

# ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Доктор физико-математических наук М.Б. АГРАНАТ,  
(Фемтосекундный лазерный центр ОИВТ РАН)

Одним из самых выдающихся достижений физики второй половины XX века, которое привело к революционным изменениям во многих областях науки и техники, явилось создание лазеров. В 1964 г. за разработки в квантовой электронике, приведшие к их созданию, советские учёные Н.Г. Басов и А.М. Прохоров и американский учёный Чарльз Таунс были удостоены Нобелевской премии. Таким образом, чуть более полувека назад зародилась и начала стремительно развиваться лазерная физика. И фемтосекундные лазеры занимают в ней стратегически важную позицию. Приставка “фемто” означает  $10^{-15}$ . Соответственно, 1 фемтосекунда (фс) – это 1 квадриллионная секунды. Иначе говоря, если обычную секунду сократить до фемтосекунды, то время существования всей Вселенной (по современным данным – примерно 13.8 млрд лет) легко уложится в 7.5 минут.

Впервые лазеры, создающие импульсы фемтосекундной длительности, появились в начале 80-х гг. прошлого века. Тогда их создание произвело в науке истинно революционный эффект. Сейчас, спустя три десятилетия, фемтосекундная лазерная физика – совершенно самостоятельное и чрезвычайно перспективное направление. Бурно развивается и фемтосекундная лазерная техника в направлении увеличе-

ния мощности излучения и уменьшения длительности импульса до долей фемтосекунд (аттосекундный<sup>1</sup> диапазон).

## Наше настоящее

Сегодня в составе Фемтосекундного лазерного центра (ФЛЦ) ОИВТ РАН имеется пять фемтосекундных лазерных систем видимого и инфракрасного диапазона спектра излучения с длительностями импульсов от 30 фс, частотой повторения до 10 кГц и выходной мощностью излучения до 10 тераватт, работают различные диагностические комплексы с уникальными методиками измерений. Наш Центр можно условно разбить на три комплекса, или три направления. Первый комплекс состоит из фемтосекундных лазерных систем тераваттного (до 10 ТВт) и субтераваттного уровня мощности импульса излучения. Здесь проводятся экспериментальные исследования взаимодействия сверхсильных полей с веществом, свойств высокотемпературной лазерной плазмы, разработка короткоимпульсных источников терагерцового и рентгеновского спектра излучения. Второй комплекс условно называем технологическим. Здесь проводятся исследования с помощью фемтосекундных лазеров мегаваттной импульсной мощности, такие как, образование горячих электронов в метал-

<sup>1</sup> 1 ас =  $10^{-18}$  с



**М.Б. Агранат**

лах и полупроводниках, неравновесного нагрева спиновой подсистемы в ферромагнетиках, исследование прочностных свойств материалов под действием ударных нагрузок предельно короткой длительности, сверхбыстрые фазовые превращения и многое другое. Отрабатываются прикладные задачи: как с помощью лазера удалять или наносить нанослой вещества, как создавать наноструктуры на поверхности различных материалов. Третий комплекс – биомедицинский. Здесь разрабатывается уникальное оборудование, ведётся работа над многими интересными задачами, для решения которых мы работаем вместе с биологами из Института биологии развития им. Кольцова, Биологического факультета МГУ, НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН, медиками из Онкоцентра, Центром биофотоники при Гарвардском университете США, Центром молекулярной нейробиологии (Гамбург, Германия). Основное направление исследований – клеточная медицина.

### Как всё начиналось

Фемтосекундный центр начал строиться в 2000 году, по инициативе и при активном участии академика В.Е. Фортова. Хотя фемтосекундные лазеры в российских лабораториях уже были, но лазерные системы тераваттной<sup>2</sup> мощности тогда в России отсутствовали, и Владимир Евгеньевич поставил задачу построить тераваттную систему у нас. К сожалению, средств на покупку за рубежом комплектующих изделий, необходимых для создания лазера, подобного зарубежным, не хватало. Тогда мы вместе с российской фирмой “Авеста-Проект” начали строить лазер с активным элементом на основе кристалла хром-форстерита (рабочий кристалл самого лазера). Он был не очень популярен, потому что его трудно выращивать, при этом он не обладает таким коэффициентом усиления как широко распространённый титан-сапфировый кристалл, но в этом случае мы смогли обойтись российскими и белорусскими комплектующими изделиями. Таким образом, **в 2002 г. в России появилась первая отечественная фемтосекундная инфракрасная тераваттная лазерная система, которая до сих пор не имеет аналогов в мире** (Рис. 1, 2).

С помощью этой уникальной установки было проведено много исследований, для которых требовался именно мощный фемтосекундный инфракрасный лазерный импульс. Но самое эффективное и яркое применение хром-форстерит лазерной системы неожиданно для нас обнаружилось совсем недавно. Выяснилось, что только благодаря нашей установке можно получить с помощью преобразования на нелинейном кристал-

<sup>2</sup> 1 тераватт (ТВт) =  $10^{12}$  Вт.



**Рис. 1.**  
**Фемтосекундная**  
**тераваттная лазерная**  
**система на основе**  
**кристалла хром-форстерита.**

ле мощные импульсы субпикосекундной длительности когерентного направленного излучения терагерцового спектрального диапазона. Этому предшествовала своя история.

Для получения рекордного по мощности импульса терагерцового излучения должны быть выполнены два основных условия – наличие нелинейного кристалла определённого типа и размера, и источника инфракрасных фемтосекундных лазерных импульсов тераваттного уровня мощности излучения. Нелинейные кристаллы – это сложные химические органические соединения, которые позволяют преобразовывать фемтосекундные импульсы оптического диапазона спектра излучения в терагерцовые импульсы фемто- и пикосекундной длительности. В настоящее время такие кристаллы в мире выращивают только в Швейцарии (фирма Rainbow Photonics, с которой тесно сотрудничает Paul Scherrer Institute), Японии, Южной Кореи. Разработанные

швейцарцами кристаллы позволяют достичь эффективности преобразования величины в несколько процентов, но лишь при накачке инфракрасными импульсами



**Рис. 2.**  
**Сотрудники Фемтосекундного лазерного**  
**центра к.ф.-м.н. Овчинников А.В. (слева)**  
**и к.ф.-м.н. Ашитков С.И. осуществляют**  
**настройку системы.**

---

тераваттной мощности. Два года назад швейцарские коллеги, узнав про нашу установку, обратились в институт с просьбой протестировать на ней нелинейные органические кристаллы для генерации терагерцового излучения. И для исследований в рамках совместного проекта швейцарцы привезли кристалл довольно больших размеров (20 × 20 мм), собранный в виде мозаики из более мелких. В лабораториях разных стран имелись инфракрасные фемтосекундные лазерные системы, но меньшей мощности. А вот такая тераваттная лазерная система, как упоминалось выше, имела только в нашем центре.

**В результате совместно выполненных исследований в 2014 г. было получено терагерцовое излучение рекордной мощности 5 ГВт, более, чем на порядок превосходящее всё, что было до этого в мире.** По существу, создан мощный фемтосекундный источник терагерцового “лазерного” излучения (лазер в кавычках, так как спектральный диапазон не оптический). Принцип действия полученного источника кратко можно описать следующим образом. Излучение нашей лазерной установки с длиной волны 1250 нм (1.25 мкм), направляется на кристалл, проходит через него и частично (с эффективностью около 3%) преобразуется в излучение с длиной волны порядка 100–200 мкм (в зависимости от преобразователя, типа кристалла). Сейчас мы используем нелинейный кристалл, который позволяет получить излучение в спектральном диапазоне от 0.5 до 2.5 терагерц.

Возникла идея провести исследования возможности управления частотными характеристиками такого источника с целью его применения для решения прикладных задач. Одна из таких задач – создание сверхбыстрого модулятора света

для управления лазерными импульсами, что позволит улучшить характеристики лазерного излучения настоящих и будущих лазерных систем. Модуляция света – это изменение параметров (амплитуды или интенсивности, частоты, фазы, поляризации, направления распространения и пространственного распределения) световой волны или светового потока в зависимости от управляющего (модулирующего) сигнала. С помощью модуляции производят наложение информации на световую волну или световой поток, осуществляющие её перенос. Терагерцовые импульсы, получаемые в сверхбыстрых оптических модуляторах (кристаллах специального состава), имеют более высокие, по сравнению с обычными лазерами, напряжённости электрического поля и могут стать мощным инструментом для управления сверхбыстрыми электромагнитными процессами, открывают новые возможности в различных областях науки и техники. В настоящее время по заказу Министерства образования и науки РФ наш центр выполняет проект “Сверхбыстрый модулятор света, управляемый полем мощного перестраиваемого источника терагерцового излучения”. Мы предложили продемонстрировать возможность создания сверхбыстрого оптического модулятора, управляемого терагерцовыми импульсами с высокой напряжённостью электрического поля, с субпикосекундным временным разрешением. Выбирая соответствующие полупроводники, можно осуществлять модуляцию электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от среднего инфракрасного до ультрафиолетового. Существует даже возможность расширить спектральный диапазон применимости такого модулятора в область вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения, что

позволит получить субпикосекундный рентгеновский импульс из синхротронных источников третьего поколения<sup>3</sup>.

С помощью фемтосекундного лазера можно создать и исследовать необычные экстремальные состояния в твёрдом веществе. Например, перегреть кристаллическую решетку до сверхвысоких температур, много выше температур фазовых переходов, при которых кристаллическая структура не может долго существовать. Но её разрушение произойдёт лишь спустя сотни или тысячи фемтосекунд после того, как её нагрели сверхкоротким импульсом. И в этот промежуток времени мы будем иметь дело с очень необычным веществом: уже не кристалл, ещё не плазма, и вообще неизвестно, что это за состояние вещества. С помощью фемтосекундного лазера можно также создавать плазму, и, например, с помощью интерферометрии с фемтосекундным временным разрешением диагностировать свойства плазмы и определять различные её параметры спустя 100, 200, 300 и т.д. фемтосекунд после её образования. Только с помощью такого лазера можем наблюдать, как она разлетается, какие параметры у неё изменились. То есть фемто-

секундный лазер позволяет как моделировать такие экстремальные состояния, так и исследовать их.

Терагерцовые импульсы открывают новые возможности их практического применения в фотонике, биологии, медицине, материаловедении, могут применяться в интересах национальной безопасности, астрофизике, химии, в системах контроля качества на производствах, в мониторинге окружающей среды и экологии, археологии, палеонтологии и других областях народного хозяйства.

Мы начали работы в рамках нового направления – взаимодействия сверхкоротких импульсов мощного когерентного терагерцового излучения с веществом, а именно с ферроиками (тип ферромагнетика) и сегнетоэлектриками. Работы проводятся совместно с сотрудниками Radboud University Nijmegen, Нидерланды, Московского технологического университета (МИРЭА), ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Таврического университета (г. Симферополь). Разработана методика исследований динамики сверхбыстрого изменения электрической и магнитной поляризации среды с целью рекордно быстрого переключения электрической и магнитной поляризации сред для сверхбыстрой записи информации. Впервые в ферромагнетике FeO<sub>3</sub> наблюдался эффект генерации фемтосекундного импульса второй гармоники лазера оптического диапазона, инициируемый сверхкоротким терагерцовым импульсом.

Это – будущее сверхбыстрых переключателей и сверхбыстрой записи информации. Дело в том, что воздействие терагерцового импульса создает очень высокое поле – с напряжённостью до 100 МВ/см, которое может быстро “переключать” свойства материала. Под его воздействием ферромагнетик превращается в антиферромагнетик. В буду-

<sup>3</sup> Синхротронное (магнитотормозное) излучение – это излучение электромагнитных волн заряженными частицами, движущимися по искривлённой траектории с релятивистскими скоростями в однородном магнитном поле. Название “синхротронное излучение” (СИ) связано с его источником – кольцевым ускорителем электронов (синхротроном), в котором электроны движутся по окружности в магнитном поле. Круговое движение приводит к тому, что электрон испытывает центростремительное ускорение, за счет чего и возникает СИ, которое можно получать в инфракрасном и видимом диапазонах, а можно в рентгеновском. Это зависит от энергии электронов и величины магнитного поля. Третье поколение синхротронных источников – это специально создаваемые устройства для генерации СИ с целью его изучения (прим. ред.)

---

щем – это запись информации на порядок быстрее того, что мы имеем сегодня.

Важным преимуществом направленного когерентного терагерцового излучения является возможность дистанционной диагностики, например, для сканирования багажа и людей в аэропортах, контролировать небольшое изменение концентрации опасных примесей в различных объектах и т.п.

В биологии и медицине терагерцовое излучение может быть использовано в томографии поверхностных слоев биологических тканей, в диагностике и лечении злокачественных образований. И мы работаем в этом направлении.

С помощью терагерцового излучения можно получать снимки поверхностей и объектов, скрытых под штукатуркой или краской. Это даст возможность бесконтактным способом исследовать объекты археологии, предметы искусства и живописи или использовать на тех же АЭС для определения скрытых дефектов. На производстве, например, в фарминдустрии, терагерцовое излучение может найти применение в выходном контроле качества выпускаемой продукции.

Сегодня рассматривается возможность применения терагерцовых импульсов в разработке новых высокоскоростных систем связи и локации. Ведутся разработки в области терагерцового имиджинга<sup>4</sup>, эллипсометрии<sup>5</sup>, голографии. Создаваемый импульсный источ-

ник мощного терагерцового излучения открывает новое направление силового воздействия терагерцового излучения с металлами, полупроводниками, диэлектриками, с различными конструкционными материалами. Это очень интересное направление, в котором мы планируем работать в дальнейшем.

### **Биомедицинские исследования**

Основное направление работ биокомплекса – применение фемто- и наносекундных лазерных диссекторов (скальпелей) и лазерных пинцетов в микрохирургии двумерных (в частности, клеток в монослое) и трёхмерных объектов (клеточных сфероидов, эмбрионов млекопитающих), а также в диагностике различных заболеваний на клеточном и молекулярном уровнях. Разработан и изготовлен лабораторный действующий образец программно-аппаратного комплекса “фемтосекундный лазерный пинцет – скальпель” с возможностью автоматизированного выполнения исследований и разработки технологий для медицины и биомедицины.

Идея создать лазерную фемтосекундную установку пинцет-скальпель возникла после того, как в нашей лаборатории появился пинцет-скальпель с использованием наносекундного лазера PALM CombiSystem, разработанный немецкой фирмой Carl Zeiss, используемый для работы с неживыми объектами. Мы решили собрать её улучшенный аналог, используя источник фемтосекундного лазерного излучения, который позволяет работать с материалом, проще говоря, более нежно, в том числе – и с биологическими объектами. Одно дело, когда вы греете вещество с линейными размерами 10 мкм наносекундными импульсами,

<sup>4</sup> *Imaging – визуализация, отображение. Воспроизведение, репродуцирование (напр. экспонирование, печатание), формирование изображений.* <http://polygraphy.academic.ru/10425/Imaging>

<sup>5</sup> *Эллипсометрия – совокупность методов изучения поверхностей жидких и твёрдых тел по состоянию поляризации светового пучка, отражённого этой поверхностью и преломлённого на ней.* <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эллипсометрия> (прим. ред.)



тепло за это время распространится далеко от зоны воздействия и, к примеру, маленькую дырочку сделать не получится. А фемтосекунда – вполне короткое время, тепло не успеет распространиться. Грубо говоря, фемтосекундный лазер на три порядка острее, чем лазер наносекундный. Поэтому, для клеточной медицины фемтосекундный лазер подходит значительно лучше, особенно для трансфекции – когда в клетке делается отверстие, и в него вводятся либо генетический материал, либо лекарства. Кроме того, мы создали компьютерный программный комплекс, который позволяет управлять установкой и выполнять автоматизированные микрохирургические процедуры в бесконтактном режиме.

Лазерный пинцет был разработан ещё во второй половине 1970-х гг. Принцип действия заключается в следующем. Луч лазера фокусируется в пятнышко с неравномерным распределением интенсивности диаметром в десяток микрон. При попадании в это пятно диэлектрической частицы, последняя уже не может из него выйти, ибо как только частица сдвигается, благодаря неравномерности распределения

интенсивности по пятну, при передаче импульсов фотонов возникает, так называемая, градиентная сила, которая возвращает её обратно.

Созданная нами комбинированная система позволяет выполнять прецизионные микрохирургические и микроманипуляционные процедуры с биообъектами. С помощью данной системы мы, совместно с сотрудниками биологического факультета МГУ, проводим бесконтактную биопсию эмбрионов на различных сроках преимплантационного развития<sup>6</sup>. В частности, лазерным скальпелем делаем в оболочке эмбриона отверстие размером 5–20 мкм, и оптическим пинцетом, без каких-либо механических инструментов, извлекаем полярное тельце. Оно не очень нужно в дальнейшем для развития эмбриона, но позволяет провести диагностику возможных генетических заболеваний. Кроме того, помимо биопсии полярного тельца, аналогичную процедуру мы выполняли на более поздних сроках преимплантационного развития –

<sup>6</sup> Преимплантационная генетическая диагностика (ПГД) – диагностика генетических заболеваний у эмбриона.



**Рис. 3.**  
**К.ф.-м.н. И.В. Ильина**  
**проводит исследования**  
**с использованием лазерного**  
**пинцета-скальпеля.**



**Рис. 4.**  
**На вручении премии**  
**Правительства Москвы молодым**  
**учёным за 2015 г. сотрудникам ФЛЦ**  
**И.В. Ильиной и Д.С. Ситникову за**  
**разработку комбинированной системы**  
**“Фемтосекундный лазерный скальпель-**  
**оптический пинцет” для микрохирургии**  
**и микроманипулирования**  
**в задачах репродуктивной**  
**и регенеративной медицины.**

осуществляли бесконтактную биопсию клеток трофэктодермы<sup>7</sup> эмбриона.

Вместе с сотрудниками НИИ нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко отработывалась методика слияния нейронов. Пинцетами два нейрона приводились в контакт друг с другом, и фемтосекундным лазером в области контакта делали аккуратную маленькую дырочку (от большой нейроны погибают), иницируя процесс слияния нейронов. Такие опыты у нас прошли успешно, правда только *in vitro*, на стекле под микроскопом (Рис. 3, 4). Для того чтобы проделать то же на живом объекте, нужен фемтосекундный лазерный эндоскоп.

Лазеры сейчас очень широко применяются в хирургии, в онкологии. И здесь

<sup>7</sup> Трофэктодерма – ткань, лежащая в основе плаценты. Троф (от греч. *τροφή* – питание), эктодерма – наружный зародышевый листок эмбриона на ранних стадиях развития (от др.-греч. *ἔκτος* – наружный + *δέρμα* – кожа).

у фемтосекундных лазеров тоже большое будущее.

В настоящее время мы совместно с НИИ общей патологии и патофизиологии РАМН разрабатываем технологию лазерной микрохирургии клеточных сфероидов (послойная диссекция заданной области 3D клеточной культуры) для моделирования повреждающего воздействия и исследования механизмов репарации сфероидов в задачах тканевой инженерии, регенеративной медицины.

Совместно с Московским НИИ Психиатрии начались работы по разработке методов ранней диагностики психиатрических заболеваний (в частности, шизофрении) по динамике в пикосекундном временном диапазоне отклика молекулы альбумина в крови на воздействие фемтосекундных лазерных импульсов.

Совместно с Центром молекулярной нейробиологии (Гамбург, Германия) начинаются работы по исследованию транспортных процессов в нейронах.

Фемто и нано, как мы всегда говорим, близнецы-братья: фемтоимпульс по времени позволяет оперировать наноразмерами. Получаются резкие границы, что важно не только в биологии. Например, фемтосекундные лазеры позволяют, скажем, балансировать лазерные гироскопы, где нужны чрезвычайно тонкие настройки. Мы это уже делали: снимали слой толщиной 10 нм и диаметром 1–2 мкм. Никакой другой лазер с такой задачей справиться не сможет. Было и такое, что приехали к нам представители одной южнокорейской фирмы, привезли дисплей с трёхслойным покрытием. Нужно было снять один слой так, чтобы совершенно не повредился следующий. И эту работу мы сделали.

Всё вышеперечисленное требует выполнения большой исследовательской работы и, следовательно, времени



и средств. Пока наш терагерцовый “лазер” единственный в мире. Но прогресс не стоит на месте, скоро аналогичные устройства появятся и за рубежом. Чтобы удержать первенство, нужно интенсивно работать. Да, пока

только у нас можно получить рекордные по мощности излучения когерентные терагерцовые импульсы, но не растерять бы первенства при остаточном принципе субсидирования фундаментальных исследований.

Если Вас интересуют проблемы энергетики, экономики и экологии: энергетическая политика и безопасность стран и регионов, нефте- и газодобыча, энергопроизводство и его экологические последствия, энергосберегающие технологии, прошлое, настоящее и будущее атомной энергетики, перспективы развития местных возобновляемых гелио-, ветро- и гидроресурсов, доступно и точно изложенные ведущими отечественными и зарубежными специалистами, а также разнообразные социальные проблемы, связанные с развитием топливно-энергетического комплекса, и многое другое (вопросы образования, здоровья, управления, природопользования и т.д.), Вам, несомненно, нужен ежемесячный иллюстрированный журнал Президиума Российской академии наук:

### **“ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ”**

Наш девиз – доступность и достоверность.

Именно поэтому журнал “Энергия”

называют в числе самых авторитетных источников точной информации по проблемам экономики, экологии, энергетики.

Формат журнала удобен для:

- проведения дискуссий и рассмотрения различных точек зрения по актуальным проблемам развития энергетики и смежным научно-техническим направлениям;
- рассмотрения новых и малоизученных методов получения и преобразования видов энергии, с выявлением их перспектив для практического применения.

Будут приветствоваться также публикации обзорных статей:

- о деятельности различных отделений РАН;
- о наиболее важных результатах фундаментальных научных исследований и прикладных разработок, полученных в ведущих отечественных институтах и университетах.

В дополнение к специальным материалам в каждом номере “Энергии”

Вы найдете материалы, посвященные гуманитарным проблемам современного мира.

В розничную продажу журнал не поступает. Подписной индекс – 71095.

Желающие могут оформить льготную подписку в редакции. Тел.: 8(495)362-07-82.