НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА СПИН-ИНЖЕКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН В НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДАХ NONLINEAR DYNAMIC OF TERAHERTZ WAVES SPIN-INJECTION RADIATION IN NANOSCALE MAGNETIC JUNCTIONS

УДК 537.862

ВИЛКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ¹VILKOV EVGENY A.¹МАКСИМОВ НИКОЛАЙ АНДРЕЕВИЧ¹MAKSIMOV NIKOLAY A.¹МИХАЙЛОВ ГЕННАДИЙ МИХАЙЛОВИЧ²MIKHAILOV GENNADY M.²ПАНАС АНДРЕЙ ИВАНОВИЧ³PANAS ANDREY I.³ЧЕРНЫХ АНАТОЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ²CHERNYKH ANATOLY V.²ЧИГАРЕВ СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ¹CHIGAREV SERGEY G.¹

¹ Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Sciences

² Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых материалов РАН

² Institute of Microelectronics Technology Problems and High
Purity Materials of Russian Academy of Sciences

³ АО «НПП «Исток» им. А. И. Шокина»

³ "Istok" JSC

Анализируются экспериментальные данные вынужденного (стимулированного) излучения терагерцовых волн в наноразмерных магнитных переходах. Обсуждаются наблюдаемые нелинейные эффекты излучения на предмет сходства с турбулентными процессами в гидродинамике и динамическим хаосом в радиофизике.

Ключевые слова: магнитные переходы; терагерцовые (ТГц) волны; нелинейное взаимодействие; спин-инжекционное излучение; турбулентность.

The paper analyzes experimental data of THz waves' spin-injection stimulated (induced) radiation in nanoscale magnetic junctions. Besides, it considers nonlinear effects of the radiation with regard to similarities to turbulent processes in the hydrodynamics and dynamic chaos in radiophysics.

Keywords: magnetic junctions; terahertz (THz) waves; nonlinear interaction; spin-injection radiation; turbulence.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время внимание специалистов все больше привлекает терагерцовый диапазон длин волн. Он расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами и в силу своей слабой освоенности иногда называется терагерцовой дырой (или провалом). Такая ситуация связана с небольшим выбором существующих источников и приемников терагерцового излучения. К первым относятся ЛОВ, оротроны, гиротроны и лазеры, в то время как выбор приемников и того меньше: это в основном болометры и ячейки Голея. Указанные приборы часто громоздки и неудобны для практических применений. И хотя специалисты считают, что «провал» сомкнулся к концу 90-х годов, эффективность существующих приборов в этом диапазоне остается невысокой.

С другой стороны, свойства сигналов терагерцового диапазона действительно привлекательны с точки зрения использования их на практике. Так, например, ТГц-излучение не является ионизирующим, поэтому, в отличие от рентгеновского излучения, оно не наносит вреда организму. Высокая проникающая способность терагерцовых сигналов делает их весьма перспективными для систем безопасности и сканирования багажа и людей. Интересны

предложения по использованию таких сигналов в спектроскопии и высокоскоростных системах связи.

Отмеченные обстоятельства делают актуальными исследования по поиску новых принципов построения источников терагерцового излучения, особенно в плане разработки компактных и технологичных в изготовлении устройств. Одно из них базируется на явлении, наблюдаемом уже на протяжении ряда лет и связанном с обнаруженным эффектом излучения сигналов в диапазоне частот 3–40 ТГц в магнитных переходах, сформированных из контактирующих слоев ферромагнетиков и антиферромагнетиков, при протекании через них токов большой плотности [1]. В [2] было показано, что механизм наблюдаемого излучения может быть связан с инжекцией неравновесных спинов электронов протекающим через контактные слои током и созданием инверсной заселенности спиновых уровней энергии. Такая трактовка вызывает дискуссии среди специалистов, но, по мнению авторов указанной публикации, имеет право на существование. Интересные эффекты наблюдаются при помещении источника терагерцового излучения в резонатор с положительной обратной связью [3–4], что при определенных условиях (величина тока через переходы) приводит к резкому увеличению интенсивности генерации подобно лазерам.

Направление исследований по спин-инжекционному излучению терагерцовых волн в магнитных переходах зародилось в России и по настоящее время не имеет аналогов в мире. С другой стороны, интерес к этим исследованиям существует, о чем свидетельствует публикационная активность ведущих научно-технических журналов. В данной ситуации любые результаты по этому направлению являются новыми и заслуживающими внимания, хотя некоторые выводы авторов как предыдущих работ [1–4], так и настоящей публикации могут казаться и не бесспорными.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффектов, обнаруженных в [3–4], с акцентом на анализ нелинейных (турбулентных) свойств генерации, имеющих место при больших токах инжекции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАКЕТ

В основе идеи введения положительной обратной связи лежит проверка гипотезы о создании инверсной заселенности спиновых уровней энергии у электронов при протекании токов через магнитные переходы. При этом используется подход, применяемый при построении лазеров, — в структуру вводится резонатор, обеспечивающий многократный проход излучения через активную среду. Это, в свою очередь, приводит к появлению вынужденного (стимулированного) излучения, которое существенно увеличивает амплитуду излучаемой волны без изменения ее частоты и фазы. Последнее свидетельствует о том, что вынужденное излучение когерентно с вынуждающим излучением.

На рис. 1 схематично представлена структура экспериментального макета источника терагерцовых волн [3]. Он состоит из наноразмерной пленки 2 антиферромагнетика FeMn (30–50 нм), к которой прижат металлический стержень 1, заостренный до диаметра 10–40 мкм. Резонатор образован пленкой 2 и немагнитным слоем 5 из титана (10–15 нм). Последний выполняет функцию полупрозрачного зеркала, имеющего в ТГц-диапазоне коэффициент прозрачности 0,3. В отличие от лазеров, у которых между зеркалами резонатора находится активная среда с инверсной населенностью энергетических уровней, в макете это пространство заполнено высокоомным кремнием 4 толщиной 0,5 мм и коэффициентом преломления, равным 2. Перечисленные характеристики делают резонатор низкодобротным, что является еще одним принципиальным отличием макета от лазерных систем. Формирование излучения происходит в области 3. Нетрудно убедиться, что собственные частоты используемого в эксперименте резонатора отстоят друг от друга на 0,15 ТГц.

Рис. 1. Структура экспериментального макета

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Основной задачей экспериментов являлись ответы на следующие вопросы: может ли в данной структуре быть реализован лазерный эффект усиления излучения за счет вынужденного воздействия и что будет происходить с выходным сигналом при больших токах инжекции? Положительный ответ на первый вопрос будет свидетельствовать о том, что кванты энергии, отраженные от титанового зеркала, также способны стимулировать перевороты спинов с излучением, увеличивая мощность излученного сигнала, естественно, при условии что в области 3 уже существует инверсная заселенность спинов. Второй вопрос связан с возможными нелинейными эффектами излучения.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики излучения, зафиксированные в эксперименте. Первая из них (рис. 2а) соответствует относительно небольшим токам инжекции (80 мА). В этом случае низкая добротность используемого резонатора в сочетании с нелинейными эффектами, связанными с преобразованием и излучением терагерцового сигнала, приводит к появлению в спектре ближайших гармоник основной моды излучения, расположенной в районе 10 ТГц. Отметим «размытость» спектральных составляющих по частоте, каждая из которых включает в себя более десятка собственных частот резонатора. Увеличение тока приводит к новым эффектам. Рис. 2б демонстрирует спектр излученного сигнала при токе инжекции 120 мА. Спектр становится более широкополосным, вовлекая в процесс излучения все больше собственных частот резонатора. Рост интенсивности генерируемого сигнала и формирование одной явно выраженной моды излучения напоминает эффект, наблюдаемый в лазерах при стимулированном излучении. Именно этот эффект позволил авторам [3, 4] осторожно

Рис. 2. Спектральные характеристики излученного сигнала

назвать исследуемый объект терагерцовым квантовым генератором («твазером»). При дальнейшем увеличении тока система переходит в новое состояние. Так, спектр на рис. 2в соответствует току 300 мА и напоминает спектры турбулентных процессов в гидродинамике [5] и в системах с динамическим хаосом в радиофизике [6]. С другой стороны, удивительным является тот факт, что переход системы в «турбулентный» режим сопровождается значительным, практически на порядок, увеличением интенсивности излучения, что отличает его от указанных нелинейных явлений и делает актуальным продолжение исследований по этой проблематике в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ экспериментальных данных по исследованию излучения стимулированных (вынужденных) спин-инжекционных терагерцовых волн свидетельствует о том, что механизм наблюдаемого излучения действительно может быть связан с созданием инверсной заселенности (по аналогии с лазерами) спиновых уровней энергии электронов на границе контактов магнитных переходов. Ставить окончательную точку в дискуссии как о самом явлении излучения терагерцовых волн, так и о его возможных механизмах, наверное, рано, но приведенные в данной работе результаты могут представлять интерес для специалистов в этой области. Кроме того, как с научной, так и с практической точки зрения интерес представляют режимы излучения, наблюдаемые при больших токах инжекции и демонстрирующие динамику, похожую на нелинейную. Но здесь явно не хватает экспериментального материала и теоретических исследований.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 15-07-03907а)*

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Маликов И. В., Михайлов Г. М., Панас А. И., Чигарёв С. Г., Эпштейн Э. М. Спин-инжекционное терагерцовое излучение в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ, 2011. — Т. 93. — С. 289–293.
2. Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Маликов И. В., Михайлов Г. М., Панас А. И., Чигарев С. Г., Эпштейн Э. М. Инжекция спинов током и терагерцовое излучение в ферромагнитных переходах // Доклады Академии наук, 2011. — Т. 438. — № 1. — С. 41–43.
3. Гуляев Ю. В., Вилков Е. А., Зильберман П. Е., Михайлов Г. М., Черных Ф. В., Чигарев С. Г. Спин-инжекционное стимулированное излучение терагерцовых волн в магнитных переходах // Письма в ЖЭТФ, 2014. — Т. 99. — № 9–10. — С. 591–594.
4. Гуляев Ю. В., Вилков Е. А., Зильберман П. Е., Михайлов Г. М., Черных А. В., Чигарев С. Г. Стимулированное терагерцовое излучение // Радиотехника и электроника, 2015. — Т. 60. — № 9. — С. 963–966.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 томах. Т. 6. Гидродинамика // М.: Наука, 1986. — 736 с.
6. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Максимов Н. А., Панас А. И. Генерация хаоса. — М.: Техносфера, 2012. — 432 с.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:

ВНЕДРЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНДУСТРИИ 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики

Под ред. Армина Рота
Пер. с нем. под общей ред. А. В. Кострова

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. — 294 с. ISBN 978-5-94836-482-7

Издание осуществлено при финансовой поддержке ПАО «Ростелеком»

Цена 1090 руб.

В книге представлены концепция, основные парадигмы развития, структура технологии Индустрии 4.0. В отличие от широко распространенного технократического прикладного метода изучения, издание позволяет выделить и целостно описать уровни стратегического, тактического и оперативного управления. Ключевым элементом при этом является процессная модель, описывающая действия на стратегическом и оперативном уровнях, а примеры практического применения Индустрии 4.0 в различных отраслях промышленности наряду с мнениями известных экспертов в области науки и производства вызовут интерес не только у новичков отрасли, но и у научных сотрудников, инженерно-технических работников и руководителей высшего и среднего звена. Благодаря обширному глоссарию издание станет ценным справочным пособием по использованию основных положений и лучших практик Индустрии 4.0.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?
e-mail: knigi@technosphere.ru;
sales@technosphere.ru

125319, Москва, а/я 91;

тел.: +7 495 234-0110;
факс: +7 495 956-3346;