

**Материалы секции**  
**ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ**  
**ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**



10-13 апреля 2020  
НОВОСИБИРСК



НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

МНСК-2020

ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы  
58-й Международной научной студенческой конференции

10–13 апреля 2020 г.

Новосибирск  
2020

УДК 535  
ББК 22.34я431  
Ф 81

Научные руководители секции  
акад. РАН С. Н. Багаев  
акад. РАН А. М. Шалагин

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, доц. С. М. Кобцев

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук  
А. В. Иваненко

Экспертный совет секции  
д-р физ.-мат. наук, проф. Е. В. Бакланов  
д-р техн. наук В. П. Корольков  
канд. физ.-мат. наук, доц. Б. Н. Нюшков  
чл.-корр. РАН И. И. Рябцев  
чл.-корр. РАН, проф. М. П. Федорук  
д-р физ.-мат. наук, проф. П. Л. Чаповский  
д-р физ.-мат. наук Д. В. Чуркин

**Ф 81** Фотоника и квантовые оптические технологии : Материалы 58-й  
Междунар. науч. студ. конф. 10–13 апреля 2020 г. / Новосиб. гос.  
ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2020. — 36 с.

ISBN 978-5-4437-1065-5

**УДК 535**  
**ББК 22.34я431**

ISBN 978-5-4437-1065-5

© СО РАН, 2020  
© Новосибирский государственный  
университет, 2020

NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY  
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ISSC-2020

PHOTONICS AND QUANTUM OPTICAL TECHNOLOGIES

Proceedings  
of the 58<sup>th</sup> International Students Scientific Conference

April, 10–13, 2020

Novosibirsk  
2020

УДК 535  
ББК 22.34я431  
Ф 81

Section scientific supervisors  
Acad. of the RAS S. N. Bagaev  
Acad. of the RAS A. M. Shalagin

Section head — Dr. Phys.-Math., Assoc. Prof. S. M. Kobtsev

Responsible secretary — Cand. Phys.-Math. A. V. Ivanenko

Section scientific committee  
Dr. Phys. Math., Prof. E. V. Baklanov  
Dr. Eng. Sciences V. P. Korolkov  
Cand. Phys.-Math., Assoc. Prof. B. N. Nyushkov  
Corr. Member of RAS I. I. Ryabtsev  
Acad. of the RAS, Prof. M. P. Fedoruk  
Dr. Phys.-Math., Prof. P. L. Chapovsky  
Dr. Phys.-Math. D. V. Churkin

**Ф 81** Photonics and Quantum Optical Technologies : Proceedings of the 58<sup>th</sup>  
International Students Scientific Conference. April, 10–13, 2020 / Novosi-  
birsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2020. — 36 p.

ISBN 978-5-4437-1065-5

**УДК 535**  
**ББК 22.34я431**

ISBN 978-5-4437-1065-5

© SB RAS, 2020  
© Novosibirsk State University, 2020

**Study of the Self-assembly of nanocrystals  
for implementation as single-photon sources**

V. B. Osokin, G. Ying

University of Oxford, United Kingdom

Current quantum technologies are largely interested in room temperature single-photon sources for a variety of applications ranging from efficient markers for imaging in Biology to a sub-micron light emitters and detectors for quantum cryptography. Despite remarkable efforts in solid-state laser coupling to nanophotonic structures, there is a deficiency either in the quality of the emission or in the device design. So far terrylene molecules in a guest-host system have shown sufficient photostability not only at 4 K but also at room temperature.

Self-assembled nanocrystals of Anthracene doped with a low amount of dibenzoterrylene molecules (DBT) form a stable system providing a bright source of almost indistinguishable single photons at cryogenic temperatures. The growth method is highly attractive by its simplicity whilst all production steps can be implemented in a basically supplied chemistry lab. This procedure involves DBT dilution in a solvent and then mixing with a solution of Diethylether with Anthracene. This is followed by spin-coating a small droplet of the final mixture on a glass substrate. Temperature annealing of the sample surrounded by a nitrogen atmosphere is not essential for the experiments; nevertheless, it allows the production of better quality crystals with a good spatial distribution across the substrate.

The possibility of producing a special sublimation chamber which allows for state-of-the-art growth parameters to be fine-tuned at different crystal forming stages has been reported in the past. This well-known technique of chemical vapour deposition (CVD) requires specific temperature and atmospheric conditions in different regions of a chamber, leading to the commercial unavailability of such a device. This study shows remarkable results in sample-preparation techniques, cryogenic micro-photoluminescence mapping, lifetime and polarisation measurements.

Supervisors — Dr. T. Farrow, Dr. Prof. R. A. Taylor

## Синтез гибридного фотополимерного материала для записи микроструктур

С. И. Алиев

Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирский институт органической химии  
им. Н. Н. Ворожцова СО РАН

Развитие оптической промышленности в немалой степени связано с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. Для широкого внедрения ДОЭ в оптические приборы актуальной задачей является получение механически и химически стойких поверхностных микроструктур. На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются гибридные фотополимерные материалы [2]. Достоинствами таких материалов является повышенная прочность, оптическая прозрачность в видимой области спектра, химическая устойчивость к растворам щелочей и кислот, термическая устойчивость.

Целью данной работы является синтез гибридного фотополимерного материала для записи элементарных голограмм.

Синтез гибридного мономера был осуществлен с помощью реакции полиприсоединения 3-(триэтоксисиллил)-пропилизоцианата к диакрилату бисфенола А глицеролата (1 глицерол/фенол). Полученное соединение охарактеризовано методами ЯМР  $^1\text{H}$  и ИК-спектроскопии.

В качестве фотоиницирующей системы к раствору гибридного мономера в хлороформе были добавлены бис(4-трет-бутилфенил) гексафторфосфат иодония и триэтиламмониевая соль эозина.

Полученная фотополимерная композиция наносилась на стеклянную подложку. Для удаления растворителя использовали предэкспозиционную термообработку при  $50^\circ\text{C}$  на протяжении 60 мин. Запись ДОЭ проводилась при помощи голографической установки записи элементарных голограмм ( $\lambda = 540$  нм) с углом схождения лазерных лучей  $11^\circ$ . Доза облучения составила  $115$  мДж/см $^2$ . Постэкспозиционная термообработка составила 30 мин при  $50^\circ\text{C}$ . Проявление записанных микроструктур было проведено в этилацетате. После проявления была получена голографическая решетка с периодом  $1,42$  мкм и толщиной  $\sim 1$  мкм.

- 
1. Миронников Н. Г. и др. // Автометрия. 2016. Т. 52, № 2. С. 88–96.
  2. Шелковников В. В. и др. // J. Mater. Sci. 2015. Т. 50.

Научный руководитель — канд. хим. наук Д. И. Дервянко



## Исследование трехчастичных резонансов Ферстера в ансамблях ультрахолодных атомов рубидия

И. Н. Ашкарин

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

В настоящее время значительно возрос интерес к реализации квантовых вычислений. Ультрахолодные нейтральные атомы могут быть использованы в качестве кубитов — логических элементов квантового компьютера. Одним из возможных вариантов выполнения многокубитовых квантовых вентилях с использованием таких атомов является применение электрически настраиваемых резонансов Ферстера в высоковозбужденных (ридберговских) атомах. Такие схемы не требуют больших энергий диполь-дипольного взаимодействия, что позволяет ожидать повышения точности квантовых вентилях в реальных экспериментальных условиях.

Экспериментальная регистрация многочастичных резонансов Ферстера в малых ансамблях ( $N = 3-5$ ) атомов была представлена в [1]. Также была теоретически смоделирована схема квантового вентиля TOFFOLI на основе трехчастичных резонансов Ферстера [2]. Однако исследованная в рамках данной работы схема резонансов не позволяет добиться высокой экспериментальной точности квантовых операций в связи со сложностью инициализации квантового регистра.

Целью данной работы является исследование трехчастичных резонансов Ферстера в ансамблях ультрахолодных атомов Rb, а также поиск схемы резонансных процессов, оптимальной для экспериментальной реализации многочастичных квантовых вентилях высокой точности.

В результате работы были теоретически продемонстрированы и исследованы трехчастичные резонансы Ферстера для ридберговских состояний ( $n = 50, 60$ ) в ансамблях ультрахолодных атомов Rb, а также определены оптимальные значения параметров системы для регистрации резонансов с высоким разрешением (100–450 %).

---

1. *Tretyakov D. B. et al.* Observation of the Borromean Three-Body Förster Resonances for Three Interacting Rb Rydberg Atoms // *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 119. P. 173402.

2. *Beterov I. I. et al.* Fast three-qubit Toffoli quantum gate based on three-body Förster resonances in Rydberg atoms // *Physical Review A.* 2018. Vol. 98, № 4. P. 042704.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. И. И. Бетеров

**Определение резонансной частоты оптико-акустической ячейки  
для оптимизации параметров измерительной системы  
в процессе измерения концентрации газа**

А. В. Бойкова

Новосибирский государственный технический университет  
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Оптико-акустический эффект представляет собой генерацию акустических волн в веществе в результате поглощения модулированного оптического излучения строго определенной длины волны (на линии поглощения). Основанный на этом эффекте оптико-акустический метод измерения поглощения веществом энергии лазерных источников широко применяется на практике. Для измерения концентрации газов применяются оптико-акустические детекторы различных конструкций. В работе исследуется оптико-акустический детектор, содержащий оптико-акустическую ячейку резонансного типа.

Целью работы является определение возможности измерения собственной резонансной частоты оптико-акустической ячейки в ходе процесса измерений концентрации пробного вещества.

В работе в качестве источника лазерного излучения использован  $\text{CO}_2$ -лазер, работающий в импульсно-периодическом режиме излучения. Длина волны излучения 10,551 мкм, энергия импульса излучения  $(1,4 \pm 0,2)$  мДж. Оптико-акустический детектор заполнялся газовой пробой  $\text{SF}_6$  из емкости ГСО с концентрацией элегаза 38,7 ppmv  $\pm 5\%$ .

Была разработана математическая модель выходного сигнала системы, построена передаточная функция резонансной оптико-акустической ячейки, результаты математического моделирования проверены экспериментально.

В результате работы сделан вывод о том, что математическая модель системы соответствует полученным экспериментальным результатам, подтверждена возможность синтеза регулярного алгоритма измерения собственной резонансной частоты оптико-акустической ячейки в ходе процесса измерений и автоматической подстройки параметров измерительной системы в соответствии с измеренным значением резонансной частоты. Полученные результаты позволяют повысить точность измерений концентрации в реальном времени.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Карапузиков

**Самосканирующий волоконный гольмиевый лазер  
с генерацией в области 2 мкм для спектроскопии CO<sub>2</sub>**

А. Д. Владимирская

Новосибирский государственный технический университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

В настоящее время особый интерес представляют источники излучения вблизи 2 мкм. В первую очередь это связано с тем, что в данной области находятся линии поглощения воды и диоксида углерода. Анализ спектрального состава данных элементов может использоваться как в биоатмосферном анализе, так и в медицине. Ранее уже было обнаружено, что по анализу изотопного состава диоксида углерода в выдыхаемом человеком воздухе возможно определить наличие в организме бактерий *Helicobacter Piloni* [1]. Для спектрального анализа воздуха необходим перестраиваемый лазер с генерацией в области линий поглощений диоксида углерода (~ 2 мкм). Одним из наиболее простых способов перестройки длины волны лазера является использование эффекта самосканирования.

В данной работе был реализован волоконный самосканирующий гольмиевый лазер с генерацией в области 2,06 мкм. Выбор данного вида активного волокна основан на возможности гольмия излучать в области поглощения диоксида углерода. В качестве накачки выступал иттербиевый волоконный лазер с длиной волны генерации 1,125 мкм и максимальной выходной мощностью 4,8 Вт. Резонатор лазера был образован плотным волоконным кольцевым зеркалом и прямым сколом активного волокна. Коэффициент отражения кольцевого зеркала регулируется контроллером поляризации, расположенным внутри него. При определенной конфигурации резонатора и уровня мощности накачки был получен диапазон сканирования порядка 4 нм со скоростью сканирования 4 нм/с. Разработанный источник может быть применен для задач спектроскопии диоксида углерода.

---

1. *Graham D. Y. et al.* Campylobacter pylori detected noninvasively by the 13C-urea breath test // The Lancet. 1987. Vol. 329, № 8543. P. 1174–1177.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Лобач

## **Исследование и оптимизация висмутового волоконного лазера с самосканированием частоты**

М. П. Гаськов

Институт автоматики и электротехники СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Суть эффекта самосканирования частоты заключается в периодической динамике частоты лазерного излучения без использования дополнительных элементов перестройки и электрических двигателей. Как результат, самосканирующие лазеры являются одним из простейших видов перестраиваемых лазеров. Данный эффект был хорошо изучен в различных волоконных лазерах на основе волокон, легированных иттербием, неодимом, эрбием, тулием и гольмием. Стоит заметить, что в области прозрачности волокон ( $\sim 1,5$  мкм) в эрбиевом лазере были получены достаточно малые диапазоны перестройки (менее 1 нм). В качестве альтернативы можно использовать активное волокно, легированное висмутом, позволяющее получать генерацию в области 1,46 мкм с диапазоном перестройки более 10 нм. Цель настоящей работы заключалась в исследовании эффекта самосканирования в висмутовом волоконном лазере с самосканированием частоты и оптимизации его выходных характеристик.

Основные элементы лазера выполнены на основе волокна с сохранением поляризации. В качестве активной среды использовался отрезок висмутового волокна длиной около 60 м. Излучение накачки от ВКР-лазера с длиной волны 1310 нм и максимальной мощностью 360 мВт было заведено в активное волокно через спектрально-селективный разветвитель 1480/1310. В качестве плотного зеркала резонатора выступало волоконное кольцевое зеркало, сделанное из ответвителя 50/50. Одним из параметров оптимизации является коэффициент отражения выходного зеркала. Для этого была проверена работа лазера с двумя выходными зеркалами: отражение Френеля от скола волокна ( $\sim 4\%$ ) и второе кольцевое зеркало, сделанное из ответвителя 10/90 (36%). В частности, было установлено, что в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала меняется диапазон мощностей накачки, на котором происходит сканирование — от 60 до 300 мВт и от 67 до 120 мВт для коэффициента отражения зеркала 4% и 36% соответственно. Также при увеличении коэффициента отражения область сканирования смещается в длинноволновую область (с 1460 до 1470 нм).

Более подробное описание схем и полученных результатов будет представлено в докладе.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Лобач

## Моделирование рассеяния бесселевых пучков малыми частицами с помощью метода дискретных диполей

С. А. Глухова

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В последние годы бесселевы пучки (БП), принадлежащие к классу недифрагирующих пучков, набирают популярность [1]. Хотя рассеяние этих пучков частицами простой формы, такими как шар, уже рассматривалось в литературе, для сложных частиц такое рассеяние моделируется редко. Метод дискретных диполей (МДД) является популярным методом моделирования рассеяния и поглощения электромагнитных волн частицами произвольной формы и внутренней структуры [2]. В общем, МДД и соответствующий компьютерный код применимы для произвольных падающих полей. Однако практическое моделирование для любых падающих пучков доступнее, если они встроены непосредственно в код. Таким образом, основной целью этой работы является реализация БП в программном пакете с открытым кодом ADDA [2].

Большинство методов и программ (включая ADDA) предназначены для вычислений матрицы рассеяния Мюллера (или амплитудной), которые требуют моделирования для двух поляризаций падающего поля. Этот подход был расширен для БП с определением двух базисных поляризаций для каждого типа, связанных друг с другом поворотом на угол  $\pi/2$ . Ввиду вихревых свойств БП, соотношения вращения были расширены для произвольного угла поворота, что необходимо для решения задачи рассеяния в повернутой системе координат. Таким образом, была расширена существующая классификация БП и их поляризаций с акцентом на поворотные соотношения между ними [1]. Простейшие типы БП уже реализованы в ADDA, и идет работа над реализацией оставшихся. В результате можно будет легко моделировать рассеяние БП произвольными частицами, включая матрицы рассеяния.

---

1. Wang J. J. et al. General description of transverse mode Bessel beams and construction of basis Bessel fields // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2017. Vol. 195. P. 8–17.

2. Yurkin M. A., Hoekstra A. G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2007. Vol. 106, № 1–3. P. 558–589.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Юркин

## **Определение формы и длительности наносекундной рентгеновской вспышки**

Д. В. Гусаченко

Новосибирский государственный университет

Целью работы являлось определение формы и длительности наносекундной рентгеновской вспышки при помощи современных методов детектирования. Для этого был использован метод, основанный на сцинтилляции. Была собрана экспериментальная установка, состоящая из импульсного генератора рентгеновских наносекундных вспышек, органического пластмассового сцинтиллятора на основе полистирола с добавлением паратерфенила и РОРОР, а также ФЭУ-87 с телескопом для развязки измерительного оборудования от электромагнитных помех. Характерное время релаксации сцинтиллятора и характерное время нарастания лавины электронов в ФЭУ составляет примерно 3 нс. В качестве источника рентгеновских вспышек был использован РИСК-150 разработки ИГиЛ СО РАН.

Для детектирования и дальнейшего анализа рентгеновской вспышки была снята аппаратная функция (осциллограмма люминесценции при пролете космической частицы через сцинтиллятор). Время пролета частицы через сцинтиллятор 0,1 нс, что на порядок меньше характерных времен системы.

В работе изложена применяемая необходимая теоретическая база о сцинтилляторах, применении прямой и обратной свертки сигнала, пояснен выбор необходимого оборудования, показан сам эксперимент и произведен анализ полученных результатов с оценкой погрешности измерения. Изменная длительность вспышки составляет по основанию 30 нс, из них нарастание — 8 нс, убывание — 12 нс. Длительность вспышки по полувысоте 20 нс. Полученные данные являются уникальными в силу отсутствия паспорта прибора. Методика измерений имеет низкую погрешность (порядка 10% и ниже при более длительных сигналах) и некоторые ограничения на использование. При этом она широко используется в научных целях и прикладных задачах.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Е. И. Пальчиков

## Исследование влияния направления магнитного поля на свойства резонанса когерентного пленения населенностей

А. М. Дамбуев

Новосибирский государственный университет

Эффект когерентного пленения населенностей (КПН) лежит в основе принципа действия современных миниатюрных атомных стандартов частоты и магнитометров [1]. Для использования эффекта КПН для измерения магнитного поля необходимо возбудить резонанс на переходах между магниточувствительными ( $m_f \neq 0$ ) энергетическими уровнями, тогда абсолютное значение магнитного поля можно определить по спектральному положению резонанса КПН. Недостатком такой реализации является то, что такой магнитометр может быть только скалярным т. е. не позволяет точно измерить направление поля. Поэтому актуальной темой является разработка методов векторного измерения магнитного поля на основе эффекта КПН.

Целью работы являлось исследование влияния направления магнитного поля на свойства резонанса КПН, возбуждаемого в парах  $^{87}\text{Rb}$ , в частности исследования зависимости амплитуд резонансов первого порядка ( $m_f = \pm 1$ ) от направления поля, для последующей разработки векторного магнитометра.

В эксперименте источником излучения накачки служил одночастотный лазерный диод, генерирующий на длине волны 794,7 нм, в спектре которого создавались боковые частоты за счет модуляции тока инжекции с частотой 3,417 ГГц. Ячейка с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$  помещалась в 3D-систему из колец Гельмгольца, индуцирующих магнитное поле. Его направление и величина определялась величиной токов, протекавших через кольца.

Получены зависимости амплитуды резонанса КПН от токов в катушках. Показано, что амплитуда резонанса КПН уменьшается по мере отклонения вектора поля от оси, продольной к лучу лазера. Когда поле ортогонально лучу лазера, эффект КПН не наблюдается. На основе полученных данных разработан прецизионный метод измерения направления магнитного поля.

---

1. *Kitching J.* Chip-scale atomic devices // *Appl. Phys. Rev.* 2018. Vol. 5, № 3. С. 031302.

Научный руководитель — Д. А. Раднагаров

## Изучение влияния солей, представителей ряда Гофмейстера, на сетку водородных связей воды

Е. А. Добрынина

Институт автоматики и электротриетрии СО РАН, Новосибирск

Вода играет ключевую в жизни всех живых организмов, обеспечивая обменные процессы, терморегуляцию, транспорт веществ и др. Молекулы воды взаимодействуют друг с другом с образованием водородных связей. При изучении белков в присутствии воды было обнаружено, что добавление различных ионов способствует повышению их стабильности в растворе либо приводит к денатурации. Подобное явление связывают с изменением сетки водородных связей под действием ионов, однако механизм этих изменений все еще не ясен. В соответствии со степенью влияния ионов на стабильность белка в воде их расположили в ряд, называемый рядом Гофмейстера, и разделили на две категории: космотропы — ионы, создающие структурный порядок в окружающей их воде, и хаотропы — ионы, нарушающие структуру воды.

Естественно предположить, что изменения в сетке водородных связей при добавлении ионов окажут влияние на вязкоупругие свойства раствора, в частности на скорость звука в веществе. Информация о вязкоупругих характеристиках вещества может быть получена с применением метода рассеяния Мандельштама — Бриллюэна — бесконтактной, неинвазивной экспериментальной методики. Настоящая работа посвящена исследованию концентрационной зависимости скорости звука для растворов различных солей, представителей ряда Гофмейстера. В качестве объектов исследования были взяты водные растворы солей натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOAc}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{NaCNS}$ ,  $\text{NaCl}$ ) и солей хлора ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), расположенные в различных частях ряда.

В результате работы было получено, что скорость звука в растворе возрастает при добавлении соли, причем степень возрастания коррелирует с положением ионов в ряду, разница скорости звука в жидкости максимальной концентрации веществ для хаотропов и космотропов около 200 м/с. При добавлении космотропов изменения скорости звука более существенны, чем при добавлении хаотропов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Зыкова



**Исследование голографического формирования фотополимерных дифракционных структур двумерными бесселеподобными световыми пучками с учетом двухпучковых взаимодействий**

В. О. Долгирев

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Бесселевы световые пучки используются во многих областях, таких как нелинейная оптика, оптическая метрология, проектирование атмосферных беспроводных линий телекоммуникаций, манипулировании наноразмерными объектами и др. Бесселевы пучки не дифрагируют, имеют свойства восстановления, они сохраняют высокую интенсивность в приосевой области на больших расстояниях. Таким образом, актуальным на сегодняшний день представляется поиск доступного метода формирования таких пучков.

В данной работе исследуется процесс голографического формирования дифракционных структур (ДС) двумерными бесселеподобными световыми пучками в фотополимерных материалах (ФПМ) с учетом двухпучковых взаимодействий.

Процесс формирования ДС происходит следующим образом: на ФПМ под малым углом к нормали поверхности падают опорный (Гауссов) и сигнальный (бесселеподобный) световые пучки. Сигнальный пучок был получен с помощью амплитудного транспаранта, представляющего из себя металлическую пластину с кольцевой щелью, и линзы. В объеме образца ФПМ опорный и сигнальный пучки интерферировали. Далее, следуя голографическому принципу, в нем формировалась фазовая пропускающая голограмма. В областях малого контраста формировалась дополнительная решетка под действием влияния двухпучкового взаимодействия. Формирование дополнительной решетки вызывало неоднородность амплитудно-фазового профиля всей решетки, что влекло к обмену энергией между пучками и смещению угла Брэгга при считывании ДР.

Таким образом, методом численного моделирования и экспериментального исследования было получено, что уровень боковых максимумов у дифрагировавшего светового пучка усиливается по уровню по отношению к записывающему полю вследствие влияния двухпучкового взаимодействия в областях малого контраста. Следовательно, для более точного определения дифракционных характеристик сформированного оптического элемента необходимо учитывать двухпучковое взаимодействие.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России  
в рамках госзадания на 2020 г.*

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, проф. С. Н. Шарангович

**Теоретическая модель дифракции света  
на многослойных неоднородных голографических  
фотополимерных дифракционных структурах**

Д. И. Дудник

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Многослойной неоднородной голографической дифракционной структурой (МНГДС) называется набор слоев из неоднородных голограмм, разделенных оптически однородными промежуточными слоями [1]. В [2] представлен процесс формирования МНГДС на основе фотополимерных материалов (ФПМ) с учетом фотоиндуцированного изменения оптического поглощения материала и показано, что неоднородность профиля показателя преломления (ПП) дифракционной структуры может отличаться на каждом слое МНГДС и быть однородной, спадающей, возрастающей или куполообразной. Во всех известных работах представлены модели дифракции плоских волн на многослойных дифракционных структурах, которые учитывают лишь определенный вид однородности или не учитывают ее совсем.

В данной работе представлена теоретическая модель дифракции света на пропускающих МНГДС, в которой учтены пространственные неоднородности амплитудного профиля ПП первой гармоники, возникающие в процессе голографического формирования решеток в ФПМ. Представлены аналитические решения, которые определяют дифракционное световое поле на выходе МНГДС, состоящей из  $N$  голографических дифракционных структур, сформированных в ФПМ, которые разделены  $N-1$  промежуточными слоями. Полученные решения полностью определяют как амплитудные, так и поляризационные параметры дифракционных полей на выходе каждого слоя МНГДС.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ  
в рамках выполнения госзадания на 2020 г.*

---

1. Пен Е. Ф., Родионов М. Ю. Свойства многослойных неоднородных голографических структур // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 10. С. 919–924.

2. Дудник Д. И., Шарангович С. Н. Влияние фотоиндуцированного изменения оптического поглощения на формирование многослойных неоднородных голографических дифракционных структур на основе фотополимерных материалов // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Минск: РИВШ, 2019. С. 26–27.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, проф. С. Н. Шарангович

## Квантовое моделирование элементарных физических процессов и систем

Н. А. Журавлев

Новосибирский государственный университет

Квантовое моделирование элементарных физических процессов открывает возможности экспериментального решения задачи современной физики, используя такой новый подход к вычислениям, как использование квантового процессора. Квантовый процессор позволяет выполнять важные для решения многих задач квантовые алгоритмы, например «Квантовое Фурье-преобразование» и «Квантовая оценка фазы». Квантовая оценка фазы является важным элементом для различных квантовых алгоритмов. Тем не менее реализация различных алгоритмов на современных квантовых компьютерах сильно ограничена низкой точностью. В связи с этим особенно интересен поиск квантовых алгоритмов, которые позволили бы продемонстрировать квантовое превосходство уже при имеющихся в настоящее время возможностях.

Особый интерес представляют задачи квантового моделирования молекул, поскольку они в будущем могут иметь приложение для материаловедения. Эта задача может быть сведена к задаче поиска энергий различных состояний молекулы, что равносильно поиску собственных состояний и чисел унитарного оператора. В [1] было проведено численное моделирование эксперимента по измерению энергии основного состояния молекулы водорода с использованием квантового регистра, состоящего из двух ультрахолодных атомов рубидия.

В данной работе было проведено тестирование такого алгоритма с использованием квантового процессора IBM QExperience на основе сверхпроводящих кубитов. Проведена оптимизация для сокращения числа однокубитовых и двухкубитовых операций. Алгоритм был реализован как на квантовом симуляторе IBM (*qasm simulator*), так и на квантовом процессоре (*ibmqx2*). Были измерены вероятности нахождения правильного значения энергии, а также сделан анализ ошибок.

---

1. Ашкарин И. Н., Бетеров И. И., Третьяков Д. Б., Энтин В. М., Яшкина Е. А., Рябцев И. И. Схема квантового симулятора молекулы водорода на основе двух ультрахолодных атомов рубидия // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 5.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

**Исследование дилеммы Ито — Стратоновича:  
границы применимости квазиклассических подходов  
для задачи лазерного охлаждения атомов в световых полях**

А. А. Кирпичникова  
Институт лазерной физики, Новосибирск

Лазерное охлаждение нейтральных атомов в настоящее время используется для широкого спектра современных исследований в области квантовой физики, включая построение сверхчувствительных интерферометров на основе холодных атомов и создание современных оптических стандартов частоты.

Для описания кинетики лазерного охлаждения используются квантовые (например, основанные на решении квантового кинетического уравнения — ККУ) и квазиклассические подходы. Основным недостатком квантовых методов является необходимость значительных вычислительных мощностей. Квазиклассические подходы основаны на использовании ряда приближений и сводятся к решению уравнения Фоккера — Планка (УФП).

Кинетическими коэффициентами УФП являются сила, действующая на атом в световом поле, и коэффициент диффузии в импульсном пространстве, возникающий в результате флуктуации силы в единичных актах поглощения и излучения фотонов поля. Поскольку коэффициент диффузии имеет существенную зависимость от скорости, а при поглощении/излучении фотона, т. е. в условиях квантового скачка, считается, что импульс атома изменяется мгновенно, то существенным оказывается выбор импульса атома, определяющего коэффициент диффузии: до или после квантового скачка. Эта вариативность получила название дилеммы Ито — Стратоновича.

В настоящей работе проведено сравнение результатов численного анализа, полученного непосредственным решением ККУ для атомной матрицы плотности, и УФП с различными видами диффузионного вклада. Показано, что для атомов с предельно малым параметром отдачи  $\epsilon_r < 10^{-4}$  (отношения энергии отдачи к естественной ширине линии) выбор вида диффузионного вклада не играет значительной роли. Но с его ростом ( $10^{-3} < \epsilon_r < 10^{-1}$ ) различия в подходах Ито и Стратоновича становятся более существенными, несмотря на то что формально указанные значения  $\epsilon_r$  удовлетворяют условиям квазиклассического описания кинетики. Проведенный анализ с использованием точных квантовых подходов позволил очертить границы квазиклассических моделей для задачи субдоплеровского охлаждения атомов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О. Н. Прудников

## Моделирование спектроскопии характеристических потерь энергии электронами методом дискретных диполей

А. А. Кичигин

Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Спектроскопия характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ) широко применяется в исследовании плазмонных наночастиц. В СХПЭЭ эксперимент проводится средствами просвечивающего электронного микроскопа, измеряется кинетическая энергия электронов, прошедших сквозь образец. Потери энергии, связанные с плазмонными резонансами, лежат в диапазоне от одного до нескольких десятков эВ. Численное моделирование СХПЭЭ используется как вспомогательный инструмент в интерпретации результатов эксперимента, в том числе для решения обратной задачи о морфологии частицы.

В нашей работе мы используем метод дискретных диполей (МДД) для моделирования СХПЭЭ. Для этого мы провели вывод всех теоретических выражений в рамках объемно-интегрального представления решения уравнений Максвелла в частотной области. В частности, выражения для напряженности электрического поля, создаваемого движущимся с постоянной скоростью электроном, получены интегрированием тензора Грина вдоль его траектории. Хотя конечные выражения для поля совпадают с известными из литературы, данный подход тесно связан с выражениями для баланса энергии [1], на которых основан МДД. Например, для электрона, движущегося быстрее скорости света в непоглощающей среде, получено выражение для потерь энергии на единицу длины, совпадающее с известной формулой Франка — Тамма для излучения Вавилова — Черенкова. В случае взаимодействия с произвольной частицей удалось получить связь выражений для вынужденных потерь энергии электроном с величинами потоков энергии, выражаемыми через интегралы по объему такой частицы, даже если взаимодействие происходит в произвольной (в том числе поглощающей) среде. А данные величины легко вычисляются в рамках МДД. Мы работаем над реализацией этих выражений в программном пакете ADDA. Первые результаты моделирования будут представлены на конференции.

---

1. *Moskalensky A. E., Yurkin M. A.* Energy budget and optical theorem for scattering of source-induced fields // *Phys. Rev. A.* 2019. Vol. 99. P. 053824.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Юркин

## Исследование резонансов насыщенного поглощения на переходах ${}^3P_{0,1,2} - {}^3D_{1,2,3}$ атомов магния в разрядной ячейке с полым катодом

О. А. Климачева

Новосибирский государственный технический университет  
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Атомы магния представляют большой интерес для создания оптического стандарта частоты [1]. Для достижения относительной нестабильности частоты на уровне  $10^{-16}$ – $10^{-18}$  необходимо глубокое охлаждение атомов до температуры порядка 1–10 мК. Такое субдоплеровское охлаждение возможно на переходе  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_3$  на длине волны 383 нм [2]. Настоящая работа посвящена исследованию резонансов насыщенного поглощения на триплетных переходах с целью настройки частоты охлаждающего лазера на переход  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_3$ .

Исследования проводились с помощью лазерной системы на длине волны 383 нм на основе полупроводникового лазера, лазерного усилителя и удвоителя частоты, а также нелинейного кристалла, помещенного в резонатор. Выходная мощность излучения составила 30 мВт. Резонансы насыщенного поглощения наблюдались в разрядной ячейке с магниевым полым катодом.

Для наблюдения резонансов насыщенного поглощения мощность насыщающей волны модулировалась с помощью акустооптического модулятора, резонансы насыщенного поглощения синхронно детектировались в мощности встречной пробной волны.

Впервые были исследованы все три линии поглощения:  ${}^3P_0 \rightarrow {}^3D_1$ ,  ${}^3P_1 \rightarrow {}^3D_2$ ,  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_3$ . Для перехода  ${}^3P_0 \rightarrow {}^3D_1$  было показано, что ширина линии 220 МГц. В спектрах переходов  ${}^3P_1 \rightarrow {}^3D_2$ ,  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_3$  наблюдаются кросс-резонансы, связанные с наличием общих нижних уровней с переходами  ${}^3P_1 \rightarrow {}^3D_1$  и  ${}^3P_2 \rightarrow {}^3D_2$  соответственно.

Результаты данного исследования будут использованы для стабилизации частоты лазера.

*Исследования были выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 19-02-00514.*

1. Goncharov A. N. et al. // Quantum Electron. 2018. Vol. 48 (5). P. 410–414.
2. Prudnikov O. N. et al. // Phys. Rev. A. 2015. Vol. 92(6). P. 063413.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. А. Н. Гончаров

## **Непрерывный Yb:YAG лазер для экспериментов по лазерной термометрии**

А. О. Коновалова

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

В ИЛФ СО РАН разрабатывается лазерная фемтосекундная система с высокими пиковой и средней мощностями. Она содержит канал лазерного усиления, в котором значительно проявляются тепловые эффекты. Для контроля температуры активных элементов на основе кристаллов Yb:YAG в канале лазерного усиления используется метод бесконтактного исследования температуры [1]. Для повышения точности метода необходимо использовать непрерывный лазер с центральной длиной волны 1030 нм, стабильный по мощности излучения, с высоким качеством пучка.

Разработан непрерывный Yb:YAG лазер с диодной накачкой. Экспериментально определены характеристики диодного лазера, используемого для накачки. Проведен расчет системы накачки и экспериментально исследовано пространственное распределение интенсивности излучения накачки, проходящего через линзовую систему. На основании полученных данных оптимизирована система накачки. Рассчитан оптимальный резонатор лазера с учетом получения требуемых характеристик. Осуществлена практическая реализация схемы лазера Yb:YAG, получена генерация. Исследованы спектральные, мощностные, пространственные характеристики Yb:YAG лазера. Проведена оптимизация лазера, повышен КПД, улучшено пространственное распределение интенсивности излучения.

*Работа поддержана программами фундаментальных исследований  
Президиума РАН «Экстремальные световые поля  
и их взаимодействие с веществом», СО РАН (№ 0307-2019-0006).*

---

1. Петров В. В., Купцов Г. В., Ноздрин А. И., Петров В. А., Лантев А. В., Кирпичников А. В., Пестряков Е. В. Бесконтактный метод исследования температуры в активном элементе мультидискового криогенного усилителя // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 4. С. 358–361.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Петров

**Разработка метода модификации поверхности  
волоконного световода для управления распространением  
мод шепчущей галереи с помощью нагрева лазерным излучением**

Д. В. Крисанов

Новосибирский государственный университет

Микрорезонаторы оптических мод шепчущей галереи (МШГ), ввиду высокой добротности и малых размеров, являются перспективным направлением современной фотоники. В недавних работах было показано, что обычное оптическое волокно обладает достаточным качеством поверхности для образования высокодобротных цилиндрических микрорезонаторов МШГ [1]. Более того, был предложен метод, позволяющий прецизионным образом подстраивать параметры таких микрорезонаторов [1]. Метод предполагал пошаговый процесс локального нагрева образца сфокусированным лазерным излучением до температуры трансформации (около 1200 °С для кварцевого стекла), что приводило к увеличению радиуса микрорезонатора.

В данной работе разработан метод формирования аксиального профиля микрорезонатора оптического волокна, основанный на внесении отрицательных модификаций эффективного радиуса. Ранее было показано, что при быстром охлаждении изменение показателя преломления стекол также может происходить при температурах, более низких, чем температуры трансформации, и в этом случае оно оказывается отрицательным [2]. Влияние локальных воздействий на окружающий материал при этом значительно уменьшается. Это позволяет упростить метод модификации, а именно облучение образца может проводиться непрерывно, в одну стадию. Также это позволяет расширить диапазон достижимых вариаций. Результирующая величина отрицательных модификаций эффективного радиуса, полученных в работе, составила 1–3 нм при температурах нагрева образца порядка 500 °С.

---

1. *Sumetsky M.* Nanophotonics of optical fibers // *Nanophotonics*. 2013. Vol. 2, № 5–6. P. 393–406.

2. *Hoffmann H. J., Jochs W. W. and Neuroth N. M.* Relaxation Phenomena Of The Refractive Index Caused By Thermal Treatment Of Optical Glasses Below Tg. // *Prop. Charact. Opt. Glas.* 1989. Vol. 0970. P. 2.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. Д. Ватник



**Регистрация одиночных атомов рубидия  
в оптической дипольной ловушке**

Я. В. Кудлаев

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Метод удержания нейтральных одиночных атомов в оптической дипольной ловушке может быть использован для создания квантовых регистров на основе массивов одиночных атомов и демонстрации квантовых операций над ними. Атомы рубидия предварительно охлаждаются в магнитооптической ловушке (МОЛ), после чего происходит их захват в дипольную ловушку, сформированную сфокусированным в облако холодных атомов нерезонансным лазерным излучением. Флуоресценция захваченных атомов, индуцированная резонансным излучением охлаждающего лазера МОЛ, регистрируется цифровой видеокамерой.

В работе проведен отбор событий регистрации сигнала от одиночных захваченных атомов путем анализа гистограммы распределения числа фотоотсчетов, полученных в эксперименте. Так как загрузка атомов в дипольную ловушку и испускание ими фотонов — независимые случайные процессы, распределение числа фотоотсчетов можно рассматривать как сумму произведений пуассоновских распределений вероятности для этих процессов [1]. Исходя из анализа измеренного распределения, можно выделить регистрацию одиночных атомов по соответствующему пику в гистограмме распределения числа полученных фотоотсчетов.

Нами разработана методика оценки ошибки при регистрации одноатомных событий: мерой ошибки при определении числа атомов принято отношение области перекрытия соседних пиков гистограммы, приближенных функциями Гаусса к площади пика, соответствующего одному атому. Оценена вероятность потери одиночных атомов в дипольной ловушке в период между двумя событиями регистрации сигнала в зависимости от длительности выдержки. Проведена оценка эффективной температуры одиночных атомов в дипольной ловушке методом повторного захвата [2].

---

1. *Picken C.J., Legaie R., Pritchard J.D.* Single atom imaging with an sCMOS camera // *Applied Physics Letters*. 2017. Vol. 111, № 16. P. 164102.

2. *Jun H. et al.* Extending a release-and-recapture scheme to single atom optical tweezer for effective temperature evaluation // *Chinese Physics B*. 2011. Vol. 20, № 7. P. 073701.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

**Исследование оптических характеристик и микрорельефа  
дифракционных структур, формируемых на пленках металлов  
титановой группы методом прямой лазерной записи**

Р. И. Куц

Новосибирский государственный университет  
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

При реализации технологии прямой лазерной записи на металлических пленках для формирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) требуется знать, как зависят оптические характеристики записанных дифракционных структур от параметров записи: мощности лазерного пучка, скорости сканирования и т. д. Особенно необходимо исследовать эти параметры при записи на новых, неизученных с этой точки зрения материалах.

В данной статье было проведено исследование параметров записи на тонких металлических пленках металлов титановой группы: титана и циркония как перспективных материалов для прямого формирования амплитудных микроструктур путем сквозного лазерно-индуцированного окисления тонкой металлической пленки. Металлические пленки были нанесены с помощью технологии магнетронного напыления на кварцевые подложки. Для записи дифракционных структур использовалась круговая лазерная записывающая система CLWS-300IAE с длиной волны лазера 532 нм.

Были построены зависимости пропускания, отражения и эффективной фазовой глубины оксида от мощности записывающего пучка при различных значениях линейной скорости записи в диапазоне 10–380 мм/с. Используя полученные данные, изготовили ДОЭ по «полностью сухой» технологии без применения жидкостного травления. Во избежание нежелательных дефектов при использовании пленок титана запись производилась на пленке, предварительно отожженной в вакууме при температуре 300 °С.

*Работа проводилась в рамках реализации гранта РФФИ 17-19-01721 с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН, а также АТИЦ ФФ НГУ.*

Научный руководитель — д-р техн. наук В. П. Корольков

**Массивы оптических дипольных ловушек с использованием пространственного модулятора света и длиннофокусного объектива**

К. Ю. Митянин

Новосибирский государственный университет  
Институт физики полупроводников  
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

В последние годы был достигнут значительный прогресс в создании упорядоченных массивов ультрахолодных нейтральных атомов. Атомы предварительно захватываются в магнитооптические ловушки и охлаждаются лазерным излучением до температур 100 мкК. Затем одиночные атомы загружаются в массивы оптических дипольных ловушек [1–2]. Это делает возможным их использование в качестве кубитов для квантовых вычислений.

В настоящее время с помощью пространственного модулятора света и короткофокусных объективов получают двухмерные и трехмерные массивы более чем из 100 ловушек с захваченными в них одиночными атомами. Такие массивы могут иметь произвольную пространственную конфигурацию.

Цель данной работы — создание массивов дипольных ловушек произвольной пространственной конфигурации и захват в них холодных атомов рубидия в оптической схеме с длиннофокусным объективом, находящимся вне вакуумной камеры. Расстояние между атомами в соседних ловушках должно быть не более 10 мкм для последующего наблюдения диполь-дипольного взаимодействия при возбуждении атомов в ридберговские состояния.

В результате работы с помощью пространственного модулятора света были сформированы массивы сфокусированных лазерных пучков размерностью до  $10 \times 10$ . Холодные атомы рубидия были успешно захвачены в массивы, состоящие из двух, трех, четырех и девяти ловушек. Для захвата атомов использовалось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 830 нм и мощностью 200 мВт. Получен массив из двух ловушек, расстояние между центрами которых составило 10 мкм. Данные результаты позволяют предположить, что схему с длиннофокусным объективом можно будет использовать для получения массива одиночных атомов и изучения их диполь-дипольного взаимодействия.

---

1. *Barredo D. et al.* An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary 2d atomic arrays // *Science*. 2016. Vol. 354. P. 1021–1023.

2. *Barredo D. et al.* Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom // *Nature*. 2018. Vol. 561. P. 79–82.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

**ВКР-усиление импульсного лазерного излучения  
в фосфоросиликатных оптических волокнах**

М. С. Мишевский

Новосибирский государственный университет

Для биомедицинских применений востребованы относительно недорогие и надежные источники импульсов с высокой пиковой мощностью и длиной волны генерации вблизи 1,3 мкм в связи с минимальным поглощением ОН-групп. Высокая пиковая мощность может обеспечиваться волоконными лазерами при генерации сильноцирипированных диссипативных солитонов. Генерация излучения на новых длинах волн возможна с использованием вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Для сдвига длины волны ВКР можно использовать фосфоросиликатные (с добавлением  $P_2O_5$ ) волокна, где имеется дополнительный пик усиления, сдвинутый примерно на 39 ТГц. При накачке в области 1,1 мкм такое волокно позволяет получить генерацию как раз на длине волны 1,3 мкм.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации рамановских диссипативных солитонов в области 1,3 мкм во внешнем резонаторе с использованием фосфоросиликатного волокна. Была реализована схема с соотношением длин резонаторов накачки и генератора 1:2, произведена оптимизация полной дисперсии внешнего резонатора путем подбора длин используемых волокон (стандартное одномодовое, фосфоросиликатное и со смещенной дисперсией) с целью получения импульсов с наибольшей энергией. В ходе эксперимента установлено, что увеличение длины фосфоросиликатного волокна с 10 до 15 м не привело к увеличению энергии импульсов, которая составила 1,7 нДж. Таким образом, дальнейшее увеличение энергии возможно лишь путем усиления посредством ВКР в том же фосфоросиликатном волокне.

На конференции будут представлены как результаты дальнейшей оптимизации параметров задающего генератора, так и результаты исследования внрезонаторного усиления.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. С. Харенко

**Разработка миниатюрного устройства опроса  
волоконного датчика температуры с использованием  
волоконного интерферометра Фабри — Перо**

Н. Р. Поддубровский

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Волоконные датчики в настоящее время являются одним из наиболее перспективных типов датчиков, так как имеют ряд существенных преимуществ над другими типами. Обычно волоконная сенсорная система состоит из волоконного чувствительного элемента и устройства для его опроса. Одним из недостатков волоконных сенсорных систем является дороговизна устройства опроса. Цель данной работы состоит в разработке компактного и дешевого устройства опроса волоконного датчика.

В ходе работы создан макет миниатюрного одноканального устройства опроса, позволяющий опрашивать температурный датчик на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) вблизи 1550 нм. Устройство опроса позволяет определить центральную длину волны отражения ВБР, которая пропорциональна ее температуре. Устройство опроса состоит из источника, приемника и спектрально-селективного элемента. В качестве источника был использован суперлюминесцентный диод, излучающий в диапазоне 1450–1650 нм, максимум мощности лежал вблизи резонансной длины волны ВБР. В качестве приемника использовалась схема с полупроводниковым (InGaAs) фотоэлементом, преобразующая мощность выходного сигнала в напряжение, которое оцифровывалось при помощи АЦП и далее выводилось на экран ПК.

Спектрально-селективным элементом устройства опроса является интерферометр Фабри — Перо, реализованный при помощи двух волокон с напылением оксида титана на торцах (коэффициент отражения 30%). Зависимость пропускаемой мощности от длины волны для используемого интерферометра имеет вид синусоиды. Изменяя расстояние между зеркалами, можно получить любое значение периода, обратно пропорционального расстоянию. Установлено, что оптимальное значение базы интерферометра равно 200 мкм, что соответствует периоду модуляции 6 нм. Область свободной дисперсии определяет диапазон измерения температуры, который составляет 300 °С. Точность измерения составила 0,5 °С, она определяется главным образом мощностью источника и чувствительностью приемника сигнала.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Лобач

**Исследование терагерцовых свойств нелинейных кристаллов калий титанил фосфата в широком диапазоне температур**

А. А. Рыбак

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

В настоящее время одним из перспективных направлений терагерцовой (ТГц) фотоники является разработка высокоинтенсивных мобильных источников ТГц-излучения. Разработка таких устройств позволит приблизиться к созданию компактного терагерцового лидара для эффективного экологического мониторинга состояния окружающей среды.

Перспективными преобразователями лазерного излучения в ТГц могут служить нелинейные кристаллы титанил-фосфата калия ( $\text{KTiOPO}_4$ , КТР). Ранее были исследованы оптические терагерцовые свойства кристаллов КТР и показана возможность преобразования в них лазерного излучения в ТГц-излучение [1]. Целью данной работы является более подробное исследование терагерцовых свойств кристаллов КТР в области 0,2–2 ТГц в широком диапазоне температур ( $-195^\circ\text{C} \div +150^\circ\text{C}$ ).

На терагерцовом импульсном спектрометре (ГИС) в сфокусированном пучке с использованием двух пленочных поляризаторов были исследованы ТГц оптические свойства двух высокоомных ( $\sim 10^{10} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) кристаллов КТР в виде полированных плоскопараллельных пластин размерами  $10 \times 10 \times 3$  мм, ориентированных вдоль оптических осей. Образцы были выращены низкоградиентным методом Чохральского. Измерения проводились при комнатной температуре, при нагревании до температур: 50, 100 и  $150^\circ\text{C}$ , при охлаждении в азотном криостате до температур:  $-50, -100, -150, -195^\circ\text{C}$ . Были рассчитаны показатели преломления и коэффициенты поглощения для всех температур для трех основных осей. Дисперсия компонент показателей преломления аппроксимирована в форме уравнений Зельмейера, коэффициенты которых рассчитывались методом наименьших квадратов. По полученным аппроксимациям определены термооптические коэффициенты и зависимость угла  $V_z$  от температуры для данных кристаллов КТР.

---

1. Huang J.-G., Huang Z.-M., Mamrashev A.A., Antsygin V.D., Potaturkin O.I., Meshalkin A.B., Kaplun A.B., Lanskii G.V., Andreev Yu.M., Ezhov D.M., Svetlichnyi V.A. Phase matching in RT KTP crystal for down-conversion into the THz range // *Laser Phys. Lett.* 2018. Vol. 15, № 7.

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. А. Николаев

**Влияние разъюстировки оптического тракта  
лабораторного поляриметрического стенда  
на поляризационные характеристики лазерного излучения**

Е. И. Свиридов

Томский государственный университет

Метод поляризационного лазерного зондирования является эффективным инструментом для определения микрофизических, оптических свойств и ориентации взвешенных кристаллических частиц в пространстве [1]. Суть метода заключается в последовательном облучении исследуемого объекта лазерным излучением, варьируя его состояние поляризации, регистрации обратно рассеянного излучения и сравнительном анализе характеристик зондирующего и регистрируемого излучения. По времени поступления излучения в приемную систему определяется дальность исследуемого объекта, по интенсивности регистрируемого излучения — оптические характеристики объекта, по поляризационным характеристикам — матрица обратного рассеяния среды, которая несет в себе максимально доступную для измерения информацию о рассеивающей среде [2].

Лазерное излучение при распространении в оптически плотных образованиях претерпевает, как правило, многократное рассеяние, которое приводит не только к ослаблению, но и деполяризации. Последняя, в свою очередь, зависит от размеров, формы и ориентации взвешенных частиц [3].

Однако ослабление и деполяризация лазерного излучения происходят не только в исследуемой среде, но в оптическом тракте системы. Для корректного восстановления элементов матрицы рассеяния света из результатов поляризационных измерений необходим учет влияния разъюстировки оптических элементов на характеристики регистрируемого излучения.

В докладе приводится анализ теоретического моделирования и экспериментального исследования оптических свойств монохроматического оптического излучения, прошедшего через оптический тракт лабораторного стенда для исследования оптически плотных суспензий.

---

1. Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Уравнение лазерной локации атмосферы с учетом двукратного рассеяния // Изв. вузов. Физика. 1975. № 8. С. 109–113.

2. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1958. 570 с.

3. Брюханова В. В. Лидарный сигнал в приближении двукратного рассеяния от удаленных аэрозольных образований. Томск, 2013.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. В. В. Брюханова

## Сдвиги спектрального отклика отражательных фотополимерных голограмм при термообработке для создания двухцветных голограмм

Т. М. Симкин

Новосибирский государственный технический университет  
Новосибирский институт органической химии  
им. Н. Н. Ворожцова СО РАН

Голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) находят широкое применение в защитной и изобразительной голографии, системах хранения данных, голографических сенсорах и дисплеях [1]. К их положительным качествам относятся широкая область спектральной чувствительности, отсутствие мокрых процессов обработки, высокая дифракционная эффективность (ДЭ) в монохромных материалах и др. Но для получения многоцветных голограмм с высокой ДЭ каждого цвета часто приходится использовать слоистые системы из нескольких светочувствительных слоев, разделенных барьерными пленками, вследствие низкой ДЭ панхроматических материалов. Актуальным является получение двух цветов в одном слое.

Известным фактом является уменьшение периода записанных решеток в результате усадки фотополимерного слоя во время записи или пост-обработки голограмм, что приводит к коротковолновому сдвигу спектрального отклика [2]. Целью данной работы является использование этого эффекта для изменения цвета записанных отражательных голограмм.

В ходе выполнения работы проводилась запись отражательных голограмм, применяя разработанный в НИОХ СО РАН ГФПМ, с помощью полупроводникового лазера с длиной волны излучения 639 нм (доза облучения — 14 мДж/см<sup>2</sup>, угол записи — 120). В результате термообработки записанных таким образом голограмм был получен гипсохромный сдвиг спектрального отклика на 110 нм, т. е. в зеленую область видимого спектра.

---

1. *Шелковников В. В.* Свойства монохромных и двухцветных голограмм в слоистых фотополимерных материалах // АВТОМЕТРИЯ. 2016. Т. 52, № 4. С. 107–117.

2. *Пен Е. Ф.* Методика определения параметров усадки голографических фотополимерных материалов // АВТОМЕТРИЯ. 2016. Т. 52, № 1. С. 60–69.

Научный руководитель — канд. хим. наук Д. И. Дервянко



**Исследование влияния оптической плотности среды на свойства резонанса когерентного пленения населенностей в парах  $^{87}\text{Rb}$** 

Т. С. Стещенко

Новосибирский государственный университет

Эффект когерентного пленения населенностей (КПН), наблюдаемый в парах щелочных металлов под воздействием двухкомпонентного лазерного излучения, лежит в основе работы миниатюрных атомных стандартов частоты и магнетометров. Характеристики приборов, основанных на этом эффекте, зависят от параметров возбуждаемого резонанса. Высокая оптическая плотность паров щелочных металлов, достигаемая в ячейках в устройствах на основе эффекта КПН, с одной стороны, позволяет получить спектроскопические сигналы с высоким соотношением сигнал/шум, а с другой — порождает эффекты, влияющие на параметры резонанса, в частности на его форму [1].

В настоящей работе представлено исследование влияния оптической плотности среды на форму резонанса КПН путем численного моделирования распространения света в оптической ячейке с рубидием-87 при квазистационарном возбуждении резонанса, когда частота сканирования резонанса относительно мала ( $< 10$  Гц), а также проведено сравнение с экспериментальными результатами [2]. Было показано, что увеличение оптической плотности среды приводит к усилению зависимости формы резонанса от параметров излучения. Также было проведено экспериментальное исследование влияния оптической плотности среды на свойства резонанса КПН в динамическом режиме возбуждения, при высоких ( $> 100$  Гц) частотах сканирования резонанса [2]. Были определены зависимости амплитуды квадратурной [3] составляющей КПН-сигнала, которая характеризует форму резонанса в динамическом режиме [1], от температуры оптической ячейки, мощности излучения, а также от частоты и амплитуды сканирования резонанса.

---

1. *Chuchelov D. S. et al.* Modulation spectroscopy of coherent population trapping resonance and light shifts // *Phys. Scripta*. 2018. Т. 93, №. 11. С. 114002.

2. *Kobtsev S. et al.* Stability properties of an Rb CPT atomic clock with buffer-gas-free cells under dynamic excitation // *JOSA B*. 2019. Т. 36, № 10. С. 2700–2704.

3. *Kobtsev S. et al.* New method of wavelength stabilisation in CPT atomic clocks // *Proc. SPIE*. 2019. Т. 11184. С. 1118414.

Научный руководитель — Д. А. Раднатаров

**Импульсный ВЧ-индукционный CO<sub>2</sub>-лазер**

И. А. Трунов

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный технический университет

CO<sub>2</sub>-лазер — один из наиболее широко распространенных источников импульсного и непрерывного инфракрасного излучения, который находит широкое применение в различных областях науки и техники, например в медицине и технологиях обработки материалов. Наиболее распространенными методами накачки активной среды CO<sub>2</sub>-лазера на сегодняшний день являются поперечный электрический разряд и ВЧ-разряд. КПД CO<sub>2</sub>-лазеров может превышать 25%, но при этом энергия излучения не превышает десятков мДж.

Сравнительно недавно в лаборатории импульсных газоразрядных лазеров под руководством А. М. Ражева был предложен новый метод накачки активных газовых сред, а именно импульсный индукционный разряд, который имеет ряд несомненных преимуществ (например, безэлектродность) перед традиционными методами накачки [1]. Чуть позднее был создан ряд импульсных индукционных лазеров, включая CO<sub>2</sub>-лазер ( $\lambda \sim 10,6$  мкм) с энергией излучения около 100 мДж при КПД меньше 1% [2]. А в [3] нами был создан ВЧ-индукционный (27,12 МГц) CO<sub>2</sub>-лазер с энергией около 17 мДж, но КПД составил около 17%.

Целью данных исследований был поиск оптимальных условий возбуждения, оптимизация состава и давления рабочей смеси и параметров накачки, направленные на достижение максимальных энергетических характеристик (энергия и КПД).

В докладе представлены результаты исследования, в ходе которого установлен оптимальный состав рабочей смеси He:N<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> = 6:1.5:1.5, достигнуто значение КПД 14% с энергией излучения 180 мДж при длительности импульса возбуждения около 2 мс. Максимальная достигнутая энергия излучения составила 300 мДж.

---

1. *Ражев А. М., Мхитарян В. М., Чуркин Д. С.* FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, № 5. С. 290–294.

2. *Razhev A. M., Churkin D. S., Zhupikov A. A.* Pulsed gas lasers excited by an inductive discharge // XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. International Society for Optics and Photonics, 2007. Vol. 6346. P. 63460.

3. *Razhev A. M., Churkin D. S., Kargapol'tsev E. S.* Pulsed IR inductive lasers // Laser Physics. 2014. Vol. 24, № 7. P. 074004.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. М. Ражев

## Исследование локализованных плазмонных резонансов на массиве гофрированных дисков в терагерцовом диапазоне

Р. Р. Хафизов

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет

Локализованный плазмонный резонанс (ЛПР) представляет из себя резонансные колебания плотности заряда свободных электронов в проводящих частицах субволнового размера, находящихся в осциллирующем внешнем поле. Необычные свойства ЛПР (сильная пространственная локализация, усиление электромагнитного поля вблизи поверхности частицы, зависимость частоты резонанса от формы, размера, проводимости, диэлектрической проницаемости частицы и диэлектрической проницаемости среды, окружающей частицу) нашли широкое применение в оптическом диапазоне и ближнем ИК [1]. Но задача использовать свойства ЛПР в терагерцовом диапазоне (ТГц) представляет из себя принципиальную сложность, так как для ТГц и микроволнового диапазона частоты колебаний электромагнитной волны на несколько порядков меньше плазменной частоты металла. Для получения ЛПР в области этих частот используются особым образом текстурированные частицы [2].

В работе исследуются металлизированные логарифмические спирали двух типов (со спиральным углом 0 и 90 градусов) на полипропиленовой подложке. В среде *CST microwave studio suite 2019* были выполнены численные расчеты спектров пропускания и фазы падающего на структуру излучения в диапазоне 0,1 до 1,5 ТГц. Варьируя параметры структур, были найдены оптимальные конфигурации для создания биосенсоров. С помощью контактной литографии была изготовлена серия образцов и выполнены эксперименты с помощью спектрометра на лампах обратной волны и *Time-domain*-спектроскопии. Результаты экспериментов хорошо согласуются с расчетами.

---

1. *Valev V.K. et al.* Asymmetric Optical Second-Harmonic Generation from Chiral G-Shaped Gold Nanostructures // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104. P. 127401.

2. *Pors A., Moreno E., Martin-Moreno L., Pendry J. Garcia-Vidal F.* Localized Spoof Plasmons Arise while Texturing Closed Surfaces // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108. P. 223905.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Герасимов

## Указатель авторов

Алиев С. И. ....	6	Крисанов Д. В. ....	22
Ашкарин И. Н. ....	7	Кудлаев Я. В. ....	23
Бойкова А. В. ....	8	Куц Р. И. ....	24
Владимирская А. Д. ....	9	Митянин К. Ю. ....	25
Гаськов М. П. ....	10	Мишевский М. С. ....	26
Глухова С. А. ....	11	Поддубровский Н. Р. ....	27
Гусаченко Д. В. ....	12	Рыбак А. А. ....	28
Дамбуев А. М. ....	13	Свиридов Е. И. ....	29
Добрынина Е. А. ....	14	Симкин Т. М. ....	30
Долгирев В. О. ....	15	Стещенко Т. С. ....	31
Дудник Д. И. ....	16	Трунов И. А. ....	32
Журавлев Н. А. ....	17	Хафизов Р. Р. ....	33
Кирпичникова А. А. ....	18		
Кичигин А. А. ....	19	Osokin V. B. ....	5
Климачева О. А. ....	20	Ying G. ....	5
Коновалова А. О. ....	21		

## Содержание

Osokin V. B., Ying G.....	5
Алиев С. И. ....	6
Ашкарин И. Н. ....	7
Бойкова А. В. ....	8
Владимирская А. Д. ....	9
Гаськов М. П. ....	10
Глухова С. А. ....	11
Гусаченко Д. В. ....	12
Дамбуев А. М. ....	13
Добрынина Е. А. ....	14
Долгирев В. О. ....	15
Дудник Д. И. ....	16
Журавлев Н. А. ....	17
Кирпичникова А. А. ....	18
Кичигин А. А. ....	19
Климачева О. А. ....	20
Коновалова А. О. ....	21
Крисанов Д. В. ....	22
Кудлаев Я. В. ....	23
Куц Р. И. ....	24
Митянин К. Ю. ....	25
Мишевский М. С. ....	26
Поддубровский Н. Р. ....	27
Рыбак А. А. ....	28
Свиридов Е. И. ....	29
Симкин Т. М. ....	30
Стещенко Т. С. ....	31
Трунов И. А. ....	32
Хафизов Р. Р. ....	33
Указатель авторов.....	34

Научное издание

МНСК-2020

ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Материалы  
58-й Международной научной студенческой конференции

10–13 апреля 2020 г.

Корректор *Д. И. Ковалева*  
Верстка *А. С. Терешкиной*  
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 20.03.2020 г.  
Формат 60 × 84/16. Уч.-изд. л. 2,2. Усл. печ. л. 2.  
Тираж 100 экз. Заказ № 81.  
Издательско-полиграфический центр НГУ  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2



Секция  
ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ  
ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ISBN 978-5-4437-1065-5



**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
**\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

