

## Международный Учебно-Научный Лазерный Центр МГУ им. М.В.Ломоносова

### **Общие сведения**

Международный учебно-научный лазерный центр МГУ (МЛЦ МГУ) был создан в 1989 г. по инициативе выдающегося ученого, профессора Московского университета С.А. Ахманова. Это одно из самых авторитетных междисциплинарных подразделений Московского университета, занимающееся организацией исследований на стыках лазерной физики и других естественных наук — биологии, химии, медицины, экологии, а также обучением и переподготовкой специалистов, уже имеющих высшее образование. Деятельность МЛЦ МГУ как бы перебрасывает мостик между фундаментальными исследованиями в области лазерной физики и нелинейной оптики и прикладными исследованиями с применениями лазерных методов в биологии, медицине, химии и в других науках.

Организационно и структурно МЛЦ МГУ является самостоятельным подразделением Московского университета, имеющим, согласно Уставу МГУ, права отдельного факультета или научно-исследовательского института. В своей деятельности МЛЦ МГУ широко использует международную кооперацию, привлекает иностранных ученых для проведения совместных научных исследований, чтения лекций, проведения семинаров. Осуществляется переподготовка и иностранных специалистов. В масштабах России МЛЦ МГУ координирует проведение крупных междисциплинарных научно-технических программ и проектов в области лазерной физики и нелинейной оптики. При этом МЛЦ МГУ сам является активным участником и соисполнителем многих программ, организатором крупных Международных конференций и школ.

### **Новое в структуре**

В МЛЦ МГУ функционирует уникальный Центр коллективного пользования по проблемам сверхсильных световых полей и лазерных фемтотехнологий. Центр предназначен для проведения фундаментальных и прикладных исследований по взаимодействию мощного фемтосекундного лазерного излучения с веществом и перспективным фемтотехнологиям научными группами МЛЦ и других подразделений МГУ, а также обучения студентов, аспирантов и слушателей МГУ принципам измерений параметров фемтосекундных лазеров и физике взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с веществом. Основой Центра является тераваттная фемтосекундная лазерная система на TiSa

(длительность импульса — 70 фс; длина волны — 800 нм; энергия в импульсе — 40 мДж; частота следования импульсов, 10 Гц).

### **Наука**

В 2007 г. МЛЦ МГУ проводил научную работу по следующим основным направлениям:

- Фундаментальные проблемы лазерной физики и нелинейной оптики;
- Физические основы лазерных технологий;
- Лазерная химия, биофизика и биомедицина;
- Получение сверхсильных световых полей и их применение;
- Физика поверхности и наноструктур;
- Квантовые компьютеры и обработка квантовой информации.

Велась работа над выполнением заданий в рамках ФЦП. Наряду с этим МЛЦ МГУ активно участвовал в ряде других ФЦП с финансированием через другие головные институты. МЛЦ МГУ является исполнителем исследований по 45-ти грантам Российского фонда фундаментальных исследований.

С целью привлечения дополнительного финансирования в МЛЦ МГУ велись работы по контракту с Международным лазерным центром г. Братиславы (Словакия).

По результатам выполняемых в МЛЦ МГУ научных исследований была опубликовано 109 статей в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах, сделано 210 докладов на российских и международных конференциях. В эти исследования активно вовлекались студенты различных факультетов МГУ — они стали авторами и соавторами более чем 100 статей и докладов.

Ниже приведены основные научные достижения МЛЦ МГУ за 2007 г.

**1. Фундаментальные проблемы лазерной физики и нелинейной оптики.** Показана возможность использования микроструктурированных световодов для эффективного преобразования спектра наносекундных лазерных импульсов за счет процессов параметрического четырехволнового взаимодействия и

вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Найдены режимы, обеспечивающие эффективное преобразование наносекундных лазерных импульсов в широкополосное излучение белого света (суперконтинуума). Показано, что сильная параметрическая связь стоковых и антистоковых ВКР-компонент, возникающая вблизи нуля дисперсии групповой скорости, позволяет существенно увеличить спектральную ширину и повысить качество спектра излучения суперконтинуума.

Проведено численное моделирование динамики формирования обращенной волны в самонакачиваемом ОВФ зеркале (СОВФЗ) с линейным резонатором на фоторефрактивном кристалле (ФРК ВаТiO<sub>3</sub>). Показано, что в оптимальных условиях в таком СОВФЗ формируется фазированная решетка динамических голограмм, и именно интерференция рассеянных на них волн обеспечивает предельно высокую эффективность (коэффициент нелинейного отражения и интеграл перекрытия более 80 и 95% соответственно) стационарного ОВФ. Установлено, что развитие неустойчивостей связано как с нарушением фазовых соотношений в этой решетке и формированием в ФРК дополнительных динамических голограмм в геометрии, характерной для СОВФЗ с полулинейным резонатором, так и с проявлениями типичного для ФРК эффекта самовоздействия (self-bending).

Показано, что в приближении взаимодействия трех мод точное аналитическое решение задачи стационарного параметрического преобразования частоты, в том числе генерации второй гармоники и параметрического усиления в среде с квадратичной нелинейностью сводится к решению трех независимых систем нелинейных уравнений. Каждая из систем состоит из двух нелинейных уравнений Шредингера, связана с двумя остальными системами лишь через граничные условия и описывает многокомпонентную кноидальную волну, содержащую две неинтерферирующие составляющие. Правомочность перехода к такому описанию задачи обусловлена возможностью описания результата конкуренции двух одновременно протекающих на нелинейности второго порядка процессов слияния и распада квантов через эффективную каскадную кубическую нелинейность.

Численно показано, что в условиях сохранения спектральной ширины, начальной энергии и поперечного размера коллимированного импульса начальная фазовая модуляция, соответствующая увеличению его начальной длительности от 54 фс до 190 фс (по уровню 1/e), может привести к увеличению расстоянию оптимального сжатия импульса от 1,7 до 5 м.

На основе построенной модели нелинейно-оптического отклика воздушной среды при воздействии фемтосекундного лазерного излучения различной длины волны показано, что с уменьшением длины волны сокращаются

поперечные размеры филамента и плазменного канала, возрастает количество свободных электронов в образовавшейся плазме. Пиковая интенсивность в филаменте слабо зависит от длины волны.

Создана математическая модель, описывающая работу адаптивной оптической системы в турбулентной атмосфере с учетом поперечного ветра и явления анизопланатизма оптических пучков в неоднородной среде. Модель включает комплекс программ для моделирования работы замкнутой адаптивной системы и моделирования распространения световых пучков в атмосфере при снос турбулентности поперечным ветром.

**2. Физические основы лазерных технологий.** В отчетный период МЛЦ МГУ завершил работы по международному контракту на создание в Международном лазерном центре Братиславы комплекса научного, научно-технологического и учебного оборудования. Контракт выполняется в рамках программы конверсии внешнего долга Российской Федерации перед Словацкой Республикой в соответствии с межправительственным соглашением. В результате выполнения работ укреплен также материально-техническая и экспериментальная база МГУ. В ходе подготовки и выполнения совместных проектов в области науки и образования укрепляется научное взаимодействие со словацкими и европейскими специалистами.

Создан рентгеновский микроскоп асимметричного отражения с двадцатикратным двумерным увеличением на основе лабораторного источника излучения. Экспериментальная схема собранного микроскопа состоит из следующих основных элементов. В качестве источника использовалась рентгеновская трубка CuK $\alpha$  (размер фокуса около 0,5×0,5 мм). Источник излучения располагался в 60 см от первого отражающего кристалла, исследуемый объект находился в 10 см от кристалла. В качестве увеличивающих элементов использовались асимметрично отражающие монокристаллы кристаллы Si(220). Угол среза кристалла относительно кристаллографических плоскостей составил 21°38'. Угол падения излучения на поверхность кристалла соответствующий максимуму брэгговского отражения равен 2°02', а угол выхода отраженного излучения 45°17'. Увеличение коэффициента асимметрии отражения приводит к падению плотности потока излучения регистрируемого детектором, поэтому в настоящих экспериментах нами был выбран коэффициент асимметрии  $\beta=20$ , который позволяет получать качественное увеличенное изображение при разумном

времени регистрации. Регистрация увеличенного изображения производилась с применением ПЗС-матрицы (размеры пикселя  $9 \times 9$  мкм). Время экспозиции составляло 600 с, при этом в каждом пикселе матрицы фиксировалось до 200 событий.

Собран и запущен в эксплуатацию терагерцовый спектрометр для измерений поглощения электромагнитных волн терагерцового диапазона при низких (от 4,2К) температурах. Проведена модернизация фемтосекундной лазерной системы на сапфире с титаном: 1) улучшен наносекундный контраст импульса до  $10^6$ ; 2) разработана и инсталлирована поляризационная схема, обеспечивающая возможность плавной регулировки энергии импульса от 200 мкДж до полной энергии; 3) разработан, создан и запущен в эксплуатацию вакуумный компрессор фемтосекундных импульсов, минимизирующий фазовую самомодуляцию импульса при компрессии и обеспечивающий формирование спектрально-ограниченных импульсов вблизи экспериментальной области. Проведен анализ возможных схем генерации терагерцового излучения в плазме, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом с использованием газовых и плотных мишеней, и определена оптимальная схема генерации, которая и будет реализована на втором году проекта. Особое внимание уделено исследованию новых материалов для генерации мощного ТГц излучения. Исследованы молекулярные кристаллы на базе мироцаанинов, показана их перспективность для применения в качестве генерационной среды для ТГц устройств. Рассчитан и изготовлен нелинейный кристалл  $\text{LiNbO}_3$  для высокоэффективной генерации мощных ТГц импульсов в схеме с использованием геометрии наклонного фронта лазерной накачки. Разработана и собрана экспериментальная установка для генерации мощных ТГц импульсов в плазме с помощью фемтосекундных лазерных импульсов с максимальной энергией до 3мДж. Система адаптирована для исследований спектров ТГц поглощения в широком диапазоне температур: от 4 К до 500 К.

Проведено теоретическое исследование пространственного разрешения фокусированных пленочных широкополосных пьезоэлектрических преобразователей и разработана оригинальная методика расчета параметров многоэлементных фокусированных антенн применительно к задачам оптико-акустической и лазерно-ультразвуковой томографии. Разработана методика расчета геометрических параметров широкополосной фокусированной многоэлементной антенны для лазерно-ультразвуковой томографии по заданным величинам разрешения изображения. Теоретически исследовано разрешение широкополосных пленочных цилиндрически фокусированных пьезоприемников, как составных частей многоэлементной антенны. Разработан программный пакет, позволяющий рассчитывать карты фокальных зон широкополосных цилиндрически фокусированных пьезоприемников с различными

геометрическими параметрами. На основе результатов теоретического анализа и численного моделирования разработана методика инженерного расчета геометрических параметров широкополосной фокусированной многоэлементной антенны для лазерно-ультразвуковой томографии по заданным величинам разрешения изображения. Для поставленной задачи лазерно-ультразвуковой томографии биотканей с субмиллиметровым пространственным разрешением рассчитан и создан 8-ми элементный сегмент 64-х элементной антенны. Полученные экспериментально карты фокальных зон отдельных фокусированных приемников и функция передачи точки 8-ми элементным сегментом антенны подтвердили правильность и корректность предложенной методики.

**3. Лазерная химия, биофизика и биомедицина.** Разработана методика, позволяющая по измерениям волнового фронта человеческого глаза методом Шака-Гартмана, определять расположение внутренних элементов человеческого глаза.

Обнаружено, что скорость фотоокисления пленок сопряженного полимера, содержащих низкомолекулярный органический акцептор (например, тринитрофлуоренон), может замедлиться на несколько порядков величины по сравнению с пленками чистого полимера.

Предложен новый сценарий селективного фоторазрушения энантиомеров при помощи совместного воздействия мощного многокомпонентного фемтосекундного и пикосекундного лазерных импульсов.

Разработан новый метод лазерной ориентации молекул с использованием короткого, достаточно интенсивного трехчастотного сфазированного лазерного импульса. Численный анализ этого метода показывает, что он является исключительно эффективным для ориентации молекул в газовой фазе даже при комнатной температуре.

Усовершенствована математическая модель распространения лазерных импульсов в слоистых средах на основе решения нестационарного уравнения переноса.

Разработаны новые алгоритмы и методы расчета распространения поляризованного и неполяризованного света в моделях биологических тканей, и проведено сравнение их эффективности.

Проведены эксперименты по определению глубинного профиля поверхностно нанесенных наночастиц диоксида титана, играющих роль физических УФ-фильтров, в роговом слое кожи человека и животных.

Рассчитана температурная зависимость контура валентной полосы спектра комбинационного рассеяния воды.

4. Получение сверхсильных световых полей и их применение. В МЛЦ МГУ функционирует центр коллективного пользования по проблемам сверхсильных световых полей и фемтосекундных лазерных технологий, базирующийся на тераваттной фемтосекундной лазерной системе на сапфире с титаном со следующими характеристиками: длина волны 800 нм, длительность импульса 40 фс, энергия в импульсе до 40 мДж, стабильность по энергии 3% rms, частота следования импульсов 10 Гц, пространственное качество пучка  $M^2 \sim 2$ . В рамках проектов этого ЦКП получены следующие результаты.

Предложена схема эффективной генерации жесткого рентгеновского излучения при двухимпульсном лазерном воздействии излучением нано и фемтосекундной длительности на твердотельную мишень, находящуюся в воздухе. Обнаружен эффект возрастания выхода жесткого ( $E > 2,5$  кэВ) рентгеновского излучения (до 17 раз) в двухимпульсном режиме воздействия по сравнению с одноимпульсным (фемтосекундным). Оптимальное время задержки между импульсами составило 10 мкс. Интенсивность сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения на мишень около  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Впервые показано что корпускулярный поток частиц, вылетающих из плазмы, созданной фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью свыше  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, может вызвать возбуждение низкоэнергетического ядерного уровня (изотоп Fe-57, энергия уровня 14.41 кэВ), наблюдение которого возможно через регистрацию энергетического спектра и времени появления конверсионных электронов.

С помощью численного моделирования исследована эволюция пространственно-временной структуры жестко сфокусированных фемтосекундных световых пакетов в прозрачной конденсированной среде (плавленом кварце). Нелинейное самовоздействие световых пакетов приводит к формированию сверхкоротких (длительность порядка 10 фс) импульсов, распространяющихся в различных направлениях. Спектральный состав, временная структура и положение сверхкоротких импульсов на временной оси зависят от направления их распространения.

#### 5. Физика поверхности и наноструктур.

Показано, что при правильном выборе спектрального диапазона измерений (точки совмещения частот компонент бигармонической накачки) спектральные и температурные особенности пикосекундного нелинейного отклика ВТСП, обусловленного межзонными переходами в спектре состояний с метастабильной энергетической щелью, устойчивы по отношению к уровню возбуждения. При этом характер этих особенностей в методах

бигармонической накачки и вырожденной четырехфотонной спектроскопии определяется резонансной составляющей полного нелинейного отклика, которая формируется при начальных температурах ВТСП ниже точки фазового перехода (при появлении энергетической щели в спектре состояний).

Изучен эффект самоорганизации упорядоченных ансамблей наноструктур на поверхности полупроводника CdTe при импульсном лазерном облучении и построена теория этого эффекта.

Построена теория образования и эволюции периодических наноструктур рельефа поверхности при сканирующем лазерном неупругом фотодеформировании полупроводников.

**6. Квантовые компьютеры и обработка квантовой информации.** Разработан метод создания аперидической модуляции нелинейной восприимчивости кристаллов, в которых возможна реализация связанных квазисинхронных нелинейно-оптических процессов. Впервые показано, что параметрическое усиление при низкочастотной накачке можно осуществить в связанных нелинейно-оптических взаимодействиях, протекающих в аперидически нелинейных фотонных кристаллах (АНФК), создаваемых методом суперпозиции модуляции квадратичной восприимчивости. В таком процессе интенсивности волн с частотами выше частоты накачки монотонно нарастают с длиной взаимодействия, как и в случае традиционного процесса параметрического усиления при высокочастотной накачке. Найдена зависимость фактора усиления от коэффициентов связи взаимодействующих волн. Рассматриваемый процесс позволяет получить перестройку генерируемой частоты в УФ при накачке в видимом диапазоне. Анализ процесса выполнен на примере АНФК ниобата лития.

Развита теория ярких трёхчастотных перепутанных состояний световых полей, генерируемых в связанных нелинейно-оптических процессах. Изучены свойства трёхчастотных перепутанных состояний световых полей, которые могут быть созданы при квазисинхронных взаимодействиях в одном аперидически нелинейном фотонном кристалле. Взаимодействия включают два процесса преобразования частоты вниз и один процесс преобразования частоты вверх. Получено выражение для матрицы плотности. Изучены корреляции фотонов и некоторые информационные характеристики полей.

## **Учебная работа**

В МЛЦ МГУ в 2007 г. один человек прошел обучение по программе стажировки. По языковой программе лаборатории лингвострановедения, рассчитанной на сотрудников, аспирантов и студентов старших курсов МГУ, в 2007 г. обучалось 5 человек. По программе повышения квалификации «Автоматизация измерений и управления экспериментом» в 2007 году прошло обучение 30 человек. Из них 5 человек в объеме 72 часа (краткосрочное повышение квалификации), 13 человек в объеме 126 часов, 7 человек в объеме 144 часа и 5 человек в объеме 288 часов. Обучение части этих слушателей проводилось в рамках выполнения государственного контракта. Кроме того, по этой программе прошли обучение две группы студентов и аспирантов физического факультета МГУ.

Совместно с физическим факультетом введен в строй полностью переоборудованный современными системами автоматизации дополнительный учебный компьютерный класс на 10 посадочных мест.

В 2007 году было продолжено чтение созданного в МЛЦ МГУ факультативного лекционно-практического курса «Основы параллельного программирования» для студентов 4-го курса физического факультета. Практическая часть курса включает параллельное программирование на вычислительном кластере МЛЦ МГУ в режиме дистанционной работы.

## **Конференции**

В 2007 г. большая работа была проделана в МЛЦ МГУ по организации и проведению молодежных Школ, семинаров и конференций.

МЛЦ МГУ организовал и был соорганизатором 7 национальных и международных школ и конференций в 2007 г. Среди них следует особо отметить Международную конференцию по когерентной и нелинейной оптике (ICONO-2007), организованную в Минске, Беларусь. Это — ведущая и крупнейшая конференция в этой области в регионе стран СНГ и в мире. Она собрала свыше 1200 человек, из которых около 500 – зарубежных участников. Кроме того, следует отметить международную конференцию по применению лазеров в науках о жизни (LALS-2007), которая успешно была организована в МГУ. В ней приняли участие около 300 человек, из которых свыше 120 участников из за рубежа.

## **Издательская деятельность**

В 2007 году сотрудниками МЛЦ МГУ опубликованы следующие учебники и учебно-методические пособия (совместно с кафедрой Общей Физики и Волновых Процессов Физического факультета МГУ):

1. Кандидов В.П., Чикишев А.Ю. Физика волновых процессов. Практические занятия по физике для

студентов-математиков, часть IV. Учебно-методическое пособие. М.: МАКС Пресс, 2007, 132 с.

2. Шувалов В.В. Физика лазеров: основы и принципы. Части 1-2. Мультимедийный конспект лекций. М.: МЛЦ МГУ и Физический факультет МГУ, 2007, 300 с.

## **Международное сотрудничество**

Международная, межвузовская и межфакультетская деятельность МЛЦ МГУ направлена главным образом на координацию крупных программ и проектов, преимущественно междисциплинарного характера в области лазерной физики, химии, биологии, медицины и лазерных технологий когерентной и нелинейной оптики и их приложений.

МЛЦ МГУ состоит коллективным членом российского отделения SPIE—The International Society for Optical Engineering и Лазерной Ассоциации. При МЛЦ МГУ успешно работает студенческое отделение SPIE.

**Адрес веб-страницы:**  
<http://www.ilc.msu.ru>