

РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

3.1. Номер Проекта

15-52-45116

3.2. Название Проекта

Взаимодействие длинных и коротких интенсивных лазерных импульсов с малоплотными пенами для получения эффективных рентгеновских источников и гидродинамических исследований

3.3. Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы

02-610, 02-205

3.4. Объявленные ранее цели Проекта

Будут определены возможности для исследований при повышенных мощностях лазерного излучения до 1016 Вт/см² при применении лазеров 1Дж/1пс и 30Дж/300пс при взаимодействии с веществом малоплотных мишеней. Новые разработанные диагностики позволят выполнять сравнительные эксперименты по облучению разных типов мишеней, специально разработанных для данной установки. Планируется ввести в эксперимент мишени из металлических кластеров, полимерных аэрогелей и многослойные мишени. Техники создания, манипуляций, доставки в лазерных фокус каждого из трех типов указанных мишеней для условий относительно малой энергии лазеров большей частью должны быть разработаны и реализованы для эфемерной структуры и малых абсолютных толщин. Нахождение вариантов создания тонких слоев малоплотных мишеней (для краткости называемых пенами) с регулярной структурой в виде аэрогелей, металлических кластерных слоев и многослойных мишеней будет значительным результатом проекта, до сих пор не достигнутым. Далее последуют эксперименты с целью получения данных по конверсии в мягкое и жесткое рентгеновское излучение, по диагностической подсветке плазмы рентгеновской мишенью, по прозрачности плазмы для лазерного света и рентгеновского излучения, по ударным волнам и неустойчивостям в плазме с намерением извлечь данные для материалов под действием высокой плотности энергии, достигнуть астрофизических параметров в лаборатории, повысить устойчивость и однородность распределения энергии в плазме. Это поисковая часть. Важность и баланс полученных в будущем данных не вполне предсказуемы заранее, но именно понимание возможностей лазерного оборудования и созданных мишеней в имеющихся диапазонах параметров, условий осуществимости дальнейших экспериментов будет вторым важным результатом данного проекта. Эти данные будут оригинальны, проверяемы и востребованы в других коллективах, занятых исследованиями лазерной плазмы.

3.5. Полученные в ходе выполнения Проекта важнейшие результаты

В процессе выполнения проекта были разработаны для участвующих в проекте лазеров и впервые предоставлены для облучения в близких условиях 3 серии широко варьирующихся по плотности, удельной массе и атомному составу мишеней. Это порошково-пенные мишени дейтерированного полиэтилена (CD₂)_n и поли-альфа-метилстирола с атомным составом, но не структурой, соответствующим формуле (CH₂)_n Рис. 1-4; пенные металлические слои на металлической или полимерной пленке, Рис. 5-6; пластиковые аэрогели со свободной поверхностью (Рис.7-8) или с металлической фольгой с одной стороны, Рис. 9. Для мишеней, имевших подложку из

фольги, решена проблема изготовления и стабилизации слоя получаемой пленки (тончайшие из них - до 0,5 микрометра).



Рис. 1. Мишень дейтерированного полиэтилена твердотельной плотности на шайбе-держателе 8 мм диаметра



Рис.2. Мишень CD2 с плотностью 1/3 от сплошного пластика, толщиной 250 мкм на шайбе 8 мм диаметра

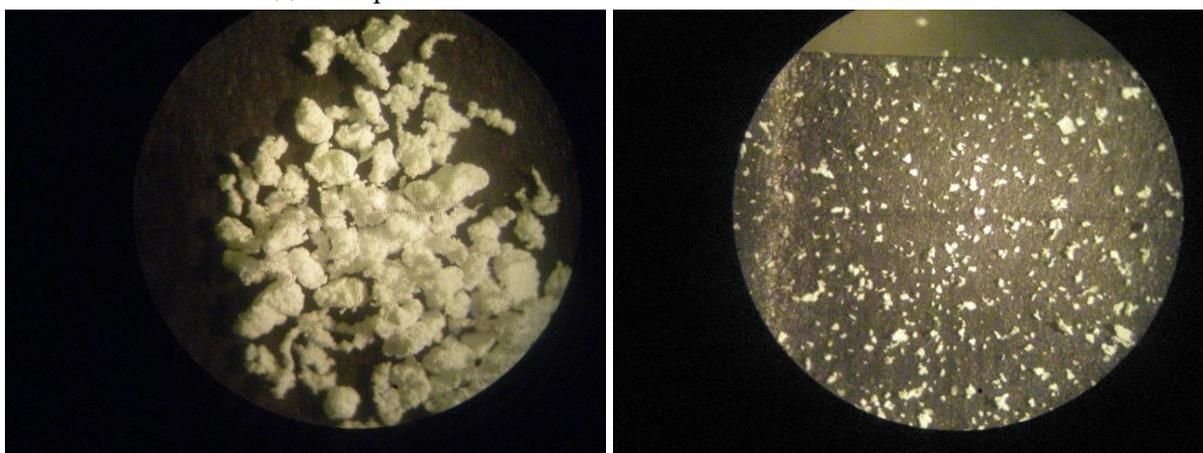


Рис.3. Дейтерированный полиэтилен (слева). После размола (справа)



Рис. 4. Синтезированный и пересаженный полимер ПАМС

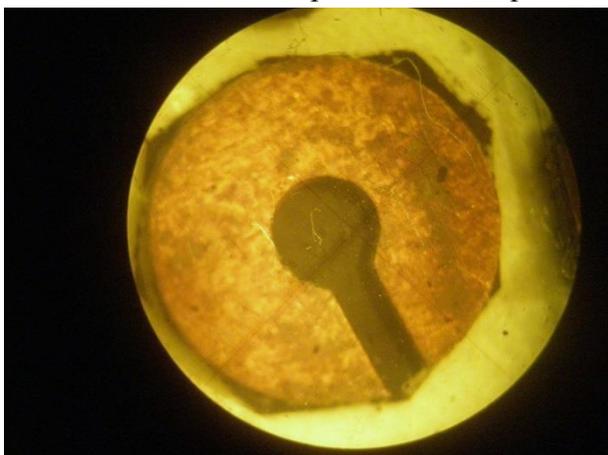


Рис. 5. Малоплотный висмут плотностью 1/100 толщиной 80 мкм на подложке из тефлона.

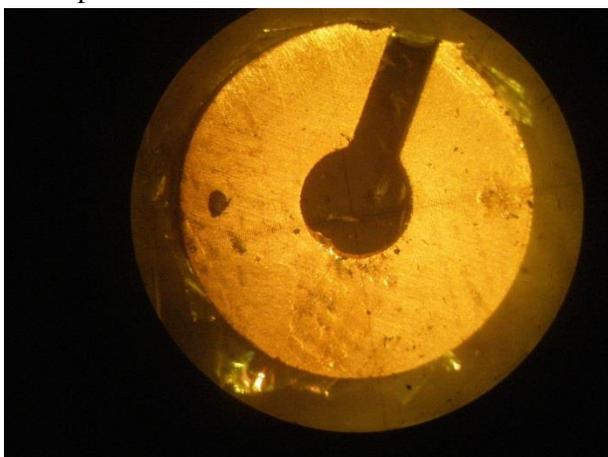


Рис. 6. Мишень из малоплотного золота плотностью 1/80 сплошной на подложке из нитрата целлюлозы.



Рис.7. Образец ТАЦ плотностью 4 мг/куб.см.

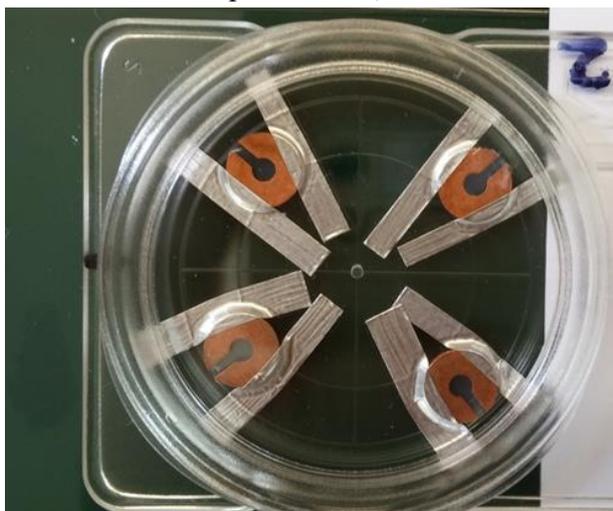


Рис. 8. Образцы ТАЦ с плотностью докритической для лазерного света 1,06 мкм 2 мг/куб.см. в транспортировочном контейнере.



Рис. 9. Образец мишени из 4 мг/куб.см. ТАЦ со слоем 5 мкм алюминия на задней стороне мишени для исследований ударной волны.

Общепризнано, что в процессе подготовки мишени к лазерному эксперименту трудоемкость их изготовления и сборки дополняется вдвое большей трудоемкостью измерений параметров [Промежуточный отчет по проекту за 2015 год] мишеней, это особенно касается мишеней с трехмерной структурой (Рис.10). В данном цикле работ выполнялись как исследовательские измерения при разработке и оптимизации мишеней, так и регулярные измерения параметров веществ, заготовок и изготавливаемых мишеней при подготовке к экспериментам по лазерному облучению мишеней [И. В. Акимова, А. А. Акунец, Л. А. Борисенко, А. И. Громов, Ю. А. Меркульев, А. С. Орехов, А. А. Шапкин, и Н. Г. Борисенко, "Вопросы мониторинга ультрадисперсных малоплотных слоев для мишеней ИТС", Доклад XLII Международная конференция по физике плазмы и УТС, 9-13 февраля 2015 г., Звенигород, Россия. Тезисы докладов (Russia, 2015), pp. 148]. Исследования выполнялись на стандартном оборудовании с применением оригинальных приемов, практически всегда необходимых в работе с лазерными мишенями. Регулярные измерения требовали модификаций стандартного оборудования и способов подготовки образцов, поскольку в арсенале российских специалистов отсутствуют распространенные в лабораториях США сборочные станции для мишенных работ. Так,

для одной только отработки на серии образцов ПАМС, которые были синтезированы методом низкотемпературной катионной полимеризации, выполнены измерения методами ядерного магнитного резонанса, рентгенофазового анализа, термогравиметрического и дифференциально-термического анализа, в том числе для термодеструкции. Это позволило иметь образцы ПАМС для получения методом микрокапсулирования полых сферических оболочек диаметром до 2,3 мм с толщиной стенок от 10 до 60 мкм. При изготовлении применялись различные составы и концентрации растворов ПАМС и варьировался состав и концентрация компонентов водно-солевой среды - поливинилового спирта и солей аммония. Отверждение капель-оболочек проводили при нагреве в различных температурно-временных режимах. Методами СЭМ и профилометрии проведена оптимизация для получения сплошных сферических, эллиптических и даже малоплотных полимерных образцов, которые только и были целью в этом проекте, т.к. после получения детальных данных по эмиссии ионов нам захотелось иметь несколько пенных полусфер/полуэллипсов для дальнейших экспериментов (Рис. 11).



Рис. 10. Изображения образцов мишеней со свидетелями процесса нанесения пены из малоплотного золота для последующего разрушающего контроля толщины и плотности пены в мишени.

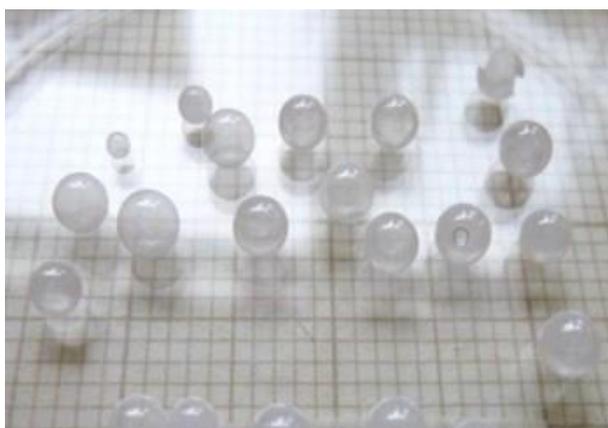


Рис.11. Сферические оболочки из ПАМС с системой пузырьков для создания вспененных сферических оболочек

На разработанных мишенях, в том числе пробегающих значения по плотности от докритической до сверхкритической, проведены эксперименты с длинными (2,5 нс по полувысоте) и короткими (500 пс) лазерными импульсами с потоками энергии, фокусируемой на мишени, до плотностей $>10^{14}$ Вт/см² и сравнимыми энергиями до 30

Дж в экспериментах отчетного периода. На рисунке 12 приведена схема эксперимента по облучению пенных мишеней и диагностики получаемой плазмы. В разных экспериментах задействовали также калориметры вместо фотодиодов и управления профилем пучка, а также регистрацию тенеграм на второй гармонике и рентгеновская ЭОК вместо спектрометра ионов и осциллографа В исследованиях с длинным импульсом использовалась установка «Канал-2» [Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., Starodub A.N. J. Russian Laser Research, 25, 79 (2004)] и диагностический комплекс в составе канала для исследования излучения плазмы на основе спектрографа; оптическая система измерения углового разлета плазмы и рассеяния лазерного излучения в диапазоне 90 градусов по углу и 0,4-1,1 мкм по спектру; калориметрической системы.

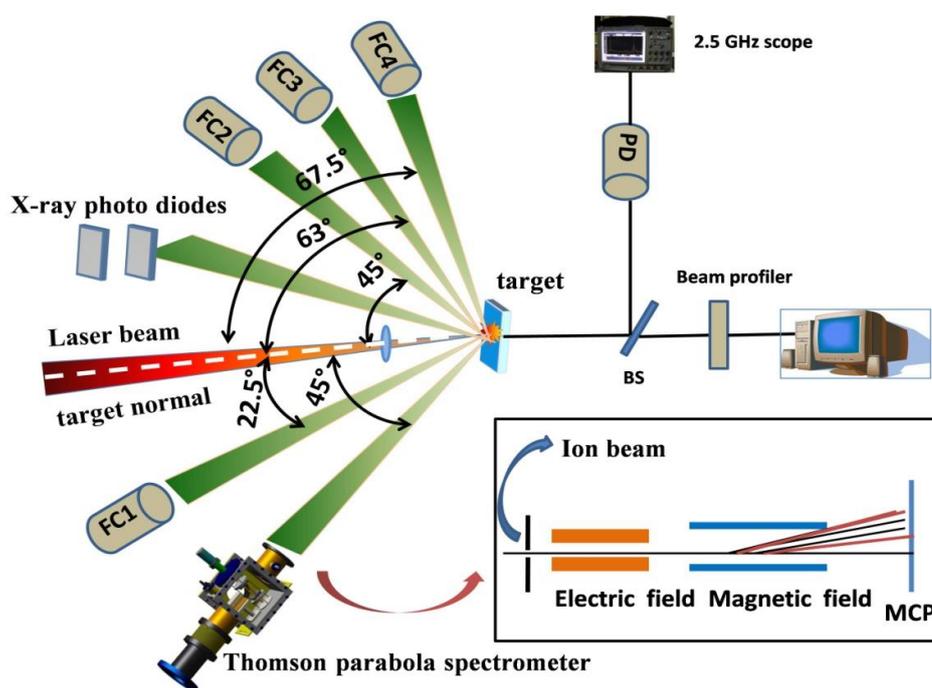


Рис.12. Базовая схема эксперимента по облучению пенных мишеней длинными или короткими лазерными импульсами

При этом получены следующие результаты, частично, поскольку не все обработано, вошедшие в публикации по проекту:

Измерениями баланса энергии, получены данные по прозрачности плазмы из полимерных пенных мишеней в различных условиях. Прозрачность до 70%, достигнутая в лазерных экспериментах с длинным импульсом, не достигалась в экспериментах с коротким лазерным импульсом, где в пенных мишенях преобладали процессы поглощения, достигавшие 60% от падающей лазерной энергии. Обнаружено профилирующее действие на лазерный импульс (укорочение на полувисоте) прохождения его сквозь мишени из полимерных аэрогелей (Рис. 13), максимально выраженного для пены 2 мг/см³ плотности и 1000 мкм толщины, где импульс укорачивается почти вдвое.

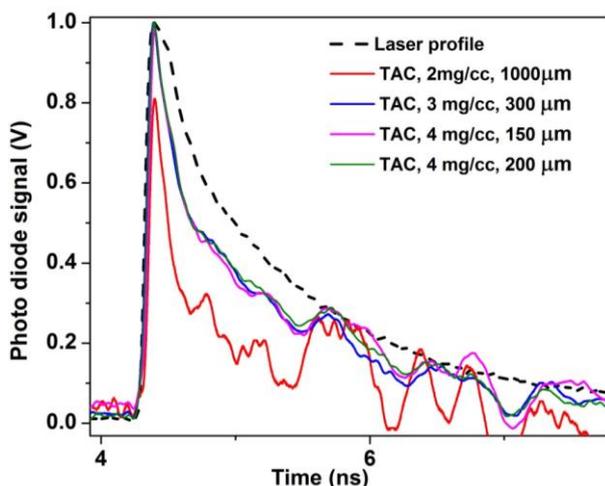


Рис.13. Временной профиль лазерного импульса после прохождения сквозь плазму из малоплотного ТАЦ для разных плотностей мишеней.

Излучательная способность полимерных аэрогелей в рентгеновском излучении плазмы отчетливо растет с уменьшением плотности от 10 мг/см³ до 4 мг/см³ в диапазоне от 4 до 16 кэВ и с уменьшением плотности от 10 до 2 мг/см³ в диапазоне 5-8,3 кэВ Рис. 14-15. Достигнуто двукратное увеличение при переходе к плотности 2мг/см³ по сравнению с плотностью 10 мг/см³.

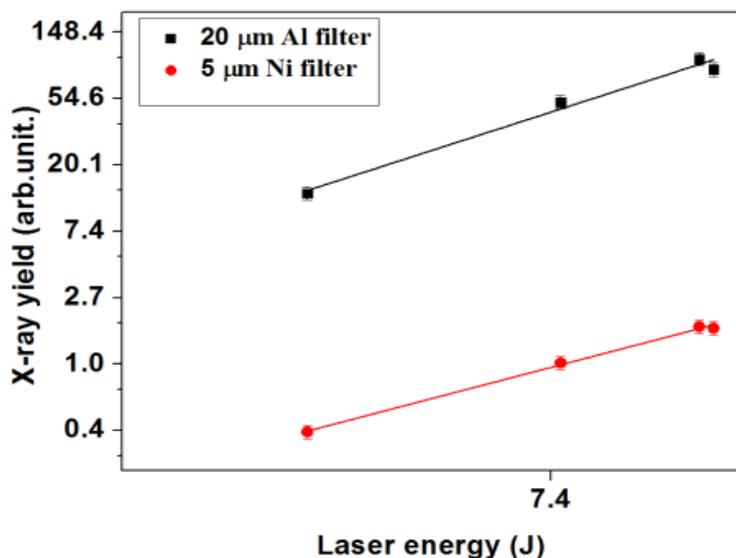


Рис. 14. Изменение сигналов двух рентгеновских диодов, накрытых 20 мкм Al фильтром (пропускание 4-16 кэВ) и 5 мкм Ni фильтром (пропускание 5-8 кэВ) в зависимости от энергии лазера на поверхности 4 мг/куб.см. ТАЦ мишени.

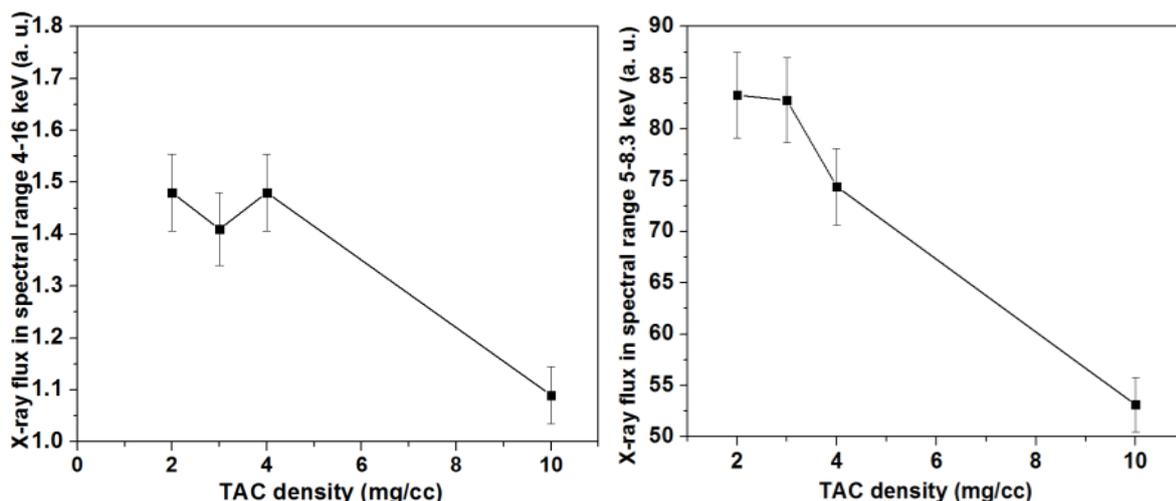


Рис. 15. Влияние плотности вещества мишени из ТАЦ на излучение рентгеновского излучения в диапазоне 5-8 кэВ (слева) и 4-16 кэВ (справа) при энергии в лазерном импульсе 6.18 Дж.

Получены временные зависимости амплитуды ионных сигналов времяпролетными методами в плазме с разной исходной плотностью полимерных пен. Уменьшение и сглаживание амплитуд, а также расплывание графиков во времени имеет место при снижении плотности ниже критической (для 2мг/см³) и продемонстрировано (Рис.16-17) для разных углов к нормали поверхности мишени.

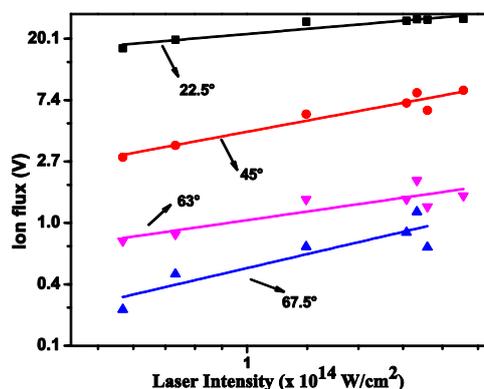


Рис.16. Изменение сигналов четырех ионных коллекторов в зависимости от интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени из ТАЦ плотностью 4 мг/куб.см.

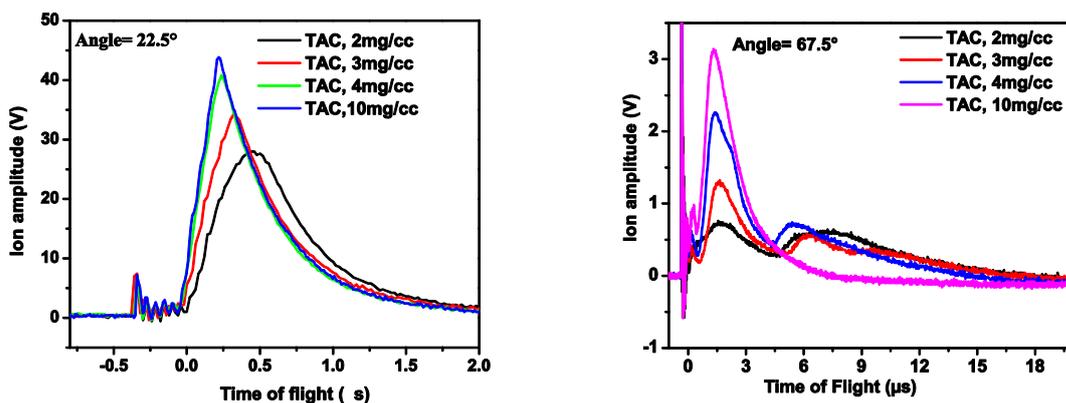


Рис. 17. Сравнение сигналов ионных коллекторов (22.5 слева, 67.5 справа) для разных плотностей мишеней из ТАЦ при одинаковой энергии лазера 4.9 Дж.

Угловые измерения потока ионов и скоростей ионов из аэрогелей дают существенно большие потоки и скорости при повышении плотности аэрогелей выше критической ($> 3 \text{ мг/см}^3$) и демонстрируют одинаковый характер направленности источника ионов для всех плотностей (Рис. 18).

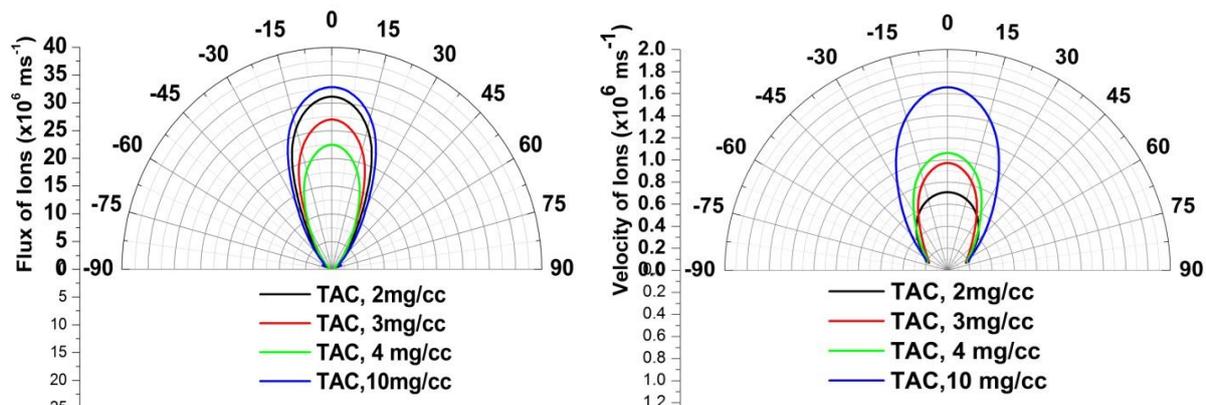


Рис. 18. Угловое распределение потока ионов (слева) и скоростей ионов (справа) для различных плотностей вещества мишеней из ТАЦ при энергии лазера около 4.9 Дж.

Малые потоки ионов и относительно небольшие их скорости при исходных плотностях пен 2 мг/см^3 вкуче с увеличением излучения в жестком рентгеновском диапазоне могут быть связаны с качественно разными процессами переноса энергии. Сверхзвуковой и объемный нагрев докритических пен, отсутствие потерь на гидродинамическое движение ионов и их ускорение могут обуславливать особенности существования ударных волн при докритической плотности мишени. Для экспериментов с ударными волнами подготовлены для февральской серии экспериментов мишени со слоем ТАЦ на обратной стороне мишени, показанной на рисунке 9.

В полимерных пенных мишенях наблюдается смещение максимумов энергий ионов в большую сторону при превышении критической плотности в исходной мишени и дальнейшем ее увеличении. Также рост смещения пиковых энергий потока ионов наблюдается при увеличении энергии лазерного излучения на мишени. Вообще хотя поиск источников ионов и нейтронов заявляется в каждом введении в статьи по взаимодействию лазерного света с мишенью, но детальные исследования ионов из пен не слишком распространены. Здесь мы постарались сделать возможно более разнообразные ионные измерения и специально начали эксперименты с CD2 Рис. 19-20, имеющим в своем составе изотопы, участвующие в термоядерных реакциях.

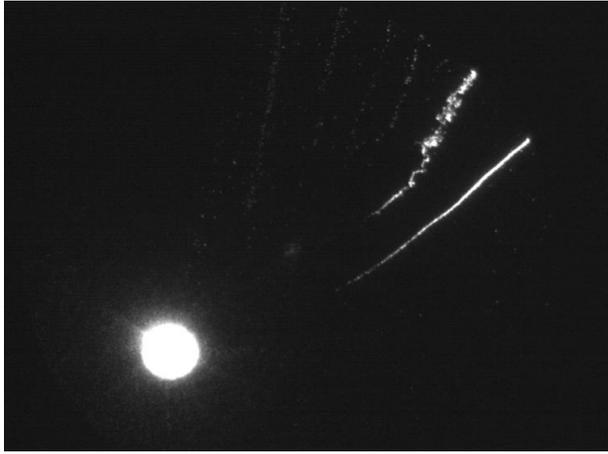


Рис 19. Изображение с масс-спектрометра для ионов H+1 и D+1.

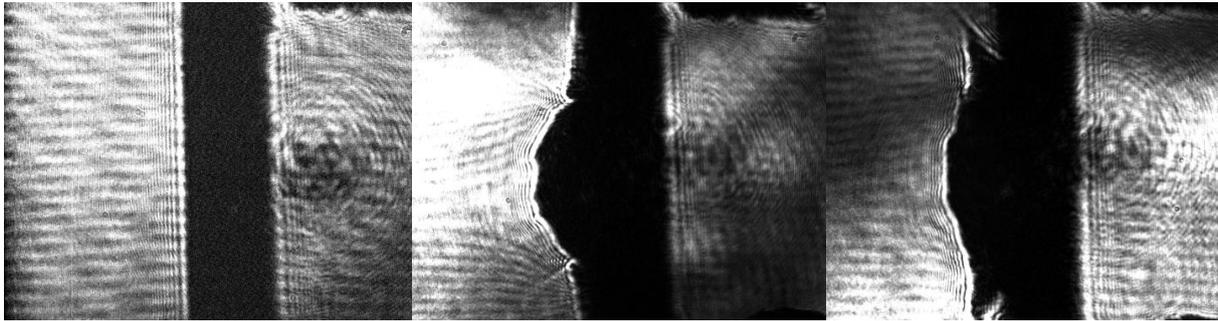


Рис. 20. Изображения разлета плазмы из мишени CD2. Первый кадр – до лазерного импульса, второй кадр – 2 нс после начала лазерного импульса, третий кадр – 8 нс после начала действия лазерного импульса.

Получен большой массив данных Рис. 26-34 по эмиссии ионов из плазмы полимерных пен. Часть из них мы начали обрабатывать и обсуждать в принятой к публикации статье [Interaction of high power laser with polymeric low density foam targets. Channpriti Kaur, S. Chaurasia, N. G. Borisenko*, A. Orekhov, P. Leshma, V.G. Pimenov, A. Akunets, M. N. Deo. Принято в печать журналом «Квантовая электроника», 2017, №3]. Но еще больший объем работ по комплексной интерпретации и описанию имеющихся измерений предстоит выполнить.

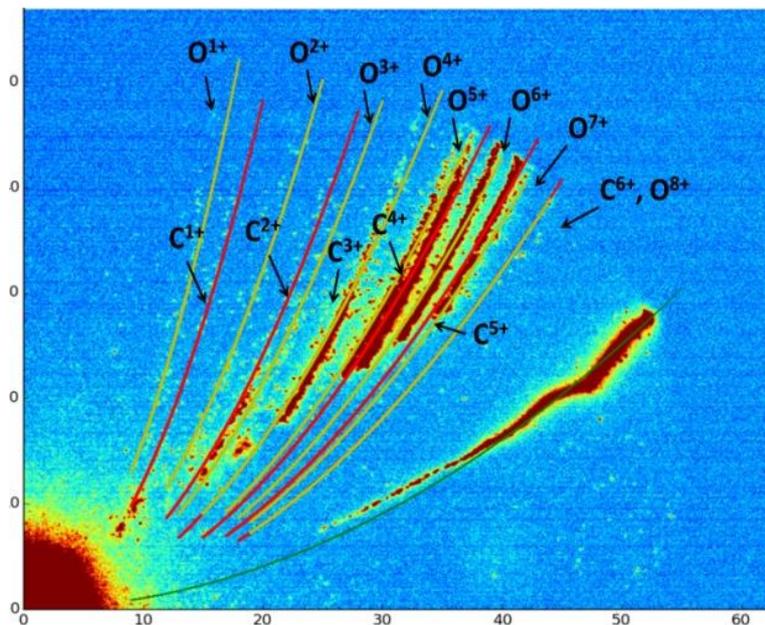


Рис. 26. Изображение с масс-спектрометра для плазмы из малоплотного ТАЦ плотностью 2 мг/куб.см. с наложенными расчетными кривыми для разных ионов.

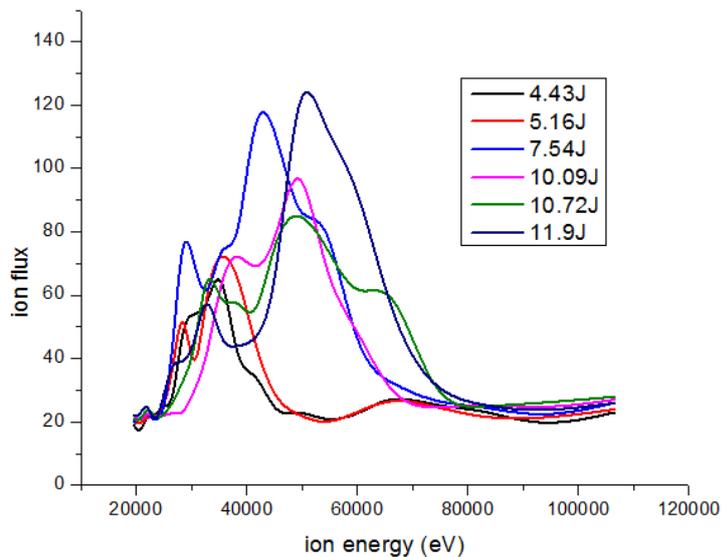


Рис. 27. Распределение ионов O+4 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

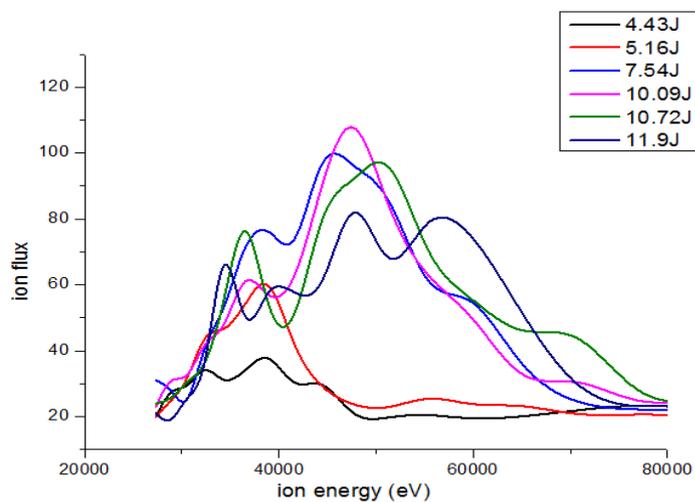


Рис. 28. Распределение ионов O+5 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

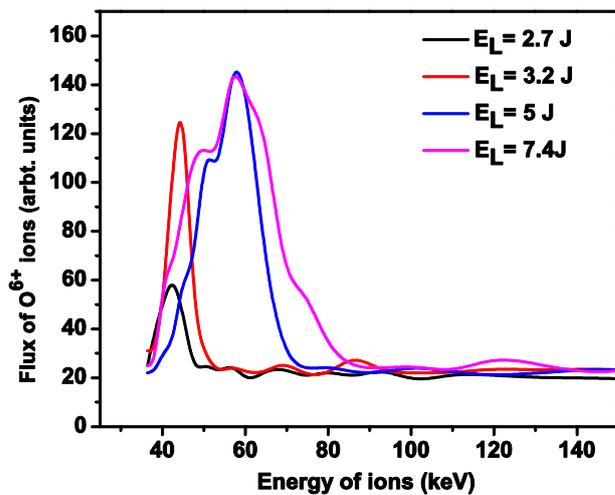


Рис. 29. Распределение ионов O+6 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

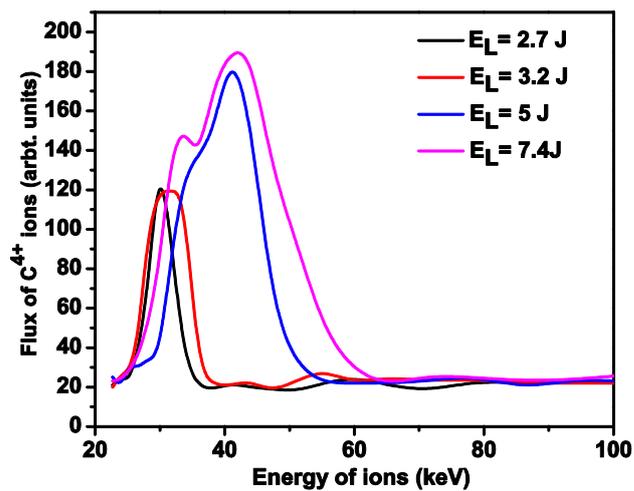


Рис. 30. Распределение ионов C+4 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

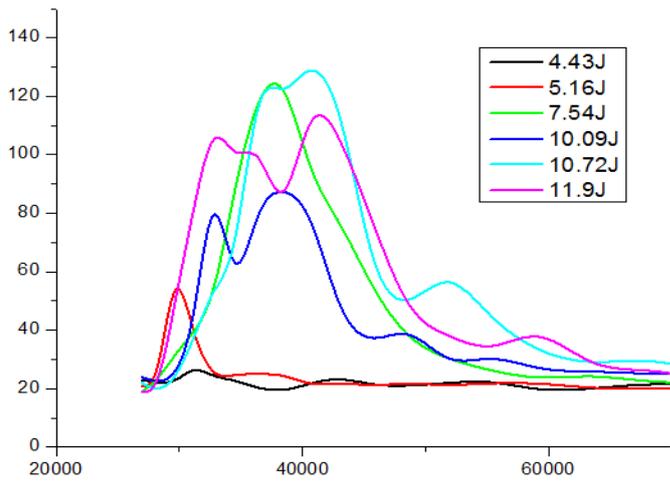


Рис. 31. Распределение ионов C+5 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

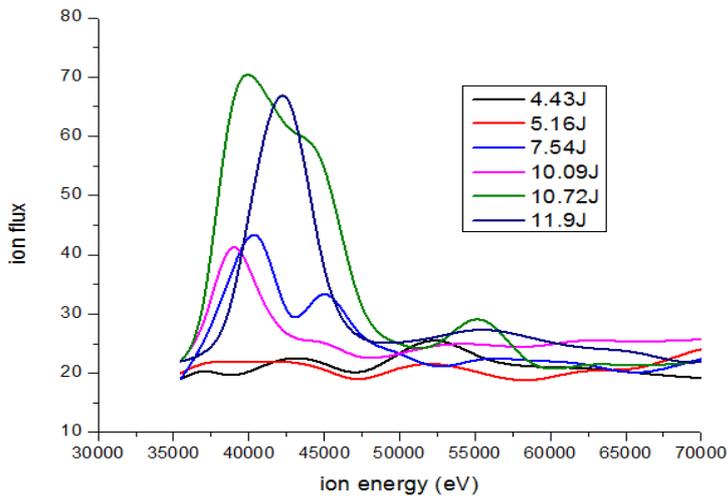


Рис. 32. Распределение ионов C+6 из плазмы из 4 мг/куб.см. ТАЦ по энергии для разных энергий лазерного импульса

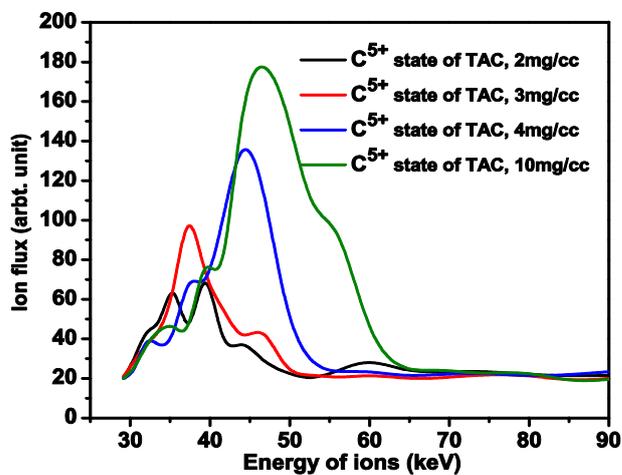


Рис. 33. Распределение ионов C+5 из плазмы из ТАЦ по энергии в зависимости от плотности вещества мишени.

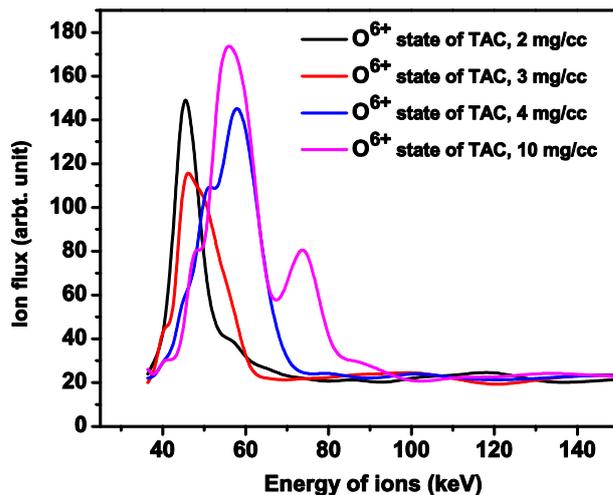


Рис. 34. Распределение ионов O^{6+} из плазмы из ТАЦ по энергии в зависимости от плотности вещества мишени.

Исследования устойчивости плазмы мишеней пен и сплошных веществ дополнены разнообразными картинками теневых фотографий (Рис. 20), допускающих количественные сравнения и расчеты продольного и поперечного движения волн и веществ. Обнаружены частые для именно полимерных мишеней высокоэнергичные потоки вещества (взрывающиеся пузыри, средний кадр рис.20) на начальных стадиях разлета плазмы. При этом основная мишень демонстрирует ровное гидродинамически спокойное течение Рис. 20-21. Начаты расчеты для сравнения с теоретическим описанием таких течений пен. Отличное поведение демонстрируют металлические пены Рис. 22. Для них характерно возникновение почти периодических возмущений фронта непрозрачности, при наличии долгого интегрально единого движения вширь и вдаль. Характер не слишком зависит от металла и заметно отличен от картины сплошного вещества, массивного или фольги.

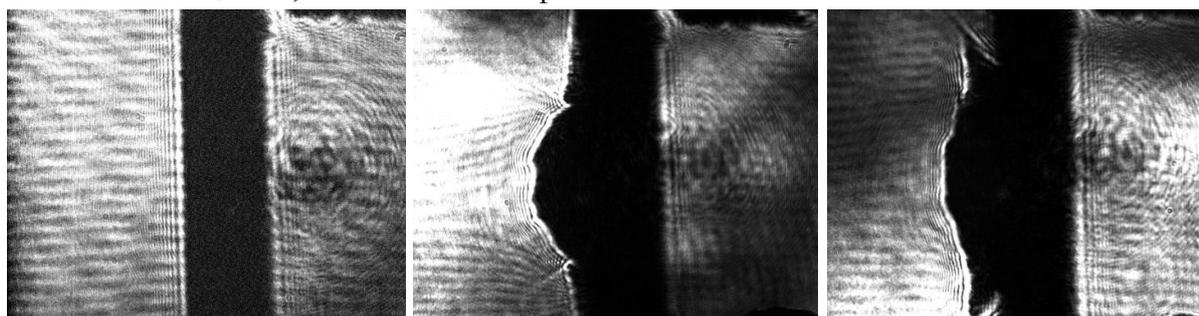


Рис. 20. Изображения разлета плазмы из мишени CD2. Первый кадр – до лазерного импульса, второй кадр – 2 нс после начала лазерного импульса, третий кадр – 8 нс после начала действия лазерного импульса



Рис. 21. Изображения разлета плазмы из мишени из ТАЦ плотностью 3 мг/куб.см. и толщиной 300 мкм. Первый кадр – до лазерного импульса, второй кадр – 5 нс после начала лазерного импульса, третий кадр – 11 нс после начала действия лазерного импульса.



Рис. 22. Изображения разлета плазмы из малоплотного висмута толщиной 70 мкм плотностью 1/100 сплошной на подложке из тефлона толщиной 5 мкм.. Первый кадр – до лазерного импульса, второй кадр – 2 нс после начала лазерного импульса, третий кадр – 8 нс после начала действия лазерного импульса.

Эксперименты с металлическими мишенями в сравнении с малоплотными металлами того же состава подтвердили ожидаемое из анализа литературы увеличение выхода рентгеновского излучения из лазерной плазмы первоначально пенной мишени. Не нашло экспериментального подтверждения снижение излучательной способности пен золота за счет присутствия примесей с низким атомным номером. Возможное объяснение – в используемой технике изготовления, обеспечивающей состав пены близкий к исходному чистому металлу. Так более длительное свечение пены золота на Рис.23-24 по данным не оптимально расположенной регистрирующей камеры РЭОК в сравнении с плотным золотом рис 25, не дает данных худшего свечения более малоплотного образца, что должно было бы случиться, появившись примеси в структуре дисперсии с большей поверхностью.

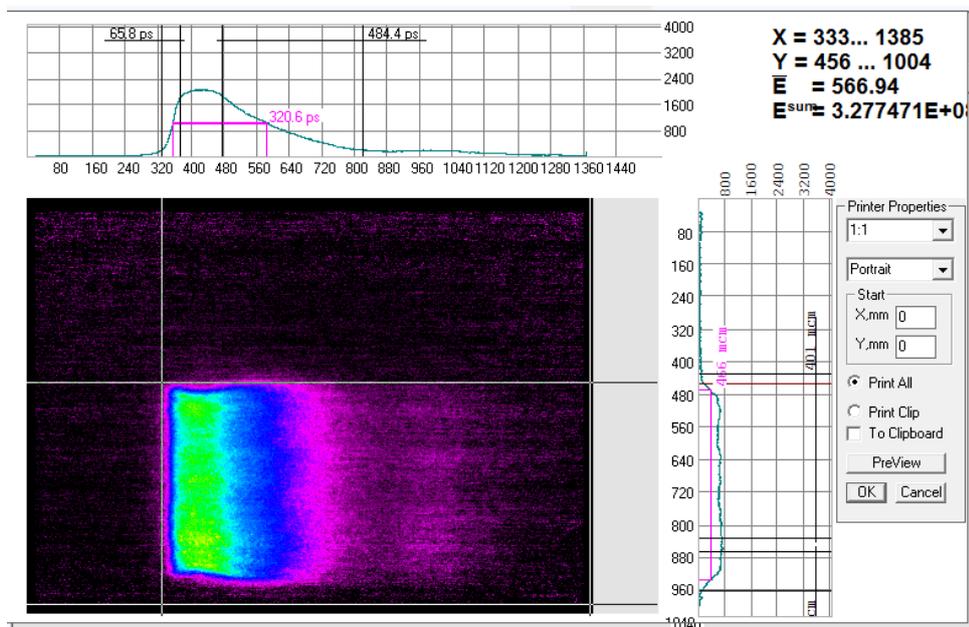


Рис. 23. Сигнал с рентгеновской стрик-камеры для мишени из золота плотностью 1/100 сплошной (Shot 12)

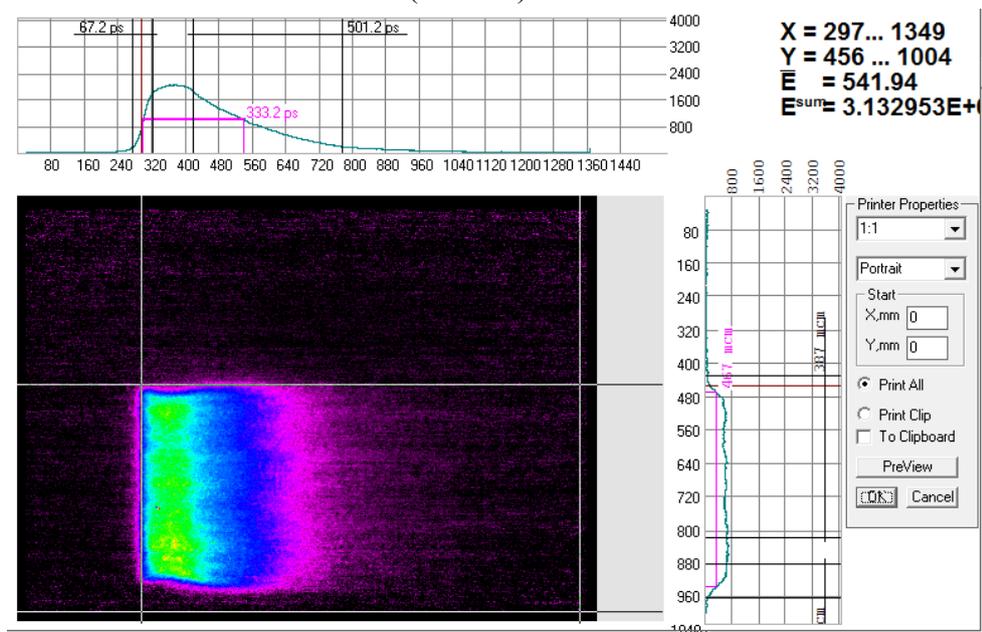


Рис. 24. Сигнал с рентгеновской стрик-камеры для мишени из золота плотностью 1/200 сплошной (Shot 9)

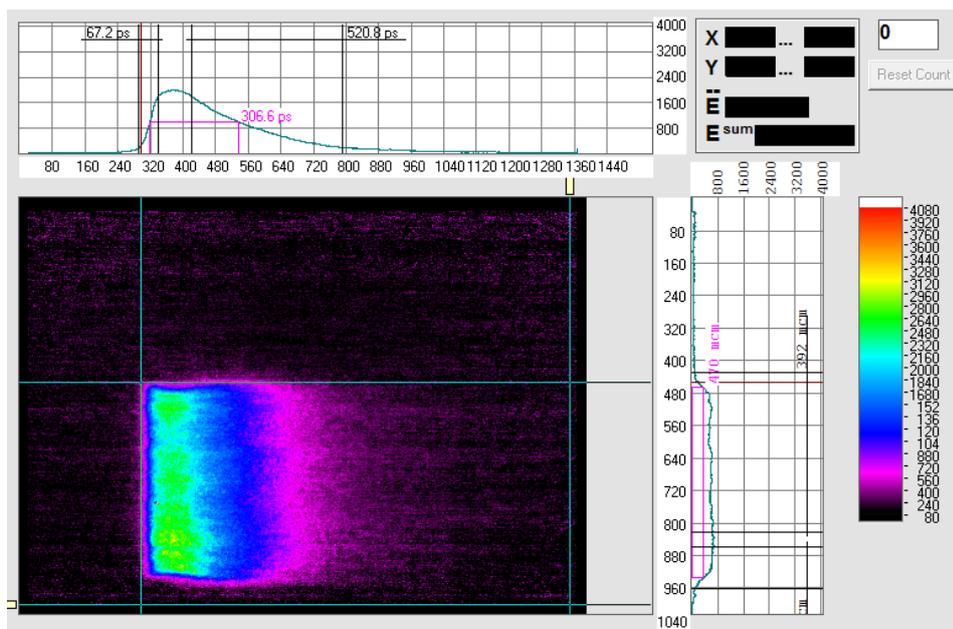


Рис.25. Сигнал с рентгеновской стрик-камеры для мишени из сплошного золота (Shot 16)

Для изучения процессов передачи энергии в плотные слои плазмы нам хотелось подойти к экспериментам, когда свет, остановленный мишенью на ее поверхности, преобразует значительную долю своей энергии в энергию релятивистских электронов (МэВ ных диапазонов), таким образом перенося ее в глубокие слои пены и более плотного слоев. Для этого выполнялось моделирование набора энергии/разогрева свободных электронов в плазме. На рисунке 35 показаны рассчитанные функции распределения электронов в различные моменты времени. Для соответствующих экспериментов в феврале на пикосекундном лазере (1ТВт) в BARC изготовлены мишени постоянной погонной массы с диапазоном плотностей 2-30 мг/см³.

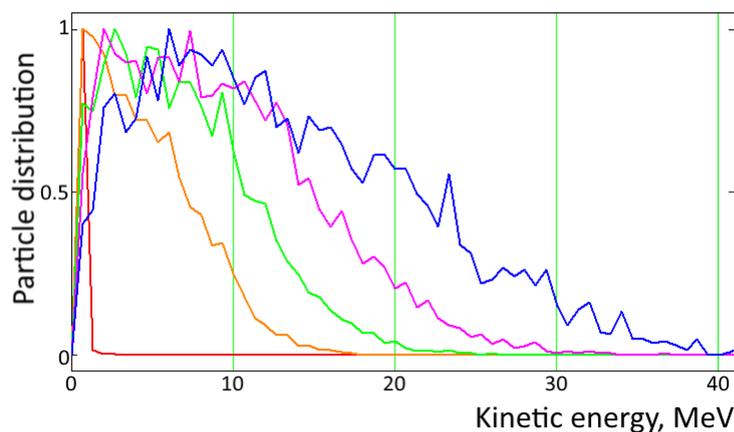
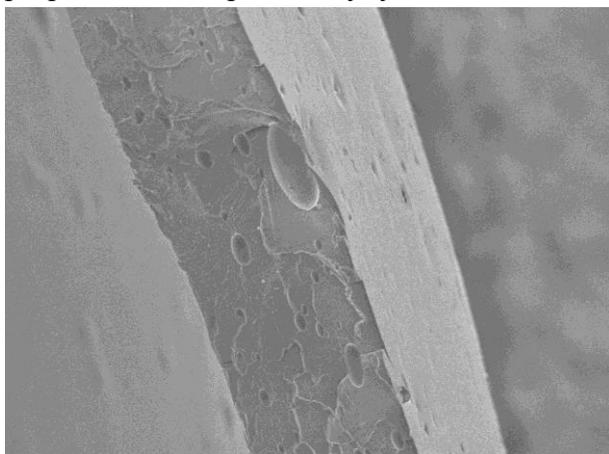


Рис. 35. Эволюция нормированной функции распределения электронов по энергиям в различные моменты времени (0.7 пс; 1.4 пс, 1.6 пс, 2 пс, 3.5 пс)

Разнообразие разработанных малоплотных, по-разному структурированных мишеней, представляет и разнообразные возможности исследовать с помощью таких мишеней плазму с температурными, плотностными и энергетическими параметрами, близкими к плазме астрофизических объектов. Поскольку возможное физическое

моделирование обладает в масштабах лазерной плазмы несферической геометрии слишком большой разницей пространственно-временных параметров по сравнению с астрофизическими объектами и ограниченными возможностями сравнения схожих параметров, то основными предложениями могли бы стать применение указанных мишеней для доскональных измерений/проверки выделенных свойств/коэффициентов для плазмы с целью дальнейших расчетов и сравнения с наблюдениями природных объектов или явлений. А для этого разработанные в проекте мишени, которые можно изготовить с желательным набором параметров, представляют отличные возможности.

Мишени сферической геометрии (Рис.36) и условий облучения более подходят для моделирования компактных объектов целиком, но и для них тоже требуется уточнение происходящих отдельных явлений без завязывания в сложный узел нераздельных проявлений интегрального поведения плазмы. Да и направление разработок материалов будущих необходимых мишеней от этих измерений зависит.



36. SEM изображение скола оболочки из ПАМС.

У индийских партнеров планирование и работы производятся в соответствии с нашим первоначальным планом на 2 года до апреля 2017. Для запланированных в феврале-марте экспериментов на тераваттном лазере созданы и измерены мишени одинаковой погонной массы в диапазоне плотностей от 2 до 30 мг/см³. Для продолжения лазерных экспериментов с ударными волнами в плазме с наличием пенных слоев подготовлены мишени со слоями разной плотности.

Мы полностью выполнили цели исследования, заявленные в заявке по проекту по части исследований мишеней и выполнения большинства лазерных экспериментов. Из-за переезда в лабораторию в другом корпусе мы лишь поменяли исследования на лазере в ФИАН и исследования на пикосекундном лазере в BARC местами в календарном плане (по просьбе колабораторов). Накоплен большой материал, требующий обработки и подготовки новых публикаций. Мы могли бы выполнить эти работы при продлении проекта на еще один год.

3.6. Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Полученные результаты являются оригинальными, получены на оригинальных установках и измерены по оригинальным методикам. Малоплотные полимерные и металлические слои с заданными под параметры лазерных установок размерами, тонкой 3D структурной организацией и конструкционными элементами в нанодиапазоне не являются коммерчески доступными из-за невозможности универсальных

разработок в связи с сильно различающимися требованиями в зависимости от установки и от выполняемого эксперимента. В первый год выполнения проекта проведены технологические опыты для создания мишеней к лазерным выстрелам при запланированных общей энергии излучения на уровне 30 Дж в 300 пс, 2 Дж в 8 нс и, возможно, 1 Дж в 1 пс. Проведены подбор методов изготовления и измерения параметров тонкопленочных подложек для создания пенных слоев (коммерческие неудовлетворительны из-за рельефа поверхности). Параметры полимерных слоев, в том числе дейтерированного полимера, обеспечили ранее не захваченный в наших ранних исследованиях диапазон плотностей вплоть до 300 мг/см³. В металлических пенах достигнут переход к 20-40 нм структурным элементам. Найдены методики, позволяющие изготавливать кратные плотности УДП металла для обеспечения заранее заявленных подходов к лазерным экспериментам, запланированным в апреле и конце июня 2016 в BARC Крупнейшие лаборатории мира в Великобритании (RAL), Франции (LULI), Японии (Osaka, ILE), и другие так же, как и мы, используют собственные мишенные разработки, сопоставимые с нашими результатами.

Выбранные направления исследований в данном проекте в части исследований гидродинамики и излучательных свойств плазмы под облучением имеющегося драйвера – почти обязательный этап исследований в любой исследовательской команде. Несмотря на это темы далеко не исчерпаны и по-прежнему востребованы. Хочется упомянуть здесь цикл работ, ведущихся в GSI, Дармштадт и посвященных исследованиям для целей непрямого облучения пен рентгеновскими лучами через облучение соответствующего конвертера [Hydrodynamic and radiative properties of low density foams heated by X-rays by O. N. Rosmej, T. Rienecker, R. Maeder, et al, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 57, Number 9]. Другой и более мощный лазер для создания рентгена из конвертера, однако, вопросы, задающиеся в исследованиях все те же: устойчивость плазмы из пены, прохождение излучения сквозь пену, скорость распространения энергии в плазме пенной мишени, поглощение, излучательная способность пен и другие рассматриваемые и у нас вопросы. И даже в этом случае решения этих вопросов для непосредственных применений в экспериментах с тяжелыми ионами и релятивистскими лазерными пучками пена пластикового аэрогеля оказывается не только объектом исследования, но и кандидатом на настоящий рабочий инструмент в перспективе. Устойчива, ярко излучает, допускает измерения общепринятыми методами и серийными приборами, дает повторяемые результаты, допускает оптимизацию и сравнение с экспериментами на других установках, в совпадающих методиках и с нашими экспериментами.

Существенным преимуществом рассматриваемой работы, как и большинства зарубежных исследований является теоретическая подготовка к эксперименту и их быстрая интерпретация впоследствии.

Мы будем стараться так же обрабатывать наши полученные данные.

3.7.1. Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта

Большинство опытов, проведенных в рамках данного проекта стали возможными постольку, поскольку были изготовлены и измерены мишени, сделавшие наблюдаемыми рассматриваемые явления. Это особенно касается докритических и критических плотностей пен, соответствующих при полной ионизации критической плотности в лазерной плазме. [Interaction of high power laser with polymeric low density

foam targets. Channpriti Kaur, S. Chaurasia, N. G. Borisenko*, A. Orekhov, P. Leshma, V.G. Pimenov, A. Akunets, M. N. Deo. Принято в печать журналом «Квантовая электроника», 2017, №3] Поскольку лазерная частота для облучения мишени является основной частотой излучения для неодимового лазера, то критической плотностью оказывается 3мг/см^3 пены, а в качестве подкритической использовали мишени 2мг/см^3 . Это почти в 2 раза превышает плотность воздуха при нормальных условиях. Изготовить твердые вещества с субмикронной структурой, равномерной не только на фокусном размере лазерного пучка, но со структурными элементами менее длины волны видимого света очень трудно. Выполнив эту задачу, мы смогли провести запланированный объемный цикл экспериментов по сравнительному изучению слоев пен, аэрогелей и малоплотных металлов с твердыми веществами и друг с другом в одинаковых условиях при облучении длинными и короткими лазерными импульсами. Оригинальны мишени, сама постановка широкого исследования 3х разных типов пен в одних условиях, набор выполняемых экспериментов на лазерах с хорошей повторяемостью и имеющих оригинальные элементы для сравнений измерений (разную длительность и спектральную ширину спектра излучения). Широкий набор диагностик, хорошо доработанных под экспериментальные установки позволил наблюдать большинство явлений, существенно превосходящих статистический разброс от выстрела к выстрелу по одинаковой мишени и от мишени к мишени при одинаковом импульсе.

Гораздо легче ведутся эксперименты по изучению свойств пен, если могут быть разработаны и изготовлены мишени из пен докритической плотности для второй, либо третьей гармоник лазерного излучения, т.к. критическая плотность кратно вырастает. Это позволило коллективу ученых из Франции-США-Японии-России продемонстрировать в эксперименте и подтвердить численным счетом: РТ-неустойчивости на фронте абляции СН-пленки с нано СНО-пенной дают уменьшение роста неоднородностей в 2-3 раза, что критически важно для успешного сжатия топлива по схеме лазерного термоядерного синтеза [B. Delorme, M. Olazabal-Loumé, A. Casner, Ph. Nicolaï et al. Experimental demonstration of laser imprint reduction using underdense foams. *Physics of Plasmas* 23, 042701 (2016); doi: 10.1063/1.4945619]. Великолепное планирование эксперимента с монозадачей в качестве цели, готовность теоретических и расчетных средств, наличие отдельных подразделений, поддерживающих лазер и подготовку к эксперименту, позволяет проведение запланированных за год-полтора исследований, принятых международной комиссией, за короткое время доступа на лазер и получить материалы для обработки. Очень высокая культура выполнения экспериментов с аппаратурой, отсутствующей для нашего доступа. Как и у нас обработка экспериментов занимает несколько месяцев упорного труда, если в измерения или идею эксперимента не закралась ошибка, плюс издательский процесс. Конкурировать напрямую не получается, пока только низкооплачиваемым изобретательством.

Заявленные подходы и методы оказались реализованы в процессе выполнения проекта. Нас самих удивило, что мы использовали практически все, какие имели (и писали в заявке), диагностические измерительные средства. Может быть из-за этого разнообразия и удалось справиться и иметь подстраховочные варианты на случай невыполнимости отдельных обещаний.

Если окажется возможно продолжение проекта на год, с нетерпением приступим к теоретическому описанию полученных данных.

3.7.2. Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году

Акунец Александр Алексеевич - работы над малоплотными сферическими мишенями, участие в лазерных экспериментах с партнерами в BARC в Индии

Борисенко Наталия Глебовна - руководство проектом и управление ресурсами, планирование, подготовка и обеспечение экспериментальных работ, анализ полученных данных, разработка схем мишеней и их применения, написание работ и отчетов, доклады на конференциях.

Борисенко Лидия Андреевна - разработка методов изготовления и характеристика малоплотных слоев, свидетелей и мишеней; расчеты для обработки первичных экспериментальных данных, создание презентаций и постеров по проводимым работам.

Громов Александр Иванович - разработка методов изготовления малоплотных металлических слоев и дейтерий-содержащих мишеней, измерения параметров структурированных веществ и мишеней методом рентгеновской радиографии, обеспечение этими мишенями совместных экспериментов и участие в лазерных экспериментах с иностранным партнером в Индии.

Орехов Андрей Станиславович - участие во всех этапах работ: организация химических лабораторных работ, разработка дизайна мишеней и методов их изготовления; измерения на микроскопе, микрофотографах и оптическом профилометре свойств получаемых малоплотных и твердотельных веществ и параметров мишеней; подготовка расчеты и обработка данных по стохастическому нагреву электронов в плазме; обработка экспериментальных данных с различных диагностических приборов. Планирование и подготовка лазерных экспериментов, результатов, отчета.

Шапкин Алексей Андреевич - инженерное обеспечение экспериментальных работ, диагностического оборудования, настройка и эксплуатация сложных измерительных приборов, описание первичных измерений.

Перваков Кирилл Сергеевич - измерения на сканирующем электронном микроскопе микрообразцов сложной и неизвестной заранее структуры, в том числе впервые полученных. Разработка методов измерения сложных микрообъектов и описание методик. Работа на различных приборах центра коллективного пользования ФИАН

3.8.1. Количество научных работ по Проекту, опубликованных в 2016 году

4

3.8.1.1. Из них в изданиях, включенных в перечень ВАК

1

3.8.1.2. Из них в изданиях, включенных в библиографическую базу данных

РИНЦ

2

3.8.1.3. Из них в изданиях, включенных в международные системы цитирования (библиографические и реферативные базы научных публикаций)

1

3.8.1.4. Из них в соавторстве с зарубежными участниками

1

3.8.2. Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения Проекта и принятых к печати в 2016 году

5

3.9. Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

Симпозиум Департамента атомной энергии Индии по «Физике конденсированного вещества в экстремальных условиях – CoMPES-2016» 13-16 апреля 2016, Центр атомных исследований имени Баба, Мумбаи, Индия. <http://barc.gov.in/symposium/compec-2016> Н.Г. Борисенко. (Приглашенный)

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. N.G. Borisenko. MWTА efforts (oral)

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.V. Pastukhov, V.A. Davankov, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.S. Orekhov, K.S. Pervakov. Production of Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets (poster)

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.S. Orekhov, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.M. Chekmarev, Y.A. Mikhailov, A.A. Shapkin, G.V. Sklizkov. Distribution Function Evolution of Electrons Stochastically Heated by Picosecond Laser Pulse (poster)

XLIII международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Февраль 2016 г. Борисенко Н.Г., Акимова И.В., Акунец А.А., Громов А.И., Борисенко Л.А., Орехов А.С., Шапкин А.А. Металлополимерные слои пен в лазерных мишенях, в том числе с добавлением кластеров металла, и их прецизионный контроль, как необходимое условие интерпретации плазменных экспериментов (стендовый)

XLIII международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Февраль 2016 г. Акимова И.В., Акунец А.А., Громов А.И., Борисенко Л.А., Орехов А.С., Борисенко Н.Г. Малоплотный, в том числе бромированный, прочный полипараксилилен, как конструкционно-диагностический слой для исследовательских мишеней в ИТС (стендовый).

3.10. Участие в 2016 году в экспедициях по тематике Проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда

0

3.11.1. Финансовые средства, полученные в 2016 году от Фонда (в руб.)

500000,00

3.11.2. Финансовые средства, полученные в 2015 году от Фонда (в руб.)

650000,00

3.12. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. N.G. Borisenko. MWTА efforts <http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/ECLIM2017%20NG%20Borisenko%20MWTА%20Efforts.pdf>

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.V. Pastukhov, V.A. Davankov, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.S. Orekhov, K.S. Pervakov. Production of Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets

<http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/ECLIM2016-LPI-Pastukhov.pdf>

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.S. Orekhov, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.M. Chekmarev, Y.A. Mikhailov, A.A. Shapkin, G.V. Sklizkov. Distribution Function Evolution of Electrons Stochastically Heated by Picosecond Laser Pulse http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/Orekhov_ECLIM_poster.pdf

<http://sites.lebedev.ru/ru/nfo/3774.html>

3.13. Библиографический список всех публикаций по Проекту за весь период выполнения проекта, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

L. A. Borisenko, A. V. Koutsenko Yu., A. Mikhailov, L. A. Nikitina, A. S. Orekhov, G. V. Sklizkov, A. M. Chekmarev. High-Intensity-Laser-Matter Interactions: the Energy-Control System of the Pico Laser Facility. *J Russ Laser Res* (2016) 37: 374. doi:10.1007/s10946-016-9584-6

C. Kaur, S. Chaurasia, N.G. Borisenko, A. Orekhov, P. Leshma, V.G. Pimenov, A. Akunets, M.N. Deo. Interaction of High Power Laser with Polymeric Low-Density Targets. *Quantum Electronics* (2017) (в печати)

А.А. Фроня, Н.Г. Борисенко, В.Н. Пузырев, А.Т. Саакян, А.Н. Стародуб, О.Ф. Якушев. Оптическое излучение плазмы малоплотных мишеней, облучаемых лазером с управляемой когерентностью // *Квантовая электроника*, 2017, Т. 2, Вып. 2 (в печати)

A.V. Pastukhov, V.A. Davankov, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.S. Orekhov, K.S. Pervakov, S.M. Tolokonnikov. Hollow Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017 (в печати)

Борисенко Н.Г., Меркульев Ю.А., Орехов А.С. Обзор прошедших лазерных экспериментов с малоплотными мишенями ФИАН. Приглашенный доклад, XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9 – 13 февраля 2015 г.

Громов А.И., Акимова И.В., Акунец А.А., Борисенко Л.А., Меркульев Ю.А., Орехов А.С., Шапкин А.А., Борисенко Н.Г. Вопросы мониторинга ультрадисперсных малоплотных слоёв для мишеней ИТС. XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9 – 13 февраля 2015 г.

Акунец А.А., Александрова И.В., Борисенко Л.А., Борисенко Н.Г., Громов А.И., Даванков В.А., Демихов Е.И., Корешева Е.Р., Костров Е.А., Меркульев Ю.А., Орехов А.С., Осипов И.Е., Пастухов А.В., Толоконников С.М., Шапкин А.А. Лазерные сферические мишени, разрабатываемые к проектам XXI века. XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 9 – 13 февраля 2015 г.

Н.Г. Борисенко, И.В. Акимова, А.А. Акунец, А.И. Громов, Л.А. Борисенко, А.С. Орехов, А.А. Шапкин. Металлополимерные слои пен в лазерных мишенях, в том числе с добавлением кластеров металла, и их прецизионный контроль, как необходимое условие интерпретации плазменных экспериментов // XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 8 – 12 февраля 2016 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2016. С. 151.

А.И. Громов, И.В. Акимова, А.А. Акунец, Л.А. Борисенко, А.С.Орехов, Н.Г. Борисенко. Малоплотный, в том числе бромированный, прочный полипараксилилен, как конструкционно-диагностический слой для исследовательских мишеней в ИТС // XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 8 – 12 февраля 2016 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2016. С. 152.

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. N.G. Borisenko. MWTa efforts <http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/ECLIM2017%20NG%20Borisenko%20MWTa%20Efforts.pdf>

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.V. Pastukhov, V.A. Davankov, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.S. Orekhov, K.S. Pervakov. Production of Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets <http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/ECLIM2016-LPI-Pastukhov.pdf>

34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. A.S. Orekhov, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.M. Chekmarev, Y.A. Mikhailov, A.A. Shapkin, G.V. Sklizkov. Distribution Function Evolution of Electrons Stochastically Heated by Picosecond Laser Pulse http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/conferences/ECLIM2016/Presentations/Orekhov_ECLIM_poster.pdf

A.V. Pastukhov, V.A. Davankov, A.A. Akunets, N.G. Borisenko, A.S. Orekhov, K.S. Pervakov. Production of Poly(alpha-methyl-styrene) Shells for Inertial Confinement Fusion Targets // 34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. Book of Abstracts. M., 2016. P. 119.

A.S. Orekhov, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.M. Chekmarev, Y.A. Mikhailov, A.A. Shapkin, G.V. Sklizkov. Distribution Function Evolution of Electrons Stochastically Heated by Picosecond Laser Pulse // 34th European Conference on Laser interaction with Matter (ECLIM2016). September 19–23, NRNU MEPhI, Moscow, Russia. Book of Abstracts. M., 2016. P. 18.

3.14. Библиографический список совместных публикаций (в соавторстве с зарубежным партнером по проекту) за весь период выполнения проекта: монографии и статьи в научных изданиях с указанием импакт-фактора журнала по базе данных Web of Science

C. Kaur, S. Chaurasia, N.G. Borisenko, A. Orekhov, P. Leshma, V.G. Pimenov, A. Akunets, M.N. Deo. Interaction of High Power Laser with Polymeric Low-Density Targets. Quantum Electronics (2017) (в печати) (Импакт-фактор 0,978)

3.15. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта не очевидно

3.16. Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта не очевидно

3.17. Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Эффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива.

3.18. Преимущества, полученные в результате международного сотрудничества (использование оборудования, наработок, доступ к уникальным объектам и условиям и т.д.)

В сотрудничестве с партнером из BARC наши участники получили доступ к использованию оборудования, отсутствующего в ФИАН, к имеющимся наработкам в диагностических приборах, стабильно работающего (не в жару) лазера и штата обслуживающего лазер и экспериментаторов квалифицированного персонала. В BARC созданы условия для экспериментов с высокой мощностью энергии в веществе, нейтронных исследований на современной экспериментальной базе и хорошим инженерным обеспечением, также есть пикосекундный лазер ТВт-ной мощности. Лазеры оказываются очень удобны в использовании с т. зрения модульной структуры измерений. В течении одной серии измерений возможно было оперативно изменить конфигурацию и диагностические устройства для акцента на ярко проявляющемся явлении проводимых поисковых экспериментов. Данные не терялись, энергии и импульсы настраивались и были пригодны для выполнения поставленных задач. Получено много данных для обработки и получение новых результатов и продолжения программы экспериментов.