

## ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ (ИЯРФ)

В рамках международного сотрудничества РФЯЦ-ВНИИЭФ участвует в эксперименте ALICE по изучению кварк-глюонной плазмы на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРНе (Швейцария, Франция). В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны и изготовлены высокоточный механический спектрометр фотонов PHOS, технология сборки детектирующей части, автоматизированные системы охлаждения, медленного

контроля и термостабилизации. В 2008 году завершена сборка первого модуля спектрометра, в составе большой международной коллаборации проведена его тестовая калибровка на Cosmic rays. Модуль с системой охлаждения установлен в шахту на место эксперимента. 10 сентября 2008 года произведен пуск ускорителя БАК. Спектрометр в составе первого модуля, систем его охлаждения, медленного контроля

и термостабилизации работал в непрерывном режиме в течение нескольких месяцев. Проведены первые измерения космических частиц, проходящих через спектрометр, и частиц, рождаемых при ускорении пучка в БАК в натуральных условиях, при интеграции спектрометра во все измерительные системы эксперимента. На первом этапе измерения проводились при стабилизированной температуре  $+17^{\circ}\text{C} (\pm 0,1^{\circ}\text{C})$ .



а



б

Спектрометр фотонов PHOS: а – матрица кристаллов первого модуля спектрометра; б – спектрометр внутри магнита L3 эксперимента ALICE

## ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ИЛФИ)

Одним из перспективных способов увеличения яркости лазерного излучения (ЛИ) является применение устройства, в котором суммируется излучение нескольких одинаковых модулей лазерных усилителей. В случае, когда удастся сфазировать излучение отдельных модулей, предельная расходимость излучения такой системы определяется дифракцией на суммарной апертуре, а энергия – суммарной энергией отдельных усилитель-

ных модулей. Наиболее эффективным способом фазировки излучения нескольких лазерных модулей является использование эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) с помощью вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ). Для реализации фазировки световых пучков различных излучателей они должны рассеиваться на общей гиперзвуковой решетке в активной к ВРМБ среде. Это достигается

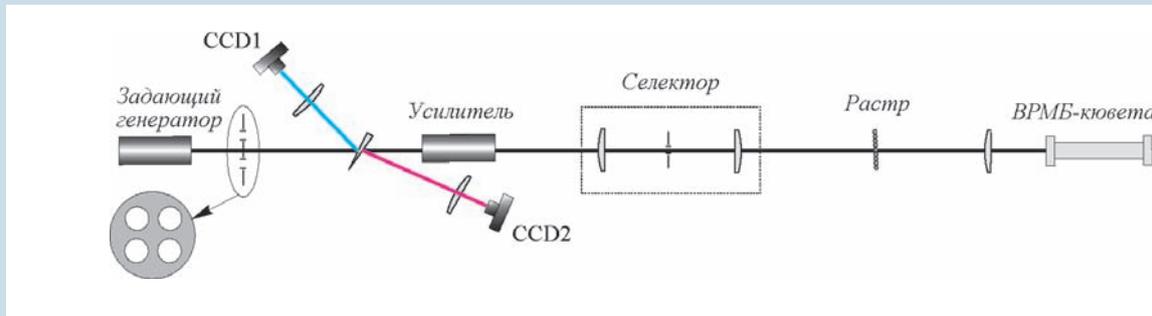
перемешиванием отдельных пучков в ВРМБ-среде, осуществить которое можно совместной фокусировкой излучения в объем взаимодействия. При ВРМБ в сфокусированных пучках наибольший инкремент достигается в каустике фокусирующей линзы (системы), поэтому фокусировка отдельных пучков в общую каустику является наиболее эффективным способом фазировки отдельных пучков. На лабораторном импульсном

неодимовом лазере проведены экспериментальные исследования фазировки четырех лазерных пучков в условиях нестационарного ВРМБ. Опорное излучение, состоящее из четырех отдельных пучков, пройдя через усилитель и угловой селектор, фокусировалось в ВРМБ-кювету. Система фокусировки содержала растр из дифракционных линз Френеля и фокусирующую линзу. Активной ВРМБ-средой служила смесь газов Хе и  $SF_6$ . Отраженное из кюветы излучение стоксовой компоненты ВРМБ возвращалось в усилитель на обратном проходе. В случае реализации режима фазировки угловое распределение усиленного стоксова излучения должно совпадать с угловым распределением опорного пучка на входе в усилитель. Экспериментально сравнива-

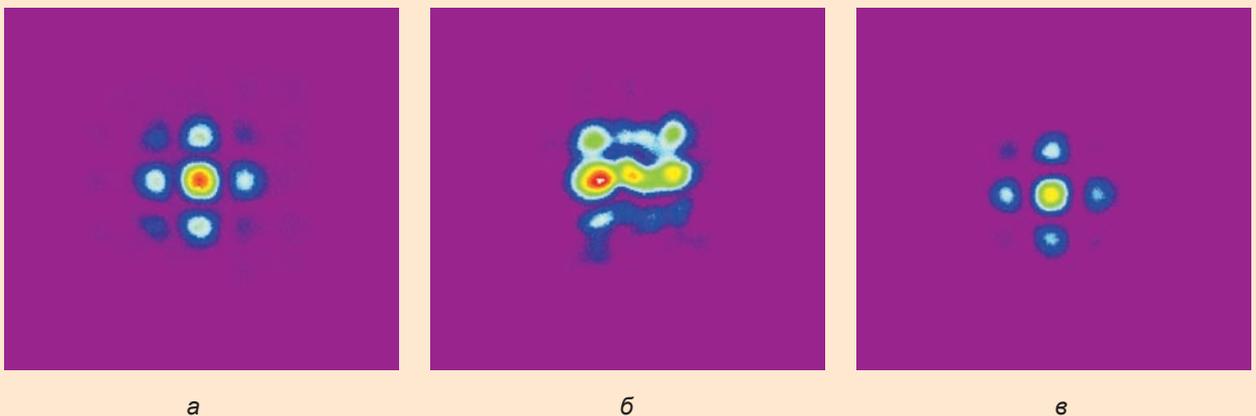
лись распределения в дальней зоне излучений опорного пучка, усиленного стоксова излучения и опорного излучения, дважды прошедшего через усилитель (ВРМБ-зеркало заменялось диэлектрическим). Показано, что лучшие результаты по фазировке получаются в условиях, когда в схеме фокусировки пучков в ВРМБ-кювету применяются киноформные линзовые растры с параметрами:  $f_r=50$  мм и  $d_r=0,5$  мм. Пучки опорного излучения фазировались в ВРМБ-кювету, и угловое распределение стоксова излучения, усиленного на втором проходе усилителя, практически совпадает с угловым распределением опорного излучения. Использование в двухпроходном усилителе фазировки с помощью ВРМБ-зеркала позволяет повысить долю энергии в пятне облучения до 66 % по сравне-

нию с 23 % в случае отсутствия фазировочного устройства.

Эффективность применения источников лазерного излучения в значительной степени зависит от качества волнового фронта, так как оно определяет возможность наведения лазерного луча на объект воздействия с малыми угловыми размерами. Факторы, искажающие волновой фронт, по своей природе имеют как статический характер (они возникают при распространении излучения через оптические элементы), так и динамический характер (при распространении излучения по приземному слою атмосферы). Одним из способов компенсации искажений волнового фронта является применение адаптивной системы фазового сопряжения, состоящей из датчика волнового фронта, деформируемого зеркала и системы управления.



Принцип фазировки лазерных пучков в условиях нестационарного ВРМБ

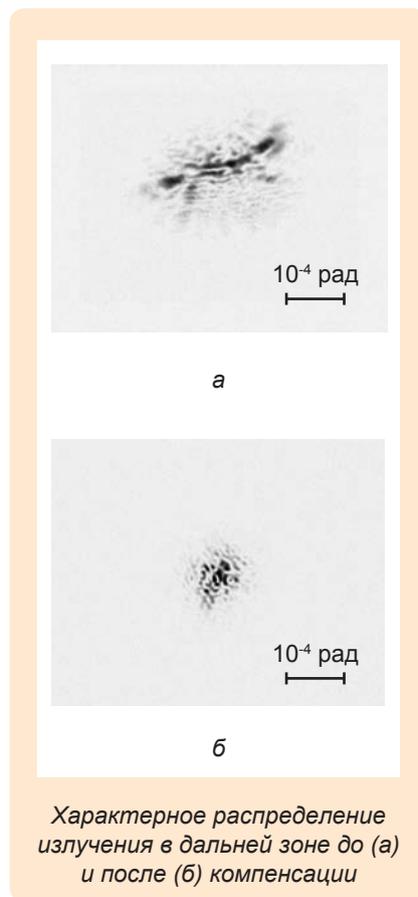
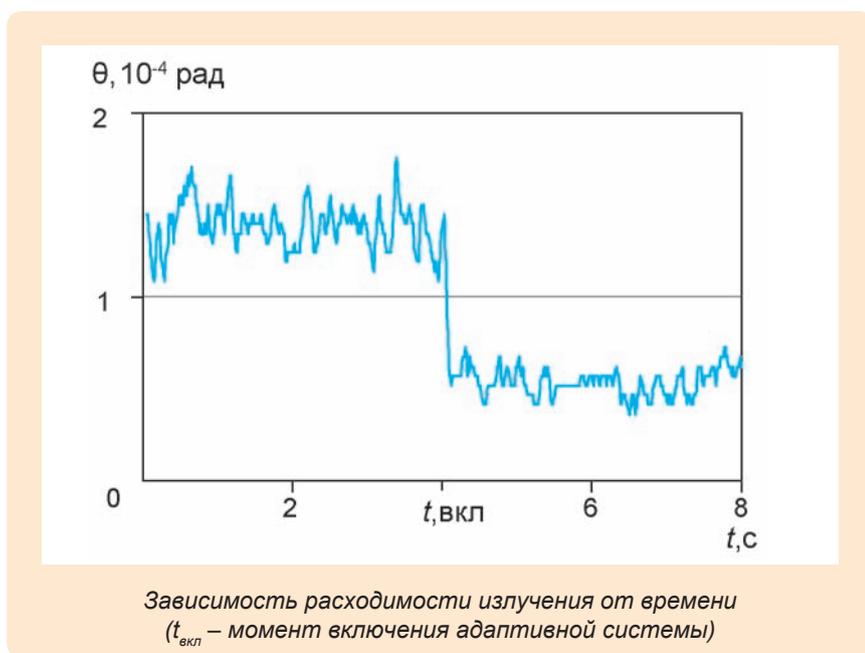
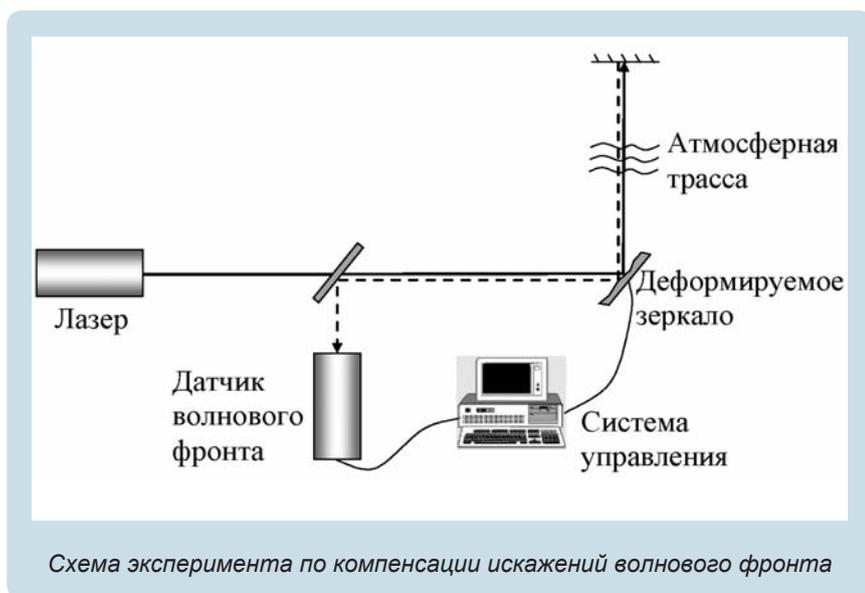


Распределение в дальней зоне излучений опорного пучка (а), опорного излучения, дважды прошедшего через усилитель (б), и усиленного стоксова излучения (в)

Был проведен эксперимент, задача которого состояла в уменьшении расходимости лазерного излучения апертурой 0,5 м, прошедшего через атмосферную трассу протяженностью 150 м. В эксперименте излучение непрерывного He-Ne лазера отражалось от деформируемого зеркала, проходило по приземной атмосферной трассе, отражалось от плоского зеркала, возвращалось и попадало на датчик волнового фронта. По измеренному волновому фронту рассчитывались сигналы коррекции для деформируемого зеркала. Плоскости деформи-

руемого зеркала и датчика волнового фронта являются сопряженными. В эксперименте использовались датчик волнового фронта Шака – Гартмана с 60 точками регистрации и биморфное деформируемое зеркало с 25 управляющими элементами. Сигналы коррекции подавались на деформируемое зеркало с частотой 12,5 Гц. Датчик волнового фронта состоит из киноформной фазовой пластины, в фокальной плоскости которой располагается CCD камера. Киноформная фазовая пластина представляет собой регулярный массив дифракци-

онных линз Френеля и изготавливается методом травления. Поверхность волнового фронта восстанавливается по взаимному расположению фокальных пятен на CCD камере. К обратной стороне деформируемого тонкого зеркала приклеены биморфные пьезоэлементы. Под действием электрического поля на отражающей поверхности зеркала формируются выпуклости или впадины, что позволяет управлять волновым фронтом ЛИ. Адаптивная система фазового сопряжения позволила улучшить расходимость ЛИ. Средняя расходимость, определяемая статическими искажениями волнового фронта за счет прохождения излучения через оптические элементы, была уменьшена в 3 раза с  $1,4 \cdot 10^{-4}$  рад до  $0,5 \cdot 10^{-4}$  рад при апертуре пучка 0,5 м. Динамическая составляющая расходимости, определяемая атмосферными флуктуациями волнового фронта, уменьшена в 2 раза с  $3,6 \cdot 10^{-5}$  рад до  $1,8 \cdot 10^{-5}$  рад.



Одно из ключевых направлений развития адаптивных оптических систем связано с коррекцией сцинтилляционных эффектов, возникающих в световом пучке при распространении света в неоднородной среде. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмов измерения (восстановления) и коррекции волнового фронта с винтовыми дислокациями, которые появляются в режиме сильных сцинтилляций. Среди рассмотренных подходов к восстановлению волнового фронта алгоритм Фрида является одним из лучших в плане точности, экономичности и устойчивости к шумам измерений. Алгоритм восстанавливает фазу по данным ее градиентов в присутствии оптических вихрей. Модификация этого алгоритма позволила увеличить его точность. Для проверки точности алгоритма и его эффективности в реальном эксперименте была генерирована торообразная мода Гаусса – Лагерра  $LG_0^1$  с использованием геликоидальных фазовых пластин, изготовленных из плавленого кварца по киноформной техно-

логии. Пластины имеют высокую лучевую прочность и рабочий диаметр 2 см. Экспериментальный стенд для комплексной регистрации оптических вихрей состоит из источника опорного излучения, интерферометра Маха – Цандера и датчика волнового фронта Гартмана – Шака, связанного с компьютером. Источник опорного излучения включает в себя He-Ne лазер 1, варьируемый ослабитель мощности 2 и коллиматор 3. Коллиматор формирует опорный гауссов пучок с плоским волновым фронтом диаметром около 1 см. Интерферометр состоит из двух клиньев 4 и двух плоских зеркал 6. В одно из плеч интерферометра вставляется геликоидальная фазовая пластина 5. После прохождения пластины гауссов пучок преобразуется в оптический вихрь (моду  $LG_0^1$ ) в фокальной области линзы 7, т. е. в дальней зоне, с высоким коэффициентом преобразования. Датчик волнового фронта состоит из матрицы ленточек 10 и CCD-камеры 11. При перекрытии опорного пучка во втором плече интерферометра CCD-камера регистрирует

распределение интенсивности излучения, при открытии опорного пучка регистрируется интерферограмма опорного пучка с вихревым пучком. Вихревой пучок имеет правильную торообразную форму. Фазовая поверхность оптического вихря реконструируется датчиком с программным обеспечением для восстановления сингулярных волновых поверхностей. Эксперименты показали возможность устранения фазовой сингулярности и повышения разрешающей способности оптической системы.

Проведен цикл исследований эффекта откола в алюминии при возбуждении в нем ударной волны (УВ) сверхкоротким импульсом ЛИ. Параметры ЛИ: длина волны 1,06 мкм; энергия импульса от 0,1 до 1 Дж, длительность 500 фс, диаметр пятна фокусировки от 400 до 600 мкм. Облучаемая лазером мишень в виде алюминиевой фольги толщиной 20, 50 и 100 мкм находилась в камере при вакууме  $10^{-4}$  торр. Фокусировка ЛИ осуществлялась параболическим зеркалом с фокусом 60 см. Интенсивность ЛИ варьировалась от  $10^{13}$  до  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. В экспериментах измеряли интенсивность ЛИ, соответствующую порогу возникновения откола. В мишенях толщиной 20, 50 и 100 мкм интенсивность соответственно составляла  $2,5 \cdot 10^{13}$ ;  $5,0 \cdot 10^{13}$  и  $1,4 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.

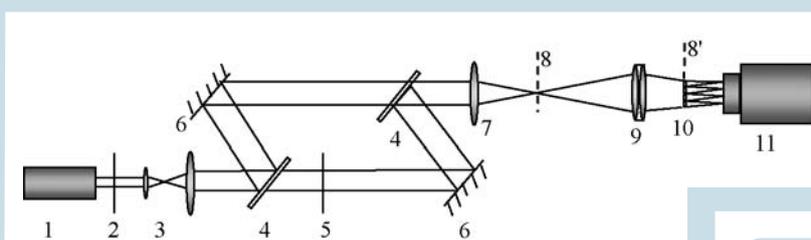
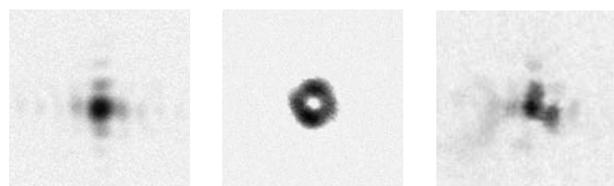


Схема регистрации вихря



Картинки в дальней зоне: исходный пучок (а), пучок до (б) и после коррекции (в)

**Расчетные параметры УВ в алюминии, возникающей при воздействии на его поверхность ЛИ длительностью 500 фс и интенсивностью  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>**

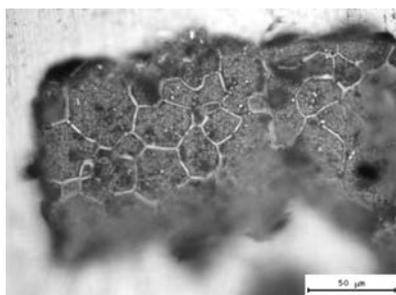
Глубина проникновения в алюминиевую мишень, мкм	20	50	100
Длительность импульса, нс	0,5	1,0	1,5
Амплитуда, кбар	280	180	112
Скорость, км/с	7,5	6,9	6,6

Видно, что на глубине 20 мкм длительность импульса УВ составляет 0,5 нс, что в 1000 раз превышает длительность импульса возбуждающего ее ЛИ. При скорости распространения 7,5 км/с УВ занимает в пространстве ~ 4 мкм. При отражении от тыльной поверхности мишени УВ трансформируется в волну растяжения, и при амплитуде, превышающей динамический порог прочности материала, возникают условия откола. Толщина слоя откола в экспериментах с 20-мкм мишенью, измеренная интерферометром белого света, составила 1,5 мкм. В фольге толщиной 20 мкм откол происходит с гладким разрывом зерен кристаллической структуры, а у фольги толщиной 100 мкм – по межзеренным границам. Учитывая, что расчетная амплитуда УВ в первом

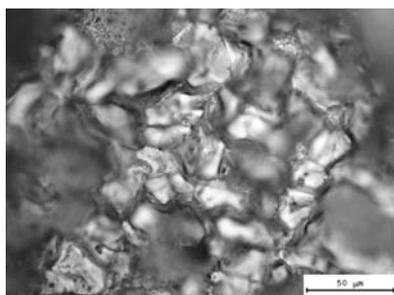
случае 140 кбар, можно предположить, что здесь реализовались условия откола, близкие к теоретическому пределу прочности алюминия, который оценивается в ~ 100 кбар. Динамические параметры откола регистрировались в экспериментах новой методикой измерений, использующей контактный зеркальный сенсор (КЗС). Это тонкая лавсановая пленка с зеркальным напылением, локально разрушающаяся от соприкосновения с фрагментами откола. КЗС освещался специальным зондирующим лучом, который после отражения регистрировался телекамерой. По характеристикам света, отраженного от КЗС, определяли размеры и скорость фрагментов откола, который представляет собой облако быстро летящих мелкодисперсных частиц. Чис-

ленная обработка фотографий контактного сенсора, сделанных с помощью ПЗС-матрицы телекамеры, позволяет получить распределение облака откола по размеру частиц и скорости их полета. Таким образом, в результате экспериментов показано, что при прямом воздействии на тонкие плоские мишени сверхкоротких лазерных импульсов длительностью 500 фс возможно возбуждение в них сильных УВ с длительностью ~ 1 нс, что позволяет изучать прочностные характеристики материалов в условиях, близких к их теоретическому пределу прочности.

В исследованиях по управлению термоядерному синтезу используются полые сферические оболочки из стекла или полимера. Они служат в качестве баллона и толкателя при

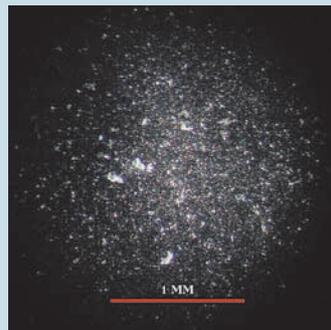


Толщина фольги 20 мкм

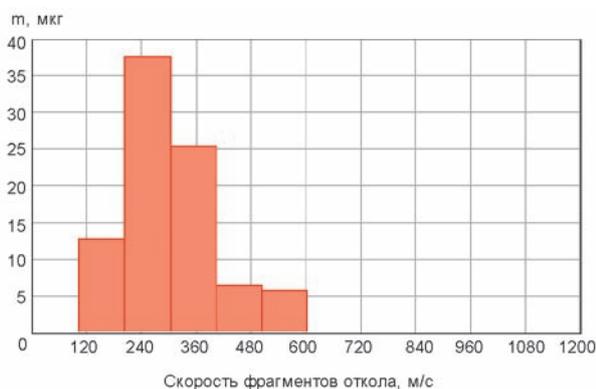
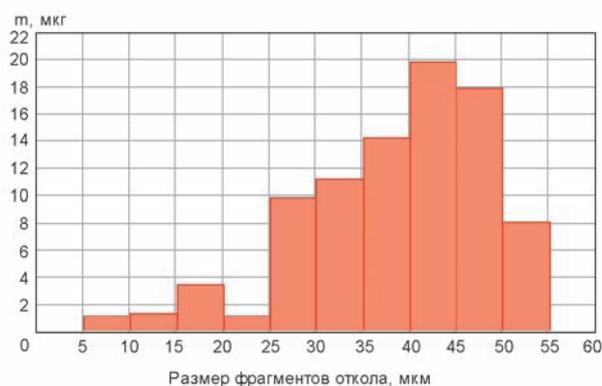


Толщина фольги 100 мкм

Фотографии поверхностей откола, полученные на металлографическом микроскопе. Длина масштабной линии – 50 мкм



Фотография контактного сенсора после взаимодействия с облаком частиц откола. Длина красной линии соответствует 1 мм



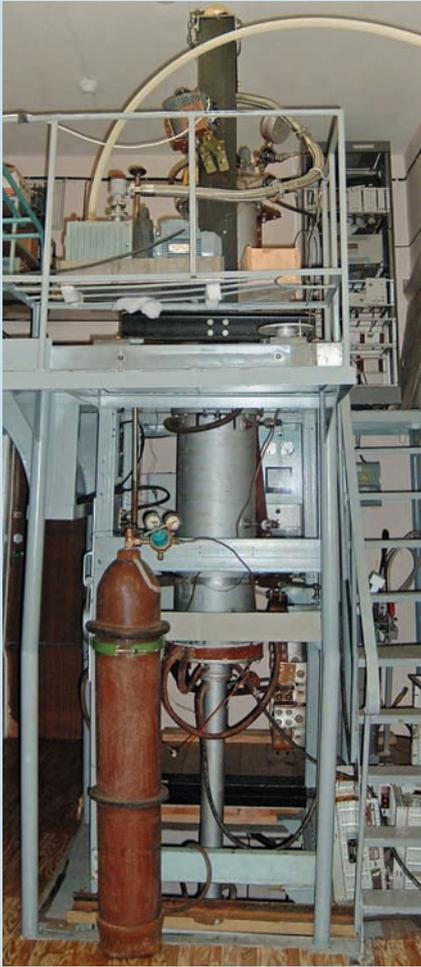
Распределение массы облака откола по размеру частиц и скорости их полета

сжатию смеси дейтерий-тритий (термоядерного топлива). Для изготовления таких оболочек сконструирована и изготовлена установка.

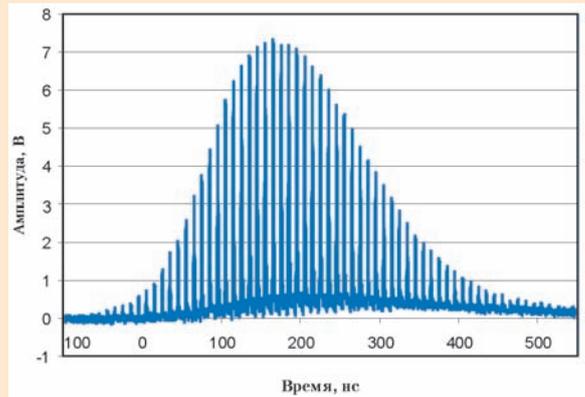
На установке «Искра-5» реализован режим работы, при котором на выходе установки

получается последовательность нескольких десятков мощных лазерных импульсов субнаносекундной длительности, следующих друг за другом через 10 нс. Цуг из 40 лазерных импульсов по уровню 0,15 имеет энергию до 300 Дж и длительность оди-

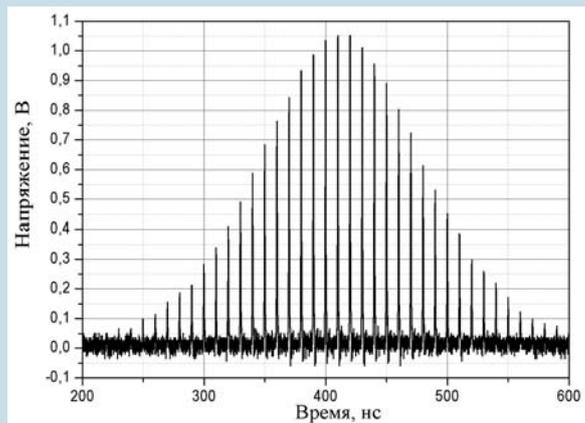
ночного импульса в цуге  $\approx 0,5$  нс. Выполнены эксперименты по конверсии цуга лазерных импульсов в цуг рентгеновских импульсов, который по форме огибающей и длительности одиночного импульса воспроизводит параметры лазерного цуга.



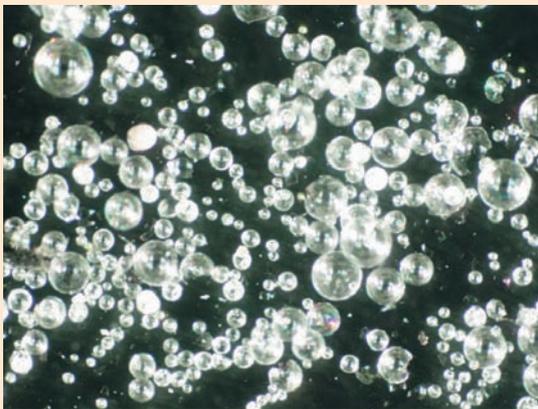
Установка для получения полых микросфер



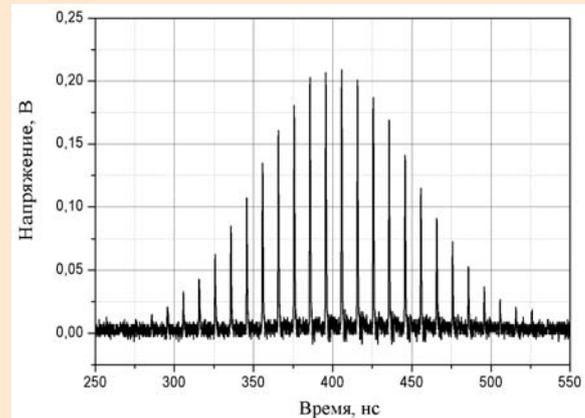
Осциллограмма цуга из 39 импульсов по уровню 0,15 с энергией 170 Дж



Осциллограмма цуга лазерных импульсов



Микросферы



Осциллограмма цуга рентгеновских импульсов