

РАДИОФОТОНИКА

Электрооптический модулятор на основе микрорезонатора с модами шепчущей галереи	
<i>Н.Г. Павлов, Н.М. Кондратьев, А.С. Городницкий, М.Л. Городецкий</i>	2
Радиационное воздействие на акустооптический кристалл двуокиси теллура	
<i>И.Г. Притуленко, В.Б. Волошинов, В.А. Скуратов, В.Ф. Загоненко, Л.Н. Магдич, С.В. Митрофанов</i>	5
Особенности обеспечения лазерной безопасности в разработке лазерных оптико-электронных приборов	
<i>С.И. Пырикова</i>	9
Спин-инжекционный механизм генерирования электромагнитных колебаний ТГц диапазона	
<i>Ю.В. Гуляев, Е.А. Вилков, Г.М. Михайлов, С.Г. Чигарев</i>	10
Поглощение излучения терагерцового диапазона нелинейно-оптическими кристаллами $ZnGeP_2$	
<i>С.В. Чучупал</i>	12
Экспериментальное исследование радиотонного приемного канала на основе оптического гетеродинамирования в диапазоне частот порядка 10 ГГц	
<i>В.В. Валеев, В.В. Кулагин, В.А. Черепенин, С.М. Конторов, Д.А. Прохоров</i>	14
Математическое моделирование радиотонной системы аналого-цифрового преобразования, использующей растяжение сигнала по времени за счёт дисперсии	
<i>В.А. Небавский, Р.С. Стариков</i>	18
Экспресс метод биотестирования биологических эффектов действия нетеплового электромагнитного излучения миллиметрового диапазона	
<i>М.Г. Гапочка, А.П. Зарубина, Е.В. Соловьева</i>	20
Измерение разности оптических задержек между сердцевинами многосердцевинного световода интерференционным методом	
<i>М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов</i>	22

Электрооптический модулятор на основе микрорезонатора с модами шепчущей галереи

Н.Г. Павлов^{1,2}, Н.М. Кондратьев², А.С. Городницкий^{1,2}, М.Л. Городецкий^{2,3}

¹Московский физико-технический институт

²Российский квантовый центр

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
pavlov.mipt@gmail.com

Для микроволновых систем сотовой связи и других коммуникационных сетей требуются устройства, способные принимать, преобразовывать и обрабатывать сигналы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. Была разработана широкая гамма устройств с переносом радиочастотных и СВЧ сигналов в оптический диапазон с последующей их передачей и обработкой чисто оптическими методами [1]. При этом используется преимущество оптоволоконных каналов связи большой емкости, позволяющих передавать информацию с большой скоростью, малыми потерями и малым потреблением энергии. Электрооптические модуляторы, основанные на взаимодействии электромагнитных волн в высокодобротных нелинейных оптических резонаторах с модами шепчущей галереи, представляют перспективную платформу для такого рода устройств [2,3,4,5].

Модулятор представляет собой кольцевой микрополосок в котором в качестве диэлектрического слоя используется оптический микродиск, а роль электродов играет металлическое кольцо, нанесённое на край микродиска и цилиндрическая металлическая подставка [3]. Схематический вид модулятора показан на рис. 1. Лазерное излучение на длине волны 1550 нм через призму связи заводится в микрорезонатор. В качестве материала микрорезонатора использовался Z-срезанный ниобат лития с металлическим напылением верхней плоскости. На поверхности микрорезонатора располагается слой металла в виде колечка (это необходимо для максимального перекрытия оптического сигнала и радиочастоты). На данное колечко подается РЧ поле с частотой до 100 МГц, и на выходе детектируется уже модулированный сигнал.

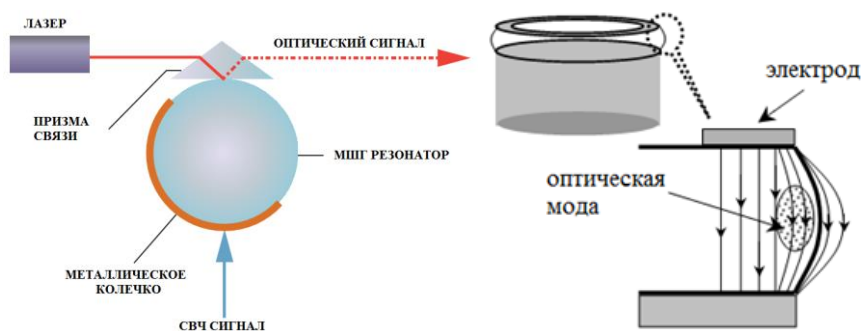


Рис. 1. Справа: схема электрооптического модулятора. Слева схема перекрытия оптического и радиочастотного полей.

Резонатор выполнен из электрооптического материала, так что приложение внешнего электрического поля будет приводить к изменению показателя преломления и сдвига резонансной частоты. Согласно [6,7], изменение частоты оптических мод под действием внешнего электрического поля:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{\int D_i^{WGM_p*} r_{ijk} E_k^{RF} D_j^{WGM} dV}{\epsilon_0 W^{WGM}} \quad (1)$$

где $\delta\omega$ сдвиг оптической сигнальной моды, ω – её исходная частота, D_j^{WGM} – компонента вектора электрического смещения сигнальной оптической моды, D_i^{WGM*} – комплексно сопряжённое поле накачки, $W^{WGM} = \int \epsilon_0^{-1} D_i^{WGM*} \epsilon_{ij}^{-1} D_j^{WGM} -$ полная энергия оптической сигнальной моды, r_{ijk} – электрооптический тензор.

Микрорезонаторы первично изготавливались из ниобата лития с помощью прецизионного станка алмазного точения (с точностью < 1 мкм). Затем вручную полировались алмазными суспензиями с величиной зерна $4 - 0.1$ мкм. На верхней плоскости микрорезонатора из напылённого слоя металла вырезалось колечко, к которому прикладывалось РЧ поле (рис.2).

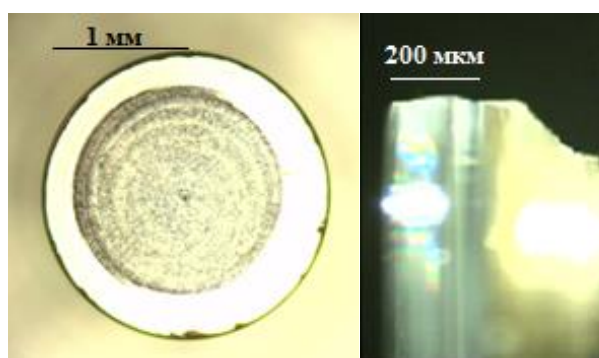


Рис. 2. Слева: вид сверху на микрорезонатор диаметром 2 мм и толщиной 200 мкм после полировки. Справа: боковая поверхность (выпуклость) микрорезонатора.

Толщина микрорезонатора влияет на самую главную характеристику модулятора – полуволновое напряжение. Приближённая формула

$$U_{\pi} \geq \frac{\pi H}{Q n^2 r}, \quad (2)$$

где n – показатель преломления для моды накачки ($n=n_z$ для ТЕ, $n=n_x$ для ТМ), r – электрооптический коэффициент накачки и сигнальной моды ($r=r_{33}$ в случае обеих ТЕ волн, $r=r_{13}$ в случае ТМ и $r=r_{42}$ в случае разных поляризаций). Так как в ниобате лития $r_{13}=9.6$ пм/В, $r_{33}=33$ пм/в, $r_{42}=31$ пм/в, использование ТЕ мод позволяет повысить эффективность модуляции более чем в 3 раза.

В нашем случае для микрорезонатора толщиной 200 мкм и при добротности порядка 10^7 величина полуволнового напряжения составляет $V_{\pi}=0.4$ В (для ТЕ поляризации МШГ). Эта величина была подтверждена в экспериментах.

На рис.3 изображен спектр мод вблизи длины волны 1550 нм в микрорезонаторе диаметром 2 мм и толщиной 200 мкм. Спектр получен при подаче выходного сигнала фотодетектора на осциллограф в режиме сканирования лазера накачки. Приложенное РЧ поле имеет частоту 50 МГц, поэтому в спектре мод появляются две боковые гармоники на частотах $\Omega \pm \omega$, что хорошо видно на рисунке.

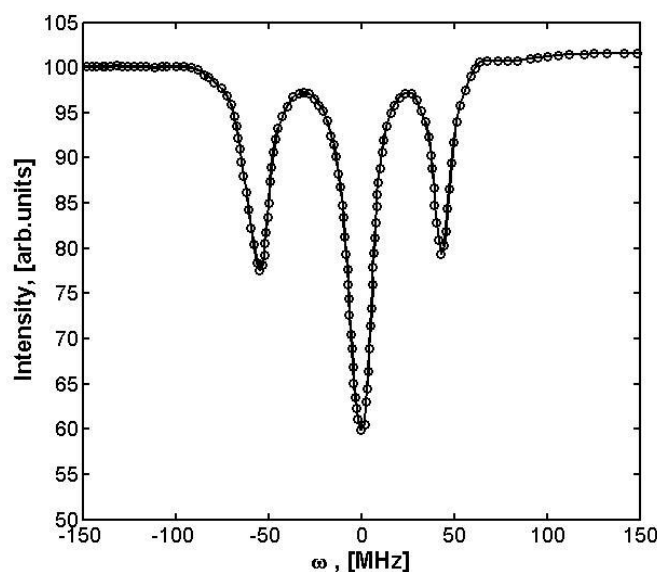


Рис. 3. Спектр мод микрорезонатора полученный путем сканирования частоты лазера при приложении РЧ сигнала на 50 МГц. Диаметр резонатора 2мм, толщина 200 мкм.

В данной работе мы представляем методику создания и испытания электрооптического модулятора на основе микрорезонатора с модами шепчущей галереи (МШГ). Максимальная добротность МШГ, полученная в эксперименте составляет до 10^8 . Экспериментально получена и исследована модуляция оптического сигнала на радиочастотах до 100 МГц. Измеренное полуволновое напряжение составило 1 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. L. Wootenидр. *A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems* // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, №6, Выпуск 1, с. 69-82, 2000.
2. Hossein-Zadeh M. Photonic microwave receivers based on high-Q optical resonance // Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV: Proceedings of SPIE, Том 8236. — San Francisco, CA. — с. 82360T1-10, 2012.
3. D. A. Cohen, M. Hossein-Zadeh and A. F. J. Levi, "Microphotonic modulator for microwave receiver," Electronics Letters, vol. 37, pp. 300-301, 2001.
4. L. Maleki, A. F. J. Levi, S. Yao and V. S. Ilchenko, "Light modulation in whispering-gallery mode resonators". // USA Patent US 6473218 B1, 2002.
5. V. S. Ilchenko, A. B. Matsko, I. Solomatine, A. A. Savchenkov, D. Seidel и L. Maleki, Ka-band all-resonant photonic microwave receiver. // IEEE Photonics Technology Letters , vol. 20, № 19, pp. 1600-1602, 2008.
6. Н. М. Кондратьев, М. Л. Городецкий, Электрооптическое взаимодействие в резонаторах с модами шепчущей галереи и СВЧ модуляторы на его основе. // Журнал Радиоэлектроники, №11, 2012.
7. N. G. Pavlov, N. M. Kondratyev, and M. L. Gorodetsky, Modeling the whispering gallery microresonator based optical modulator. // Applied Optics, Vol. 54, Issue 35, pp. 10460-10466, 2015.

Радиационное воздействие на акустооптический кристалл двуокиси теллура

И.Г. Притуленко¹, В.Б. Волошинов¹, В.А. Скуратов², В.Ф. Загоненко², Л.Н. Магдич³,
С.В. Митрофанов²

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва, Россия*

²*Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Московская область, Россия*

³*НИИ “Полюс” им М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия
email: priylenco@mail.ru*

Представлены результаты *in-situ* и послерадиационных исследований воздействия облучения электронами с энергией 5 МэВ на оптические характеристики акустооптического монокристалла диоксида теллура. Измерены спектры пропускания и поглощения кристалла парателлурита в зависимости от поглощенной дозы от времени облучения образцов (дозы облучения). Установлена дозовая зависимость интенсивности проходящего через кристалл света с длиной волны 357 нм в процессе электронного облучения.

В настоящее время акустооптические устройства (АО) находят широкое применение в современной оптике, оптоэлектронике, спектроскопии и лазерной технике [1-5]. Данные приборы позволяют управлять основными параметрами оптического излучения, такими как амплитуда, частота, фаза и поляризация света. Простота конструкции, малые габариты и отсутствие подвижных деталей обеспечили возможности применения АО устройств в аэрокосмической и специальной технике [2-5]. Очевидно, что, находясь на борту космического аппарата, АО приборы могут подвергаться продолжительному воздействию радиационных потоков, которые влияют на физические параметры кристаллов, например, на оптическое пропускание, величины показателей преломления или кристаллическую структуру материала. К сожалению, влияние радиации на параметры АО кристаллов на данный момент изучено недостаточно полно. Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния одного из видов излучения на оптические параметры наиболее распространенного материала акустооптики - кристалла парателлурита [1, 3-6].

При проведении исследования измерялось оптическое пропускание и поглощение света в парателлурите в диапазоне длин волн от 330 до 900 нм. Также была определена зависимость интенсивности света с длиной волны 357 нм, проходящего через кристалл, от времени облучения образцов, или дозы облучения в режиме реального времени. Для этого пучок электронов с энергией 5 МэВ, излучаемый микротроном МТ-25 ЛЯР ОИЯИ, выведенный на воздух, проходил через диафрагму диаметром 5 мм и попадал на образец TeO_2 . Кристалл, вырезанный в виде пластинки с размерами $10 \times 10 \times 1$ мм, устанавливался под углом 45 градусов к оси пучка электронов. Интенсивность лазерного излучения, проходящего через облучаемую часть образца, регистрировалась спектрометром ShamrockSR-303i. В качестве приемника излучения в спектрометре использовалась ПЗС-матрица ANDOR, охлаждаемая микрохолодильником Пельтье.

Во время эксперимента образец крепился углеродным скотчем к медному держателю, охлаждаемому водой. Кроме этого, вся мишенная сборка обдувалась потоком воздуха для охлаждения. Температура кристалла контролировалась с помощью термопары медь-константан, приклеенной к обратной стороне образца парателлурита.

С учетом наклона образца его эффективная толщина составляла 1.41 мм. Поэтому электроны с энергией 5 МэВ, пробег которых в TeO_2 составляет 1.01 мм, не проникали через

исследуемый образец. После калибровки плотность потока электронов определялась по току пучка на фольге, разделяющей вакуумную камеру ускорителя и атмосферу. Калибровка проводилась по току, измеряемому с помощью цилиндра Фарадея, который был расположен за изучаемым кристаллом.

На Рис. 1 представлены результаты измерения интенсивности излучения на длине волны 357 нм в зависимости от флюенса электронов, поглощенной дозы, а также значения плотности потока электронов. Как следует из приведенных данных, наибольшее изменение в пропускании света наблюдалось в начальный момент облучения, что в значительной степени связано с ростом температуры кристалла [3]. На этой стадии эксперимента не представлялось возможным разделить вклады температуры и воздействия электронов на оптические параметры кристалла парателлурита. Это было обусловлено сложностью определения локального изменения температуры в облучаемой области.

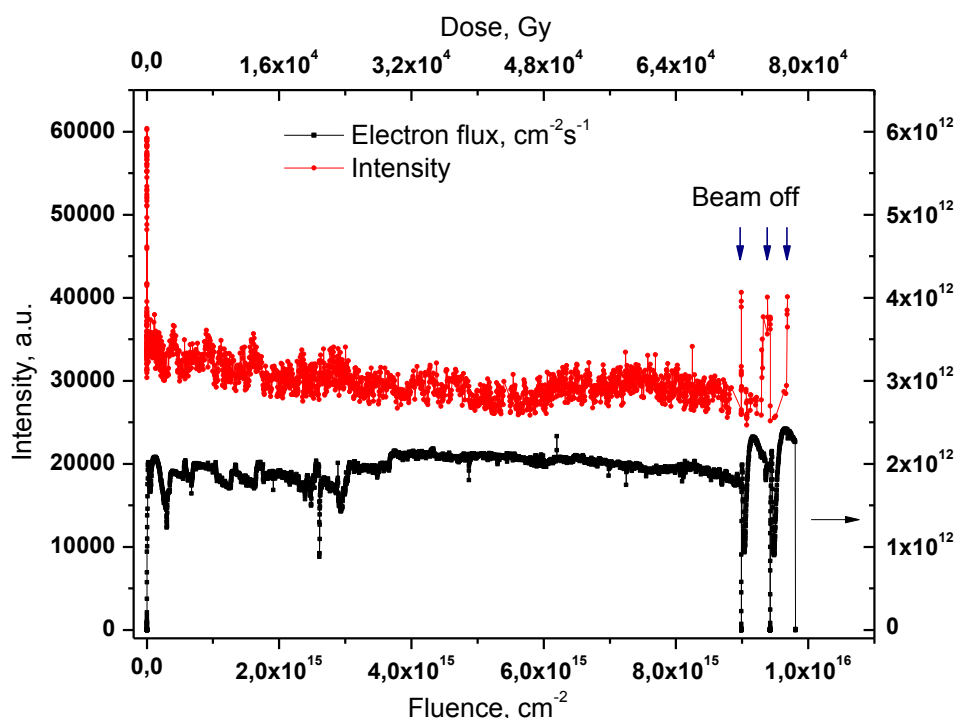


Рис. 1. Дозовая зависимость интенсивности излучения при облучении электронами с энергией 5 МэВ

Эксперимент показал, что температура облучаемой мишени не превышала 48°C. В тоже время, вклад радиации в оптическое поглощение мог быть с достаточно хорошей точностью установлен при более высоких флюенсах электронов. С другой стороны, выключение пучка электронов (на рисунке отмечено стрелками с надписью “Beamoff”) на время, достаточное для охлаждения мишени, приводило к росту интенсивности прошедшего света, однако до уровня, значительно меньшего исходного. Очевидно, что отношение интенсивностей излучения до и после включения пучка электронов может являться параметром, определяющим степень радиационного воздействия электронов на кристалл. Согласно данным, приведенным на Рис. 1, этот параметр составляет величину порядка 30% для флюенса $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

При исследовании кристалла парателлурита представляло интерес определение коэффициента оптического пропускания в первые минуты облучения образца. Зависимость

интенсивности прошедшего через кристалл света от времени облучения, ограниченного 80 секундами, приведена на Рис. 2. Из рисунка видно, что через 10-15 секунд происходил рост интенсивности света, связанный с нагревом парателлуриата, а затем наблюдалось падение интенсивности приблизительно в 2 раза. После 50 секунд облучения интенсивность прошедшего через кристалл света менялась незначительно.

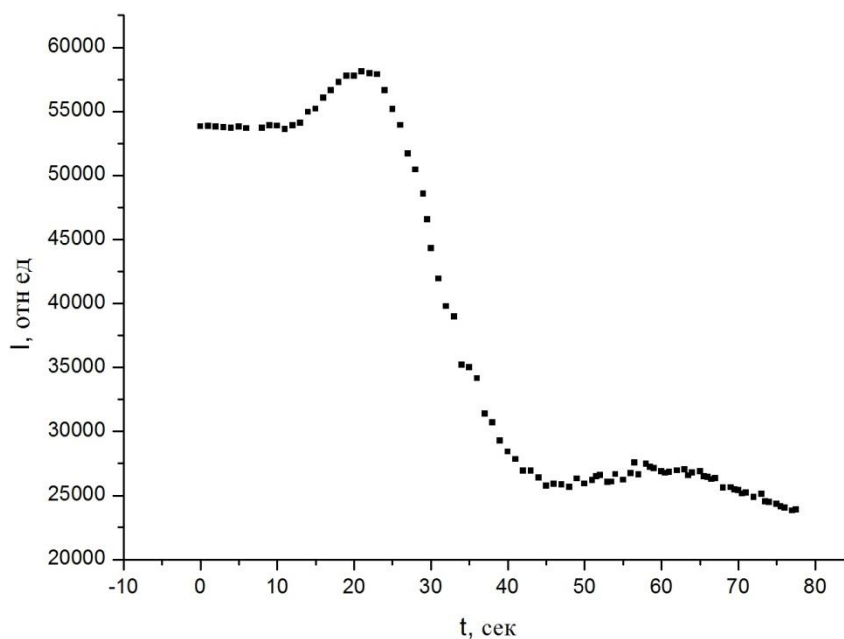


Рис. 2. Временная зависимость интенсивности проходящего света в первые минуты облучения

На Рис. 3 представлена зависимость коэффициента поглощения оптического излучения от длины волны света до и после облучения парателлуриата. Из рисунка видна разница в полученных результатах. Оказалось, что образец после облучения оказался менее прозрачным в диапазоне длин волн от 320 – 500 нм, близком к краю полосы пропускания кристалла. С другой стороны, заметных изменений в оптическом пропускании на длинах волн свыше 500 нм не наблюдалось.

В результате проведенных измерений был сделан вывод о том, что оптические характеристики кристалла парателлуриата, как и ожидалось, зависели от поглощенной дозы. Особенно сильно подобная зависимость проявлялась на коротких длинах волн вблизи края полосы пропускания образца двуокиси теллура, т.е. при длинах волн 325-335 нм. На длинах волн от 335 нм до 350 нм оптическое пропускание возрастало менее быстро. Наконец, в диапазоне длин волн света от 350 – 500 нм изменения пропускания были не столь заметными. Данный результат имеет важное прикладное значение. Зарегистрированные зависимости коэффициентов пропускания и поглощения света от времени облучения и температуры исследуемых образцов следует учитывать при разработке новых модификаций акустооптических приборов. В первую очередь, к таким приборам относятся перестраиваемые акустооптические фильтры на кристалле парателлуриата, разрабатываемые для аэрокосмических и иных применений, предназначенные для анализа оптических изображений в ультрафиолетовом и видимом диапазоне длин волн электромагнитного спектра.

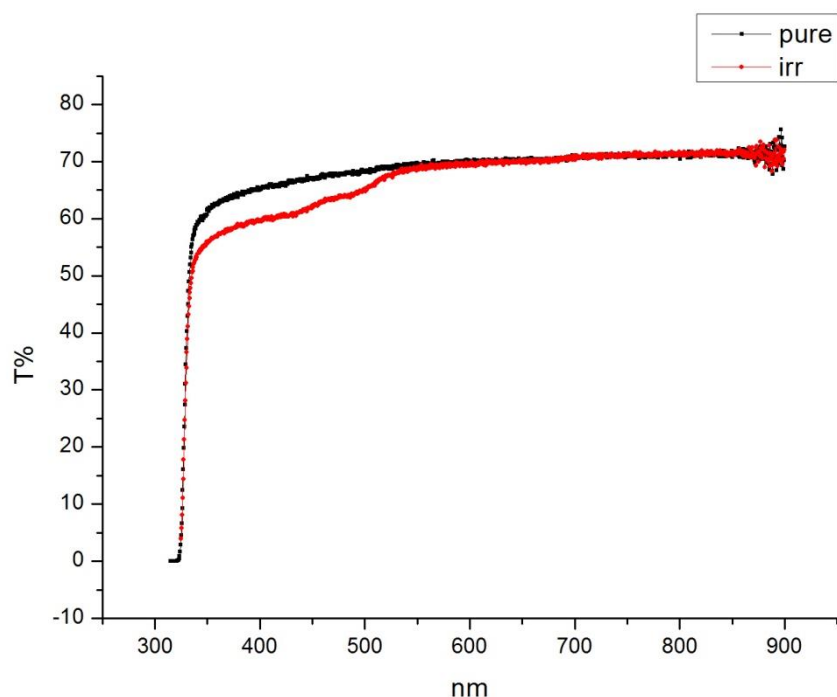


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания оптического излучения от длины волны света до (черная линия) и после (красная линия) облучения пучком электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Gupta, V.B. Voloshinov. *Applied Optics*. V. 46. P. 1081.
2. N. Gupta, V.B. Voloshinov, G.A. Knyazev, L.A. Kulakova. *Journal of Optics*. 2011. No14. P. 035502
3. S.N. Mantsevich, O.I. Korablev, Yu.K. Kalinnikov, A.Yu. Ivanov, A.V. Kiselev. *Ultrasonics*. 2015. V. 59. P. 50.
4. E. Dekemper, J. Vanhamel, B. Van Opstal, D. Fussen, V.B. Voloshinov. *Journal of Optics*. 2015. V. 17. P. 075404.
5. E. Dekemper, D. Fussen, D. Pieroux, J. Vanhamel, B. Van Opstal, F. Vanhellefont, N. Mateshvili, G. Franssens, V.B. Voloshinov, C. Janssen, H. Elandaloussi. *Proc. SPIE.9241, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVIII*. 2014. V. 9241. P. 92410L
6. T.V. Yukhnevich. V.B. Voloshinov, I.G. Pritulenko. *Acta Physica Polonica A*. 2015. V. 127. No 1. P. 78.

Особенности обеспечения лазерной безопасности в разработке лазерных оптико-электронных приборов

С.И. Пырикова

АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН»

Федеральный центр науки и высоких технологий

Специальное научно-производственное объединение «ЭЛЕРОН»

115563 Москва, ул. Генерала Белова, д. 14, 8-499-725-04-10

Работа посвящена созданию алгоритма и программы расчета предельно допустимых уровней (ПДУ) лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов.

Оценка воздействия лазерного излучения на организм человека предусматривает определение класса опасности лазеров и лазерного излучения с учетом зависимостей коэффициентов поглощения биотканей от длины волны.

Разработка лазерных оптико-электронных приборов требует соблюдение норм лазерной безопасности (1,2) при взаимодействии специалистов с прямым, зеркальным и диффузно-отраженным лазерным излучением в стационарных и полевых условиях с учетом уровня освещенности или фона (день, ночь, сумерки).

В современных оптико-электронных системах охраны периметра для целей наведения и измерения применяются лазеры видимого и ИК-диапазонов, первого и второго классов опасности. По стандарту ANSIZ существует 11 специальных мер безопасности.

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются энергетическая экспозиция и облученность, энергия и мощность излучения, усредненные по ограничивающей апертуре.

Выбор защитных фильтров производится по длине волны лазерного излучения и оптической плотности светофильтра

В докладе будет представлено описание, алгоритм и программа расчета предельно-допустимых уровней лазерного излучения; результаты работы программы на примерах расчета ПДУ и выбора индивидуальных защитных фильтров.

ЛИТЕРАТУРА

1. СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.
2. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – М.: Стандартинформ, 2013.

Спин-инжекционный механизм генерирования электромагнитных колебаний ТГц диапазона

Ю.В. Гуляев¹, Е.А. Вилков¹, Г.М. Михайлов², С.Г. Чигарев¹

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

² Институт проблем точной механики РАН (г. Черноголовка)

chig50@mail.ru

Спин-инжекционная ТГц электроника возникла и развивается в рамках нового раздела электроники - СПИНТРОНИКА. Эффекты, исследуемые спинтроникой, наблюдаются в особой структуре - магнитном переходе, образованном двумя магнитными слоями. При прохождении тока сквозь магнитный переход (перпендикулярно к плоскости слоев) в одном из магнитных слоев (инжекторе) происходит упорядочение спинов по направлению его намагниченности (спиновая поляризация) во втором, рабочем слое, происходит взаимодействие спинового потока с намагниченностью этого слоя. Следствием такого взаимодействия могут быть различные эффекты, в том числе и возбуждение электромагнитных колебаний. Ниже рассматривается только этот процесс.

В настоящее время различают два механизма взаимодействия спинового потока с намагниченностью рабочей области: крутильный механизм или механизм Сланчевского-Берже [1, 2] и спин-инжекционный механизм [3]. Первый механизм наблюдается в непосредственной близости к границе раздела слоев на расстоянии ~ 1 нм. Он имеет поверхностный характер и связан с изменением направления спина, так что спины ориентируются параллельно или антипараллельно намагниченности рабочего слоя. Наблюдаемая при этом прецессия спинов приводит к генерации электромагнитных колебаний ТГц диапазона мощностью менее 1 мкВт. Коллинеарность спинов относительно намагниченности рабочего слоя сохраняется в течении времени спиновой релаксации ($\tau \sim 10^{-13}$ сек), на длине спиновой релаксации l . Для ферромагнетиков это десятки нанометров. Таким образом, наблюдается инжекция спинов током из инжектора в рабочую область. Сохранение спинового состояния инжектируемого потока происходит при одновременном изменении его энергии и импульса. Последнее происходит из-за различия магнитного состояния рабочего слоя и инжектора. При этом наблюдается ряд эффектов, обеспечивающих генерацию электромагнитных колебаний ТГц диапазона. Это

- транспорт спинов свободными электронами из одного магнитного слоя перехода (инжектора) в другой - рабочий слой [3];
- нарушение в рабочем слое равновесного спинового состояния с образованием в спиновых подзонах квазиуровней Ферми [3];
- возникновение условий для инверсной заселенности спин-энергетических подзон [3];
- межподзонные излучательные квантовые переходы с sd - обменным взаимодействием [4].

Особо ценно то, что для генерирования ТГц сигналов в спин-инжекционных генераторах не требуется ни внешнего магнитного поля, ни создания особых температурных условий. Это объясняется использованием в них нормальных ферромагнитных или антиферромагнитных металлов.

Спиновый поток поступающий из инжектора приводит к появлению в рабочей области неравновесной спиновой поляризации. $\Delta P(x) = P(x) - \bar{P}$, которая описывается уравнением

$$\frac{d^2 \Delta P}{dx^2} - \frac{j}{j_D l} \frac{d \Delta P}{dx} - \frac{\Delta P}{l^2} = 0 \quad (1)$$

Здесь $P(x)$ текущее значение равновесной спиновой поляризации, \bar{P} – равновесная спиновая поляризация рабочей области, $j_D = \frac{enD}{l} = \frac{enl}{\tau}$ – плотность тока диффузии электронов, τ – время релаксации спинов, D – коэффициент спиновой диффузии, j – плотность рабочего тока. Решение этого уравнения [5]

$$\Delta P = \frac{P_1 \cos \varphi - P_2}{j - j_D \lambda_1 l} j e^{\lambda_1 x} \quad (2)$$

Здесь φ – угол между осями квантования инжектора и рабочей области, λ_1 – решение соответствующего характеристического уравнения. При $\frac{j}{j_D} \ll 1$ – $\lambda_1 = \frac{1}{l}$, при $j \gg j_D$ – $\lambda_1 = 0$. Величина ΔP – определяет энергии квазиуровней Ферми, разность которых соответствует максимальной частоте генерируемых колебаний.

По принципу действия спин-инжекционные генераторы можно отнести к квантовым генераторам с токовой накачкой. К настоящему времени в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН совместно с ИПТМ РАН разработаны, созданы и экспериментально исследованы несколько разновидностей спин-инжекционных ТГц генераторов, работающих в диапазоне частот 7 - 35 ТГц с мощностью генерируемых колебаний, подаваемых в нагрузку, до 0,5 мВт. В докладе приводятся конструкции следующих генераторов с краткой характеристикой их рабочих параметров: генератор с магнитным переходом типа «стержень-пленка», генератор с двухштыревым магнитным переходом, генератор с резонатором типа Фабри-Перо, генератор с магнитным переходом типа «двухслойная структура – медный стержень», генератор с планарной структурой типа «метaperеход».

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантами РФФИ №№ 13-02-12427, 13-07-00259-а, 15-07-03907.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.C. Slangzewski // J. Magn. Mater. V.159. №1. p.L1., 1996.
2. L. Berger. // Phys.Rev. V. 54. №13. p.9353., 1996
3. Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, Э.М. Эпштейн, Р. Дж. Элиот. // РЭ, т.48, №9, с.1030 – 1044, 2003.
4. A.Kadigrobov, R.I Shekhter., M. Jonson // Fisika Nizkikh Temperater. V.31. p.463 – 470, 2005.
5. Ю.В. Гуляев, Е.А. Вилков, Г.М. Михайлов, С.А. Никитов, С.Г. Чигарев // РЭ, 2016.

Поглощение излучения терагерцового диапазона нелинейно-оптическими кристаллами $ZnGeP_2$

С.В. Чучупал

ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

MirrorMan@yandex.ru

Методами ЛОВ- и ИК-спектроскопии выполнено экспериментальное исследование механизмов, ответственных за поглощение электромагнитных волн терагерцового (ТГц) диапазона в нелинейно-оптическом монокристалле $ZnGeP_2$, в широком частотном ($5 - 5000 \text{ см}^{-1}$) и температурном диапазонах (10–300 К).

Активно проводящиеся фундаментальные и прикладные исследования, направленные на освоение ТГц-интервала частот (10^{11} – 10^{13} Гц), стимулировали работу над созданием новых, в частности, твердотельных источников ТГц-излучения. $ZnGeP_2$ является перспективным материалом для генерации ТГц-волн. В данном кристалле реализуется монохроматическое излучение (2,7–2,94 ТГц) мощностью ~ 1 Вт на разностной частоте при накачке двухчастотным лазерным излучением и возбуждение широкополосного ТГц-излучения (0,1–3 ТГц) фемтосекундными лазерными импульсами.

Мощность генерируемого ТГц-излучения определяется как эффективностью нелинейно-оптического преобразования излучения, так и поглощением этого излучения в частотной области накачки и генерации. Для минимизации несобственных механизмов поглощения, в частности, применяется облучение кристалла электронами. Варьируя условия воздействия на образец $ZnGeP_2$, удалось эффективно (в 3–5 раз) уменьшить поглощение излучения накачки в диапазоне 2–8 мкм [1]. Были выбраны следующие оптимальные параметры облучения: энергия электронов — 4 МэВ, доза — $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Возникающие при облучении кристалла точечные дефекты сами могут являться источником дополнительного поглощения излучения ТГц-диапазона, если они образуют дипольный момент, взаимодействующий с данным излучением [2], [3].

Экспериментальные спектры пропускания и отражения были получены методами ИК-Фурье-спектроскопии и монохроматической ЛОВ-спектроскопии. Моделирование спектров и определение параметров дипольных колебаний выполнены с применением трёхпараметрической аддитивной модели гармонических осцилляторов Друде — Лоренца. Калибровочные СБММ-данные, полученные в области высокой прозрачности образца, определены по формулам Френеля.

Путём сравнения модельных спектров пропускания фононного отклика и экспериментальных данных выявлено наличие дополнительных механизмов дипольного поглощения ТГц-волн. Было высказано предположение [4], что поглощение излучения ТГц-диапазона в кристалле $ZnGeP_2$ вызвано проводимостью друдевского типа. Расчёт спектра динамической проводимости по модели Друде показал, что вклад статической проводимости на уровне 10^{-6} – $10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ меньше вклада фононных резонансов на 2–4 порядка.

Аддитивность модели Друде — Лоренца при обработке спектров пропускания и отражения широкодиапазонных температурных измерений позволила выделить фононный вклад. Фононные механизмы характеризуются уменьшением затухания при неизменности диэлектрического вклада при охлаждении от 300 до 100 К. Собственные частоты всех модельных осцилляторов при этом остаются практически без изменений. Данный подход позволил проследить линейное снижение диэлектрических вкладов осцилляторов, описывающих дополнительные механизмы поглощения ТГц-излучения, при понижении температуры. На основании этого механизмы дополнительного поглощения ТГц-волн объясняются в рамках модели двухфононных разностных процессов [5], [6]. При

температурах ниже 100 К величины диэлектрических вкладов меняются слабо, и изменение находится в пределах экспериментальной погрешности.

Было выявлено, что эффективное снижение поглощения излучения ТГц-диапазона происходит при охлаждении образца до температуры 80–100 К. При дальнейшем снижении температуры остаточное поглощение не изменяется.

Сравнение данных для облучённого и необлучённого образцов показало, что облучение кристалла ZnGeP_2 электронами с энергией 4 МэВ и дозой $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к понижению диэлектрической проницаемости на 3% в ТГц-диапазоне. При этом уровень поглощения ТГц-излучения в пределах погрешности эксперимента не изменяется. Это указывает на то, что снижение ϵ' вызвано изменением вклада в диэлектрическую проницаемость на более высоких частотах, которое не оказывает влияния на поглощение волн ТГц-диапазона.

На рис. 1 приведены рассчитанные спектры коэффициента поглощения при 10 и 300 К по полному набору дисперсионных параметров кристалла с учётом однофононного и многофононного поглощения.

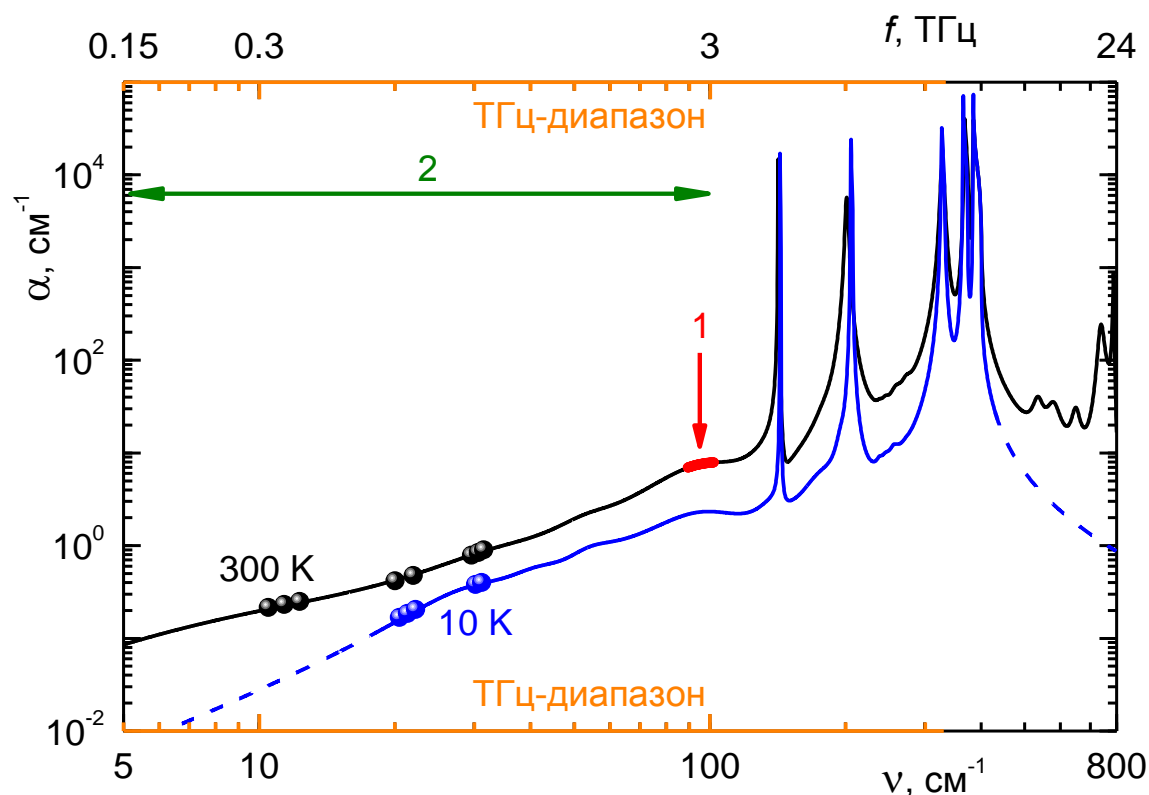


Рис. 1. Спектр коэффициента поглощения монокристалла ZnGeP_2 в поляризации $E_{\perp c}$, где крупные символы — калибровочные данные СБММ измерений, 1 — область реализованной генерации монохроматического сигнала, 2 — область реализованной генерации широкополосного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.I. Gribenyukov et al. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 2003, V. 744, P. M5.40.1.
2. А.И. Ритус и др. // ЖЭТФ, 2008, Т. 133, № 2, С. 380.
3. А.И. Ритус, В.Б. Анзин, А.А. Волков // ЖЭТФ, 2008, Т. 134, № 3(9), С. 567.
4. В.В. Войцеховский и др. // ФТТ, 1995, Т. 37, № 7, С. 2199.
5. R. Stolen, K. Dransfeld // Phys. Rev. A, 1965, V. 139, No. 4, P. 1295.
6. M. Sparks, D.F. King, D.L. Mills // Phys. Rev. B, 1982, V. 26. No. 12, P. 6987.

Экспериментальное исследование радиотонного приемного канала на основе оптического гетеродина в диапазоне частот порядка 10 ГГц

В.В. Валуев¹, В.В. Кулагин^{1,2,3}, В.А. Черепенин³, С.М. Конторов¹, Д.А. Прохоров¹

¹ЗАО «РТИ-Радио»

²Государственный астрономический институт им. П.К.Штенберга

³Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

victorvkulagin@yandex.ru, skontorov@rti-r.ru, dprokhorov@rti-r.ru

Исследование посвящено разработке радиотонного приемного канала на основе метода оптического гетеродина. Использование фотонных технологий в радиотехнических, в частности, радиолокационных, системах позволяет добиться целого ряда преимуществ:

- низкие потери при передаче сигнала независимо от частоты модуляции;
- широкая полоса аналоговых линий связи – от единиц МГц до 10 ГГц (в перспективе – более 100ГГц),
- высокая достоверность передачи информации – до 10^{-12} ош/бит;
- малые поперечные размеры и масса кабелей (в 100-1000 раз лучше коаксиалов и волноводов);
- нечувствительность к внешним помехам и ЭМИ;
- высокая стабильность фазовой длины (в 15-20 раз лучше коаксиальных линий);
- высокая надежность и долговечность;
- отсутствие излучения через оболочку световода (внутренняя ЭМС);
- низкая стоимость.

Современные тенденции развития приемных устройств РЛС связаны с бурным прогрессом аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и вычислительных возможностей компьютерных систем. Очевидным подходом при их использовании в приемниках РЛС СВЧ диапазона является преобразование входного сигнала в цифровой вид уже на начальных стадиях обработки, причем дальнейшая обработка осуществляется уже только для цифрового сигнала. Однако такая стратегия встречает существенные трудности при увеличении несущей частоты входного сигнала. Действительно, при несущей частоте порядка 30-40 ГГц частота оцифровки должна быть как минимум в два раза выше, что представляет значительные трудности для электронных АЦП. Выходом может быть использование радиотонных систем оцифровки сигнала [1].

Ключевым моментом построения радиотонного приемного канала является разработка оптоэлектронной схемы преобразования СВЧ сигнала на промежуточную частоту, после чего сигнал уже может быть оцифрован с достаточной степенью точности коммерческими электронными АЦП. В перспективе предполагается создание полностью радиотонного приемного канала с цифровым выходом, включающего диэлектрический антенно-приемный модуль [2,3], одноканальный (или многоканальный) оптический гетеродин, электронные АЦП и компьютерный блок обработки, а также, возможно, и оптоэлектронный генератор СВЧ несущей [4,5], что обеспечит выдающиеся шумовые и электрические характеристики, существенное повышение помехозащищенности и снижение массо-габаритных характеристик всей установки. Существенное значение для обработки широкополосных сигналов имеет сохранение фазовой информации и малые нелинейности преобразования, что позволит использовать в том числе и когерентный прием в радиолокационных приемниках.

Одним из наиболее перспективных подходов является использование симметричной двухплечевой схемы построения радиофотонной реализации когерентного приемного канала, например, по схеме, представленной на рис. 1.

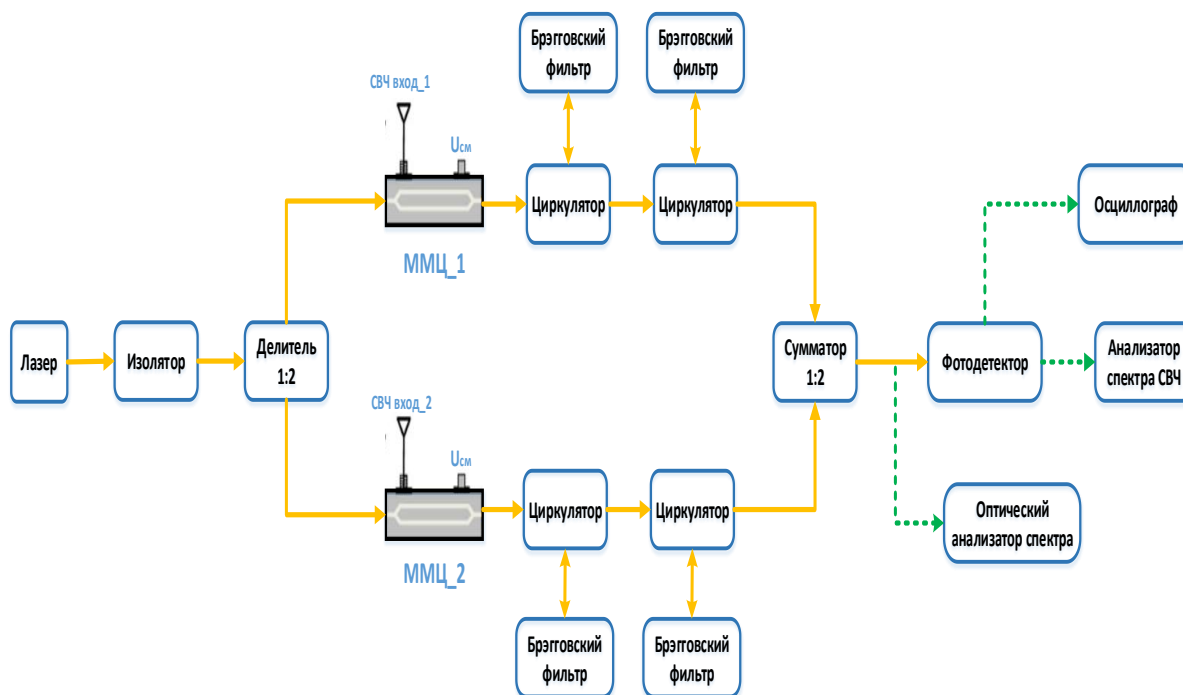


Рис. 1. Схемная реализация радиофотонного приемного тракта методом оптического гетеродина с использованием брэгговских фильтров

В качестве источника высокостабильного оптического излучения использовался непрерывный стабилизированный лазер на длине волны 1550 нм, а также амплитудные модуляторы (электрооптические модуляторы Маха-Цандера) и узкополосные оптические брэгговские фильтры для преобразования радиолокационного сигнала в диапазон низких частот. В результате амплитудной модуляции оптической волны СВЧ-сигналом формируются боковые полосы, содержащие полезный сигнал (рис. 2).

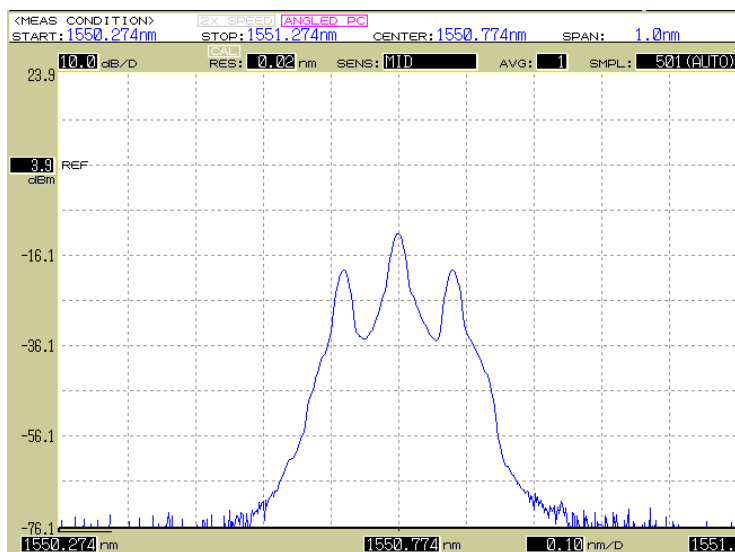


Рис. 2. Оптический сигнал, промодулированный СВЧ сигналом на выходе модулятора Маха-Цандера

Оптическая несущая и одна из боковых полос подавляются с помощью оптических полосовых фильтров. Фильтрация может быть осуществлена как с помощью сферических или тороидальных микрорезонаторных фильтров [6,7], так и с помощью волоконных брегговских фильтров, которые обеспечивают полосы пропускания шириной от десятков мегагерц и более [8]. Для создания оптического опорного сигнала, используемого для гетеродинирования, часть лазерного луча модулируется во втором модуляторе по амплитуде СВЧ сигналом, близким по частоте к частоте несущей СВЧ, и также фильтруется для подавления оптической несущей и одной из боковых полос [9]. После этого оптические сигналы, содержащие принимаемый сигнал и сигнал СВЧ несущей, могут быть протестированы фотоприемником и оцифрованы медленным электронным АЦП.

В случае гетеродинной обработки сигнала частота оптической моды смещена относительно полосы фильтра, выделяющего оптический сигнал с СВЧ модуляцией, на требуемую величину. Гетеродинный метод позволяет сохранять фазовую информацию СВЧ сигнала при использовании только одного опорного сигнала.

Результаты оптического гетеродинирования после сложения оптических сигналов с выходов брегговских фильтров представлены на рис.3.

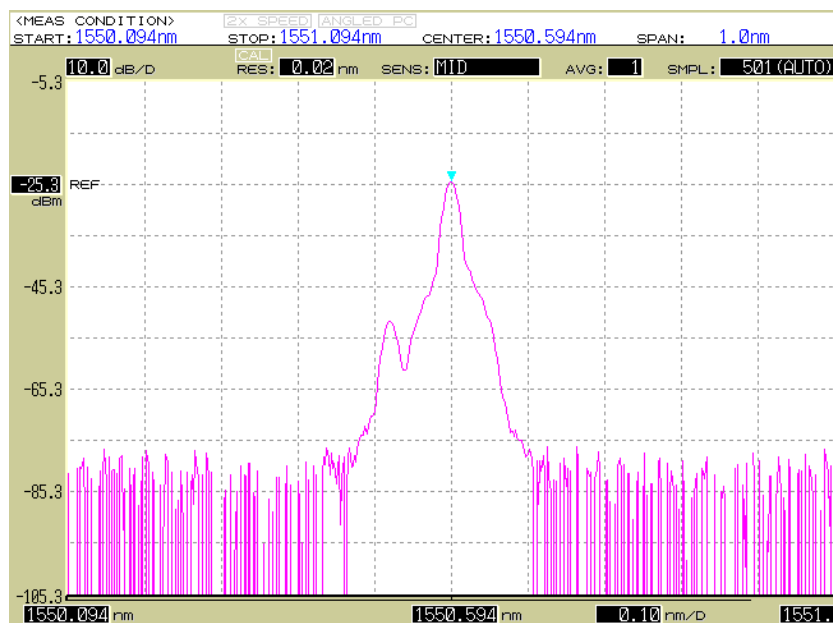


Рис. 3. Спектрограмма оптического сигнала на выходе сумматора, с оптическими фильтрами ($\lambda=1550,59\text{нм}$), при мощности лазера $P_{\text{опт}}=+16\text{дБм}$, длине волны $\lambda=1550,51\text{нм}$ (смещена на 10ГГц относительно брегговских фильтров), мощности СВЧ сигнала ММЦ_1 $=+20\text{дБм}$ (10ГГц x 100кГц), мощности СВЧ сигнала ММЦ_2 $=+10,0\text{дБм}$ (9ГГц).

Результаты оптического гетеродинирования на выходе фотодетектора на промежуточной частоте 1 ГГц представлены на рис.4. Здесь высокочастотный радиолокационный сигнал 10 ГГц модулировался низкочастотным сигналом 100 кГц и подавался на первый модулятор Маха-Цандера (ММЦ_1), на второй модулятор (ММЦ_2) подавался опорный высокочастотный сигнал 9 ГГц. Выходной сигнал на частоте 1 ГГц обладает высокой стабильностью, а соотношение сигнал/шум составляет более 50 дБ.

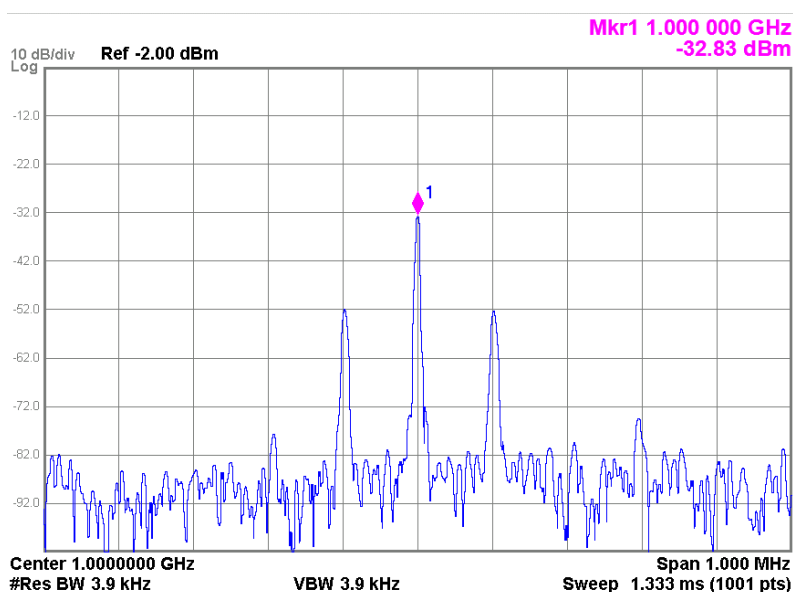


Рис. 4. Спектрограмма выходного РЧ сигнала гетеродина с оптическими фильтрами при мощности лазера $P_{\text{опт.}} = +16$ дБм, длине волны $\lambda = 1550,51$ нм (смещена на 10 ГГц относительно брэгговских фильтров), мощности СВЧ сигнала ММЦ_1 $= +20$ дБм (10 ГГц \times 100 кГц, глубина модуляции 30%), мощности СВЧ сигнала ММЦ_2 $= +11,5$ дБм (9 ГГц).

Выводы: применение метода оптического гетеродинирования позволяет преобразовать принимаемый широкополосный СВЧ сигнал на промежуточную частоту с сохранением информации о фазе сигнала и с высоким соотношением сигнал/шум для дальнейшего оцифровывания низкочастотными коммерческими АЦП. В перспективе возможно переходить на интегральное исполнение радиопотонного приемного тракта (рис.2) для уменьшения массо-габаритных характеристик, увеличения стабильности системы и улучшения спектральных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Richard W. Ridgway, Microwave Photonics Programs at DARPA.
2. George C. Valley, Optics Express, vol. 15, pp. 1955–1982 (2007).
3. A. S. Bhushan, IEEE Photonic Technol. Lett., 14, 684–686 (2002).
4. Y. Han and B. Jalali, J. Lightwave Technol., 21, 3085–3103 (2003).
5. A. B. Matsko, J. of Lightwave Technol., 28, 3427–3438 (2010).
6. M. Hossein-Zadeh, In: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV, edited by Alexis V. Kudryashov, Proc. of SPIE Vol. 8236, 82360T (2012).
7. X. S. Yao, L. Maleki, “High frequency optical subcarrier generator”, Electronics Letters, 30, 1525 (1994).
8. E. Salik, N. Yu, L. Maleki, IEEE Photonics Technology Letters, 19, № 6, 444–446 (2007).
9. A. B. Matsko, and V. S. Ilchenko, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron., 12(1), 3–14 (2006).

Математическое моделирование радиотонной системы аналого-цифрового преобразования, использующей растяжение сигнала по времени за счёт дисперсии

В.А. Небавский, Р.С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
k1121@mail.ru

Целью данной работы является моделирование работы радиотонной системы, использующей процесс растяжения сигнала по времени за счёт дисперсии света в оптоволокне.

На основе предобработки, обеспечивающей растяжение сигналов по времени, возможно построение высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей, что является перспективной и практически важной задачей [1-4]. В данном случае применение растяжения сигнала обеспечивает снижение требований к скорости проведения дискретизации, то есть делает возможным выполнение преобразования коротких и/или быстрых сигналов с использованием АЦП с малой частотой выборки.

Принцип действия фотонного АЦП с оптическим временным растяжением (ФАЦП ВР) в простейшем случае иллюстрируется рис.1. СК генерирует широкополосный оптический импульс, который при прохождении первого диспергирующего элемента растягивается так, что его спектральные компоненты следуют друг за другом. Далее полученный оптический ЛЧМ-импульс модулируется по интенсивности входным радиосигналом при помощи модулятора света (как правило используется модулятор Маха-Цандера). Проходя второй диспергирующий элемент сигнал растягивается по времени с коэффициентом растяжения, определяющимся отношением дисперсии 1й и 2й диспергирующих сред: $M=1+D_2/D_1$. «Растянутый» сигнал принимается на фотодиоде и обрабатывается АЦП.

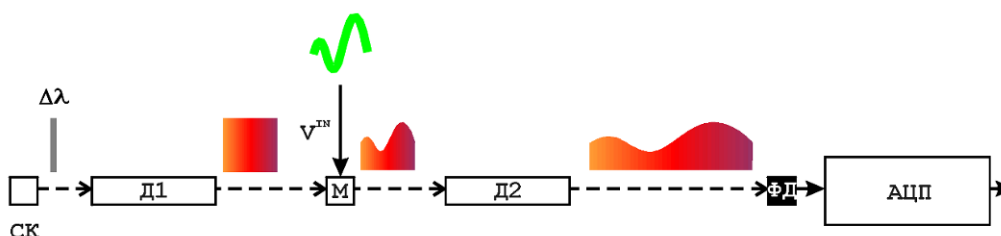


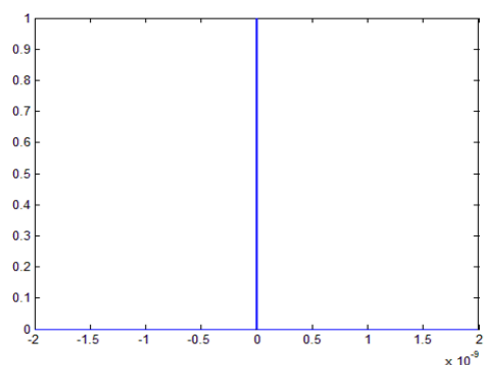
Рис.1. Схема ФАЦП ВР.

СК суперконтинуум. Д1 и Д2 – диспергирующие элементы. М - модулятор. ФД - фотодиод

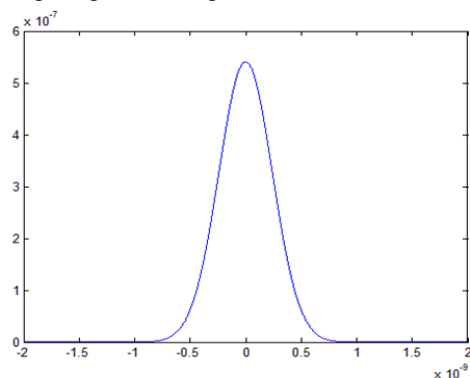
Для моделирования ФАЦП ВР создано программное обеспечение, реализующее математические модели её элементов для которых были введены различные варьируемые параметры, в том числе: ширина спектра суперконтинуума, шумы суперконтинуума, дисперсионные характеристики волоконных элементов, модуляционная и АЧХ модулятора, АЧХ и шумы фотодетектора, эффективное число бит АЦП. В качестве рабочего оптического диапазона выбран стандартный 1,5мкм диапазон. Учёт перечисленных параметров позволяет показать их влияние на отношение сигнал/шум и свободный динамический диапазон на выходе рассматриваемой системы, а значит охарактеризовать выполняемое ей аналого-цифровое преобразование. Примеры результатов моделирования сигналов схемы при $M=10$ представлены в таблице ниже, временной масштаб всех графиков одинаков, частота измеряемого радиосигнала 10ГГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-29-08174.

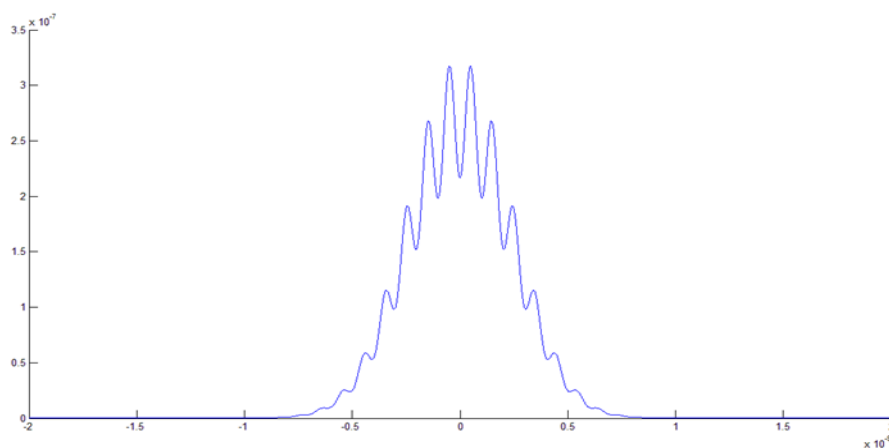
Таблица. Примеры моделирования сигналов схемы ФАЦП ВР



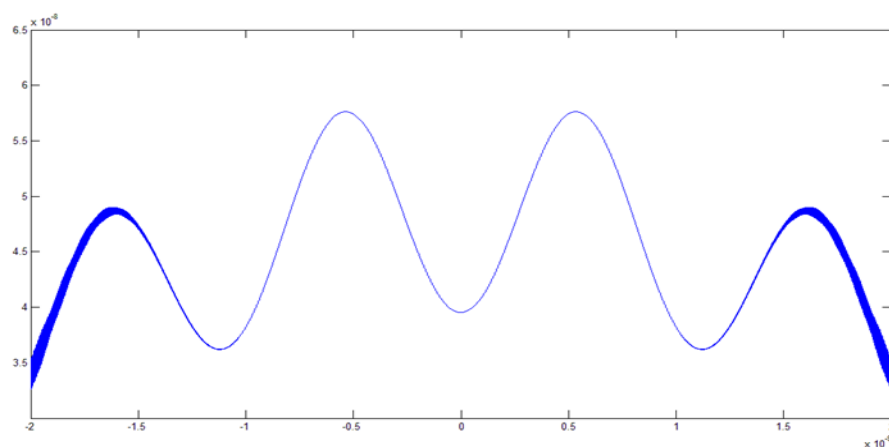
Импульс СК



Световой ЛЧМ импульс после Д1



Модулированный световой ЛЧМ импульс



Интенсивность после Д2, перед ФД

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Caputi // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vAES-7, 269-278 (1971)
2. G. Valley // Opt. Expr., v.15, 1955-1982 (2007)
3. A.Fard, S.Gupta, B. Jalali // Laser Photon. Rev., v.7, 207-263 (2013)
4. Р. Стариков // Успехи совр. радиоэлектроники, 2015, №2, стр.3-39 (2015)

Экспресс метод биотестирования биологических эффектов действия нетеплового электромагнитного излучения миллиметрового диапазона

М.Г. Гапочка¹, А.П. Зарубина², Е.В. Соловьева¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический факультет
gapochka@physics.msu.ru

Цель данной работы – оценка возможности использования экспресс – метода биотестирования на основе бактериальной люминесценции (в течение 30 мин) биологического действия электромагнитного поля (ЭМП) низкой интенсивности в различных частотных диапазонах, (длина волны в свободном пространстве $\lambda = 7.1$ мм, соответственно, частота $f = 42.25$ ГГц и длина волны в свободном пространстве $\lambda = 4.92$ мм, соответственно, частота $f = 61,0$ ГГц). В качестве биосенсора служили бактерии генно-инженерного штамма *Escherichia coli* K12 TG1 K12 TG1 с встроенным lux-опероном морских светящихся бактерий *Photobacterium leiognathi* 54D10. Бактерии получены и хранят на кафедре микробиологии Биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. Для работы готовили биотест в лиофильновысушенном состоянии для использования стандартной партии бактерий во всех исследованиях.

Основываясь на известных данных, что действие ЭМП более выражено в условиях загрязнения водной среды химическими токсикантами, мы осуществляли эксперименты в условиях загрязнения среды тяжелым металлом. В связи с этим осуществляли подбор концентраций и выбор тяжелого металла, обладающего заметной, но при этом незначительной токсичностью (для безопасности в работе) на исследуемый биотест.

Для эксперимента в качестве токсиканта был выбран препарат тяжелого металла - алюминий хлористый, 6-водный, $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ (ч, ГОСТ 3759-75). Для экспериментов рассчитывали концентрацию на Al^{+3} .

Измерение токсичности исследуемых растворов проводили при комнатной температуре ($20^{\circ}C$) в течение 5, 15, 30, 60 мин. В пробирки типа Эппендорфа (объемом 1.5 мл) наливали 0.1 мл суспензии клеток бактерий и 0.9 мл исследуемого раствора.

Анализ осуществляли при фиксированном времени экспозиции каждого контрольного и опытного образца воды, одновременно регистрируя интенсивность люминесценции. Индекс токсичности (Т) во времени взаимодействия биосенсора с исследуемым образцом воды определялся автоматически по программе люминометра «Биотокс» по формуле:

$T=100 \cdot (I_k - I) / I_k$, где I_k и I – интенсивность свечения контроля и опыта, соответственно. Оценку токсичности классифицировали по трем группам: Значение $T < 20$ – образец нетоксичен; Значение $T > 20$, но < 50 - образец токсичен; Значение $T > 50$ - образец очень токсичен. Иногда наблюдали стимуляцию свечения тест - организма, т.е. значение Т с отрицательным знаком.

Облучение проводили в течение 30 мин, Al^{+3} брали в концентрации 0.02 мкг/мл.

Совместное содержание в пробе биотеста с тяжелым металлом после облучения выявляет менее значимое влияние ЭМП для частоты $f = 61$ ГГц (Т на 30 мин анализа ≈ 30), через 20 часов действие ЭМИ и алюминия нивелировалось. Влияние ЭМП для частоты 42.25 ГГц более выражено Т (≈ 40). Содержание в пробе биотеста с тяжелым металлом после облучения выявляет более значимое влияние ЭМП для частоты $f = 61$ ГГц на стимуляцию интенсивности свечения биотеста (Т на 30 мин анализа превышало величины до -50) и практически к 20 часам также нивелировалось – не выявлялось действие ЭМП и металла. Содержание в пробе биотеста совместно с тяжелым металлом после облучения выявило

токсическое влияние ЭМП для частоты $f = 42.25$ ГГц ($T \approx 20$). Отдельное облучение биотеста и отдельное облучение металла после их смешивания не выявило токсичности. Полученные данные требуют дополнительных исследований, связанных с подбором концентраций этого металла и более детального изучения стабильности водных растворов этой соли алюминия во времени.

Таким образом, обнаружено, что ЭМП проявляет большую токсичность для клеток биосенсора в смешанных, а значит в более сложных средах. Предварительное облучение отдельно среды с токсикантом и отдельно биосенсора при смешивании различно влияет на последующее значение токсичности раствора.

Эффекты облучения зависят от облучаемого объекта, от времени облучения, времени последствия и смеси облучаемых объектов.

Выявлен синергизм облучаемых объектов: клеток генно-инженерного штамма бактерий *Escherichia coli* (водного раствора биосенсора), дистиллированной воды, раствора токсического вещества.

Все выявленные эффекты мы связываем с изменением с течением времени структуры дальнего и ближнего порядка воды вследствие аккумулялирования КВЧ-излучения водными структурами с последующим изменением электронной конфигурации молекул воды.

Представленные результаты требуют дальнейшего исследования с детализацией стабильности водных растворов исследуемого токсиканта и подбора его концентрации, с целью изучения накопления в клетках бактерий. Метод биотестирования на основе бактериальной люминесценции удобен в использовании и позволяет оценить развитие токсического эффекта ЭМП в разных частотных диапазонах во времени, он доступнее других биотестов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mantel J., Freidin M., Bulich A., Perry H. The effect of radiation on bioluminescent bacteria: possible use of luminescent bacteria as a biological dosimeter // *Physics in Medicine and biology*. 1983. Vol. 28. № 5. P. 599-602.
2. Ревазова Ю.А., Данилов В.С., Зарубина А.П., Маркелова С.И., Соловьева Л.Н., Аверин А.В. Методика экспрессного определения токсичности воды с помощью люминесцентного бактериального теста "Эколюм" // *Методические рекомендации. Гос. сан.-эпид. нормирование РФ. Минздрав России. М, 2000. 19 с.*
3. Данилов В.С., Зарубина А.П., Ерошников Г.Е., Соловьева Л.Н., Карташев Ф.В., Завильгельский Г.Б. Сенсорные биолюминесцентные системы на основе lux-оперонов разных видов люминесцентных бактерий // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. Биология*. 2002. № 3. С. 20-24.
4. Ulitzur S., Lahav T., Ulitzur N. A novel and sensitive test for rapid determination of water toxicity // *Environ. Toxicol.* 2002. Vol. 17. №3. P. 291-296.
5. Зарубина А.П., Мажуль М.М., Новоселова Л.А., Гапочка М.Г. Бактериальный люминесцентный биотест // *Сенсор*. 2005. №3. P. 14-21.
6. Зарубина А.П., Гапочка М.Г., Новоселова Л.А., Гапочка Л.Д. Биотестирование тест-системой «Эколюм» влияния электромагнитного поля низкой интенсивности на токсичность бытовых стоков. // *Вестник Моск. Ун-та. Сер.16. Биология*. 2012. №3. С.39-43.

Измерение разности оптических задержек между сердцевинами многосердцевинного световода интерференционным методом

М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов

Научный центр волоконной оптики РАН

mastak@fo.gpi.ru

В последние несколько лет активно исследуются возможности применения многосердцевинных волоконных световодов для таких областей, как передача информации, датчики и т. д.. В работах [1,2] многосердцевинные световоды были предложены также и для ряда задач радиофотоники, а именно для использования в качестве многоканальных линий задержки [1] и элементов многорезонаторных оптоэлектронных генераторов [2]. Преимуществами многосердцевинных световодов является компактность, а также практически одинаковое пространственное расположение сердцевин и влияние внешних факторов на все сердцевины, что снижает нежелательные изменения разности оптических задержек между каналами (сердцевинами).

Для практического использования многосердцевинных световодов для задач радиофотоники возникает необходимость в измерении разности оптических задержек между различными сердцевинами. В настоящей работе для этих целей применен интерферометрический метод с использованием интерферометра Маха-Цандера. Измерена величина разности групповых задержек сигнала между сердцевинами многосердцевинного световода с одинаковыми сердцевинами, изготовленного в НЦВО РАН. Исследования показали, что оптические задержки во всех сердцевинах световода отличаются на величину не более 0,05 %. Это отличие, по-видимому, связано с изгибом световода при намотке на катушку.

На рис. 1 представлена схема установки для измерения разности оптических задержек компенсационным методом низкокогерентной интерферометрии на основе интерферометра Маха-Цандера [3, 4, 5]. В качестве широкополосного источника излучения "1" использовался суперлюминисцентный диод, с центральной длиной волны 1,53 мкм и шириной спектра излучения 50 нм. Его излучение делилось на волоконном ответвителе "2" в равном соотношении между двумя плечами интерферометра Маха-Цандера. В первом (измерительном) плече излучение из односердцевинного световода "А" вводилось в измеряемую сердцевину исследуемого многосердцевинного световода "4" путём стыковки торцов на прецизионном трехкоординатном трансляторе "3" под визуальным контролем в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Из измеряемой сердцевины многосердцевинного световода излучение с помощью транслятора "5" аналогичным способом вводилось в односердцевинный световод "В", а затем в коллиматор "6". Далее в виде объёмного коллимированного пучка излучение поступало в регулируемую линию задержки "7", образованную перемещаемым уголковым отражателем "7а", установленном на модуляторе "7б", осуществляющим перемещение уголкового отражателя вдоль оси Х. Пройдя линию задержки и отразившись от глухого металлического зеркала "8", излучение поступало на полупрозрачную делительную пластину "11".

Во втором (опорном) плече излучение проходило по отрезку компенсационного односердцевинного световода "9", длина которого примерно равнялась длине измеряемого многосердцевинного световода. После коллиматора "10" излучение в виде объёмного коллимированного пучка поступало на делительную пластину "11", где складывалось с излучением, прошедшим измерительное плечо интерферометра. После делительной пластины сложное излучение падало на фотоприемник "12", с которого детектированный сигнал визуально наблюдался на осциллографе "13".

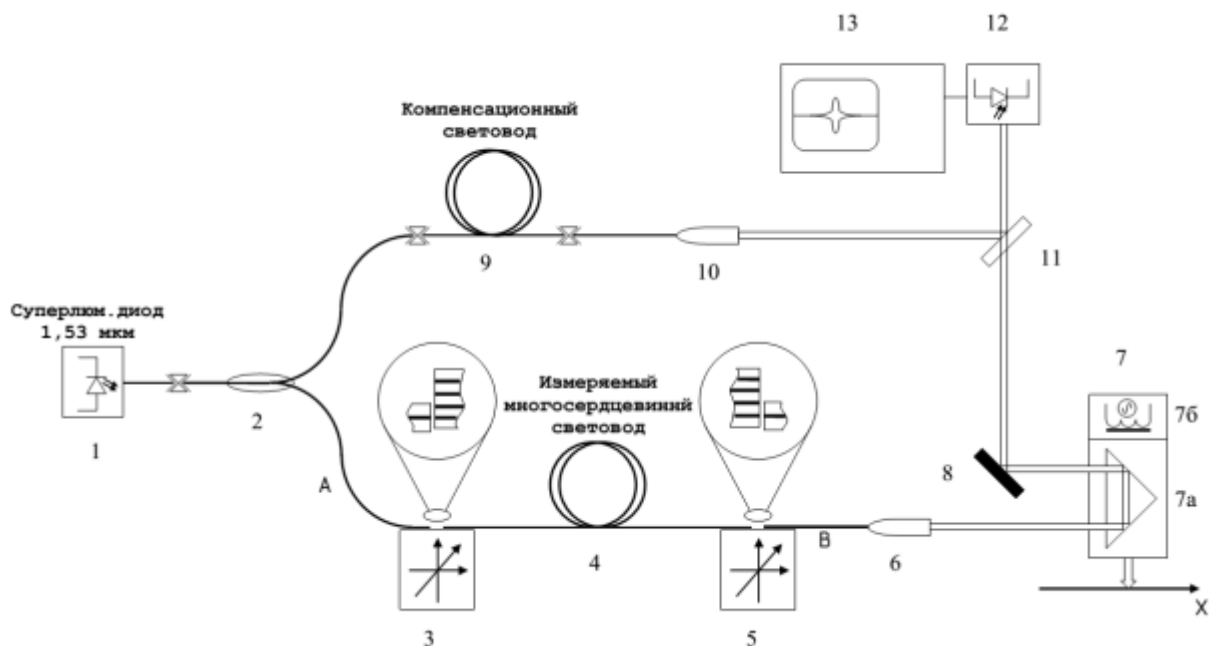


Рис. 1. Схема установки по измерению разности оптических задержек.

В случае, если длины плеч интерферометра различаются на величину, большую чем длина когерентности источника излучения "1", происходит сложение некогерентных пучков и в плоскости фотоприемника не возникает интерференционной картины. При этом интенсивность регистрируемого сигнала пропорциональна сумме мощностей излучения, прошедших через оба плеча интерферометра.

Для достижения условия интерференции, то есть равенства плеч интерферометра, проводится изменение длины измерительного плеча интерферометра путем перемещения узла "7" вдоль оси X. Когда разница плеч становится меньше длины когерентности, в плоскости фотоприемника возникает интерференционная картина. Поскольку размер чувствительной области фотоприемника сравним с шириной интерференционных полос, то под воздействием внешних факторов, вызывающих флуктуацию длин плеч интерферометра и изменение положения интерференционных полос, сигнал на фотоприемнике испытывает резкие скачки. Это затрудняет наблюдение максимума сигнала, соответствующего максимальному совпадению плеч интерферометра. Поэтому для усреднения сигнала и выявления его огибающей осуществляется малое периодическое изменение длины (модуляция) измерительного плеча интерферометра с амплитудой, сравнимой с длиной когерентности источника. Модуляция осуществляется путем перемещения уголкового отражателя "7a" с помощью электромеханического модулятора "7б" с частотой 20 Гц с амплитудой, превышающей длину когерентности источника излучения. Для используемого в данной установке широкополосного источника с длиной когерентности около 50 мкм [6] амплитуда модуляции составляет 100-300 мкм. Среднее положение уголкового отражателя "7a", при котором достигается максимум огибающей, соответствует равенству оптических длин плеч интерферометра.

В начале измерения в измерительное плечо интерферометра вводилась центральная сердцевина многосердцевинного световода. При этом в опорное плечо устанавливался односердцевинный компенсационный световод типа smf-28, длина которого примерно (с точностью 0,5 м) соответствовала длине многосердцевинного световода. Затем осуществлялось выравнивание оптических длин плеч интерферометра путем перемещения

узла "7" вдоль оси X до достижения на фотоприемнике сигнала, соответствующего появлению интерференции. Затем в измерительное плечо интерферометра вводилась одна из боковых сердцевин многосердцевинного световода. Если оптическая длина этой сердцевины оказывалась отличной от оптической длины центральной, баланс длин плеч интерферометра нарушался, вследствие чего нарушалось условие интерференции. Затем, путем изменения длины воздушной части измерительного плеча, осуществляемого за счет перемещения узла "7" вдоль оси X, снова осуществлялось балансирование длин плеч интерферометра до появления интерференционного сигнала.

Измерив величину компенсирующего смещения Δx узла "7" вдоль оси X, можно определить разность оптических задержек между сердцевинами:

$$\Delta\tau = 2\Delta x n_{\text{gair}}/c, \quad (1)$$

где c - скорость света, n_{gair} – групповой показатель преломления воздуха $n_{\text{gair}} \approx 1$. Для данной установки диапазон измерения $\Delta\tau$ составил ± 3 нс с точностью 0,7пс.

Относительную разность оптических задержек между сердцевинами $\delta\tau$ можно оценить по формуле:

$$\delta\tau = \Delta\tau/\tau \cdot 100\% = 2\Delta x n_{\text{gair}}/(Ln_g) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где L - длина измеряемого отрезка многосердцевинного световода, τ - оптическая задержка, приобретаемая сигналом при прохождении по сердцевине многосердцевинного световода длиной L , n_g - групповой показатель преломления основной моды сердцевины многосердцевинного световода. Для оценки можно принять $n_g = 1,468$, что равно групповому показателю преломления основной моды односердцевинного световода SMF-28, близкому по параметрам сердцевине к параметрам сердцевины исследуемого многосердцевинного световода.

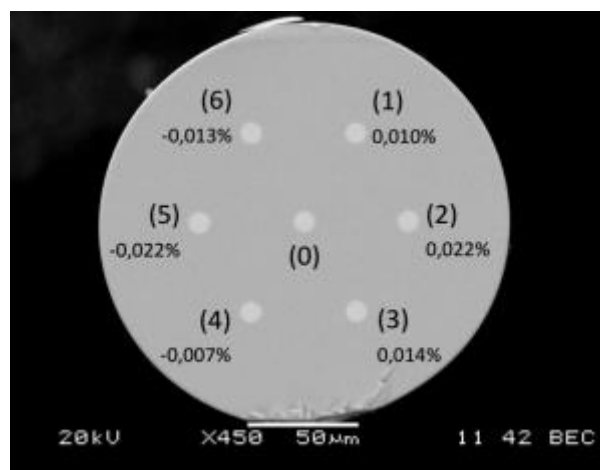


Рис. 2. Фотография торца исследованного семисердцевинного световода. Цифрами в круглых скобках отмечены номера сердцевины. Ниже отмечены величины относительных разностей задержек $\delta\tau$

Исследуемый семисердцевинный световод (рис. 2) был изготовлен методом сверления. Все сердцевинны световода имели одинаковые параметры. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляла 0,0055, диаметры сердцевины - 9 мкм, расстояние между центрами соседних сердцевины - 47 мкм. Длина волны отсечки первой высшей моды в каждой из сердцевины лежит в диапазоне 1360 ± 20 нм.

Измерение разности оптических задержек между сердцевин данного семисердцевинного световода проводились на отрезке световода длиной 94 м. Световод был намотан на катушку радиусом 160 мм. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сердцевина	0	1	2	3	4	5	6
$\Delta\tau$, пс	0	44,3	101,5	62,6	-33,2	-101,5	-60,7
$\delta\tau$, %	0	0,010	0,022	0,014	-0,007	-0,022	-0,013
$\delta\tau_{\text{расч.}}$, %	0	0,015	0,029	0,015	-0,015	-0,029	-0,015

Максимальная относительная разность оптических задержек наблюдалась между сердцевинами 2 и 5 и не превысила 0,05%, что является приемлемым для использования данного световода для ряда задач.

Характер распределения оптических задержек в боковых сердцевинах относительно центральной сердцевины позволяет предположить, что различие времен задержек связано с изгибом световода. В таблице 1 приведены расчетные значения разности оптических задержек, которые должны возникнуть за счет изгиба световода [7], проведенные в предположении, что радиус-вектор, проведенный перпендикулярно оси изгиба световода, проходит через центры сердцевин 5, 0 и 2. По порядку величины расчетные значения совпадают с измеренными.

Таким образом, для измерения разности групповых задержек между сердцевинами многосердцевинного световода предложено использовать компенсационный метод на базе интерферометра Маха-Цандера и низкокогерентного источника излучения. Создана установка и исследован изготовленный в ИЦВО РАН семисердцевинный световод с одинаковыми сердцевинами. Измеренные величины разности оптических задержек между сердцевинами световода не превышают 0,05%, что говорит о высокой однородности световода. Небольшое отличие в величине групповых задержек в разных сердцевинах связано, по-видимому, с изгибом световода при намотке на катушку.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Gasulla et al. // IEEE Photonics Journal, 2012. V. 4, No. 3, P. 877
2. S. García et al. // Opt. Express 2015. V. 23 P. 2403
3. А.В. Белов и др. // Квантовая электроника, 1986, Т. 13 №8 стр. 1680
4. X. Zhang et al. // Optik - International Journal for Light and Electron Optics 2011, V. 122, I. 10, P. 928
6. А.Е. Левченко и др. // Квантовая электроника, 2005. Т. 35 №9 стр. 835
7. С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин "Физическая оптика" М.:Изд-во МГУ; Наука, 2004, стр. 334
8. T. Sakamoto et al. // Opt. Express 2014. V. 22 P. 31966.