

РАДИОФОТОНИКА

Линия задержки СВЧ сигналов на основе многосердцевинного оптического волокна

*О.Н. Егорова, М.Е. Белкин, Д. А. Ключник, С.Г. Журавлев,
М.С. Астапович, С.Л. Семенов 2*

Установка для исследования спектральных характеристик электромагнитных колебаний терагерцового диапазона

*И.Н. Дюжиков, М.В. Логунов, С.С. Сафонов, А.В. Скотников,
С.Г. Чигарев, А.В. Чурбанов..... 6*

Увеличение эффективности ТГц генерации при протекании тока в металлических магнитных переходах

*Ю.В. Гуляев, Е.А. Вилков, А.В. Давыденко, Р.С. Ильин, Р.С. Куликов,
А.Г. Колесников, А.Р. Сафин, С.Г. Чигарев..... 8*

Исследование нелинейных свойств высокодобротных оптических микрорезонаторов в области нормальной дисперсии

А.Е. Шитиков, Н.Г. Павлов, И.А. Биленко, М.Л. Городецкий 10

Линия задержки СВЧ сигналов на основе многосердцевинного оптического волокна

О.Н. Егорова¹, М.Е. Белкин², Д. А. Ключник², С.Г. Журавлев¹,
М.С. Астапович¹, С.Л. Семенов¹

¹ Научный центр волоконной оптики РАН (НЦВО РАН)

² Московский технологический университет (МИРЭА)

egorova@fo.gpi.ru

Волоконно-оптические линии задержки широко используются для ряда задач радиофотоники [1,2]. При получении длительных времен задержки свыше, например, 100 мкс, основным недостатком волоконно-оптических линий задержки являются высокие масса и габариты, связанные с большой длиной оптического волокна. Уменьшить длину оптического волокна в этом случае возможно за счет использования последовательного прохождения сигнала по сердцевинам многосердцевинного оптического волокна (МСОВ) [3].

Для создания волоконно-оптической линии задержки на МСОВ, сравнимой по величине затухания сигнала с линиями задержки на односердцевинных волокнах, необходимо создание, во-первых, МСОВ с низкими оптическими потерями, во-вторых, устройств, обеспечивающих ввод и вывод излучения из каждой сердцевины МСОВ в отдельные односердцевинные волокна без существенных потерь мощности сигнала. В настоящей работе описана разработанная в российской академии наук отечественная технология создания многосердцевинных оптических волокон и устройств ввода-вывода, а также созданная с использованием этих элементов линия задержки оптического сигнала.

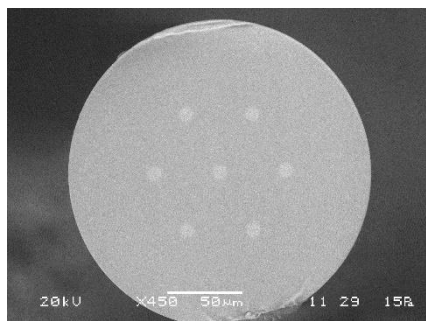


Рис. 1. Поперечное сечение МСОВ.

Заготовка МСОВ была изготовлена методом сверления. Для этого в исходном стержне из синтетического кварцевого стекла с помощью полого алмазного сверла высверливались семь отверстий, расположенных в гексагональном порядке. Путем перетягивания на стеклодувном станке заготовки односердцевинного оптического волокна были изготовлены семь стержней с сердцевинами. Затем в высверленные отверстия были вставлены стержни с сердцевинами и, собранная таким образом заготовка, консолидировалась в стержень – заготовку путем нагрева. Затем из полученной заготовки вытягивалось МСОВ.

Фотография торца МСОВ, полученная с помощью электронного микроскопа в режиме отраженных электронов, представлена на рисунке 1. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки, определенная по профилю показателя преломления односердцевинной заготовки, составляла 0.0055. В изготовленном МСОВ диаметр оболочки из кварцевого стекла составил 205 мкм, расстояние между центрами

соседних сердцевин – 44,5 мкм. Длина волны отсечки первой высшей моды для всех сердцевин лежала в диапазоне 1.47-1.48 мкм. Оптические потери, измеренные с помощью оптического рефлектометра на длине волны 1,55 мкм, составили менее 1 дБ/км.

В полученном МСОВ проводилось измерение перекрестных помех между центральной и боковыми сердцевинами. Для этого излучение вводилось в центральную сердцевину, а на выходном торце МСОВ измерялась мощность сигнала в каждой из сердцевин, значение перекрестных помех определялось как отношение сигналов в боковой и центральной сердцевинах. Полученные значения перекрестных помех при длине оптического волокна 160 м в каждой из сердцевин находились в диапазоне от -51 до -56 дБ.

В полученном МСОВ была измерена разность групповых задержек между центральной и боковыми сердцевинами [4]. Измерения проводились на длине МСОВ 620 м. Измеренные значения разности групповой задержки между центральной и каждой из боковых сердцевин $\Delta\tau=(\tau_s-\tau_c)/L$, (где τ_s - задержка в боковой сердцевине, τ_c - задержка в центральной сердцевине, L-длина оптического волокна) лежат в диапазоне от -0,23 до 0,29 пс/м.



Рис. 2. Внешний вид устройства ввода-вывода.

Для изготовления устройства ввода-вывода (УВВ) была выбрана волоконно-оптическая конструкция, основанная на методе травления и склейки [5]. Для изготовления УВВ сначала изготавливался корпус устройства, представляющий собой капилляр из кварцевого стекла с воронкой. Воронка изготавливалась при помощи раздувки участка капилляра на стеклодувном станке и последующего скалывания. Участки длиной 5-7 см односерцевинных оптических волокон помещались в плавиковую кислоту, где производилось их травление до достижения диаметра, равного расстоянию между центрами соседних сердцевин МСОВ. Затем в воронку корпуса УВВ вводился клей, и затем помещались семь участков односерцевинных оптических волокон уменьшенного в результате травления диаметра, сложенных в гексагональном порядке. Затем производилось отверждение клея с помощью ультрафиолетового излучения и полировка торца полученного УВВ. Геометрия положения сердцевин на торце УВВ соответствовала расположению сердцевин в МСОВ. Внешний вид полученного таким образом УВВ показан на рисунке 2.

Для изготовления линии задержки было использовано 160 м МСОВ. К обоим концам отрезка волокна были пристыкованы и приклеены устройства ввода вывода УВВ1 и УВВ2 (рисунок 3). В местах стыковки МСОВ и УВВ были измерены оптические потери. Также с помощью рефлектометра временной области были измерены коэффициенты отражения в местах стыковки.

Оптические потери на стыковке МСОВ с УВВ1 и УВВ2 находились в диапазоне от 0,3 до 1,6 дБ. Коэффициенты отражения в местах стыковки не превышали -40 дБ, что

приемлемо для практического использования линии задержки. Потери сигнала в каждом из каналов, включая оптические потери на стыковках и в сердцевинах МСОВ, находились в диапазоне 1,0-2,2 дБ. Суммарная величина оптических потерь по всем семи каналам составила 11,4 дБ.

Для измерения параметров волоконно-оптической линии задержки использовался векторный анализатор цепей AgilentE8363BPNA- ВАЦ (рисунок 3). В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный излучатель (ПЛИ) PS-NILL-1550.92-80-04 Teraxion на длине волны 1550,92 нм, мощность излучения после электрооптического модулятора Маха-Цандера (ЭОМ) в точке А составляла 3 мВт.

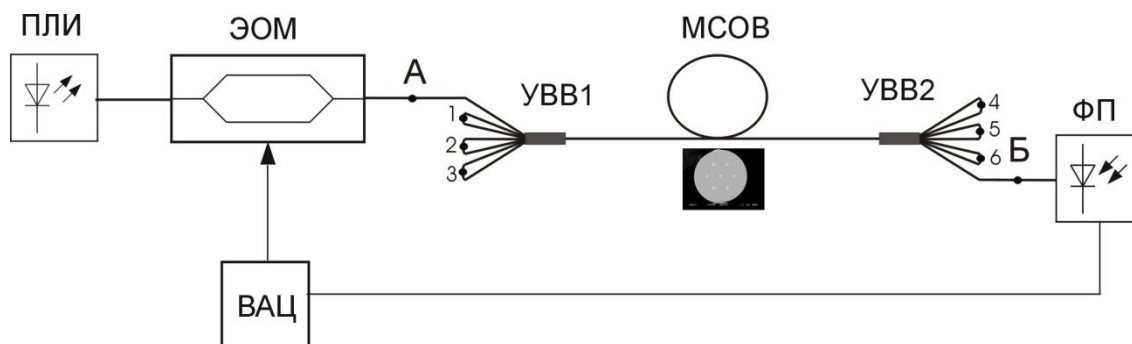


Рис. 3. Схема линии задержки на МСОВ.

Было проведено измерение группового времени запаздывания (ГВЗ) при последовательном прохождении сигнала через все семь сердцевин МСОВ. Для того, чтобы обеспечить последовательное прохождение сигнала по всем сердцевинам МСОВ, соответствующие выходы УВВ были соединены друг с другом. То есть, после ЭОМ оптический сигнал с помощью УВВ 1 вводился в одну из сердцевин МСОВ, проходил по ней, поступал в односердцевинное волокно на выходе УВВ 2, которое было соединено в точке 4 с другим односердцевинным волокном УВВ 2, с помощью которого сигнал подавался в следующую сердцевину МСОВ. Таким образом, с помощью односердцевинных волокон, являющихся выходами УВВ 1 и УВВ 2, соединенных попарно в точках 1-6, оптический сигнал последовательно проходил все сердцевинны МСОВ и на выходе из последней сердцевинны подавался на фотоприемник (ФП). Результаты измерения ГВЗ представлены на рисунке 4а. Измерения проводились в диапазоне от 6 до 12 ГГц. Для этого было проведено шесть измерений: в диапазонах 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11 и 11-12 ГГц. Вертикальные линии на рисунке 4а соответствуют границам диапазонов измерения.

На рисунке 4б представлена разность результатов измерения ГВЗ при прохождении оптического сигнала по всем сердцевинам МСОВ и при прохождении закороченного участка, то есть схемы на рисунке 3 без МСОВ, при соединении точек А и Б. Измеренное ГВЗ в диапазоне частот 6-12 ГГц составило 5,620 мкс.

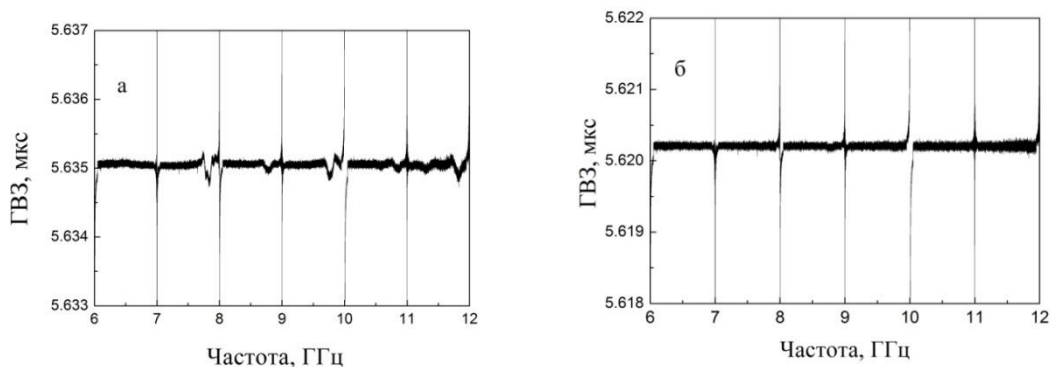


Рис. 4. а - Измерение ГВЗ через все сердцевинки на длине волны 1550.92 нм. б- Разность ГВЗ при прохождении сигнала через все сердцевинки МСОВ и только закороченного участка. Измерения проводились в диапазонах 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12 ГГц. Вертикальные линии – границы диапазонов.

С помощью разработанной отечественной технологии изготовления многосердцевинных оптических волокон и устройств ввода-вывода создана волоконно-оптическая линия задержки, основанная на последовательном прохождении сигнала по всем сердцевинам семисердцевинного оптического волокна, суммарные оптические потери в которой составляют 11,4 дБ. Благодаря использованию многосердцевинного оптического волокна, измеренное в диапазоне частот 6-12 ГГц групповое время задержки составило 5,62 мкс при длине оптического волокна всего 160 м. Дальнейшее снижение оптических потерь в линии задержки возможно за счет совершенствования технологии изготовления многосердцевинных оптических волокон и устройств ввода-вывода.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI60715X0138).

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Capmany et al // J. of Lightwave Technology. 2005. V. 23. P. 702.
2. R.A. Minasian // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. V. 54. P. 832.
3. О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, заявка на Патент РФ № RU 2016124251 от 20.06.2016.
4. М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов // Известия РАН Серия физическая. 2017. Т. 81. № 1. с. 15-18.
5. B. Li et. al. // Optics Express. 2015. V. 23. No. 9. P. 10997.

Установка для исследования спектральных характеристик электромагнитных колебаний терагерцового диапазона

И.Н. Дюжиков¹, М.В. Логунов¹, С.С. Сафонов²,
А.В. Скотников², С.Г. Чигарев³, А.В. Чурбанов¹

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

²Московский технологический университет

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

logunov@cplire.ru

Исследование механизмов генерации терагерцовых колебаний в микро- и наноструктурах привлекает внимание благодаря перспективам их использования в быстродействующих устройствах спинтроники [1-3], вплоть до частот в десятки терагерц [4]. Интенсивность терагерцовых колебаний в таких структурах мала и маскируется тепловым излучением: максимум излучения чёрных/серых тел при температуре 300 К приходится на 10 мкм / 30 ТГц. Другая особенность экспериментально исследуемых структур заключается в трудностях с непрерывной регистрацией характеристик излучения в широком диапазоне спектра, так как элементы спектрометров (светоделители, детекторы и др.) работают, как правило, на узких участках дальнего ИК спектра.

В данной работе представлена установка для исследования спектральных характеристик электромагнитных колебаний в среднем и дальнем ИК диапазоне, в диапазоне частот 0,15 – 80 ТГц, со спектральным разрешением не хуже 0,2 см⁻¹ (6 ГГц). Основа установки – ИК Фурье-спектрометр типа Vertex 80v (Bruker). Прибор укомплектован криостатом для работы с исследуемыми образцами в диапазоне температур от 5 до 300 К, что важно для детального исследования квантовых явлений.

Регистрируемый сигнал формируется в результате интерференции разделенных лучей, отраженных от неподвижного зеркала и движущегося зеркала, осциллирующего «вперед-назад» с постоянной частотой. Интерферограмма формируется единственным детектором в зависимости от позиции движущегося зеркала, а преобразование Фурье восстанавливает зависимость интенсивности от длины волны [5] аналогично тому, как при анализе спектра во временной области «THz-TDS» соотносятся зависящая от времени волновая форма электрического поля с частотно зависимым спектром электрического поля. Классический результат регистрации спектра излучения с помощью данного спектрометра представлен на рис. 1. Последующая обработка спектров позволяет, в частности, вычитать вклады фонового теплового излучения и других паразитных сигналов.

При работе со спектрометром необходимо учитывать, что каждый участок спектра требует своей уникальной конфигурации оптических элементов и детекторов излучения для достижения оптимального соотношения сигнал/шум. На частотах терагерцового диапазона используются, в частности, майларовые делители лучей и кремниевый болометр в качестве детектора, охлаждаемый жидким гелием. Возможно также использование длинноволнового фотодетектора при комнатной температуре, однако он обладает меньшим рабочим диапазоном и имеет чувствительность на три порядка ниже по сравнению с охлаждаемым болометром.

Особенностью представляемой установки является автоматизация изменения режимов работы генерирующих терагерцовые колебания микро- и наноструктур, и синхронизация процессов генерации/регистрации терагерцового излучения. В установке предусмотрен режим работы с модуляцией сигнала внешнего источника. Необходимость использования модуляции обусловлена перекрытием спектров полезного сигнала и теплового излучения терагерцового диапазона, амплитуды

которых могут быть сравнимы по величине. Более того, разработанная схема эксперимента позволяет выделять полезный сигнал, амплитуда которого меньше амплитуды теплового излучения.

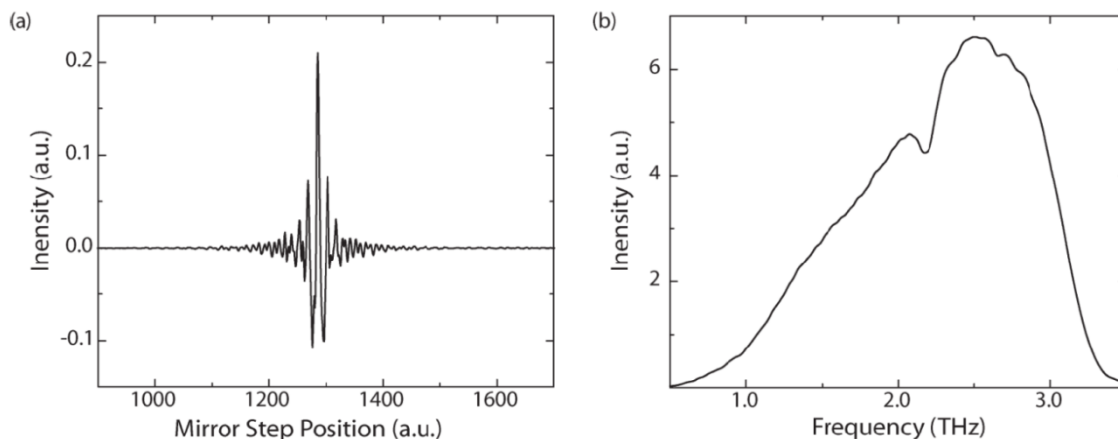


Рис. 1. (а) Интерферограмма интенсивности в зависимости от положения зеркала. (б) Спектр, полученный в результате фурье-преобразования интерферограммы (а).

Отметим, что применение амплитудной модуляции в режиме непрерывного сканирования спектра накладывает ряд ограничений на диапазон частот модуляции и величину постоянной времени, используемой при синхронном детектировании. Частота модуляции должна быть достаточно высокой для получения необходимого соотношения сигнал/шум при малых значениях постоянной времени. Выбор малых значений постоянной времени обусловлен необходимостью обеспечения достаточного спектрального разрешения при сохранении скорости сканирования на таком уровне, чтобы условия генерации и измерения сигналов можно было считать неизменными в течение всего времени сканирования по спектру сигнала.

Благодаря синхронизации систем генерации сигнала с внутренними системами спектрометра в данной установке реализованы режимы Step-Scan и Rapid-Scan, когда сканирование спектра идет пошагово или непрерывно. Использование модуляции полезного сигнала возможно в обоих режимах работы.

Установку планируется использовать для детального изучения механизмов генерации терагерцовых волн под влиянием поляризованного по спину тока в ферромагнитных и антиферромагнитных металлических структурах (магнитных переходах) в результате процессов спиновой инжекции, *sd*-обмена [2], а также и в других микро- и наноструктурах [3,4], когда требуется регистрация спектров сигналов терагерцового диапазона с высокой чувствительностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.A. Lewis. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 374001.
2. Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, С.Г. Чигарев. // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. С. 441.
3. J. Walowski and M. Münzenberg. J. Appl. Phys. 2016. V. 120. P. 140901.
4. D. Bossini¹, S. Dal Conte, Y. Hashimoto et al. // Nature Communications. 2016. V. 7. P. 10645.
5. P. Griffiths and J. A. De Haseth “Fourier transform infrared spectrometry” New York: Wiley-Interscience, 2007.

Увеличение эффективности ТГц генерации при протекании тока в металлических магнитных переходах

Ю.В. Гуляев¹, Е.А. Вилков¹, А.В. Давыденко³, Р.С. Ильин², Р.С. Куликов², А.Г. Колесников³, А.Р. Сафин², С.Г. Чигарев¹

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

² НИУ «Московский энергетический институт»

³ Дальневосточный федеральный университет

chig50@mail.ru

Согласно [1] при спиновой инжекции током в магнитных переходах основным параметром выступает не величина тока, а его плотность. Она является и основным критерием, определяющим генерацию электромагнитных волн [2]. В исследуемой нами структуре магнитного перехода типа ферромагнитный стержень – ферромагнитная пленка [2, 3] плотность тока определяется как диаметром острия стержня (~ 10 -50 мкм) так и толщиной пленки (~ 30-50 нм). Уменьшение диаметра острия приводит к увеличению тепловой нагрузки в области контакта стержень-пленка, что ограничивает, в конечном счете, величину тока. Уменьшение толщины пленки приводит к нарушению ее сплошности вплоть до потери пленкой электропроводности. При нарушении сплошности пленки, но сохранении ее электропроводности, структура пленки может представлять отдельные металлические области, электрически связанные между собой перемычками. Из-за этого эффективное сечение пленки существенно уменьшается, что приводит, прежде всего, к увеличению ее сопротивления (см. напр. [4]). Тем не менее представляет интерес использовать этот эффект для увеличения эффективности генерации за счет увеличения плотности тока.

В предлагаемой работе исследовались как однослойные структуры пленок кобальта разной толщины, нанесенные на алмазные подложки, так и многослойные структуры, образованные несколькими пленками кобальта, разделенных танталовыми спейсерами.

Исследовалась топология поверхности образцов разной толщины сканирующим зондовым микроскопом СМЕНА. Результаты представлены на рис.1

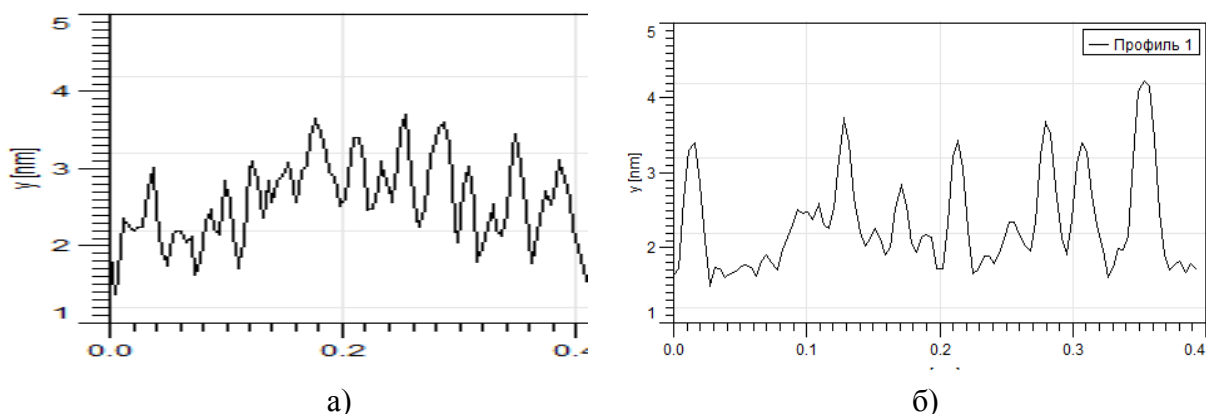


Рис.1. Сечения пленок различной толщины: а) толщина 50 нм, б) толщина 5 нм.

Экспериментальные исследования возможности повышения эффективности генерирования ТГц излучения при протекании тока в магнитном переходе проводились на экспериментальном макете, схема которого, а также описание экспериментальной установки и методика проведения измерений представлены в [5].

В предположении того, что пусковая плотность тока одинакова для различных структур экспериментально было установлено уменьшение эффективного сечения при

уменьшении толщины пленки с 50 нм до 5 нм не в 10 раз, а в ~ 25 раз. Это можно объяснить наличием участков ультратонкой пленки с толщиной менее 5 нм.

На рис.2 изображена зависимость мощности излучения $W_{изл}$ от потребляемой источником мощности $W_{пот}$. Видно, что уменьшение толщины пленки приводит к существенному снижению потребляемой мощности (увеличение КПД) необходимой для достижения одного и того же уровня мощности для пленки 5 нм и пленки 50 нм.

Возможность увеличения мощности излучения при сохранении КПД видно из сравнения кривой 1 (Со 5 нм) на рис. 2, с кривой 3 (3 слоя Со 5 нм). Некоторое снижение эффективности (увеличение пускового тока) для многослойной структуры можно объяснить шунтирующим действием танталовых слоев.

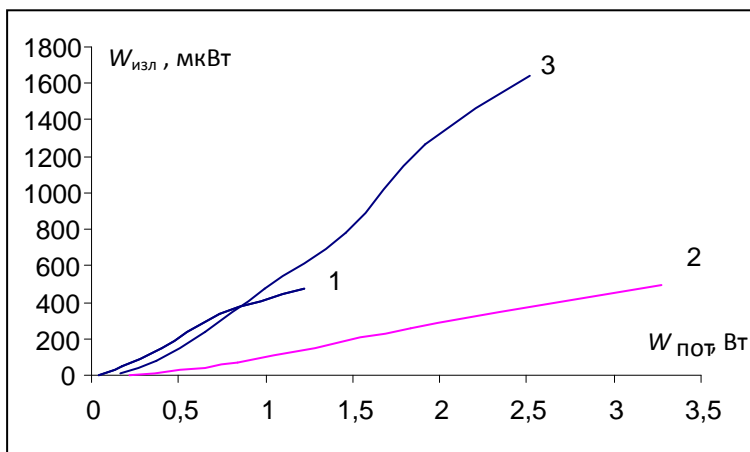


Рис.2. Зависимость мощности излучения от потребляемой источником мощности для различных структур. Кривая 1, 2 однослойные структуры с пленкой Со, 1- толщиной 5 нм, 2 - 50 нм, кривая 3 многослойная структура с тремя разделенными пленками Со 5 нм.

Таким образом, использование плёнок 5 нм позволило в 3 раза увеличить КПД по сравнению с плёнками 50 нм. Так для излучения 0.5 мВт (пленка Со 5нм) потребляется 1.2 Вт вместо 3.3 Вт (Со 50 нм). Максимальная излучаемая мощность в эксперименте составила 1.6 мВт для многослойной структуры из плёнок 5 нм, в то время как для плёнки 50 нм всего 0.5 мВт. Эти результаты приближает применение эффекта спиновой инжекции током для создания генераторов ТГц диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.В.Гуляев, П.Е.Зильберман, Э.М.Эпштейн, Р.Дж. Элиот “Инжекция спинов током в магнитных переходах металл-металл” // РЭ, 2003, т.48,№9,с.1030 – 1044.
2. Ю.В.Гуляев, П.Е.Зильберман, С.Г.Чигарев “Спин-инжекционный генератор ТГц волн на основе металлических магнитных структур” // РЭ,2015,т. 60, № 5,с.1–7
3. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, И. В. Маликов,Г. М. Михайлов, А. И. Панас, С. Г. Чигарев, Э. М. Эпштейн “Инжекция спинов током и терагерцевое излучение в ферромагнитных переходах” // ДАН, 2011, том 438, № 1, с. 1–3
4. И.В. Антонец, Л.Н. Котов, С.В. Некипелов, Е.Н. Карпушнв “Проводящие и отражающие свойства тонких пленок” // ЖТФ. 2004.т.74. вып.11. с. 102-106.
5. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, С. Г. Чигарёв, Э. М. Эпштейн ”Спин-поляризованный ток в структуре стержень-пленка” // РЭ, 2010, том 55, № 10, с. 1211–1215.

Исследование нелинейных свойств высокодобротных оптических микрорезонаторов в области нормальной дисперсии

А.Е. Шитиков^{1,2}, Н.Г. Павлов^{1,2}, И.А. Биленко^{1,2}, М.Л. Городецкий^{1,2}

¹Российский Квантовый Центр, Сколково, Россия

²Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ShArtEv@gmail.com

Нелинейные эффекты в оптических диэлектрических микрорезонаторах с модами типа «шепчущей галереи» представляют большой интерес, поскольку могут использоваться для генерации «оптических гребенок», являющихся основой для создания эталонных источников оптических и радиочастот, генерации фемтосекундных импульсов [1].

Особый интерес представляет возможность генерации в области нормальной дисперсии нового класса солитонных импульсов – платиконов. Платиконы – диссипативные солитоны с плоской вершиной. В работе [2] было продемонстрировано, что генерация платиконов может вызываться амплитудной модуляцией с частотой равной межмодовому интервалу резонатора или бигармонической накачкой, двумя оптическими частотами с разницей равной межмодовому интервалу. С точки зрения преобразования энергии в энергию импульсов генерация платиконов является более эффективной нежели генерация солитонов, что важно во многих практических применениях, например, для радиофотонного СВЧ генератора [3].

В данной работе экспериментально продемонстрировано возникновение каскадного процесса генерации гребенок в микрорезонаторе диаметром 4 мм из флюорита магния при накачке на длине волны 1064 нм (область нормальной дисперсии групповых скоростей). Добротность мод превышала 10^9 , мощность накачки – 50 мВт, эффективность связи через призму до 30%. При использовании модулированной или бигармонической накачки такой процесс должен позволить формирование платиконов [4].

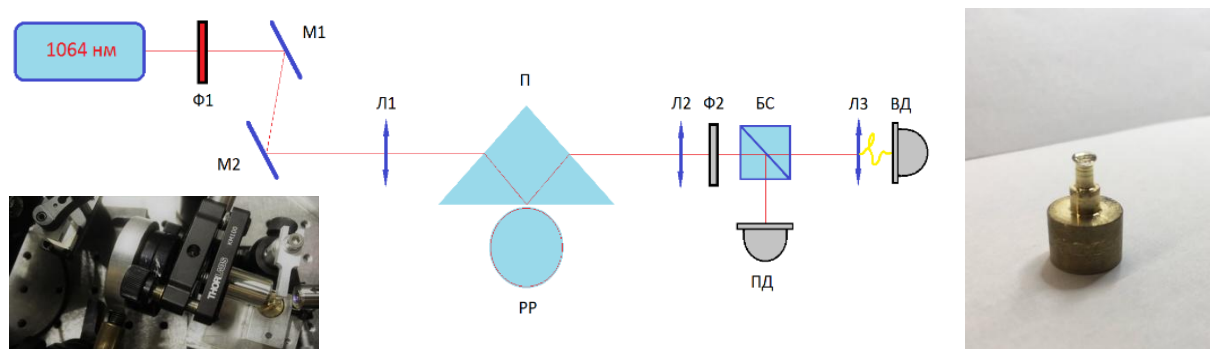


Рис. 1. Установка состоит из лазера 1064 нм, Ф1 – фильтр на 1064нм, М1 и М2 – юстировочные зеркала, Л1 – коллимирующая входная линза, П – прямоугольная равнобедренная стеклянная призма, Р – резонатор из MgF_2 $d = 4$ мм, Л2 – выходная линза, Ф2 – фильтр, БС – светоделитель 50:50, Л3 – линза для ввода в волокно, ВД – волоконный детектор, ПД – юстировочный детектор. Также представлен вид установки и микрорезонатор на латунном пьедестале.

В установке использовался лазер с длиной волны 1064 нм, мощность до 50 мВт. В лазере предусмотрено два канала управления частотой: пьезоэлектрический (диапазон перестройки до 100 МГц) и медленный – температурная перестройка в широких

пределах, достаточных для покрытия межмодового расстояния микрорезонаторов миллиметровых диаметров.

Был изготовлен микрорезонатор ручного точения из MgF_2 диаметром 4,0 мм, межмодовый интервал 8,5 ГГц. Входным коллиматором световой пучок фокусировался на грань равнобедренной прямоугольной призмы из стекла под оптимальным углом, с помощью пьезоподачи контролировалось расстояние между микрорезонатором и призмой, тонкой настройкой входного коллиматора возбуждались различные семейства мод. Выходное излучение из одного плеча светоделителя заводилось в волокно и подавалось на анализатор спектра, с другого – на юстировочный фотодетектор, подключенный к осциллографу.

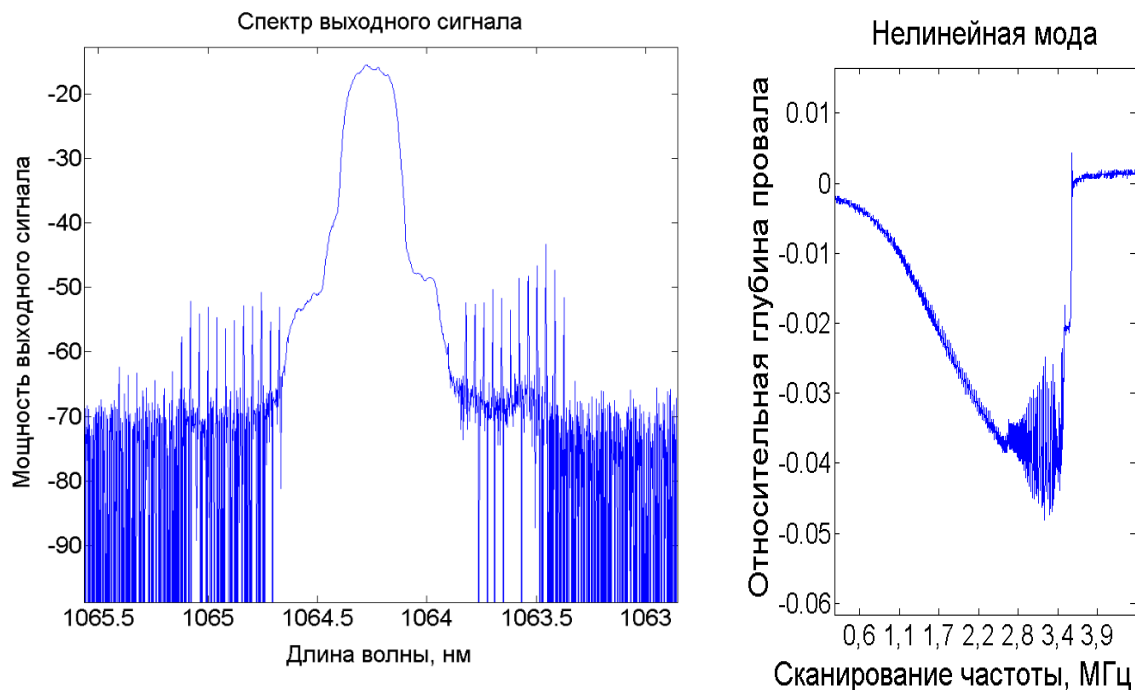


Рис. 2. Слева представлен спектр параметрической генерации «частотной гребенки». Справа представлен вид нелинейной моды, добротность 5×10^9 .

На рисунке 2 слева представлена «частотная гребенка», полученная на моде с добротностью 3×10^9 при циркулирующей энергии 13 мкДж. Хорошо различимы 12 эквидистантных пиков с каждой стороны в диапазоне 0,5 нм. Гребенка оставалась стабильной при уменьшении мощности накачки до 40 мВт. На рисунке 2 справа представлена нелинейная мода с зарождающейся солитонной ступенькой и областью нестабильности, на таких модах наблюдается параметрическая генерация.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность генерации оптической гребенки в микрорезонаторах в области нормальной дисперсии групповых скоростей и определены условия такой генерации. В дальнейшем планируется реализация модулированной и бигармонической накачки для возбуждения платиконов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Л. Городецкий “Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью” М.: Физматлит, 2011.
2. V.E. Lobanov et al. // EPL. 2015. V. 112. P. 54008.
3. X. Xue et al. // Laser Photon. Rev. 2017. V. 11. P. 1600276.
4. V.E. Lobanov et al. // Opt. Exp. 2015. V. 23. P. 7713.