

05,13

## Генерация ЭДС магнитостатическими волнами в структуре ЖИГ(111)—Pt в слабых полях подмагничивания

© Ю.В. Никулин<sup>1,2</sup>, А.В. Кожевников<sup>1</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2,¶</sup>, А.Г. Темиряев<sup>3</sup>,  
М.Е. Селезнев<sup>1</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1,2</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

<sup>3</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

¶ E-mail: vysotsl@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

В структуре из эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с кристаллографической ориентацией (111) толщиной  $11.8\ \mu\text{m}$  и нанесенной на ее поверхность пленки платины (Pt) толщиной  $5\ \text{nm}$  исследован эффект генерации в пленке платины ЭДС при распространении в структуре магнитостатических волн (МСВ) при величинах касательного постоянного магнитного поля  $H$  меньших, чем поле насыщения  $H_s \sim 65\ \text{Oe}$  пленки ЖИГ. Эксперименты выполнялись в геометрии, когда поле  $\mathbf{H}$  параллельно кристаллографическому направлению  $[1\bar{2}1]$  и антеннам МСВ, а расстояния от входной антенны до выходной и до пленки Pt составляли  $\sim 5$  и  $\sim 0.5\ \text{mm}$ , соответственно. В рассматриваемой структуре при  $|H| < H_s$  формировалась полосовая доменная структура (ПДС), которая в полях  $|H| < H_1 \sim 5\text{--}7\ \text{Oe}$  приобретала ветвящийся характер в приповерхностном слое. В интервале полей  $H_1 < |H| < H_2 \approx 40\ \text{Oe}$  наблюдалось распространение МСВ в полосе частот  $\Delta F_1 \sim 300\text{--}550\ \text{MHz}$ , что сопровождалось генерацией ЭДС за счет обратного спинового эффекта Холла. В интервале  $H_2 < |H| \leq H_s$  распространение МСВ наблюдалось в полосе частот  $\Delta F_2 \approx 750\text{--}1750\ \text{MHz}$ , при этом интервал частот, в котором регистрировался сигнал ЭДС, оказывался в разы меньше из-за развития параметрической неустойчивости МСВ.

**Ключевые слова:** поверхностные магнитостатические волны, железо-иттриевый гранат, доменная структура, платина, обратный спиновый эффект Холла.

DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55842.19H

### 1. Введение

Исследование генерации ЭДС при распространении спиновых волн (СВ) в структурах магнитный диэлектрик—металл представляет интерес для создания энергоэффективной элементной базы на принципах магноники и спинтроники [1–3]. Наиболее широко исследуются структуры на основе пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) и платины (Pt), в которых как когерентные, так и некогерентные СВ могут эффективно инжектировать через интерфейс ЖИГ/Pt спиновый ток  $I_s$ . Детектирование спинового тока осуществляют с помощью обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) [4], который приводит в пленке Pt к генерации электрического тока

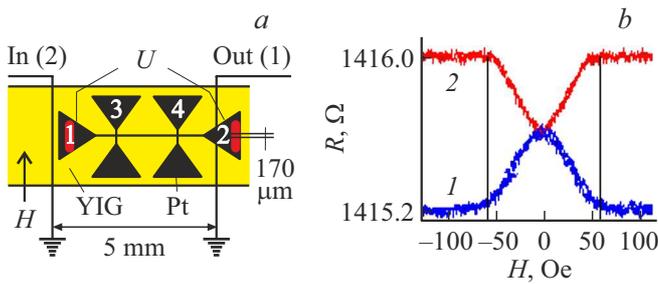
$$I_e \propto [nI_s], \quad (1)$$

где  $\mathbf{n}$  — орт вектора спинового момента в ЖИГ [1–5]. При этом с контактов к Pt, расположенных вдоль направления, перпендикулярного  $\mathbf{n}$ , измеряют величину ЭДС  $U = I_e R$ , где  $R$  — сопротивление Pt [1–5]. Генерация ЭДС в структурах ЖИГ—Pt бегущими СВ изучалась как в геометрии поверхностных магнитостатических волн

(ПМСВ), когда волновой вектор  $\mathbf{k}$  перпендикулярен направлению касательного поля  $\mathbf{H}$  ( $\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$ ) [6–14], так и в геометрии обратных объемных магнитостатических волн (ООМСВ), когда  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{H}$  [13–16]. При этом в работах [6–13] исследования эффекта генерации ЭДС проводились в полях подмагничивания  $H$ , превышающих необходимое для намагничивания пленки ЖИГ до насыщения  $H_s$ . В настоящей работе сообщается о наблюдении в геометрии  $\mathbf{k} \perp \mathbf{H}$  эффекта генерации ЭДС бегущими магнитостатическими волнами (МСВ) в структуре ЖИГ—Pt при слабых полях подмагничивания ( $|H| \leq H_s$ ), отвечающих наличию в пленке ЖИГ доменной структуры (ДС). Отметим, что влияние ДС на магнитосопротивление, обусловленное спиновым эффектом Холла, для структур ЖИГ—Pt рассматривалось в работах [17–19].

### 2. Методика эксперимента

Эксперименты выполнялись с пленкой ЖИГ, выращенной эпитаксиально на подложке гадолиний галлиевого граната с кристаллографической ориентацией (111).



**Рис. 1.** *a* — геометрия макета; *b* — зависимости электрического сопротивления  $R$  мостика от величины поля  $H$ , приложенного в плоскости структуры в направлении  $H \perp I$  (синяя кривая 1) и  $H \parallel I$  (кривая 2). Измерения проводились при величине постоянного тока  $I \sim 100 \mu\text{A}$ .

Пленка имела толщину  $d \approx 11.8 \mu\text{m}$ , эффективную намагниченность насыщения  $4\pi M_{ef} = 4\pi M - H_u \sim 1640 \text{ G}$ , где  $H_u$  — поле одноосной анизотропии; поле кубической анизотропии  $H_c \sim -40 \text{ Oe}$  и характеризовалась заметной толщиной неоднородностью, что затрудняло определение скорости релаксации СВ по спектру ФМР. Для проведения измерений из пленки ЖИГ был вырезан волновод с размерами  $10 \times 5 \text{ mm}$ , короткая сторона которого совпадала с кристаллографической осью  $[1\bar{2}1]$ . На его поверхность с помощью магнетронного распыления была нанесена пленка платины толщиной  $5 \text{ nm}$ , из которой с использованием технологий фотолитографии и ионного травления был сформирован холловский мостик, геометрия которого схематически показана на рис. 1, *a*. Продольные и поперечные (по отношению к длинной оси волновода) полоски имели ширину  $170 \mu\text{m}$ , треугольные контактные площадки использовались для присоединения проволочных контактов с помощью токопроводящего клея.

Для наблюдения эффекта генерации ЭДС бегущими МСВ структура ЖИГ–Pt помещалась в макет линии задержки на МСВ, которые возбуждались и принимались проволочными антеннами диаметром  $30 \mu\text{m}$ , расстояние между которыми составляло  $5 \text{ mm}$ . При этом входная антенна (2) отстояла от пленки Pt на расстояние  $\approx 0.5 \text{ mm}$ , а выходная (1) перекрывала Pt, см. рис. 1, *a*. Внешнее магнитное поле  $H$  прикладывалось параллельно антеннам, что отвечает условию возбуждения ПМСВ в полях  $|H| > H_s$  [20]. Для исследования влияния величины поля  $H$  на распространение и дисперсию МСВ в структуре, с помощью векторного анализатора цепей регистрировались частотные зависимости модуля и фазы коэффициента передачи  $S_{12}(f)$  со входа на выход макета при уровне падающей мощности  $P_{in} = -25 \text{ dBm}$ , что исключало влияние процессов параметрической неустойчивости на измеряемые характеристики. Для измерения ЭДС входная мощность увеличивалась до уровня  $P_{in} = 7 \text{ dBm}$  и модулировалась меандром с частотой  $11.3 \text{ kHz}$ , что позволяло с помощью синхронного

детектора регистрировать с контактов 1 и 2 к платине частотные зависимости ЭДС  $U(f)$ .

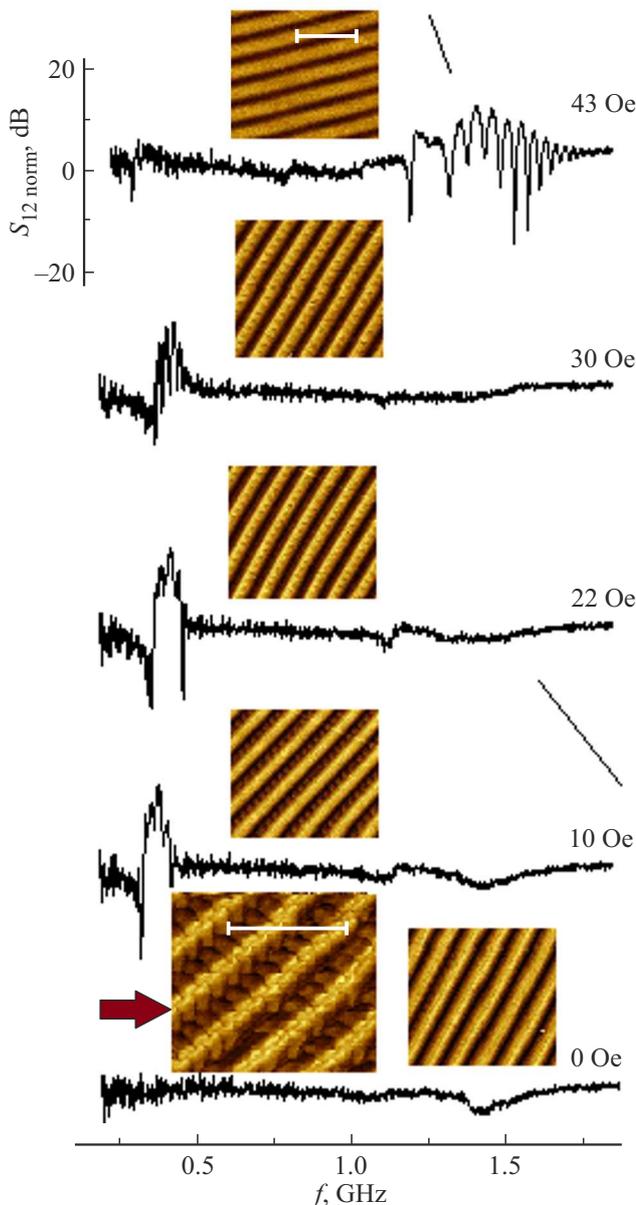
### 3. Результаты измерений

Перед проведением экспериментов по генерации ЭДС бегущими МСВ, структура тестировалась на наличие эффекта магнитосопротивления  $R(H)$  за счет спинового эффекта Холла. Для этого к контактам 1 и 2 холловского мостика подключался источник тока  $I$ , а с контактов 3 и 4 снималась зависимость напряжения  $U(H)$ . На рис. 1, *b* приведены результаты измерений  $R(H) = U(H)/I$  при величине постоянного тока  $I \sim 100 \mu\text{A}$  и намагничивании в плоскости структуры для  $J \perp I$  (кривая 1) и  $H \parallel I$  (кривая 2). Можно видеть, что зависимости  $R(H)$  имеют типичный [17] для структур ЖИГ–Pt вид. Вертикальными линиями на рис. 1, *b* отмечены поля насыщения  $|H_s| \sim 65 \text{ Oe}$ .

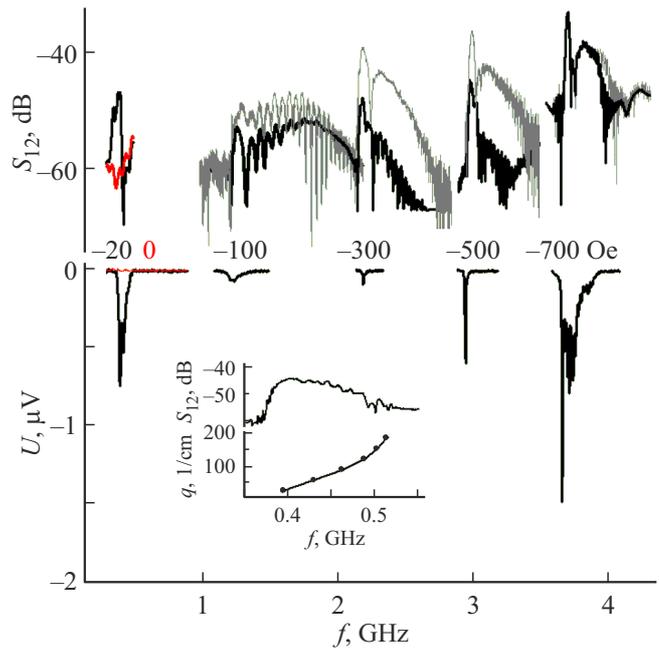
Для определения характера ДС в структуре использовались оптический поляризационный и магнитно-силовой микроскопы (МСМ). В полях  $|H| < H_s$  в пленке формировалась блочная полосовая доменная структура (ПДС). Пленка платины не оказывала заметного влияния на размер блоков, период  $\Lambda$  и характер ПДС. При этом поведение ПДС при изменении поля подмагничивания в рассматриваемой структуре в целом было аналогично наблюдавшемуся ранее для пленок ЖИГ [21–31]. Для исследуемой структуры можно было выделить три интервала полей, в которых характер и поведение ДС при изменении  $H$  заметно отличались. При  $|H| < H_1 \sim 5\text{--}7 \text{ Oe}$  ПДС приобретала в приповерхностном слое „ветвящийся“ [21–24] („волнистый“ [25,26]) характер с периодом  $\Lambda \sim 7 \mu\text{m}$  и размером блоков  $150\text{--}200 \mu\text{m}$ . В интервале полей  $H_1 < |H| < H_2 \sim 40 \text{ Oe}$  „волнистость“ доменов исчезала, блоки укрупнялись до размера  $200\text{--}300 \mu\text{m}$ , тогда как заметного изменения  $\Lambda$  не наблюдалось, см. вставки к рис. 2, где яркость светлого и темного тонов иллюстрируют угол „выхода“ вектора намагниченности  $M$  из плоскости пленки ЖИГ. В интервале  $H_2 < |H| \leq H_s$  происходило разрастание блоков и заметный рост периода ДС, который при  $|H| \sim H_s$  достигал значений  $\Lambda \sim 20 \mu\text{m}$ .

На рис. 3 представлены частотные зависимости  $S_{12}(f)$  (тонкие серые и толстые черные линии отвечают  $P_{in} \sim -25$  и  $7 \text{ dBm}$ , соответственно) и  $U(f)$  при  $P_{in} \sim 7 \text{ dBm}$ , измеренные при различных величинах поля подмагничивания (указаны около кривых в Ое, знак „минус“ отвечает направлению  $H$ , при котором максимум интенсивности МСВ „прижат“ к поверхности пленки ЖИГ, граничащей с платиной). При  $H = -700 \text{ Oe}$  ширина частотной области наблюдения ЭДС была близка к регистрируемой ширине полосы наблюдения ПМСВ (см. рис. 3) и содержала максимум  $U_{max}$  вблизи длинноволновой границы полосы существования ПМСВ  $f_0 = \sqrt{H(H + 4\pi M)}$ , как ранее описывалось в [13]. При уменьшении величины  $H$  распростра-

нение ПМСВ при  $P_{in} \sim 7 \text{ dBm}$  проходило в условиях развития процессов трехмагнанных распадов [20], что приводило к уменьшению уровня выходного сигнала ПМСВ по сравнению с линейным режимом их распространения (при  $P_{in} = -25 \text{ dBm}$ , см. рис. 3). При этом генерация ЭДС наблюдалась только в области частоты  $f_0$ , а величина  $U_{max}$  уменьшалась. Однако, в интервале изменения  $H$  от  $-35$  до  $-10 \text{ Oe}$  в полосе частот  $\Delta F_7$  350–500 MHz наблюдается рост коэффициента передачи  $S_{12}(f)$  (см. рис. 2), а величина сигнала ЭДС



**Рис. 2.** Зависимости  $S_{12\text{norm}}(f)$  и изображения поверхностной структуры ДС, полученные с помощью МСМ при величинах  $H$ , указанных у кривых. Стрелкой показан вид поверхностной структуры ДС пленки, извлеченной из электромагнита. Масштаб на всех изображениях, кроме помеченного стрелкой, одинаков. Длина масштабной метки  $20 \mu\text{m}$ .

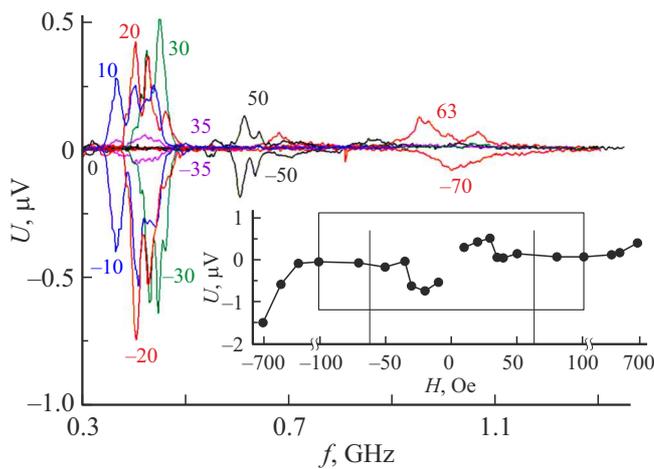


**Рис. 3.** Частотные зависимости модуля коэффициента передачи  $S_{12}(f)$  (тонкие и толстые линии отвечают  $P_{in} \sim -25$  и  $7 \text{ dBm}$ , соответственно) и ЭДС  $U(f)$  для  $P_{in} \sim 7 \text{ dBm}$  для различных величин  $H$  (указаны у кривых в Oe). На вставке показана зависимость  $S_{12}(f)$  и дисперсионная зависимость МСВ при  $H = -20 \text{ Oe}$ .

увеличивается до уровня, всего в два раза уступающего случаю насыщенной пленки ЖИГ при  $H = -700 \text{ Oe}$  и превышает значения, соответствующие распространению МСВ в насыщенной пленке при  $|H| \leq 300 \text{ Oe}$  (см. рис. 3, 4). Дальнейшее уменьшение  $|H|$  до нуля приводит к уменьшению сигнала ЭДС до уровня шумов, а величина  $S_{12}(f)$  снижалась до уровня наводки (красные линии на рис. 3). При смене знака поля подмагничивания знак ЭДС меняется, а характер изменения величины  $U_{max}$  с ростом  $|H|$  качественно соответствует описанному выше (см. рис. 4 и вставку к нему), при этом количественное различие, очевидно, связано с невзаимным характером распространения ПМСВ [20].

#### 4. Обсуждение результатов

Возможность распространения различных типов МСВ в пленках ЖИГ в малых полях подмагничивания показана уже более 30 лет назад для разнообразных доменных структур [27–45]. В исследуемой структуре при  $H < 30 \text{ Oe}$  ДС имеет полосовой характер (см. вставку к рис. 2), а построенная с использованием фазочастотной характеристики дисперсионная зависимость (см. вставку к рис. 3) свидетельствует о распространении в частотном интервале  $\Delta F_7$  МСВ с прямой дисперсией. При изменении направления распространения МСВ на обратное (когда в качестве входной исполь-



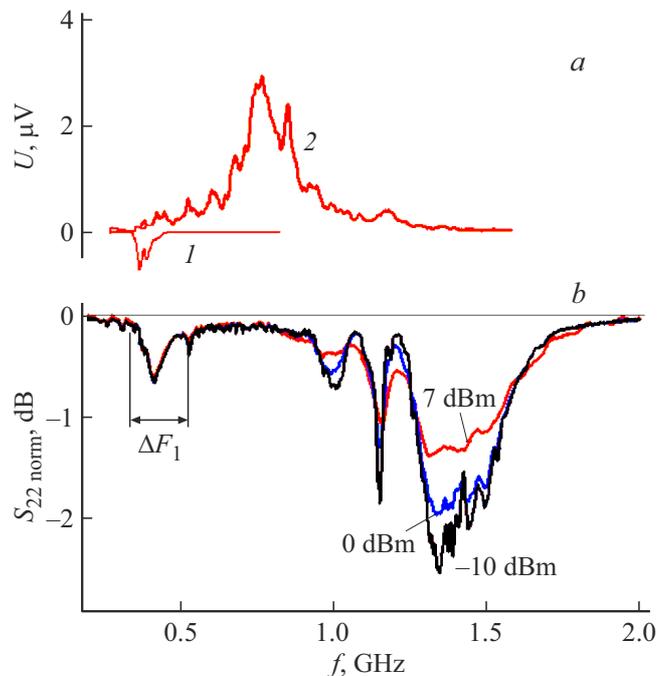
**Рис. 4.** Зависимости  $U(f)$  для различных величин поля  $H$  (указаны у кривых в Ое). На вставке показана зависимость  $U_{max}(H)$ . Вертикальные линии ограничивают интервал полей, отвечающих ненасыщенному состоянию пленки ЖИГ.

зуется антенна ( $I$ ) уровень  $S_{21}(f)$  при сохранении направления поля  $\mathbf{H}$  оказался примерно на 3 dB ниже, чем для  $S_{12}(f)$ , что позволяет предположить поверхностный характер распространяющейся в этом частотном диапазоне МСВ [20]. При этом максимум коэффициента передачи  $S_{12}$  лишь немногим уступает случаю насыщенной пленки при  $H = -700$  Ое и превосходит величины  $S_{12}$  для величин  $H$ , отвечающих области трехмагнотных распадов ПМСВ. Причиной этого, по-видимому, является повышение пороговых мощностей для развития этих процессов в ДС, ранее рассмотренное в [29]. В наших измерениях изменение уровня  $P_{in}$  с 7 dBm до -25 dBm никак не влияло на вид зависимости  $S_{12}(f)$  в частотном интервале  $\Delta F_1$ . Добавим также, что в этом интервале в частотной зависимости отраженной от входной антенны ( $I$ ) мощности  $S_{22norm}(f)$  (нормированной на вид этой зависимости в отсутствие МСВ в рассматриваемом диапазоне частот — при  $H = 3$  кОе) при изменении входной мощности от 7 до -10 dBm никаких изменений не происходит в отличие от частотного интервала  $\Delta F_2$  (см. рис. 4,  $b$ ).

Подчеркнем, что обнаруженная в частотном интервале  $\Delta F_1$  генерация ЭДС наблюдается в условиях существования в пленке ЖИГ полосовой доменной структуры, когда намагниченность в объеме пленки имеет компоненты, направленные по нормали к поверхности пленки, противоположно направленные в соседних доменах, что характерно для пленок ЖИГ (111) [42]. Однако генерация ЭДС по механизму ОСЭХ предполагает у поверхности пленки касательную к ней компоненты намагниченности в слое толщиной не более 1 nm [46]. Такая ориентация намагниченности может наблюдаться при наличии в приповерхностном слое пленки „замыкающих“ доменов [20]. В то же время, длина платинового элемента намного больше, чем ширина доменов,

что позволяет предположить ограничение измеряемой ЭДС вследствие эффекта „усреднения“ ЭДС на участках пленки ЖИГ с противоположным направлением намагниченности, что, по-видимому, и наблюдается при  $H = 0$  (см. рис. 3). Отсутствие этого эффекта с ростом величины  $H$ , вероятно, связано со сложным характером доменной структуры, который может приводить к количественным различиям распределения касательной компоненты намагниченности в соседних доменах.

Полученные нами с помощью МСМ изображения доменных структур (см. вставки к рис. 2) отражают структуру полей рассеяния доменов в приповерхностном слое [19]. Можно видеть, что на фоне полосовой структуры проявляются особенности меньшего масштаба, имеющие сложный вид. Такие результаты могут быть связаны с наличием приповерхностных несквозных ДС [20]. При этом в пленках ЖИГ, у которых поле одноосной анизотропии  $H_a$  превышает  $\sim 120$  Ое, приповерхностный слой может быть неоднородным по толщине [24]. Отметим, что в исследованной пленке ЖИГ оцененная величина  $H_a$  составила  $\sim 100$  Ое. Исследовать структуру поверхностного слоя и показать наличие касательной к поверхности пленки компоненты намагниченности, необходимой для наблюдения ОСЭХ, нам не удалось. Тем не менее, отметим, что смена направления поля  $H$  приводит к смене знака генерируемой ЭДС (см. рис. 4), что находится в соответствии с механизмом ОСЭХ ( $I$ ).



**Рис. 5.**  $a$  — частотные зависимости  $U(f)$  при возбуждении ПМСВ в геометрии эксперимента (1) и при смене направлении распространения ПМСВ (2) при  $P_{in} = 7$  dBm;  $b$  — частотная зависимость  $S_{22norm}(f)$  для различных уровней входной мощности.  $|H| = 20$  Ое.

В заключение добавим, что рассмотренные результаты получены для случая, когда входная антенна (2) отстояла от пленки Pt на расстояние  $\sim 0.5$  mm (см. рис. 1, *a*) и, следовательно, накачка спинового тока осуществлялась за счет полей распространяющейся МСВ. На рис. 5, *a* кривая 2 представляет результаты измерения ЭДС в описанной структуре, но для случая использования в качестве возбуждающей антенны (1), расположенной над платиной (см. рис. 1, *a*) при  $P_{in} = 7$  dBm,  $|H| = 20$  Oe (направление поля  $\mathbf{H}$  менялось на противоположное для обеспечения расположения максимума интенсивности МСВ вблизи поверхности пленки ЖИГ, граничащей с платиной). Видно, что в этом случае уровень сигнала ЭДС и ширина полосы ее наблюдения значительно превосходят результаты (кривая 1 на рис. 5, *a*), полученные при использовании в качестве возбуждающей антенны (2). Обсуждение этого эффекта выходит за рамки данной работы.

## 5. Заключение

Обнаружена генерация ЭДС по механизму обратного спинового эффекта Холла при распространении МСВ в структуре пленка ЖИГ–платина поверхностных магнитостатических волн при величинах поля подмагничивания, отвечающего формированию в пленке ЖИГ полосовой доменной структуры. Полученные результаты демонстрируют возможность осуществлять в структурах ЖИГ–Pt СВЧ спиновую накачку при слабых полях подмагничивания (или в отсутствие полей) что может оказаться полезным для разработки устройств спинтроники, а также для изучения приповерхностной доменной структуры магнитных пленок. Способность детектировать спиновый ток переносимый спиновыми волнами в пленках с ДС также может оказаться полезной для разработки подходов к построению резервуарных вычислителей на основе спиновых волн в пленках с ПДС [47].

## Финансирование работы

Результаты МСМ-измерений доменной структуры в пленке ЖИГ получены А.Г. Темиряевым в рамках госзадания. Исследования эффекта генерации ЭДС поддержаны Российским научным фондом (грант РНФ № 22-19-00500).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Y. Li, W. Zhang, V. Tyberkevych, W. Kwong Kwok, A. Hoffmann, V. Novosad. *J. Appl. Phys.* **128**, 130902 (2020).
- [2] A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, I. Prejbeanu, B. Diény, P. Pirro, B. Hillebrands. *JMMM* **509**, 166711 (2020).
- [3] V.E. Demidov, S. Urazhdin, A. Anane, V. Cros, S.O. Demokritov. *J. Appl. Phys.* **127**, 170901(2020).
- [4] M.I. Dyakonov, V.I. Perel. *Phys. Lett. A* **35**, 459 (1971).
- [5] К.И. Константибян, Г.А. Овсянников, К.Л. Станкевич, Т.А. Шайхулов, В.А. Шмаков, А.А. Климов. *ФТТ* **63**, 1312 (2021).
- [6] C.W. Sandweg, Y. Kajiwara, K. Ando, E. Saiton. *Appl. Phys. Lett.* **97**, 252504 (2011).
- [7] R. Iguchi, R. Ando, Z. Qiu, T. Au. *Appl. Phys. Lett.* **102**, 122406 (2013).
- [8] M. Balinsky, M. Ranjbar, M. Yaidar, P. Durrenfeld. *IEEE Magn. Lett.* **6**, 1 (2015).
- [9] O. d’Allivy Kelly, A. Anane, R. Bernard, J.B. Youssef. *Appl. Phys. Lett.* **103**, 082408 (2013).
- [10] Y.V. Nikulin, M.E. Seleznev, Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov, S.L. Vysotskii, A.V. Kozhevnikov, Y.A. Filimonov. *Semiconductors* **54**, 1721 (2020).
- [11] М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов. *ЖТФ*, **91**, 1504 (2021).
- [12] М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, В.К. Сахаров, Г.М. Дудко, Е.С. Павлов, Ю.А. Филимонов. *Изв. вузов. ПНД* **30**, 617 (2022).
- [13] М.Е. Seleznev, Y.V. Nikulin, V.K. Sakharov, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotskii, A.V. Kozhevnikov, G.M. Dudko, E.S. Pavlov, Y.A. Filimonov. *Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, Russia Federation, 32 (2022).
- [14] М.Е. Селезнев. Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. Саратов. (2022).
- [15] A.V. Chumak, A. Serga, M.B. Jungfleisch, R. Nob, D. Bozhko, V. Tiberkevich, B. Hillebrands. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 082405 (2012).
- [16] M. Balinskii, H. Chiang, D. Guttierrez, A. Khitun. *Appl. Phys. Lett.* **118**, 242402 (2021).
- [17] N. Vlietstra, J. Shan, V. Castel, B.J. van Wees, J. Ben Youssef. *Phys. Rev. B* **87**, 184421 (2013).
- [18] L. Lang, X. Qiu, S. Zhou. *Sci. Rep.* **8**, 329 (2018);
- [19] J. Mendil, M. Trassin, Q. Bu, J. Schaab, M. Baumgartner, C. Murer, P.T. Dao, J. Vijayakumar, D. Bracher, C. Bouillet, C.A.F. Vaz, M. Fiebig, P. Gambardella. *Phys. Rev. Mater.* **3**, 034403 (2019).
- [20] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. *Магнитные колебания и волны. Физматлит, М.* (1994). 464 с.
- [21] Ф.В. Лисовский, Е.Г. Мансветова, М.П. Темиряева, А.Г. Темиряев. *Письма в ЖЭТФ* **96**, 665 (2012)
- [22] А.Г. Темиряев, С.А. Саунин, В.Е. Сизов, М.П. Темиряева, *Изв. РАН. Сер. физ.* **78**, 78 (2014).
- [23] А. Мамонов, В.Б. Новиков, А.И. Майдыковский, М.П. Темиряева, А.Г. Темиряев, А.А. Федорова, М.В. Логунов, С.А. Никитов, Т.В. Мурзина. *ЖЭТФ* **163**, 41 (2023).
- [24] Э.Г. Локк, М.П. Темиряева, В.И. Щеглов. *Изв. РАН. Сер. физ.* **74**, 1413 (2010).
- [25] G.A. Jones, E.T.M. Lacey, I.B. Puchalska. *J. Appl. Phys.* **53**, 7870 (1982).
- [26] Р.М. Гричишкин, Ю.Н. Зубков, Д.И. Семенов. *Письма в ЖТФ* **15**, 45 (1989).
- [27] Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Г.Т. Казаков, В.В. Тихонов. *Письма в ЖТФ* **11**, 97 (1985).
- [28] П.Е. Зильберман, Г.Т. Казаков, В.В. Тихонов. *Радиотехника и электроника* **29**, 710 (1987).

- [29] П.Е. Зильберман, В.М. Куликов, В.В. Тихонов, И.В. Шейн. *ЖЭТФ* **99**, 1566 (1991).
- [30] А.В. Вашковский, Э.Г. Локк, В.И. Щеглов. Письма в *ЖЭТФ* **63**, 544 (1996).
- [31] А.В. Вашковский, Э.Г. Локк, В.И. Щеглов. *ЖЭТФ* **111**, 1016 (1997).
- [32] С.А. Вызулин, С.А. Киров, Н.Е. Сырьев. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика и астрономия* **25**, 70 (1984).
- [33] С.А. Вызулин, С.А. Киров, Н.Е. Сырьев. *Радиотехника и электроника* **30**, 179 (1985).
- [34] D.D. Stancil. *J. Appl. Phys.* **56**, 1775 (1984).
- [35] D.J. Halchin. *J. Appl. Phys.* **63**, 3338 (1988).
- [36] А. Высапкас, В. Ивашка, И. Мешкаускас. *Литовск. физ. сб.* **32**, 58 (1992).
- [37] M. Ramesh, E. Jedryka, P.E. Wigen, M. Shone. *J. Appl. Phys.* **57**, 3701 (1985).
- [38] S.-Y. Bi, D.J. Seagle, E.C. Myers, S.H. Charap, J.O. Artman. *IEEE Trans. Magn.* **MAG-18**, 1337 (1982).
- [39] F.J. Rachford, P. Lubitz, C. Vittoria. *J. Appl. Phys.* **52**, 2259 (1981).
- [40] С.А. Киров, А.И. Пильщиков, Н.Е. Сырьев. *ФТТ* **16**, 3051 (1974).
- [41] К.Б. Власов, Л.Г. Оноприенко. *ФММ* **15**, 45 (1963).
- [42] И.Е. Дикштейн, Ф.В. Лисовский, Е. Г. Мансветова, В.В. Тарасенко. *ЖЭТФ* **98**, 2158 (1990).
- [43] J.T. Carlo, D.C. Bullock, F.G. West. *IEEE Trans. MAG-10*, 626 (1974).
- [44] Г.А. Мелков, В.Л. Гранкин. *ЖЭТФ* **67**, 1750 (1974).
- [45] А.И. Пильщиков. *ЖЭТФ* **66**, 679 (1974).
- [46] J.T. Carlo, D.C. Bullock, F.G. West. *IEEE Trans. MAG-10*, 626 (1974).
- [47] R. Nakane, A. Hirose, G. Tanaka. *Phys. Rev. Res.* **3**, 033243 (2021).

*Редактор Ю.Э. Китаев*