



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 44–52  
*Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 44–52  
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

Научная статья  
УДК 537.86.4



## Влияние кристаллографической анизотропии ненасыщенной пленки железо-иттриевого граната на спиновую инжекцию в пленку платины по механизму обратного спинового эффекта Холла

С. Л. Высоцкий<sup>1,2</sup>✉, М. Е. Селезнев<sup>1,2</sup>, Г. М. Амаханов<sup>1,3</sup>, Ю. В. Никулин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Высоцкий Сергей Львович, кандидат физико-математических наук, <sup>1</sup>ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники, <sup>2</sup>доцент кафедры технологии материалов, [vysotsl@gmail.com](mailto:vysotsl@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>, AuthorID: 27015

Селезнев Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, <sup>1</sup>научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники, <sup>2</sup>доцент кафедры технологии материалов, [mixanich94@mail.ru](mailto:mixanich94@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7359-3201>, AuthorID: 1031873

Амаханов Гайдар Маликович, <sup>1</sup>инженер лаборатории магнитоэлектроники; <sup>3</sup>студент, [agm.05@yandex.ru](mailto:agm.05@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0003-9998-3384>

Никулин Юрий Васильевич, кандидат физико-математических наук, <sup>1</sup>старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники; <sup>2</sup>доцент кафедры технологии материалов, [yvnikulin@gmail.com](mailto:yvnikulin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>, AuthorID: 168029

**Аннотация.** Исследована генерация тока носителей заряда в пленках платины, нанесенных на поверхность ферритовых волноводов, изготовленных из пленок железо-иттриевого граната кристаллографических ориентаций (100) и (111). Из каждой пленки вырезалось по два волновода, короткие стороны которых ориентировались в направлении осей трудного и легкого намагничивания. Спиновые волны возбуждались в полученных структурах в геометрии поверхностных магнитоэлектрических волн при величинах поля подмагничивания, не обеспечивающих намагничивания пленок железо-иттриевого граната до насыщения. Показано, что для обеих кристаллографических ориентаций генерация тока носителей заряда наиболее эффективно происходит при направлении внешнего магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания в условиях формирования в пленке феррита симметричной полосовой доменной структуры.

**Ключевые слова:** железо-иттриевый гранат, спиновые волны, кристаллографическая анизотропия, магнитные домены, обратный спиновый эффект Холла

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00640).

**Для цитирования:** *Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Амаханов Г. М., Никулин Ю. В.* Влияние кристаллографической анизотропии ненасыщенной пленки железо-иттриевого граната на спиновую инжекцию в пленку платины по механизму обратного спинового эффекта Холла // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 44–52. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Influence of crystallographic anisotropy of unsaturated yttrium iron garnet film on spin injection in platinum film by the mechanism of inverse spin Hall effect

S. L. Vysotskii<sup>1,2</sup>✉, M. E. Seleznev<sup>1,2</sup>, G. M. Amakhanov<sup>1,3</sup>, Yu. V. Nikulin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

<sup>2</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>3</sup>Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

Sergei L. Vysotskii, [vysotsl@gmail.com](mailto:vysotsl@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3151-9297>, AuthorID: 27015

Mikhail E. Seleznev, [mixanich94@mail.ru](mailto:mixanich94@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7359-3201>, AuthorID: 1031873

Gaidar M. Amakhanov, [agm.05@yandex.ru](mailto:agm.05@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0003-9998-3384>

Yury V. Nikulin, [yvnikulin@gmail.com](mailto:yvnikulin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>, AuthorID: 168029

© *Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Амаханов Г. М., Никулин Ю. В.*, 2025



**Abstract. Background and Objectives:** Thin-film structures of yttrium iron garnet ferrite film – platinum are actively studied due to the possibility of using the direct (for converting electric current in platinum into spin waves in ferrite) and inverse (injection of spin current from ferrite into platinum film) spin Hall effects for application in magnonics and spintronics devices. **Materials and Methods:** The structures studied in this work were obtained on the basis of yttrium iron garnet films of crystallographic orientations (100) and (111), from which waveguides were cut out, in which spin waves were excited. Their propagation was monitored using a vector network analyzer. A platinum film in the form of stripe oriented along the long axis of the waveguide was fabricated on the surface of the waveguides using magnetron sputtering, photolithography, and ion etching. Spin injection from ferrite film in the platinum film results in electric charge current generation. An experimentally measured value was the electromotive force between contacts to the platinum stripe. It was measured using a synchronous detector. The measurements were carried out at magnetization field values lower than the saturation field of the ferrite film, with the magnetic structure of the film being divided into domains. **Results and Conclusions:** It has been shown that for both crystallographic orientations the maximum spin injection is achieved when magnetizing the waveguides along the easy magnetization axis and symmetrical domain structure is formed.

**Keywords:** yttrium iron garnet, spin waves, crystallographic anisotropy, magnetic domains, inverse spin Hall effect

**Acknowledgments:** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-29-00640).

**For citation:** Vysotskii S. L., Seleznev M. E., Amakhanov G. M., Nikulin Yu. V. Influence of crystallographic anisotropy of unsaturated yttrium iron garnet film on spin injection in platinum film by the mechanism of inverse spin Hall effect. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 44–52 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-1-44-52>, EDN: IJAXHF

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

## Введение

Эффекты взаимного преобразования спинового тока и тока носителей заряда в слоистых структурах «феррит – тяжелый металл» активно исследуются на протяжении более двух десятков лет [1–13], поскольку с их использованием связывается возможность построения устройств магноники и спинтроники. Наиболее часто исследуются структуры, состоящие из пленок железоиттриевого граната (ЖИГ), являющегося лучшей средой для исследования спин-волновых возбуждений, и платины. В данной работе рассматривается обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ), заключающийся в том, что в структуре ЖИГ-платина при наличии в пленке ЖИГ спин-волновых возбуждений (как резонансного характера, так и распространяющихся волн) в пленке платины генерируется ток носителей заряда

$$\vec{I}_e \propto |I_{s,n}| \cdot [\vec{n} \times \vec{m}],$$

где  $\vec{n}$  и  $\vec{m}$  – единичные векторы вдоль нормали к поверхности пленки ЖИГ и намагниченности,  $I_{s,n}$  – компонента спинового тока вдоль нормали  $\vec{n}$ . Наиболее часто ОСЭХ исследуется при величинах поля подмагничивания  $H$ , достаточных как для намагничивания пленки ЖИГ до насыщения, так и для запрета развития процессов ЗМ параметрической неустойчивости [14]. При уменьшении магнитного поля  $H$  до величин  $H < H_s$ , где  $H_s$  – поле насыщения, в пленке ЖИГ формируются доменные структуры (ДС), при этом в [15] показана возможность наблюдения ОСЭХ для поддерживаемых доменной структурой спин-волновых возбуждений, обусловленных синфазными и противофазными колебаниями намагниченности в доменах, а также волнами смещения доменных границ [16–19].

Следует отметить, что исследование ОСЭХ в структурах ЖИГ-платина, как правило, ведется с использованием пленок ЖИГ, эпитаксиально выращенных на подложках из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) кристаллографической ориентации (111). Для таких пленок при величинах поля подмагничивания больше поля насыщения при фиксированной величине  $H$  положение спектра поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) [20] практически не зависит от направления  $H$  относительно кристаллографических осей пленки [21]. Особенности ОСЭХ при использовании в качестве подложки ГГГ (100) рассматривались в [22]. В этом случае в плоскости пленки можно выделить оси трудного [100] и «полулегкого» намагничивания [110]. Изменение направления намагничивания пленки относительно этих осей приводит к сдвигу спектра исследованных в работе ПМСВ и, соответственно, влияет на диапазон частот, в котором наблюдается генерация ЭДС.

В данной работе исследуется зависимость эффекта ОСЭХ в структурах ЖИГ(100)-платина и ЖИГ(111)-платина от направления поля намагничивания относительно кристаллографических осей структуры в малых полях подмагничивания.

## 1. Исследуемые структуры и методика эксперимента

Исследовались структуры, полученные на основе пленок ЖИГ кристаллографических ориентаций (100) толщиной 16.1 мкм и (111) толщиной 15.6 мкм с намагниченностью насыщения 1750 Гс, в которых с помощью методики [23] были определены направления осей трудного и легкого намагничивания. Из обеих пленок были вырезаны волноводы с плоскостными размерами



10 x 5 мм, на поверхности которых с помощью технологий магнетронного напыления, фотолитографии и ионного травления была изготовлены ориентированные вдоль длинной стороны волновода полоски из платины толщиной 4 нм, длиной 4 мм, шириной 25 мкм; их сопротивление равнялось 11–12 кОм. Далее структуры на основе пленки (100) будем называть образцами № 1 и № 2, а на основе (111) – № 3 и № 4, при этом короткие оси волноводов (вдоль которых в эксперименте будет прикладываться поле подмагничивания  $H$ ) образцов № 1 и № 3 соответствуют направлению оси трудного намагничивания (ОТН), а образцов № 2 и № 4 – направлению легкого намагничивания (ОЛН). На вставке к рис. 1 пунктиром показаны направления ОТН (НМЕ) в образцах № 1 и № 3 и ОЛН (ЕМЕ) в образцах № 2 и № 4. Там же показаны направления приложения магнитного поля  $\vec{H}$  и распространения спиновых волн  $\vec{q}$ .

Образцы устанавливались в макет линии задержки (ЛЗ) ПМСВ с микрополосковыми антеннами шириной 40 мкм с расстоянием между ними 7 мм, который размещался между полюсами электромагнита. Поле подмагничивания прикладывалось касательно к поверхности структуры перпендикулярно длинной оси волноводов. Контакты к полоске платины для измерения генерируемой ЭДС выполнялись с помощью токопроводящего клея. В процессе измерений доменная структура пленок ЖИГ могла наблюдаться с помощью поляризационного микроскопа.

На входную антенну от векторного анализатора цепей подавалась СВЧ мощность 7 дБм в режиме измерения ЭДС или –25 дБм для контроля области частот возбуждения СВ. Модуляция СВЧ мощности сигналом в виде меандра с частотой 11.3 кГц позволяла проводить измерение ЭДС с помощью синхронного детектора. Регистрировались частотные зависимости модуля коэффициента передачи спиновых волн  $S_{12}(f)$  и ЭДС  $U(f)$ . Известно [14], что при распространении ПМСВ в структуре пленка ЖИГ – платина максимальная величина генерируемой ЭДС наблюдается на частотах, отвечающих длинноволновой  $f_0$  и коротковолновой  $f_s$  границам спектра ПМСВ. Используемые в конструкции макета ЛЗ антенны не позволяют возбуждать коротковолновую часть спектра ПМСВ на частотах, близких к  $f_s$ . По этой причине при регистрации частотных зависимостей  $U(f)$  будем ограничиваться областью частот вблизи частоты  $f_0$ .

Подробное описание методики измерений приведено в [15].

## 2. Результаты измерений

На рис. 1, а и 1, б приведены частотные зависимости  $S_{12}(f)$  (кривые 1–4) и ЭДС  $U(f)$  ( $1^U$ – $4^U$ ), соответственно, для случаев размещения в макете ЛЗ образцов № 1 – № 4 (номера кривых соответствуют номеру структуры) при намагничивании пленок ЖИГ до насыщения ( $H = 940$  Ое). Видно, что длинноволновые (низкочастотные) границы спектра ПМСВ в образцах № 1 и № 2 (показаны на рисунке стрелками), намагниченных вдоль осей трудного ( $f_{01}$ ) и легкого ( $f_{02}$ ) намагничивания, соответственно, различаются примерно на 400 МГц, тогда как для образцов № 3 и № 4  $f_{03}$  и  $f_{04}$  практически совпадают. Максимальные величины ЭДС  $U_{\max}$  вблизи  $f_0$  помечены звездочками на зависимостях  $U(f)$  (рис. 1, б) для всех образцов.

Рассмотрим зависимости от величины  $H$  длинноволновых границ спектра ПМСВ и  $U_{\max}$  для исследованных образцов. При этом, поскольку в ненасыщенной пленке ЖИГ в используемой в эксперименте геометрии ПМСВ характер распределения намагниченности по толщине пленки и в направлении распространения распространяющихся в ДС волн может отличаться от случая насыщенной пленки, будем называть распространяющиеся волны спин-волновыми возбуждениями (СВВ).

На рис. 2, а кривыми 1 и 2 представлены зависимости  $f_0(H)$  для образцов № 1 и № 2, соответственно. Видно, что при намагничивании в направлении оси трудного намагничивания при уменьшении  $H$  до величин  $H < 60$  Э характер зависимости меняется – при уменьшении  $H$  частота  $f_{01}$  растет (кривая 1 на рис. 2, а), при этом уровень регистрируемой ЭДС становится неразличимым на фоне шумов (см. кривую  $1^U$  на рис. 2, б и вставку к нему).

В то же время, при приложении поля  $H$  вдоль оси легкого намагничивания частота  $f_{02}$  монотонно снижается при уменьшении  $H$  до 0 (кривая 2 на рис. 2, а), а зависимость  $U(H)$  демонстрирует генерацию ЭДС во всем интервале величин  $H$ , отвечающих ненасыщенному состоянию пленки ЖИГ (кривая  $2^U$  на рис. 2, б и вставка к нему), при этом для  $H \approx 10$  Э наблюдается ярко выраженный максимум.

На рис. 3, а приведено изображение доменной структуры для образца № 1, которая становится различимой при уменьшении  $H$  до пример-

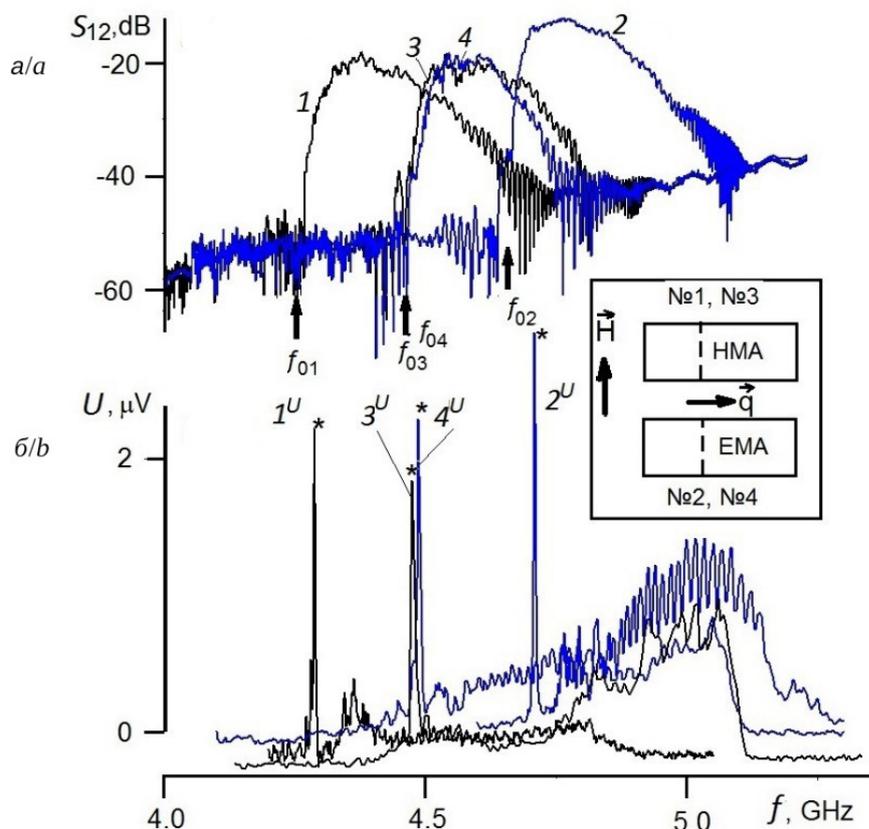


Рис. 1. Частотные зависимости  $S_{12}(f)$  (кривые 1–4 на рис. 1, а) и ЭДС  $U(f)$  ( $1^U$ – $4^U$ ) (кривые на рис. 1, б) при намагничивании пленок ЖИГ до насыщения ( $H = 940$  Э) (цвет онлайн)

Fig. 1. Frequency dependences of  $S_{12}(f)$  (curves 1–4 in Fig. 1, a) и EMF  $U(f)$  ( $1^U$ – $4^U$ ) in Fig. 1, b) at  $H = 940$  Oe (saturated YIG film) (color online)

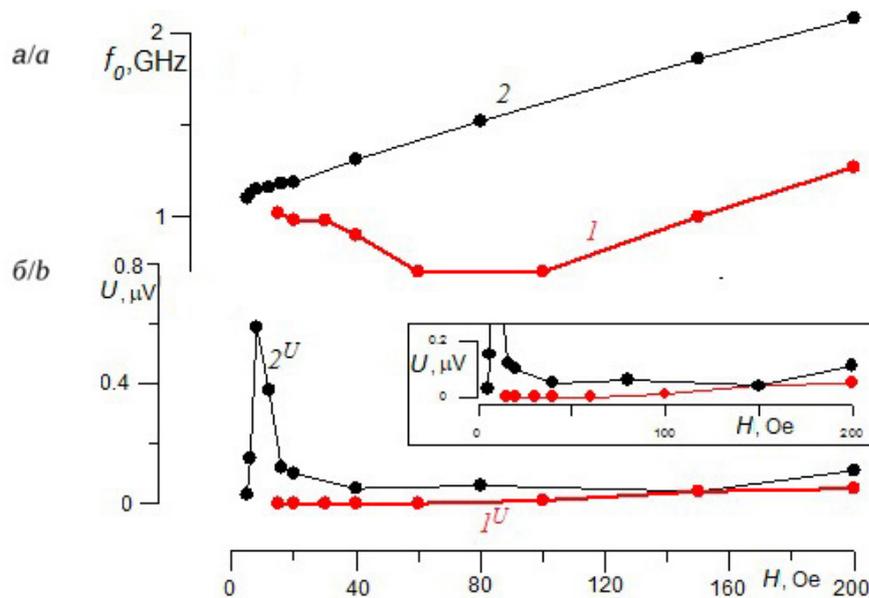


Рис. 2. Зависимости  $f_0(H)$  для СВВ образцов № 1 (кривая 1) и № 2 (кривая 2) (а); зависимости  $U(H)$  для образцов № 1 (кривая  $1^U$ ) и № 2 (кривая  $2^U$ ) (б) (цвет онлайн)

Fig. 2. Dependences  $f_0(H)$  for SWE of samples no. 1 (curve 1) and no. 2 (curve 2) (a); dependences  $U(H)$  for samples no. 1 (curve  $1^U$ ) and no. 2 (curve  $2^U$ ) (b) (color online)



но 50 Э. Видно, что она является симметричной (отношение ширины «светлого» и «темного» доменов  $t \approx 1$ ) полосовой с периодом  $\Lambda \approx 4$  мкм (ширина темной горизонтальной полосы (платины) равна 25 мкм может использоваться как масштабная метка). При этом, несмотря на то, что внешнее поле  $H$  направлено вдоль оси трудного намагничивания (НМА), домены ориентированы вдоль оси легкого намагничивания (ЕМА) в пленке ЖИГ. Такая ориентация сохраняется при уменьшении  $H$  до 15 Э (рис. 3, б), после чего сигнал СВВ не наблюдается. Из сопоставления кривых  $I^U$  на рис. 2, б и рис. 3, а можно заключить, что в структуре № 1 при величинах  $H$ , отвечающих формированию в пленке ЖИГ доменной структуры, ОСЭХ не наблюдается. В свою очередь, в структуре № 2 с момента начала наблюдения при  $H \approx 50$  Э (рис. 3, в) и до  $H = 0$  (рис. 3, г) домены остаются ориентированными вдоль ОЛН, при этом генерация ЭДС наблюдается во всем исследованном интервале величин  $H$ .

Рассмотрим теперь аналогичные зависимости для образцов № 3 и № 4, полученных на основе пленки ЖИГ(111). На рис. 4, а приведена зависимость  $f_0(H)$  для структуры № 3 (намагни-

ченной в направлении ОТН), из которой следует, что при  $H < 60$  Э область наблюдения ПМСВ с низкочастотной границей  $f_{03}$  (кривая 3) разделяется на две области наблюдения доменных СВВ – противофазное и синфазное с низкочастотными границами, показанными на рис. 4, а кривыми 3<sub>1</sub> и 3<sub>2</sub> соответственно. Эти СВВ регистрируются при уменьшении величины  $H$  до 50 и 40 Э соответственно. При дальнейшем уменьшении  $H$  СВВ отсутствуют до  $H \approx 26$  Э, когда формируется и наблюдается до  $H \approx 3$  Э СВВ, обусловленное колебаниями доменных границ, с низкочастотной границей, показанной на рис. 4, а кривой 3<sub>3</sub>. Из рис. 4, б видно, что для всех описанных видов СВВ наблюдается генерация ЭДС.

В случае образца № 4 (намагниченного в направлении оси легкого намагничивания) вид исследуемых зависимостей качественно не изменяется (см. рис. 4, в), однако интервал величин  $H$  наблюдения противофазных СВВ расширяется до 26 Э, синфазных – до 40 Э, а для СВВ, обусловленного колебаниями доменных границ, не изменяется. Вид соответствующих зависимостей  $U(H)$  показан на рис. 4, г. Из сравнения рис. 4, б и 4, г видно, что в структуре № 4 уровень

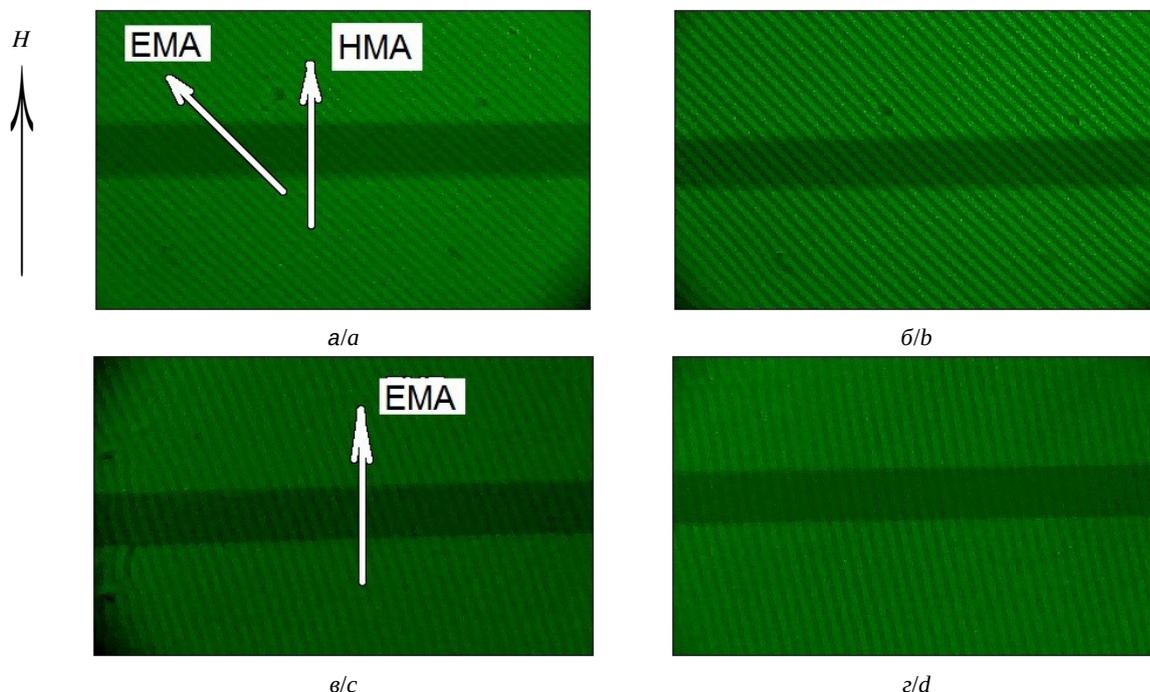


Рис. 3. Вид доменных структур в образце № 1 при  $H \approx 50$  Э (а) и  $H \approx 15$  Э (б) и в образце № 2 при  $H \approx 50$  Э (в) и  $H \approx 0$  (г). Темная горизонтальная линия (полоска платины шириной 25 мкм) может быть использована как масштабная метка (цвет онлайн)

Fig. 3. View of domain structures in sample no. 1 at  $H \approx 50$  Oe (a) and  $H \approx 15$  Oe (b) and in sample no. 2 at  $H \approx 50$  Oe (c) and  $H \approx 0$  (d). The dark horizontal line (platinum strip 25  $\mu\text{m}$  wide) can be used as a scale mark (color online)

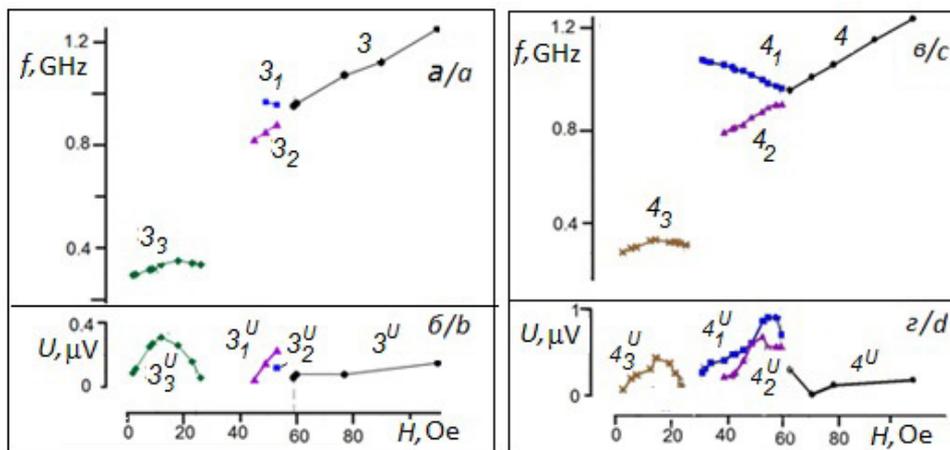


Рис. 4. Зависимости  $f_0(H)$  для СВВ образца № 3 (кривые 3, 3<sub>1</sub>, 3<sub>2</sub>, 3<sub>3</sub>) (а); зависимости  $U(H)$  для СВВ образца № 3 (кривые 3<sup>U</sup>, 3<sub>1</sub><sup>U</sup>, 3<sub>2</sub><sup>U</sup>, 3<sub>3</sub><sup>U</sup>) (б); зависимости  $f_0(H)$  для СВВ образца № 4 (кривые 4, 4<sub>1</sub>, 4<sub>2</sub>, 4<sub>3</sub>) (в); зависимости  $U(H)$  для СВВ образца № 4 (кривые 4<sup>U</sup>, 4<sub>1</sub><sup>U</sup>, 4<sub>2</sub><sup>U</sup>, 4<sub>3</sub><sup>U</sup>) (г) (цвет онлайн)

Fig. 4. Dependences  $f_0(H)$  for SWE of sample no. 3 (curves 3, 3<sub>1</sub>, 3<sub>2</sub>, 3<sub>3</sub>) (a); dependences  $U(H)$  for SWE sample no. 3 (curves 3<sup>U</sup>, 3<sub>1</sub><sup>U</sup>, 3<sub>2</sub><sup>U</sup>, 3<sub>3</sub><sup>U</sup>) (b); dependences  $f_0(H)$  for SWE sample no. 4 (curves 4, 4<sub>1</sub>, 4<sub>2</sub>, 4<sub>3</sub>) (c); dependences  $U(H)$  for SWE sample no. 4 (curves 4<sup>U</sup>, 4<sub>1</sub><sup>U</sup>, 4<sub>2</sub><sup>U</sup>, 4<sub>3</sub><sup>U</sup>) (d) (color online)

регистрируемой ЭДС в несколько раз выше, чем для структуры № 3.

На рис. 5 представлены изображения ДС структур № 3 и № 4 для нескольких величин  $H$ . Для образца № 3 различить ДС можно было при уменьшении  $H$  до величин, меньших 58 Э, при этом период ДС составлял  $\Lambda \approx 29$  мкм, а сама она имела вид полосовой несимметричной с параметром  $t \approx 9$  (см. рис. 5, а для  $H \approx 38$  Э). С уменьшением  $H$  величины  $\Lambda$  и  $t$  уменьшались (см. рис. 5 для  $H \approx 25$  Э) при со-

хранении полосового характера ДС, достигая  $\Lambda \approx 11$  мкм и  $t \approx 1$ , соответственно, при  $H \approx \approx 22$  Э. В интервале 22–11 Э наблюдалась блочная зигзагообразная структура ДС, где оси доменов ориентировались вдоль какой-либо из осей легкого намагничивания, при этом величина  $t$  сохранялась равной 1 при  $\Lambda \approx 10$  мкм (рис. 5, в). При  $H < 16$  Э ДС принимала характер симметричной полосовой с периодом  $\Lambda \approx 10$  мкм, которая сохранялась до  $H = 0$  (рис. 5, г). Из сопоставления рис. 4, б и 5, в, г следует, что наиболее эффек-

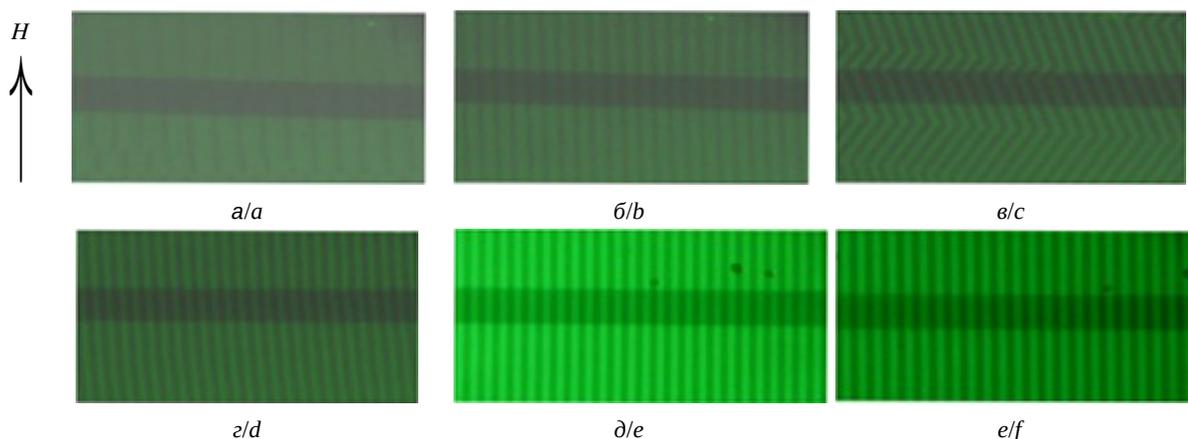


Рис. 5. Вид доменных структур в образце № 3 при  $H \approx 38$  Э (а),  $H \approx 25$  Э (б),  $H \approx 18$  Э (в),  $H \approx 5$  Э (г) и в образце № 2 при  $H \approx 40$  Э (д) и  $H \approx 5$  Э (е). Темная горизонтальная линия (полоска платины шириной 25 мкм) может быть использована как масштабная метка (цвет онлайн)

Fig. 5. View of domain structures in sample no. 3 at  $H \approx 38$  Oe (a),  $H \approx 25$  Oe (b),  $H \approx 18$  Oe (c),  $H \approx 5$  Oe (d) and in sample no. 2 at  $H \approx 40$  Oe (e) and at  $H \approx 5$  Oe (f). The dark horizontal line (platinum strip 25  $\mu\text{m}$  wide) can be used as a scale mark (color online)



тивно в структуре № 3 ЭДС генерируется, когда доменная структура принимает вид полосовой симметричной.

Для образца № 4 ДС при уменьшении  $H$  до  $H \approx 50$  Э регистрировалась симметричная полосовая структура с периодом  $\Lambda \approx 11$  мкм,  $t \approx 1$  (рис. 5, д). Такой вид ДС сохранялся при уменьшении  $H$  до 0 (рис. 5, е). Максимальная величина ЭДС наблюдалась для протовофазного СВВ при  $H \approx 56$  Э.

### Заключение

С использованием пленок ЖИГ кристаллографической ориентации (100) и (111) экспериментально исследован обратный спиновый эффект Холла в образцах «пленка феррита – пленка платины» в условиях разбиения магнитной структуры пленки ЖИГ на домены. Показано, что при направлении внешнего магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания пленок ЖИГ и формировании в пленке ЖИГ симметричной полосовой доменной структуры генерируемая в пленке платины ЭДС может в несколько раз превышать аналогичную величину, регистрируемую при намагничивании структуры вдоль оси трудного намагничивания.

### Список литературы

1. Dyakonov M. I., Perel V. I. Current induced spin orientation of electrons in semiconductors // *Phys. Lett. A*. 1971. Vol. 35, № 6. P. 459–460. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(71\)90196-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(71)90196-4)
2. Sandweg C. W., Kajiwara Y., Ando K., Saitoh E., Hillebrands B. Enhancement of the spin pumping efficiency by spin wave mode selection // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, № 25. Art. 252504. <https://doi.org/10.1063/1.3528207>
3. Yang F., Hammel P. C. FMR-driven spin pumping in  $Y_3Fe_5O_{12}$ -based structures // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 51, № 25. Art. 253001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac249>
4. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Ioan-Lucian P., Dieny B., Pirro P., Hillebrands B. Review on spintronics: Principles and device applications // *JMMM*. 2020. Vol. 509, № 12. Art. 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
5. Manuilov S. A., Du C., Adur R., Wang H. L., Bhallamudi V., Yang F., Hammel P. C. Spin pumping from spinwaves in thin film YIG // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Vol. 107, № 4. Art. 042405. <https://doi.org/10.1063/1.4927451>
6. Chumak A. V., Serga A. A., Jungfleisch M. B., Neb R., Bozhko D. A., Tiberkevich V. S., Hillebrands B. Direct detection of magnon spin transport by the inverse spin Hall effect // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100, № 8. Art. 082405. <https://doi.org/10.1063/1.3689787>
7. Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Kehlberger A., Lauer V., Kim D. H., Onbasli M. C., Ross C. A., Klaui M., Hillebrands B. Thickness and power dependence of the spin-pumping ejet in  $Y_3Fe_5O_{12}/Pt$  heterostructures measured by the inverse spin Hall effect // *Phys. Rev. B*. 2015. Vol. 91, № 13. Art. 134407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.134407>
8. Kohno R., Thiéry N. M., An K., Noël P., Vila L., Naletov V. V., Beaulieu N., Youssef J. D., Loubens G., Klein O. Enhancement of YIG|Pt spin conductance by local Joule annealing // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 118, № 3. Art. 032404. <https://doi.org/10.1063/5.0028664>
9. Wang J., Wang H., Chen J., Legrand W., Chen P., Sheng L., Xia J., Lan G., Zhang Y., Yuan R., Dong J., Han X., Ansermet J. P., Yu H. Broad-wave-vector spin pumping of flat-band magnons // *Phys. Rev. Appl.* 2024. Vol. 21, № 4. Art. 044024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.044024>
10. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostelev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-Damping Spin-Wave Transmission in YIG/Pt-Interfaced Structures // *Adv. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 9, iss. 36. Art. 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
11. Zhao Y., Yao Y., Chai Y., Zhou Z., Li Y., Guo Y., Lu Q., Liu H., Yang G., Dong G., Peng B., Hu Z., Liu M. Greatly Improved the Tunable Amplitude of Ferromagnetism Based on Interface Effect of Flexible Pt/YIG Heterojunctions // *ACS Appl Mater Interfaces*. 2024 Vol. 16, iss. 8. P. 10953–10959. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c17220>
12. Lobanov N., Matveev O., Morozova M. Bragg Resonances in a Yttrium Iron Garnet–Platinum–Yttrium Iron Garnet Layered Structure // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. Vol. 88, iss. 2. P. 254–259. <https://doi.org/10.1134/S1062873823705330>
13. Yang M., Sun L., Zeng Y., Cheng J., He K., Yang X., Wang Z., Yu L., Niu H., Ji T., Chen G., Miao B., Wang X., Ding H. Highly efficient field-free switching of perpendicular yttrium iron garnet with collinear spin current // *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15. Art. 3201. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47577-x>
14. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Высоцкий С. Л., Кожевников А. В., Сахаров В. К., Дудко Г. М., Филимонов Ю. А. Влияние параметрической неустойчивости на спиновую накачку дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами в структурах ЖИГ–Pt // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2023. Т. 31, № 2. С. 225–242. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003032>
15. Высоцкий С. Л., Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Амаханов Г. М., Темиряев А. Г. Детектирование спин-волновых возбуждений доменной структуры в пленке железо-иттриевого граната с помощью обратного спинового эффекта Холла // *ФТТ*. 2024. Т. 66, № 7. С. 1057–1061. <https://doi.org/10.61011/ФТТ.2024.07.58373.34НН>
16. Вызулин С. А., Киров С. А., Сырьев Н. Е. Волны смещений доменных границ в ферритовой пластинке // *Радиотехника и электроника*. 1985. Т. 30, № 1. С. 179–181.



17. Stancil D. D. A magnetostatic wave model for domain wall collective excitation // *J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 56, iss. 6. P. 1775–1779. <https://doi.org/10.1063/1.334184>
18. Ramesh M., Jedryka E., Wigen P. E., Shone M. Coupled oscillations of domain-domain wall system in garnet films // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 57, iss. 8. P. 3701–3703. <https://doi.org/10.1063/1.334995>
19. Киров С. А., Пильщиков А. И., Сырьев Н. Е. Магнитостатические типы колебаний в образце с доменной структурой // ФТТ. 1974. Т. 16, № 10. С. 3051–3056.
20. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М. : Физматлит, 1994. 464 с.
21. Берегов А. С., Кудинов Е. В. Магнитостатические волны в произвольно ориентированной пленке кубического ферромагнетика с наведенной анизотропией. Ч. II. Дисперсионные характеристики магнитостатических волн // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.* 1987. № 6 (400). С. 8–12.
22. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Сахаров В. К., Амаханов Г. М. Спиновая накачка ПМСВ, бегущими в направлениях «легкая» и «трудная» оси намагничивания, в микроструктурах ЖИГ/Pt // XXV Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» : сб. докладов : в 2 т. Москва, 1–6 июля 2024 г. М. : РТУ МИРЭА, 2024. Т. 1. С. 454–459.
23. Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Филимонов Ю. А., Шеин И. В., Хе А. С. Магнитостатические волны в косонамагнитенной структуре с двумя ферритовыми слоями ориентации (111) // *Радиотехника и электроника.* 1990. Т. 35, № 5. С. 959–965.
7. Jungfleisch M. B., Chumak A. V., Kehlberger A., Lauer V., Kim D. H., Onbasli M. C., Ross C. A., Klaui M., Hillebrands B. Thickness and power dependence of the spin-pumping ejet in  $Y_3Fe_5O_{12}/Pt$  heterostructures measured by the inverse spin Hall effect. *Phys. Rev. B*, 2015, vol. 91, no. 13, art. 134407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.134407>
8. Kohno R., Thiéry N. M., An K., Noël P., Vila L., Naleto V. V., Beaulieu N., Youssef J. D., Loubens G., Klein O. Enhancement of YIG/Pt spin conductance by local Joule annealing. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, vol. 118, no. 3, art. 032404. <https://doi.org/10.1063/5.0028664>
9. Wang J., Wang H., Chen J., Legrand W., Chen P., Sheng L., Xia J., Lan G., Zhang Y., Yuan R., Dong J., Han X., Ansermet J. P., Yu H. Broad-wave-vector spin pumping of flat-band magnons. *Phys. Rev. Appl.*, 2024, vol. 21, art. 044024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.044024>
10. Serha R. O., Bozhko D. A., Agrawal M., Verba R. V., Kostylev M., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Serga A. A. Low-Damping Spin-Wave Transmission in YIG/Pt-Interfaced Structures. *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 9, iss. 36, art. 2201323. <https://doi.org/10.1002/admi.202201323>
11. Zhao Y., Yao Y., Chai Y., Zhou Z., Li Y., Guo Y., Lu Q., Liu H., Yang G., Dong G., Peng B., Hu Z., Liu M. Greatly Improved the Tunable Amplitude of Ferromagnetism Based on Interface Effect of Flexible Pt/YIG Heterojunctions. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, vol. 16, iss. 8, pp. 10953–10959. <https://doi.org/10.1021/acscami.3c17220>
12. Lobanov N., Matveev O., Morozova M. Bragg Resonances in a Yttrium Iron Garnet–Platinum–Yttrium Iron Garnet Layered Structure. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2024, vol. 88, iss. 2, P. 254–259. <https://doi.org/10.1134/S1062873823705330>
13. Yang M., Sun L., Zeng Y., Cheng J., He K., Yang X., Wang Z., Yu L., Niu H., Ji T., Chen G., Miao B., Wang X., Ding H. Highly efficient field-free switching of perpendicular yttrium iron garnet with collinear spin current. *Nat. Commun.*, 2024, vol. 15, art. 3201. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47577-x>
14. Seleznev M. E., Nikulin Y. V., Khivintsev Y. V., Vysotskii S. L., Kozhevnikov A. V., Sakharov V. K., Dudko G. M., Pavlov E. S., Filimonov Y. A. Influence of three-magnon decays on electromotive force generation by magnetostatic surface waves in integral YIG-Pt structures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2023, vol. 31, no. 2, pp. 225–248. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-003032>
15. Vysotskii S. L., Seleznev M. E., Nikulin Yu. V., Kozhevnikov A. V., Amakhanov G. M., Temirazyev A. G. Detection of spin-wave excitations of domain structure in yttrium-iron film using inverse spin Hall effect. *Fizika Tverdogo Tela*, 2024, vol. 66. no. 7, pp. 1057–1061 (in Russian). <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.07.58373.34HH>
16. Vizulin S. A., Kirov S. A., Siryev N. E. Domains wall displacement waves in ferrite plate. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1985, vol. 30, no. 1, pp. 179–181 (in Russian).



17. Stancil D. D. A magnetostatic wave model for domain wall collective excitation. *J. Appl. Phys.*, 1984, vol. 56, no. 6, pp. 1775–1779. <https://doi.org/10.1063/1.334184>
18. Ramesh M., Jedryka E., Wigen P. E., Shone M. Coupled oscillations of domain – domain wall system in garnet films. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, no. 1, pp. 3701–3703. <https://doi.org/10.1063/1.334995>
19. Kirov S. A., Pilshikov S. A., Siryev N. E. Magnetostatic types of oscillations in sample with domain structure. *Physika Tverdogo Tela*, 1974, vol. 16, no. 1, pp. 3051–3056 (in Russian).
20. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnetization oscillations and waves*. London, CRC Press, 1996. 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
21. Beregov A. S., Kudinov E. V. Magnetostatic waves in arbitrary oriented film of cubic ferromagnetic with induced anisotropy. Part II. Dispersion characteristics of magnetostatic waves. *Electronic Technique. Ser. Microwave Electronics*, 1987, no. 6 (400), pp. 8–12 (in Russian).
22. Seleznev M. E., Nikulin Yu. V., Sakharov V. K., Amakhanov G. M. Spin pumping by MSSW propagating along “easy” and “hard” magnetization axes in microstructures YIG/Pt. *XXV International Conference “New in Magnetism and Magnetic Materials”: Collection of reports: in 2 vols. Moscow, July 1–6, 2024*. Moscow, RTU MIREA Publ., 2024, vol. 1, pp. 454–459.
23. Vysotskii S. L., Kazakov G. T., Filimonov Yu. A., Shein I. V., He A. S. Magnetostatic waves in obliquely magnetized structure consist of two ferrite layers of (111) orientation. *Radiotekhnika i Elektronika*, 1990, vol. 35, no. 5, pp. 959–965 (in Russian).

Поступила в редакцию 13.09.2024; одобрена после рецензирования 08.10.2024;  
принята к публикации 16.10.2024; опубликована 31.03.2025

The article was submitted 13.09.2024; approved after reviewing 08.10.2024;  
accepted for publication 16.10.2024; published 31.03.2025