

ПОЛУВЕКОВОЙ ЮБИЛЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ: СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

А.Паткин, rathkeen@bk.ru

В середине декабря 2010 года в Москве прошло Общее собрание Российской академии наук (РАН) по теме «Лазеры: 50 лет в науке, технологиях и медицине». На заседании рассмотрены достижения современных лазерных технологий, использование мощных лазерных систем, в том числе для фундаментальных приложений, например для создания экстремальных световых полей, проблемы оптической связи, перспективы развития отрасли.

Президент РАН академик Ю.С.Осипов, открывая заседание, отметил неопценимый вклад в развитии мировой лазерной промышленности академика А.М. Прохорова и Н.Г. Басова, и Ч.Х. Таунса, удостоенных в 1964 году звания лауреатов Нобелевской премии. Выступление нобелевского лауреата, вице-президента РАН, академика Ж.И. Алферова касалось вопросов совершенствования нанотехнологий и полупроводниковой лазерной техники.

Доклад члена-корреспондента РАН С.Г. Гаранина и академика О.Н. Крохина затрагивал

проблематику термоядерного синтеза и использования мощных лазерных систем. При изучении поведения горячей плотной плазмы рассмотрены процессы переноса генерируемого в бокс-конверторе по цилиндрическим каналам из разных материалов рентгеновского излучения. Серия экспериментов по анализу асимметричного влияния на динамику работы термоядерных мишеней и генерацию нейтронов, проведенная впервые в мире, позволила скоррелировать экспериментальные данные с результатами математического моделирования. Согласно расчетам, полученным при экспериментировании с мишенями непрямого сжатия, поле излучения в боксе имеет эффективную температуру 170 эВ и высокую (~ 3%) степень однородности. Зарегистрировано объемное сжатие ~ $2 \cdot 10^3$, скорость полета оболочки ~ $3 \cdot 10^7$, нейтронный выход ~ $2 \cdot 10^9$ и температура DT-плазмы ~ 3 кэВ. Эксперименты с высокой симметрией облучения DT-капсулы были проведены благодаря особой конструкции мишени непрямого облучения.

При изучении влияния на динамику работы мишени асимметрии поля рентгеновского излучения было доказано, что усовершенствованные методы численного моделирования

и развитые физические модели удовлетворительно описывают процессы, рассматриваемые в сложных неоднородных газодинамических течениях. В рамках программы экспериментов на установке «Искра-5» была продемонстрирована возможность совершенствования методов численного моделирования, развития физических моделей излучаемых явлений и сопоставления расчетных и экспериментальных данных. Для одномерных газодинамических расчетов сжатия мишеней прямого облучения было показано, что полимерная криогенная мишень зажигается при воздействии лазерным импульсом с коэффициентом усиления $G=10$, при энергии $EL=500$ кДж на длине волны 0,35 мкм. При оценке влияния на горение термоядерной мишени (двумерные расчеты) крупномасштабной неоднородности (КН) показано, что КН облучения на уровне 3–5% способствует срыву горения, а порог зажигания дополнительно повышают мелкомасштабные неоднородности. Также был представлен модуль установки «Искра-6»: 4-канальный 4-проходный лазер на неодимовом фосфатном стекле (установка «Луч») с размером одного лазерного пучка 20×20 см², длительностью лазерного импульса 4 нс и энергией в одном лазерном



Рис.1. Президент РАН академик Ю.С.Осипов

пучке 3,3 кДж на длине волны 1054 нм. При создании установки по проекту осуществлялось научное сотрудничество академических институтов (ИОФ РАН, ФИАН и ИПФ РАН), предприятий Минпром РФ (ЛЗОС, НИКИ ОЭП и ГОИ) и организаций ГК «Росатом» (ВНИИА, ТРИНИТИ, НИИЭФА и РФЯЦ-ВНИИЭФ). На установке «Луч» отрабатываются основные проектные решения для приборов и оборудования следующего поколения. При реализации проекта по созданию установки «УФЛ-2М» создан новый алгоритм системы наведения, разработаны активные лазерные элементы из отечественного стекла с требуемой апертурой и лучевой прочностью, выполнено облучение мишени на второй гармонике неодимового лазера и сконструирована смешанная диодно-ламповая система накачки лазерных элементов. Развитием технологий нового поколения является концептуальный проект ЛАГИР, предполагающий появление ядерно-термоя-

дерного гибридного реактора с лазерным термоядерным источником нейтронов, что позволит не только обеспечить развитие конкурентоспособной энергетики XXI века и решение проблем ядерных отходов, но и развитие ядерно-безопасной энергетики с вовлечением природного урана в топливный цикл. Таким образом, среди основных направлений работ РФЯЦ-ВНИИЭФ по физике мощных лазеров можно отметить проектирование лазеров с диодной накачкой, повышение силы света методами адаптивной и нелинейной оптики, совершенствование химических лазеров (йодно-кислородных и импульсно-периодических), взрывных фотодиссоционных йодных лазеров и лазеров с ядерной накачкой.

Фундаментальные приложения для экстремальных световых полей рассматривались в выступлении члена-корреспондента РАН А.М. Сергеева. В частности, был представлен совместный проект ИСЭ СО РАН и ФИАН по строительству 100-

ТВт установки ТНЛ-100, по мнению докладчика, являющийся “ренессансом” технологий проектирования эксимерных усилителей фемтосекундных импульсов. В состав оборудования входит фотохимический XeF(C-A)-усилитель с 6-сторонней накачкой ВУФ-излучением электронно-пучкового конвертера и Ti:Sa стартовый комплекс. Другой проект – мультитераваттный лазерный комплекс «Прогресс-П» на Nd:glass с применением метода chirпованных импульсов (НИИКИ, Сосновый Бор, 1997 г.), после которого в ВНИИТФ и ЦНИИМаш были построены аналогичные комплексы с мощностью порядка 10 ТВт. Работающий по схожей схеме петаваттный лазер был запущен в 1997 г. в Ливерморской национальной лаборатории. Также в 1997 году был построен первый в РФ тераваттный титан-сапфировый лазерный комплекс (ИПФ РАН).

В настоящее время несколько систем данного класса работают в ИЛФ СО РАН, ОИВТ



Рис.2. Вице-президент РАН, академик Ж.И. Алферов

РАН и других академических институтах. Например, в ИЛФ СО РАН с 2005 году начал работу Ti:Sa лазерный комплекс (10 Гц, 800 нм, 3ТВт, 45 фс), а в ОИВТ РАН в 2003 году “запущена” уникальная фемтосекундная тераваттная лазерная система ИК-диапазона частот на кристаллах “хром-форстерит” (10 Гц, 1240 нм, 2 ТВт, 80 фс). Лазерный комплекс PEARL (PEtawatt pARametric Laser) петаваттного уровня мощности создан в ИПФ РАН в 2006 году под руководством члена-корреспондента РАН Е.А. Хазанова

Лазерам и волоконной оптике был посвящен доклад академика Дианова Е.М. (Научный центр волоконной оптики РАН). Среди проблем передачи информации посредством оптической связи на большие расстояния отмечалось не только затухание оптического сигнала (например, потери порядка 1000 дБ/км), но и недостаточная степень проницаемости свободной атмосферы для оптической связи на значительные расстояния. Снижение оптических потерь в волоконных световодах стало возможным благодаря применению инновационных технологий: если в 1970 году они составляли 20 дБ/км (компания «Корнинг Гласс», США), то уже в 1980 году – 0,16 дБ/км (ослабление сигнала на длине 18 км в 2 раза). Помимо телекоммуникационных волоконных световодов широко известны специальные волоконные световоды: фотонно-кристаллические

(микроструктурированные), со специальными покрытиями, нелинейные, поддерживающие поляризацию излучения на больших длинах, волоконные световоды для среднего ИК-диапазона, фоточувствительные, световоды для компенсации дисперсии и активные. Инициировал научные исследования по волоконной оптике академик А.М. Прохоров, а основателем направления изучения “высокочистых” веществ стал академик Г.Г. Девятых Уже в 1973 году в ИХАН и ФИАН начались работы по созданию технологии волоконных световодов с низкими потерями (ВСНП), и первые ВСНП (7 дБ/км на длине волны 0,8 мкм) были получены в 1975 году. Через 2 года совместно с МЭП была построена первая экспериментальная волоконно-оптическая система связи, а в 1978 году в ИХАН, ФТИАН и ФИАН была создана волоконно-оптическая линия передачи сигналов для систем дальней связи на волне 1,3 мкм. Результатами развития волоконно-оптической индустрии в РФ стало создание висмутовых волоконных световодов и волоконных лазеров, рамановских волоконных усилителей и лазеров, изучение взаимодействия и распространения солитонов, конструирование прочных светодиодов

(герметичных покрытий). Также среди научных достижений можно отметить детонационно-подобный режим распространения оптического разряда в волоконных светодиодах, семейство высоколинейных волоконных световодов и генерацию второй гармоники с созданием соответствующей модели явления. Таким образом, скорость передачи коммерческих систем связи в 1980 году составляла 40 Мбит/с, а в 2010 году достигла 1–10 Тбит/с (для сравнения: в экспериментальных системах – до 70 Тбит/с) по одному световоду. Согласно оценкам экспертов, в 2015 году число пользователей Интернета достигнет 5 млрд. чел., а общая протяженность сетей волоконных световодов составит 2 млрд. км (сейчас – 1 млрд. км). Среди новых подходов к увеличению к 2030 году скорости передачи информации до уровня 1 петабит/с (10^{15} бит/с) можно отметить многомодовые волоконные световоды (MMF) с уплотнением каналов, многосердцевидные волоконные световоды (MCF) и многоуровневые модуляции оптического излучения (MLM).

Иновациями в лазерной технике и физике является применение волоконных лазеров в аэрокосмической, судостроительной и автомобильной отраслях. Их преимущества – малый вес и небольшие размеры, высокое качество пучка и высокая степень эффективности (свыше 30% от розетки) с мощностью непрерывной генерации до 50 кВт при удобной и надежной эксплуатации: например, эффективный отток тепла реализован через боковую поверхность. Инвестиционно-привлекательно производство фемтосекундных волоконных лазеров, применяемых в

товодов и генерацию второй гармоники с созданием соответствующей модели явления.

Таким образом, скорость передачи коммерческих систем связи в 1980 году составляла 40 Мбит/с, а в 2010 году достигла 1–10 Тбит/с (для сравнения: в экспериментальных системах – до 70 Тбит/с) по одному световоду. Согласно оценкам экспертов, в 2015 году число пользователей Интернета достигнет 5 млрд. чел., а общая протяженность сетей волоконных световодов составит 2 млрд. км (сейчас – 1 млрд. км). Среди новых подходов к увеличению к 2030 году скорости передачи информации до уровня 1 петабит/с (10^{15} бит/с) можно отметить многомодовые волоконные световоды (MMF) с уплотнением каналов, многосердцевидные волоконные световоды (MCF) и многоуровневые модуляции оптического излучения (MLM).

Иновациями в лазерной технике и физике является применение волоконных лазеров в аэрокосмической, судостроительной и автомобильной отраслях. Их преимущества – малый вес и небольшие размеры, высокое качество пучка и высокая степень эффективности (свыше 30% от розетки) с мощностью непрерывной генерации до 50 кВт при удобной и надежной эксплуатации: например, эффективный отток тепла реализован через боковую поверхность. Инвестиционно-привлекательно производство фемтосекундных волоконных лазеров, применяемых в



Рис.3. Член-корреспондент РАН А.М. Сергеев

биологии и медицине, компактных и прецизионных оптических часах, в астрофизике для определения скорости расширения Вселенной с точностью 1 см/с и поиска экзопланет, а также для создания нано- и микроструктур и прецизионной обработки различных материалов.

Достижения и перспективы развития технологий конструирования лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) освещались в докладе д.ф.-м.н. Н.А. Винокурова, подготовленного в соавторстве с академиком Г.Н. Кулипановым и академиком А.Н. Скринским из Института ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера СО РАН. Поскольку ЛСЭ обеспечивают монохроматическое излучение на любой заданной длине волны – от 0,1 нм до 1 мм с плавной ее перестройкой, средняя излучаемая мощность может быть порядка 100 кВт (применяется явление вынужденного ондуляторного излучения, вызванное синхронизацией отдельных излучателей. Как и в лампах бегущей волны, это является продольной группировкой электронов. Поскольку скорость электрона в ондуляторе имеет поперечную компоненту, энергия электрона меняется. Суммарное изменение энергии во всем ондуляторе может быть значительным в случае, если за время прохождения электроном одного периода ондулятора он отстаёт от волны ровно на длину волны.

По длине волн излучения ЛСЭ перекрывают 7 порядков (0,1 нм – 1 мм). Среди достигнутых результатов по созданию ЛСЭ субмиллиметрового диапазона можно отметить работы ИЯФ СО РАН (РФ), UCSB (США), CLEO (Франция), FELIX (Нидерланды) и KAERI (Ю. Корея). В ФРГ (FLASH) и США (LCLS) есть рентгеновские ЛСЭ, в Южной Корее, Великобритании, ФРГ, КНР, Италии и Японии новые рентгеновские ЛСЭ строятся. Например, для генерации фотонов с энергией до 100 МэВ при длине волны 10^{-14} м применяется ЛСЭ университета Дюка (США).

В ходе работ по совершенствованию конструкции ЛСЭ были реализованы оптические клистроны и ондуляторы на посто-

янных магнитах с изменяемым зазором, а также гибридные ондуляторы на постоянных магнитах. Были экспериментально изучены результаты вынужденного и спонтанного излучения оптического клистрона с созданием теории ЛСЭ на электронном накопителе. Разработан проект ЛСЭ на ускорителе-рекуператоре с применением рекуперации энергии использованного в ЛСЭ электронного пучка. Для ЛСЭ УФ- и видимого диапазонов были опробованы внутриврезонансные эталоны Фабри-Перо с конфокальным резонатором и достигнуто значение рекордно короткой длины волн для ЛСЭ в 0,24 мкм, что предусматривало оригинальную конструкцию обмотки электромагнитного ондулятора. Выходная мощность свыше 10 кВт была достигнута при “электронном” выводе излучения из оптического резонатора ЛСЭ. Применение длинного ондулятора позволило провести серию экспериментов по исследованию влияния на движение одного электрона в накопителе квантовых флуктуаций синхротронного излучения.

В ИЯФ СО РАН функционируют 2 мощных ЛСЭ дальнего ИК- и терагерцового диапазонов для Сибирского центра фотохимических исследований. Третий ЛСЭ спроектирован, и проводятся работы по его строительству. Согласно проекту, в основу положена модель 4-дорожечного ускорителя-рекуператора с максимальной энергией 40 МэВ. Для трех лазеров, установленных на 1, 2 и 4 дорожках полномасштабного ЛСЭ, полный диапазон перестройки длин волн излучения составит 5–250 мкм, что позволит научным учреждениям и организациям РФ проводить уникальные исследования.

Для мощных ЛСЭ применения рекуперации энергии отработанного электронного пучка, что обусловлено низким электронным КПД ЛСЭ (поряд-



Рис. 4. Член Президиума РАН академик Е.М.Дианов

ка 1%). Но рекуперация позволит увеличить значение среднего тока электронного пучка и сократить радиационную безопасность установки. Функциональная схема функционирующего с 2003 года субмиллиметрового терагерцового ЛСЭ такова: ускорение в ВЧ-резонаторах до энергии 11 МэВ инжекторных электронов с энергией 2 МэВ приводит к их замедлению в ВЧ-резонаторах с предварительной передачей части энергии в ЛСЭ (энергия возвращается в резонаторы) и отводом в поглотитель электронов с низкой энергией в 2 МэВ.

Новосибирский ЛСЭ – уникальный источник когерентного электромагнитного излучения, и по своей средней мощности в 0,5 кВт он существенно превосходит зарубежные аналоги в своих диапазонах волн (110–24 и 40–80 мкм). Применение уникальной конструкции ускорителя-рекуператора электронов с энергией до 40 МэВ и средним током пучка 30 мА обуславливает рекордно высокую мощность ЛСЭ. Значительно расширился спектр мультидисциплинарных исследований после запуска второй очереди новосибирского ЛСЭ. С применением уникального лазерного оборудования в Сибирском центре фотохимических исследований СО РАН проводятся совместные работы по научным проектам и программам. Например, в ходе испытаний оборудования для абляции оргстекла несфокусированным излучением новосибирского ЛСЭ были получены уникальные данные: за 3 мину-

ты в оргстекле толщиной 5 см отверстие просверливается несфокусированным лазерным пучком без признаков горения материала. Поскольку изучение механизма абляции становится возможным в ранее недостижимых условиях, благодаря высокой частоте повторения эксперимента технология и оборудование имеют потенциал для совершенствования с целью дальнейшей коммерциализации. В частности, возможно производство наноматериалов и наблюдение за труднодоступными процессами: например, непрерывный оптический разряд в аргоне и воздухе атмосферного давления был получен при фокусировке параболическим зеркалом излучения непосредственно после выходного зеркала. Также с помощью тепловизора, разработанного ИФП РАН, допустима визуализация субмиллиметрового излучения. Другой пример: многократно наблюдаемый в Институте химической кинетики и горения (ИХКГ) СО РАН и Институте цитологии и генетики СО РАН процесс абляции биологи-

ческих макромолекул, которые могут испаряться с поверхности твердого образца без разрушения при низкой (менее 0,01 эВ) энергии фотонов субмиллиметрового излучения. Допустимо введение определения "ультрамягкая лазерная абляция ДНК". В этом случае спектр размеров содержит всего один пик, а соответствующие фрагментам начальных молекул пики наблюдаются при больших мощностях. Еще одно применение технологии – молекулярная спектроскопия с использованием излучения ЛСЭ. В ИХКГ СО РАН проведены успешные эксперименты по обнаружению в водородном пламени радикалов ОН по эффекту Фарадея.

ВЫВОДЫ

1. Современные лазерные технологии являются неотъемлемой частью современного мира. Для перехода к постиндустриальному этапу развития общества и новому технологическому укладу необходим качественный рост в восприятии

проблем отраслевого развития на государственном уровне. Стратегия развития отрасли предполагает целенаправленное финансирование работ по линии госбюджета и внешних и внутренних заимствований и под гарантии возврата кредитов.

2. В рамках программы научной кооперации академических институтов, в частности, разработан новый алгоритм построения системы юстировки, который в два раза снижает число дорогостоящих элементов при сокращении времени юстировки и повышении точности. Также создан диагностический комплекс для анализа параметров лазерного излучения, продуктов термоядерных реакций и измерения характеристик плазмы.

3. Необходимым условием развития современного информационного общества является совершенствование технологий конструирования волоконно-оптических систем связи и передачи информации со скоростями в терабитном-петабитном диапа-