ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ И ПРИЕМНИКОВ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ МАССИВА ГЕТЕРОГЕННЫХ МАГНИТНЫХ НАНОПРОВОЛОК

Д.Л. Загорский[1)], И.М. Долуденко[1)], С.Г. Чигарев[2)], Л.А. Фомин[3)], В.Г. Криштоп[3)], Е. Вилков[2)]
[1)]*ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Ленинский пр. 59, Москва, Россия, dzagorskiy@gmail.com*
[2)]*ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, пл. Введенского, Фрязино, Россия*
[3)]*ФГБУН ИПТМ РАН, ул. Ак. Осипьяна 6, Черноголовка, Россия*

В работе продемонстрирована возможность создания генераторов ТГц излучения на основе массива нанопроволок полученных методом матричного синтеза на основе трековых матриц. При пропускании тока через массив нанопроволок, состоящих из чередующихся частей из различных магнитных материалов наблюдается генерация электромагнитного излучения, приходящегося на терагерцовый диапазон. Исследована причина этой генерации, показана нетепловая природа возникающего сигнала. Изучены особенности генерации, её пространственное распределение. На основе последней была предложена усовершенствованная конструкция генератора излучения, Обнаружена конкуренция между возникающим тепловым и т.н. динамическим излучением. Рассмотрены перспективы создания детектора ТГц излучения на основе излучателя.

Ключевые слова: электромагнитное излучение; терагерцовый диапазон; гетероструктурные нанопроволоки; матричный синтез.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF CREATING THz RADIATION GENERATORS AND RECEIVERS BASED ON AN ARRAY OF NWs

D. Zagorskiy[1)], I. Doludenko[1)], S. Chigarv[2)], L. Fomin[3)], V. Krishtop[3)], E. Vilkov[2)]
[1)]*FSRC «Crystallography and photonics», Russian Academy of Sciences, 59 Leninsky Ave., Moscow, Russia, dzagorskiy@gmail.com*
[2)]*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, 141190 Fryazino, Russia*
[3)]*Institute of Problems of Microelectronics, 6 Ak. Osipyana Str., Chernogolovka, Russia*

The paper demonstrates the possibility of creating THz radiation generators based on an array of nanowires obtained by the method of matrix synthesis based on track matrices. The reason for this generation is investigated, and the nonthermal nature of the emerging signal is shown. The features of generation, its spatial distribution are studied. On the basis this, an improved design of the radiation generator was proposed, which is a metal-polymer composite film (nanowires in a matrix) with connected contacts in the form of metal strips. A competition between the emerging thermal and so-called dynamic emission was found. The prospects for the creation of a THz radiation detector based on an emitter are considered.

Keywords: electromagnetic radiation; terahertz range; heterostructural nanowires; matrix synthesis.

Введение

Освоение терагерцового диапазона частот (1-30 ТГц), в том числе и поиск его еще не известных потенциальных возможностей требует расширения круга исследований. Существующие источники ТГц излучения, построенные как на основе классических принципов, развитых в СВЧ электроники, так и использующие новые принципы, практически полностью перекрывают указанный диапазон частот. Известны и приемники ТГц сигналов, такие как ячейка Голея или болометры на сверхпроводниках. Однако все они далеко не отвечают современным требованиям.

Поэтому поиск новых принципов построения ТГц устройств продолжается.

Большие возможности в этом направлении дает спинтроника [1-4]. Эффекты, наблюдаемые при этом, используются при создании элементов вычислительной техники, сенсоров [5, 6], источников и приемников электромагнитного излучения, в том числе ТГц диапазона [7]. Один из перспективных способов транспорта спина для создания источников и приемников ТГц сигналов является спиновая инжекция током с плотностью более 10^6 А/см^2 в магнитных гетероструктурах, образованных ферромагнитными пленками наноразмерной толщины [8].

Среди различных способов формирования магнитных гетероструктур представляет интерес использование массивов многослойных магнитных нанопроволок (НП), формируемых в трековых мембранах [9, 10]. Кроме того, технология их изготовления даёт возможность получать НП, состоящие из нескольких чередующихся слоёв различных металлов (сплавов) в том числе и магнитных, через которые значительно проще пропустить ток высокой плотности, перпендикулярно слоям, чем через аналогичную пленочную многослойную структуру [11, 12]. Существенным преимуществом излучателей на основе НП является то, что при диаметре каждой структурной единицы в несколько десятков нм практически всё возникающее излучение выходит на поверхность.

Исследуемый нами спин-инжекционный механизм можно рассматривать как один из возможных принципиально новых механизмов построения генераторов сигналов, в том числе, и при использовании массива многослойных магнитных нанопроволок, отвечающих вышеперечисленным требованиям. Опираясь на выводы [13], можно предположить и обратный эффект – изменение электрических характеристик массива нанопроволок под действием внешнего магнитного поля. Этот эффект можно было бы использовать для регистрации ТГц сигналов, в создании детекторов. Авторами начаты работы в этом направлении [14], в настоящей работе приводятся новые данные.

Основная часть

В работе в качестве матрицы использовались трековые мембраны (пр-во ОИЯИ, Дубна) с различными параметрами. Наиболее часто применялись матрицы с плотностью пор $1.2 \cdot 10^9$ пор на см^2 и диаметром пор 100 нм. В поры этих матриц гальваническим способом проводилось осаждение чередующихся слоёв различного состава. Были изучены массивы НП из различных комбинаций металлов группы железа (железо, кобальт, никель) –как в чистом виде, так и в виде сплавов. Наилучшие результаты на данный момент были получены на НП с слоёв чередованием железо-никелевого сплава со слоями железо-кобальтового сплава. На полученный образец - композит из множества (массив) слоевых НП в полимерной матрице - с двух сторон наносились контактные слои. Через последние пропускался ток, при этом датчик регистрировал возникающее излучение, приходящееся на ТГц частоту [14]. Изучен характер нарастания интенсивности от времени для источника с НП (т.н. динамическое излучение) и излучение от глобара-тепловое (рис. 1а.) Видно, что характер нарастания интенсивности в обоих случаях значительно отличается, что позволяет говорить о нетепловом характере возникающего в НП излучения. Была исследована угловая зависимость интенсивности излучения (рис. 1б). Важно то, что интенсивность слабо уменьшается.

Полученный результат позволил создать новую конструкцию излучателя с несплошными контактами (рис. 2), позволяющую увеличить интенсивность излучения.

На созданных излучателях были проведены исследования изменения спектра излучения в зависимости от подводимого напряжения (от протекающего тока). Результаты представлены на рис. 3.

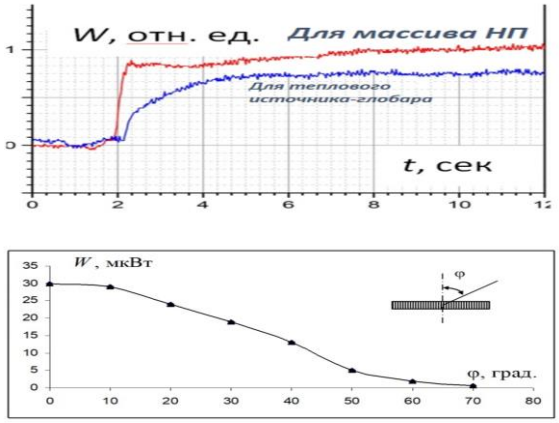

Рис. 1. Нарастание интенсивности излучения теплового источника и источника на основе НП; снизу- угловая зависимость интенсивности сигнала

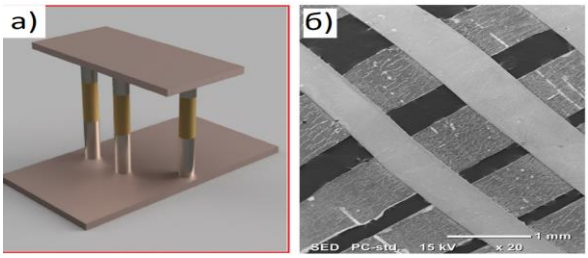

Рис. 2. а - схема подведения контактов (в виде чередующихся металлических полос) к массиву НП, б - общий вид полосковых контактов (на обеих сторонах композита) после удаления матрицы

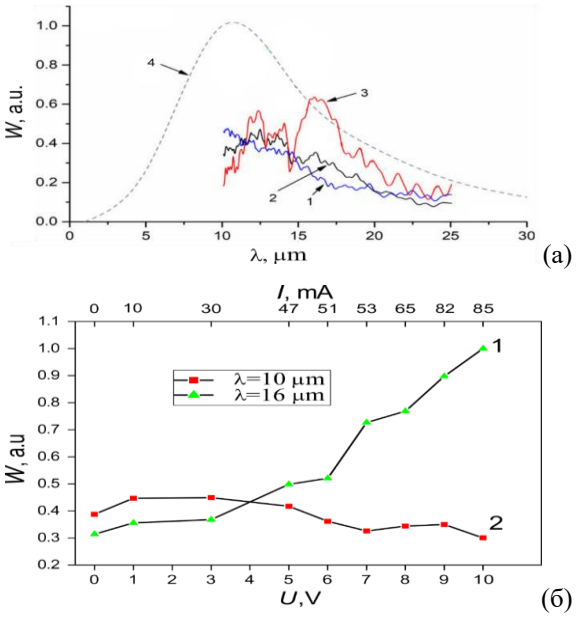

Рис. 3. Характер изменения спектра (в ТГц диапазоне) при увеличении протекающего тока: а - пороговое увеличение интенсивности (стрелка 3), б - соотношение между тепловым и динамическим излучением

Для нескольких образов были исследованы спектры пропускания, для слоевых НП Ni/Fe результаты даны на рис.4.

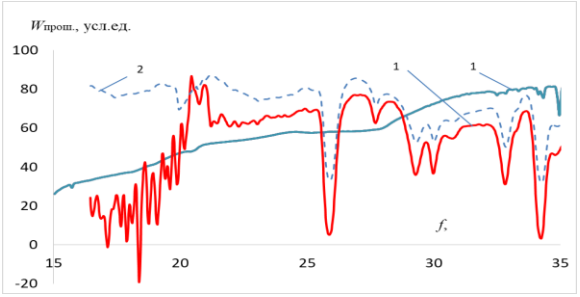

Рис. 4. 1 -спектр для массива нанопроволок Ni/Fe, 2 – спектр для чистой мембраны, 3- спектр глобара

Видно, что в интервале 18.3 ТГц наблюдается отрицательное поглощение. Появление последнего может свидетельствовать о перераспределении (перекачке) энергии. На этом эффекте могут быть созданы датчики Э/М излучения.

Заключение

В работе показан нетепловой характер возникающего излучения - оно вызвано спин-инжекционными переходами (т.н. динамическое излучение). Обнаружена конкуренция между возникающим динамическим излучением и тепловым. Рассмотрены перспективы создания детектора ТГц излучения на основе излучателя, включенного по «обратной схеме».

Работа (получение НП и СЭМ) выполнена в рамках Госзадания ФНИЦ «КиФ» РАН.

Библиографические ссылки

1. Fert A. *Europhys. News* 2003; 34(6): 227.
2. Grunberg P. *Rev. Mod. Phys.* 2008; 80: 1531.
3. Гуляев Ю. *УФН* 2009; 179: 359.
4. Звездин А.К. и др. *УФН* 2008; 178: 436.
5. Walowski J. *J. Ap. Phys.* 2016; 120: 140901.
6. Fernand-Pacheco A. *Nature Com.* 2017; 8: 15756.
7. Dhillon S. *J. Phys. D*: *Ap Ph.* 2017; 50: 363001.
8. Гуляев Ю.В. *РЭ* 2003; 48(9): 1030.
9. Martin C.R. *Science* 1994; 266: 1961.
10. Давыдов А. *Электрохим.* 2016; 52(9): 905.
11. Kadigrobov A.//Europhys.Lett.2004 V. 67, P. 948.
12. Гуляев Ю. *Письма в ЖЭТФ* 2007; 86(5): 381.
13. Zakharchenya B. *Sov. Phys.Usp.*1982; 25: 143.
14. Гуляев Ю.В. *Письма в ЖЭТФ* 2019; 45(6): 27.