

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕНТР

*Общие сведения.* Международный учебно-научный лазерный центр (МЛЦ) был создан в 1989 г. Центр занимается организацией исследований на стыках лазерной физики и других естественных наук – биологии, химии, медицины, экологии, а также обучением и переподготовкой специалистов (в т.ч. иностранных), уже имеющих высшее образование.

МЛЦ является обособленным подразделением МГУ. В своей деятельности МЛЦ широко использует международную кооперацию, привлекает иностранных учёных для проведения совместных научных исследований и учебной работы.

*Новое в структуре.* МЛЦ организовал Центр молодёжного и инновационного творчества совместно с физическим факультетом, Научным парком МГУ и компанией «Мовиком», целью которого является предоставление возможности школьникам и молодёжи найти и реализовать себя в технологическом творчестве, познакомиться с современными технологиями моделирования, проектирования и производства робототехнических изделий. В 2013 г. для двух групп школьников были организованы лекции о новейших инженерных технологиях и разработках.

*Наука.* МЛЦ является исполнителем исследований по 63 грантам РФФИ, 2 президентским грантам и 2 госконтрактам по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.».

В 2013 г. был выигран грант Президента РФ на поддержку ведущих научных школ по теме «Терагерцовая оптика для нано- и биотехнологий» (рук. проф. В.А.Макаров). Среди членов школы 14 молодых учёных, т.ч. 4 аспиранта и 2 студента физического факультета.

НОЦ МЛЦ «Фемтосекундная нелинейная и квантовая оптика» завершил выполнение НИР «Нелинейная и квантовая оптика микро- и наноструктур». Было привлечено 32 молодых учёных, в т.ч. 9 аспирантов и 8 студентов физического факультета.

В 2013 г. МЛЦ проводил научную работу по основным направлениям:

1. Фундаментальные проблемы лазерной физики и нелинейной оптики;
2. Перспективные лазерные технологии;
3. Лазерная химия, биофизика и биомедицина;
4. Сверхсильные световые поля и их применение
5. Физика поверхности и наноструктур;
6. Квантовая оптика и физика квантовой информации.

Основные научные достижения Центра в 2013 г.

### *«Нелинейная оптика и лазерная физика»*

(ПНР – 4, 5)

Изучено распространение плоских эллиптически поляризованных световых волн в изотропной гиротропной нелинейной среде. Показано, что в изотропной среде с локальной и нелокальной составляющими керровской нелинейности и частотной дисперсией 2-го порядка могут распространяться как чирпированные, так и нечирпированные плоские эллиптически поляризованные кноидальные волны, а также возникать апериодические режимы, внешне напоминающие поляризационный «хаос».

Изучено распространение сверхкоротких эллиптически поляризованных световых импульсов в изотропной оптически активной среде с пространственной дисперсией кубической нелинейности и обнаружены новые эффекты, связанные с распространением сверхкоротких (в несколько колебаний поля) световых импульсов. Изучено распространение сверхкоротких эллиптически поляризованных световых импульсов в изотропной оптически активной среде с пространственной дисперсией

кубической нелинейности и обнаружены новые эффекты, связанные с распространением сверхкоротких (в несколько колебаний поля) световых импульсов. Развита единая непертурбативная квантово-механическая теория генерации как длинноволнового (терагерцового), так и коротковолнового излучения одиночными атомами, взаимодействующими с последовательностью лазерных импульсов произвольной поляризации. Данная теория была применена для описания генерации ТГц излучения атомом аргона, взаимодействующим с двухцветным лазерным полем в доионизационном режиме взаимодействия. В результате был предложен новый способ генерации ТГц излучения в доионизационном режиме взаимодействия.

Впервые предсказан и экспериментально обнаружен оптический мираж в рентгеновском диапазоне частот. Эта работа предоставляет новые возможности для создания голограмм и «невидимых» покрытий в рентгеновском диапазоне спектра.

Выполнено моделирование частотно-угловых спектров отражения и пропускания субволновых дифракционных решёток, полученных методом ионно-лучевой литографии, для создания основанных на эффекте ГКС датчиков органических веществ. На основании расчётов методом ионно-лучевой литографии были изготовлены нанорешётки с оптимальными структурными параметрами. Исследованные субволновые решётки могут быть использованы для построения на их основе сенсоров, а также различных элементов нанофотоники и оптоэлектроники. Разработан фазовый контроль когерентного рамановского рассеяния с использованием оптических полей накачки с управляемым спектрально-фазовым профилем для повышения эффективности когерентного отклика слабой комбинационно-активной моды исследуемого, а также заметного повышения чувствительности методик нелинейной рамановской спектроскопии.

Изучено формирование сверхкоротких световых аттосекундных ударных волн в процессе нелинейно-оптической динамики мощных фемтосекундных лазерных импульсов и синтез мультитигаваттных аттосекундных световых импульсов. Подобные ударные волны позволят исследовать законы нелинейной оптики на аттосекундных временных масштабах, а также являются перспективным инструментом визуализации и контроля электронных волновых функций в атомах.

#### *«Разработка основ новых лазерных технологий»*

(ПНР – 4, 5)

Разработан и реализован пикосекундный широкополосный источник лазерных импульсов на основе неколлинеарного параметрического генератора для реализации схемы двойной широкополосной спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света. Получены импульсы длительностью 26 пс со средней длиной волны 685 нм, шириной спектра 20,7 нм и энергией 1,2 мДж.

Разработан метод диагностики фазового поведения молекулярных сред при адсорбции и конденсации в нанопорах диаметром несколько нанометров с помощью спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света. Развитый подход может найти широкое применение в разнообразных физических, химических и биологических процессах, при создании эффективных катализаторов, селективных биосенсоров, биомембран, биоимплантантов, водородных накопителей, устройств сепарации, фильтрации и очистки.

Созданы органические транзисторы и интегральные схемы на ультратонком активном слое толщиной в одну молекулу. Изготовлены ультратонкие эффективные органические полевые транзисторы, где монослой молекул толщиной в 3,5 нм нанесен скоростным методом Ленгмюра-Блоджетт. Выполненная работа открывает

широкие перспективы производства ультратонкой электроники на основе метода Ленгмюра-Блоджетт.

В результате многолетней работы развиты методы широкополосной спектроскопии молекул и кристаллов в диапазоне частот от 0,1 до 10 ТГц. Терагерцовая технология является одним из методов получения изображений в дополнение к методам рентгеновских лучей и инфракрасного излучения, обеспечивая для малоcontrastных материалов, таких как теплоизоляционный пенопласт малой плотности, лучшую контрастность изображений (амплитудную и фазовую), чем при использовании рентгеновского излучения.

Разработан оптический виброметр для диагностики бытовой техники в процессе производства. Порог чувствительности виброметра для вибраций звуковых частот составляет в зависимости от модификации от нескольких нанометров до долей микрона, а максимальная амплитуда измеряемых вибраций достигает нескольких миллиметров.

Разработан метод диагностики параметров турбулентности природных сред, основанный на регистрации и анализе искажений волнового фронта лазерного пучка, прошедшего через слой исследуемой среды. Метод основан на разложении фазовых флуктуаций в пределах заданной апертуры в ряд по полиномам Цернике и анализе статистики коэффициентов этого разложения. Применение метода для оценки параметров турбулентности в жидкостной ячейке дало результаты, хорошо согласующиеся с оценками, полученными другими методами.

Разработаны эффективные и легко интегрируемые лазеры сверхкоротких импульсов высокой пиковой мощности с диодной накачкой и электрооптическим управлением генерацией, обеспечивающие малый оптический джиттер и высокую точность синхронизации. Текущая реализация лазерного генератора позволяет получать пикосекундные импульсы с оптическим джиттером, не превышающим 50 пс, что в 2,5 раза меньше опубликованных, к настоящему времени, результатов для аналогичных лазерных источников.

Впервые проведено сравнительное исследование нескольких образцов бумаги естественно состаренных документов и книг (с фоксингами и без них) и образцов новой бумаги при помощи рамановской микроспектроскопии. Результаты исследования показывают, что рамановская микроспектроскопия позволяет идентифицировать изменения, связанные как с общим старением бумаги, так и с образованием фоксингов. Полученные результаты могут быть применены при реставрации старинных рукописей, печатных документов и книг.

Разработан лазерный оптико-акустический метод диагностики остаточных напряжений в металлах после плазменной поверхностной обработки. Методика основана на лазерном термооптическом возбуждении наносекундных ультразвуковых импульсов на поверхности исследуемых образцов и их пьезоэлектрической регистрации с высоким временным разрешением. Преимуществом данного метода являются оперативность, высокая разрешающая способность и высокая точность измерений, а также возможность создания конструкций портативных приборов на его основе. Предложенный лазерный оптико-акустический метод может быть использован в сочетании с другими методами диагностики, например, измерениями твёрдости и износостойкости, для оптимизации технологических параметров плазменного поверхностного упрочнения.

Создан метод широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии для количественной оценки влияния концентрации и морфологии газовых пор на коэффициент затухания и фазовую скорость продольных акустических волн в углепластиковых композитных материалах. Дальнейшее развитие предложенного метода широкополосной акустической спектроскопии в сочетании с механическими и климатическими испытаниями углепластиковых композитных материалов является

перспективным для выработки оптимальных критериев допустимого качества таких материалов, содержащих производственные дефекты структуры типа микроскопических пор или протяжённых расслоений. Предложенный метод также может быть использован в системах контроля изменений структуры при усталостных испытаниях и для оценки остаточного ресурса углепластиковых композитных материалов.

*«Лазерная химия, биофизика и биомедицина»*  
(ПНР – 4)

Предложен способ измерения дисперсии деформируемости, а также коэффициента асимметрии распределения эритроцитов по деформируемости, на основе данных лазерной дифрактометрии эритроцитов в сдвиговом потоке (эктацитометрии). Анализ показывает, что метод лазерной дифрактометрии позволяет определять такие характеристики ансамбля эритроцитов как средняя форма частиц, дисперсия деформируемости и асимметрия распределения эритроцитов по деформируемости. ИК спектроскопия в низкочастотном (терагерцовом) диапазоне использована для исследования механизмов, определяющих существенное увеличение каталитической активности фермента в органических (неводных) растворителях в присутствии краун-эфира. Проведено исследование взаимодействия краун-эфира с химотрипсином и трис(гидроксиметил)-аминометаном, моделирующим белковые аминокислотные группы в малоисследованном низкочастотном ( $30\text{--}500\text{ см}^{-1}$ ) диапазоне, где по теоретическим оценкам лежат колебания больших частей макромолекул, а также межмолекулярные колебания в упорядоченных структурах. Изменения спектров комплексов краун-эфир–белок с увеличением относительной концентрации краун-эфира аналогичны соответствующим изменениям спектров комплекса модельного вещества, что подтверждает предположение о роли поверхностных аминокислотных групп белка в увеличении каталитической активности.

Проведено генотоксическое тестирование терагерцового излучения при облучении лейкоцитов крови. Анализ результатов воздействия показал, что при выбранных параметрах излучения не происходит индукции прямых повреждений ДНК в жизнеспособных лейкоцитах крови человека. Таким образом, доказано, что использованные источники терагерцового излучения в диапазоне частот  $0,1\text{--}6,5\text{ ТГц}$  с интенсивностью  $8\text{--}200\text{ мкВт/см}^2$  не вызывают генотоксических эффектов на уровне прямых повреждений ДНК лейкоцитов крови человека и могут применяться в медицинской аппаратуре.

С помощью флуоресцентной спектроскопии исследован на применимость один из наиболее широко используемых методов определения основных параметров процесса связывания для системы белок-лиганд – метод тушения флуоресценции белка. Предлагается модель, объясняющая несоответствие результатов, полученных с помощью этих двух подходов. Обсуждаются ограничения применения метода тушения флуоресценции белка для анализа процесса связывания.

Методом флуоресценции европия(III) исследовано определение основных характеристик процесса связывания белок-лиганд – число сайтов связывания и константы комплексообразования. Показано, что использование европия(III) в качестве флуоресцентного зонда позволяет корректно определить основные параметры процесса связывания  $n$  и  $K_a$ , что закладывает основы нового оптического метода диагностики комплексообразования белков с тяжёлыми металлами.

Исследован молекулярно-динамический процесс агрегации, происходящий в растворах макромолекул альбумина при воздействии различных параметров среды оптическими методами. Установлен новый молекулярный механизм изменений в биологических объектах, связанный с токсическим действием тяжёлых металлов на

живые объекты. Процесс агрегации белков объясняется сорбцией ионов тяжёлых металлов на поверхности коллоидных частиц тяжёлого металла. Разработан волоконно-оптический нейроинтерфейс для параллельного долговременного динамического зондирования функциональной активности нейронов в пространственно разделённых структурах головного мозга живых свободноподвижных животных. Благодаря максимально лёгкому и компактному размеру вживляемой системы всё время между измерениями животные могут жить в своих домашних клетках без каких-либо неудобств, а также без опасности повредить оптоволокно. Возможности и эффективность предлагаемой методики зондирования нейронной активности были продемонстрированы на примере регистрации флуоресцентного отклика белка EGFP в мозге трансгенных животных, у которых ген флуоресцентного белка встроен под промотор немедленно раннего гена *zif/268*. Данные измерения были проведены на живой бодрствующей мыши, что позволило впервые продемонстрировать оптическую регистрацию маркеров нейронной активности одновременно двух пространственно разнесённых областей мозга живого свободнодвижущегося животного.

*«Получение сверхсильных световых полей и их применение»  
(ПНР-3)*

Изучено резонансное лазерно-плазменное возбуждение когерентных терагерцовых фононов в объёме кристаллических диэлектриков. Показано, что формируемая в микрообъёме кристаллических диэлектриков лазерно-индуцированная плазма оказывает существенное влияние на процессы возбуждения и релаксации когерентных фононов.

Разработаны предложения по эффективной генерации рентгеновского излучения при фемтосекундном лазерном возбуждении кластеров многоатомных молекул, созданию смешанных кластеров и управлению выходом характеристического излучения на линиях кластерообразующих частиц. Правомерность этих критериев была продемонстрирована на примере смесей  $SF_6$ -Ar(He),  $CF_3I$ -Ar,  $CF_2Cl_2$ -He(Ar). Получен максимальный выход К-характеристического излучения хлора в смеси  $CF_2Cl_2$ -He (1:9), порядка  $2 \cdot 10^{-5}$  при энергии субпикосекундного лазерного импульса около 5 мДж и интенсивности порядка  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. Спектр характеристического рентгеновского излучения может лежать в основе метода детектирования смешанных кластеров. Предложено использование трёхкомпонентной смеси для управления парциальной концентрацией компонент, образующих смешанные кластеры.

Экспериментально и теоретически исследовано влияние длительности оптической накачки на спектр терагерцового излучения при пробое газа двуцветным фемтосекундным импульсом. Показано, что при уменьшении длительности оптической накачки возрастает спектральная ширина терагерцового излучения, генерируемого как за счёт фототока свободных электронов, так и за счёт отклика связанных. Установлено, что за низкочастотную компоненту терагерцового излучения отвечает отклик лазерной плазмы, а за более высокочастотную – отклик нейтральных атомов. При изменении длительности оптического импульса максимум спектра терагерцового излучения смещается в высокочастотную область независимо от механизма генерации, однако характер такого смещения различается для различных механизмов.

Экспериментально продемонстрировано, что при филаментации фемтосекундного лазерного импульса (805 нм, 55 фс, 4.5 мДж) в молекулярных газах (воздухе и азоте) в ИК области спектра появляется максимум в области длин волн от 820 нм до 900 нм. Обнаружено появление крыла в стоксовой части спектра при филаментации

фемтосекундного излучения в молекулярных газах, позволяющее высказать гипотезу о формировании солитоноподобных световых пульс в филаменте. Генерация данного импульса связана с явлением каскадного вынужденного комбинационного рассеяния на вращательных переходах в молекуле азота. Обнаружено, что данная спектральная компонента отделена от основного импульса не только спектрально, но и во времени. Длительность данного импульса составляет 30 фс и практически не изменяется при распространении излучения вдоль филамента, что позволяет предположить солитоноподобное распространение данного импульса, т.е. режим световой пули.

Разработана модель филаментации эллиптически поляризованного фемтосекундного импульса при учёте керровской нелинейности высокого порядка. Показана устойчивость линейной и циркулярной поляризации.

Предложены лазерно-плазменные ускорители электронов на основе мишеней нового типа – расплавленного металла. Под действием предимпульса с управляемой амплитудой и задержкой оказывается возможным достичь микроструктурирования поверхности мишени в виде плазменных микроструй, облучение которых мощным лазерным импульсом обеспечивает эффективное ускорение электронов до релятивистских энергий и генерацию импульсного жёсткого рентгеновского излучения. Работа проводится совместно с Физическим институтом РАН.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование явления насыщения частоты отсечки в околоатомных лазерных полях. Показано, что частота отсечки линейно растёт с ростом интенсивности лазерного импульса в полях субатомной напряжённости и выходит на насыщение (т.е. перестаёт зависеть от интенсивности импульса) в полях околоатомной напряжённости. Такое поведение находится в количественном согласии с результатами современных экспериментов.

Разработана квантово-механическая непертурбативная теория генерации гармоник высокого порядка одиночными атомами, взаимодействующими с последовательностью высокоинтенсивных лазерных импульсов произвольной поляризации. В рамках развиваемого подхода гармоники генерируются и в доионизационном режиме, когда атомный электрон в каждый момент взаимодействия находится в суперпозиции связанных состояний. Кроме того, предложены механизмы управления спектром отклика атома, в частности, показана эффективность поляризационного управления.

Обнаружена и изучена лазерная филаментация сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона с длиной волны 3.9 мкм для эффективной генерации суперконтинуума шириной более двух октав. Совместные исследования с сотрудниками Венского технического университета позволили впервые экспериментально наблюдать явление филаментации сверхкоротких лазерных импульсов в среднем инфракрасном диапазоне в атомарных и молекулярных газах: аргоне, азоте и кислороде. В аргоне продемонстрирована высокоэффективная генерация суперконтинуума с шириной спектра несколько октав, покрывающего часть ультрафиолетового, видимый, ближний и часть среднего инфракрасного спектрального диапазона. Для выявления физических механизмов генерации суперконтинуума проведено трёхмерное суперкомпьютерное моделирование на вычислительных комплексах СКИФ-МГУ «Чебышёв» и «Ломоносов». Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментом и показывают, что генерация гармоник низкого порядка и спектральное уширение импульса накачки являются основными физическими механизмами генерации суперконтинуума в аргоне. В азоте и кислороде, «красный» сдвиг спектров обусловлен усиленным рамановским эффектом, позволяющим эффективный сдвиг

частоты сверхкоротких лазерных импульсов в сторону среднего инфракрасного диапазона.

*«Изучение физики поверхности и наноструктур»*  
(ПНР – 5)

Впервые продемонстрирована возможность количественного описания оптических свойств планарного метаматериала, состоящего из наночастиц произвольной формы, с помощью численного нахождения мультипольных моментов этих частиц и последующего аналитического определения дальних полей. Это позволяет исследовать оптические и поляризационные свойства метаматериалов применительно к огромному кругу практических задач.

Предложен метод компенсации дифракционного расплывания пучков электромагнитного излучения при их отражении на краю плазмонного резонанса наноструктурированной поверхности. Показано, что фаза комплексного коэффициента отражения на краю плазмонного резонанса хорошо аппроксимируется параболой. Показано, что металлические нанорешётки позволяют компенсировать дифракционное расплывание падающего пучка при его отражении вблизи края плазмонного резонанса. Такие дифракционные нанорешётки представляют собой перспективные объекты для создания частотно-селективных фильтров оптического излучения, которые пропускают (или отражают) излучение с определённым состоянием поляризации на определённой длине волны, зависящей от выбора морфологических параметров нанорешётки. Нанорешётки можно использовать для монохроматизации падающего излучения и создания устройств амплитудной и частотной модуляции света, а также для компенсации дифракционного расплывания пучков при их отражении от нанорешёток.

*«Квантовая оптика и квантовая информация»*  
(ПНР – 2)

Развита теория динамики атомов в трёхмерной импульсной оптической дипольной ловушке, сформированной интерференцией цуга коротких (до нескольких фс) лазерных импульсов с отражением этого цуга от зеркала. Она описывает все основные особенности динамики атомов в ловушке, включая диполь-дипольное взаимодействие между атомами в ловушке за счёт обмена виртуальными фотонами между атомами. Показано, что фемтосекундная оптическая дипольная ловушка может эффективно удерживать атомы при лазерной накачке в диапазоне от нескольких мW до нескольких kW. Также показано, что около-резонансное диполь-дипольное взаимодействие, через которое взаимодействуют близко-расположенные атомы, может быть существенно увеличено при облучении атомов лазерным пучком, с частотой излучения близкой к резонансной. Изменяя параметры ловушки и интенсивность пробного поля можно в деталях изучить механизм диполь-дипольного взаимодействия и динамику атомов в ловушке. Последние являются идеальным инструментом для изучения взаимодействия атомов в отсутствие внешних возмущающих полей и для проведения высокопрецизионных измерений.

Изучена генерация многомодовых световых полей в связанных оптических параметрических взаимодействиях. Показано, что нормально-упорядоченная характеристическая функция содержит информацию о псевдоклассических и истинно квантовых корреляциях. Последние проявляются в интерференционных членах волновой функции и приводят к квантовым парадоксам, а псевдоклассические корреляции фотонов и их кумулянты удовлетворяют соотношениям для классических случайных переменных. Введена кумулятивная

мера квантовости запутанного состояния, не связанная с энтропийным подходом. Обсуждена реализация на дискретных квантовых переменных нового парадокса – аналога классического парадокса Бернштейна в теории вероятности. Парадокс продемонстрирован на примере трёх- и четырёхкубитовых состояний Гринбергера-Хорна-Цайлингера.

Учебная работа. По программе повышения квалификации «Автоматизация измерений и управления экспериментом» прошли обучение 2 слушателя (144 ч.).

Конференции. Сделано 212 докладов на российских и международных конференциях. МЛЦ организовал и был со-организатором 9 национальных и международных школ и конференций, в т.ч.:

— международной конференции по когерентной и нелинейной оптике / Лазерам, приложениям и технологиям (ICONO/LAT-2013) совместно с РАН. В её работе приняли участие 950 человек, в т.ч. около 200 зарубежных учёных;

— III российско-тайваньской школы-семинара по нелинейной оптике и фотонике совместно с Владимирским ГУ им. А.Г. и Н.Г.Столетовых (июнь). Было сделано более 30 научных докладов и проведена стендовая сессия с участием молодых учёных.

Проводились двусторонние симпозиумы с Францией и Германией и Финляндией.

Публикации. Опубликовано 102 статьи в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах. Студенты различных факультетов стали авторами и соавторами более чем 80 статей и докладов.

Адрес сайта МЛЦ: <http://www.ilc.msu.ru>