

УДК 621.378

Базовые конструкции и рабочие характеристики нано- и микроразмерных экспериментальных генераторов терагерцевых волн 3–30 ТГц

С. Г. Чигарев¹, Е. А. Вилков², Ю. В. Гуляев³, П. Е. Зильберман⁴, В. И. Маликов⁵,
Г. М. Михайлов⁶, А. И. Панас⁷, А. В. Черных⁸

^{1,2,3,4,7} Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН»

^{5,6,8} ФГБУН «Институт проблем точной механики», г. Черноголовка

e-mail: chig50@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются три базовые конструкции спин-инжекционных генераторов ТГц-диапазона частот: два генератора с использованием магнитного перехода, образованного контактом ферромагнитного стержня с острием до 50 мкм с ферромагнитной пленкой наноразмерной толщины (один из них с фокусирующей линзой, другой с открытым резонатором типа Фабри–Перо) и генератор с использованием метаперехода, образованного наноразмерными, ферромагнитными столбиками, нанесенными на диэлектрическую подложку и покрытые сплошной ферромагнитной пленкой наноразмерной толщины. Приведены некоторые результаты их экспериментального исследования.

Ключевые слова: магнитный переход, спин электрона, спиновые энергетические подзоны, ТГц-излучение, метапереход

Base Constructions and Experimental Working Characteristics of Nano- and Micro-Sized Terahertz Wave Generators on 3–30 THz

S. G. Chigarev, E. A. Vilkov, Yu. V. Gulyaev, P. E. Zilberman, V. I. Malikov,
G. M. Mikhailov, A. I. Panas, A. V. Chernykh

^{1,2,3,4,7} Fryazino Branch of State Scientific Organization

“V. A. Kotel’nikov Institute of Radio Technology & Electronics of RAS”

^{5,6,8} Federal State Scientific Organization of exact mechanics, Chernogolovka town

e-mail: chig50@mail.ru

Abstract. Three based constructions considered here for spin — injection generators THz-diapason: two generators are used magnetic junction having a ferromagnetic rod sharpened to 50μ with ferromagnetic film of nano-sized thickness (one of them with focusing lens and the other is open), and once more generator based on meta-junction. Some results of experimental research are presented for these generators.

Key words: magnetic junction, electrons spins, energy subbands for electrons, radiation, meta-junction

Предлагаемые к рассмотрению спин-инжекционные генераторы ТГц частот построены на принципах нового направления электроники — спинтроники. В спинтронике рассматривается взаимодействие с электромагнитными полями не только зарядов электронов, но и их собственных магнитных моментов — спинов. Рабочей средой таких генераторов служат многослойные металлические структуры, образованные ферромагнитными или антиферромагнитными пленками наноразмерной толщины с различной собственной намагниченностью [1]. Для возбуждения в них электромагнитных колебаний ТГц-частот при прохождении сквозь такие структуры электрического тока необходимо выполнить ряд условий, обеспечивающих: расщепление электронов по спиновым энергетическим подзонам, инжекцию спинов электронным потоком из одного ферромагнитного или антиферромагнитного слоя в другой с иной намагниченностью, создание в спиновых энергетических подзонах инверсной заселенности при инжекции спинполяризованного потока электронов.

Все эти процессы отмечаются в течение времени спиновой релаксации $\tau_p \sim 10^{-12}$ с на длине спиновой релаксации l в десятки нанометров. Излучение наблюдается при превышении током некоторого значения, определяемого плотностью $j \sim 10^5$ А/см².

На рис. 1 представлена схема, поясняющая преобразование энергии источника питания в энергию излучения с выполнением вышеперечисленных условий. На рисунке приняты следующие обозначения: мощность излучения $W_{изл} = \frac{h\nu}{t}$, где h — постоянная Планка, ν — частота излучения, t — время наблюдения излучения; энергия обменного взаимодействия $I_{обм} = \alpha\mu_B M_i$, где α — постоянная обменного взаимодействия, μ_B — магнетон Бора, M_i — намагниченность конкретного участка магнитного перехода; E_F — энергия уровня Ферми; E_{F1} — энергия квазиуровня Ферми в конкретной спин-энергетической подзоне; X — продольная координата, вдоль которой распространяется ток.

Эти условия могут быть достигнуты различными техническими решениями. Так, наиболее продвинутой в настоящее время оказалась структура, образованная ферромагнитным стержнем с заострением диаметром 10–50 мкм, контактирующим

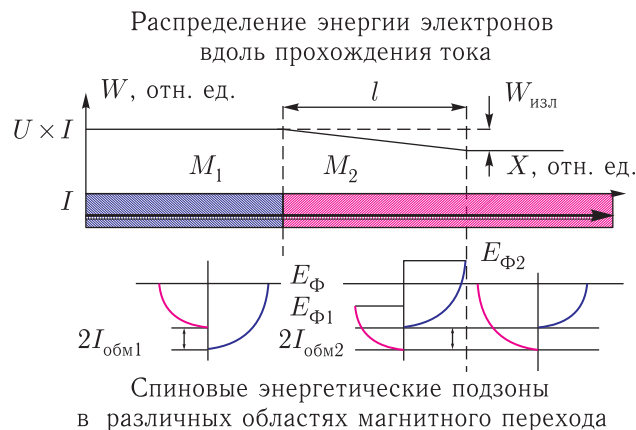


Рис. 1. Схема преобразования энергии источника питания, обеспечивающего в магнитном переходе ток I при напряжении U

с ферромагнитной пленкой толщиной в десятки нанометров [2] (см. рис. 2.).

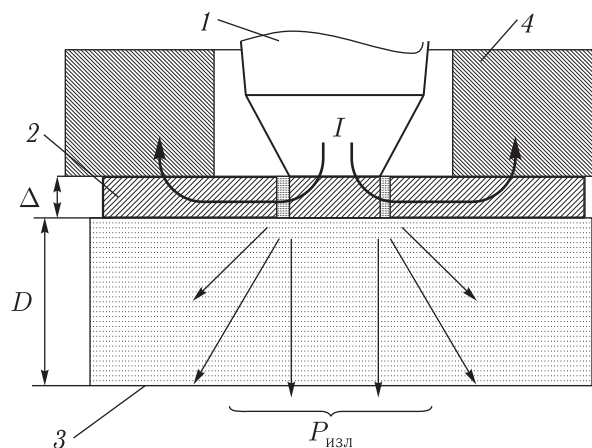


Рис. 2. Схема излучателя спин-инжекционного генератора с магнитным переходом типа стержень–пленка. 1 — ферромагнитный стержень, 2 — ферромагнитная или антиферромагнитная пленка толщиной десятки нанометров Δ , 3 — диэлектрическая подложка толщиной $D \sim 0,5$ мм, 4 — массивный медный электрод. Жирные стрелки указывают направление распространения тока, тонкие стрелки указывают направление излучения мощностью $P_{изл}$. Светлый участок ферромагнитной пленки — рабочая область

На рис. 3 представлена принципиальная схема построения генератора с излучателем типа стержень–пленка. В нем используется линза для фокусировки излучения в пучок параллельных лучей. На рис. 4 общий вид такого излучателя

с блоком питания. В таком генераторе на частоте 15 ТГц удалось получить в сфокусированном пучке мощность 450 мкВт при токе 500 мА.

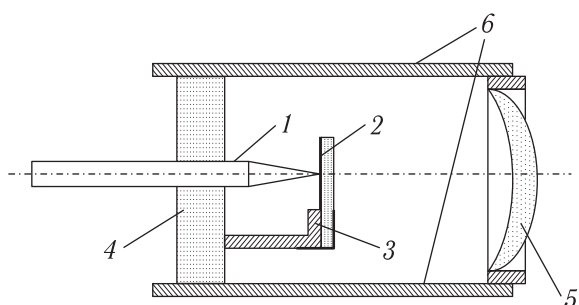


Рис. 3. Спин-инжекционный генератор с фокусирующей линзой. 1 — ферромагнитный стержень, 2 — ферромагнитная или антиферромагнитная пленка на диэлектрической подложке, 3 — держатель-анод, 4 — фиксирующий диск, 5 — линза, 6 — держатель линзы



Рис. 4. Общий вид генератора с линзой и блоком питания

На базе этого генератора создан генератор стимулированного излучения (типа лазера ТГц-диапазона). В нем обратная связь по излучению обеспечивается применением резонатора типа Фабри–Перо, образованного ферромагнитной пленкой и полупрозрачной металлической пленкой нанесенной на противоположную от ферромагнитной пленки поверхность диэлектрической подложки (см. рис. 5).

В таком генераторе удалось получить сужение спектра излучения в несколько раз [3] Это показано на рис. 6. где представлены спектры излучения, снятые при различных значениях тока. При увеличении тока спектр расширяется из-за того,

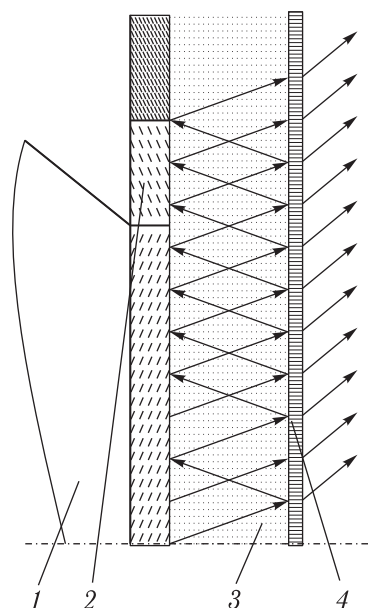


Рис. 5. Генератор стимулированного излучения. 1 — стержень, 2 — пленка, 3 — подложка, 4 — отражатель

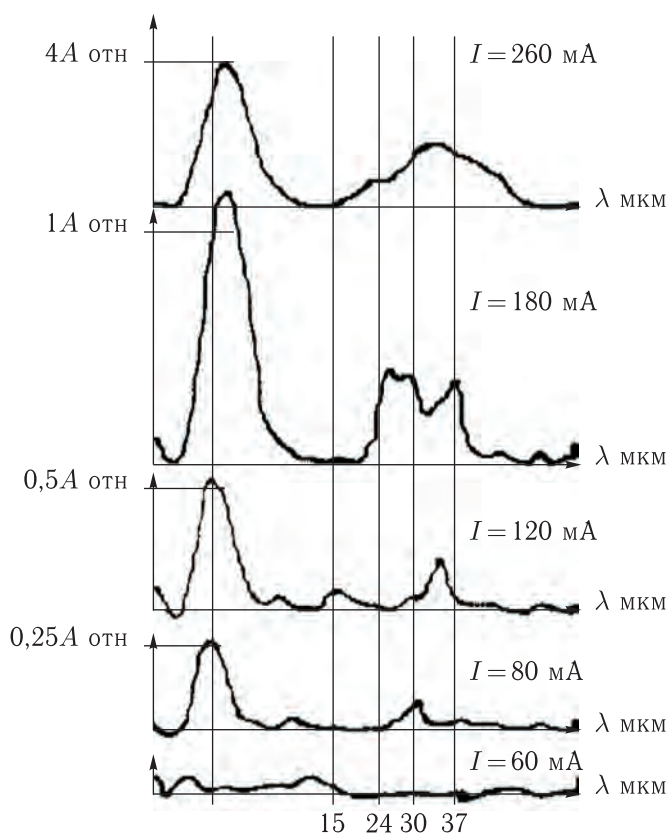


Рис. 6. Спектр стимулированного излучения

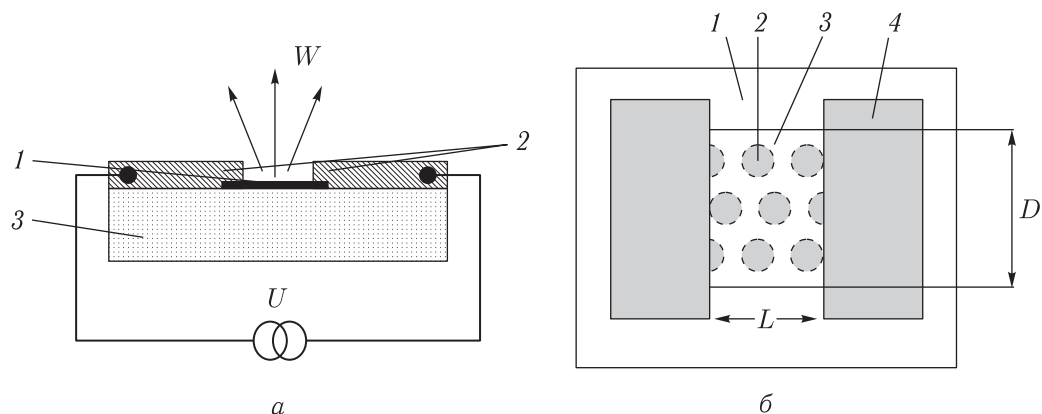


Рис. 7. Схема генератора с метапереходом: *а* — вид сбоку, *б* — вид в плане. 1 — метапереход, образованный столбиками из ферромагнитного металла (железо) — 2 и покрывающие столбики слой из FeMn — 3, 4 — контактные площадки из молибдена, 5 — диэлектрическая подложка, на которую нанесен метапереход с контактными площадками, W — мощность, U — напряжение, D — длина метаперехода, L — ширина метаперехода

что селективность используемого нами резонатора невелика. Сейчас ведутся работы по оптимизации резонансной системы такого генератора.

Иным техническим решением для создания спин-инжекционного генератора ТГц диапазона является использование в качестве рабочего элемента метаперехода, представляющего собой полосу ферромагнитного материала толщиной в десятки нанометров, в которую внедрено множество столбиков из иного ферромагнитного материала диаметром 50–100 нм, разнесенных друг от друга на расстояния порядка 10 нм. Схема такого генератора представлена на рис. 7.

В таких структурах излучение формируется на границе столбика и охватывающего его слоя. Так как в таких переходах происходит наложение парциальных волн от различных столбиков, то эффективность генератора и мощность могут существенно возрасти [4]. Это и наблюдается в экспериментах. Так, при токе 100 мА получена мощность

100 мкВт на частоте 9,4 ТГц. При этом возможно дальнейшее увеличение тока.

Данная работа была поддержана грантами РФФИ №№ 13-02-12427, 13-07-00259-а, 15-07-03907.

Список литературы

1. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М., Чигарев С.Г. // Генерация терагерцевых волн в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ, 2013, т. 98, вып. 11, с. 837–848.
2. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М. и др. Твердотельный источник электромагнитного излучения. Патент РФ 2012, № 2464683.
3. Гуляев Ю.В., Вилков Е.А., Зильберман П.Е. и др. Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцевых волн в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ, 2014, т. 99, вып. 9, с. 591–594.
4. Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Чигарев С.Г. и др. Твердотельный источник электромагнитного излучения. Патент РФ (в рассмотрении).