

СВЕРХКОРОТКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

За последние 20 лет широкое распространение фемтосекундных лазеров привело к значительному расширению спектра решаемых с их помощью задач. Причем, если на первом этапе после создания фемтосекундных лазеров, они использовались в основном для фундаментальных физических исследований, то в последнее время такие системы все больше используются для решения широкого спектра прикладных задач в различных областях науки и техники, в том числе в области технологий высокопрецизионной обработки материалов и биомедицинских технологиях.

Отличительная особенность фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) состоит в концентрации световой энергии в предельно малом временном интервале. В настоящее время фемтосекундными лазерами надежно генерируются импульсы длительностью порядка 10 фс и даже менее (1 фемтосекунда (фс) = 10^{-15} с). О временном масштабе таких процессов красноречиво говорит следующий пример:

$$10 \text{ фс} / 1 \text{ мин} = 1 \text{ мин} / \text{возраст Вселенной}.$$

Другой особенностью ФЛИ, также связанной с малой длительностью, является возможность достижения колоссальных значений пиковой мощности в импульсе. Пиковая мощность лазерного импульса $\sim 10^{14}$ Вт, генерируемого современной мультитераваттной лазерной системой (1 тераватт (ТВт) = 10^{12} Вт), в десятки раз превышает мощность всех источников энергии на планете. При этом, в связи с малой длительностью, такие рекордные пиковые мощности достигаются при относительно небольшой величине энергии лазерного импульса (несколько джоулей), а сами лазерные системы при этом являются достаточно компактными. Так современная коммерческая фемтосекундная 100 ТВт лазерная система располагается в помещении площадью примерно 100 м^2 .

В настоящее время рекордные интенсивности, достигаемые в фокусе лазерного луча составляют $\sim 10^{21} \div 10^{22} \text{ Вт/см}^2$. При нагреве вещества такими импульсами достигаются температуры в десятки и сотни миллионов градусов, что соответствует температурам инициирования ядерных реакций. Поэтому одним из наиболее важных перспективных применений сверхмощных петаваттных лазеров (1 петаватт = 10^{15} Вт) в настоящее время считается лазерный управляемый термоядерный синтез (ЛУТС).

Другая особенность – предельно малая длительность импульсов позволяет с их помощью возбуждать сильнонеравновесные состояния и исследовать быстропротекающие релаксационные процессы в веществе, например теплообмен между электронами проводимости и кристаллической решеткой в металлах, происходящий в пикосекундном временном диапазоне.

В последние годы фемтосекундные лазеры широко используются в для прецизионной обработки широкого класса материалов. Высокая мощность ФЛИ, сочетающаяся с низкой расходимостью лазерного излучения, позволяет концентрировать световую энергию в очень малом объеме. При фокусировке лазерного луча пространственное распределение интенсивности в фокусе обычно имеет колоколообразную (гауссову) форму (рисунок 1). При фокусировке микрообъективом с большой числовой апертурой ($NA > 1$) диаметр фокального пятна соизмерим с длиной волны лазерного излучения, и составляет примерно $0,5 \div 1 \text{ мкм}$.

Для большинства материалов взаимодействие носит пороговый характер, и изменениям подвержена лишь та область образца, где интенсивность излучения превышает некоторое пороговое значение.

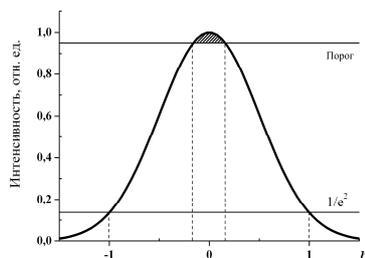


Рисунок 1 — Характерный вид распределения интенсивности излучения в фокальном пятне

Эта область может быть значительно меньше размера фокального пятна. Такой принцип применяется при обработке широкого круга труднообрабатываемых материалов с нанометрической точностью, включая керамики и прозрачные диэлектрики (алмаз и кварц). Минимальный диаметр получаемых таким образом отверстий составляет $100 \div 200$ нм.

Специфика воздействия сверхкоротких импульсов на металлы и полупроводники состоит в том, что тепло не успевает далеко распространиться за пределы области взаимодействия. Кроме того абляция (удаление) вещества происходит не в виде капель расплавленного материала (как в случае использования наносекундных лазерных импульсов), а в виде пара и плазмы. Эти факторы увеличивают точность обработки с возможностью получения резких границ на субмикронном уровне (рисунок 2).

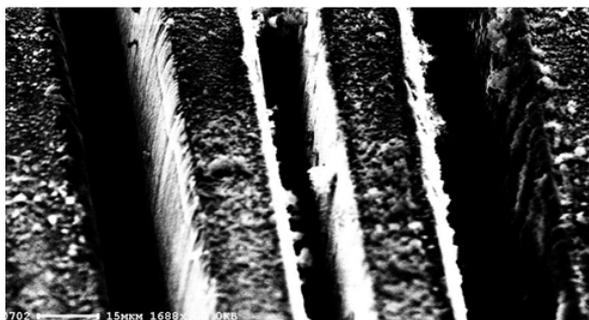


Рисунок 2. Прорезы в алмазной пластине; ширина паза 10 и 20 мкм, глубина $20 \div 25$ мкм

Особую ценность фемтосекундные лазерные технологии представляют в биологии при работе с живыми клетками, чувствительными к различного рода воздействию. С помощью ФЛИ можно создавать в мембране клетки микронные отверстия, например, для введения в клетку молекул ДНК. При этом, в связи с малой энергией импульса, клетка не погибает и продолжает функционировать. Развитие фемтосекундной техники послужило основой создания новых биотехнологий, таких как клеточная хирургия и клеточная инженерия.

В созданном за последние десять лет «Лазерном фемтосекундном комплексе» (ЛФК) Объединенного института высоких температур РАН проводятся фундаментальные исследования экстремальных состояний, образующихся в сильно нагретом и сжатом веществе, экспериментальные исследования плазменных явлений, структурных и фазовых превращений, происходящих под действием мощных фемтосекундных лазерных импульсов.

Наряду с фундаментальными исследованиями также проводится разработка фемтосекундных лазерных технологий создания и обработки наноматериалов. Биомедицинский лазерный комплекс предназначен для разработки фемтосекундных технологий для биологии и медицины.

В настоящее время ЛФК включает в себя три мощные фемтосекундные системы для фундаментальных исследований. Две из них тераваттного уровня мощности: титан-сапфировая (Coherent, USA) мощностью 6 ТВт с длительностью импульса 40 фс и хром-форстеритовая, созданная в ОИВТ РАН, мощностью 1 ТВт с длительностью импульса 100 фс (рисунок 3). Третья титан-сапфировая система (Coherent, USA) субтераваттного уровня (длительность импульса 40 фс, энергия – 2 мДж) отличается высокой частотой повторения импульсов до 1 кГц.



Рисунок 3. Тераваттные титан-сапфировая и хром-форстеритовая лазерные системы «Лазерного фемтосекундного комплекса» ОИВТ РАН

Для технологических целей применяются компактные иттербиевые фемтосекундные лазеры с диодной накачкой (Авеста, Россия), обладающие высокой стабильностью и большим ресурсом работы. При существенно меньшей энергии в импульсе (от десятков наноджоулей до десятков микроджоулей) за счет высокой частоты генерации импульсов (10 кГц – 100 МГц) реализуется высокая средняя мощность на уровне нескольких ватт, необходимая для достижения высокой производительности при лазерной обработке.

В фемтосекундном лазерном центре ОИВТ РАН проводятся исследования по следующим основным направлениям.

Рентгеновское излучение плазмы. В твердом теле с помощью ФЛИ можно возбудить так называемое характеристическое K_{α} рентгеновское излучение с нижних оболочек атомов (рисунок 4) в виде коротких импульсов длительностью несколько сотен фемтосекунд с длиной волны в несколько ангстрем.

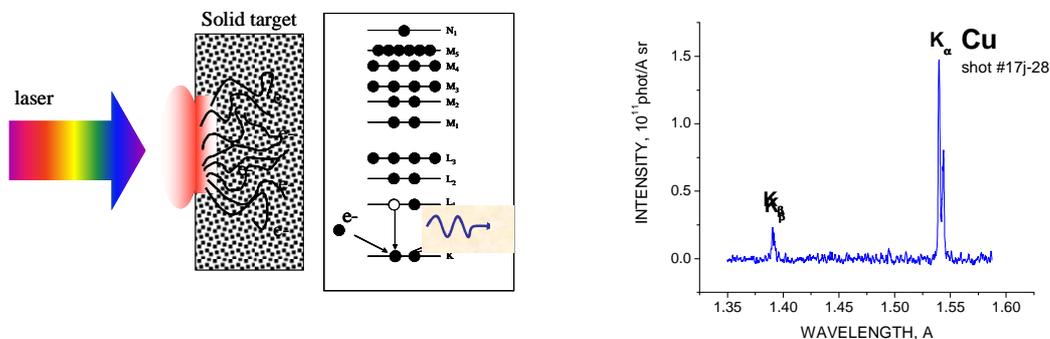


Рисунок 4. Принцип генерации характеристического излучения ; рентгеновский спектр характеристического излучения меди.

Такие импульсные рентгеновские источники чрезвычайно важны для диагностики быстрых фазовых превращений и структурных изменений в веществе, протекающих в пикосекундном временном диапазоне. Однако, для возбуждения этих оболочек, нужны быстрые электроны с энергией в несколько КэВ. Такие электроны при определенных условиях возникают во время взаимодействия импульсов с интенсивностью $10^{15} \div 10^{16}$ Вт/см² с лазерной плазмой, возникающей на поверхности мишени в момент взаимодействия.

Неидеальная лазерная плазма. При воздействии на металлическую мишень импульсов с интенсивностью $10^{14} \div 10^{15}$ Вт/см² в образующейся плазме твердотельной плотности на пико- и субпикосекундных временах достигаются электронные температуры на уровне

сотен и даже тысяч электрон-вольт, а также развиваются огромные гигабарные давления. Но всё это происходит в очень короткий промежуток времени – плазма быстро разлетается, температура и давление падают. Поэтому, чтобы исследовать экстремальные состояния, характеризующиеся высокими температурами и давлениями, необходимы методы, позволяющие получать информацию о параметрах вещества, когда разлёт плазмы ещё не развился. То есть, нужна методика измерений с фемтосекундным временным разрешением. Для этого фемтосекундный лазерный импульс делится на две части (нагревающий и зондирующий) с изменяемой фемтосекундной временной задержкой между ними (pump-probe метод). Мощный нагревающий импульс приводит вещество в экстремальное состояние, а более слабый диагностирует поведение вещества на субпикосекундных временах. Применение данного метода впервые позволило получить данные о транспортных параметрах неидеальной плазмы алюминия и серебра твердотельной плотности.

Неравновесный нагрев электронов и решетки в металлах и полупроводниках.

При воздействии фемтосекундных импульсов умеренной интенсивности $10^{11} \div 10^{13}$ Вт/см² в веществе происходит целый ряд интересных явлений, таких как неравновесный нагрев и релаксация электронов и ионов. Электроны проводимости, поглощая лазерное излучение, нагреваются до температур достигающих 10000 К, в то время как температура кристаллической решетки остается ниже температуры плавления. При этом «горячие» электроны излучают свет, т.е. имеет место тепловое излучение «холодного» металла. Исследования взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов умеренной интенсивности с веществом являются важными в связи с широким кругом актуальных технологических приложений, а также в связи с многими фундаментальными проблемами (физика неравновесных процессов, метастабильных состояний, горячих конденсированных сред, лазерно-индуцированных ударно-волновых процессов, формирование нанорельефа и т.п.). С прикладной точки зрения актуальность обусловлена развитием современной лазерной индустрии прецизионной обработки материалов, наномодификации поверхности, нанесения покрытий с использованием фемтосекундных импульсов.

Генерация ударных волн. Одним из интересных применений фемтосекундных импульсов умеренной интенсивности является лазерная генерация ударных волн. При быстром изохорическом нагреве поверхностного слоя вещества толщиной порядка нескольких сотен нанометров в нем возникают мегабарные давления, которые приводят к возникновению ударных волн очень высокой амплитуды и малой длительности. Отличительной их особенностью является рекордно малая локализация в пространстве. Характерный масштаб локализации такой ударной волны в веществе составляет несколько сотен нанометров.

Уникальность таких волн заключается в возможности исследования динамических прочностных свойств нанослоев различных материалов при экстремально высоких скоростях деформирования вещества. Эксперименты показывают, что динамическая прочность нанослоев при столь коротких нагрузках возрастает в сотни раз, приближаясь к предельной, атомарной прочности вещества. То есть, чтобы очень быстро разорвать вещество, нужно приложить гораздо большее усилие. Здесь действуют другие механизмы возникновения пластических деформаций и разрушений, по сравнению с взрывной ударной волной. Данная информация является очень важной для построения широкодиапазонных уравнений состояния вещества и разработки потенциалов межатомного взаимодействия для проведения молекулярно-динамических расчетов. С помощью фемтосекундных импульсов получены данные о прочности металлов в твердом и жидком состоянии при рекордно высоких скоростях растяжения, порядка 10^9 с⁻¹. Подобные скорости деформирования недостижимы другими известными методами.

Лазерное ускорение ионов. Одно из перспективных направлений исследований ЛФК на ближайшие годы связано с лазерным ускорением ионов. При воздействии фемтосекундного импульса с интенсивностью выше 10^{18} Вт/см² на тонкие фольги в них возникают быстрые электроны, которые проходят фольгу насквозь и вылетают с ее противоположной стороны. В результате этого вблизи задней поверхности мишени образуется отрицательно заряженный слой электронов. Электрическое поле, создаваемое этими электронами достаточно для того, чтобы ионизовать атомы, находящиеся на поверхности мишени. Под действием этого же электрического поля, образовавшиеся ионы начинают ускоряться. Возникает двойной слой (рисунок 5), состоящий из разделенных в пространстве слоев электронов и ионов, который вылетает из мишени. В процессе ускорения энергия от электронов переходит к ионам. Наиболее эффективно ускоряются легкие ионы (протоны) до энергий в десятки МэВ

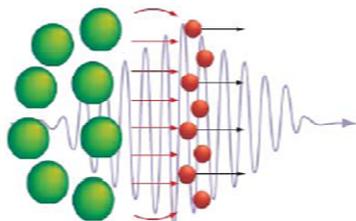


Рисунок 5. Лазерное ускорение ионов: ионы (зеленые сферы) ускоряются под действием электрического поля, возникающего между ионами и движущимися электронами (красные сферы).

Лазерно-ускоренные потоки заряженных частиц могут быть использованы в производстве полупроводниковых и мембранных материалов, колоризации кристаллов, структурной диагностике и др. Однако, наиболее перспективно их применение в медицине для терапии раковых заболеваний. Терапия протонными пучками признана на сегодняшний день наиболее эффективной формой радиационной терапии глубоко расположенных опухолей. Это связано с особым механизмом передачи энергии от ускоренных частиц биологическим тканям, так называемым “пиком Брегга”, когда максимальное выделение энергии происходит в конце пробега иона перед его остановкой в биологической ткани. Глубина расположения пика Брегга в облучаемой ткани зависит от энергии ионов, что дает возможность прецизионно локализовать выделяемую ионами энергию именно в раковой опухоли, приводя к ее разрушению.

Подобные исследования в настоящее время ведутся в различных лабораториях мира. В литературе сообщается о лазерном ускорении ионов до энергий 60 МэВ, что близко к требуемым значениям энергий. Ожидается, что подобные фемтосекундные лазерные системы в ближайшие годы могут составить конкуренцию дорогостоящим и громоздким традиционным ускорителям, которые в настоящее время применяются для протонной терапии онкологических заболеваний.

Применение фемтосекундных лазеров в биологии. Развитие лазерных технологий открыло новые возможности для создания уникальных методов, позволяющих модифицировать биологические объекты на тканевом, клеточном и даже субклеточном уровнях. С помощью лазера можно перемещать вирусы, отдельные клетки и их структуры в трёхмерном пространстве. С его же помощью можно проводить операции с мембранами, элементами клеток и даже с хромосомами. В последнее десятилетие появились работы, посвящённые исследованию особенностей взаимодействия ФЛИ с биологическими объектами. Применение фемтосекундных лазеров обеспечивает избирательное воздействие излучения на биообъекты, минимизируя повреждение прилегающих к ним тканей, и делая воздействие на ткани и клетки наиболее безопасным.

Оптический пинцет и тканевая инженерия. В 1986 году Артуром Ашкиным был открыт феномен “оптической ловушки”. Этот феномен состоит в возможности захвата и удержания в фокусе лазерного луча прозрачных объектов микроскопического размера, а также в их перемещения в трёхмерном пространстве. Последующие исследования

показали, что таким образом можно манипулировать вирусами, живыми клетками и даже их ядрами или хромосомами. Технология оптического пинцета позволяет конструировать нужным образом клеточные структуры, устанавливая заданное взаимоотношение между отдельными клетками, их органеллами и производными. Такая технология открывает удивительные перспективы развития нового направления – тканевой инженерии.

Преимплантационная диагностика (биопсия) эмбриона. В настоящее время биопсия эмбриона на начальной стадии его развития выполняется с помощью механических инструментов. В фемтосекундном лазерном центре ОИВТ РАН на примере эмбриона мыши была продемонстрирована возможность ее проведения с использованием только оптических технологий.

С помощью созданного в ОИВТ РАН фемтосекундного лазерного пинцета-скальпеля (рисунок 6) сначала прорезается отверстие в прозрачной оболочке эмбриона, а затем через него оптическим пинцетом выводится образец ткани, который в дальнейшем можно использовать для диагностики. Образцом ткани для диагностики служит так называемое редуцированное тельце, которое не участвует в последующем развитии эмбриона, но содержит генетическую информацию о его состоянии. Эмбрионы, подвергнутые этой процедуре, в дальнейшем благополучно развивались. Этапы процедуры лазерной биопсии эмбриона демонстрирует рисунок 6.

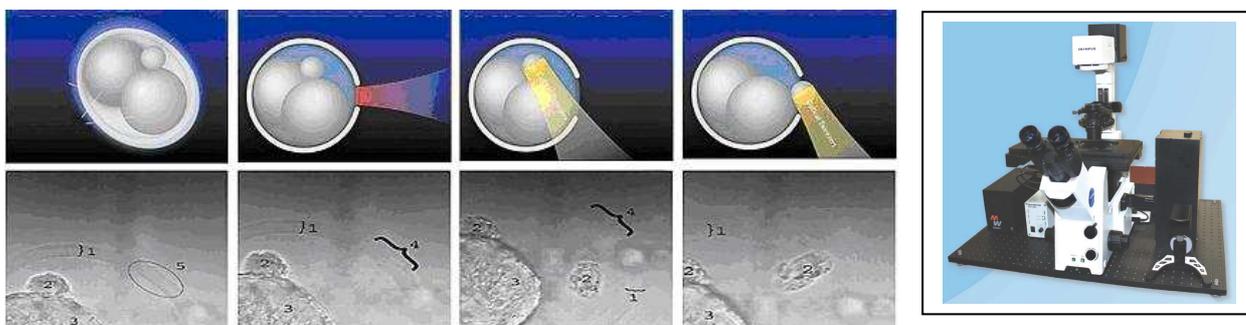


Рисунок 6. Основные этапы лазерной предимплантационной биопсии эмбриона; фемтосекундный лазерный пинцет-скальпель ОИВТ РАН

Лазерная трансфекция. Проблема эффективной доставки (трансфекции) в живые клетки субстанций и веществ, таких как лекарственные препараты, гены и антитела, представляет в настоящее время одно из наиболее приоритетных направлений развития биомедицинских технологий.

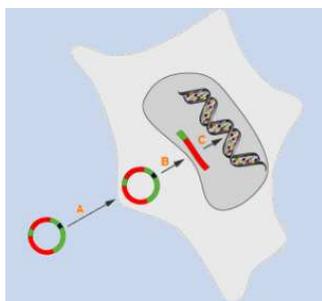


Рисунок 7. Лазерная микроинъекция или оптическая трансфекция – введение генетического материала или лекарственных средств в клетку без вирусных агентов (размер отверстия в мембране должен составлять не более 1 мкм)

Процедура введения в клетку нуклеиновых кислот (ДНК, РНК) позволяет полностью или частично модифицировать генетическую информацию, содержащуюся в клетке или живом организме, что открывает новые возможности для современных биотехнологий, фармацевтики, клеточной биологии и генетики, а также клинической терапии. «Деликатность» и предельная локализация воздействия с помощью ФЛИ позволяет осуществлять трансфекцию клеток, особенно чувствительных к внешним факторам (например, стволовых клеток и клеток первичной культуры и др.)