение полученных результатов с результатами, представленными в настоящей работе, на величины не более 10 MHz и 5 cm^{-1} . Такое отличие объясняется рядом приближений и упрощающих предположений, сделанных при построении данной модели.

На рис. 3 показаны дисперсионные характеристики ГЭСВ в структуре ФП|СЭ|МК, рассчитанные по со-

отношению (7), в отсутствие связи между прямыми и отраженными волнами (пунктирные кривые) и при наличии связи между волнами (сплошные кривые). Слева на рисунке по горизонтальной оси отложены действительные значения волновых чисел k , справа — мнимые значения k .

Из дисперсионных зависимостей на рис. 3 видно, что существует 8 точек пересечения пунктирных кривых (точки E, G, G', F, F', C, D, D'). В этих точках будут выполняться условия фазового синхронизма при взаимодействии различных типов волн.

1. Взаимодействие прямых и отраженных ГЭСВ-м2 (ветви 22 и 22', точка E), образуется запрещенная зона c .
2. Взаимодействие прямых и отраженных ГЭСВ-м1 (ветви 21 и 21', точка C), образуется запрещенная зона e .
3. Взаимодействие ГЭСВ-м1 и ГЭСВ-м2 (ветви 21 и 22', точка G; ветви 22 и 21', точка G'), образуется запрещенная зона g .
4. Взаимодействие прямой ГЭСВ-б и ГЭСВ-м1 (ветви 1 и 21', точка D; ветви 1' и 21, точка D'), образуется запрещенная зона d .
5. Взаимодействие прямой ГЭСВ-б и ГЭСВ-м2 (ветви 1 и 22', точка F; ветви 1' и 22, точка F'), образуется запрещенная зона f .

Таким образом, в структуре ФП|СЭ|МК происходит формирование пяти запрещенных зон, три из которых образованы взаимодействием медленных ГЭСВ-м (зоны c, e, g показаны синим цветом). Будем называть данные зоны основными, так как механизм их формирования аналогичен механизму формирования ЗЗ в структуре МК-1|диэлектрик|МК-2 [22]. Третья и четвертая ЗЗ

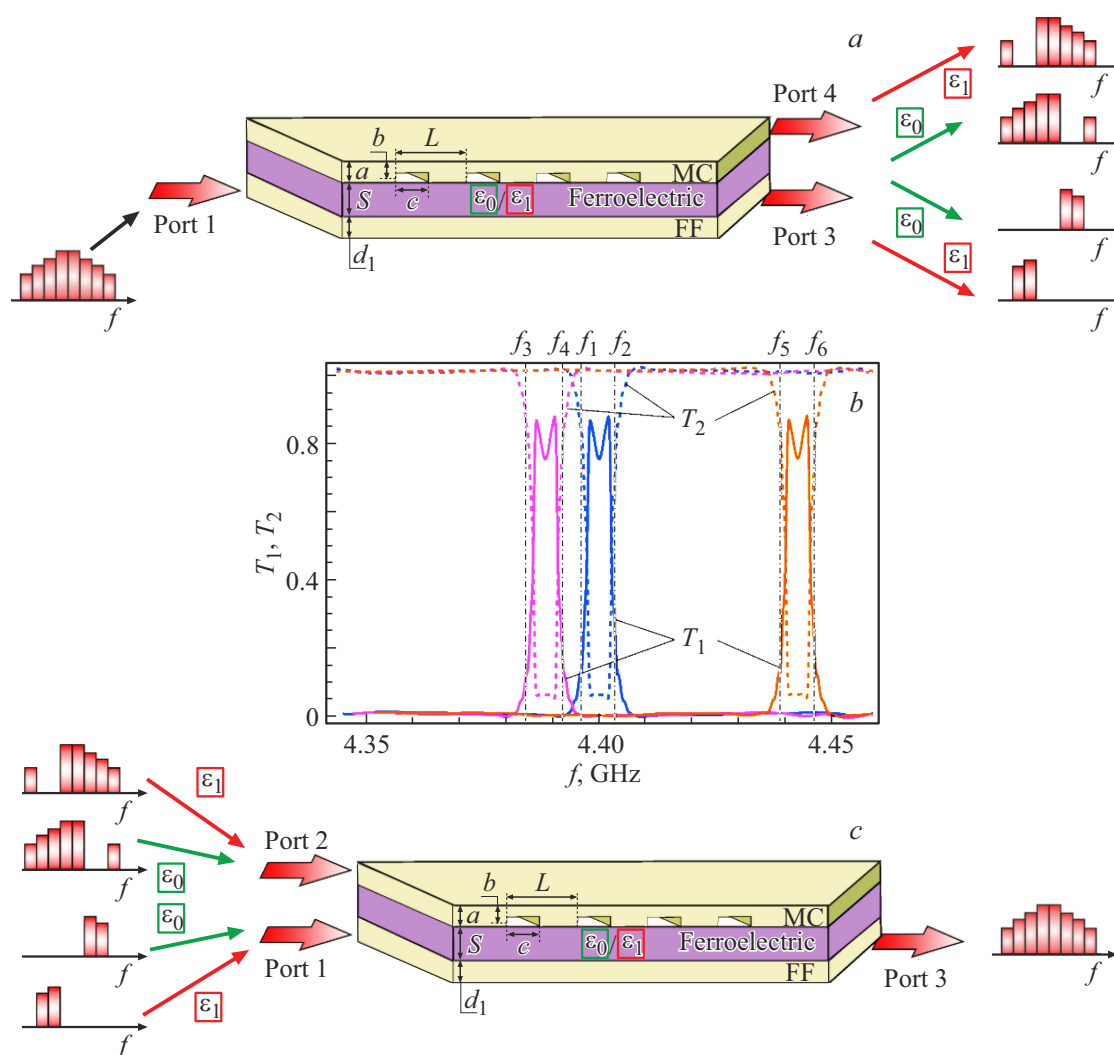


Рис. 4. *a)* Схема исследуемой структуры, принцип демультимплексирования на основе структуры ФП|СЭ|МК. *b)* Зависимость коэффициентов пропускания ФП-1 (T_1 , сплошные кривые) и МК (T_2 , пунктирные кривые) от частоты при различных значениях внешнего магнитного поля и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика (при $H_0 = 860$ Ое, $\epsilon = 3000$ — синие кривые, при $H_0 = 860$ Ое, $\epsilon = 5000$ — розовые кривые, при $H_0 = 880$ Ое, $\epsilon = 3000$ — коричневые кривые). *c)* Принцип мультиплексирования на основе структуры ФП|СЭ|МК.

образованы за счет взаимодействия прямой быстрой ГЭСВ-б и отраженных медленных ГЭСВ-м, либо прямых медленных ГЭСВ-м и отраженной быстрой ГЭСВ-б (зоны d, f показаны красным цветом). Будем называть эти зоны гибридными запрещенными зонами, так как они не формируются в структуре МК-1|диэлектрик|МК-2, а механизм их формирования обусловлен взаимодействием с быстрой ветвью ГЭСВ-б, которая формируется исключительно за счет гибридизации ЭМВ и ПМСВ.

4. Принцип мультиплексирования/демультимплексирования сигнала

Для описания волновой эволюции амплитуд огибающих в структуре ФП|СЭ|МК может использоваться система (5) с коэффициентами (6). Начальные и граничные

условия задавались в виде

$$A_{1,2}(y, 0) = 0, \quad B_{1,2}(y, 0) = 0, \quad A_1(0, t) = A_{01}f(t),$$

$$A_2(0, t) = A_{02}f(t), \quad B_{1,2}(l, t) = 0, \quad (9)$$

где A_{01} и A_{02} — амплитуды импульсов, подаваемых в МК-1 и МК-2, $f(t)$ описывает форму входного импульса, в частности, для входного импульса гауссовой формы $f(t) = \exp[-(\frac{t-\tau_0}{\tau_{imp}})^2]$; τ_{imp} и τ_0 — длительность и задержка входного импульса соответственно. Длительность импульса выбиралась так, чтобы ширина его частотного спектра была меньше ширины запрещенной зоны.

Структуру ФП|СЭ|МК можно рассматривать как четырехпортовую структуру с одним входным портом и четырьмя выходными (порты 1–4) (см. рис. 4, *a*). Тогда

коэффициенты пропускания ФП-1 (T_1) — определяющий долю мощности, вышедшую через ФП-1 (порт 2), и МК-2 (T_2) — определяющий долю входной мощности, вышедшую через МК-2 (порт 4), определяются соотношениями

$$T_{1,2} = \frac{\int_0^{T_{\max}} |A_{1,2}(l, t)|^2 dt}{\int_0^{T_{\max}} |A_1(0, t) + A_2(0, t)|^2 dt}, \quad (10)$$

где T_{\max} — время наблюдения.

Выберем длину структуры l кратной половине длины перекачки мощности между слоями структуры и будем исследовать зависимость коэффициентов передачи от частоты входного сигнала. Пусть входной сигнал подается в ФП-1 (порт 1, как показано красной стрелкой на рис. 4, *a*), в соотношения (9) зададим $A_{01} \neq 0$, $A_{02} = 0$.

На рис. 4, *b* приведена зависимость коэффициентов пропускания ФП-1 (T_1 , сплошные кривые) и МК-2 (T_2 , пунктирные кривые) от частоты входного сигнала. Видно, что при $\varepsilon = 3000$ и $H_0 = 860$ Ое коэффициент пропускания для МК-2 T_2 имеет характерный минимум на частотах $f_1 < f < f_2$, соответствующих запрещенной зоне (синяя пунктирная кривая). На этих же частотах наблюдается максимум коэффициента пропускания для ФП-1 T_1 (синяя сплошная кривая). Следовательно, сигнал, поступающий в ФП-1 на частотах, лежащих в ЗЗ, не перекачивается в МК-2, а проходит через ФП-1 без искажений. Описанное поведение коэффициентов передачи приведет к разделению сигнала по выходным портам структуры МК|СЭ|ФП. Сигнал на частотах, лежащих в ЗЗ ($f_1 < f < f_2$), будет выходить из ФП-1, т.е. через порт 2. Сигнал на частотах вне запрещенной зоны $f < f_1$ и $f > f_2$ будет выходить из МК-2, т.е. через порт 4 (это связано с тем, что на выбранной длине сигнал полностью перекачивается в МК-2). При $\varepsilon = 5000$ гибридная зона смещается вниз по частоте (розовые сплошные кривые). Таким образом, через порт 2 выйдет только сигнал с частотами, лежащими в диапазоне $f_3 < f < f_4$. Сигнал на частотах вне данного диапазона $f < f_3$ и $f > f_4$ выйдет через порт 4. Коэффициент пропускания МК-2 при другом значении магнитного поля $H_0 = 880$ Ое и $\varepsilon = 3000$ показан коричневой сплошной кривой. В этом случае запрещенная зона смещается вверх по частоте. Следовательно, через порт 2 выйдет сигнал с частотой в диапазоне $f_5 < f < f_6$, сигнал на частотах вне данного диапазона $f < f_5$ и $f > f_6$ выйдет через порт 4.

Таким образом, в зависимости от частоты, сигнал выходит через разные порты структуры, т.е. исследуемая структура позволяет осуществлять частотное разделение каналов — демultipлексирование. Диапазон частот, поступающих на данный порт, определяется величиной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика (которая зависит от электрического поля, приложенного к сегнетоэлектрику) и величиной магнитного поля, приложенного к ферромагнитным слоям.

С другой стороны, подавая сигнал на частоте запрещенной зоны в ФП-1 (порт 1), а сигнал с частотой вне запрещенной зоны в МК-2 (порт 3), получим оба сигнала на выходе ФП-1 (порт 2). Следовательно, исследуемая структура позволяет осуществлять частотное объединение каналов — мультимultipлексирование (рис. 4, *c*). При этом диапазон частот, подаваемых в ФП, может быть любой, а для осуществления функции мультимultipлексирования необходимо выбрать значение диэлектрической проницаемости СЭ и магнитного поля таким образом, чтобы выбранный диапазон совпал с ЗЗ исследуемой структуры.

Описанные эффекты позволяют рассматривать структуру ФП|СЭ|МК в качестве базового элемента для частотного мультимultipлексирования/демultipлексирования сигналов с двойным управлением — магнитным и электрическим. Данный элемент позволяет как разделять входные сигналы по частотам, выводя их через разные выходные порты, так и объединять сигналы на разных частотах, подаваемые на разные входные порты, выводя их с одного выходного порта. Устройства мультимultipлексирования/демultipлексирования, в свою очередь, являются одними из базовых элементов телекоммуникаций и, в частности, широко используются в компьютерных сетях и волоконной оптике [28,29].

5. Заключение

Построена модель, описывающая дисперсионные характеристики ГЭСВ в структуре ФП|СЭ|МК. Показано, что в такой структуре образуется пять запрещенных зон, три из которых образуются в результате взаимодействия прямых и отраженных медленных ГЭСВ в каждом слое (основные запрещенные зоны). Две запрещенные зоны образуются в результате взаимодействия прямых быстрых ГЭСВ-б и отраженных медленных ГЭСВ-м в каждом слое (гибридные запрещенные зоны). Гибридные запрещенные зоны становятся шире с увеличением диэлектрической проницаемости ε . В структуре ФП|СЭ|МК возможно двойное управление (электрическим и магнитным полем) плотности запрещенных зон и характеристик ЗЗ в спектре ГЭСВ.

В зависимости от частоты, сигнал выходит через разные порты структуры, т.е. исследуемая структура допускает частотное разделение каналов — демultipлексирование. Диапазон частот, подаваемых на порты, определяется диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрика (которая зависит от величины электрического поля) и величиной магнитного поля, приложенного к ферромагнитным слоям. Исследуемая структура также позволяет объединять сигналы с разными частотами на одном порту — мультимultipлексирование. В этом случае диапазон частот, подаваемых на ФП, может быть любым, и для реализации функции мультимultipлексирования необходимо выбрать диэлектрическую проницаемость

СЭ и магнитное поле таким образом, чтобы выбранный диапазон совпадал с запрещенной зоной структуры.

Описанные эффекты позволяют рассматривать структуру ФП|СЭ|МК в качестве базового элемента для частотного мультимплексирования/демультимплексирования сигналов с магнитным и электрическим управлением.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-000759, <https://rscf.ru/project/23-29-000759/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Garcia, M. Bibes, A. Barthélémy. *Comptes Rendus Physique* **16**, 2, 168 (2015).
- [2] А.П. Пятаков, А.К. Звездин. *УФН* **182**, 6, 593 (2012). [А.К. Pyatakov, A.K. Zvezdin. *Phys. — Uspekhi*, **55**, 6, 557 (2012).]
- [3] N.X. Sun, G. Srinivasan. *SPIN* **2**, 3, 1240004 (2012).
- [4] C.-W. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, G. Srinivasan. *J. Appl. Phys.* **103**, 3, 031101 (2008).
- [5] В.Б. Анфиногенов, Т.Н. Вербицкая, П.Е. Зильберман. *ПЖТФ* **12**, 8, 454 (1986).
- [6] О.Г. Вендик, Б.А. Калинин, С.И. Митева *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **24**, 9, 52 (1981).
- [7] A.I.A. Nikitin, An.A. Nikitin, A.V. Kondrashov, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, E. Lähderanta. *J. Appl. Phys.* **122**, 15, 153903 (2017).
- [8] И.А. Устинова, А.А. Никитин, А.В. Устинов. *ЖТФ* **86**, 3, 155 (2016). [I.A. Ustinova, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov. *Tech. Phys.* **61**, 3, 473 (2016).]
- [9] М.А. Морозова, О.В. Матвеев, Д.В. Романенко, С.А. Никитов. *ЖЭТФ* **164**, 4, 503 (2023). [M.A. Morozova, O.V. Matveev, D.V. Romanenko, S.A. Nikitov. *JETP* **137**, 4, 432 (2023).]
- [10] M.A. Morozova, S.V. Grishin, A.V. Sadovnikov, D.V. Romanenko, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *IEEE Trans. Magn.* **51**, 11, 2802504 (2015).
- [11] А.В. Дроздовский, А.А. Никитин, А.Б. Устинов, Б.А. Калинин. *ЖТФ* **84**, 7, 87 (2014). [A.V. Drozdovskii, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos. *Tech. Phys.* **59**, 7, 1032 (2014).]
- [12] А.В. Устинов, Б.А. Калинин. *Письма в ЖТФ* **40**, 13, 58 (2014). [A.V. Ustinov, B.A. Kalinikos. *Tech. Phys. Lett.* **40**, 7, 568 (2014).]
- [13] M.A. Morozova, O.V. Matveev, D.V. Romanenko, A.V. Trukhanov, A.M. Mednikov, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *J. Magn. Magn. Mater* **508**, 166836 (2020).
- [14] H. Sasaki, N. Mikoshiba. *J. Appl. Phys.* **52**, 5, 3546 (1981).
- [15] H. Sasaki, N. Mikoshiba. *Electron. Lett.* **15**, 6, 172 (1979).
- [16] K. Vogt, F.Y. Fradin, J.E. Pearson, T. Sebastian, S.D. Bader, B. Hillebrands, A. Hoffmann, H. Schultheiss. *Nature Commun.* **5**, 1, 3727 (2014).
- [17] H. Al-Wahsh, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, A. Akjouj. *Surf. Sci.* **602**, 10, 1795 (2008).
- [18] H. Al-Wahsh. *Eur. Phys. J. B* **76**, 3, 445 (2010).
- [19] B. Rana, Y. Otani. *Phys. Rev. Appl.* **9**, 1, 014033 (2018).
- [20] А. Муадили, А. Акжуж, Е.Х. Эль-Будути, Л. Добржински. *ЖЭТФ* **157**, 6, 1020 (2020). [A. Mouadili, A. Akjouj, E. El Boudouti, L. Dobrzynski. *JETP* **130**, 6, 859 (2020).]
- [21] A. Mouadili, E.H. El Boudouti, A. Akjouj, H. Al-Wahsh, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski. *AIP Adv.* **9**, 3, 035011 (2019).
- [22] M.A. Morozova, A.Yu. Sharaevskaya, A.V. Sadovnikov, S.V. Grishin, D.V. Romanenko, E.N. Beginin, Yu.P. Sharaevskii, S.A. Nikitov. *J. Appl. Phys.* **120**, 22, 223901 (2016).
- [23] D. Marcuse. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Academic Press (1974).
- [24] V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, P. Edenhofer. *J. Appl. Phys.* **91**, 12, 10007 (2002).
- [25] A. Prabhakar, D.D. Stancil. *Spin Waves. Theory and applications*. Springer (2009).
- [26] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. *Магнитные колебания и волны*. Физматлит, М. (1994). [A.G. Gurevich, G.A. Melkov. *Magnetization, Oscillations and Waves*. CRC-Press, London (1996).]
- [27] An.A. Nikitin, A.B. Ustinov, V.V. Vitko, A.I.A. Nikitin, A.V. Kondrahov, P. Pirro, E. Lähderanta, B.A. Kalinikos, B. Hillebrands. *J. Appl. Phys.* **122**, 1 (2017).
- [28] J. Torrejon, M. Riou, F. Abreu Araujo, S. Tsunegi, G. Khalsa, D. Querlioz, P. Bortolotti, V. Cros, K. Yakushiji, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, M.D. Stiles, J. Grollier. *Nature* **547**, 7664, 428 (2017).
- [29] G.P. Agrawal. *Lightwave Technology: Telecommunication Systems*. John Wiley & Sons, Inc. (2005).

Редактор Е.В. Толстякова