

## Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцевых волн в магнитных переходах

Ю. В. Гуляев<sup>1</sup>, Е. А. Вилков<sup>1</sup>, П. Е. Зильберман<sup>1</sup>, Г. М. Михайлов<sup>2</sup>, А. В. Черных<sup>2</sup>, С. Г. Чигарев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН.

Россия, 141190, Москва–Фрязино.

<sup>2</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

Россия, 142432, Черноголовка.

Исследовано стимулированное ТГц излучения в спин-инжекционном генераторе. Обратная связь обеспечивалась полупрозрачным зеркалом на диэлектрической подложке с противоположной стороны от магнитной пленки. Показано изменение спектральных характеристик и увеличение интенсивности генерации.

PACS: 01.30.Cc.

УДК: УДК 537.67.

Ключевые слова: ТГц излучение, спиновая инжекция, обратная связь, стимулированное излучение.

В последние годы широко осваивается терагерцевый (ТГц) диапазон волн (условно 0,3–30 ТГц) [1, 2], что связано с перспективами применения новых физических механизмов для создания устройств этого диапазона. Доклад посвящен одному из таких механизмов, проявляющемуся в магнитоупорядоченных структурах (образующих магнитный переход), а именно, на контакте металлических ферромагнитных (ФМ) и антиферромагнитных (АФМ) материалов. Здесь ТГц волны возбуждаются за счет нарушения спинового равновесия в протекающем в них токе перпендикулярно к их поверхности. Наша работа с Fe, Ni, Ru, Co, FeMn и др. магнитными металлами, показала возможность получать генерацию ТГц частот в широком диапазоне температур: от криогенных до комнатных и выше [3].

В наших предшествующих работах исследование ТГц излучения при комнатных температурах проводилось без специально создаваемой обратной связи с излучателем. В настоящей работе сообщается о первых наблюдениях влияния положительной обратной связи на энергетические и спектральные характеристики спин-инжекционного генератора.

Конструкция исследованного нами спин-инжекционного генератора подробно описана в обзоре [3]. Она включает в себя металлическую ФМ или АФМ пленку наноразмерной толщины, нанесенную на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, прижатый к пленке токовый стальной электрод — ФМ, один конец которого заострен до диаметра  $\sim 10\text{--}50\ \mu\text{м}$  и фокусирующую линзу. По границе острия стержня формируется рабочая область, определяемая толщиной ФМ или АФМ пленки и длиной спиновой релаксации в материале пленки (десятки нанометров). Дополнительно к этому, в предлагаемой работе для формирования обратной связи в рабочей области, на диэлектрическую подложку с противоположной стороны от ФМ или АФМ пленки наносилось полу-

прозрачное зеркало виде тонкой металлической (Ti) пленки. Спонтанно генерируемые в рабочей области волны излучаются практически равномерно по всему телесному углу [3]. При этом часть волн излучается под углами, близкими к нормали пленки. Эти волны многократно переотражаются между обеими проводящими поверхностями, попадая в рабочую область. Кванты энергии волны, отраженной от полупрозрачного зеркала, способны стимулировать перевороты спинов с излучением. Таким образом, по нашему мнению, можно реализовать стандартную схему резонансного генератора с токовой накачкой.

Наша оценка показала, что селективность используемого нами резонатора (расстояние между зеркалами десятки полуволн) не велика. Ближайшие частоты разнесены на  $f \sim 0,15$  ТГц. Такая селективность не позволяет получить одночастотный, достаточно узкополосный сигнал, но позволяет без перестройки резонатора наблюдать резонансный эффект (увеличение амплитуды регистрируемого сигнала, выделение на общем фоне отдельных частот при токах близких к пусковому значению) в некоторой полосе частот генерации.

Добротность такого резонатора во многом определяется поглощением излучения в подложке, две грани которой покрыты тонкими металлическими пленками, образующими резонатор типа Фабри–Перо. Поэтому, используя подложку с малыми потерями, например высокоомный кремний, можно получить резонансный эффект генерации, а для подложки с большими потерями (подложки из сапфира) такой эффект получить практически невозможно.

Наблюдения проводились на установке и по методике, описанной в [4]. В качестве детектора использовался опто-акустический преобразователь — ячейка Голея (ОАП), спектральные характеристики оценивались с помощью дифракционной решетке. Результаты исследования показали, что при малых токах генерировался слабый многочастотный сигнал не устойчивый во времени. При увеличении тока в  $\sim 1,5$  раза выделялся один узкий по частоте пик с полосой до несколь-

\*E-mail: chig50@mail.ru

ких процентов. Без полупрозрачного отражателя при таком же токе полоса генерируемого сигнала более чем на порядок шире. Мы считаем, что наблюдаемый доминирующий пик возникает за счет стимулированных процессов излучения определяемых полем резонатора. Таким образом, впервые наблюдается функционирование квантового генератора типа лазера на ТГц частотах, который по аналогии можно назвать «твазером». При дальнейшем увеличении тока доминирующий пик расширяется т.к. селективность резонатора мала и начинают возбуждаться ближайšie от основной частоты колебания. Видимо, одновременно играют роль нелинейные процессы взаимодействия волн и процессы их стимулированного излучения. Возникает состояние электромагнитной турбулентности.

Сравнение интенсивности излучения для излучателя с зеркалом и без него показали: при использовании излучателя с подложкой из высокоомного кремния (малые потери) с полупрозрачным зеркалом регистрируемая ОАП мощность в 1,5–2 раза больше, чем без

зеркала. В то же время при использовании излучателя с подложкой из сапфира, у которого потери более чем в 10 раз больше чем у кремния, регистрируемая мощность излучателя с зеркалом в 3 раза меньше чем для излучателя без зеркала. Ослабление сигнала как раз соответствует прозрачности зеркала.

Таким образом, положительная обратная связь приводит к изменению спектра ТГц излучения и к увеличению амплитуды излучения на определенных частотах. Подобные изменения вызваны влиянием стимулированных процессов излучения в спин-инжекционном генераторе с резонатором типа Фабри–Перо.

Результаты работы дают основание для создания когерентного источника ТГц диапазона частот типа лазера. Однако для этого необходимо существенно повысить качество резонансной системы спин-инжекционного генератора.

Работа поддержана РФФИ, гранты №№ 13-02-12427 и 13-07-00259-а.

- [1] Williams B.S. Terahertz quantum-cascade lasers. *Nature photonics*. **1**. P. 517 (2007).  
 [2] Майская В. Электроника. **8**. P.00114. (2011).  
 [3] Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Михайлов Г.М., Чигарев

- С.Г. Письма в ЖЭТФ. **98**, № 11. С. 837 (2013).  
 [4] Чигарев С.Г., Маликов И.В., Михайлов Г.М. РЭ. **58** С. 3. (2013).

## Spin-injection stimulated radiation of Terahertz Waves in magnetic Junctions

A. V. Chernych<sup>2</sup>, S. G. Chigarev<sup>1,а</sup>, Yu. V. Gulyaev<sup>1</sup>, G. M. Mikhailov<sup>2</sup>, E. A. Vilkov<sup>1</sup>, P. E. Zilberman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.A. Kotel'nikov Institute of Radioengineering & Electronics of RAS. Moscow–Fryazino, 141190, Russia.

<sup>2</sup>Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of RAS. Chernogolovka, 142432, Russia.  
 E-mail: <sup>а</sup>chig50@mail.ru

The mechanism of stimulated terahertz radiation was investigated for spin-injection oscillators. The feedback performs due to semitransparent mirror arranged on the back surface of the substrate. The influence of the feedback on spectral characteristics and radiation intensities of the oscillator are discussed.

PACS: 01.30.Cc.

Keywords: terahertz (THz) radiation, feedback, stimulated emission, spin injection.

### Сведения об авторах

1. Гуляев Юрий Васильевич — докт. физ.-мат. наук, академик, директор института, тел.: 8(926) 295-41-24, e-mail: gulyaev@cplire.ru.
2. Зильберман Петр Ефимович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией, тел.: 8(916) 496-04-51, e-mail: zil@ms.ire.rssi.ru.
3. Чигарев Сергей Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, тел.: 8(496) 565-24-76, e-mail: chig50@mail.ru.
4. Михайлов Геннадий Михайлович — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией; тел.: 8(496) 524-41-81, e-mail: mikhailo@iptm.ru.
5. Черных Анатолий Васильевич — старший научный сотрудник; тел.: (496) 524-41-76, e-mail: mikhailo@iptm.ru.
6. Вилков Евгений Анатольевич — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: 8(496) 565-24-18, e-mail: e-vilkov@yandex.ru.