

# ОПТИЧЕСКИЕ И КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ, ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

---

УДК 621.3.049.77

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУСПЕНЗИЙ ДИСПЕРСНОГО КВАРЦА

А.Г. Алексеев

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент О.В. Андреева

Создание наноматериалов с новыми свойствами, как правило, требует изготовления ансамблей наночастиц с заданными параметрами. Важной проблемой является то, что существующие методы не позволяют проводить однозначную диагностику параметров и свойств частиц в нанометровом диапазоне.

**Целью работы** является разработка метода измерения размеров частиц проб тонкодисперсного кварца, полученных при диспергировании на планетарно-центробежных мельницах. Способ измельчения кварца такими мельницами внедряется в промышленность и требует поддержки измерительными методиками оценки размеров и форм частиц. Особенно важное значение имеет оценка определения размеров частиц порядка 10–100 нм.

В работе для оценки размеров наночастиц использовался прибор LB-550, основанный на принципе динамического рассеяния света. Пробы, измельченные на мельнице, которые поступают на диагностику, имеют очень большой разброс частиц по размерам. При этом определение тонкодисперсной фракции (диаметр частиц порядка 100 нм) в исследуемых образцах затруднено тем, что имеющиеся крупные частицы (порядка 1 мкм и более) вносят основной вклад при изучении рассеяния на образце с использованием метода динамического рассеяния света.

При подготовке проб для исследования используется процесс седиментации частиц в жидкой среде, при котором естественным образом можно выделить фракции более мелких частиц. За определенное время осаждения более тяжелые частицы располагаются ближе ко дну раствора, а более мелкие остаются выше. Теоретический анализ показал возможность использования аналитического представления процесса седиментации для вывода формул, характеризующих скорость осаждения частиц кварца в воде.

Были исследованы растворы кварца, измельченного на мельницах, диаметр рабочих шариков которых составлял 5 мм. За тем в течение двух суток проводилось осаждение раствора. По истечению данного времени, результаты, выполняемых исследований, показали наличие в верхних слоях раствора частицы от 100 до 200 нм при среднем размере частиц 1,5 мкм.

Таким образом, разработаны основы методики, позволяющей проводить измерения проб кремния с частицами, размер которых меньше 200 нм, оценивать их количество и вес, для выбора режима работы мельниц по получению заданных параметров изготавливаемых суспензий.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

**Т. Ассасса**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Ю.А. Балашин**

Объект исследования: ткани биообъектов.

В настоящее время имеется повышенный интерес к работам в области медицинских применений СВЧ-техники, в частности к разработкам аппаратуры, как для диагностики заболеваний внутренних органов, так и оценки травм и других нарушений в опорно-двигательной системе человека. Таким образом, разработка неинвазивных методов определения неоднородности биологических тканей, позволяющих выявлять патологические образования, расположенные как на поверхности органов, так и скрытые под покровным структурами (эпителием) и определять их границы является весьма актуальной задачей

Вместе с тем, несмотря на имеющиеся успехи у СВЧ-диагностирования необходимо искать новые направления в медицинской диагностике, которые бы позволили оценивать не только наличие или отсутствие патологических процессов.

Таким направлением может стать метод ВЧ-ближнепольного зондирования. В основе этого метода лежит идея о том, что информацию о внутренней структуре любой среды можно получить с ее поверхности [1].

Ключевыми особенностями данного метода является:

- наличие связи электродинамического состояния поверхности среды (ее полного импеданса) через ее диэлектрическую проницаемость и удельную проводимость с процессами, происходящими внутри среды;
- возможность определения этой связи с помощью малой электрической антенны (датчик).

Прототипом этого метода послужил активный режим СВЧ-диагностики. Принципиальным отличием данного метода является частота электромагнитного поля антенны датчика. Для задач диагностики состояния живых систем эта частота была определена из анализа известных в литературе дисперсионных зависимостей для  $\epsilon$ ,  $\sigma$  и полного импеданса  $Z$  [2]. Анализ этих зависимостей показывает, что диапазон частот 1–10 МГц отражает широкий круг электродинамических процессов в биологических системах и сильно зависит от разнообразных нарушений жизнедеятельности исследуемых тканей.

В рассматриваемой модельной задаче частота электромагнитного поля малой антенны выбирается равной 4 МГц (ВЧ-частота, соответствующая среднему значению области дисперсии биологических объектов).

Далее приводится электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования биологических объектов и предварительные эксперименты.

### **Литература**

1. Кинг Р. Антенны в материальных средах. – М.: Мир, 1984. – 824 с.
2. Самойлов В.О. Медицинская биофизика. – СПб: Спецлит, 2007. – 560 с.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАЗРАБОТКА ГОМОГЕНИЗАТОРА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ГРАВИРОВКИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК**

**Е.В. Бараусова**

**Научный руководитель – аспирант В.К. Баля**

Гомогенизация лазерного излучения является одной из ключевых технологий для многих современных приложений. Гомогенизатор – это оптическая поверхность, на которой регулярно с неким периодом (или хаотически) расположены элементарные рассеиватели: микролинзы, микрзеркала, дифракционные элементы и другие. Стандартные гомогенизаторы, используемые для формирования пространственного профиля лазерного излучения, а также для достижения равномерной освещенности мишени, представляют собой линзовые растры, используемые как единично, так и попарно. Обычно гомогенизаторы изготавливают путем абляции высококачественного синтетического кварцевого стекла или СаF<sub>2</sub> лазерным излучением, что достаточно трудоемко.

В данной работе экспериментально получен гомогенизатор лазерного излучения на базе перекрещивающихся микропризмных структур по типу Келлера [1], изготовленный методом лазерной гравировки термочувствительной пленки [2] и последующего наноиmprинт копирования [3].

Решетки микропризмных структур, наложенные друг на друга и имеющие соответствующих период могут быть использованы как элементы, обеспечивающие получение множественных изображений при наблюдении яркого источника через такую прозрачную структуру.

### **Литература**

1. Voelkel R., Weible K.J. Laser beam homogenizing: limitations and constraints // Proc. SPIE. – 2008. – 7102, 71020J, 71020J-12.
2. Баля В.К., Денисюк И.Ю. Формирование микрооптических элементов для защиты с использованием лазерного гравера // Приборостроение. – 2012. – Т. 55 – № 3 – С. 51–56.
3. Арефьева Н.Н. Денисюк И.Ю. Применение метода наноиmprинта для единичного копирования полимерной френелевской и микро- оптики // Оптический журнал. – 2008. – т.75 – №7 – С. 71–74.

## **ВЫСОКОЧАСТОТНОЕ БЛИЖНЕПОЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ (ВОДА). МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

**А.Б. Будаев**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Ю.А. Балашин**

Объект исследования: дистиллированная вода, растворы различных веществ в дистиллированной воде.

Диагностика внутреннего состояния различных физических объектов актуальна для микроэлектроники, материаловедения, дефектоскопии, прикладной химии. Одним из наиболее успешных и перспективных методов такой диагностики может стать ВЧ-ближнепольное зондирование.

В основе используемого нами метода ВЧ-ближнепольного зондирования лежит идея о том, что информацию о внутренней структуре любой среды можно получить с ее поверхности.

Ключевыми особенностями данного метода являются:

- наличие связи электродинамического состояния поверхности среды (ее полного импеданса) через ее диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  и удельную проводимость  $\sigma$  с процессами, происходящими внутри среды;
  - возможность определения этой связи с помощью малой электрической антенны (датчик).
- Прототипом этого метода послужил активный режим СВЧ-диагностики.

Принципиальным отличием является частота электромагнитного поля антенны датчика. Для задач диагностики состояния свободной или связанной воды эта частота была определена из анализа известных в литературе дисперсионных зависимостей  $\epsilon$ ,  $\sigma$ , и полного импеданса  $Z$ .

Для более глубокого понимания метода и развития его возможностей в прикладных исследованиях необходимо построение относительно простой электродинамической модели, позволяющей качественно и количественно оценивать отклик ВЧ-ближнеполюсной измерительной системы при взаимодействии ее с исследуемым физическим объектом.

Рассматривается электродинамическая модель ВЧ-ближнеполюсного зондирования свободной воды. Приводятся качественные и количественные оценки результатов этого зондирования.

### **Литература**

1. Кинг Р. Антенны в материальных средах. – М.: Мир, 1984. – 824 с.
2. Самойлов В.О. Медицинская биофизика. – СПб: Спец. лит., 2007. – 560с.

УДК 004.27:530.145

## **АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ С ПРИЕМНИКОМ, РАЗЛИЧАЮЩИМ МНОГОФОТОННЫЕ СОСТОЯНИЯ, К АТАКЕ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПУЧКА ФОТОНОВ**

**А.А. Гайдаш**

**Научный руководитель – аспирант В.И. Егоров**

Системы квантовой криптографии позволяют реализовать безопасное распределение закрытого секретного ключа между двумя и более пользователями. Использование одиночных фотонов в технологии передачи дает легитимным пользователям возможность обнаруживать подслушивание в канале связи (осуществляемое злоумышленником – Евой) по возрастанию уровня ошибок.

В большинстве экспериментов [1, 2] и коммерческих схемах [3] в качестве источника используется ослабленное до критического уровня лазерное излучение. В этом случае условие однофотонности источника в системе квантовой криптографии выполняется нестрого, и у Евы появляется выигрышная стратегия, называемая *beamsplitting* («разделение пучка»). Она основана на возможности злоумышленника определять многофотонные состояния без измерения и разделять такие импульсы, получая информацию о ключе незаметно для легитимных пользователей.

В ходе работы разработана аналитическая модель Евы, представленная в виде трех основных узлов: устройства, позволяющего определять количество фотонов в импульсе без измерения, детектора, обладающего высокой квантовой эффективностью, и управляемого делителя пучка, который забирает из пучка некоторое определенное количество фотонов. Анализ модели Евы позволил выяснить, что при реализации этой атаки общее число принятых фотонов значительно снижается, а статистика приема, сильно модифицируется. При наличии у получателя детектора, различающего многофотонные состояния, эти изменения могут быть распознаны. На основе этого анализа разработан метод, позволяющий

обнаруживать атаки типа beamsplitting, и проведен комплексный анализ устойчивости криптографической системы к подобным атакам.

Таким образом, применение детекторов одиночных фотонов, накапливающих статистику, позволяет противостоять атаке разделением пучка в системах квантовой криптографии, использующих источник ослабленного лазерного излучения.

Анализ комбинирования этой стратегии с другими и возможности «восполнения» статистики путем посылки дополнительных фотонов на детектор Боба также представляют значительный интерес.

### **Литература**

1. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – P. 1301–1350.
2. Lydersen L., Wiechers C., Wittmann C., Elser D., Skaar J., Makarov V. Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination // Nature Photonics. – 2010. – V. 4. – P. 686–689.
3. Голубчиков Д.М. Структура и принципы функционирования системы квантового распределения ключей ID 3000 CLAVIS // Известия ЮФУ. Техн. науки. – 2008. – № 3. – С. 149–157.

УДК 004.27:530.145

## **СИНХРОНИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ ОТПРАВИТЕЛЯ И ПОЛУЧАТЕЛЯ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОЙ РАССЫЛКИ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО КЛЮЧА НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.**

**В.Д. Дубровская**

**Научный руководитель – аспирант А.В. Глейм**

Квантовая криптография (КРК) позволяет осуществить безопасное распределение закрытого ключа, секретность которого гарантируется фундаментальными законами квантовой механики. Несмотря на то, что проблема синхронизации устройств отправителя и получателя в системах КРК практически не затрагивается в современных статьях и обзорах, она является актуальной по нескольким причинам. Во-первых, не существует универсального метода ее решения для схем КРК [1]; во-вторых, влияние синхронизационного (классического) канала на квантовый и в целом возможность мультиплексирования сигналов в системах КРК являются мало изученными. Отдельной задачей является определение структуры стартового байта, инициирующего процесс генерации.

**Целью работы** являлось проектирование экспериментального макета подсистемы синхронизации устройств отправителя и получателя в установке квантовой рассылки криптографического ключа на боковых частотах модулированного излучения [2] (КРКПЧ), а также формирование оптимальной структуры стартового байта.

Работа проводилась на установке КРКПЧ. Синхронизацию предлагается реализовать следующим образом: дополнительный лазер генерирует синхросигнал, представляющий собой последовательность прямоугольных импульсов с определенной частотой. Мощность сигнала регулируется аттенюатором, после чего он поступает вместе с квантовым каналом в волоконно-оптическую линию связи через двухканальный мультиплексор и передается на приемный модуль, где усиливается EDFA-усилителем и регистрируется фотодетектором.

Стартовый байт заданной структуры посылается по классическому каналу до начала процесса передачи. При определении его оптимальной структуры учитывались параметры сверхпроводниковых детекторов одиночных фотонов [3]: высокая скорость счета (до 1 Гб/с),

низкий уровень шума (до 10 Гц) и относительно небольшая (12%) квантовая эффективность.

В ходе работы был создан экспериментальный макет системы КРКПЧ с синхронизацией устройств отправителя и получателя, а также проведены предварительные эксперименты, демонстрирующие работу прибора. Определена структура стартового байта для использования в системе со сверхпроводниковым счетчиком фотонов.

### **Литература**

1. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – V. 81. – P. 1301–1350/
2. Мазуренко Ю.Т., Меролла Ж.-М., Годжебюр Ж.-П. Квантовая передача информации с помощью поднесущей частоты. Применение к квантовой криптографии // *Оптика и Спектроскопия.* – 1999. – Т. 86. – № 2. – С. 181–183.
3. Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G. et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector // *App. Phys. Lett.* – 2001. – V. 79. – № 6. – P. 705–707.

УДК 533.143

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН СОЗДАЮЩИХ КАВИТАЦИОННЫЕ ПУЗЫРЬКИ В ВОДЕ**

**Н.А. Дубровский**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин**

При воздействии на жидкость ультразвуковым полем определенной частоты в ней возникают так называемые кавитационные полости. При этом в кавитирующие, непрерывно схлопывающиеся и расширяющиеся, пузырьки излучают в видимой части спектра, этот эффект был назван многопузырьковой сонолюминесценцией. Однако, если попробовать создать люминесценцию в емкостях определенной формы, то в ней, в фокальной плоскости емкости, поле кавитирующих пузырьков за короткое время превращается в одиночный пузырек, интенсивность свечения которого намного превышает интенсивность излучения при многопузырьковой сонолюминесценции, этот эффект был назван однопузырьковой сонолюминесценцией.

**Целью работы** было моделирование процесса распространения звуковых волн в жидкости, для последующего создания в ней одиночного кавитационного пузырька.

Поскольку наилучший эффект однопузырьковой сонолюминесценции наблюдается в воде, то и в модели решено было использовать именно воду. Модель создавалась с помощью математического пакета Wolfram Mathematica на основе явной конечно-разностной схемы для волнового уравнения. Была добавлена возможность задания границы среды произвольным образом.

Полученная модель дала возможность узнать условия, создаваемые ультразвуковым полем вблизи области образования кавитационного пузырька в любой момент времени. Это позволило добавить к модели одиночный кавитирующий пузырек, который должен образовываться в емкости. Тем самым была получена возможность проследить динамику жизни кавитационного пузырька, с учетом условий создаваемых ультразвуковым полем.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ, ОСНОВАННОЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ РАЗДЕЛЕНИИ ФОТОНОВ

А.Е. Иванова, А.В. Глейм, В.И. Егоров

Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин

Случайные числа используются во множестве приложений. Генераторы псевдослучайных чисел опираются на алгоритмы, реализованные на вычислительном устройстве. Физические генераторы случайных чисел извлекают случайность из хаотического поведения сложных физических систем, поэтому лучше подходят для генерации истинно случайных чисел, пригодных для нужд, например, криптографии, как классической, так и квантовой. К этому типу относятся и квантовые генераторы случайных чисел (КГСЧ).

В работе изучается статистика квантовой генерации случайных чисел, полученных непосредственно при детектировании лазерного излучения, а также генерации случайных чисел, основанной на разделении фотонов, испускаемых лазером, при помощи светоделителя. Теоретически исследуется и моделируется статистика случайных чисел, в зависимости от параметра, характеризующего симметрию светоделителя. На основании ряда статистических тестов, исследуется степень отклонения полученного распределения случайных чисел от равномерного распределения.

**Целью работы** являлось проведение теоретического расчета и численного моделирования генерации последовательностей случайных чисел при использовании случайного распределения, полученного напрямую от лазера, а также случайного распределения, полученного при помощи симметричного и несимметричного делителей пучка.

В КГСЧ, основанных на разделении пучка, фотон после испускания попадает на делитель пучка, затем идет по одному из двух возможных путей, выбор пути и определяет значение бита. Другие реализации подобных систем включают падение фотона на полупрозрачное зеркало или поляризационный делитель, отражение фотонов от дифракционной решетки с последующим измерением угла отклонения. Существуют также схемы, использующие временную задержку на одном из путей, по которым проходят фотоны и один детектор. Детектируя время прибытия фотона, можно определить, какой путь он прошел, и получить последовательность случайных бит.

При исследовании статистики случайного распределения, полученного напрямую от лазера, рассматривается система, состоящая только из лазера и детектора. Распределение случайной величины, определяющей бинарную последовательность, определяется статистикой лазерного излучения, которое можно представить в виде пуассоновского процесса.

В данном распределении существуют многофотонные состояния, поэтому для предоставления результатов генерации в бинарном виде необходима обработка. Отсчеты, в которых наблюдалось любое количество фотонов, принимаем за «1», отсутствие фотонов – «0». Для достижения равных вероятностей появления в итоговой последовательности нулей и единиц, было найдено удовлетворяющее этим требованиям значение параметра распределения Пуассона  $\lambda = \ln 2$ . С учетом этого параметра было смоделировано распределение, описывающее статистику лазерного излучения. Последовательность, полученная непосредственно от лазера успешно прошла тесты на случайность.

При исследовании статистики распределения, полученного при использовании светоделителя, была проведена имитация вероятностного процесса путем деления лазерного излучения при помощи светоделителя и поочередного снятия данных с детекторов. Обработка двух последовательностей, полученных после деления исходного излучения,

происходит следующим образом: если на первом выходе из делителя пучка не были обнаружены фотоны, а на втором обнаружено любое их количество, то бит итоговой последовательности принимает значение «0», в противоположном случае – «1», в остальных случаях бит не записывается. Были получены статистические параметры бинарного распределения, сгенерированного при помощи симметричного и несимметричного делителей пучка.

Проведены теоретическое исследование и моделирование генерации случайного распределения, полученного напрямую от лазера и при помощи светоделителя. Показана зависимость качества случайности генерируемой последовательности от параметра  $\lambda$  распределения Пуассона. Рассчитано оптимальное его значение. Изучено влияние параметров делителя пучка на случайность генерируемой последовательности. Сгенерированные последовательности проходят тесты на случайность, если отклонение угла делителя пучка  $\theta$  от  $45^\circ$  составляет не более двух градусов.

УДК 534.231.2

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ**

**А.А. Козырев**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин**

Объект исследования: корпус-емкость автоклава, заполненная жидкостью, под воздействием ультразвука.

Применение ультразвука при производстве наноматериалов обеспечивает многочисленные положительные эффекты. В частности это использование ультразвукового воздействия при синтезе и осаждении наночастиц.

Воздействие ультразвукового излучения связано, в первую очередь, с развитием такого эффекта как акустическая кавитация, возникающего в среде при распространении ультразвука. Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков.

В работе проводились исследования распределения звукового давления в емкости автоклава, заполненной жидкостью, в которой происходит синтез наночастиц. Моделирование процесса производилось в среде Ansys.

В ходе исследований было выявлено влияние основных параметров жидкости и явления кавитации на распределение звукового давления.

УДК 535.015

## **КОНТАКТНАЯ СУБВОЛНОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ**

**С.В. Колодезникова**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент М.И. Фокина**

В современном мире уменьшение размеров имеет все большую актуальность. Современная интегральная схема с каждым годом содержит все большее количество элементов, соответственно каждый отдельный элемент с каждым годом уменьшается в размерах. Наиболее распространенной и удобной технологией изготовления интегральных схем является литография.

Главной проблемой в достижении нанометровых размеров, с которой сталкивается



оптическая литография сегодня, является сложность преодоления дифракционного предела. Один из способов решения – использование элементов с «фазовой границей», прежде всего для создания одиночных тонких линий [1]. Данный метод заключается в использовании эффекта интерференции. Волна электромагнитного излучения, проходящая сквозь фотошаблон с рельефом, который обеспечивает фазовый сдвиг, интерферирует на двух смежных участках рельефа, что позволяет получить полосы засветки меньше дифракционного предела [1]. Так группой Zhi-Yuan Li, получены элементы с толщиной линии около 50 нм [2].

**Целью работы** является подтверждение возможности преодоления дифракционного предела при использовании контактной литографии в присутствии фазовой маски.

Для получения интерференционной картины в данной работе используется гибкий силиконовый штамп с фазовой маской, изготовленный на основе первоначального образца. В качестве образцов используется нанесенный на стеклянную пластинку фоторезист ФП-20Ф, который экспонируется ртутной лампой через шаблон, после промывания, на нем образуется «ступенька». Высота «ступеньки» корректируется по средствам плазмохимического травления. После получения необходимой высоты (высота ступеньки должна обеспечивать требуемый фазовый сдвиг при заданном показателе преломления маски для используемой длины волны) изготавливалась гибкая фазовая маска, с которой проводились эксперименты по засвечиванию полимерного композита.

В ходе работы были проведены расчеты необходимой высоты выступа, для интерференции ультрафиолетового света с длиной волны  $\lambda=337$  нм, и материала штампа с показателем преломления  $n=1,445$ . Проведены эксперименты по подбору подходящих условий для нанесения фоторезиста требуемой толщины, его засвечивания, проявления и травления. Получены гибкие штампы на силиконе «Силастик Т4» и проведены эксперименты по засвечиванию полимерного композита через данные штампы с фазовой маской.

#### **Литература**

1. Сейсян Р.П. Нанолитография в микроэлектронике (обзор) // ЖТФ. – 2011. – Т. 81. – Вып. 8. – С. 1–14.
2. Zhi-Yuan Li et al. Optimization of elastomeric phase masks for near-field photolithography // Applied Physics Letters. – 2001. – V. 78. – № 17. – P. 2431–2433.

УДК 535.44

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЕРХКОРОТКИХ СУБИМПУЛЬСОВ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ДВУХ ФАЗОВОМОДУЛИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

**Ю.А. Комарова**

**Научный руководитель – аспирант А.Н. Цыпкин**

На сегодняшний день в мире одним из актуальных вопросов является решение проблемы, связанной с формированием последовательности сверхкоротких импульсов с большой частотой повторения и использованием ее в различных областях науки и техники. В связи с этим данной проблеме уделяется большое внимание. Использование таких последовательностей необходимо как в системах многоимпульсных возбуждений атомов в молекулах и твердых телах, так и в схемах высокого градиента плазменных ускорителей, а также во многих других приложениях. Последовательности сверхкоротких импульсов находят широкое применение в технологиях контролирования химических процессов в материалах с фемтосекундной точностью, в исследованиях молекулярного движения в твердых телах, для генерации перестраиваемого узкополосного терагерцового

электромагнитного излучения [1–3].

Существует большое разнообразие способов формирования последовательностей сверхкоротких оптических импульсов. Например, в работе [4] авторами было теоретически показана возможность формирования такой последовательности в результате взаимодействия двух сонаправленных фемтосекундных импульсов света с различным спектральным составом (первая и вторая гармоники Ti:S фемтосекундного лазера, исходная длительность составляла 20 фс) в нелинейной диэлектрической среде с нормальной дисперсией групповой скорости. Одна из самых простых техник формирования последовательности представлена в работе [5]. Авторы использовали экспериментальную установку, представляющую собой последовательно расположенные интерферометры Майкельсона, временная задержка в которых контролируется относительно нуля от первого интерферометра и составляет больше длительности исходного импульса. В схеме используются светоделители 50/50 и 4 интерферометра Майкельсона. Количество импульсов в последовательности зависит от количества интерферометров ( $n$ ) и увеличивается по закону  $2^n$ . Однако главным недостатком данного способа является то, что энергия импульсов уменьшается обратно пропорционально  $2^n$ .

Авторами работы [6] был придуман простой альтернативный способ формирования последовательности фемтосекундных импульсов, имеющий высокую контрастность. Способ основан на пропускании линейно поляризованного чирпированного лазерного импульса через многомодовую волновую пластинку, после чего он линейно поляризуется. Также в работе экспериментально была продемонстрирована возможность формирования последовательности, состоящей из 100 импульсов, длительность каждого импульса составляла около 200 фс. Управление последовательностью происходило с помощью многоволновой пластинки. При увеличении длины пластинки, увеличивалось количество импульсов в последовательности.

Основной целью данной работы является выявление закономерности формирования сверхкоротких субимпульсов при интерференции двух фазовомодулированных фемтосекундных оптических импульсов для временного сдвига между импульсами меньше их длительности.

В работе были проведены исследования интерференции импульсов с заданной линейной частотной модуляцией фазовомодулированных фемтосекундных импульсов. Было показано, что при изменении коэффициента частотной модуляции изменяется частота повторения импульсов в последовательности, при увеличении коэффициента частота повторения возрастает. Например, при изменении коэффициента частотной модуляции от 0,02 до 0,03 для длительности фазовомодулированного импульса 50 фс при временной задержке 30 фс, частота повторения изменяется с 38,5 ТГц до 51,3 ТГц.

На следующем этапе работы было численно смоделирована интерференция двух фемтосекундных импульсов с квазилинейной фазовой модуляцией, которые формировались на выходе из оптической среды. Расчеты численного моделирования распространения фемтосекундных импульсов в кварцевом стекле с параметрами  $N_0=1,45$ ,  $a=4,04 \times 10^{-42} \text{ с}^3/\text{м}$  и  $b=0$ , описывающими линейный показатель преломления среды и его дисперсию, и с параметром  $g$ , характеризующим безынерционную кубическую по полю нелинейность поляризационного отклика среды, были произведены с использованием программы LBullet. При исследовании интерференции двух фазовомодулированных импульсов полученные данные обрабатывались в программе Mathcad. В результате было показано формирование последовательности сверхкоротких оптических импульсов с терагерцовой частотой повторения и выявлено, что при увеличении дистанции распространения импульсов увеличивается частота повторения импульсов в последовательности. Например, при увеличении дистанции распространения с 4 до 6 мм с постоянной длительностью импульса 50 фс на входе в оптическую среду, частота повторения импульса в последовательности увеличивается с 55,6 ТГц до 63,5 ТГц. Это обусловлено увеличением длительности

фазовомодулированного импульса на выходе из среды от 90 до 120 фс.

Также был проведен эксперимент по исследованию интерференции двух фемтосекундных импульсов с квазилинейной фазовой модуляцией на выходе из оптической среды. В качестве оптической среды выступало кварцевое стекло. В результате эксперимента была сформирована последовательность сверхкоротких импульсов. Полученные результаты были обработаны и сравнены с теоретическими.

### Литература

1. Kruger E. Absorption spectra of pulse-train-excited sodium two-level atoms // J. Opt. Soc. Am. B. – 1995. – V. 12. – P. 15.
2. Weiner A.M., Leaird D.E., Wiederrecht G.P. and Nelson K.A. Femtosecond Pulse Sequences Used for Optical Manipulation of Molecular Motion // Science. – 1990. – V. 247. – P. 1317–1319.
3. Umstadter D., Esarey E. and Kim J. Nonlinear Plasma Waves Resonantly Driven by Optimized Laser Pulse Trains // Phys. Rev. Lett. – 1994. – V. 72. – P. 1224.
4. Bakhtin M.A., Kozlov S.A. Generation of the discrete spectral supercontinuum in two intensive ultrashort pulses interaction // Optical Memory and Neural Network. – 2006. – V. 15. – № 1. – P. 1–10.
5. Craig W. Siders, Jennifer L.W. Siders, Antoinette J. Taylor, Sang-Gyu Park, and Andrew M. Weiner Efficient high-energy pulse-train generation using a 2n-pulse Michelson interferometer // Appl. Opt. – 1998. – V. 37. – № 22. – P. 5302–5305.
6. Robinson T., O’Keeffe K., Landreman M., Hooker S.M., Zepf M. and Dromey B. Simple technique for generating trains of ultrashort pulses // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – № 15. – P. 2203–2205.

УДК 537.621.39

## АНИЗОТРОПНЫЕ ДИАМАГНИТНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЗАМКНУТЫХ КОЛЕЦ

А.К. Крылова, М. Лапин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., гл.н.с. П.А. Белов

В последние десять лет начали создаваться метаматериалы – новые материалы с необычными и полезными свойствами, представляющие собой периодическую решетку из искусственных элементов, играющих роль «атомов». В зависимости от поставленных задач можно выбрать внутреннюю структуру «мета-атомов» и способ их периодического размещения. Например, метаматериалы на основе разомкнутых кольцевых резонаторов обладают резонансными магнитными свойствами и могут применяться для достижения отрицательного показателя преломления [1]. Метаматериалы могут использоваться не только для получения резонансных свойств, но и, например, для создания искусственного диамагнетика. В природе не существует диамагнетиков с магнитной проницаемостью, заметно отличающихся от единицы, но для практического применения было бы полезным использовать материалы с сильным диамагнетизмом.

**Целью работы** являлось исследование возможности создания метаматериала на основе замкнутых колец, обладающего диамагнитными свойствами. Для получения требуемых свойств мы использовали замкнутые проводящие кольца, упорядоченные в решетке с разной внутренней симметрией. Эффективные материальные параметры этих решеток исследовались по аналогии с методикой, приведенной в [2].

Для изучения эффективных материальных параметров магнитной проницаемости, была выведена формула, связывающая ее параметры решетки и характеристики кольца (радиус

кольца, проводимость, толщина провода). С использованием этой формулы, был проведен общий параметрический анализ влияния типа решетки и ее параметров, а также геометрических характеристик «мета-атомов» на минимальное значение магнитной проницаемости. Мы выяснили, что наименьшие значения магнитной проницаемости достигаются при сдвинутой гексагональной решетке с максимальной плотно упаковкой колец.

На основе нашего исследования можно сделать вывод, что метаматериал из замкнутых проводящих колец пригоден для получения магнитной проницаемости 0,05. Мы нашли оптимальные параметры метаматериала необходимые для сильного диамагнетизма. Теоретический анализ, приведенный в этой работе, справедлив в широком диапазоне частот от радиоволн и до инфракрасного излучения [3]. Мы предполагаем, что метаматериал с такими диамагнитными свойствами может быть полезен для магнитной левитации. Результаты этих исследований будут способствовать изучению материалов с магнитной проницаемостью вблизи нуля.

### **Литература**

1. Веселаго В.Г. Волны в метаматериалах: их роль в современной физике // УФН. – 2011. – Т. 181. – № 11. – С. 1201–1205.
2. Gorkunov M., Lapine M., Shamonina E. and Ringhofer K.H. Effective magnetic properties of a composite material with circular conductive elements // Eur.Phys. J. B. – V. 28. – 2002. – P. 263–269.
3. Lapine M., Krylova A.K., Belov P.A., Poulton C.G., McPhedran R.C. and Kivshar Y.S. Broadband diamagnetism in anisotropic metamaterials // Phys. Rev. B. – 2013. – V. 87. – P. 024408.

УДК 535.317.1: 778.38

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММ**

**П.В. Кудрявцев**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент О.В. Андреева**

Регистрирующая среда для записи объемных голограмм, имеющая толщину порядка миллиметра, должна обеспечивать неизменность структуры голограммы в процессе ее обработки и эксплуатации. Температура является одним из основных параметров внешней среды, влияние, которого необходимо учитывать. Изменение температуры приводит к изменению, как линейных размеров образца, так и к изменению его показателя преломления: коэффициент линейного расширения полиметилметакрилата, из которого изготовлены образцы материала «Диффен» составляет  $\approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , изменением показателя преломления  $\approx 1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , (силикатное стекло имеет данные коэффициенты на порядок меньше).

**Целью работы** является исследование изменений, происходящих при считывании голограмм, которые вызваны изменением температуры окружающей среды.

Влияние температуры оценивалось с помощью низкочастотной интерференционной картины. Голограмма устанавливается в положение, при котором производилась ее запись, и освещается двумя когерентными пучками, при  $\lambda=488 \text{ нм}$ . Каждый из падающих пучков дифрагирует на голографической решетке, образуя низкочастотную интерференционную картину.

Полученные интерферограммы и результаты их обработки показали, что при изменении температуры образца от 21 до 28 град, период низкочастотной интерференционно картины изменяется от 1,8 мм до 0,7 мм, что соответствует изменению угла дифракции при считывании

голограмм 0,3 мрад. Следует отметить, что период интерференционной картины, измеренный до начала проведения измерений и после остывания образца до комнатной температуры не изменился (в пределах погрешности измерений).

Проделанная работа является важным промежуточным результатом. Предполагается проверка результатов при использовании другой методики, в более длинноволновой спектральной области. Планируется использование схемы с расходящимся пучком, излучение HeNe-лазера с  $\lambda=633$  нм, и проведение измерений в том же диапазоне температур, и получение зависимости изменения угла дифракции от температуры.

УДК 532.516.5

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ**

**Д.А. Кучер**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин**

Гидротермальный синтез является одним из методов получения наночастиц. Для организации наиболее эффективного процесса синтеза, необходимо иметь представление о пространственно-временных характеристиках поля температур в автоклаве. Эти характеристики можно получить, проведя численный эксперимент. Поле температур в процессе гидротермального синтеза формируется за счет свободной конвекции. Свободная конвекция – движение, возникающее в неравномерно нагретой жидкости в поле массовых сил [1].

Конечной целью исследования является получение модели автоклава, в котором происходит процесс гидротермального синтеза. Первый этап заключается в описании математической модели свободной конвекции в замкнутой полости. Для этого введена прямоугольная область, границы которой являются стенами полости. Физической интерпретацией модели является кювета с жидкостью, в которой предусмотрен нагревательный элемент. В работе стоит задача продемонстрировать результаты моделирования свободной конвекции на примере модельного объекта.

Свободно конвективные течения возникают вследствие изменений плотности, обусловленных процессами тепло- или массообмена в поле гравитационных сил. Разность плотностей создает выталкивающую силу, под действием которой возникает течение. При охлаждении нагретого тела окружающим воздухом такое течение наблюдается в области, окружающей тело. К естественной конвекции относят также обусловленные выталкивающей силой течения при отводе теплоты в атмосферу или другую окружающую среду, циркулирующую в нагретых помещениях, в атмосфере или водоемах, течения, связанные с выталкивающей силой.

Для построения математической модели процесса используется система дифференциальных уравнений Навье-Стокса. Поскольку задача решается в двумерном виде, то система уравнений представлена в переменных «функция тока–вихрь», что предоставляет преимущества перед записью в естественных переменных[1]. Предполагается, что описываемый процесс не зависит от времени, и система дифференциальных уравнений описывает конвективный процесс для стационарного случая. При моделировании для функции тока на стенках задается условия прилипания, а для температуры условие второго рода. Решение ищется при помощи релаксационного метода. Для неразвитой конвекции параметр релаксации принимается равным единице, что сводит схему к методу Зейделя. Для аппроксимации стационарных уравнений системы используется монотонная консервативная схема, дающая второй порядок точности.

В работе произведена формализация описанной схемы в системе компьютерной

алгебры Mathcad. Рассчитано поле температур модельного объекта. Проведены различные тесты схемы, а также сравнение численного и реального экспериментов [2, 3].

### **Литература**

1. Берковский Б.М., Полевилов В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции. – Минск: Университетское, 1988. – 167 с.
2. Манухин Б.Г., Кучер Д.А., Андреева О.В., Чивилихин С.А. Исследование процесса конвективного теплопереноса жидкости методами цифровой голографической интерферометрии // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. – М: НИЯУ МИФИ. – 2013. – С. 271–272.
3. Andreeva O.V., Kiririlova S.A., Manuhin B.G., Kucher D.A., Chivilikhin S.A. A technique for investigation of the thermal field during the hydrothermal synthesis of nanoparticles in an autoclave with optical access // 15-th International symposium of flow visualization. – 2012. – Minsk: Belarus. – P. 143.

УДК 004.27:530.145

## **РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КВАНТОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЧИПАХ**

**Е.П. Ляхов**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин**

Обработка информации, закодированной в обладающих эффектами параллелизма и запутанности квантовых системах предполагает значительный рост вычислительной мощности, что необходимо для исследования сложных многочастичных систем, например в микробиологии. Несмотря на некоторые экспериментальные успехи в этой области, возможность применения квантовых компьютеров с большим количеством кубитов сталкивается с определенными трудностями. В этом направлении была предложена золотая середина между универсальным квантовым и классическим компьютерами, так называемый бозонный компьютер.

Он представляет собой оптический чип с фотонными цепями – структурой заглубленных волноводов, где точки их сближения – перетяжки – выполняют функцию светоделителей. Бозонный компьютер выполняет, в отличие от универсального квантового, строго конкретные задачи, – к примеру, алгоритм Шора или вычисление перманента матрицы, т.е. задачи, представляющие трудности для классических вычислений.

В устройство на входы подается набор одиночных фотонов, которые взаимодействуют между собой в цепи, получая измененный результирующий набор на выходе. На практике, расчет выходных данных представляет собой вычисление ряда перманентов матриц рассеяния светоделителей.

**Целью работы** являлось проведение аналитического расчета и численного моделирования распространения электромагнитной волны в фотонных цепях различных конфигураций и определение на их основании, посредством перехода от классического когерентного света к квантовой системе, оптимальных конфигурационных параметров квантового логического чипа.

Сам чип выполнен на подложке из кремниевого стекла, причем разница показателей преломления одномодовых волноводов и подложки мала. Помимо толщины волноводов и расстояния между ними в точке максимального сближения, важным конфигурационным параметром, влияющим на потери, является радиус кривизны сближения волноводов.

В ходе работы были проведены аналитическое исследование и численное моделирование фотонных цепей. Изучено влияние длины перетяжки волноводов и радиусов

их кривизны на матрицы рассеяния светоделителей. Выявлена зависимость зазора между волноводами и размером разности показателей преломления подложки и волновода.

УДК 547.97:535.8

## **ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ**

**Р.М. Магомеднабиев**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Ю.Э. Бурункова**

Введение наночастиц в полимерные матрицы является одним из способов получения гибридных материалов с новыми свойствами. Неорганические наночастицы внедренные в полимеры формируют нанокомпозиты, на которых оптические, механические, электрические и другие свойства могут быть скорректированы путем смещения состава мономеров, а также природой, размером и концентрацией части. И свою очередь присутствие неорганических наночастиц влияет на формирование структуры полимера. Несмотря на многочисленные исследования, основной проблемой получения гибридных композитов является агрегации наночастиц к органической среде.

**Целью исследования** было получение гибридных композитов на основе наночастиц  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}$  с низким рассеянием света и максимальной концентрацией неорганических частиц. Другие эксплуатационные характеристики материала не должны ухудшаться.

Были разработаны однородные, прозрачные, низкорассеивающие полимерные нанокомпозиты (полимерные пленки толщиной от 5 до 30 мкм) методом УФ-отверждения. Сначала поверхность наночастиц модифицировали для предотвращения образования крупных агрегатов, а затем вводили смесь мономеров и далее проводили отверждение. В качестве полимерной матрицы были использованы акрилаты с различными показателями преломления (1,456–1,557). Было исследовано влияние природы и концентрации частиц на оптические и механические свойства нанокомпозитов. Методом ИК-спектроскопии и с помощью оптического микроскопа была изучена внутренняя структура нанокомпозитов. Были изучены фотокаталитические свойства наночастиц в полимерных средах.

В зависимости от состава матрицы может быть получен материал либо с высоким показателем преломления и твердостью либо слои для записи голографических решеток. Полученный материал был использован для записи голограмм, дифракционная эффективность которых 20%.

Эти материалы предназначены для применения в интегрированных оптических системах, чипах оптической связи в нанолитографии.

УДК 535.3

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОКОГЕРЕНТНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

**М.В. Мельник**

**Научный руководитель – аспирант А.Н. Цыпкин**

Генерация суперконтинуума в оптических волокнах хорошо изученный процесс, и может включать различные нелинейные эффекты, такие как само- и кросс-модуляции, солитонные эффекты, комбинационное рассеяние, модуляционная неустойчивость и четырехволновые смешения. Большинство спектральных суперконтинуумов генерируются в

области аномальной дисперсии групповой скорости, в данном случае в процессе уширения спектра доминируют солитонные эффекты [1, 2]. Эти эффекты приводят к тому, что спектр становится чувствительным к импульсу, что в свою очередь приводит к низкой согласованности между соседствующими импульсами, а, следовательно, и низкой когерентности.

Избавиться от этого можно двумя способами, либо тщательно выбирать входные параметры, либо генерировать спектральный суперконтинуум в области с нормальной дисперсией групповых скоростей, в котором солитоны формироваться не могут, а генерация фемтосекундного спектрального суперконтинуума происходит в основном из-за фазовой самомодуляции [3]. Фазовая самомодуляция является внутренним детерминированным процессом, который сохраняет согласованность входных импульсов. Поэтому спектральный суперконтинуум сгенерированный в этом режиме обладает высокой спектральной согласованностью и стабильностью. Однако в этом случае требуется большая интенсивность лазерных импульсов.

В настоящее время вопрос когерентности считается почти полностью проработанным. Однако работ по исследованию времени когерентности обнаружено не было. А знание о времени когерентности спектрального суперконтинуума может быть использовано, например, для расчета максимального разрешения оптической когерентной томографии.

Основной целью работы является выявление оптимальных условий генерации высококогерентного фемтосекундного спектрального суперконтинуума в оптических волокнах на основе определения времени когерентности исследуемого излучения.

Модель распространения интенсивного светового импульса в оптической среде учитывает только безынерционную кубическую по полю нелинейность поляризованного отклика среды. В таких условиях динамика электрического поля светового импульса может быть описана уравнением [4]. На основе данного уравнения мной было численно смоделировано распространение светового импульса в оптическом волокне при генерации спектрального суперконтинуума с использованием программы Lbullet, полученные данные обрабатывались в программе Mathcad. Время когерентности определялось из интерференционного сигнала, который являлся результатом расчета энергии суммарного интерференционного поля двух фемтосекундных спектральных суперконтинуумов на выходе из среды в момент, когда распространение начинало проходить в линейном режиме, для временных задержек между импульсами от нуля до времени, когда интерференционный сигнал становился равен нулю.

По результатам моделирования была определена зависимость времени когерентности светового импульса от входной длительности, интенсивности и длины волны фемтосекундного светового импульса. Как и предполагалось, при увеличении длительности входного импульса время когерентности увеличивается. В области нормальной групповой дисперсии, существует максимум времени когерентности на длине волны 800 нм, после чего величина времени когерентности значительно уменьшается при смещении к области аномальной групповой дисперсии. Однако, в области нулевой групповой дисперсии (~1260 нм для оптического кварцевого волокна) имеется скачок увеличения времени когерентности, после чего величина времени когерентности продолжает убывать и достигает своего минимума в области аномальной групповой дисперсии оптической среды. Например, на длине волны 800 нм время когерентности равно 26 фс, при увеличении длины волны время когерентности падает до 8 фс на длине волны 1180 нм. В области нулевой групповой дисперсии время когерентности резко увеличивается до 20 фс, после чего опять уменьшается, достигая минимума в 4 фс на длине волны 1560 нм.

Следовательно, использование спектрального суперконтинуума генерируемого в области нормальной групповой дисперсии, является целесообразным для использования его, например, в оптической когерентной томографии, системах передачи информации из-за высокого значения времени когерентности.



## Литература

1. Islam M.N., Sucha G., Bar-Joseph I., Wegener M., Gordon J.P., Chemla D.S. Femtosecond distributed soliton spectrum in fibers // J. Opt. Soc. Am. B. – 1989. – V. 6. – №. 6. – P. 1149–1158.
2. Herrmann J., Griebner U., Zhavoronkov N., Husakou A., Nickel D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P. St. J., Korn G. Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V. 88. – №. 17. – P. 173901 (4 pages).
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 324 с.
4. Шполянский Ю.А. Сценарии развития фемтосекундного спектрального суперконтинуума // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб, 2000. – С. 136–153.

УДК 535.42; 535.417; УДК 535.338.1

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА В ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДАХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ФАЗЕ

С.С. Налегав, С.Э. Путилин, Н.В. Петров

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.Г. Беспалов

Нелинейное оптическое пространственно-временное преобразование поля интенсивных сверхкоротких лазерных импульсов в диэлектрических средах приводит к генерации излучения с широким непрерывным спектром. Это явление известно как генерация белого света, или генерация спектрального суперконтинуума (СК) [1]. Спектральный суперконтинуум может быть использован в итерационных методах восстановления фазы волнового фронта как один из способов создания необходимых для таких методов вариаций в измеренных распределениях интенсивности.

При регистрации изображения в виде пространственного распределения интенсивности его светового поля происходит потеря важной информации о фазе рассеянной объектом волны. Возникает так называемая фазовая проблема в оптике: проблема восстановления формы волнового фронта объекта из измеренных распределений интенсивности [2].

В итерационных методах восстановления фазовой информации на основе измеренных распределений интенсивности одним из варьируемых параметров может служить длина волны излучения, освещающего исследуемый объект. Посредством последовательного изменения рабочей длины волны в системе излучения и последующего измерения соответствующих распределений интенсивности возможен расчет информации о фазе. При этом, генерация дополнительных спектральных компонент может быть реализована посредством использования каких-либо нелинейных преобразований первичного излучения. Например, на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния [3], или параметрической генерации [4].

Как показано в [5, 6], использование нелинейных оптических эффектов в задачах восстановления информации о фазы волнового фронта открывает возможности по разработке новых методов микроскопии с пределом разрешения превосходящим дифракционный за счет восстановления динамики поля, претерпевающего нелинейные превращения, а также восстановления пропущенных пространственных частот [6] (хотя, модуляционная неустойчивость и шум могут помешать достигнуть этого). Поэтому определение разрешения, достижимого на практике является все еще открытой задачей.

В работе исследовались особенности и возможные ограничения использования излучения спектрального суперконтинуума, а также нелинейных оптических эффектов в

задачах восстановления фазы волнового фронта при регистрации на матричные приемники оптического излучения (КМОП- или ПЗС-типа). Эксперименты по генерации СК производились при использовании анизотропных сред, обладающих  $\chi^{(2)}$ -нелинейностью, и фемтосекундной лазерной системы на кристаллах сапфира, активированных титаном при возбуждении оптическими импульсами излучения на длине волны 830 нм, с длительностью 40–50 фс и энергией 1,0–1,5 мДж (плотность мощности излучения накачки внутри среды с  $\chi^{(2)}$ -нелинейностью составляла при генерации  $\sim 2$  ТВт/см<sup>2</sup>).

Получены оценки зависимостей качества восстановления  $E/E_0$  (в относительных величинах нормированного среднеквадратического отклонения) от соответствующих ключевых параметров, на него влияющих: спектральной ширины  $\Delta\lambda$  вырезаемых из общего спектра СК спектральных компонент и величины гауссового шума, вносимого в процессе записи распределений интенсивности. Судя по полученным в процессе моделирования данным, для используемого нами в данной работе метода восстановления фазы спектральная ширина излучения при записи распределений интенсивности не должна превышать относительного значения  $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,1-0,25$ .

Работа выполнена в рамках гранта № 14.В37.21.1561.

### Литература

1. Alfano R.R. The Supercontinuum Laser Source: fundamentals with updated references. – N.Y.: Springer-Verlag 2006. – 552 p.
2. Кузнецова Т.И. О фазовой проблеме в оптике // УФН. – 1988. – № 154. – С. 677–690.
3. Петров Н.В., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Солдатов Ю.И. Исследования двухдлинноволновой цифровой спекл-фотографии для анализа фазовых неоднородностей в гидросфере // В сб. трудов VI международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009». – 2009.
4. Kolenovic E. Correlation between intensity and phase in monochromatic light // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – V. 22. – P. 899–906.
5. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 328 с.
6. Jia S., Wan W., J. Fleischer W. Forward four-wave mixing with defocusing nonlinearity // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – P. 1668–1670.
7. Barsi C., Wan W., Fleischer J.W. Imaging through nonlinear media using digital holography // Nature Photonics. – 2009. – V. 3. – P. 211–215.

УДК 535.42

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ И ДАЛЬНЕЙ ЗОНАХ ДИФРАКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Т.Ю. Николаева

Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. Н.В. Петров

**Введение.** В последнее время большую популярность приобрели безлинзовые вычислительные методы формирования изображений, в которых изображение объекта восстанавливается с помощью численных процедур. К таким методам относится метод восстановления фазы, основанный на регистрации распределений интенсивности дифрагировавшего электромагнитного поля. Для безлинзовых методов формирования изображений интерес представляет область дифракции Френеля, или ближняя зона, поскольку именно здесь сосредоточены высокие пространственные частоты, отвечающие за

мелкие детали в изображении объекта. Возможность регистрации последних непосредственно связана с минимальным размером пикселя регистрирующей матрицы, а также с размером сетки, на которую разбивается волновое поле при численных вычислениях.

**Постановка проблемы, цель работы.** Продольные картины дифракции представляют собой двумерные распределения интенсивности, формируемые по мере удаления от объекта. В фокальной плоскости оптических систем, продольные распределения интенсивности весьма полно характеризуют качество изображений удаленных предметов, а также их условия фокусировки. К их построению прибегают при исследовании фокусирующих характеристик зонных пластинок, оптимизации дифракционных оптических элементов, разработке методов исследования аберраций. В данной работе, продольные картины дифракции используются для выявления областей локализации высоких пространственных частот и наблюдения процесса их перераспределения в пространстве по мере распространения волнового поля.

**Базовые положения исследования.** Исследование продольных распределений интенсивности проводилось с использованием математического аппарата скалярной теории дифракции Кирхгофа. Для численного расчета распространения волнового поля использовался метод распространения углового спектра плоских волн [1], с помощью которого строились продольные распределения интенсивности.

Диапазон расстояний от объекта до плоскости регистрации, для которых применим этот метод расчета, ограничен сверху неравенством:

$$l < l_0 = \frac{\Delta x D}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние от плоскости объекта до плоскости регистрации;  $\Delta x$  – размер пикселя в плоскости регистрации;  $D$  – линейный размер апертуры;  $\lambda$  – длина волны. Этот диапазон может быть расширен, с помощью процедуры заполнения нулевыми элементами, при которой происходит увеличение размера объект, посредством добавления пикселей с нулевыми значениями яркости.

Вид картины дифракции можно охарактеризовать с помощью числа Френеля [2]. Помимо числа Френеля оказалось удобным введение дополнительной информационной характеристики. Учитывая возможности увеличения области расчета методом углового спектра путем заполнения нулевыми элементами, вводится понятие дифракционного интервала  $N_{sb}$ :

$$N_{sb} = \log_2 b, \quad (2)$$

где  $b$  – коэффициент заполнения нулями.

Большое количество современных методов компьютерной оптики основано на регистрации распределений интенсивности поля фоторегистрирующими матрицами. Использование матричных фотоприемников в различных цифровых методах накладывает некоторые ограничения: низкое пространственное разрешение и конечный размер регистрирующей матрицы. Еще одним важным параметром, определяющим характеристики фотоприемников, является коэффициент заполнения матричного фотоприемника (филл-фактор), определяемый, согласно [3], как отношение площади фоточувствительной области фотоячейки ко всей площади фотоячейки.

**Результаты.** В данной работе представлена информация, касающаяся потери электромагнитным полем высоких пространственных частот в процессе его распространения в свободном пространстве. Продольные картины дифракции на границах простейших апертур наглядно иллюстрируют модель распространения углового спектра плоских волн. В случае произвольного полупрозрачного транспаранта каждая его точка рассматривается как

источник излучения набора плоских волн с различными пространственными частотами, каждая из которых распространяется в своем определенном направлении. Наиболее высокочастотные плоские волны распространяются под большими углами относительно оптической оси, что и было отслежено на продольных дифракционных картинах, когда в качестве объекта были взяты амплитудные решетки, обладающие лишь одной пространственной частотой.

В работе проанализировано влияние дискретизации, возникающей при численных расчетах распространения волнового поля, и при регистрации его на матричные фотоприемники с ограниченным размером регистрирующей области на содержание высоких пространственных частот. Число различимых зон Френеля на поперечном распределении интенсивности зависит от размера сетки на апертуре, используемого при разбиении. Увеличение частоты дискретизации на объекте приводит к смещению границы первого дифракционного интервала влево, и сопровождается появлением новых, более высоких пространственных частот на продольном распределении интенсивности. Установлено, что учет особенностей архитектуры матричного фотоприемника при моделировании процессов дифракции волнового поля позволяет разрешить более высокие пространственные частоты, по сравнению с традиционно выполняемым разбиением на узлы квадратной сетки.

### **Литература**

1. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. Пер. с англ. / Под. ред. Косоурова Г.И. – М.: Мир, 1970. – 74 с.
2. Siegman A.E. Lasers, University Science, Mill Valley, Calif. – 1986. – P. 724–726.
3. Holst G. Imaging system fundamentals // Optical Engineering. – 2011. – V.50 (5). – P. 052601-1.

УДК 532.5.013.4

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦЫ**

**Т.Н. Погосян**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. С.А. Чивилихин**

В работе теоретически исследуется развитие возмущения формы поверхности наночастицы в процессе диффузионного роста. Невозмущенная поверхность считается идеальной сферой. Массовый диффузионный поток способствует нарастанию объема сферы и развитию возмущений ее поверхности.

Наряду с развитием малых возмущений свободной поверхности за счет возмущения массового потока, учитывается и релаксация этих возмущений благодаря действию капиллярных сил. При расчете релаксации формы поверхности используются эффективные значения вязкости и коэффициента поверхностного натяжения у наночастицы.

Для описания массового потока к свободной поверхности решается квазистационарное уравнение диффузии, концентрация находится путем решения уравнения Лапласа в сферических координатах, причем учитываются только осесимметричные возмущения. Релаксация формы поверхности описывается согласно [1]. Возмущение формы поверхности представляется в виде разложения по полиномам Лежандра. Коэффициенты разложения имеют зависимость от времени и индекса  $n$  – степень полинома Лежандра.

При определенных соотношениях между параметрами системы возникает область индексов  $n$ , которая соответствует потере устойчивости поверхности наночастицы. Так, для больших индексов  $n$ , если невозмущенная скорость роста радиуса сферы больше коэффициента поверхностного натяжения деленного на удвоенное эффективное значения

вязкости, все коэффициенты определяют неустойчивые гармоники, причем скорость развития неустойчивости возрастает с ростом индекса, что соответствует формированию фрактальной структуры поверхности.

В работе выявлены режимы, при которых поверхность наночастицы теряет устойчивость, и исследована динамика развития неустойчивости свободной поверхности.

#### **Литература**

1. Hrna P. and Carter C.E. Capillarity-induced spheroidization of nearly spherical amorphous bodies by viscous flow // Journal of Non-Crystalline Solids. – 1984. – V. 63. – P. 391–412.

УДК 535.3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

**А.И. Посников**

**Научный руководитель – к.т.н. В.Н. Баушев**

**Объект исследования.** Оптоволоконный кабель FRP (Fiber Reinforced Polymer). Кабель представляет собой конструкцию в двух вариантах: одно или два одномодовых оптических волокна, усиленные полимерными силовыми элементами. Оптические волокна представляют собой кварцевое стекло, легированное германием. Диаметр одного одномодового волокна стандарта G.657 составляет 9/125 мкм. Диапазон рабочих температур: от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

**Описание ситуации в предметной области.** За последние пару десятков лет компьютерная техника развивается очень стремительно – возрастают объемы носителей данных, увеличивается быстродействие систем, вычислительные мощности и т.д. Тем временем, информация, которая накапливается на компьютерах, нуждается в передаче и обработке, для чего необходимо стабильное и быстрое соединение сети. На данный момент связующим звеном между оптической сетью и персональным компьютером, чаще всего используется медный кабель, пропускная способность канала которого в тысячу раз меньше, по сравнению с оптическим волокном. Такая разница при коммутации значительно снижает эффективность передачи, обработки данных, и искажение информационного сигнала. Переход от связующего звена в виде медного кабеля к оптическому волокну позволит открыть новые возможности работы в сети.

**Цель работы** станет исследование построения оптической сети до персонального компьютера с использованием оптоволоконного кабеля FRP. В рамках этого исследования будет рассчитана и изучена оптическая сеть новой архитектуры, ее свойства, условия использования, положительные и отрицательные стороны.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАЗОМКНУТЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А.П. Слобожанюк

Научный руководитель – д.ф.-м.н., гл.н.с. П.А. Белов

Термин «метаматериал» впервые обнаруживается в работах Дэвида Смита [1, 2] применительно к искусственным периодическим структурам с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями (левосторонние среды). В отличие от обычных материалов, свойства которых определяются атомами и молекулами, из которых они состоят, свойствами метаматериалов можно управлять за счет специальной формы и компоновки искусственно создаваемых «мета-атомов». Создание метаматериалов позволило существенно расширить представления об электромагнетизме, например, была показана возможность отрицательного преломления, инверсии: эффекта Доплера, излучения Черенкова и эффекта Гуса-Хенхена. Метаматериалы находят применение для разнообразных приложений: от субволнового разрешения [3] и трансформационной оптики [4] до перестраиваемых и активных материалов [5], фотоники [6] и плазмоники [7].

Недавно был предложен оригинальный подход к созданию метаматериала, магнитный резонанс которого управляется светом [8]. Был исследован одиночный разомкнутый кольцевой резонатор, нагруженный варакторным диодом, постоянное смещение на котором обеспечивалось фотодиодом, работающем в фотогальваническом режиме. Было показано, что при увеличении освещенности магнитный отклик резонатора смещается вверх по частоте [8].

В данной работе мы рассматриваем разомкнутый кольцевой резонатор подобный резонатору из [8], но изменяем ориентацию фотодиода для того, чтобы получить положительное напряжение смещения на варакторном диоде, а также создаем нелинейный отклик с помощью варакторного диода. Показано, что магнитный отклик кольцевого резонатора перестраивается вниз по частоте при увеличении освещенности. Кроме того, исследован нелинейный отклик разработанного резонатора при изменении мощности возбуждающего сигнала. С увеличением мощности резонансный отклик сдвигается вверх по частотному диапазону. Экспериментально показано нестабильное поведение коэффициента отражения при больших уровнях мощности возбуждаемого сигнала, которое перестраивается при изменении освещенности.

Изучаемый кольцевой резонатор представляет собой два вложенных друг в друга разомкнутых металлических кольца. Для обеспечения перестройки характеристик резонатора используется варакторный диод, включенный в дополнительный разрыв во внешнем кольце. Для подачи постоянного смещения на варакторный диод используются два последовательно включенных фотодиода, которые работают в фотогальваническом режиме. Для развязки по постоянному и переменному току используются индуктивности, включенные последовательно с фотодиодами. Эффективная развязка обеспечивается, если собственный резонанс индуктивности совпадает или близок к резонансной частоте всего резонатора.

Для того, чтобы измерить магнитный отклик кольцевого резонатора управляемого светом, нужно возбудить его магнитным полем. Специально для этого была изготовлена симметричная микрополосковая кольцевая антенна. Она располагалась на расстоянии 5 мм от поверхности кольцевого резонатора и подсоединялась к векторному анализатору цепей при помощи коаксиального кабеля. Для проведения нелинейных измерений, использовался микроволновый усилитель, который позволял изменять мощность сигнала от 0 дБм до 16 дБм.

Предложенные в работе кольцевые резонаторы могут быть использованы для разработки метаматериалов нового типа с нелинейным откликом перестраиваемым внешним световым источником.

## Литература

1. Smith D.R., Padilla W., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C. and Shultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – V. 84. – P. 4184–4187.
2. Shelby R., Smith D.R. and Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction // *Science.* – 2001. – V. 292. – P. 77–79.
3. Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – V. 85. – P. 3966–3969.
4. Pendry J.B., Schurig D. and Smith D.R. Controlling electromagnetic fields // *Science.* – 2006. – V. 312. – P. 1780–1782.
5. Boardman A.D., Grimalsky V.V., Kivshar Y.S., Koshevaya S.V., Lapine M., Litchinitser N.M., Malnev V.N., Noginov M., Rapoport Y.G. and Shalaev V.M. Active and tunable metamaterials // *Lasers Photonics Rev.* – 2011. – V. 5. – P. 287–307.
6. Shalaev V.M. Optical negative-index metamaterials // *Nature Photonics.* – 2006. – V. 1. – P. 41–48.
7. Schuller J.A., Barnard E.S., Cai W., Jun Y.C., White J.S. and Brongersma M.L. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation // *Nat. Mater.* – 2010. – V. 9. – P. 193–204.
8. Kapitanova P.V., Maslovski S.I., Shadrivov I.V., Voroshilov P.M., Filonov D.S., Belov P.A. and Kivshar Y.S. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – V. 99. – P. 251914.

УДК 535.14, 57.043

## СТИМУЛЯЦИЯ РОСТА НЕЙРИТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕРАГЕРЦОВОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.И. Сулацкий

Научный руководитель – аспирант М.В. Цуркан

В работе проведен обзор литературы, посвященный воздействию терагерцового (ТГц) излучения на нервные клетки. Также в работе представлены результаты первого этапа исследований, выполненных совместно с Институтом физиологии им. И.П. Павлова РАН, свидетельствующие о стимулирующем воздействии терагерцового излучения на рост нервных клеток.

В последнее время растет потребность в более детальном изучении возможных биологических эффектов ТГц-излучения, как положительного, так и отрицательного характера. В результате этого увеличивается число работ, описывающих использование источников ТГц-излучения, в том числе биологии и медицине [1].

Статьи, посвященные биологическим эффектам ТГц-излучения можно разделить на три группы: эффекты на молекулярном уровне, эффекты на клеточном уровне и эффекты на организменном уровне. Так как исследования направлены на изучение влияния ТГц-излучения на нервные клетки, то хотелось бы подробнее рассмотреть работы, целью которых было изучение эффектов данного излучения на схожие биологические объекты.

В работе [2] отмечается нарушение морфологии мембран и внутриклеточных структур и падение мембранного потенциала нейронов при высокой плотности мощности (30 мВт/см<sup>2</sup> и выше). В другой работе этих авторов этот же объект подвергался облучению на частоте порядка 2 и 2,31 ТГц при средней мощности от 0,5 до 20 мВт/см<sup>2</sup> и экспозиции 10 с [3]. С помощью красителей было показано, что излучение на частоте 2,31 ТГц может вызвать обратимые нарушения барьерных свойств мембран нейронов. Увеличение плотности мощности более 10 мВт/см<sup>2</sup> с той же частотой привело к резкому снижению жизнеспособности клеток (около 80%). Излучение с частотой 2 ТГц не показывало таких результатов.

С помощью использования метода цельноклеточной фиксации напряжения были изучены изменения  $K^+$  токов и  $Ca^{2+}$  токов во время облучения с частотой 0,6 и 0,75 ТГц [4]. Использование этанола, уменьшающего тепловой эффект облучения, показало, что изменения амплитуды и кинетики данных токов были следствием повышения температуры.

Сильная реакция нейронов в корковой доле 13-ти и 16-ти дневных крыс была результатом воздействия излучения частотой 0,06 ТГц в течение 1 минуты при низкой плотности мощности (0,07; 0,28; 0,56 и 0,74 мВт) [5]. Исследователи наблюдали ослабление и увеличение нейронной активности с помощью методики фиксирования потенциала.

В работе [6] клеточные линии сенсорных нейронов (ND7/23) подвергались ТГц-облучению (0,14 ТГц) со средней мощностью 1–4 мВт/см<sup>2</sup>. При 2-х часов экспозиции у клеток снижается скорость производства резорфина от 40% до 50%. Впоследствии произошло некоторое оживление в сторону исходного состояния равного контрольному уровню производства резорфина, но уровень был ниже по сравнению с контрольными образцами.

Таким образом, вопрос о фундаментальном обосновании возможности использования ТГц-излучения для воздействия на биологические системы, в особенности на нервную, все еще открыт. Механизм данного воздействия до сих пор не изучен, в том числе не определены дозы и время облучения. В рамках данного вопроса на первом этапе необходимо выявить эффекты, возникающие в сложно организованных молекулярных системах – нервных клетках при действии такого излучения.

В этой связи работа была посвящена исследованию воздействия широкополосного импульсного ТГц-излучения на рост нейритов. В нашей работе исследовалась воздействие широкополосного импульсного ТГц излучения диапазона 0,05–2 ТГц на рост нейритов сенсорных ганглиев 10–12 дневных куриных эмбрионов [7]. Была разработана оптическая схема эксперимента с использованием фемтосекундного волоконного лазера EFOA-SH. Лазер работает в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 50 МГц на длине волны  $\lambda=1,56$  мкм. Типичная длительность одного импульса 125 фс. Мощность излучения 120 мВт. Излучение лазера проходило систему зеркал, перед тем как попасть на кристалл, оно стробировалось механическим модулятором с частотой 13 Гц. Затем фокусировалось линзой на кристалл InAs, помещенный в сильное магнитное поле. Мощность фемтосекундного излучения перед кристаллом InAs составляла 120 мВт. Лазерное излучение фемтосекундной длительности создает свободные носители заряда, движение которых в магнитном поле генерирует терагерцовое излучение. Фемтосекундное излучение, отраженное от кристалла, обрезалось с помощью фильтра из фторопласта. Расходящееся ТГц-излучение собиралось внеосевыми параболическими зеркалами и направлялось на чашку Петри с объектом.

В результате работы были получены данные, свидетельствующие о стимулирующем воздействии терагерцового излучения на нервные клетки. Обнаружена зависимость увеличения данного эффекта при уменьшении мощности используемого излучения. При мощности облучения 2 и 11 мВт изменение индекса площади относительно контрольного образца составило приблизительно 103 и 107 процентов соответственно. Эти результаты были приняты за изменения на уровне контроля. Увеличение индекса площади до 124 процентов ( $p<0,05$ ) было получено при мощности равной 0,9 мВт, что позволяет нам говорить об эффекте стимуляции клеточного роста.

### Литература

1. Sherwin M.S., Schmuttenmaer C.A., Bucksbaum P.H. eds. Opportunities in THz Science // DOE-NSF-NIH Workshop Report. – 2004.
2. Olshevskaya J.S., Ratushnyak A.S., Petrov A.K., Kozlov A.S., Zapara T.A. Effect of terahertz electromagnetic waves on neurons systems // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering. – 2008. – P. 210–211.



3. Olshevskaya J.S., Kozlov A.S., Petrov A.K., Zapara T.A., Ratushnyak A.S. Cell membrane permeability under the influence of terahertz (submillimeter) laser radiation // Vestnik Novosibirsk State University. – 2010. V. 5(4). – P. 177–181.
4. Alekseev S.I., Ziskin M.C. Effects of millimeter waves on ionic currents of Lymnaea neurons // Bioelectromagnetics. – 1999. – V. 20(1). – P. 24–33.
5. Siegel P.H., Pikov V. Can neurons sense millimeter waves? // SPIE Photonics West, BiOS. – 2010. – P. 7562-17.
6. Bourne N., Clothier R.H., D'Arienzo M. and Harrison P. The effects of terahertz radiation on human keratinocyte primary cultures and neural cell cultures // Altern Lab Anim. – 2008. – V. 36(6). – P. 667-84.
7. Zhu Y., Gao F., Yang X., Shen H. and Liu W. The effect of microwave emission from mobile phones on neuron survival in rat central nervous system // Progress In Electromagnetics Research, PIER. – 2008. – V. 82. – P. 287–298.
8. Tsurkan M.V. et al. Changing growth of neurites of sensory ganglions by terahertz radiation // in Proc. of SPIE. – 2012. – V. 8261. – P. 82610S-1.

УДК 537.876.43

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ВЕРТИКАЛИЗАЦИЮ ЗАДНЕГО ФРОНТА ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗ МАЛОГО ЧИСЛА КОЛЕБАНИЙ ПОЛЯ В ПРОЗРАЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

А.А. Точилкин

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент Ю.А. Шполянский

**Краткое вступление, постановка проблемы.** В последние годы все большее распространение получают лазерные системы, способные генерировать интенсивные импульсы из малого числа колебаний электрического поля. Эволюция таких импульсов в прозрачных оптических средах позволяет наблюдать многие нелинейные явления, в том числе существенное уширение спектра. Было показано, что во временной области уширение спектра импульсов в оптическом кварцевом стекле часто связано с вертикализацией заднего фронта их временной огибающей. Согласно расчетам длительность заднего фронта может становиться короче одного периода колебаний на центральной частоте входного импульса.

**Базовые положения.** В поле импульсов из малого числа колебаний поля нелинейный отклик кварцевого стекла определяется, в основном, двумя кубичными по полю механизмами: мгновенный электронный и малоинерционный электронно-колебательный. В ряде предыдущих работ учитывался только первый механизм, который количественно проявляется сильнее.

**Цель работы.** Средствами численного моделирования исследовать влияние электронно-колебательной нелинейности на вертикализацию заднего фронта временной огибающей импульсов из малого числа колебаний поля в кварцевом стекле.

**Промежуточные результаты.** Получены результаты моделирования вертикализации заднего фронта импульсов из малого числа колебаний поля в кварцевом стекле, как с учетом, так и без учета электронно-колебательной нелинейности.

**Основной результат.** Показано, что электронно-колебательная нелинейность кварцевого стекла сильнее влияет на эволюцию импульсов из малого числа колебаний поля,

когда их начальный спектр частично или полностью попадает в область аномальной групповой дисперсии. Минимальная длительность заднего фронта огибающей при учете электронно-колебательной нелинейности в большинстве случаев меняется слабо, но может достигаться на другом расстоянии от входа в среду. Ширина формируемых спектров сопоставима как при учете электронно-колебательной нелинейности, так и без ее учета.

УДК 53.084.852

## **РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОАНТЕНН И ИХ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В МИКРОВОЛНОВОМ ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ**

**Д.С. Филонов, А.Е. Краснок**

**Научный руководитель – д.ф.-м.н., гл.н.с. П.А. Белов**

Оптические антенны (наноантенны) – это новое и быстро развивающееся направление в области современной оптики. Важность этого направления продиктована, в основном, проблемами нанофотоники. Характерные размеры элементов нанофотоники меньше или порядка длины волны рабочего излучения, поэтому встает вопрос о связи их с оптическими линиями передачи информации и между собой. В настоящее время предлагается решить эти проблемы, используя бесконтактный метод связи при помощи наноантен.

Наноантенны, в широком смысле, это устройства, которые преобразуют свободно распространяющееся оптическое излучение в поле, сильно локализованное в некоторой области, и наоборот.

На данный момент в мировой литературе представлены два типа наноантен Яги-Уда, а именно плазмонные и диэлектрические. Первый, плазмонный, тип наноантен Яги-Уда выполняется в виде системы металлических наночастиц. Однако у таких наноантенн имеются недостатки. А именно, большой уровень диссипации энергии, который существенно растет с уменьшением расстояния между металлическими наночастицами. К недостаткам таких антенн можно отнести так же, невозможность создания металлической наноантенны на частотах выше плазмонного резонанса и чисто технологические ограничения вызванные малым набором материалов которые можно использовать в качестве металлических сфер.

Недавно, был предложен совершенно новый класс наноантенн – диэлектрическая Яги-Уда наноантенна. Работа таких наноантенн основана на электрическом и магнитном резонансах Ми диэлектрических наночастиц с большой диэлектрической проницаемостью. Было показано, что существует область длин волн, в которой такие частицы обладают электрическим и магнитным откликом одновременно.

В наших работах материалом диэлектрических наночастиц является кремний (Si), который обладает реальной частью диэлектрической проницаемости равной  $\epsilon = 16$ , в широком диапазоне оптических длин волн. Это дает возможность реализации на одной частице элемента Гюйгенса, т.е. рассеивателя диаграммой направленности которого является кардиоида. Благодаря таким свойствам диэлектрических наночастиц появляется возможность конструирования наноантен, например наноантен Яги-Уда. При этом свойства элемента Гюйгенса обеспечивает достаточно узкую диаграмму направленности всей наноантенны. Преимуществом таких наноантенн перед плазмонными наноантеннами так же является существенно более широкий спектр материалов и более низкие диссипативные потери. Стоит отметить возможность близкого расположения наночастицы и квантового источника без сильного увеличения диссипативных потерь.

В этой работе мы представляем результаты экспериментальной верификации диэлектрической Яги-Уда наноантенне в микроволновой области излучения и сравниваем полученные результаты с численным моделированием. При этом в качестве источника мы используем полуволновой вибратор. В качестве изучаемых характеристик диэлектрической

антенны были выбраны двумерные коэффициенты направленности и диаграммы направленности.

Для выяснения зависимости направленных характеристик диэлектрической антенны Яги-Уда для различных частот излучения вибратора мы численно исследовали полярный коэффициент направленности в коммерческом программном продукте CST Microwave Studio 2012.

Для экспериментального исследования полярного коэффициента направленности в диапазоне от 10 до 12 ГГц, мы на разных частотах измеряли мощности, излучаемой системой в Е и Н плоскостях. Затем значения полярного коэффициента направленности для каждой из выбранных частот. Сравнивая результаты, полученные численно и экспериментально было показано хорошее соответствие теории и эксперимента. Небольшая трансляция (примерно 2%) экспериментальных данных, как целого, в область меньших частот мы объясняем наличием крепежных элементов, которые отсутствовали при численном моделировании.

Итак, в этой работе мы провели численное исследование и экспериментальную верификацию диэлектрической Яги-Уда nanoантенны в микроволновой области излучения. Результаты эксперимента находятся в хорошем согласии с численным моделированием. Мы продемонстрировали возможность получения узкой диаграммы направленности диэлектрической Яги-Уда nanoантенны в микроволновом диапазоне длин волн. В силу обратной пропорциональной зависимости между частотами Ми-резонансов и радиусом диэлектрической частицы, мы считаем, что узкая диаграмма направленности может быть получена так же и в оптической области частот.

УДК 004.27:530.145

## **МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ КАНАЛОВ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**В.В. Чистяков**

**Научный руководитель – аспирант А.В. Глейм**

В практических приложениях квантовой криптографии на сегодняшний день наиболее часто применяют аттенюированное до однофотонного уровня лазерное излучение. Квантовая природа передаваемых сигналов делает невозможным использование в процессе генерации ключа обыкновенных оптических усилителей и ретрансляторов. В связи с этим потери в элементах схемы и оптоволоконной линии ограничивают максимальную дальность передачи и приводят к значительному снижению битовой скорости. Для увеличения скорости генерации криптографического ключа предлагается использовать технологию мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM), позволяющую одновременно передавать несколько информационных каналов по одному волокну на разных несущих частотах. На сегодняшний день этот метод применительно к квантовой криптографии является мало изученным.

В работе изучается возможность частотного мультиплексирования каналов в системах квантовой рассылки криптографического ключа на боковых частотах модулированного излучения (КРКПЧ), а также влияние этих каналов друг на друга.

**Целью работы** являлось исследование возможности эффективной реализации WDM в системе квантовой криптографии, проверка функционирования данной технологии на экспериментальном макете и исследование процессов взаимодействия мультиплексированных каналов, влияющие на эффективность работы системы квантовой криптографии.

Объектом исследования являются слабые (со средним числом фотонов в импульсе порядка 1) сигналы, излучаемые двумя источниками (длины волн – 1310 и 1550 нм) на блоке

отправителя, которые до ввода в канал связи объединяются мультиплексором, а на приемной стороне разделяются демультиплексором. При математическом описании основной акцент делался на процессы, происходящие в оптическом волокне при использовании WDM, а именно на влияние каналов передачи данных друг на друга.

В ходе работы было выполнено теоретическое исследование мультиплексированных сигналов и поставлен эксперимент с использованием двухволновой WDM-системы, работающей на центральных длинах волн второго и третьего окон прозрачности кварцевого волокна в лабораторном макете системы КРКПЧ.

УДК 537.622.2

## **ИЗОТРОПНЫЙ ДИАМАГНИТНЫЙ МЕТАМАТЕРИАЛ ИЗ КУБИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**И.В. Ягунов, Д.С. Филонов, А.П. Слобожанюк**  
**Научный руководитель – д.ф.-м.н., гл.н.с. П.А. Белов**

В настоящее время большой интерес представляет отдельный класс метаматериалов – диамагнитные метаматериалы. Диамагнетики – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. Некоторые природные вещества обладают диамагнитными свойствами, такие как азот, водород, глицерин. Целью работы является исследование диамагнитных свойств и создание искусственного диамагнитного метаматериала.

Существуют аналитические выражения, которые позволяют оценить материальные параметры бесконечно протяженного метаматериала, состоящего из набора металлических кубиков, разделенных диэлектрическим зазором. Так, для метаматериала, состоящего из идеально проводящих кубиков со стороной 1,5 мм и толщиной зазоров 0,1 мм, магнитная проницаемость  $\mu=0,125$ .

В настоящей работе исследуемый метаматериал представляет собой изотропную структуру конечного размера, состоящую из элементарных ячеек. В качестве элементарной ячейки метаматериала рассматривается кубик из немагнитного металла. Элементарные ячейки в составе метаматериала разделены тонким диэлектрическим зазором, что исключает контакт металлических кубиков друг с другом.

Для определения значений материальных параметров из коэффициентов отражения и прохождения может быть эффективно использован метод экстракции. Для определения коэффициентов отражения и прохождения было произведено электродинамическое моделирование метаматериала в программном пакете CST Microwave Studio. Элементарная ячейка была расположена в волноводе с периодическими граничными условиями для имитации бесконечно протяженного метаматериала. Для возбуждения структуры использовались волноводные порты. Рассматривались кубики со стороной 1,5 мм, выполненные из алюминия с проводимостью  $\sigma=3,56 \cdot 10^{13}$  См/м. В качестве зазора между элементарными ячейками был использован диэлектрик с  $\epsilon=4$ .

В ходе электродинамического моделирования рассчитывались коэффициенты отражения и прохождения, из которых были экстрагированы  $\epsilon$  и  $\mu$ . В качестве исследуемых параметров была выбрана толщина диэлектрического зазора и толщина метаматериала (по направлению распространения волны). Было показано, что при толщине зазора между элементарными ячейками 0,2 мм и 0,1 мм магнитная проницаемость принимала значения 0,225 и 0,125, что соответствует аналитическим оценкам. При увеличении толщины метаматериала от 1 до 4 слоев полученные значения  $\mu$  также были равны 0,125.

Тестовый образец метаматериала из алюминиевых кубиков со стороной 1,6 мм и зазором 0,1 мм, был измерен в волноводе. Из коэффициентов отражения и прохождения

методом экстракции было получено  $\mu = 0,15$ , что повторяет аналитический и численный результат.

УДК 778.38

## **ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ НА МАЛОГАБАРИТНОМ СТЕНДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛЕНОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Н.В. Буров**

**Научный руководитель – ассистент Н.В. Андреева**

В современном мире достаточно большой интерес представляет голография для использования в изобразительной технике, создания голографических оптических элементов, голографической памяти.

В настоящее время трудно даже перечислить все отрасли, где полимеры благодаря своим разнообразным и ценным свойствам нашли широкое применение.

**Целью работы** является получение цветных изобразительных голограмм на малогабаритном стенде с использованием полупроводниковых лазеров красного, синего, зеленого цветов на голографическом полимерном материале BAYFOL® HX. BAYFOL® HX – голографический полимерный материал фирмы «Bayer MaterialScience AG» Образцы, которого представляют собой подложку из поликарбоната и полиэтилентерефталата, реакционный слой, защитный слой из полиэтилена.

Запись голограмм проводилась на малогабаритном стенде с использованием полупроводниковых лазеров красного (655 нм) и зеленого (532 нм) цветов. Голограммы проявлялись светодиодной лампой PHILIPS AccentColor Miniglobe Yellow 1 Watt LED E27. На данный момент получены двухцветные голограммы цветного объекта при проведении эксперимента с красным и зеленым лазером. Подготовлены рекомендации по совершенствованию условий получения голограмм цветных объектов с использованием полупроводниковых лазеров.

Сейчас ведется поиск полупроводникового лазера синего цвета для получения цветного объекта с использованием красного, зеленого и синего лазеров. Подготовлены рекомендации по совершенствованию условий получения голограмм цветных объектов с использованием полупроводниковых лазеров. Также ожидается светодиодная лампа OSRAM PARATHOM DECO CLASSIC A Yellow 1 Watt LED E27 время проявления, которой значительно меньше используемой. Разработана методика по работе с пленками фирмы «Bayer MaterialScience AG», на основе которой будет создана лабораторная работа по получению изобразительных голограмм с использованием пленочных полимерных материалов в рамках курса «Прикладная голография».