УДК 53.083.91+53.082.54;621.373.8;533.9…15

О разработке и создании фемтосекундного лазерного модуля кластера «Фемтолаб МГТУ»

© Е.Ю. Локтионов, А.В. Павлов, Н.А. Пасечников, Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов, В.Д. Телех

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Россия

Сообщается о создании в учебно-научном центре «Фотонная энергетика» фемтосекундного лазерного модуля кластера «Фемтолаб МГТУ». Назначение модуля — экспериментальные исследования многофакторных оптических, теплофизических, газодинамических, переносных процессов и характеристик активных сред фотонных энергетических установок и их конструкционных материалов в газовакуумных условиях при воздействии на конденсированные, газовые, плазменные среды интенсивного лазерного излучения ультракороткой длительности в широком диапазоне изменения спектрально-энергетических и динамических параметров воздействия.

Ключевые слова: *фемтосекундный лазер, лазерно-индуцированные процессы, взаимодействие излучения с веществом, ультракороткие импульсы лазерного излучения, лазерная плазма, импульсы фемтосекундной длительности, диагностические методы.*

О генерации ультракоротких импульсов лазерного излучения. С момента создания первых лазеров одной из важнейших задач квантовой электроники было и остается увеличение пиковой мощности лазерного излучения. Само понятие «высокая пиковая мощность» постоянно меняется, и сегодня речь идет о мощности ~1 ПВт (10^{15} Вт) [1]. Ключевой вехой, позволившей достичь такой мощности, стало изобретение в 1985 г. принципа усиления чирпированных (растянутых во времени частотно-модулированных) импульсов (CPA — chirped pulse amplification), заключающегося в том, что перед усилением фемтосекундный лазерный импульс растягивается до длительности порядка 1 нс, что уменьшает его мощность и позволяет усилить его до большой энергии без самофокусировки и пробоя, а затем сжимается до исходной длительности с помощью дифракционных решеток, имеющих высокий порог пробоя, так как свет только отражается от них, а не проходит внутрь. Принцип CPA так или иначе используется в большинстве лазеров мощностью 1 ТВт и более. В последнее время дополнительно стали применять оптическое параметрическое усиление (OPCPA — optical parametrical chirped pulsed amplification) с использованием нелинейных кристаллов (BBO, KDP, DKDP) [2] и обратное рамановское рассеяние [3].

Ни один из существующих на данный момент методов компрессии не может быть использован в одиночку для усиления и сжатия импульсов с энергией свыше 10 кДж (преимущественно из-за необходимости изготовления слишком больших оптических элементов,

способных противостоять тепловым нагрузкам). Для высокоэнергетичных импульсов требуется комплексный подход, например компрессия с каскадным преобразованием (C^3) [4]. В настоящее время достигнуты длительности импульсов менее $3 \cdot 10^{-17}$ с [5].

Решение проблемы генерации лазерного излучения в виде импульсов предельно малой длительности открывает пути создания лазеров, обладающих предельно высокой интенсивностью излучения (рис. 1). С помощью таких лазеров можно получить концентрацию энергии, сравнимую с концентрацией энергии при ядерном взрыве. Другим обстоятельством, мотивирующим развитие лазеров ультракоротких импульсов, является необходимость измерения предельно коротких интервалов времени, что позволяет исследовать различные быстропротекающие процессы [6].

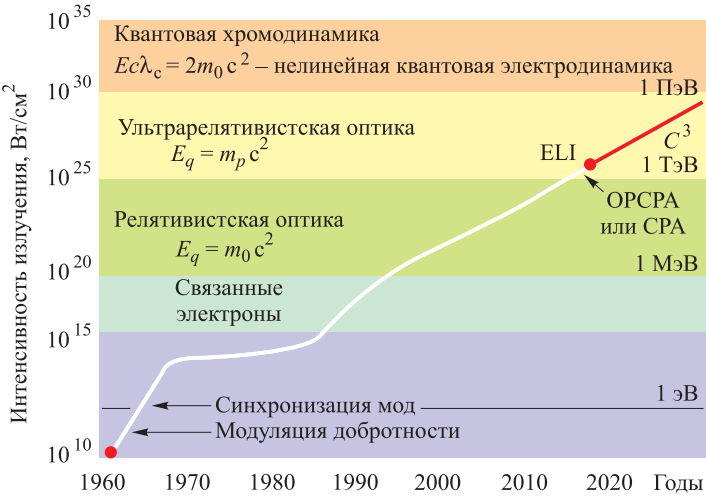


Рис. 1. Динамика достигнутых плотностей мощности лазерного излучения в зависимости от развития технологий временной компрессии импульсов [4]

О взаимодействии сверхинтенсивных импульсов лазерного излучения с веществом. При взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с веществом на поверхности мишени образуется плазма, распределение электронов по скоростям в которой носит существенно немаксвелловский характер: помимо тепловых электронов, возникающих за счет классических столкновительных механизмов, образуются «горячие» электроны. Именно с их появлением связаны такие важные эффекты, как генерация плазмой жесткого рентгеновского излучения с высокой спектральной яркостью и малой длительностью импульса, ускорение протонов и многозарядных ионов до больших энергий, ядерные реакции в плазме и др. [7] (рис. 2). В последние десятилетия в связи с развитием лазерной техники перспективные лазерно-плазменные методы ускорения заряженных частиц привлекают к себе все больший интерес [8–10]. Оценки показывают, что в кильватерной волне, генериру-

емой достаточно мощным релятивистским лазерным импульсом, становится принципиально возможным ускорение электронов до энергий порядка 10 ГэВ на одном ускоряющем каскаде.

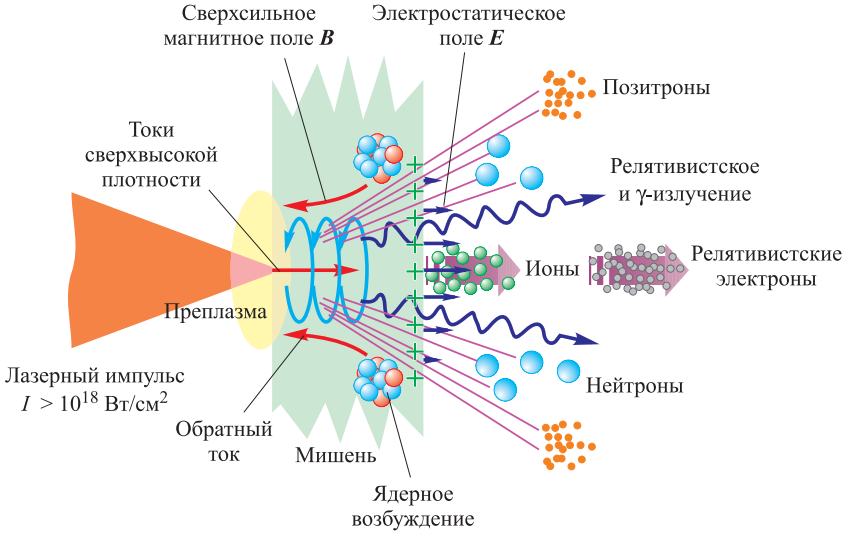


Рис. 2. Схема процесса взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с плазмой [10]

При интенсивностях излучения в диапазоне $10^{17}…10^{21}$ Вт/см^2 в лазерном импульсе создаются недоступные ранее сверхсильные электрические поля, существенно превосходящие атомное электрическое поле $E_а = 5{,}14 \cdot 10^9$ В/см (рис. 3). В этих условиях возникает новая физическая картина взаимодействия лазерного излучения с плазмой, образующейся на переднем фронте лазерного импульса или от предымпульсов, при воздействии на поверхность твердотельной мишени [7]. Лазерное излучение достаточно эффективно трансформируется в потоки быстрых заряженных частиц — электронов и атомарных ионов, взаимодействие которых с окружающим веществом мишени приводит к генерации жесткого рентгеновского излучения при ионизации внутренних оболочек атома, к различным ядерным и фотоядерным реакциям. Такая лазерная плазма является источником ионов, обладающих высокой кинетической энергией направленного движения [9, 10].

Многозарядные ионы с энергиями вплоть до мегаэлектронвольт регистрировались в нано- и пикосекундной лазерной плазме твердотельных мишеней [11, 12] при плотности мощности нагревающего лазерного излучения $10^{14}…10^{16}$ Вт/см^2. Наиболее перспективным сейчас представляется использование фемтосекундных лазерных импульсов в сочетании с кластерными мишенями [13], обеспечивающими более эффективное поглощение энергии лазерного импульса по сравнению со сплошными мишенями, что позволяет значительно понизить требования к параметрам лазерных установок, используемых для генерации быстрых ионов.

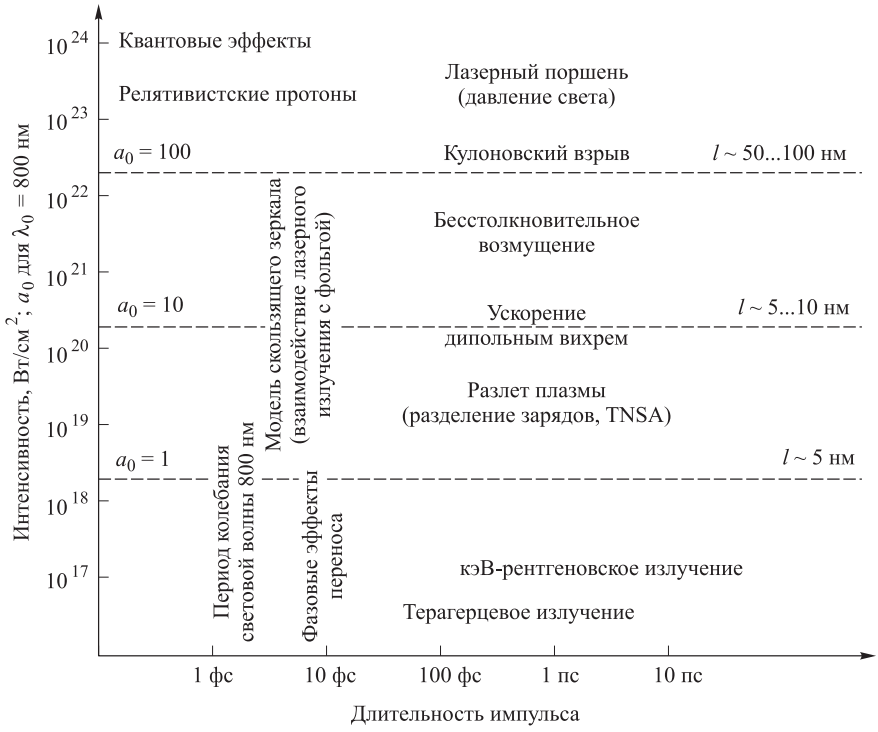


Рис. 3. Возможные режимы и области применения сверхинтенсивных лазерных импульсов [10]

Электромагнитные поля лазерного импульса осциллируют во времени, их векторы ориентированы поперек направления распространения, поэтому непосредственное ускорение электронов ими малоэффективно. Продольное электрическое поле может быть велико в случае острой фокусировки излучения, однако фазовая скорость вдоль оси распространения в этом случае больше скорости света. Это приводит к тому, что электроны быстро покидают ускоряющую фазу поля. При оптимальном выборе угла фокусировки максимальная добавка к энергии электрона определяется выражением $\mathrm{d}W$ [МэВ] = $= 31(P\ [\text{ТВт}])^{1/2}$ [14].

В 1979 г. была предложена идея ускорения заряженных частиц волнами электронной плотности [15], распространяющимися в плазме низкой плотности в кильватерной (ленгмюровской) волне, возникающей вследствие пондеромоторного воздействия на электроны вдоль направления распространения излучения и бегущей вслед интенсивному ультракороткому импульсу. В таких волнах создается электрическое поле напряженностью ~10^9 В/см, что в тысячи раз превышает порог пробоя на стенках в обычных ускорителях (~1 МВ/см), т. е. возможно значительное уменьшение (до сантиметров) зоны ускорения. В этом поле имеются как фазы ускорения, в которых электроны ускоряются в направлении распространения лазерного импульса, так и фазы торможения. Поскольку зоны ускорения перемещаются с фазовой скоростью,

равной групповой скорости лазерного импульса в плазме и близкой к скорости света, то электроны, оказавшиеся в фазе ускорения и движущиеся с релятивистской скоростью в направлении распространения лазерного импульса, могут оставаться в ускорительной фазе относительно длительное время, приобретая тем самым значительную энергию.

Ускорение протонов и легких ионов лазерным импульсом начали исследовать позднее, чем ускорение электронов. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью мишени происходит эффективный (энергетический КПД ~40…50 %) нагрев электронов [16], которые разлетаются во все стороны и могут пройти сквозь мишень и вылететь с ее обратной стороны. Эти электроны образуют отрицательно заряженное облако в приповерхностном слое, создавая квазистационарное электрическое поле (схема TNSA — Target Normal Sheath Acceleration) [16]. Таким образом, имеется разность потенциалов, которая способна ускорять протоны и другие легкие ионы из мишени. Первоначальные эксперименты, проводившиеся по этой схеме, давали в результате широкие квазитепловые распределения ускоренных ионов по энергиям, в то время как большинство приложений требует моноэнергетичности получаемых пучков. Для решения этой проблемы предложено использовать металлические фольги с органическим покрытием, содержащим протоны и легкие ионы, на задней стороне фольги [17]. При формировании ускоряющего потенциала в первую очередь происходит ускорение легких ионов, в то время как тяжелые ионы фольги за время действия лазерного импульса практически не смещаются. При этом, поскольку ускоряемые ионы изначально находятся практически в одинаковых условиях, их динамика слабо различается, что в результате приводит к моноэнергетичности их спектра. В экспериментах был получен пучок протонов с энергиями порядка (1,2 ± 0,3) МэВ, т. е. разброс составил около 25 %.

При большой интенсивности излучения (~10^{23} Вт/см^2) более эффективна схема ускорения световым давлением [18]. Вследствие эффекта Доплера отраженный импульс имеет значительно меньшую частоту, чем падающий, поэтому при релятивистских скоростях слою может быть передано практически 100 % энергии падающего излучения. Для гауссова импульса длительностью 25 фс и максимальной интенсивностью $1{,}37 \cdot 10^{23}$ Вт/см^2 оценка дает $E_{i\,\text{кин}} \approx 30$ ГэВ для фольги толщиной 1 мкм с плотностью электронов 10^{22} см$^{-3}$. Однако режим ускорения световым давлением пока мало исследован экспериментально, поскольку требует достаточно высокой интенсивности излучения.

На похожем принципе основана схема ускорения легких ионов пондеромоторно отжатыми электронами: в тонком слое тяжелого металла создается поле разделения зарядов за счет отжатия электронов к задней границе мишени пондеромоторными силами [19]. При этом необходимо создать максимально возможный перепад потенциала, который и используется для ускорения легких ионов, пролетающих

через весь слой, т. е. в отличие от традиционных схем предполагается, что ускоряемые ионы изначально должны находиться в начале слоя. Таким способом могут быть получены хорошо коллимированные пучки с разбросом ~30 мрад. Развитием этой схемы является идея каскадного ускорения ионов, основанная на эффекте релятивистски индуцированной прозрачности слоя, наблюдаемом в тонких плазменных слоях под воздействием сверхсильного циркулярно поляризованного излучения [20].

Рассматривалась также возможность ускорения протонов в кавитационном режиме распространения лазерного импульса в прозрачной плазме [21], однако эта схема требует релятивистских энергий ионов, поэтому предлагалось соединить ее с предускорением методом светового давления [22]. Предлагается и другой режим, так называемый режим BOA (Breakout Afterburner) [23], в котором линейно поляризованное лазерное излучение взаимодействует с тонкой фольгой, нагреваемой по всему объему и разрушаемой, в результате чего происходит распространение импульса в разогретой плазме. В этом случае развивается релятивистская бунемановская неустойчивость, которая приводит к эффективной передаче энергии от электронов ионам [18].

Первым поколением источников аттосекундных импульсов считаются источники, основанные на генерации высоких гармоник при взаимодействии лазерных импульсов интенсивностью ~10^{13} Вт/см^2 с газовыми струями [24]. В связи с увеличением доступности высокоинтенсивных лазерных систем развиваются исследования генерации гармоник при взаимодействии лазерных импульсов с твердотельными мишенями для создания второго поколения источников аттосекундного излучения с использованием сверхкоротких сильносфокусированных импульсов, лазерных импульсов со специально подобранной переменной поляризацией, селективной фильтрацией генерируемого излучения [25].

С точки зрения повышения эффективности преобразования энергии весьма привлекателен режим генерации мощных аттосекундных импульсов при наклонном облучении поверхности закритической плазмы [26]. К особенностям этого режима относится не только появление более пологого спектра гармоник, но и то, что генерируемый на каждом периоде аттосекундный импульс имеет амплитуду бóльшую, чем амплитуда падающего на плазму излучения. Фактически это означает, что происходит не только преобразование энергии лазерного импульса в энергию высоких гармоник, но и концентрация энергии одного периода оптического импульса в аттосекундном всплеске.

Другим механизмом генерации высоких гармоник является так называемое когерентное кильватерное излучение [27], заключающееся в следующем: при взаимодействии лазерного излучения с поверх-

ностью твердотельной мишени происходит генерация электронных сгустков, распространяющихся в глубь плазмы [28]. Эти сгустки при наличии градиента концентрации способны возбуждать плазменные колебания, частота которых кратна частоте следования сгустков, определяемой, в свою очередь, частотой лазерного импульса, поэтому эти плазменные колебания могут излучать электромагнитные волны той же частоты. Таким образом, происходит генерация гармоник вплоть до гармоник плазменной частоты, соответствующей максимальной концентрации электронов в мишени.

О применении петаваттных лазерных импульсов. Создаваемые во всем мире петаваттные лазеры уже в ближайшее время станут инструментом для освоения новой области знаний — физики экстремальных световых полей [29]. В будущем петаваттные лазеры могут быть использованы в качестве ускорителей заряженных частиц для фундаментальных исследований, военно-технических и медицинских приложений. Эти и другие потенциальные приложения, а также значительный прогресс в области петаваттных лазеров вызывают интерес коммерческих фирм к освоению этого диапазона, что еще больше ускоряет развитие лазерных технологий. Все это позволяет надеяться, что через 5–10 лет петаваттные лазеры перестанут быть экзотикой и станут доступными для многих лабораторий во всем мире. Уже сейчас начаты разработки экса- и зеттаваттных установок [4].

Потенциальные преимущества применения фемтосекундных импульсов лазерного излучения для абляции конструкционных материалов энергоустановок высокой плотности мощности связаны с существованием режимов воздействия, при которых отсутствует плазменная экранировка падающего когерентного излучения, и с малой глубиной прогрева аблирующего вещества за время лазерного воздействия. Следствием этого являются незначительность или полное отсутствие жидкой фазы, возможность непосредственной передачи энергии излучения в тонкий слой испаряемого конденсированного вещества и высокая пространственная локализация лазерного воздействия, ограниченная лишь дифракционными эффектами. Кроме того, импульсная фемтосекундная лазерная абляция является мощным научным инструментом и представляет общефизический интерес, так как открывает новые возможности в области неравновесной термодинамики, генерации наноструктур, ускорительной техники, лабораторного моделирования процессов в звездных атмосферах, вспышках сверхновых звезд и др. [9, 10].

Лазерные ускорители заряженных частиц могут в ряде приложений заменить традиционные ускорители, позволяя сделать получение высокоэнергетичных частиц более дешевым и управляемым по времени, а также повысить пространственное качество пучков. Последнее преимущество крайне важно для протонной радиографии с микрометровым разрешением, например для регистрации конфигурации электрических и магнитных полей в плазме. Управление временны́ми характери-

стиками ионных пучков важно для создания разогретого плотного вещества (WDM — warm dense matter, т. е. изохорически нагретого до температуры 100 эВ твердого вещества с плотностью в 1–10 раз выше таковой при нормальных условиях, когда энергия электрон-ионного взаимодействия сопоставима с кинетической энергией электронов), в случае если применение рентгеновского излучения и ударного сжатия ограничено низкой пространственной однородностью, а ускорителей и электрических импульсных источников ионов — сравнительно большой длительностью (1…10 нс) воздействия.

Ожидается, что использование лазерных ускорителей ионов в лучевой терапии позволит сделать существующие методы лечения более дешевыми и доступными как в случае инжекции высокоэнергетичных ионов в радиочастотные ускорители, так и в случае создания чисто оптических систем с минимальным расстоянием транспортировки ионов. Становится возможным также более точное фракционирование и существенное увеличение мощности дозы. Кроме терапии, ускоренные ионы используются и в диагностике — позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), установки для которой в традиционном исполнении не только дороги и громоздки, но и требуют серьезной радиационной защиты. Применение лазеров, способных обеспечивать плотности мощности излучения ~10^{20} Вт/см^2 с частотой ~1 кГц, позволит достичь активности распада короткоживущих изотопов ~ГБк, достаточной для конкурентоспособных ПЭТ-установок.

Взаимодействие лазерно-ускоренных ионов с другими мишенями может индуцировать ядерные реакции различных типов, что значительно расширяет возможности исследования вне специализированных центров и делает их более безопасными. Недавно предложена схема процесса деления-синтеза для создания богатых нейтронами ядер для моделирования астрофизических процессов, требующая плотности мощности ~$3\cdot10^{22}$ Вт/см^2 [30]. Кроме того, потоки нейтронов, полученные таким образом, могут быть использованы для лучевой терапии, нейтронной радиографии, исследования процессов радиационной деградации материалов, трансмутации ядерных отходов. Ожидается также, что полученный при интенсивности воздействия ~10^{21} Вт/см^2 поток ускоренных ионов может быть использован для получения пи-мезонов с гораздо большим выходом, чем при использовании традиционных ускорителей. При интенсивности ~10^{23} Вт/см^2 ожидается получение потоков ~20 МэВ мюонных нейтрино [31].

Практический интерес к созданию компактных лазерных ускорителей электронов в основном связан с их возможным применением в качестве первой ступени традиционных линейных ускорителей, а также с возможностью получения коротких электромагнитных импульсов в труднодоступных диапазонах. Повышение интенсивности до уровня ~10^{22} Вт/см^2 позволит осваивать гамма-диапазон электромагнитного излучения вплоть до $h\nu$ ~ 1 ГэВ. Особым преимуществом лазерного ускорения является то, что тот же самый лазерный им-

пульс, который ускорял электроны, можно использовать для генерации излучения [1].

Аттосекундные рентгеновские пучки высокой яркости, генерируемые при воздействии сверхмощных лазерных импульсов, дадут возможность получать четырехмерные изображения с субатомным разрешением, т. е. фиксировать динамические изменения структуры вещества с пикометровым разрешением в пространстве и аттосекундным разрешением во времени. Они могут быть также использованы для фазово-контрастной и дифракционной рентгенографии отдельных биологических молекул и нанообъектов.

По данным Scopus, ежегодное число публикаций по ключевому слову «femtosecond laser» неуклонно возрастает и в 2012 г. составило 2 193 статьи.

О существующих петаваттных установках. В настоящее время в мире существует более 20 лазерных установок с пиковой мощностью излучения более 100 ТВт и субпикосекундными длительностями импульсов, более 10 установок такого уровня находятся в стадии строительства или модернизации [1] (таблица, рис. 4). Среди наиболее масштабных проектов — создание четырех лазерных центров по программе ELI (Extreme Light Infrastructure) [29], в одном из которых планируется достичь мощности 0,2 ЭВт.

Как показывает анализ, наиболее универсальными являются исследовательские установки с энергией ~50 Дж в импульсе длительностью ~50 фс, экономически целесообразная частота следования импульсов для большинства применений составляет ~0,1 Гц.

О созданном модуле. Цель работы заключалась в создании на современнейшей элементной базе фемтосекундного лазерного модуля кластера «Фемтолаб МГТУ». В соответствии с Программой развития МГТУ им. Н.Э. Баумана на 2009–2018 гг., утвержденной приказом Минобрнауки от 10 ноября 2009 г. № 581, в университете совместно с ОИВТ РАН ведется разработка кластера экспериментально-диагностических модулей по исследованию ультракоротких процессов экстремальной плотности мощности в средах различных агрегатных состояний [32–42]. Создание экспериментального комплекса плазменно-лазерных воздействий (как центра коллективного пользования университетов, организаций РАН и Минобрнауки РФ) по исследованию лазерно-индуцированных многофакторных процессов взаимодействия ультракоротких импульсов мощного когерентного излучения и плазменных гиперзвуковых потоков с веществом позволит существенно расширить спектр решаемых научными подразделениями МГТУ фундаментальных и прикладных задач по разработке принципиально новых плазменно-лучевых систем высокой плотности мощности и исследованию свойств вещества в неизученном диапазоне параметров (рис. 5).

Действующие установки с пиковой мощностью излучения не менее 100 ТВт [1]
(ЛТС — лазерный термоядерный синтез; ЛУЧ, ЛУИ, ЛУЭ — лазерное ускорение частиц, ионов, электронов; ЭСВ — экстремальные состояния вещества, ГРИ — генерация рентгеновского излучения)

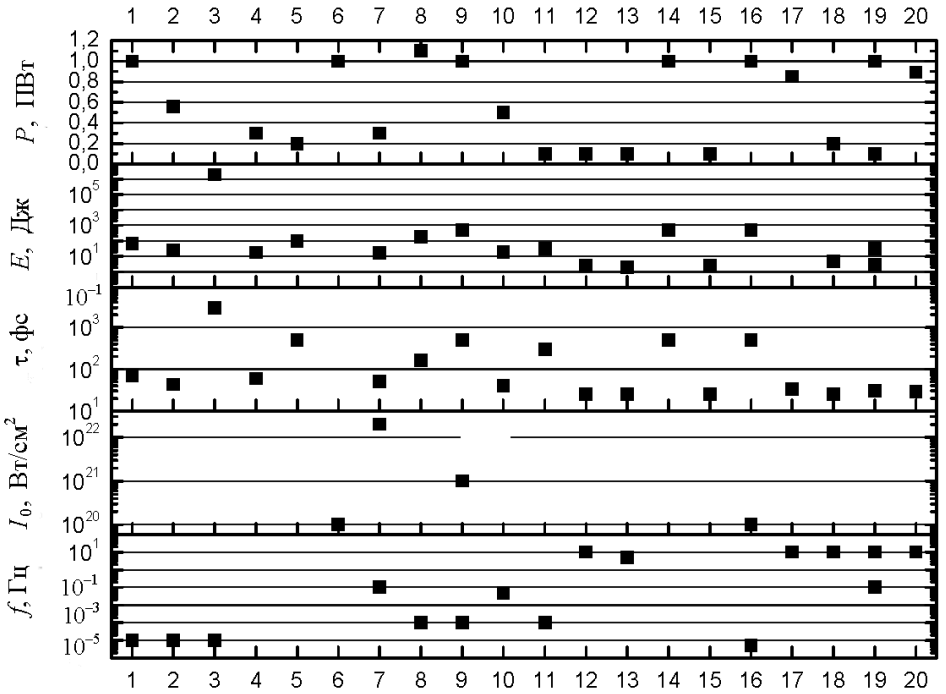
№ п/п	*Название лазера* Научный центр	Тип лазера	Пиковая мощность	Энергия в импульсе, Дж	Минимальная длительность, фс	Максимальная интенсивность, Вт·см$^{-2}$	Частота повторения	Основные направления исследований
				Россия				
1	*Фемта-Луч* РФЯЦ ВНИИЭФ	DKDP	1 ПВт	70	70	—	Несколько раз в сутки	ЛТС, ЭСВ, ЛУЧ
2	*PEARL* ИПФ РАН	DKDP	560 ТВт	24	43	—	Несколько раз в сутки	ЛУЭ, биомедицинские приложения
				США				
3	*NIF* LLNL	Nd:Glass		$1{,}8 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$	—	Несколько раз в сутки	ЛТС
4	*Callisto* LLNL	Ti:Sa	300 ТВт	18	60	—	—	ЛУЭ
5	*Trident* LANL	Nd:Glass	200 ТВт	100	500	—	—	ЛУИ, лабораторная астрофизика
6	*OMEGA EP* Лаборатория лазерной энергетики Рочестерского университета (LLE)	Nd:Glass	1 ПВт	—	—	1020	—	ЛТС, эксперименты по высокой плотности энергии

7	*Hercules* Центр сверхбыстрой оптики (CUOS) при Мичиганском университете	Ti:Sa	300 ТВт	17	50	$2 \cdot 10^{22}$	0,1 Гц	Релятивистская лазерная плазма, ЛУЧ, ГРИ
8	*Texas Petawatt* Техасский университет (UT)	Nd:Glass	1,1 ПВт	186	165	—	Несколько раз в час	ЛУЧ, биомедицинские приложения
Великобритания								
9	*Vulcan* Лаборатории им. Резерфорда и Эплтона (RAL)	Nd:Glass	1 ПВт	500	500	1021	Несколько раз в час	ЛТС, ЭСВ, ЛУЧ, лабораторная астрофизика
10	*Astra Gemini* RAL	Ti:Sa	$2 \cdot 0{,}5$ ПВт	$2 \cdot 20$	40	10^{22}	1/20 Гц	ЛУЧ, ГРИ, лабораторная астрофизика
Франция								
11	Лаборатория использования интенсивных лазеров (LULI), Политехническая школа	Nd:Glass	100 ТВт	30	300	—	Один раз в 20 мин	Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Окончание таблицы

№ п/п	*Название лазера* Научный центр	Тип лазера	Пиковая мощность	Энергия в импульсе, Дж	Минимальная длительность, фс	Максимальная интенсивность, Вт · см$^{-2}$	Частота повторения	Основные направления исследований
				Франция				
12	Лаборатория прикладной оптики (LOA)	Ti:Sa	100 ТВт	2,5	25	—	10 Гц	ЛУЧ
				Германия				
13	*ATLAS* Институт квантовой оптики Макса Планка (MPQ)	Ti:Sa	100 ТВт	2	25	—	5 Гц	ЛУЧ
14	*PHELIX* Центр им. Гельмгольца по исследованию тяжелых ионов (GSI)	Nd:Glass	1ПВт	500	500	—	—	Взаимодействие лазерного излучения с пучками тяжелых ионов
15	Дюссельдорфский университет	Ti:Sa	100 ТВт	2,5	25	—	—	Релятивистская лазерная физика
				Япония				
16	Институт лазерных технологий университета Осака (ILE)	Nd:Glass	1 ПВт	500	500	10^{20}	3–4 раза в сутки	ЛТС, физика высоких плотностей энергии

17	Advanced Proton Research Center (APRC), Японское агентство по атомной энергии (JAEA)	Ti:Sa	850 ТВт	—	33	—	10 Гц	Релятивистская оптика
				Канада				
18	*ALLS* Национальный институт научных исследований (INRS)	Ti:Sa	200 ТВт	5	25	—	10 Гц	Взаимодействие с веществом в диапазоне от рентгеновского до инфракрасного излучения
				Корея				
19	Институт науки и техники Кванджу (GIST)	Ti:Sa	100 ТВт 1 ПВт	3 30	30 30	—	10 Гц 0,1 Гц	Релятивистское томсоновское рассеяние, ГРИ, ЛУЭ
				Китай				
20	Шанхайский институт оптики и точной механики (SIOM)	Ti:Sa	890 ТВт	—	29	—	10 Гц	Релятивистская лазерная плазма, ЛУЧ, ГРИ



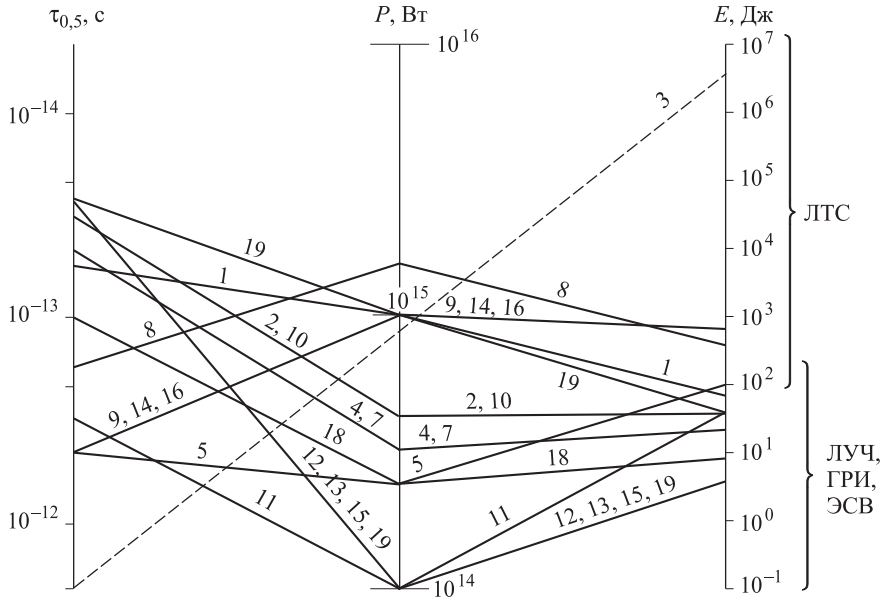


Рис. 4. Параметры существующих петаваттных лазерных комплексов (обозначения 1–20 соответствуют порядковым номерам в таблице)

В составе модуля реализуются блоки, связанные оптически, электрически в единый оптоэлектронный контур.

Принципиальная блок-схема модуля представлена на рис. 6. Модуль состоит из следующих функциональных блоков:

генерации импульсов лазерного излучения ультракороткой длительности (*1–8*);

диагностики параметров лазерного излучения (*9–12*);

создания и контроля необходимых газовакуумных условий (*14*, *21*);

оптической диагностики лазерно-индуцированных газоплазменных образований (*13*, *15*, *17–19*, *22*, *23*); блоков синхронизации, сбора и обработки экспериментальных данных (*20*, *24*, *25*).

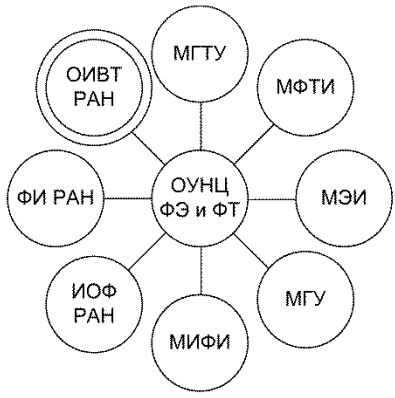


Рис. 5. Схема сотрудничества организаций в рамках Объединенного учебно-научного центра фотонной энергетики и фотонных технологий

В модуле на современной элементной базе реализованы комплексная оптическая диагностика высокого временного и пространственного разрешения. Во-первых, это регистрация эмиссионных и абсорбционных спектров, спектров комбинационного рассеяния (*17–19*, *22*, *23*), которая осуществляется, в зависимости от задачи, как в интегральном, так и в дифференцированных по пространству и времени режимах для отдельных линий ($\lambda/\Delta\lambda \sim 30\,000$) и широких ($\lambda/\Delta\lambda \sim 4\,000$) спектральных интервалов (λ от 120 до 2 000 нм) с использованием линеек спектрометров и монохроматоров *17*, *18*, приемников *19*, эталонных *22* и высокояркостных *23* источников излучения. Во-вторых, это интерференционные методы исследования плазмы (*13*), которые при должной обработке могут быть весьма информативными [32, 39, 43], являются невозмущающими и обладают высоким пространственным и временным разрешением [33, 36]. Для достижения наибольшего эффекта необходимо одновременное использование нескольких методик с последующей комплексной обработкой результатов [44].

Наш опыт применения схем Майкельсона и Маха — Цендера для исследования поверхности мишени и приповерхностой зоны не только показал преимущества комбинированного подхода к исследованию светоэрозии, но и выявил ряд ограничений по использованию этих классических схем. Так, для интерференционной микроскопии существуют достаточно жесткие требования к поверхности мишени (толщине и качеству тонкой пленки), связанные с диффузным отражением (пропусканием), к глубине светоэрозионного кратера и уклону его стенок. Эти ограничения могут быть устранены при использовании спекл-интерферометрии, безразличной к характеру поверхности.

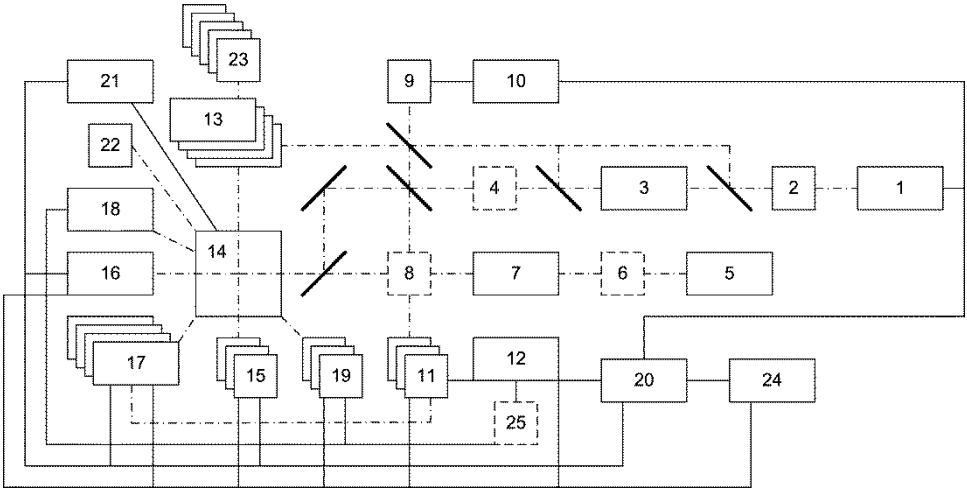


Рис. 6. Блок-схема фемтосекундного лазерного комплекса (штрихпунктирными линиями показаны оптические связи):

1 — диодный лазер накачки; *2* — твердотельный лазер с диодной накачкой (Lighthouse Sprout-6W, 532 нм); *3* — генератор фемтосекундных лазерных импульсов (Техноскан Фемтис, 500 мВт, 25…45 фс, 750…950 нм, 80…100 МГц); *4* — блок преобразования частоты излучения (375…425 нм); *5* — волоконный генератор фемтосекундных импульсов (Техноскан Иттербиус-Мастер, 1060…1115 нм); *6* — волоконный модулятор длительности импульсов (500 фс…3 нс, 100 кГц…25 МГц); *7* — волоконный усилитель (до 100 мкДж/имп.); *8* — блок преобразования частоты излучения (535 нм); *9* — автокоррелятор (Femtochrome 103 XL, 410…1800 нм, 5 фс…175 пс, 1 фс); *10* — цифровой осциллограф (Tektronix TDS2024B, 2 Гвыб/с); *11* — блок сверхскоростных фотоприемников (Hamamatsu, Alphalas UPD, 15 пс, 170…1700 нм); *12* — цифровой осциллограф (Tektronix DPO7254, 40 Гвыб/с); *13* — блок интерферометрии поверхности мишени (спекл-интерферометр, интерференционный микроскоп Майкельсона/Линника) и приповерхностной зоны (схема Маха — Цендера, поляризационный интерферометр Номарского); *14* — вакуумная камера (10^{-8} мбар, 100 л, 32 порта); *15* — блок фоторегистраторов (ПЗС-камеры с ЭОП Наноскан Наногейт-2, 10 нс; цветная и двухкадровая ПЗС-камеры Видеоскан 205); *16* — времяпролетный фотоэмиссионный спектрометр высокого пространственого и временного разрешения (Specs Themis 600, 0…3,5 кэВ, 200 мкэВ, 100 пс, 0,1°); *17* — блок УФ-ИК-спектроскопии и спектрохронографии (190…2000 нм, 0,01 нм: монохроматоры Solar M833, MSA-130; спектрометры Solar SDH-IV, S-150); *18* — ВУФ-монохроматор (McPherson 234/302, 30…275 нм, 0,06 нм); *19* — блок приемников коротковолнового излучения (IRD AXUV, Техноэксан ФДУК, 250 пс, 0,02-1100 нм); *20* — рабочая станция сбора и обработки информации; *21* — блок генерации и контроля газовакуумных условий (безмасляный откачной пост Pfeiffer Turbocube, ионно-геттерный насос Gamma Ti-ion, масс-спектрометр MKS e-Vision+); *22* — калиброванный источник широкополосного зондирующего излучения (Energetiq EQ-99, 170…2200 нм); *23* — источники зондирующего лазерного излучения (405; 445; 473; 532; 671 нм); *24* — система синхронизации (Berkeley Nucleonics 575; 50 пс); *25* — усилитель электрических сигналов (Alphalas BBA, 4 ГГц, 13 дБ)

Для качественного анализа динамики и макроструктуры светоэрозионных потоков и комплексной обработки экспериментальных результатов необходимо получить теневые (абсорбционные) картины

одновременно с интерференционными. Это требование может быть выполнено при использовании интерферометра Номарского при перекрытии невозмущенной и возмущенной областей обыкновенного и необыкновенного лучей после прохождения зондирующим излучением призмы Волластона. Кроме того, интерферометр Номарского существенно проще в юстировке, чем интерферометр Маха — Цендера, особенно при использовании ультракоротких импульсов зондирующего излучения, когда достижение пространственной и временной когерентности затруднено.

Управление режимами воздействия, синхронизация, регистрация и обработка экспериментальных данных (*12*, *20*, *24*) в значительной степени автоматизированы. Пути передачи аналоговых сигналов минимизированы за счет аналого-цифрового и обратного преобразований для уменьшения наводок и помех. Программа подготовки (калибровка регистрирующей аппаратуры) и выполнения эксперимента (перемещение мишени, изменение параметров воздействия и регистрации его результатов) может быть задана для последующего ведения многопараметрического протокола без участия человека, что позволяет значительно увеличить производительность дорогостоящего комплекса и подготовить первичные данные для последующей автоматизированной комплексной обработки с минимальным количеством ошибок и пропусков.

Современное состояние модуля представлено на рис. 7. В настоящее время с его использованием ведется отработка метрологических и диагностических методик в рамках тестовых экспериментов.

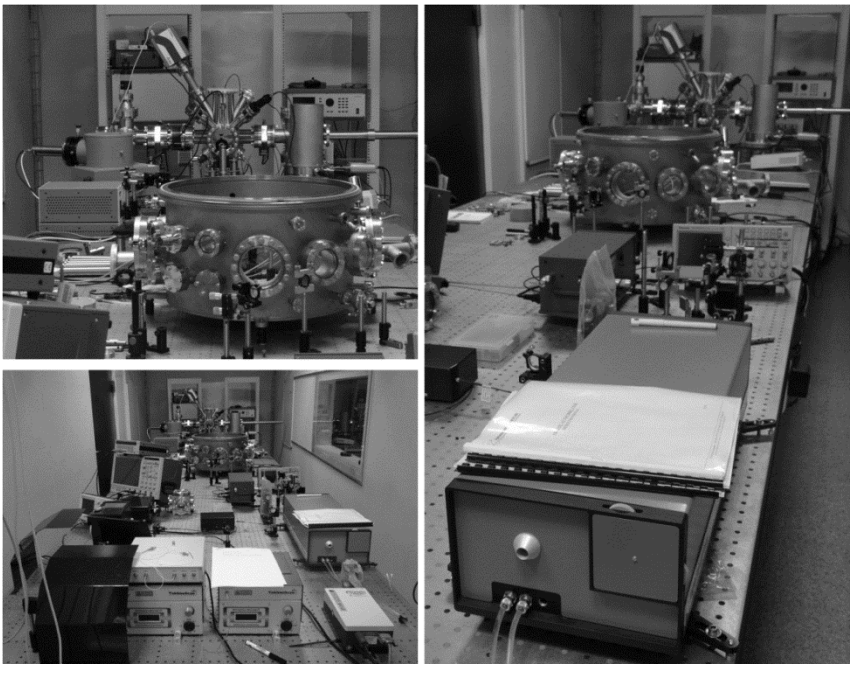


Рис. 7. Внешний вид модуля

Заключение. Таким образом, создаваемый кластер «Фемтолаб МГТУ» (модуль фемтосекундного лазерного воздействия) предназначен для фундаментальных и прикладных экспериментальных исследований:

- термодинамических, оптических характеристик и переносных свойств многократно ионизованной плотной (и неидеальной) плазмы различного химического и ионизационного состава в неисследованной области экстремально высоких параметров и плотностей вводимых в среду энергий в условиях интенсивного радиационного переноса и сильных ударно-волновых нагрузок;
- новых методов и эффективности коллективного ускорения плазмы и плазмоподобных сред в интенсивных световых полях;
- физики нового класса электрических разрядов — сильноточных излучающих плазмодинамических разрядов в вакууме и газах ультракороткой длительности;
- физики высоких плотностей энергии (исследование радиационно-газоплазмодинамических процессов взаимодействия мощного коротковолнового излучения ($h\nu$ от 10 до 400 эВ), сильных ударных волн и гиперзвуковых потоков плотной сильноионизованной плазмы сложного химического и ионизационного состава с веществом различных агрегатных состояний).

Чтобы обеспечить выполнение этих задач, планируется многоэтапное создание, оснащение и развитие модулей, позволяющих как отдельное их использование, так и объединение в специализированные установки.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 14.518.11.7009) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 12-08-12047, 13-08-01391).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов. *Успехи физических наук*, 2011, т. 181, № 1, с. 9–32.

[2] Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Петаваттные лазеры на основе оптических параметрических усилителей: состояние и перспективы. *Успехи физических наук*, 2008, т. 178, № 9, с. 1006–1011.

[3] Malkin V.M., Shvets G., Fisch N.J. Fast Compression of Laser Beams to Highly Overcritical Powers. *Physical Review Letters*, 1999, vol. 82, no. 22, pp. 4448–4451.

[4] Mourou G.A., Fisch N.J., Malkin V.M., Toroker Z., Khazanov E.A., Sergeev A.M., Tajima T., Le Garrec B. Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, no. 5, pp. 720–724.

[5] Li P.-C., Zhou X.-X., Wang G.-L., Zhao Z.-X. Isolated sub-30-as pulse generation of an He+ ion by an intense few-cycle chirped laser and its high-order harmonic pulses. *Physical Review A*, 2009, vol. 80, no. 5, p. 053825.

[6] Mauritsson J., Remetter T., Swoboda M., Klunder K., L'Huillier A., Schafer K.J., Ghafur O., Kelkensberg F., Siu W., Johnsson P., Vrakking M.J.J., Znakovskaya I., Uphues T., Zherebtsov S., Kling M.F., Lepine F., Benedetti E., Ferrari F., Sansone G., Nisoli M. Attosecond Electron Spectroscopy Using a Novel Interferometric Pump-Probe Technique. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 105, no. 5, p. 053001.

[7] Беляев В.С., Крайнов В.П., Лисица В.С., Матафонов А.П. Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями. *Успехи физических наук*, 2008, т. 178, № 8, с. 823–847.

[8] Wang X., Zgadzaj R., Fazel N., Li Z., Yi S.A., Zhang X., Henderson W., Chang Y.Y., Korzekwa R., Tsai H.E., Pai C.H., Quevedo H., Dyer G., Gaul E., Martinez M., Bernstein A.C., Borger T., Spinks M., Donovan M., Khudik V., Shvets G., Ditmire T., Downer M.C. Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV. *Nature Communications*, 2013, vol. 4, p. 1988.

[9] Macchi A., Borghesi M., Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction. *Reviews of Modern Physics*, 2013, vol. 85, no. 2, pp. 751–793.

[10] Daido H., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S. Review of laser-driven ion sources and their applications. *Reports on Progress in Physics*, 2012, vol. 75, no. 5, p. 056401.

[11] Sentoku Y., Liseikina T.V., Esirkepov T.Z., Califano F., Naumova N.M., Ueshima Y., Vshivkov V.A., Kato Y., Mima K., Nishihara K., Pegoraro F., Bulanov S.V. High density collimated beams of relativistic ions produced by petawatt laser pulses in plasmas. *Physical Review E*, 2000, vol. 62, no. 5, p. 7271.

[12] Yogo A., Daido H., Bulanov S.V., Nemoto K., Oishi Y., Nayuki T., Fujii T., Ogura K., Orimo S., Sagisaka A., Ma J.L., Esirkepov T.Z., Mori M., Nishiuchi M., Pirozhkov A.S., Nakamura S., Noda A., Nagatomo H., Kimura T., Tajima T. Laser ion acceleration via control of the near-critical density target. *Physical Review E*, 2008, vol. 77, no. 1, p. 016401-6.

[13] Faenov A.Y., Pikuz T.A., Fukuda Y., Kando M., Kotaki H., Homma T., Kawase K., Kameshima T., Pirozhkov A., Yogo A., Tampo M., Mori M., Sakaki H., Hayashi Y., Nakamura T., Pikuz J.S.A., Skobelev I.Y., Gasilov S.V., Giulietti A., Cecchetti C.A., Boldarev A.S., Gasilov V.A., Magunov A., Kar S., Borghesi M., Bolton P., Daido H., Tajima T., Kato Y., Bulanov S.V. Submicron ionography of nanostructures using a femtosecond-laser-driven-cluster-based source. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, no. 10, p. 101107-3.

[14] Esarey E., Sprangle P., Krall J. Laser acceleration of electrons in vacuum. *Physical Review E*, 1995, vol. 52, no. 5, pp. 5443–5453.

[15] Tajima T., Dawson J.M. Laser Electron Accelerator. *Physical Review Letters*, 1979, vol. 43, no. 4, pp. 267–270.

[16] Wilks S.C., Langdon A.B., Cowan T.E., Roth M., Singh M., Hatchett S., Key M.H., Pennington D., MacKinnon A., Snavely R.A. Energetic proton generation in ultra-intense laser--solid interactions. *Physics of Plasmas*, 2001, vol. 8, no. 2, pp. 542–549.

[17] Snavely R.A., Key M.H., Hatchett S.P., Cowan T.E., Roth M., Phillips T.W., Stoyer M.A., Henry E.A., Sangster T.C., Singh M.S., Wilks S.C., MacKinnon A., Offenberger A., Pennington D.M., Yasuike K., Langdon A.B., Lasinski B.F., Johnson J., Perry M.D., Campbell E.M. Intense High-Energy Proton Beams from Petawatt-Laser Irradiation of Solids. *Physical Review Letters*, 2000, vol. 85, no. 14, p. 2945.

[18] Esirkepov T., Borghesi M., Bulanov S.V., Mourou G., Tajima T. Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 92, no. 17, p. 175003.

[19] Коржиманов А.В., Гоносков А.А., Ким А.В., Сергеев А.М. Об ускорении протонов и легких ионов до энергий ГэВ при взаимодействии сверхсильного лазерного излучения со структурированной плазменной мишенью. *Письма в ЖЭТФ*, 2007, т. 86, № 9, с. 662–669.

[20] Gonoskov A.A., Korzhimanov A.V., Eremin V.I., Kim A.V., Sergeev A.M. Multicascade Proton Acceleration by a Superintense Laser Pulse in the Regime of Relativistically Induced Slab Transparency. *Physical Review Letters*, 2009, vol. 102, no. 18, p. 184801.

[21] Shen B., Li Y., Yu M.Y., Cary J. Bubble regime for ion acceleration in a laser-driven plasma. *Physical Review E*, 2007, vol. 76, no. 5, p. 055402.

[22] Shen B., Zhang X., Sheng Z., Yu M.Y., Cary J. High-quality monoenergetic proton generation by sequential radiation pressure and bubble acceleration. *Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams*, 2009, vol. 12, no. 12, p. 121301.

[23] Albright B.J., Yin L., Bowers K.J., Hegelich B.M., Flippo K.A., Kwan T.J.T., Fernandez J.C. Relativistic Buneman instability in the laser breakout afterburner. *Physics of Plasmas*, 2007, vol. 14, no. 9, p. 094502-4.

[24] Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics. *Reviews of Modern Physics*, 2009, vol. 81, no. 1, pp. 163–234.

[25] Carman R.L., Forslund D.W., Kindel J.M. Visible Harmonic Emission as a Way of Measuring Profile Steepening. *Physical Review Letters*, 1981, vol. 46, no. 1, pp. 29–32.

[26] Boyd T.J.M., Ondarza-Rovira R. Anomalies in Universal Intensity Scaling in Ultrarelativistic Laser-Plasma Interactions. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 101, no. 12, pp. 125004.

[27] Quéré F., Thaury C., Monot P., Dobosz S., Martin P., Geindre J.P., Audebert P. Coherent Wake Emission of High-Order Harmonics from Overdense Plasmas. *Physical Review Letters*. 2006, vol. 96, no. 12, p. 125004.

[28] Brunel F. Not-so-resonant, resonant absorption. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 59, no. 1, pp. 52–55.

[29] ELI: the Extreme Light Infrastructure european project. URL: http://www.extreme-light-infrastructure.eu

[30] Habs D., Thirolf P.G., Gross M., Allinger K., Bin J., Henig A., Kiefer D., Ma W., Schreiber J. Introducing the fission–fusion reaction process: using a laser-accelerated Th beam to produce neutron-rich nuclei towards the N = 126 waiting point of the r-process. *Applied Physics B*, 2011, vol. 103, no. 2, pp. 471–484.

[31] Pakhomov A.V. Neutrino generation by high-intensity lasers. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2002, vol. 28, no. 6, pp. 1469–1476.

[32] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Исследование оптико-теплофизических и газодинамических характеристик фемтосекундной лазерной абляции конструкционных материалов полимерного ряда. *Теплофизика высоких температур*, 2010, т. 48, № 5, с. 766–778.

[33] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Экспериментально-диагностический модуль для сверхскоростной комбинированной интерферометрии процессов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с конденсированными средами в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 3, с. 104–110.

[34] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Энергетическая эффективность фемтосекундной лазерной абляции тугоплавких металлов. *Журнал прикладной спектроскопии*, 2010, т. 77, № 4, с. 604–611.

[35] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Экспериментальное исследование оптико-газодинамических процессов абляции полимерных материалов ультракороткими лазерными импульсами. *Краткие сообщения по физике*, 2010, № 3, с. 31–34.

[36] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Методика экспериментального определения удельного механического импульса отдачи при фемтосекундной лазерной абляции конденсированных сред в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 4, с. 140–144.

[37] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Экспериментальное исследование оптомеханических характеристик фемтосекундной лазерной абляции полимеров в атмосферных и вакуумных условиях. *Письма в Журнал технической физики*, 2010, т. 36, № 13, с. 8–15.

[38] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. О спектрально-энергетической эффективности фемтосекундной лазерной абляции полимеров. *Доклады Академии наук*, 2010, т. 434, № 1, с. 38–41.

[39] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Исследование газодинамических процессов фемтосекундного оптического разряда с аблирующей полимерной стенкой в атмосферных и вакуумных условиях. *Теплофизика высоких температур*, 2011, т. 49, № 3, с. 415–425.

[40] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Энергетическая эффективность фемтосекундной лазерной абляции полимерных материалов. *Журнал прикладной спектроскопии*, 2012, т. 79, № 1, с. 114–121.

[41] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Исследование оптико-механических характеристик процессов взаимодействия ультракоротких импульсов лазерного излучения с полимерными материалами. *Оптика и спектроскопия*, 2012, т. 112, № 4, с. 685–692.

[42] Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Ситников Д.С. Об эффективности преобразования энергии излучения в кинетическую энергию газово-плазменного потока при фемтосекундной лазерной абляции металлов в вакууме. *Теплофизика высоких температур*, 2013, т. 51, № 6 (в печати).

[43] Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю. Экспериментальное исследование динамики лазерно-индуцированных газово-плазменных потоков при фемтосекундной лазерной абляции меди в вакууме. *Оптика и спектроскопия*, 2013. т. 115, № 5, с. 159–169.

[44] Локтионов Е.Ю., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д., Хазиев Р.Р. Комплексная обработка интерферограмм светоэрозионных газово-плазменных потоков в вакууме. *Приборы и техника эксперимента*, 2013, № 1, с. 53–62.

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Локтионов Е.Ю., Павлов А.В, Пасечников Н.А., Протасов Ю.С., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д. О разработке и создании фемтосекундного лазерного модуля кластера «Фемтолаб МГТУ». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1041.html

Локтионов Егор Юрьевич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией учебно-научного центра «Фотонная энергетика», специалист в области экспериментальных исследований радиационно-газодинамических и оптотеплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний с использованием новейших методов диагностики. Автор более 50 работ в данной области. e-mail: stcpe@bmstu.ru

Павлов Алексей Вячеславович — ведущий инженер учебно-научного центра «Фотонная энергетика», специалист в области расчетно-теоретических исследований термодинамических, оптических и транспортных характеристик низкотемпературной плазмы сложного химического состава. Автор нескольких работ в этой области. e-mail: stcpe@bmstu.ru

Пасечников Никита Алексеевич — магистр техники и технологии, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (выпуск 2013 года). e-mail: stcpe@bmstu.ru

Протасов Юрий Степанович — д-р физ.-мат. наук, профессор, заместитель научного руководителя Объединенного учебно-научного центра фотонной энергетики и фотонных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области физики и техники низкотемпературной плазмы, радиационной газоплазмодинамики и физической электроники. Автор более 400 научных работ, более 10 книг и 300 изобретений. e-mail: stcpe@bmstu.ru

Протасов Юрий Юрьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований радиационно-плазмодинамических и оптотеплофизических процессов взаимодействия мощного излучения с веществом всех агрегатных состояний. Автор более 100 работ в данной области. e-mail: stcpe@bmstu.ru

Телех Виктор Дмитриевич — канд. техн. наук, директор учебно-научного центра «Фотонная энергетика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист в области фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований термодинамических, оптических и транспортных свойств низкотемпературной неидеальной плазмы. Автор более 50 работ в данной области. e-mail: stcpe@bmstu.ru