

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

Отделение нелинейной динамики и оптики

3.1. Компактный 300 Дж / 1 нс лазер на фосфатном стекле с неодимом для накачки параметрического усилителя фемтосекундных импульсов петаваттного уровня мощности

На выходе шестикаскадного усилителя на фосфатном стекле с неодимом при длительности импульса 1 нс экспериментально достигнута энергия 315 Дж. Диаметр пучка составляет 92 мм, коэффициент заполнения апертуры – 0.8, расходимость излучения – 2 дифракционных предела, энергетический КПД преобразования во вторую гармонику – 60%. Лазер расположен на одном оптическом столе с размерами 450×120 см. Уникальное сочетание параметров лазера обеспечено благодаря комплексу мер по подавлению электронной самофокусировки в лазерных усилителях.

Авторы: А. К. Потемкин, Е. В. Катин, А. В. Кирсанов, Г. А. Лучинин, А. Н. Мальшаков, М. А. Мартыанов, А. З. Матвеев, О. В. Палашов, Е. А. Хазанов, А. А. Шайкин (ИПФ РАН).

Аннотация. Ключевую роль в параметрических усилителях чирпированных импульсов в кристаллах DKDP играет лазер накачки. Для накачки конечного каскада параметрического усилителя 200-тераваттного фемтосекундного лазера использовалась вторая гармоника излучения импульсного лазера на неодимовом фосфатном стекле, энергия импульса которого в основной гармонике достигала 130 Дж, а во второй ~ 70 Дж при длительности импульсов 1–2 нс. Увеличение мощности фемтосекундного лазера до петаваттного уровня требует увеличения энергии накачки. Расчеты показывают, что для достижения мощности 0.5 ПВт (при сохранении компактности установки) необходима существенная модернизация лазера накачки с увеличением энергии импульса первой гармоники до 300 Дж. Такая модернизация была проведена.

Была изменена схема формирования входного излучения, апертура двухпроходного усилителя увеличена с 20 до 30 мм, введена дополнительная оптическая развязка двухпроходного усилителя, добавлен ещё один каскад усиления диаметром 100 мм, добавлен выходной пространственный фильтр, линейная поляризация выходных каскадов заменена на циркулярную, а также изменена схема генерации второй гармоники. На одном оптическом столе размером 4.5×1.2 м размещены основные компоненты установки. Вне стола расположены только два оконечных усилителя и удвоитель частоты. Это позволило использовать лазер в течение достаточно длительного времени без существенной подстройки его элементов. Суммарный интеграл распада электронной самофокусировки составил $V=7$, однако благодаря пространственной фильтрации, высокому коэффициенту заполнения и циркулярной поляризации никаких оптических пробоев не наблюдалось.

Увеличение коэффициента заполнения апертуры выходного каскада лазера до 0.8 и добавление ещё одного выходного каскада усиления позволило увеличить выходную энергию излучения без ухудшения выходных параметров излучения. Достигнутая энергия выхода 300 Дж в основной гармонике и 150 Дж после удвоения частоты излучения позволили в первой же серии экспериментов увеличить энергию импульса в сигнальной волне чирпированного импульса с 14 до 24 Дж.

3.2. Новая реализация метода кросс-поляризационной оптической когерентной томографии, основанная на ортогональных произвольно поляризованных модах

Реализован новый метод кросс-поляризационной оптической когерентной томографии, позволяющий получать изображения внутренней структуры биотканей в двух строго ортогональных поляризациях с использованием элементной базы одномодовой изотропной волоконной оптики. Метод основан на свойстве сохранения ортогональности двух волн при распространении их в оптической системе даже при произвольном изменении состояния поляризации, обусловленном вносимыми возмущениями. При использовании гибкого выносного волоконного зонда, осуществляющего доступ к поверхности биотканей, достигнут динамический диапазон изображений не менее 40 дБ как в основном, так и в ортогональном поляризационном канале, что позволяет значительно повысить специфичность получаемой биомедицинской информации.

Авторы: В. М. Геликонов, Г. В. Геликонов (ИПФ РАН).

Аннотация. Разработан новый метод кросс-поляризационной оптической когерентной томографии на изотропном волокне для приема излучения, рассеянного исследуемой средой в исходную и строго ортогональную поляризации. В основе метода использовано свойство сохранения ортогональности волн при распространении их в одномодовом волокне без собственной анизотропии даже при произвольных фазовых возмущениях, но при условии отсутствия анизотропии потерь. Для реализации этого метода использована известная схема на изотропном волокне, содержащая зонд с интерферометром Физо и компенсирующий интерферометр Майкельсона с фарадеевскими зеркалами, к которой добавлено устройство, формирующее исходное излучение в виде двух взаимно задержанных когерентных волн со строго ортогональными линейными поляризациями. Эти две волны создают в одномодовом волокне оптической схемы систему опорных и зондирующих волн со строгой ортогональностью между отдельными компонентами. Даже при изгибах волокна зонда схема позволяет реализовать в двух каналах отдельный прием света, рассеянного как в исходную, так и в ортогональную поляризации при динамическом диапазоне не менее 40 дБ.

3.3. Спектроскопия молекулы HNCО

С помощью модернизированного спектрометра РАД проведены прецизионные исследования вращательного спектра молекулы изоциановой кислоты (HNCО) в диапазоне 0.087–1.1 ТГц. Обработка спектра позволила в десятки раз уточнить значения эффективных вращательных констант, что дало возможность предсказывать значения частот линий в $K_a=0$ и 1 состояниях с погрешностью менее 2 кГц и использовать их в качестве стандарта при измерениях частот других линий. Достигнутая точность в пересчете к доплеровским скоростям составляет ~ 1 м/с (1σ), что позволяет использовать линии HNCО для радиоастрономических измерений и получать важную информацию о кинематике в областях звездообразования.

Авторы: А. В. Лапинов, Г. Ю. Голубятников, В. Н. Марков (ИПФ РАН), A. Guarnieri. (Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Physikalische Chemie der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Германия).

Аннотация. Прецизионные частоты молекулярных линий необходимы при радиоастрономических исследованиях возбуждения молекул, переноса излучения,

измерениях градиентов систематических скоростей в областях звездообразования, а также в качестве эталонных значений частот при измерениях спектральных линий других молекул не только в межзвездной среде [1, 2], но и в лаборатории [3]. Подобно ряду других молекул, HNCO активно используется в качестве зонда для определения физических условий в молекулярных облаках как нашей, так других галактик [4, 5]. Результаты предшествующих исследований вращательного спектра HNCO позволяли предсказывать частоты переходов с ошибкой порядка тепловой ширины линий, наблюдаемых в темных облаках. Этого достаточно для идентификации наблюдаемых линий и сравнения интенсивностей разных переходов, но совершенно неприемлемо для детального анализа внутренней динамики темных облаков. Проведенные в данной работе исследования вращательного спектра HNCO позволили существенно (для многих частот более, чем на порядок) повысить точность расчета частот линий по сравнению с имеющимися данными [6]. Исследования включали прецизионные измерения частот линий в диапазоне 87–1100 ГГц, а также анализ полученных и известных данных. Исследовались линии с квантовыми числами в широком диапазоне (J от 2 до 65, K_a от 0 до 7). Особое внимание уделялось состояниям с $K_a=0$ и 1, представляющим наибольший интерес при исследовании темных облаков, в частности, из-за того, что измеренные интенсивности переходов HNCO в разных K_a состояниях на близких частотах позволяют определять радиационную температуру. Все измеренные частоты для переходов b -типа (между уровнями с разными K_a) были скорректированы на сдвиг давлением. Сдвиги частот в спектре HNCO ранее были неизвестны и во внимание не принимались. Обнаружены и устранены ошибки в описании сверхтонкого расщепления линий HNCO в каталоге Jet Propulsion Laboratory [7]. Достигнутая точность предсказания частот вращательных переходов для $K_a=0$ и 1 состояний в пересчете к доплеровским скоростям составила ~ 1 м/с (1σ) во всем диапазоне вплоть до 1 ТГц, что сопоставимо с наиболее прецизионными данными по линиям других молекул. Благодаря одновременным измерениям линий разных молекул, включая HNCO ($J_{KaKc} = 5_{05} - 4_{04}$), измерены градиенты систематических движений в нескольких десятках темных облаков, связанных с областями раннего звездообразования, а, используя линию HNCO в качестве эталона частот, из радиоастрономических измерений удалось существенно уточнить значение частоты перехода $J = 1-0$ молекулы H^{15}NC , являющейся очень нестабильной в лабораторных условиях. Т.обр., определенные в данной работе частоты позволяют измерять с очень высокой точностью скорость движения вещества в областях звездообразования и являются хорошим вторичным стандартом частоты при прецизионных измерениях частот линий других молекул.

1. G. Cazzoli, C. Puzzarini, and A.V. Lapinov, 2003, ApJ 592, L95.
2. G. Cazzoli, C. Puzzarini, and A.V. Lapinov, 2004, ApJ 611, 615.
3. G.Yu. Golubiatnikov, A.V. Lapinov, A. Guarnieri, and R.Knöchel, 2005, JMS 234, 190.
4. I. Zinchenko, C. Henkel, and R.Q. Mao, 2000, Astron. & Astrophys. 361, 1079.
5. M. Wang, C. Henkel, Y.-N. Chin et al., 2004, Astron. & Astrophys. 422, 883.
6. M. Niedenhoff, K.M.T. Yamada, S.P. Belov, and G. Winnewisser, 1995, JMS 174, 151.
7. H.M. Pickett, R.L. Pointer, E.A. Cohen et al., 1998, JQSRT 60, 883.

3.4. Об определении вращательного движения молекулы

На основе закона свободного вращения в изотропном пространстве получен рецепт корректного выбора подвижной системы координат (ПСК), вводимой для определения самого понятия вращательного движения молекулы в заданном электронном состоянии. Он не только охватывает случаи нелинейной и линейной жестких молекул, которые ранее рассматривались отдельно, но и легко приложим к нежестким молекулам. Важнейшим следствием является заторможенность непотенциальным полем движения любых ПСК, не

удовлетворяющих этому рецепту. Показано, что заданная в ПСК точечная группа молекулы должна использоваться как группа симметрии полного (электронно-колебательно-вращательного) внутреннего движения.

Автор: А. В. Буренин (ИПФ РАН).

Аннотация. Понятие вращательного движения молекулы как целого в заданном электронном состоянии вводится с помощью связанной с молекулой декартовой подвижной системы координат (ПСК), причем вращательным называется движение, изменяющее ориентацию осей ПСК относительно осей декартовой неподвижной системы координат. Традиционно для жесткой нелинейной молекулы ПСК определяется условиями Экарта, выведенными из условия минимальности взаимодействия между колебательным и вращательным движениями. Критерий отсутствия вращения молекулы как целого не совпадает с условием равенства нулю ее углового момента. Дело в том, что выражение для углового момента не является полной производной по времени какой-либо функции лишь от координат ядер и равенство нулю углового момента нельзя проинтегрировать по времени так, чтобы привести к виду равенства нулю некоторой функции этих координат. В предположении, что последнее необходимо для разумной формулировки понятий чистого вращения и чистого колебания, в [1] получено требование на ПСК, совпадающее с условиями Экарта. До настоящего времени отсутствовало четкое понимание того, к чему приводит выбор ПСК, не удовлетворяющий таким условиям. Автором на основе закона свободного вращения молекулы в изотропном пространстве получен рецепт корректного выбора ПСК, согласно которому ПСК необходимо «вморозить» в эффективный ядерный потенциал в рассматриваемом электронном состоянии. Важнейшим следствием является заторможенность непотенциальным полем движения любых ПСК, не удовлетворяющих этому рецепту. Для частного случая жесткой нелинейной молекулы данный рецепт совпадает с условиями Экарта. Важно отметить, что в многочисленных работах по упрощению описания внутренней динамики жесткой нелинейной молекулы на основе отказа от условий Экарта (см., напр.[2]), возникновение тормозящего движение ПСК поля игнорируется. Полученный результат показывает несостоятельность такого подхода, так как необходимость учета непотенциальных полей приводит к резкому усложнению задачи описания внутренней динамики.

В настоящее время существуют два разных подхода к рассмотрению симметрии внутримолекулярного движения. В первом из них [1] постулируется, что симметрия электронно-колебательно-вращательного движения в заданном электронном состоянии определяется точечной группой в этом состоянии. Во втором [2] считается, что геометрическая группа не может определять такую симметрию и точечная группа применяется только как вспомогательная при описании электронно-колебательного движения. Полное движение характеризуется группой молекулярной симметрии (MS -группой). Для жесткой нелинейной молекулы MS -группа изоморфна точечной группе и эффективность последней в описании симметрии полного движения объясняется лишь этим фактом и трактуется как случайная. Автором показано, что действие преобразований точечной группы молекулы на ее произвольную ядерную конфигурацию эквивалентно перестановкам тождественных ядер в инвариантном по отношению к преобразованиям этой группы эффективном потенциале взаимодействия ядер. Из симметрии по отношению к перестановкам тождественных ядер следует, что точечная группа является группой строгой симметрии полного электронно-колебательно-вращательного движения.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974, 752 с.

2. Банкер Ф., Йенсен П. Симметрия молекул и спектроскопия, М.: Мир, 2004, 764 с.

3.5. Высокоэффективная компактная лазерная система среднего ИК диапазона на основе широко перестраиваемого параметрического генератора света

Создан макетный образец эффективной компактной твердотельной лазерной системы, перестраиваемой в диапазоне длин волн 3,0–5,0 мкм. Система состоит из параметрического генератора света на кристалле $ZnGeP_2$, возбуждаемого наносекундным излучением Ho:YAG лазера с накачкой непрерывным волоконным лазером на длине волны 1.9 мкм. Продемонстрирована генерация пучков излучения высокого качества со средней мощностью до 6 Вт при частоте повторения импульсов 10–20 кГц при общей эффективности преобразования мощности излучения волоконного лазера в излучение среднего ИК диапазона до 24%. Лазерная система может быть использована в составе бортового самолетного оборудования для экологического мониторинга и дистанционного контроля магистральных газопроводов, а также для решения ряда медицинских и специальных задач.

Авторы: О. Л. Антипов, О. Н. Еремейкин, Н. Г. Захаров, А. П. Савикин, А. М. Сергеев, Г. И. Фрейдман, В. В. Шарков (ИПФ РАН; ННГУ), С. Г. Гаранин, С. Д. Великанов, Р. Ю. Волков, В. И. Лазаренко, Г. М. Мищенко, Ю. Н. Фролов (ИЛФИ ВНИИЭФ-РФЯЦ).

Аннотация. Создан макетный образец эффективной и компактной твердотельной лазерной системы, перестраиваемой в диапазоне длин волн 3,0–5,0 мкм. Система состоит из параметрического генератора света на кристалле $ZnGeP_2$, накачиваемого пучком излучения импульсно-периодического лазера на кристалле Ho:YAG, который, в свою очередь, накачивается пучком излучения волоконного лазера. Продемонстрирована генерация пучков высокого качества со средней мощностью до 6 Вт при частоте повторения импульсов 10–20 кГц. Общая эффективность преобразования мощности излучения волоконного лазера в излучение среднего ИК диапазона достигает 24%. Общий вес разрабатываемой системы не превышает 20 кг.

Лазерная система может быть размещена на борту лёгкого самолёта и использована для экологического мониторинга, дистанционной диагностики утечки газа из магистральных газопроводов, в медицине, научных исследованиях и для решения некоторых других задач.

3.6. Модель термооптических эффектов в лазерной керамике

Построена модель термооптических эффектов в лазерной керамике, учитывающая случайный характер ориентации кристаллографических осей в зернах. В приближении геометрической оптики для аксиально-симметричной геометрии получены аналитические выражения для термонаведенной фазы, а также ее среднего значения и дисперсии. Предсказан эффект модуляции фазы пучка с характерным поперечным размером порядка размера зерна. Этот эффект присущ исключительно керамике и не имеет аналога ни в стеклах, ни в монокристаллах. Показано, что связанное с этим эффектом ухудшение параметров качества пучка пропорционально отношению размера зерна к длине керамического элемента.

Авторы: И. Л. Снетков, И. Б. Мухин, О. В. Палашов, Е. А. Хазанов (ИПФ РАН).

Аннотация. Для лазеров с большой мощностью (средней и пиковой) оптическая керамика имеет три главных преимущества по сравнению с монокристаллом. Во-первых, большая, как у стекла, апертура и высокая, как у монокристалла, теплопроводность. Во-вторых, возможность создания керамики из кристаллов, в принципе не выращиваемых в виде монокристалла. В-третьих, вязкость разрушения керамики в 3–5 раз, а параметр

теплового разрушения – в 3 раза больше, чем в монокристалле. Это делает использование керамики в лазерах с большой средней мощностью весьма перспективным, а исследование тепловых эффектов в керамических оптических элементах – актуальным.

Термонагруженный керамический элемент представляет собой набор последовательно расположенных фазовых пластинок со случайной ориентацией осей и случайным набегом фазы между собственными поляризациями (монокристалл представляет одну детерминированную фазовую пластинку). Эти величины зависят от поперечных координат как детерминированным образом (точно так же, как и в монокристалле), так и случайным, поскольку лучи, разнесенные на размер порядка размера зерна, проходят через статистически независимый набор зерен. Следовательно, термонаведенная фаза (тепловая линза) является функцией большого числа случайных величин. Авторами построена модель термооптических эффектов (как поляризационных, так и фазовых) в лазерной керамике, учитывающая случайный характер ориентации кристаллографических осей в зернах. Для любого аксиально-симметричного тепловыделения в стержневом керамическом элементе аналитически получены выражения для набег фазы, его математического ожидания и среднеквадратичного отклонения.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Керамика, в среднем, вносит такие же фазовые искажения, как и монокристалл с ориентацией. В частности, средняя фаза не зависит от числа зерен на пути луча и прямо пропорциональна мощности тепловыделения. В тоже время, термонагруженная керамика вносит в пучок мелкомасштабную фазовую модуляцию с характерным поперечным размером порядка размера зерна. Среднеквадратичное отклонение фазы прямо пропорционально мощности тепловыделения и обратно пропорционально корню из числа зерен на пути луча. Вызванное мелкомасштабной фазовой модуляцией отличие числа Штреля и интеграла перекрытия от единицы незначительно. В тоже время, параметр M^2 возрастает существенно. Кроме того, эта модуляция может служить источником самофокусировки в лазерах с большой пиковой мощностью.

3.7. Наноструктурирование полимерных материалов при лазерном облучении

Развита экспериментальная методика лазерного микро- и наноструктурирования окрашенных полимерных материалов на основе эффекта лазерного свеллинга. Впервые созданы выпуклые наноструктуры высотой от 10 до 100 нм и диаметром ~ 200 нм на поверхности полимеров с использованием эффекта ближнепольного усиления и локализации лазерного излучения прозрачными микрошариками, предварительно нанесенными на поверхность материала. Найден пороги формирования микро- и наноструктур и оптимальные режимы лазерной обработки для формирования качественных структур для создания элементов интегральной оптики, оптической памяти и биосенсоров.

Авторы: А. Ю. Малышев, Н. А. Агарёва, О. А. Мальшакова, Н. М. Битюрин (ИПФ РАН).

Аннотация. Применение лазерных микротехнологий является гибким методом создания выпуклых микроструктур на поверхности полимерных материалов, в отличие от промышленных многостадийных методов. Полимерные материалы находят широкое распространение в микрооптике, интегральной и волоконной оптике, сенсорике. Бурное развитие оптических микросистем требует создания рельефных выпуклых микроструктур, таких как растры микролинз, литографические маски, оптические элементы дисплеев и сенсоров.

Проведены экспериментальные исследования лазерного микро-структурирования поверхности различных окрашенных полимерных образцов на основе полиметилметакрилата (ПММА), поглощающих излучение второй гармоники неодимового лазера. Основное внимание уделено формированию выпуклых микроструктур за один лазерный импульс. В экспериментах при фокусировке лазерного излучения линзами исследованы зависимости высоты и диаметра создаваемых выпуклых микроструктур от плотности энергии лазерного импульса. Анализ экспериментальных данных позволил определить пороговую плотность энергии (порог) формирования выпуклой микроструктуры и порог испарения материала. Порог возникновения выпуклой структуры на поверхности полимерной среды с коэффициентом поглощения $\sim 50 \text{ см}^{-1}$ составляет $F_{\text{th}} \sim 4 \text{ Дж/см}^2$ и соответствует порогу лазерного свеллинга (разбухания материала). Получены выпуклые микроструктуры на поверхности окрашенных различными красителями полимерных образцов на основе ПММА: круглые выпуклые структуры высотой $h = 0.05\text{--}2 \text{ мкм}$ и диаметром $d = 20\text{--}200 \text{ мкм}$, и структуры в виде протяженных валиков высотой 1 мкм , шириной 200 мкм и длиной несколько миллиметров. В результате изучения формы поверхности микроструктур и анализа изменения объема материала установлено, что в основе микроструктурирования лежат эффекты лазерного свеллинга и перераспределения расплава материала силами поверхностного натяжения («bumping effect»). Эффект лазерного свеллинга вносит основной вклад в околопороговое формирование микроструктуры, а с увеличением энергии в импульсе преобладает эффект перераспределения расплава.

Исследование микроструктур, полученных в различных режимах лазерного воздействия, позволило выбрать оптимальный режим микрообработки. Оптимальная плотность энергии в центре пучка, необходимая для получения качественных выпуклых структур, на $10\text{--}20 \%$ превышает пороговую плотность энергии возникновения выпуклой структуры. В оптимальном режиме микрообработки получены матрицы выпуклых микроструктур (микролинз) высотой $1\text{--}1.4 \text{ мкм}$ и диаметром $120\text{--}140 \text{ мкм}$, находящихся на расстоянии $200\text{--}250 \text{ мкм}$ друг от друга. Профиль выпуклых структур имеет гладкую форму, близкую к параболической.

Экспериментально получены одиночные выпуклые наноструктуры и группы наноструктур на поверхности окрашенного ПММА образца за счет эффекта лазерного свеллинга при помощи локализации лазерного излучения микрошариками, нанесенными на поверхность полимера. Наноструктуры имели диаметр $\sim 200 \text{ нм}$ и высоту $10\text{--}100 \text{ нм}$.

Показано, что методика формирования выпуклых структур путем последовательного воздействия на поверхность среды лазерными импульсами может использоваться для создания растров микролинз и выпуклых структур в виде валиков на окрашенных полимерных материалах, что может найти применения в микрооптике, интегральной оптике, лазерной литографии, сенсорах.