

Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцевых волн в магнитных переходах

Ю. В. Гуляев, Е. А. Вилков, П. Е. Зильберман¹⁾, Г. М. Михайлов⁺, А. В. Черных⁺, С. Г. Чигарев

Институт радиотехники и электроники им. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, Россия

⁺Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 8 апреля 2014 г.

Сообщается о наблюдениях стимулированного терагерцевого излучения в магнитных переходах, вызванного инъекцией неравновесных спинов током при комнатных температурах. Исследован контакт между ферромагнитными слоями, а также контакт между ферромагнитным и антиферромагнитным слоями. Ток создает инверсную заселенность спиновых уровней энергии. При помещении в резонатор возникают положительная обратная связь и стимулированное излучение. Наблюдаются выделение доминирующего пика излучения и электромагнитная турбулентность.

DOI: 10.7868/S0370274X14090033

1. Введение. В последние годы попытки широкого освоения высокочастотной части спектра радиоволн, а именно диапазона терагерцевых (ТГц) волн (условно 0.3–30 ТГц), становятся все более устойчивыми (см., например, обзоры [1, 2]). Это вызвано перспективами применений и появлением новых физических механизмов функционирования различных устройств. В настоящей работе обсуждаются механизмы инъекции неравновесных спинов током в структурах, составленных из магнитных материалов. Это могут быть контакты ферромагнетиков (ФМ–ФМ-структуры) или контакты ферромагнетика и антиферромагнетика (ФМ–АФМ-структуры). Такие контакты позволяют генерировать ТГц-волны за счет нарушения спинового равновесия протекающим через них током. Весьма удобными для подобных исследований оказываются металлы ввиду возможной относительно слабой зависимости их магнитных свойств от температуры. В частности, применение некоторых металлов, таких, как Fe, Ni, Ru, Co, FeMn и т.д., в принципе позволяет осуществлять генерацию ТГц в широком диапазоне температур – от криогенных до комнатных и выше.

В наших предыдущих работах сообщалось о конструкциях структур, механизмах и результатах экспериментального исследования ТГц-излучения при комнатных температурах, которое возникало под действием тока, но спонтанно, т.е. без какой-либо специально создаваемой обратной связи с излучателем [3]. В настоящей статье мы хотим сообщить о первых наблюдениях влияния положительной об-

ратной связи на спектральные характеристики спин-инжекционного излучения. При малых токах и, соответственно, малых уровнях излучения обратная связь не проявлялась. Генерировался слабый шум. По мере роста тока выделялся один узкий по частоте пик, который становился доминирующим по сравнению с пиками на других частотах. Мы считаем, что доминирующий пик возникает за счет стимулированных процессов излучения в поле резонатора. Таким образом, впервые наблюдается функционирование квантового генератора типа лазера, но на ТГц-частотах. По аналогии его можно было бы назвать “твазером”. При дальнейшем увеличении тока доминирующий пик расширяется, охватывая почти весь частотный диапазон неустойчивых ТГц-волн. При этом амплитуды волн возрастают более чем на порядок. По-видимому, здесь одновременно играют роль как нелинейные процессы взаимодействия волн, так и процессы их стимулированного излучения. Возникает интересное состояние электромагнитной турбулентности.

Эксперименты. Конструкция исследованного нами спин-инжекционного генератора подробно описана в обзоре [3]. Генератор включает в себя металлическую ФМ или АФМ пленку наноразмерной толщины, нанесенную на диэлектрическую подложку, прижатый к пленке токовый электрод – ФМ металлический стержень, один конец которого заострен до диаметра ~ 10 – 50 мкм, и фокусирующую линзу. В представляемых здесь экспериментах был дополнительно введен элемент, который осуществляет положительную обратную связь. Для этого излучающий конец стержня с пленкой помещался в плоскопарал-

¹⁾e-mail: zil@ms.ire.rssi.ru

лельный резонатор типа Фабри-Перо, схематически показанный на рис. 1. Резонатор был образован дву-

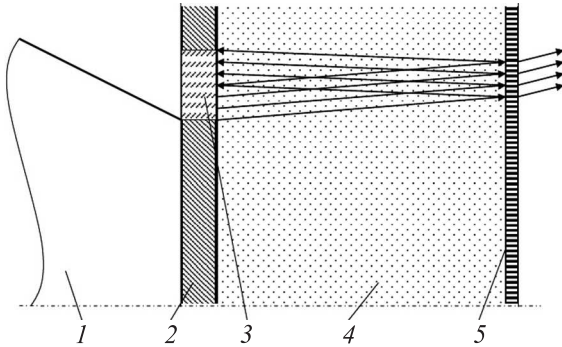


Рис. 1. Схематическое изображение участка рабочей зоны излучателя спин-инжекционного генератора: 1 – магнитный стержень, 2 – магнитная пленка наноразмерной толщины, 3 – рабочая область, 4 – подложка, 5 – полупрозрачное для ТГц-излучения зеркало

мя параллельными металлическими пленками (2 и 5) и диэлектрическим слоем (подложкой 4) между ними. В качестве подложки использовался либо диэлектрик (сапфир, Al_2O_3), либо высокоомный полупроводник (кремний, Si). Магнитная пленка 2 изготавливалась из ФМ (из пермаллоя, Ru толщиной ~ 10 нм или из магнетита, Fe_3O_4 толщиной ~ 150 нм). Немagnetная пленка 5 (из Ti толщиной ~ 10 –15 нм) служила в качестве полупрозрачного экрана для ТГц с коэффициентом прозрачности ~ 0.3 . Формирование излучения происходило в рабочей области излучателя 3. Излучение (на рис. 1 оно изображено стрелками), распространяясь в объеме подложки, частично отражалось от полупрозрачного зеркала 5 в сторону рабочей области, осуществляя обратную связь.

Волны спонтанно излучаются во всей рабочей области 3 практически равномерно по телесному углу [3]. Излучение возникает за счет создаваемой током инверсной заселенности спинов в рабочей области. При этом часть волн излучается под углами, близкими к нормали к пленке. Такие волны многократно переотражаются между обеими проводящими поверхностями, попадая в рабочую область. Кванты энергии, отраженной от полупрозрачного зеркала, способны стимулировать перевороты спинов с излучением. Таким образом, реализуется стандартная схема резонансного генератора с токовой накачкой. Подчеркнем еще раз, что в рабочей области 3 уже существует созданная током инверсная заселенность спинов.

Оценим селективность нашего резонатора с помощью соотношения

$$\Delta f = \frac{c}{2Ln}, \quad (1)$$

где Δf – разность между ближайшими резонансными частотами, L – расстояние между проводящими поверхностями (толщина подложки), n – коэффициент преломления среды (материала подложки). Для нашего случая $L = 0.5$ мм, $n \sim 2$. Тогда $\Delta f \sim 0.15$ ТГц. В исследуемом нами диапазоне (10–30 ТГц) такая селективность не позволяет получать одночастотный достаточно узкополосный сигнал. Она лишь дает возможность наблюдать резонансный эффект в некоторой полосе частот генерации.

Добротность такого резонатора во многом определяется поглощением излучения в среде. Иными словами, используя подложки из материалов с существенно различными значениями коэффициента поглощения, можно наблюдать разные картины влияния обратной связи на процесс генерации. Так, для подложки с малыми потерями несложно получить резонансный эффект генерации, а для подложки с большими потерями такой эффект получить труднее.

Обсуждение результатов и выводы. Измерения частот генерации были выполнены на установке, описанной ранее в [4]. При этом для спектрального анализа применялись дифракционные решетки, предоставленные нам ГОИ им. Н.И. Вавилова (Санкт-Петербург), а в качестве регистрирующего устройства служил оптоакустический преобразователь (ОАП, ячейка Голея) фирмы “ТИДЕКС”. В экспериментах наряду с возможностью обеспечения обратной связи за счет полупрозрачного зеркала исследовалось также и влияние добротности резонатора на параметры генерации. Для этого использовались излучатели на сапфировой подложке, имеющей в ТГц-диапазоне коэффициент поглощения $3 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, а также излучатели на подложке из высокоомного кремния с более чем на порядок меньшим коэффициентом поглощения, одним из наименьших в ТГц-диапазоне. Исследовались как амплитудные характеристики излучения, так и спектр излучаемого сигнала. В соответствии со спецификой применяемой методики [4] измерялись амплитуды 0-й и 1-й пространственных гармоник сигнала излучателя как без полупрозрачного зеркала, так и с зеркалом.

На рис. 2 приведены интенсивности 0-й и 1-й гармоник для излучателя с зеркалом (сплошные кривые) и без зеркала (штриховые кривые) для случая,

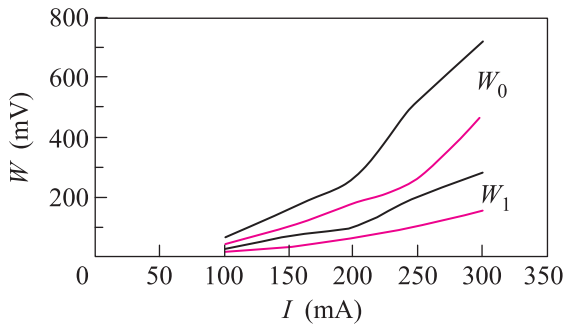


Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимости мощности излучения от тока для 0-й и 1-й гармоник излучателя на подложке из высокоомного кремния с зеркалом на задней стенке (сплошные кривые) и без зеркала (штриховые кривые)

когда подложка выполнена из высокоомного кремния. Интенсивность представлена в единицах измерения ОАП (в мВ). Из рисунка видно, что несмотря на использование полупрозрачного зеркала, оптоакустическим преобразователем регистрируется только треть генерируемой мощности. Эта мощность в 1.5–2 раза больше мощности, регистрируемой без зеркала. Иной результат наблюдается при использовании излучателя на подложке из сапфира (см. рис. 3). В

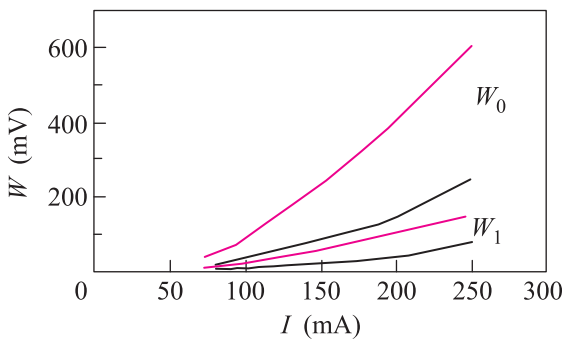


Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимости мощности излучения от тока для 0-й и 1-й гармоник излучателя на сапфировой подложке с зеркалом на задней стенке (сплошные кривые) и без зеркала (штриховые кривые)

этом случае регистрируемая мощность излучателя без зеркала в три раза больше мощности, регистрируемой для излучателя с зеркалом. Таким образом, регистрируется та часть излучения, которая соответствует прозрачности зеркала.

Итак, представленные результаты показывают, что для подложки из высокоомного кремния между проводящими поверхностями устанавливаются относительно слабо затухающие колебания. Многократное переотражение волн вызывает увеличение напряженности поля внутри резонатора, что в конечном счете и приводит к увеличению мощности, из-

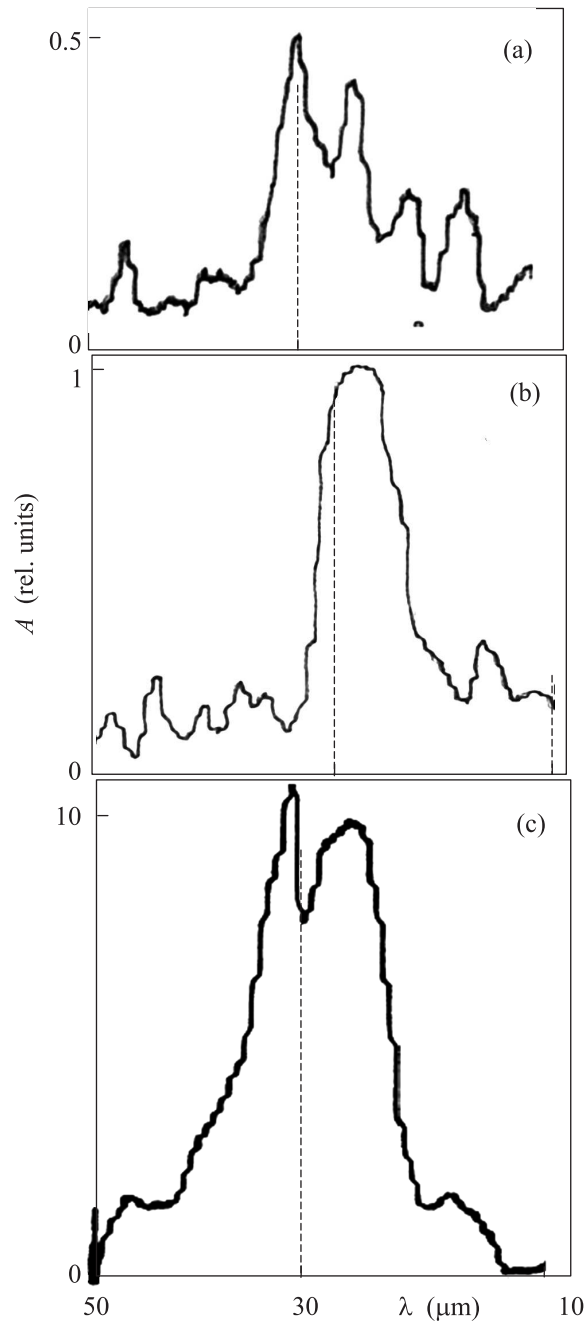


Рис. 4. Спектры первой дифракционной гармоники при различных значениях тока I в образце; λ – излучаемая длина волны. (а) – Режим неустойчивости при малых токах близок к линейному режиму: амплитуды всех излучаемых волн сопоставимы. (б) – При промежуточных токах доминирует пик в относительно узкой полосе частот, выделяемой стимулированными процессами. (с) – При самых больших токах происходит спектральное расширение доминирующего пика и возрастание его амплитуды на порядок за счет стимулированного излучения и нелинейного взаимодействия волн. Возникает турбулентное состояние ТГц-волн

лучаемой генератором. Применение же сапфировой подложки, имеющей более чем в 10 раз большие потери, чем у высокоомного кремния, приводит к быстрому затуханию электромагнитных колебаний между проводящими поверхностями. Это препятствует возникновению эффективной обратной связи. Как следствие здесь не наблюдается увеличения амплитуды регистрируемого сигнала.

На рис. 4 представлены спектры, соответствующие первой дифракционной гармонике при различных значениях тока. Рис. 4а отвечает малым начальным значениям тока, рис. 4б – незначительному (в 1.5 раза) повышению тока, рис. 4с – значительному (в 4 раза) повышению рабочего тока. Значения амплитуд сигналов на рисунках приведены относительно максимального значения амплитуды пика, который доминирует на рис. 4б.

Таким образом, положительная обратная связь приводит к радикальному изменению спектра ТГц-излучения и к увеличению более чем на порядок амплитуды излучения на определенных частотах. Подобные изменения вызваны влиянием стимулированных процессов излучения в резонаторе.

Работа поддержана РФФИ (гранты # 13-02-12427 и 13-07-00259-а).

-
1. B. S. Williams, *Nature Photonics* **1**, 517 (2007).
 2. В. Майская, *Электроника* **8**, 00114 (2011).
 3. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Г. М. Михайлов, С. Г. Чигарев, *Письма в ЖЭТФ* **98**(11), 837 (2013).
 4. С. Г. Чигарев, И. В. Маликов, Г. М. Михайлов, *РЭ* **58**, 3 (2013).