

## Динамическое излучение и поглощение THz-сигналов массивом двуслойных нанопроволок

© С.Г. Чигарев,<sup>1</sup> Е.А. Вилков,<sup>1</sup> О.А. Бышевский-Конопко,<sup>1</sup> Д.Л. Загорский,<sup>2</sup> И.М. Долуденко,<sup>2</sup> А.И. Панас<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,  
141190 Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Институт кристаллографии им А.В.Шубникова Курчатовского комплекса „Кристаллография и фотоника“ НИЦ  
„Курчатовский институт“,  
119333 Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственное научно-производственное предприятие „Исток“ им. Шокина,  
141190 Фрязино, Московская обл., Россия  
e-mail: chig50@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2024 г.

В окончательной редакции 17 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Рассмотрены источники THz-излучения, построенные на принципах спинтроники, использующие гетероструктуры, образованные массивами двуслойных нанопроволок Fe/Ni и Ni/Co, выращенных в полимерных матрицах (трековых мембранах). В диапазоне частот 12–30 THz проведен сравнительный анализ их реакции на ток, протекающий по ним, и отдельно на внешнее THz-излучение. Установлено соответствие частотных диапазонов спин-инжекционного (динамического) THz-излучения, возбуждаемого током, инжектирующего спины в слоях гетероструктур, и области интенсивного поглощения электромагнитных колебаний внешнего источника. Это говорит о возможности использования структур с массивом нанопроволок для регистрации THz-сигналов.

**Ключевые слова:** спиновая инжекция током, внешнее THz-излучение, спиновая неуровновешенность, динамическое THz-излучение, поглощение THz-излучения.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59469.180-24

### Введение

Освоение терагерцового диапазона частот (1–30 THz), в том числе и поиск его еще неизвестных потенциальных возможностей, требует расширения круга исследований. Но отсутствие общедоступных, имеющих низкие цены, определяемые сложностью технологии их изготовления и используемыми материалами и комплектующими, компактных, с малыми размерами и весом, устойчиво работающих в широком температурном диапазоне, в том числе и при комнатных температурах, надежных и простых в эксплуатации источников и приемников сигналов затрудняет данные исследования. Существующие источники THz-излучения (лампа обратной волны (ЛОВ), лазер на свободных электронах (ЛСЭ), квантовокаскадный лазер (ККЛ) и т.п.), а также используемые широкополосные детекторы, такие, как ячейка Голея или болометры на сверхпроводниках, практически полностью перекрывают указанный THz-диапазон частот. Однако все они далеко не отвечают вышперечисленным требованиям.

Так, THz ЛОВ для своей работы требуют магнитных полей до 10 kG и более, что усложняет их конструкцию, увеличивает вес и стоимость изделия. ЛСЭ требуют вспомогательного вакуумного оборудования, увеличивающего их габариты и вес. ККЛ работают в основном при низких температурах, и стабильность их работы

сильно зависит от температуры генератора. В последние годы разрабатываются и используются THz-источники на базе нелинейных кристаллов, однако они работают только в импульсном режиме, так как используют мощное импульсное электромагнитное излучение. Это существенно ограничивает область их применения. Учитывая все это, сохраняется актуальность продолжения поиска новых принципов построения приемо-передающих THz-устройств.

Многообещающие возможности в этом направлении дает спинтроника [1–10] — новое направление электроники, в котором рассматриваются процессы электронно-волнового взаимодействия при транспорте не только заряда электронов, но и их спинов в многослойных тонкопленочных магнитных гетероструктурах. Эффекты, наблюдаемые при этом, уже используются на практике, например, при создании элементов вычислительной техники или сенсоров [11,12]. Ведутся исследования по созданию как когерентных, так и некогерентных источников и приемников электромагнитного излучения, в том числе THz-диапазона [13–15].

Один из перспективных способов транспорта спина для этих целей является спиновая инжекция током большой плотности  $j > 10^6$  A/cm<sup>2</sup> в магнитных гетероструктурах, образованных ферромагнитными или антиферромагнитными пленками наноразмерной толщины [16]. В настоящее время с использованием этого способа

ведутся работы по созданию некогерентных источников и приемников THz-диапазона. Однако в перспективе возможно создание и когерентного THz-источника типа лазера. Преимущество спин-инжекционного способа заключается в простоте технологии изготовления гетероструктур для его реализации. Один из технологических процессов приведен ниже.

Работа спин-инжекционных источников не требует специальных температурных режимов, вакуума или внешнего магнитного поля. Немаловажно использование тока в качестве рабочего органа. На стабильность вольт-амперных характеристик практически не влияют внешние условия. По нашему мнению, мощность генерируемых колебаний определяется объемом рабочей области в гетероструктуре и может предположительно достигать единиц  $W$ . К настоящему времени мощность излучения в экспериментальных макетах достигает сотен  $\mu W$ . Наибольший уровень мощности, полученный нами, составляет  $10 mW$ .

Среди различных конструкций магнитных гетероструктур представляют интерес массивы однослойных и многослойных нанопроволок (НП), формируемых в трековых мембранах [17–19]. Многослойные НП состоят из нескольких чередующихся слоев различных магнитных металлов или сплавов [20,21], контактирующих между собой. Такие структуры в качестве активных элементов квантовых генераторов привлекательны тем, что их использование может обеспечить хороший теплоотвод от рабочей области при генерировании сигналов большой мощности.

Опираясь на результаты работы [22], можно предположить и обратный эффект — изменение электрических характеристик массива нанопроволок под действием внешнего электромагнитного излучения. Этот эффект интересен для приема THz-сигналов, особенно учитывая возможность использования поглощающей поверхности большой площади. Поэтому представляет интерес оценить возможность использования структур с массивом НП для регистрации THz-сигналов.

К настоящему времени получены результаты „горячих“ экспериментов (в которых возбудителем электромагнитного излучения выступает электрический ток большой плотности — более  $10^6 A/cm^2$ ), подтверждающие возможность использования массива магнитных НП в качестве активных элементов некогерентных THz квантовых генераторов [23]. Проведены исследования отклика гетероструктур с массивом нанопроволок на внешний сигнал („холодные“ измерения, в которых рассматривается реакция магнитных гетероструктур на внешний THz-сигнал), в том числе и в THz-диапазоне [24,25]. Полученные результаты дают основание полагать, что как возбуждение, так и поглощение THz-сигналов в массивах магнитных нанопроволок связано с возникновением в них спиновой неуровненности [16]. Для подтверждения этого тезиса в настоящей работе рассматриваются и сопоставляются

спектры „горячих“ и „холодных“ измерений для одного массива нанопроволок.

Полученные результаты дают основание предполагать, что исследуемый нами спин-инжекционный механизм можно рассматривать как один из возможных принципиально новых механизмов построения некогерентных источников и приемников THz-сигналов.

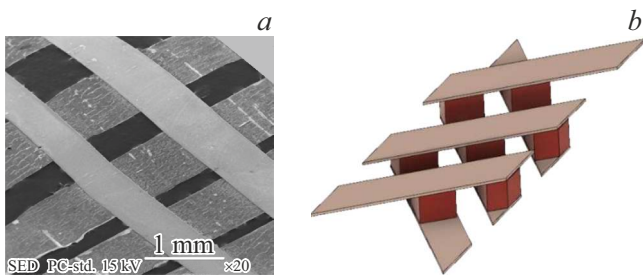
## 1. Схема использованного THz-излучателя

В ранних работах авторов были предложены схемы излучателей, в которых гетеропереходы создавались при контакте одномерных структур (тонких стержней или нанопроволок в матрице) с двумерной поверхностью — тонкой фольгой или металлической пленкой на поверхности матрицы. Однако эти конструкции имели ряд недостатков. Во-первых, даже тонкая токопроводящая пленка была сплошной, что затрудняло вывод THz-излучения из образца. Во-вторых, в предлагаемой в [23] схеме все НП в массиве были соединены параллельно, поскольку находились между двумя контактными пленками. В результате этого электросопротивление такого излучателя было крайне малым. Последнее не давало возможности пропускать ток с контролируемыми параметрами, а также приводило к прогоранию тонкого контактного слоя.

В настоящей работе была использована конструкция, которая частично устраняла описанные недостатки. В целом новизна состояла в синтезе слоевых (вместо гомогенных) НП, нанесении достаточно толстых контактных слоев в виде чередующихся полос и последовательное подключение пучков НП, возникающих между полосовыми контактами, нанесенными на противоположные поверхности полимерной матрицы, что существенно увеличивало электросопротивление конструкции.

Магнитные переходы создавались непосредственно в поровых каналах — для этого поры в процессе электроосаждения последовательно заполнялись слоями из различных металлов или сплавов, между которыми и возникал гетеропереход. В простейшем случае каждая НП состояла из двух частей разного состава и соответственно одного гетероперехода. Контактные слои создавались на поверхности полимерной матрицы в виде отдельных полос (толщиной  $0.2–0.5 \mu m$  и шириной  $0.5–1 mm$ ), регулярно чередующихся с нематриализованными промежутками ( $0.3–1 mm$ ). Направления этих полос на противоположных поверхностях полимерной матрицы были перпендикулярны. СЭМ изображение полученного излучателя представлено на рис. 1, *a* — общий вид с удаленным полимером.

На последнем этапе из полученного композита (металл–полимер–контактные полосы) вырезалась лента. Направление „реза“ составляло  $45^\circ$  к направлению контактных полос, а ширина ленты составляла  $1–2 mm$  (схематически лента представлена на рис. 1, *b*. Контакты



**Рис. 1.** Используемый излучатель с массивом нанопроволок: *a* — СЭМ изображение части образца-излучателя после удаления полимерной пленки-матрицы (видны полосы с промежутками; полосы, нанесенные на противоположные стороны пленки, перпендикулярны друг другу); *b* — схема ленточного излучателя, где розовые „кубики“ — это пучки массивов НП, находящиеся между контактными полосами. Микрофотографии получены методами сканирующей электронной микроскопии. Использовался микроскоп марки JEOL—JSM 6000 plus с ускоряющим напряжением 15 kV, работа проводилась при увеличениях 500–10000х.

присоединялись к концам ленты. Описанная конструкция излучателя позволила организовать последовательно-параллельное соединение отдельных пучков НП. При этом ток, пропускаемый по ленте, проходил через цепь из нескольких последовательно соединенных пучков НП. Отметим, что площадь „пучка“ определялась площадью „наложения“ верхних и нижних полосок-токоподводов. При длине ленты 2 см количество „пучков“, включенных в цепь, составляло 12–20 штук. Такая схема соединения обеспечивала сопротивление образца, приемлемое для устойчивой работы излучателя. Обычно в экспериментах рабочее напряжение было до 10 V, а ток, протекающий по НП, был в пределах 300 мА.

В этом случае THz-излучение выходит через зазоры между плоскостями контактов — токоподводов. Такая схема позволила увеличить эффективность вывода излучения (несмотря на то, что при этом вовлеченной в процесс генерации оказывалась лишь меньшая часть НП) и увеличить электросопротивление образца.

Описанная конструкция позволила проводить как „горячие“, так и „холодные“ эксперименты, так как значительная часть НП, выращенных в порах трековых мембран, не экранируется токоподводящими элементами и оказывается как бы „подвешенной“, что позволяет облучать их внешним электромагнитным сигналом при проведении „холодных“ измерений. В формировании динамического излучения они не участвуют.

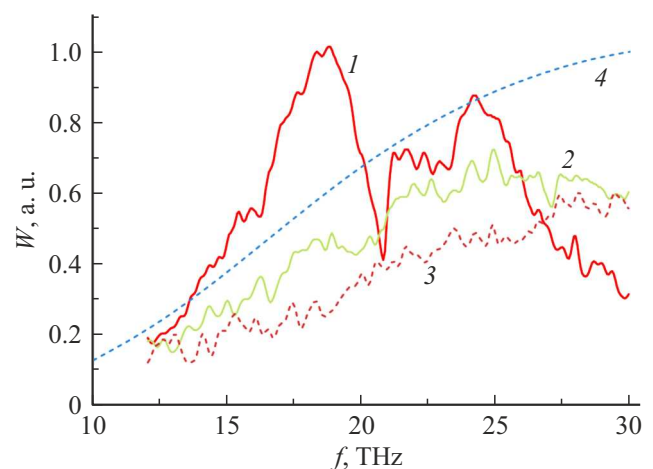
## 2. Эксперимент

Детальное описание измерений, результаты которых используются ниже, представлено в [23–26]. Отметим, что спектральный анализ проводился на ИК фурье-спектрометре Bruker „Vertex80v“ в воздушной среде в

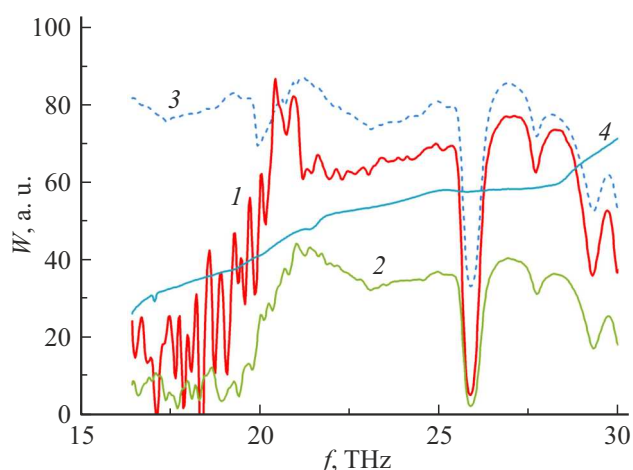
пределах диапазона частот 12–30 THz, где наблюдались наиболее интересные эффекты, касающиеся наших исследований. При этом в каждом конкретном случае границы диапазона исследования выбирались так, чтобы выделить наблюдаемый эффект. Источником внешнего сигнала служил глобар — тепловой излучатель MIR. В „холодных“ измерениях сигнал глобара формировался в узкий пучок, который с помощью лазерного прицела микроскопа Nuperion пропускался через свободную от полосовых контактов область образца, где НП находились в „подвешенном“ состоянии.

При проведении „горячих“ экспериментов использовалась измерительная цепочка спектрального анализатора, только вместо излучения от теплового источника в нее через вход подавался сигнал спин-инжекционного излучателя с массивом НП. При этом микроскоп не требовался. Источником питания излучателя служил стабилизированный источник постоянного тока, который при необходимости мог обеспечить ток излучателя до 1 А.

Для подтверждения нетепловой природы наблюдаемого спин-инжекционного THz-излучения на рис. 2 представлены спектральные характеристики излучателя в диапазоне частот 12–30 THz как зависимость интенсивности излучения  $W$  от частоты, измеренные при токах  $I = 0$  и 30 мА до возникновения динамического излучения (кривые 2, 3 на рис. 2) и  $I = 85$  мА, обеспечивавшего возбуждение этого излучения (кривая 1 на рис. 2). Интенсивность излучения  $W$  оценивалась в условных единицах, определяемых ценой деления измерительного осциллографа. До возникновения динамического излучения интенсивность сигнала в исследуемом диапазоне частот с их увеличением монотонно нарастала до максимального значения при  $f \sim 30$  THz. Такое поведение спектра соответствует характеру кривой Планка (кривая 4 на рис. 2) для излучения „горячего“ тела. При значении тока 85 мА наблюдается концентрация мощности излучения в виде пика в диапазоне частот



**Рис. 2.** Спектр регистрируемого сигнала при различных значениях тока: 1 — 85, 2 — 30, 3 — 0, 4 — расчетная кривая Планка для 300 К.



**Рис. 3.** Спектр прошедшего сигнала при облучении массива НП, состоящего из двух слоев: 1 — Fe/Ni, 2 — Ni/Co. 3 — спектр сигнала, прошедшего сквозь чистую мембрану, 4 — спектр глобара — источника внешнего сигнала.

17–20 THz на уровне 3 dB и значительный ее провал в области частот 30 THz, соответствующих максимуму теплового излучения согласно закону Планка. Этот провал, как показано в [26,27], связан с конкуренцией динамического и теплового излучений. Возбуждение THz-излучения в сравнительно узком диапазоне частот только при превышении некоторого пускового значения тока говорит о нетепловой, динамической природе наблюдаемого излучения.

Рассмотрим поведение массива НП в диапазоне частот 15–30 THz при облучении образцов сигналом от внешнего источника — глобара. Результаты этих измерений представлены на рис. 3. Следует подчеркнуть, что в этом диапазоне спектр глобара имел монотонный характер (кривая 4 на рис. 3) и тем самым не мог существенно сказываться на исследуемых спектрах. Измерялись спектры прошедшего сигнала при облучении массивов двуслойных НП Fe/Ni, Co/Ni и чистой трековой мембраны. Использование двух образцов позволило нам делать более общие выводы.

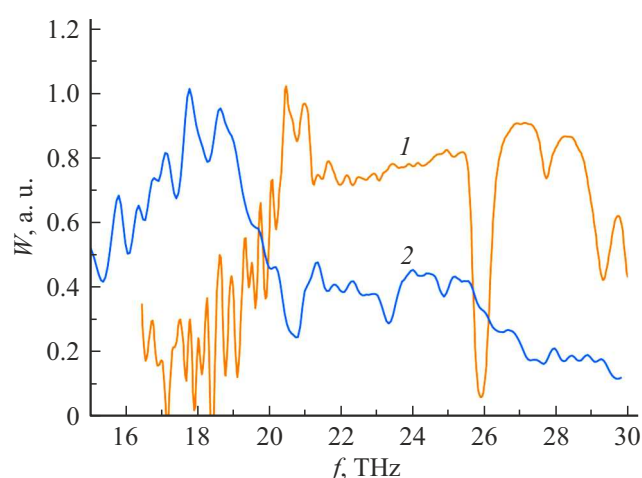
Влияние атмосферы на вид спектра наблюдалось на более высоких частотах (не приводимых нами здесь), где спектральная характеристика глобара на отдельных участках имела сильно изрезанный вид. Учитывая отсутствие влияния атмосферы в исследуемом диапазоне, наблюдаемое изменение спектра внешнего сигнала следует связать с влиянием НП и трековой мембраны (кривые 1, 2 на рис. 3). При этом видно, что амплитудные характеристики спектра зависят от материалов слоев НП, а частотные характеристики, определяемые его изрезанностью, на отдельных участках имеют некоторое сходство.

Так, анализируя спектры сигналов, представленных на рис. 3, можно выделить две области. Это область низких частот (до 22 THz), где спектры имеют сильно

изрезанный по амплитуде характер, и область более высоких частот, где спектры для обоих магнитных переходов имеют более монотонный вид с характерными пиковыми провалами для обоих образцов на частотах  $\sim 25$  и 27 THz, которые соответствуют провалам спектра чистой мембраны. Это говорит о том, что в этом диапазоне материалы переходов в НП главным образом сказывались на амплитуде сигналов, а частотные характеристики определялись спектром чистой мембраны.

Спектры прошедших сигналов, приведенные на рис. 3, показывают их идентичность для различных пар ферромагнетиков (как и для спектров отраженных сигналов) в диапазоне 22–30 THz, причем эти спектры идентичны спектру прошедшего сквозь мембрану сигнала, отличаясь только амплитудой. Это говорит о том, что в диапазоне частот 22–30 THz спектры определяются поглощением трековой мембраной, а массивы НП пассивно влияют на электромагнитное излучение, которое претерпевает только тепловое взаимодействие с НП, не приводящее к изменению спектра (частоты пиковых провалов не меняются). При меньших частотах (15–22 THz) наблюдается активное взаимодействие электромагнитного излучения, приводящее к существенному изменению спектра сигнала, прошедшего сквозь массив нанопроволок. Сильная изрезанность спектра может говорить о флуктуационных процессах, приводящих к появлению неуравновешенных по спину электронов, осуществляющих межзонные косые квантовые переходы с поглощением фононов.

Для развития представления об излучательных межзонных спиновых переходах и расширения возможного их практического применения интересно сравнить полученные нами спектр излучения структуры с массивом НП при пропускании сквозь нее тока со спектром прошедшего внешнего сигнала такой же структуры. Указанное сравнение представлено на рис. 4.



**Рис. 4.** Сопоставление спектров динамического излучения и поглощения массива двуслойных нанопроволок Fe/Ni. 1 — спектр сигнала, прошедшего через массив НП, 2 — спектр динамического излучения при токе 85 mA.

Из рис. 4 видно, что частотному диапазону, в котором формируется нетепловое, динамическое излучение, соответствует область провала амплитуды спектра прошедшего сигнала с наибольшей изрезанностью, т. е. здесь наблюдается наибольшее взаимодействие внешнего сигнала с массивом НП. В то же время сильный пиковый провал на частоте  $\sim 26$  ТГц в „холодном“ спектре и его отсутствие в „горячем“ спектре подтверждает пассивность НП в диапазоне выше 22 ТГц. Совпадение спектров может говорить о том, что поглощение внешнего электромагнитного излучения также связано с межзонными спиновыми переходами и нарушениями спинового равновесия в магнитных переходах НП. Это говорит о возможности расширения области использования таких структур, в частности, для регистрации ТГц-сигналов.

## Выводы

Проведенный анализ спектров излучателей с массивом многослойных НП показал совпадения частотных диапазонов наблюдения спин-инжекционного излучения и интенсивного поглощения внешнего сигнала. Характер поглощения внешнего сигнала показывает возможность распространения представлений о спиновой неуравновешенности, введенных при исследовании спиновой инжекции током в массиве НП на процесс поглощения в нем внешнего сигнала. С практической точки зрения совпадение частотных диапазонов поглощения и генерации ТГц-сигнала в структуре с массивом НП показывает возможность создания на их основе как генераторов, так и приемников этого диапазона.

## Благодарность

Авторы выражают благодарность И.Н. Дюжикову за техническое содействие в проведении работы.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № FFWZ-2022-0016. Работы по росту массивов нанопроволок, получению образцов-излучателей и микроскопии проводились в рамках Госзадания НИЦ „Курчатовский институт“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Fert, J.-M. George, H. Jaffrès, R. Mattana, P. Seneor. *Europhys. News*, **34** (6), 227 (2003). DOI: 10.1051/eprn:2003609609
- [2] J.F. Gregg, I. Petej, E. Jouguelet, C. Dennis. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35** (18), R121 (2002). DOI: 10.1088/0022-3727/35/18/201
- [3] I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma. *Rev. Mod. Phys.*, **76** (2), 323 (2004). DOI: 10.1103/RevModPhys.76.323
- [4] S. Maekawa (Editor). *Concepts in Spin Electronics* (Oxford University Press, NY., 2006), DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198568216.001.0001
- [5] П.А. Грюнберг. УФН, **178** (12), 1349 (2008). DOI: 10.3367/UFNr.0178.200812g.1349 [P.A. Grunberg, *Rev. Mod. Phys.*, **80** (4), 1531 (2008). DOI: 10.1103/RevModPhys.80.1531]
- [6] Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, А.И. Панас, Э.М. Эпштейн. УФН, **179** (4), 359 (2009). DOI: 10.3367/UFNr.0179.200904b.0359 [Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilberman, A.I. Panas, E.M. Epshtein. *Phys.-Usp.*, **52** (4), 335(2009). DOI: 10.3367/UFNe.0179.200904b.0359]
- [7] А.К. Звездин, К.А. Звездин, А.В. Хвальковский. УФН, **178** (4), 436 (2008). DOI: 10.3367/UFNr.0178.200804g.0433 [Yu.V. Gulyaev, P.E. Zil'berman, E.M. Epshtein, A.K. Zvezdin, K.A. Zvezdin, A.V. Khval'kovskii. *Phys. Usp.*, **51** (4), 409 (2008). DOI: 10.1070/PU2008v051n04ABEH006509]
- [8] X. Zhou, L. Ma, Z. Shi, W.J. Fan, Jian-Guo Zheng, R.F.L. Evans, S.M. Zhou. *Phys. Rev. B*, **92** (6), 060402 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.060402
- [9] Y.-C. Lau, D. Betto, K. Rode, J.M.D. Coey, P. Stamenov. *Nature Nanotech.*, **11** (9), 758 (2016). DOI: 10.1038/nnano.2016.84
- [10] P.E. Faria Jr, G. Xu, Y.-F. Chen, G.M. Sipahi, I. Žutić. *Phys. Rev. B*, **95** (11), 115301 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.95.115301
- [11] J. Walowski, M. Münzenberg. *J. Appl. Phys.*, **120** (14), 140901 (2016). DOI: 10.1063/1.4958846
- [12] A. Fernandez-Pacheco, R. Streubel, O. Fruchart, R. Hertel, P. Fischer, R.P. Cowburn. *Nature Comm.*, **8** (6), 15756 (2017). DOI: 10.1038/ncomms15756
- [13] S.S. Dhillon, M.S. Vitiell, E.H. Linfield, A.G. Davies, M.C. Hoffmann, J. Booske, C. Paoloni, M. Gensch, P. Weightman, G.P. Williams, E. Castro-Camus, D.R.S. Cumming, F. Simoons, I. Escorcia-Carranza, J. Grant, S. Lucyszyn, M. Kuwata-Gonokami, K. Konishi, M. Koch, C.A. Schmuttenmaer, T.L. Cocker, R. Huber, A.G. Markelz, Z.D. Taylor, V.P. Wallace, J.A. Zeitler, J. Sibik, T.M. Korter, B. Ellison, S. Rea, P. Goldsmith, K.B. Cooper, R. Appleby, D. Pardo, P.G. Huggard, V. Krozer, H. Shams, M. Fice, C. Renaud, A. Seeds, A. Stohr, M. Naftaly, N. Ridler, R. Clarke, J.E. Cunningham, M.B. Johnston. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50** (4), 043001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001
- [14] A.M. Kadigrobov, Z. Ivanov, T. Claeson, R.I. Shekhter, M. Jonson. *Europhys. Lett.*, **67** (6), 948 (2004). DOI: 10.1209/epl/i2004-10159-8
- [15] V. Korenivski, A. Iovan, A. Kadigrobov, R.I. Shekhter. *Europhys. Lett.*, **104** (2), 27011 (2013). DOI: 10.1209/0295-5075/104/27011
- [16] Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, И.В. Маликов, Г.М. Михайлов, А.И. Панас, С.Г. Чигарев, Э.М. Эпштейн. Письма в ЖЭТФ, **93** (5), 289 (2011). [Yu.V. Gulyaev, P.E. Zilberman, I.V. Malikov, G.M. Mikhailov, A.I. Panas, S.G. Chigarev, E.M. Epshtein. *JETP Lett.*, **93** (5), 259 (2011). DOI: 10.1134/s0021364011050055]
- [17] C.R. Martin. *Science*, **266** (5193), 1961 (1994). DOI: 10.1126/science.266.5193.1961

- [18] M. Vázquez (Editor). *Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications* (Woodhead Publishing, Amsterdam, 2005)
- [19] А.Д. Давыдов, В.М. Волгин. *Электрохимия*, **52** (9), 905 (2016). DOI: 10.7868/S0424857016090024 [A.D. Davydov, V.M. Volgin. *Russ. J. Electrochem.*, **52** (9), 806 (2016). DOI: 10.1134/S1023193516090020]
- [20] D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, V.M. Kanevskii, A.I. Panas. *IEEE Trans. Magnetics*, **58** (2), 2300605 (2021). DOI: 10.1109/TMAG.2021.3083407
- [21] А.С. Шаталов, Д.Л. Загорский, С.Г. Чigarev, И.Н. Дюжиков. *Твердотельный источник электромагнитного излучения и способ его изготовления*. (Пат. № 2715892. Бюллетень „Изобретения. Полезные модели“, № 7, 2020)
- [22] Б.П. Захарченя, Д.Н. Мирлин, В.И. Перель, И.И. Решина. *УФН*, **136** (3), 459 (1982). DOI: 10.3367/UFNr.0136.198203d.0459 [B.P. Zakharchenya, D.N. Mirlin, V.I. Perel', I.I. Reshina. *Sov. Phys. Usp.*, **25** (3), 143 (1982). DOI: 10.1070/PU1982v025n03ABEH004519]
- [23] Ю.В. Гуляев, С.Г. Чigarev, А.И. Панас, Е.А. Вилков, Н.А. Максимов, Д.Л. Загорский, А.С. Шаталов. *Письма в ЖТФ*, **45** (6), 27 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47495.17641 [Yu.V. Gulyaev, S.G. Chigarev, A.I. Panas, E.A. Vilkov, N.A. Maksimov, D.L. Zagorskiy, A.S. Shatalov. *Tech. Phys. Lett.*, **45** (3), 271 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019030271]
- [24] L.A. Fomin, V.G. Krishtop, E.S. Zhukova, S.S. Zhukov, D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, A.I. Panas. *Proc. SPIE*, **12157**, 1215706 (2022). DOI: 10.1117/12.2623795
- [25] Л.А. Фомин, Д.Л. Загорский, С.Г. Чigarev, Е.А. Вилков, И.М. Криштоп, С.С. Долуденко, С.С. Жуков. *ЖТФ*, **92** (8), 1142 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52775.71-22 [L.A. Fomin, D.L. Zagorskiy, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, V.G. Krishtop, I.M. Doludenko, S.S. Zhukov. *Tech. Phys.*, **67** (8), 961 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.08.54557.71-22]
- [26] А.И. Панас, С.Г. Чigarev, Е.А. Вилков, О.А. Бышевский-Конопко, Д.Л. Загорский, И.М. Долуденко. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **86** (7), 1013 (2022). DOI: 10.31857/S0367676522070249 [A.I. Panas, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, O.A. Byshevski-Konopko, D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **86** (7), 841 (2022). DOI: 10.3103/S1062873822070243]
- [27] S.G. Chigarev, L.A. Fomin, D.P. Rai, E.A. Vilkov, O.A. Byshevsky-Konopko, D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko and, A.I. Panas. *SPIN*, **13** (1), 2350010 (2023). DOI: 10.1142/S2010324723500108