

УДК 535.016

СЛОЕВЫЕ НАНОПРОВОЛОКИ: СИНТЕЗ, МИКРОСКОПИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2021 г. Д. Л. Загорский^{1, *}, И. М. Долуденко¹, С. Г. Чигарев², Е. А. Вилков²,
А. Э. Муслимов¹, Д. А. Черкасов^{1, 3}, А. И. Панас⁴

¹Федеральное государственное учреждение
“Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника” Российской академии наук,
Москва, Россия

²Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

⁴Акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Исток” имени А.И. Шокина”, Фрязино, Россия
*E-mail: dzagorskiy@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 28.04.2021 г.

Методом матричного синтеза получены массивы нанопроволок из чередующихся слоев различных ферромагнитных металлов для создания генератора электромагнитного излучения терагерцовой частоты. Предложен способ вывода излучения за счет формирования несплошных контактов в виде чередующихся полос, показана нетепловая природа сигнала. Изучено угловое распределение интенсивности сигнала. Показано, что излучение направлено во все стороны, однако имеется достаточно выраженный максимум интенсивности, направленный перпендикулярно плоскости пленки. Сделана теоретическая оценка и показана возможность получения детектора ТГц излучения на структурах из слоевых нанопроволок.

DOI: 10.31857/S0367676521080330

ВВЕДЕНИЕ

Среди наноматериалов особый интерес вызывают металлические нанопроволоки (НП), получаемые методом матричного синтеза — заполнением наноразмерных пор в специальной матрице. Работы по получению и исследованию таких объектов ведутся с 1990-х годов [1]. Интерес к ним обусловлен широким спектром их возможных применений: микромагниты, поверхности для магнитной записи с высокой плотностью, сенсоры, устройства спинтроники. В настоящее время для синтеза используются два основных типа матриц — полимерная трековая мембрана [2] и пористый оксид алюминия [3]. Достоинством метода матричного синтеза является его вариабильность, возможность с его помощью получать в порах матрицы различные типы металлических реплик-нанопроволок. Первые работы были посвящены осаждению НП из одного металла [1], затем были отработаны способы получения многокомпонентных НП (из двух или нескольких металлов) — как гомогенных (т.н. сплавы), так и гетерогенных (т.н. слоевые).

Получение таких структур описано во многих работах — можно отметить обзорные работы [4–6].

Такие НП могут иметь различные применения, например, использоваться в качестве оптически активных поверхностей (SERS) [7]. Структуры могут состоять из чередующихся слоев различной толщины и состава, например, ферромагнетик и диамагнетик или два различных ферромагнетика и могут иметь уникальные свойства, например, магнитные. Одной из первых работ по получению двухсегментных НП была [8]. Авторы предложили синтезировать НП из двух слоев и использовать такое “деление” НП для стабилизации их магнитного состояния. В работах [9, 10] изучены НП с чередованием слоев железа или кобальта с медными слоями. Показано, что характер взаимодействия и магнитные свойства зависят от толщины немагнитной прослойки — спейсера.

Другое интересное свойство — гигантское магнитосопротивление (ГМС, состоящее в заметном изменении сопротивления структуры (из слоев различных металлов) во внешнем магнитном по-

ле) было впервые обнаружено в плоских слоевых структурах Fe/Cr [11]. Впоследствии эффект был обнаружен и в слоевых НП [12]. Открытие это стало сразу же востребованным, в частности, при создании головок магнитной записи, а его авторы получили в 2007 г. Нобелевскую премию. Эффект ГМС лежит в основе использования НП в качестве сенсоров, датчиков магнитного поля, элементов спинтроники. Зависимость ГМС от соотношения толщин слоев Co и Cu была исследована в [13].

Чередование металлов с различными магнитными свойствами позволяет изменять спин протекающего тока и использовать эти структуры как элементы спинтроники, для магнитной записи с высокой плотностью. В последнем случае предлагается запись битов информации “по длине” слоевой НП [14]. Массивы пересекающихся НП, (в т.ч. слоевые НП) имеют измененную магнитную анизотропию [15] и особые термические свойства [16].

Ранее было предложено еще одно применение структур на основе НП: для генерации электромагнитного излучения сигнала терагерцовой частоты (ТГц-излучения). В теоретических работах [17–19] была предсказана возможность спининжекционного излучения (в диапазоне частот 3–40 ТГц) в структурах с переходами между магнитными металлами, при протекании через них токов 10^5 – 10^7 А/см². Известно, что электроны, переходя границу областей с различной намагниченностью, изменяют энергетическое состояние и направление своей спиновой поляризации. Так как энергетическое состояние изменяется быстрее спинового, часть электронов при переходе границы раздела магнитных слоев оказывается в энергетически возбужденном состоянии. Последующая релаксация может приводить к излучению энергии электромагнитных волн, частоты которых приходится на терагерцовую область.

Первые экспериментальные работы по исследованию возможности ТГц излучения на этой основе были проведены на излучателе со структурой “стержень–пленка”. Стальной стержень диаметром 1.5 мм контактировал острым концом (заостренным до диаметра 10–50 мкм) с ферромагнитной пленкой наноразмерной толщины (порядка 30–50 нм), нанесенной на диэлектрическую подложку. Здесь магнитный переход образовывался в области контакта стержня с пленкой. В такой структуре впервые было зафиксировано электромагнитное излучение ТГц диапазона, имевшее нетепловую природу [20]. Аналогичные результаты были затем получены группой В. Корневского [21]. В последующих работах [22, 23] было предложено использовать для генерации ТГц излучения массивы НП, каждый из которых содержит по крайней мере один переход (контакт), образующийся между слоями НП, состоящими

из различных магнитных металлов. (При этом использовалось множество (массив) одинаковых НП, в каждой из которых содержался переход между двумя металлами). При синтезе использовался т.н. двухваннный способ: в этом случае при росте каждого следующего слоя проводится замена ростовой ванны или электролита, что дает возможность растить слой из одного металла без примеси другого. Так, в [22] был описан способ получения массива НП из двух частей (Fe/Co и Fe/Ni), предложена измерительная схема для детектирования сигнала. Была показана генерация сигнала в диапазоне частот 16–18 ТГц. В последующей работе [23] было проведено сравнение различных способов получения массивов НП из двух различных магнитных металлов, получены спектры излучения как с помощью дифракционной решетки при использовании ячейки Голея в качестве детектора по методике описанной в [24], так и на Фурье-спектрометре фирмы BRUCKER Vertex 80 V.

Авторы считают, что в этих работах впервые была продемонстрирована возможность генерации излучения терагерцовой частоты при пропускании тока через массивы нанопроволок, состоящих из двух частей. Вместе с тем возникал целый ряд вопросов. Во-первых, это нестабильность генерации излучения: интенсивность сигнала изменялась и через какое-то время генерация прекращалась. Во-вторых, это потери мощности при выводе излучения: в полученных образцах излучатели (параллельные НП) находятся между металлическими контактными слоями. Обе эти проблемы, очевидно, связаны с контактными слоями. Решению этих задач и, соответственно, поиску эффективных способов генерации и посвящена настоящая работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Получение массивов нанопроволок

Массивы НП были получены на основе пористых матриц из Полиэтилентерефалата (ПЭТФ-мембраны), производства ОИЯИ, (г. Дубна). Матрицы имели следующие параметры: толщина пленки – 10 мкм, диаметр пор – 100 нм, плотность пор – 10^9 пор на см². В поры матрицы осаждались слои различных металлов: Fe, Ni, Co. Для приготвления электролитов использовались соответствующие растворы солей металлов: FeSO₄·7H₂O – 120 г/л, NiSO₄·7H₂O – 200 г/л и NiCl₂·6H₂O – 30 г/л, CoSO₄·7H₂O – 320 г/л. Также во всех случаях применялась добавка борной кислоты (около 40 г/л для предотвращения подкисления прикатодного слоя, которое может привести к выделению гидроксида металла). Для железного электролита использовалась еще и ас-

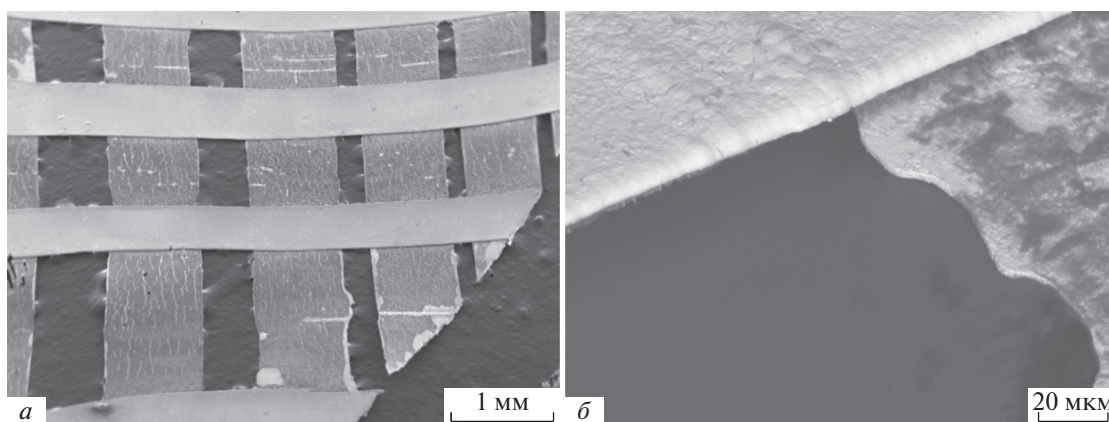


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности образца с параллельными полосами-токоподводами: общий вид (а), увеличенное изображение области перекрытия (б).

корбиновая кислота (для предотвращения окисления иона двухвалентного железа в трехвалентное) и лаурилсульфат натрия (для лучшей смачиваемости и проникновения электролита в поры); количество этих добавок составляло около 1 г/л.

Электрохимическое заполнение пор в этих матрицах производилось в стандартной гальванической ячейке (производства СКБ ИК РАН) по двухэлектродной схеме. В качестве источника использовался потенциостат-гальваностат “ElinsP-2X”, рост слоев проводился при напряжениях порядка 1 В, контроль длинны слоя осуществлялся в зависимости от протекшего заряда. Во всех случаях были синтезированы НП, состоящие из трех частей (примерно равной длины). При этом каждая часть осаждалась в определенном электролите.

Формирование контактных слоев

Во всех случаях один контактный слой создавался перед гальваническим осаждением металла в поры. (Он состоял из меди и имел толщину 7–10 мкм). Вопрос необходимости последующего “вывода” излучения для его детектирования решался разными способами. На первом этапе работы на вторую поверхность матрицы наносился тонкий слой меди: он должен был быть достаточно тонким для того, чтобы пропустить хотя бы часть возникающего излучения, но в то же время иметь достаточную толщину для пропускания подводимого к массиву НП тока. На втором этапе работы на поверхность матрицы формировались не сплошные контактные слои, а полосы из металла, чередующиеся с “пустыми” областями. При этом системы полос на двух сторонах были по-разному направлены (см. рис. 1). Такой способ улучшал условия выхода сигнала и увеличивал общее электросопротивление образца.

Электронная микроскопия

После получения проводились СЭМ-исследования контрольных образцов. Для этого с них предварительно удалялась полимерная матрица (травлением в щелочи). Использовался СЭМ JEOL JSM 6000 plus, с рабочими увеличениями от 200× до 10000×. Применялся режим работы как во вторичных, так и в упруго-отраженных электронах. Элементный состав определялся с помощью рентгеноспектральной приставки.

Исследование генерации электромагнитных колебаний

Исследование возможности генерации электромагнитных колебаний ТГц диапазона проводилось в спин-инжекционном излучателе с использованием в качестве активного элемента образца с магнитными переходами (представлявший из себя массив НП, заключенный между двумя контактными площадками). Образец закреплялся в держателе с токоподводами и располагался около регистрирующего устройства. К образцу от источника питания на контакты подавалась разность потенциалов, приводящая к появлению тока в НП. Возникающее при протекании тока по НП излучение фиксировалось детектором-ячейкой Голея, либо подавалось на вход спектрального анализатора Vertex 80 V фирмы BRUCKER.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получение массива НП и его изучение методом микроскопии

Методом матричного синтеза были получены образцы, массивов нанопроволок состоящих как правило, из трех слоев: Ni/Co/Ni и Ni/Fe/Ni. На первом этапе использовались образцы со сплошным покрытием обеих поверхностей. По крайней

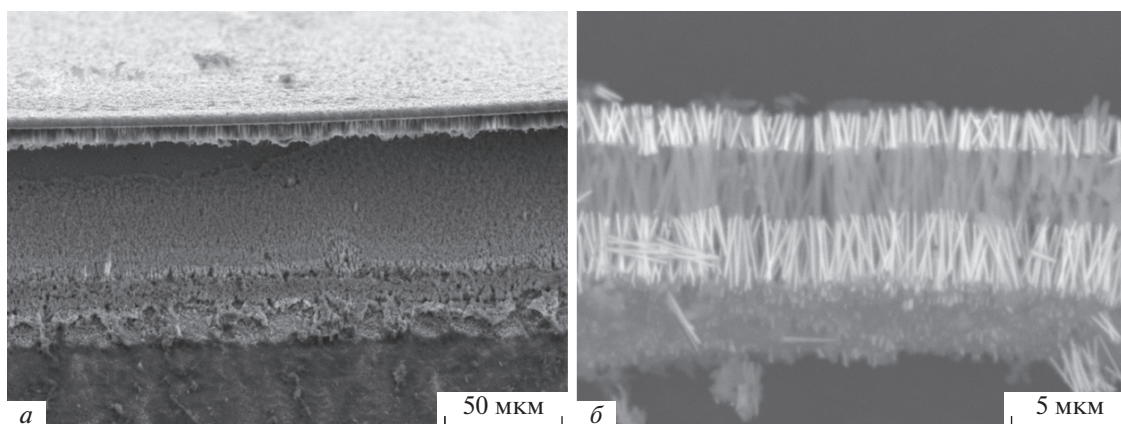


Рис. 2. СЭМ-изображение массива НП между двумя контактными слоями: общий вид (а), увеличенное изображение фрагмента массива НП, с тремя областями (Ni/Co/Ni) (б).

мере одна из них была достаточно тонкой, чтобы пропускать часть электромагнитного излучения. Исследовались как амплитудные, так и частотные характеристики излучения, о чем говорилось в тексте выше. При превышении некоторой величины тока излучение пропадало. (В различных экспериментах значения этого предельного тока несколько различались, достигая значения вплоть до 1 А).

Проведенные СЭМ-исследования выявили причину этого явления, заключающуюся в деградации контактного слоя. Эта деградация вызвана проплавлением металла в непосредственной близости от токоведущих НП. Об этом свидетельствовало отсутствие металла вокруг вершин НП.

В силу этого на втором этапе использовались образцы с несплошными контактами (параллельные полосы шириной около 1 мм с промежутками такой же ширины), но со значительно большей толщиной металлического слоя. Пример СЭМ изображения таких образцов приведен на рис. 1.

Изображение демонстрирует особенности образцов — токоподводящие слои (полосы), нанесенные на обе стороны пленки, взаимно перпендикулярны. Между ними (в области перекрытия) находятся, собственно, нанопроволоки, в которых происходит генерация ТГц излучения.

Сам массив НП (состоящих из трех частей) показан на рис. 2 — приведено СЭМ изображение фрагмента образца. Рисунок демонстрирует однородный характер массива. В каждой НП четко просматривается три области, контраст которых очевидно связан с различной эмиссионной способностью металлов. Таким образом СЭМ-изображение доказывает гетерогенную структуру НП. СЭМ исследования, проведенные после экспериментов по генерации излучения, показали, что изменения поверхности и токоподводящих полосок не происходит.

Исследование излучения электромагнитных колебаний

Основной вопрос при описании работы спин-инжекционных ТГц излучателей работающих в диапазоне 7–30 ТГц это — не является ли тепловым наблюдаемое излучение? Так как регистрируемый нами сигнал от полученных массивов НП с подведенными контактами-полосками наблюдался в диапазоне частот 10–25 ТГц то были проведены сравнительные эксперименты по определению его нетепловой природы. Сравнительные эксперименты основаны на предположении о том, что при включении тока в исследуемой структуре скорость нарастания мощности излучения для динамического излучения, определяемого спин-флип переходами в магнитном переходе, и теплового, определяемого изменением температуры нагреваемого образца, различны при равных потребляемых мощностях и соизмеримых массах. Для сравнения в качестве теплового излучателя использовался глобар-однородный проводник, нагреваемый током, протекающем по нему. На рис. 3а представлены результаты этих исследований.

Сравнение кривых, приведенных на рис. 3а показывает их принципиальное различие, состоящее в характере нарастания переднего фронта сигнала при включении излучателя. В случае теплового излучателя нарастание имеет достаточно плавный характер: оно определяется нагревом поверхности излучателя и составляет несколько секунд. При спин-инжекционном излучении из массива НП время установления динамического режима порядка 10^{-12} с. На осциллограмме же в этом случае время нарастания определяется инерционностью регистрирующей аппаратуры, обеспечивающее время регистрации порядка 0.1 с. Этим объясняется различие передних фронтов, наблюдаемое на кривых. Таким образом, боль-

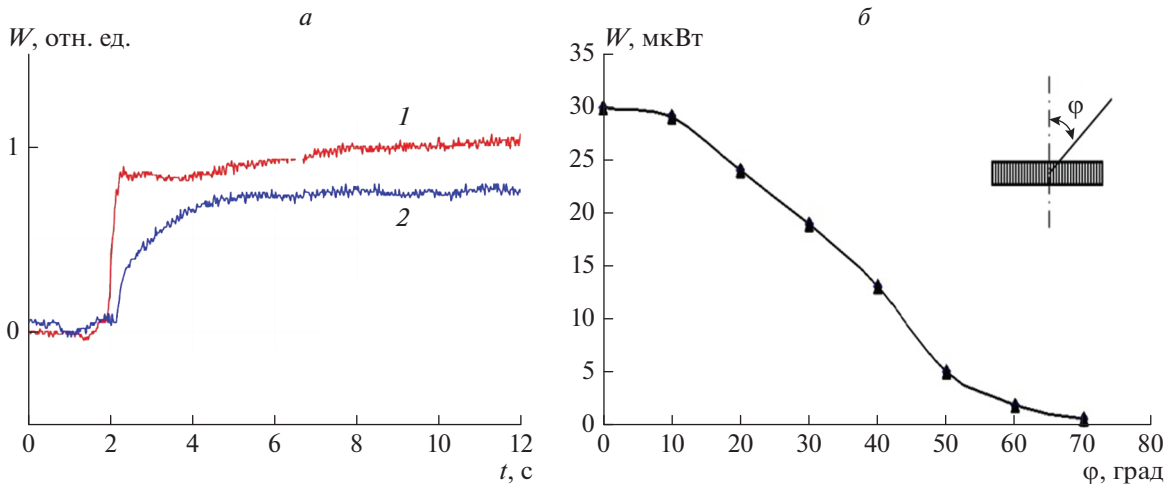


Рис. 3. Осциллограмма зависимости интенсивности сигнала от времени при включении излучателя: 1 – для спининжекционного излучателя (на основе массива нанопровок), 2 – для теплового источника излучения (глобара) (а). Зависимость мощности излучения от угла наблюдения ϕ (для образца с рядом последовательно чередующихся контактов) (б). Геометрия расположения образца и детектора приведена на вставке: сплошная линия – направление на детектор.

шая крутизна нарастания сигнала в случае излучения из массива НП подтверждает, по нашему мнению, его нетепловую природу [25].

Для оценки интегральной мощности излучения снизу (“величина не менее”) от полученных массивов НП с подведенными контактами-полосками было изучено угловое распределение излучаемой мощности по продольной стороне излучателя. Полученные результаты приведены на рис. 3б. Приведенный график показывает то, что значительная доля мощности излучается под углом к излучающей поверхности и не попадает в растр рупора детектора. Учитывая, что в рупор попадает только доля мощности, наблюдаемая в диапазоне углов 0° – 10° можно оценить снизу интегральную мощность по соотношению площадей под кривой в диапазонах 0° – 10° и 10° – 70° . Соотношение площадей составляет примерно 1 : 3, т.е. интегральная мощность излучения не менее чем в 3 раза больше регистрируемой детектором мощности. Это говорит о необходимости использовать в будущем фокусирующие системы (плоские линзы, зеркала и т.п.). Более точное определение мощности излучения, рассеиваемой в окружающее пространство, требует решения отдельной задачи о трехмерном распределении мощности, которая выходит за рамки данной статьи.

Возможности детектирования ТГц сигнала

Основываясь на теоретической модели [26] можно также предположить, что массив НП можно использовать помимо генерации излучения и в качестве детекторов ТГц-излучения, если одним из слоев НП будет антиферромагнитный металл.

В рассматриваемой структуре, согласно [26, 27], поляризованный по спину ток перетекает из ферромагнетика в антиферромагнитный слой. При этом глубина спиновой инжекции должна соответствовать глубине проникновения регистрируемого излучения, что и определяет толщину АФМ слоя (примерно несколько десятков нанометров). Из-за высокой плотности тока инжекции нарушается антипараллельность намагниченностей подрешеток, они “скашиваются”, и наводится результирующая намагниченность АФМ слоя. В результате, в антиферромагнетике возможен собственный колебания (прецессия) наведенной намагниченности вокруг эффективного статического sd -обменного поля, создаваемого поляризованным током. При наложении внешнего поля, если его частота совпадает с собственной частотой прецессии, должен наблюдаться резонанс, который можно назвать спин-инжекционным АФМ резонансом. Последний, при определенной плотности тока, приводит к резкому усилению поглощения внешнего сигнала.

Спин-инжекционный АФМ резонанс имеет частоты, которые пропорциональны плотности тока и поэтому перестраиваются током. Тем самым, подбором материала перехода и изменением тока, возможно подстроиться под максимальное поглощение (изменение амплитуды сигнала) внешней электромагнитной волны терагерцевого диапазона, и связать плотность тока в магнитном переходе с частотой принимаемого сигнала. Это открывает принципиальную возможность использования магнитных переходов ферромагнетик-антиферромагнетик в качестве детекторов-резонанс-

ных приемников ТГц-излучения, перестраиваемых по частоте постоянным током.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированным методом матричного синтеза получен массив НП, в котором каждая проволока включает два перехода между магнитными слоями. Показано, что на таких массивах НП возможна эффективная генерация ТГц излучения. При этом сигнал наибольшей величины был получен при использовании НП с переходом Ni/Fe/Ni.

Показано что при нанесении сплошного контактного слоя (в виде тонкой пленки на поверхности) генерации излучения нестабильна: это обусловлено деградацией (проплавлением) данного контактного слоя вокруг НП. Для устранения этого эффекта был успешно использован способ нанесения несплошных контактов в виде периодических полос.

Сравнительный анализ временной зависимости излучения глобара и образца на основе массива НП доказывает, что излучение последнего имеет нетепловой (динамической) характер и вызвано именно спиновыми переходами.

Диаграмма направленности излучения показала распределение излучаемой мощности в широком диапазоне углов. С ее помощью можно оценить интегральную мощность динамического излучения.

Рассмотрены теоретические предпосылки возможности детектирования ТГц сигнала с применением массива НП (своеобразный “обратный эффект”).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-29-03015-мк и № 20-07-00349-а). Матричный синтез и микроскопические исследования проведены в рамках государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника РАН”, а изготовление контактов — в рамках проекта РФФИ № 18-29-12099-мк. Изучение генерации ТГц сигнала и теоретические расчеты выполнены в рамках государственного задания ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и Президиума Российской академии наук (программа № 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martin C.R.* // Science. 1994. V. 266. P. 1961.
2. *Флеров Г.Н.* // Вест. АН СССР. 1984. Т. 1. № 4. С. 35.
3. *Masuda H., Fukuda K.* // Science. 1995. V. 268. P. 1466.
4. *Lupu N.* Electrodeposited nanowires and their applications. Croatia: InTech, 2010. 236 p.

5. *Vazquez M.* Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. Amsterdam: Elsevier-Woodhead Publishing, 2015. 847 p.
6. *Давыдов А.А., Волгин В.М.* // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 9. С. 905; *Davydov A.D., Volgin V.M.* // Rus. J. Electrochem. 2016. V. 52. P. 806.
7. *Kozhina E., Bedin S., Razumovskaya I. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1283. Art. No. 012009.
8. *Ceballos D., Cisternas E., Vogel E.E. et al.* // J. Magn. Magn. Mat. 2018. V. 451. P. 676.
9. *Moraes S., Navas D., Béron F. et al.* // Nanomaterials. 2018. V. 8. P. 490.
10. *Черкасов Д.А., Загорский Д.Л., Хайбуллин Р.И. и др.* // ФТТ. 2020. Т. 62. № 9. С. 1531; *Cherkasov D.A., Zagorskii D.L., Khaibullin R.I. et al.* // Phys. Sol. St. 2020. V. 62. No. 9. P. 1695.
11. *Baibich N., Broto J.M., Fert A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2472.
12. *Fert A., Piraux L.* // J. Magn. Magn. Mat. 1999. V. 200. Nos. 1–3. P. 338.
13. *Kamimura H., Hayashida M., Ohgai T.* // Nanomaterials. 2020. V. 10. P. 5.
14. *Ivanov Y.P., Chuvilin A., Lopatin S. et al.* // ACS Nano. 2016. V. 10. No. 5. P. 5326.
15. *Araujo E., Encinas A., Velazquez-Galvan Y. et al.* // Nanoscale. 2015. V. 7. P. 1485.
16. *Gomes T.C.S.C., Araujo F.A., Piraux L.* // Sci. Adv. 2019. V. 5. P.1.
17. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Энштейн Э.М. и др.* // Радиотехн. и электрон. 2003. Т. 48. № 3. С. 1030; *Gulyaev Yu.V., Zil'berman P.E., Epshtein E.M. et al.* // J. Comm. Technol. Electron. 2003. V. 48. No. 9. P. 942.
18. *Кадигробов А., Шехтер Р.И., Джонсон М.* // Физ. низк. темп. 2005. Т. 31. № 3–4. С. 463.
19. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Чигарев С.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2011. С. 16; *Gulyaev Y.V., Zilberman P.E., Panas A.I.* // JETP Lett. 2011. V. 93. No. 5. P. 259.
20. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В. и др.* // ДАН. 2011. Т. 438. № 1. С. 41; *Gulyaev Y.V., Zil'berman P.E., Malikov I.V. et al.* // Dokl. Phys. 2011. V. 56. P. 265.
21. *Korenivski V., Iovan A., Kadigrobov A. et al.* // Europhys. Lett. 2013. V. 104. P. 2701.
22. *Гуляев Ю.В., Чигарев С.Г., Панас А.И. и др.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 6. С. 27; *Gulyaev Yu.V., Chigarev S.G., Panas A.I. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. P. 271.
23. *Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А. и др.* // Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника. 2019. № 2(541). С. 8.
24. *Chigarev S.G., Malikov I.V., Mikhailov G.M. et al.* // J. Comm. Technol. Electron. 2013. V. 58. P. 238.
25. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Котов В.Д. и др.* // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 8. С. 888; *Gulyaev Yu.V., Zilberman P.E., Kotov V.D.* // J. Comm. Technol. Electron. 2012. V. 57. No. 8. P. 813.
26. *Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А. и др.* // Нано- и микросист. техн. 2020. № 8. С. 438.
27. *Фомин Л.А., Черных А.В., Березин В.А. и др.* // Поверхн. Рентг., синхротр. и нейтр. иссл. 2021. № 2. С. 1; *Fomin L.A., Chernykh A.V., Berezin V.A. et al.* // J. Surf. Invest. X-Ray. Synchrotron. Neutron. Tech. 2021. No. 2. P. 1.

Layered nanowires: synthesis, microscopy and application for generation of THz radiation

**D. L. Zagorskiy^{a,*}, I. M. Doludenko^a, S. G. Chigarev^b, E. A. Vilkov^b,
A. E. Muslimov^a, D. A. Cherkasov^{a,c}, A. I. Panas^d**

^a*Federal Scientific Research Center "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

^b*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences,
Fryazino, 141190 Russia*

^c*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700 Russia*

^d*JSC "RPC "Istok", Fryazino, 141190 Russia*

**e-mail: dzagorskiy@gmail.com*

Arrays of nanowires from alternating layers of various ferromagnetic metals have been obtained by the method of matrix synthesis to create a generator of electromagnetic radiation of terahertz frequency. A method for outputting radiation due to the formation of discontinuous contacts is proposed. The non-thermal nature of the signal is shown. The pronounced maximum of angular distribution of the signal intensity was demonstrated. A theoretical estimation is made and the possibility of obtaining a THz radiation detector.