

**РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ В ОТЧЕТ РАН
ПО РАЗДЕЛУ
«ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ,
ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК»**

3. Отделение нелинейной динамики и оптики

3.1. Создан широкодиапазонный безрезонаторный спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, обеспечивающий получение методом провала Лэмба узких нелинейных резонансов с минимальной шириной ~ 5 кГц внутри доплеровского контура вращательных переходов молекул и измерение их частот с абсолютной точностью лучше 1 кГц (± 500 Гц). Достигнутые параметры вдвое превосходят лучшие аналоги. Спектрометр предназначен для прецизионных измерений частот молекулярных вращательных переходов и изучения их сверхтонкой структуры в интересах наземной и космической радиоастрономии, а также фундаментальных астрофизических и спектроскопических исследований.

Авторы: Белов С.П., Голубятников Г.Ю., Леонов И.И., Лапинов А.В.

Аннотация. Совершенствование техники и методов наземной и, особенно, космической радиоастрономии, а также современная астрофизика и спектроскопия требуют проведения лабораторных измерений спектров молекул в терагерцовом диапазоне частот с максимально возможной точностью. Такие данные, как несмещённые лабораторные частоты компонент сверхтонкой структуры молекулярных переходов, их ширины, относительные интенсивности, величины расщепления энергетических уровней внутримолекулярными взаимодействиями нужны в радиоастрономии для определения химического состава, физических условий (температуры, плотности, скорости движения молекул) в межзвездной среде, изучения внутренней динамики газопылевых облаков в областях звездообразования и многих других задач. В частности, прецизионные измерения частот вращательных и туннельно-вращательных переходов молекул, таких как аммиак и метанол, нужны для экспериментального обнаружения возможных вариаций от времени и места во вселенной значений таких фундаментальных констант как постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$ и величины отношения массы электрона к массе протона $\mu = m_e/m_p$. Прецизионные спектроскопические измерения необходимы также для развития методов квантово-механического описания спектров молекул и построения моделей внутримолекулярных движений, в том числе, основанных на принципах симметрии. В частности, данные о симметрии спиновых и координатных волновых функций, получаемые из экспериментально измеренных интенсивностей компонент сверхтонкой структуры переходов молекул с высокой симметрией, чрезвычайно важны для понимания механизмов смешивания волновых функций, изучения фундаментальных свойств материи, связанных с неразличимостью тождественных частиц.

Одним из наиболее точных методов измерения частот спектральных линий молекул и их сверхтонкой структуры является метод провала Лэмба. В настоящее время лучший зарубежный спектрометр с насыщением молекулярного поглощения [1] позволяет получать нелинейные субдоплеровские резонансы (провалы Лэмба) шириной ~ 10 кГц и измерять их частоты с погрешностью в пределах 1 кГц вплоть до частот 600 -700 ГГц. В России до настоящего времени подобных спектрометров не было и прецизионные измерения приходилось вести в зарубежных лабораториях. Разработанный спектрометр ликвидирует это отставание и открывает новые возможности для проведения исследований в области молекулярной спектроскопии и астрофизики.

Публикации

1. Cazzoli G., Puzzarini C., Harding M.E., Gauss J., "The hyperfine structure in the rotation spectra of water: Lamb-dip technique and quantum-chemical calculations", Chem. Phys. Lett., v. 473, pp. 21-25, 2009.

3.2. Теоретически показано, что диффузия специально введенного ингибитора может приводить к улучшению разрешающей способности при создании наноструктур методом лазерной полимеризации. В лазерном центре IESL FORTH (Гераклион, Греция) путем введения ингибитора в полимеризационную среду и выбора режима облучения, при котором диффузия ингибитора существенна, получены образцы фотонных кристаллов из гибридного органо-неорганического полимера с периодом решетки 400 нм. На данный момент это лучший результат, полученный с помощью традиционной многофотонной лазерной полимеризации.

Авторы: А.В. Пикулин, Н.М. Битюрин (ИПФ РАН), И. Сакеллари, В. Парлис, Е. Кабуаки, Д. Грей, К. Фотакис, М. Вамвакаки, М. Фарсари (IESL FORTH, Греция)

Аннотация. Лазерная нанополимеризация является в настоящий момент основным способом создания твердых наноструктур произвольной трехмерной конфигурации. Образование структур осуществляется путем прямой записи сфокусированным лазерным пучком, инициирующим фотополимеризацию в соответствующей среде. Данная технология востребована в задачах фотоники, микрофлюидики, трехмерного хранения информации, а также в биомедицинских приложениях.

Наличие порога полимеризации по отношению к плотности поглощенной энергии позволяет создавать отдельные элементы полимерных структур (например, линии) с размерами значительно меньшими дифракционного предела фокусировки лазерного пучка. Однако, эффект памяти полимеризационной среды по отношению к лазерному воздействию ограничивает дифракционным пределом минимальное расстояние, на котором можно создать два таких отдельных элемента. Предложен способ преодоления данного ограничения разрешающей способности за счет использования диффузии специально введенного в полимеризационную среду ингибитора – реагента, препятствующего полимеризации.

В случае ингибированной полимеризации поглощаемая плотность энергии лазерного пучка расходуется сначала на выработку ингибитора, затем в областях среды, где ингибитор выработан полностью, происходит образование полимерной структуры. При выборе ингибитора с высокой молекулярной подвижностью и уменьшении скорости лазерной записи эффект памяти, связанный со снижением концентрации ингибитора, может быть преодолен за счет его диффузии.

Был теоретически рассмотрен такой режим записи полимерных наноструктур сфокусированным лазерным пучком, при котором уничтожение ингибитора в зоне максимума интенсивности пучка сбалансировано диффузионным переносом ингибитора из необлученных областей. В этом случае полимеризация протекает только в небольшой зоне вблизи максимума интенсивности пучка, там, где ингибитор отсутствует. Размер этой зоны может быть произвольно уменьшен путем подбора интенсивности облучения, в то время как высокий контраст степени полимеризации достигается путем увеличения дозы облучения.

В лазерном центре IESL FORTH (Гераклион, Греция) по данному методу были получены образцы фотонных кристаллов с периодом решетки 400 нм. На данный момент, это лучший результат, полученный с помощью однопучковой многофотонной лазерной полимеризации.

Публикации

1. I. Sakellari, E. Kabouaki, D. Gray, V. Purlys, C. Fotakis, A. Pikulin, N. Bityurin, M. Vamvakaki, and M. Farsari, "Diffusion-assisted high resolution direct fs laser writing," ACS Nano, *submitted*.

3.3. Предложена схема компенсации термонаведенного двулучепреломления в изоляторах Фарадея, основанная на использовании дополнительного компенсирующего элемента вне магнитного поля и оптимизации ориентации кристаллографических осей элементов. Результаты теоретического анализа подтверждены экспериментально, при мощности лазерного излучения 300 Вт степень изоляции увеличена в 7 раз. Показана возможность создания устройства на лазерную мощность 4 кВт со степенью изоляции 10^{-3} на существующих кристаллах.

Предложенная схема позволяет также модернизировать ранее созданные изоляторы Фарадея, увеличивая допустимую лазерную мощность; использовать в качестве дополнительного компенсирующего другие оптические элементы мощных лазерных систем или компенсировать термонаведенные искажения в них.

Авторы: О.В. Палашов, И.Л. Снетков, И.Б. Мухин, Е.А. Хазанов

Аннотация. В лазерах с высокой (~ 1 кВт и более) средней мощностью одним из устройств, в которых излучение подвержено сильному тепловому самовоздействию, является изолятор Фарадея (ИФ), что обусловлено относительно высоким поглощением излучения ($\sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$) в магнитооптических элементах (МОЭ). Поэтому степень изоляции – важнейшая характеристика ИФ – большей частью определяется величиной термодеполяризации в МОЭ. Существует несколько подходов к проблеме уменьшения термодеполяризации. Один из способов – компенсация двулучепреломления наведенного в МОЭ при помощи термонаведенного двулучепреломления в другом. Идея существовавшего ранее способа заключалась в делении 45° -ного МОЭ на две половины, вращающих по $22,5^\circ$, и размещения между ними $67,5^\circ$ взаимного поляризационного вращателя. Все оптические элементы в такой схеме находятся внутри магнитной системы, МОЭ идентичны и кристаллографические оси в них ориентированы одинаково.

Идея нового способа компенсации термодеполяризации заключается в добавлении к 45° -му МОЭ компенсатора, расположенного вне магнитного поля ИФ и состоящего из двух оптических элементов: поляризационного вращателя и дополнительного оптического элемента (ДОЭ), изготовленного из материала, имеющего термооптические свойства близкие к свойствам МОЭ. Поэтому термодеполяризация, наведенная в МОЭ, частично компенсируется в ДОЭ. Оптимизация параметров (θ_r , D , θ_1 и θ_2 для ориентации [001] и θ_r и D для ориентации [111], где $\theta_{r,1,2}$ – угол между плоскостью поляризации и одной из кристаллографических осей вращателя, МОЭ и ДОЭ; D – параметр, характеризующий термооптические свойства МОЭ и ДОЭ) позволяет эффективно ослаблять термодеполяризацию. Результаты расчетов подтверждены экспериментально, при мощности лазерного излучения 300Вт степень изоляции увеличена в 7 раз. Полученные результаты показывают возможность создания устройства на лазерную мощность 4 кВт со степенью изоляции 10^{-3} , используя существующие кристаллы.

Предложенная схема имеет ряд дополнительных преимуществ. Во-первых, она позволяет модернизировать (добавлением двух оптических элементов) традиционные ИФ, увеличивая допустимую мощность. Во-вторых, позволяет изготавливать ДОЭ из материала отличного от материала МОЭ, который может быть дешевле. При выборе материала с противоположным по знаку значением dn/dT , частично компенсировать не только термодеполяризацию, но и термолинзу. При выборе материала ДОЭ с параметром оптической анизотропии $\xi < 0$ из предложенной схемы может быть исключен поляризационный вращатель. Более того, функцию ДОЭ могут выполнять другие оптические элементы лазерной системы, например АЭ, поляризатор (получено экспериментальное подтверждение) и др. В-третьих, заложенный в схему принцип позволит изготавливать компенсаторы не только для ИФ, но и для других оптических элементов мощных лазерных систем.

Публикации

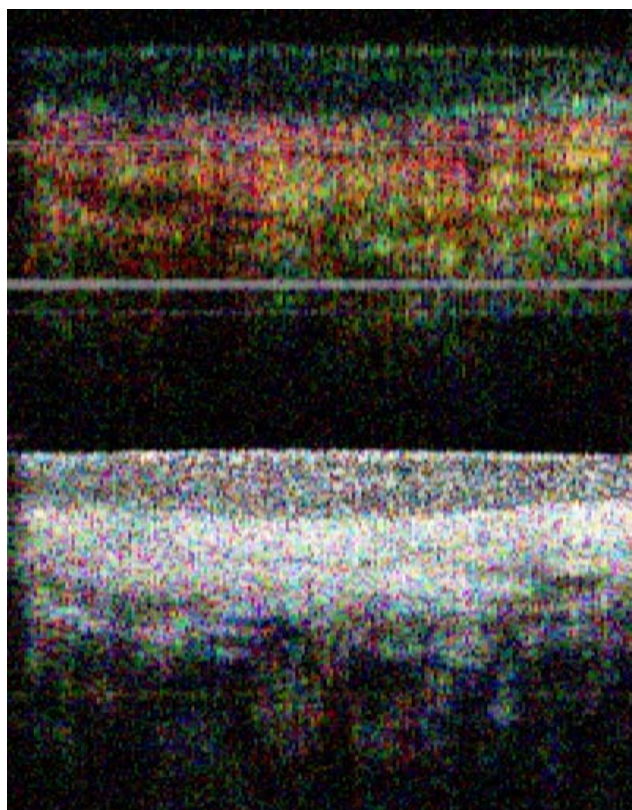
1. I. Snetkov, I. Mukhin, O. Palashov, and E. Khazanov, "Compensation of thermally induced depolarization in Faraday isolators for high average power lasers", *Optics Express* **19**, 6366-6376 (2011).

2. Snetkov I.L., Palashov O.V., Khazanov High-Power Faraday Isolator with New Method of Compensation of Thermally Induced Depolarization, E.A. CTuJ4, CLEO 2011, 1-6 May, Baltimore, USA.

3.4. С целью повышения информативности зондирования биоткани создан новый вариант поляризационного метода оптической когерентной томографии на базе оптической схемы на изотропном волокне с общим трактом для сигнальных и опорных волн. Метод основан на формировании рабочего излучения в виде двух когерентных ортогонально поляризованных волн произвольной эллиптичности, между которыми вводится задержка, а также на интерференционном приеме обратно рассеянного света, с использованием опорных волн с исходными поляризациями в одном канале и перекрестными поляризациями во втором канале. Показано, что угловая ориентация осей биологической ткани влияет на изображение в первом канале и не влияет во втором, что позволяет выделять наличие упорядоченных слоев в ее локальных фрагментах при вращении эллипса поляризации рабочего излучения.

Авторы: Геликонов Г.В., Геликонов В.М., Касаткина И.В., Фельдштейн Ф.И.

Аннотация. Усовершенствован поляризационно-чувствительный корреляционный оптический когерентный томограф с эндоскопическим зондом на одномодовом волокне, предназначенный для *in-vivo* зондирования живой биоткани. Система с общим оптическим трактом для зондирующих и опорных волн содержит гибкий зонд, измерительный интерферометр Физо, интерферометр Майкельсона как коррелятор,



поляризационный ротатор и оптический приемник. Использование двух взаимно когерентных ортогональных зондирующих волн и суммирование с точностью до фазы всех сигналов на доплеровской частоте в прямом и кросс каналах позволяет устранить недостатки прототипа и повысить информативность ОКТ изображений. Так изображение в исходной поляризации зависит только от двулучепреломления биоткани и не зависит от эллиптичности пробных волн и ориентации осей эллипса. Однако изображение в ортогональной поляризации зависит не только от двулучепреломления биоткани, но и от ориентации пробных волн. Это позволяет при вращении эллипса поляризации рабочего излучения получать одновременно как обычное ОКТ изображение в исходных поляризациях (б), так и кросс изображение, в котором в цветной палитре отображается ориентация упорядоченных слоев в локальных фрагментах биоткани (а).

Публикации

1. V.M. Gelikonov, G.V. Gelikonov, I.V. Kasatkina "Polarization-sensitive time domain optical coherence tomography based on two orthogonal elliptically polarized mutually coherent waves", Proceedings TPB – 2011, St.-Petersburg – Nizhny Novgorod, Russia, 16 – 22 July, 2011, p. 47-48.

2. G.V. Gelikonov, F.I. Feldchtein, and V.M. Gelikonov "Polarization-sensitive time domain optical coherence tomography based on common path optical fiber system", to be published.

3.5. С помощью резонаторного спектрометра проведено исследование континуального поглощения миллиметровых волн смесью водяного пара с азотом в зависимости от влажности и температуры смеси. Учет влияния адсорбции воды элементами резонатора позволил впервые провести измерения континуума при отрицательных температурах. Определены наиболее точные на сегодняшний день эмпирические параметры континуума. На основании существующих расчетов, сделана оценка вклада известных механизмов, приводящих к возникновению континуума. Подтверждено, что при температурах ниже комнатной практически вся квадратичная по концентрации молекул воды часть континуума обусловлена димером воды, и показано, что только 65-85% линейной по концентрации молекул воды части континуума обусловлены дополнительным индуцированным дипольным моментом в молекуле воды, возникающем при ее столкновении с молекулами азота.

Авторы: Кошелев М.А., Третьяков М.Ю. Серов Е.А., Паршин В.В.

Аннотация. Исследования континуального поглощения направлены на решение как прикладных, так и фундаментальных и проблем. Природа этого поглощения до конца не ясна. Предполагается совместное действие нескольких механизмов, таких как дальние крылья регулярных линий, поглощение стабильными и метастабильными молекулярными комплексами, поглощение, индуцированное столкновениями. Среди прикладных задач – построение моделей поглощения, используемых для дистанционного зондирования, расчета радиационного баланса Земли, радиосвязи и, особенно, радиолокации в окнах относительной прозрачности атмосферы.

Несмотря на длительную историю исследований, результаты лабораторных и полевых измерений связанного с влажностью континуального поглощения зачастую не согласуются друг с другом и с теоретическими. Во многом это объясняется сложностью исследований ввиду малости величины континуального поглощения по сравнению с резонансным, а также наличием систематических ошибок в экспериментах связанных с влажностью. Именно поэтому все предшествующие лабораторные исследования связанного с влажностью континуума выполнялись при положительных температурах (например, измерения Подобедова от +20 до +60 °С, Bauer – от +23 до +83, Liebe от +9 до

+44 °C). В то же время большая часть атмосферы Земли имеет отрицательную температуру.

Результаты работы основаны на новых высокоточных исследованиях континуального поглощения в смеси водяного пара с азотом в диапазоне частот 107-143 ГГц, при относительных влажностях смеси от 0 до 60%. Выполнено большое число измерений в интервале температур от -12 до +55 °C. Высокая точность и надежность полученных данных обусловлена чувствительностью использовавшегося спектрометра, которая на порядок превосходит чувствительность известных аналогов, а так же применением новой методики измерений, которая минимизирует систематические ошибки измерений, связанные с адсорбцией молекул воды на элементах измерительного резонатора спектрометра.

Параметры континуума, определенные из экспериментальных данных позволяет провести их сравнение с результатами имеющихся теоретических расчетов континуума, возникающего в результате действия различных физических механизмов. В частности были проанализированы вклады связанных димеров воды [Y. Scribano, C. Leforestier J. Chem. Phys. 126 (2007) 234301.] (полная внутренняя энергия такого димера меньше энергии его диссоциации по межмолекулярной связи) и столкновительно - индуцированного поглощения [Q.Ma., R.H.Tipping. JQSRT 82 (2003) 517], возникающего в водяном паре в результате взаимодействия молекул воды с молекулами азота и обусловленного дополнительным индуцированным дипольным моментом в молекуле воды. В первом случае сравнение подтвердило, что при температуре вблизи комнатной практически весь континуум в чистом водяном паре обусловлен спектром поглощения связанных димеров воды. При повышении температуры, экспериментальная зависимость начинает идти выше, оставляя место для других механизмов, приводящих к возникновению континуума. Во втором случае сравнение показало, что столкновительно-индуцированное поглощение составляет только часть наблюдаемой в эксперименте линейной по влажности составляющей континуума, что не вызывает противоречий, поскольку в равновесных условиях во влажном азоте могут образовываться гетеродимеры $H_2O \cdots N_2$, которые тоже будут вносить свой вклад в поглощение (к сожалению, в настоящее время отсутствуют расчеты спектра такой молекулы, поэтому количественное сравнение невозможно). Однако разница между расчетом и экспериментом увеличивается с увеличением температуры. Это противоречит тому, что с повышением температуры столкновительно-индуцированное поглощение должно становиться доминирующим механизмом формирования континуума.

Публикации

1. M.A. Koshelev, E.A. Serov, V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov, Millimeter wave continuum absorption in moist nitrogen at temperatures 261 – 328 K, *J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer* 112 (2011) 2704-2712.

2. M.A. Koshelev, E.A. Serov, V.V. Parshin, M.Yu. Tretyakov and D.S. Makarov, Millimeter wave continuum absorption in moist nitrogen at temperatures 261 – 328 K, 22-d Colloquium on High-Resolution Molecular Spectroscopy, Dijon, France, August 29 - September 2, 2011.

3. Паршин В.В., Кошелев М.А., Кукин Л.М., Серов Е.А., Третьяков М.Ю., Шанин В.Н., Андриянов А.Ф. Поглощение в 2-х ММ окне прозрачности атмосферы // Сборник докладов XXIII всероссийской научной конференции РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН (Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011 года) Т. 2. С. 64-67.

4. Е.А. Серов, М.А. Кошелев, В.В. Паршин, М.Ю. Третьяков. Температурная зависимость параметров континуального поглощения в смеси водяного пара с азотом в миллиметровом диапазоне длин волн. VIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 1-4 марта 2011. С. 93.

3.6. Построена теория генерации высоких гармоник интенсивного лазерного излучения в газах, учитывающая пространственную структуру волновых пакетов электронов, перерасеивающихся на родительских ионах. Предложено объяснение природы эллиптичности высоких гармоник и найден физический механизм эффективной генерации эллиптически-поляризованных гармоник. В частности, показана возможность и найдены условия эффективной генерации гармоник с высокой эллиптичностью при взаимодействии линейно-поляризованного лазерного излучения с молекулами. Полученный результат открывает возможности рентгеновской спектроскопической диагностики магнитных структур с нанометровым пространственным и фемтосекундным временным разрешением с использованием компактных лазерных систем.

Авторы: А.А. Гоносков, И.А. Гоносков, М.Ю. Рябикин (ИПФ РАН), В.В. Стрелков (ИОФ РАН)

Аннотация. Практический интерес к явлению генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) оптического излучения при взаимодействии мощных лазерных импульсов с газами обусловлен возможностями его использования для создания компактных источников когерентного излучения вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского диапазона. Недавние успехи в создании мощных источников фемтосекундного излучения среднего ИК диапазона [G. Andriukaitis et al., Opt. Lett. 36, 2755 (2011)] и в осуществлении фазового синхронизма при нелинейном взаимодействии такого излучения с газами в капиллярах при высоком давлении [T. Popmintchev et al., PNAS 106, 10516 (2009)] привели к созданию основанных на ГГВП компактных высокоярких источников с энергиями фотонов от сотен эВ до единиц кэВ. Такие источники представляют интерес для применения в тех областях, в которых до недавнего времени могли использоваться только синхротронные источники. Так, в диапазоне 0.4–1.2 кэВ лежат L-края полос поглощения многих металлов, включая магнитные материалы, что обуславливает интерес к развитию элементно-чувствительной фемтосекундной спектроскопии в этом диапазоне, перспективной для имиджинга магнитных материалов, в том числе наноструктур, и исследованиям сверхбыстрых процессов в них.

Использование эффектов кругового дихроизма при взаимодействии ультракоротких импульсов эллиптически- или циркулярно-поляризованного рентгеновского излучения с магнитными материалами позволяет исследовать процессы в этих материалах с высоким временным и пространственным разрешением. В связи с этим вызывает большой интерес решение проблемы генерации эллиптически и циркулярно-поляризованных высоких гармоник лазерного излучения. Решение этой задачи сильно затруднено тем, что физический механизм ГГВП в газах, основанный на перерасеянии оторванных от атомов электронов на родительских ионах [P.V. Corkum, PRL 71, 1994 (1993)], очень чувствителен к поляризации исходного излучения: эллиптически-поляризованные гармоники, как правило, генерируются только при эллиптически-поляризованной накачке, а эффективность преобразования частот резко уменьшается с ростом эллиптичности падающего излучения. Авторами данного исследования найдены условия, при которых генерация гармоник с высокой эллиптичностью может происходить с большой эффективностью.

Проведенное исследование основано на построенной авторами теории ГГВП в газах, учитывающей пространственную структуру волновых пакетов электронов, перерасеивающихся на родительских ионах. Это позволило объяснить природу эллиптичности высоких гармоник в терминах поперечной неоднородности электронных волновых пакетов. На основе развитой теории и проведенных прямых численных расчетов показана возможность и найдены условия эффективной генерации гармоник с высокой эллиптичностью при взаимодействии линейно-поляризованного лазерного излучения с выстроенными молекулами. Согласно проведенным исследованиям, возникновение

компоненты индуцированного дипольного момента, перпендикулярной по отношению к поляризации падающего излучения, обусловлено асимметрией электронного волнового пакета при его отрыве от молекулы и возврате к родительскому ионному остову. Полученный результат согласуется с результатами недавних экспериментов [X. Zhou et al., PRL 102, 073902 (2009)] и открывает возможности рентгеновской спектроскопической диагностики магнитных структур с нанометровым пространственным и фемтосекундным временным разрешением с использованием компактных лазерных систем.

Публикации

1. V.V. Strelkov, A.A. Gonoskov, I.A. Gonoskov, and M.Yu. Ryabikin, Origin for ellipticity of high-order harmonics generated in atomic gases and the sublaser-cycle evolution of harmonic polarization, Physical Review Letters, v.107, No 4, 043902, 2011.

2. M.Yu. Ryabikin, A.A. Gonoskov, I.A. Gonoskov, and V.V. Strelkov, Quantum path interference in HHG: impact on harmonic polarization and molecular imaging, In: Multiphoton Processes and Attosecond Physics: Proceedings of ICOMP12/ ATTO3 (Kaoru Yamanouchi and Katsumi Midorikawa, Eds.), Springer-Verlag, 2011.

3.7. Созданы мощные и эффективные лазеры, впервые использующие в качестве активной среды керамику $Tm^{3+}:Lu_2O_3$, с накачкой коммерчески доступными лазерными диодами на длине волны 796 нм или 811 нм. Исследованы структурные, оптические и спектроскопические свойства этой новой керамики. Получена генерация в непрерывном и импульсно-периодическом режимах на длине волны 2066 нм – наибольшей из известных в тулиевых материалах. Созданные лазеры могут быть использованы для проведения эндоскопических хирургических операций, обработки материалов, дистанционного экологического мониторинга, а также решения военно-технических задач.

Авторы: Антипов О.Л., Новиков А.А., Захаров Н.Г., Зиновьев А.П., Головкин С.Ю. (ИПФ РАН), Сахаров Н.В., Круглова М.В., Марычев М.О., Горшков О.Н., Касаткин А.П., Чупрунов Е.В. (ННГУ).

Аннотация. Лазеры двухмикронного диапазона длин волн (1.9-2.1 мкм) имеют множество применений в медицине, дистанционном зондировании атмосферы и экологическом мониторинге, технологиях обработки пластиков и других областях. Кроме того, лазеры на длине волны более 2 мкм являются идеальными источниками накачки параметрических генераторов света (ПГС) на основе кристаллов $ZnGeP_2$, например, для преобразования излучения в средний ИК диапазон.

Существующие в настоящее время лазеры двухмикронного диапазона на основе кристаллов и стёкол, активированных ионами Ho^{3+} , требуют длинноволновой накачки с помощью волоконных или твердотельных лазеров, а тулиевые лазеры (на основе материалов, активированных Tm^{3+}) способны эффективно генерировать мощное излучение только на более короткой длине волны (≤ 2 мкм). По нашему заказу компанией “Konoshima Chemicals” (Япония) была впервые изготовлена лазерная керамика $Tm^{3+}:Lu_2O_3$, которая сочетает в себе достоинства мощной генерации на длине волны >2 мкм и эффективной накачки с помощью хорошо отработанных лазерных диодов на длине волны ~ 800 нм.

С помощью растрового электронного микроскопа “Jeol JSM-6490” (производства компании “Jeol”, Япония) и атомно- силового микроскопа “Solver Pro” (производства компании “NT-MDT”, Россия) была исследована структура керамики. Средний размер зерна (кристаллита) керамики составил $\sim 0,54-0,56$ мкм, характерный размер пор на границах кристаллита - менее 3 нм (точность определения ограничивалась разрешающей

способностью микроскопов). Измеренный при комнатной температуре спектр поглощения керамики в диапазоне длин волн от 500 нм до 2500 нм (с помощью спектрофотометра “Perkin-Elmer Lambda 9”, производства компании “PerkinElmer Inc.”) показал наличие сильных линий поглощения с центрами на длинах волн 796 нм и 811 нм. Измерения в среднем ИК диапазоне с помощью Фурье-спектрометра “FTS-7000” (производства компании “Varian”) выявили хорошее пропускание керамики вплоть до 7 мкм. Исследование спектра люминесценции керамики Tm:Lu₂O₃ при накачке лазерным диодом на длине волны 796 нм с помощью монохроматора “MDP-41” (производства компании “ЛОМО”, Россия) показало наличие сильных линий с максимумами на длинах волн 1942 нм, 1965 нм и 2065 нм. Оценки времени жизни верхнего лазерного уровня и времени кросс-релаксации ионов Tm³⁺ (по измерениям затухания люминесценции на длине волны ~2 мкм и в диапазоне длин волн 0,8-1,5 мкм) дали величины 3.74±0.07 мс и 4.8±1.1 мкс, соответственно. Измерения показателя преломления (проведённые с помощью спектроскопического эллипсометра “PhE-102”, производства компании “Micro Photonics Inc.”) дали значения $n \sim 1,94$ на длине волны накачки 811 нм и $n \sim 1,92$ на длине волны генерации 2066 нм.

При накачке стержней из керамики Tm:Lu₂O₃ диодными лазерами на длине волны 796 нм или 811 нм получена мощная и эффективная генерация на длине волны 2066 нм как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме. Мощность генерации в непрерывном режиме достигает 29 Вт при дифференциальной эффективности ~42%. Реализована также импульсно-периодическая генерация (при акустооптической модуляции добротности резонатора) импульсов длительностью 100-150 нс, следующих с частотой повторения 3-10 кГц.

Лазеры на основе керамики Tm:Lu₂O₃ показывают хорошие перспективы увеличения мощности двухмикронной генерации до уровней в сотни ватт-киловатты путём оптимизации концентрации активатора, размеров активного элемента, геометрии накачки и резонатора. Импульсно-периодические лазеры на основе керамики Tm:Lu₂O₃ является также перспективными источниками накачки ПГС на основе кристаллов ZnGeP₂, способными генерировать мощное излучение среднего ИК диапазона.

Публикации

1. О.Л. Антипов, С.Ю. Головкин, О.Н. Горшков, Н.Г. Захаров, А.П. Зиновьев, А.П. Касаткин, М.В. Круглова, М.О. Марычев, А.А. Новиков, Н.В. Сахаров, Е.В. Чупрунов, “Структурные, оптические и спектроскопические свойства новой лазерной керамики Tm³⁺:Lu₂O₃ и эффективная двухмикронная лазерная генерация на её основе”, Квантовая электроника, Том 41, № 10 стр. 860-867, 2011.

2. Oleg Antipov, Nikita Zakharov, Anton Novikov, Valeriy Sharkov, “High Efficiency 2066-nm Laser Based on Tm:Lu₂O₃ ceramics”, in Technical Digest of CLEO/Europe-EQEC 2011 (22-26 May 2011, Munich, Germany), paper CA. P. 21.

3. Andrey Zinoviev, Remi Soulard, Oleg Antipov, Richard Moncorge, Eugeni Ivakin, “Dynamics of Refractive Index Changes in Tm-doped Crystals Tm:YAG and Tm:YLF, and Ceramics Tm:Lu₂O₃”, in Technical Digest of CLEO/Europe-EQEC 2011 (22-26 May 2011, Munich, Germany), paper CA. P. 22.

4. O.L. Antipov, A.A. Novikov, N.G. Zakharov, and A.P. Zinoviev, “Optical properties and highly efficient laser generation at 2066 nm of novel Tm:Lu₂O₃ ceramics,” Optical materials express (submitted at October 21, 2011).

5. О.Л. Антипов, Н.Г. Захаров, А.А. Новиков, Патентная заявка “Оптический квантовый генератор двухмикронного диапазона длин волн” (дата поступления в РОСПАТЕНТ: 25/02/2011; регистрационный номер: 2011106907).

3.8. Предложен и апробирован метод визуализации прозрачных объектов и структур фокусировкой прошедшего через объект лазерного излучения в слабопоглощающую протяженную среду. Метод является развитием классического метода фазового контраста Цернике. Визуализация реализована в жидкостях и газах на тепловом механизме нелинейности среды при милливаттном уровне мощности зондирующего лазерного пучка. Путем численного моделирования показано, что, несмотря на нелокальность используемой нелинейности, визуализация осуществляется с разрешающей способностью близкой к дифракционной. Экспериментально продемонстрирована визуализация газового микропотока, прозрачного текста, флуктуаций показателя преломления в жидком глицерине и некоторых других важных прозрачных объектов и структур.

Авторы: Бубис Е.Л., Матвеев А.З.

Аннотация. Предложен и исследован метод визуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке прошедшего через объект и получившего вследствие этого пространственную фазовую модуляцию лазерного излучения в слабопоглощающую протяженную среду. В методе используется тепловая нелинейность жидкостей или газов. Требуемый уровень мощности для эффективной визуализации соответствует мощности начальной стадии развития тепловой самодефокусировки освещающего пучка в среде и в жидкостях составляет единицы милливатт. Метод является развитием классического метода фазового контраста Цернике. Продемонстрирована визуализация ряда важных прозрачных объектов и структур: газового микропотока, прозрачного текста, флуктуаций показателя преломления в жидком глицерине и т.д. Экспериментально зарегистрировано усиление границ в визуализированном изображении прозрачных объектов с резкими краями, рассчитанное теоретически.

В результате численных расчетов показано, что, несмотря на нелокальность используемой в предлагаемом методе нелинейности, визуализация осуществляется с разрешающей способностью близкой к дифракционной. Проведено сравнение схемы визуализации с фототермической ячейкой Цернике (на основе частичного поглощения света средой) с той схемой, но с ячейкой Цернике на основе локальной керровской нелинейности.

Предложенная методология, кроме применений в классической Церниковской микроскопии визуализации прозрачных биологических объектов, может использоваться для прецизионной диагностики и детектирования слабых флуктуаций плотности газовых и плазменных сред. Вследствие адаптивности представленного процесса (в отличие от классического, он не зависит от направления лазерного луча), визуализация будет иметь место в ситуациях, приводящих к смещению (блужданию) пучка как целого в фурье-плоскости, например, в условиях тепловых потоков или в стратифицированной среде.

Публикации

1. Бубис Е.Л. «Эффект самовизуализации прозрачных объектов и структур при фокусировке пространственно фазомодулированного лазерного излучения в слабопоглощающую среду», Квантовая электроника, 2011, т.41, №6, с. 568-570.

2. Bubis, E. L. Phase-Contrast Technique with Linear and Nonlinear Optical Zernike Filters. Program of International Conference "Nonlinear Optics: East-West Reunion" Suzdal, Russia, 2011.

3. Бубис Е.Л., Матвеев А.З. К расчету характеристик термокапиллярного фильтра Цернике. Оптические методы исследования потоков: XI Межд.науч-технич. Конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. - Электр. дан. -М.: МЭИ (ТУ), 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – Доклад №32, 7 с., 2011.

4. Bubis, E. L. The effect of phase object imaging in focusing of spatially phase-modulated laser beams on a weakly absorbing extended medium. Proceedings of the SPIE, Volume 7994, pp. 79941I-79941I-6 (2010).

5. Бубис Е.Л., Матвеев А.З. «Исследование процесса визуализации прозрачных объектов при использовании фазоконтрастного метода с фототермической ячейкой Цернике», Квантовая электроника, (принята к публикации).

3.9. Достигнута рекордная эффективность преобразования ($\sim 0.25\%$) излучения фемтосекундного лазера в широкополосное терагерцовое излучение. Результат получен в сэндвич-структуре, состоящей из 30 мкм слоя ниобата лития, кремниевой призмы и металлической подложки с варьируемым воздушным зазором. Продемонстрирована возможность перестройки спектра генерации терагерцового излучения путем изменения ширины воздушного зазора и возможность повышения энергии терагерцового излучения за счет использования частотно-модулированных фемтосекундных лазерных импульсов. Высокая эффективность оптико-терагерцового преобразования достигается при использовании лазерных импульсов с умеренной энергией – 1...10 мкДж и длительностью 50...200 фс, что позволяет использовать в качестве оптической накачки компактные и эффективные волоконные лазеры.

Авторы: Бодров С.Б., Иляков И.Е., Шишкин Б.В., Степанов А.Н.

Аннотация. Экспериментально исследована генерация широкополосного терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами в сэндвич-структуре, состоящей из 30 мкм слоя нелинейного кристалла ниобата лития, кремниевой призмы и металлической подложки с варьируемым воздушным зазором. В ходе эксперимента излучение Ti:Sapphire лазера фокусировалось цилиндрической линзой в тонкий слой ниобата лития. Распространяющийся в слое лазерный импульс формировал нелинейную поляризацию, которая, в свою очередь, излучала черенковское терагерцовое излучение, выводящееся через кремниевую призму.

В результате исследований показано, что уменьшение воздушного зазора между ниобатом лития и металлической подложкой от 20 до 0 мкм увеличивает эффективность генерации низкочастотных компонент терагерцового спектра, на 10-20% повышается энергия терагерцового импульса. При толщине воздушного зазора более 20 мкм форма спектра и энергия ТГц излучения не зависят от величины зазора. Наблюдаемые эффекты хорошо согласуются с ранее развитой теорией [M.I. Bakunov and S.B. Bodrov, Applied Physics B. V. 98. P. 1–4 (2010)]. Обнаружено, что использование частотно-модулированных лазерных импульсов позволяет увеличить энергию генерируемого терагерцового излучения в 2 раза. Достигнута рекордная эффективность оптико-терагерцовой конверсии 0.25% при использовании лазерных импульсов с энергии 15-25 мкДж и длительностью 50-200 фс. Такие умеренные параметры лазерного излучения позволяют эффективно генерировать ТГц излучение в сэндвич-структуре с использованием компактных и дешевых волоконных лазеров.

Публикации

1. M.I. Bakunov, S.B. Bodrov, Si–LiNbO₃–air–metal structure for concentrated terahertz emission from ultrashort laser pulses // Applied Physics B. 2010. V. 98. P. 1–4.

2. S. Bodrov, I. Ilyakov, B. Shishkin, A. Stepanov «Terahertz Generation Control by Metal Substrate in Sandwich Structure with Thin LiNbO₃» // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC 2011), Munich, Germany, 22-26 May 2011, CC4.6 SUN.

3.10. Разработан новый метод, позволяющий описать и исследовать динамику нейронных сетей с возбуждающими синаптическими связями. Он основан на редуцировании непрерывной динамики нейронных сетей к дискретной динамике клеточных автоматов, построенных на ориентированных графах синаптических связей. Предложенная схема редукиции базируется на использовании динамических свойств синапсов и не зависит от индивидуальной динамики нейронов. Результатом редукиции является дискретная модель в виде клеточного автомата, в которой каждый синапс описывается ограниченным набором состояний и определены правила перехода из одного состояния в другое. Метод является достаточно универсальным и может быть использован для описания процессов в разнообразных нейронных сетях. Предложенный метод апробирован на примерах ансамблей нейронов Морриса-Лекара и Ходжкин-Хаксли.

Авторы: Некоркин В.И, Дмитричев А.С., Касаткин Д.В. (ИПФ РАН) Афраймович В.С. (Университет Сан Луис Потоси, Мексика)

Аннотация. Реальные нейронные системы, представляющие собой крупномасштабные сети связанных активных элементов, демонстрируют широкий диапазон электрической активности. Выявление возможных мод коллективной активности в больших нейронных сетях представляет собой достаточно сложную задачу.

Результаты многих нейрофизиологических экспериментов показывают, что определяющую роль в формировании коллективной активности нейронной сети зачастую играют геометрия связей и тип взаимодействия между нейронами, а не детали их индивидуального поведения. Нами предложен метод, позволяющий описать и исследовать динамику нейронных сетей с возбуждающими синаптическими связями, который базируется именно на дискретном описании динамики межнейронных синаптических связей. В рамках данного метода задача о существовании и форме мод коллективной динамики нейронной сети сводится к задаче о возможных состояниях клеточных автоматов, построенных на ориентированных графах синаптических связей. Для построения клеточного автомата нейронная сеть разбивается на элементарные кластеры в соответствии с архитектурой ее синаптических связей. Элементарный кластер представляет собой часть нейронной сети содержащей i -ый (выходной) синапс и все j -ые (входные) синапсы опосредованно связанные с ним через j -ые нейроны. Далее устанавливаются всевозможные отклики выходного синапса каждого из элементарных кластеров, вызванные различными откликами входных. В результате мы получаем дискретную модель, где каждый синапс описывается ограниченным набором состояний, а переходы из одного состояния в другое происходят в соответствии с установленными правилами. Поскольку состояние нейрона напрямую зависит от уровня активности синаптических связей (генерация спайков нейронами имеет место при переходе соответствующих синапсов из активного состояния в состояние покоя), то посредством анализа состояний клеточного автомата могут быть установлены и режимы нейронной активности исходной сети. Разработанная методика апробирована на примерах ансамблей нейронов Морриса-Лекара и Ходжкин-Хаксли. Развертки (или пространственно-временные диаграммы) режимов исходных нейронных ансамблей и построенных клеточных автоматов достаточно хорошо повторяют друг друга и переходят одна в другую при соответствующем масштабировании времени. Предложенная методика является универсальной, поскольку не зависит от индивидуальной динамики нейронов и может быть использована для расчета мод коллективной динамики в разнообразных нейронных сетях.

Публикации

1. V.I. Nekorkin, A.S. Dmitrichev, D.V. Kasatkin, V.S. Afraimovich, «Relating the sequential dynamics of excitatory neural networks to synaptic cellular automata», Chaos, 2011, vol.21, №4.

2. V.I. Nekorkin, A.S. Dmitrichev, D.V. Kasatkin, «Reducing the sequential dynamics of neural networks to synaptic cellular automata», in book related to the conference "Nonlinear Dynamics: New Directions", Springer, 2012.

3.11. Теоретически предсказан и экспериментально реализован режим эффективного (энергетический КПД 70%) преобразования энергии фемтосекундных импульсов высокой интенсивности (до 4 ТВт/см²) во вторую гармонику. Фазовая модуляция, возникающая при распространении оптического импульса в кристалле удвоителя, позволяет уменьшить длительность импульса второй гармоники в несколько раз при использовании простейшего фазового корректора, вносящего квадратичную спектральную фазу. В результате изменения длины волны и длительности импульса интенсивность излучения в фокусе увеличится на порядок, по сравнению с излучением первой гармоники.

Авторы: Гинзбург В.Н., Катин Е.В., Ложкарёв В.В., Лучинин Г.А., Миронов С.Ю., Потёмкин А.К., Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Яковлев И.В.

Аннотация. Генерация второй гармоники (ГВГ) широко используется в лазерных системах петаваттного уровня мощности. В первую очередь, удвоение частоты лазерного излучения с длиной волны ~ 1 мкм применяется для накачки кристаллов Ti:сапфира и параметрических усилителей. Процесс преобразования частоты используется также для увеличения пиковой интенсивности сфокусированного излучения, поскольку позволяет за счет уменьшения длины волны уменьшить диаметр пучка в перетяжке в два раза. ГВГ может использоваться и для улучшения временных характеристик сверхмощных фемтосекундных лазерных импульсов. Особый интерес представляют возможность сокращения длительности и повышения временного контраста импульса. Повышение контраста происходит из-за того, что импульс вдали от максимума преобразуется во вторую гармонику со значительно меньшим КПД вследствие нелинейности процесса ГВГ.

Кубическая нелинейность среды удвоителя частоты приводит к проявлению эффектов само- и кросс – воздействия волн первой и второй гармоники. В результате спектр излучения расширяется, а импульсы приобретают фазовую модуляцию и на выходе кристалла не являются спектрально ограниченными. Приобретенная фазовая модуляция может быть частично скомпенсирована за счет использования простейшего фазового корректора – зеркал с аномальной дисперсией (чирпирующие зеркала). При этом происходит заметное сокращение длительности импульса второй гармоники.

Нами были выполнены исследования процесса преобразования во вторую гармонику излучения с пиковой интенсивностью до нескольких единиц ТВт/см² в условиях существенного влияния кубической нелинейности. В кристалле KDP толщиной 1 мм достигнуто преобразование с КПД по энергии 73% при пиковой интенсивности около 2 ТВт/см². Получено 50%-ное преобразование в кристалле KDP толщиной 0.5 мм при пиковой интенсивности до 3.5 ТВт/см².

Выполнено трехмерное моделирование процесса генерации второй гармоники излучения с параметрами, соответствующими экспериментальным. Результаты моделирования находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными по энергетической эффективности преобразования. Было установлено наличие неоднородного распределения длительности излучения второй гармоники по сечению

пучка на выходе кристалла. Показано, что коррекция квадратичной фазы у излучения второй гармоники позволяет сократить длительность с 70 фс до 20 фс.

Полученные результаты в полной мере демонстрируют перспективность использования процесса ГВГ для сокращения длительности, увеличения временного контраста и повышения пиковой интенсивности у лазерных импульсов петаваттного уровня мощности.

Публикации

1. С.Ю. Миронов, В.Н. Гинзбург, В.В. Ложкарев, Г.А. Лучинин, А.В. Кирсанов, И.В. Яковлев, Е.А. Хазанов, А.А. Шайкин, Высокоэффективная генерация второй гармоники интенсивного фемтосекундного излучения при существенном влиянии кубической нелинейности, Квантовая электроника, 2011, принята в публикации.

2. Mironov S., Lozhkarev V., Ginzburg V., Yakovlev I., Luchinin G., Shaykin A., Khazanov E., Babin A., Novikov E., Fadeev S., Sergeev A., and Mourou G. Second harmonic generation of super powerful femtosecond pulses at strong influence of cubic nonlinearity, Journal of Selected Topics of Quantum Electronics, Published 21 October, 2010.

3. Гинзбург В. Н., Ложкарев В. В., Миронов С. Ю., Потемкин А. К., Хазанов Е. А., Влияние мелкомасштабной самофокусировки на генерацию второй гармоники сверхсильным лазерным полем, Квантовая электроника 40(6), 503–508, 2010.