РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Н.Г. БОРИСЕНКО, И.В. АКИМОВА,
А.И. ГРОМОВ, Ю.А. МЕРКУЛЬЕВ,
А.М. ХАЛЕНКОВ, В.Г. ПИМЕНОВ,
В.Н. КОНДРАШОВ, С.Ф. МЕДОВЩИКОВ,
И. ЛИМПОУХ, Е. КРОУСКИЙ, И. КУБА,
К. МАСЕК, М. ПФАЙФЕР

ПРЕПРИНТ



ПОГЛОЩЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (до 10¹⁵ Вт/см²) И ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ПОДКРИТИЧЕСКИХ СРЕДАХ, В Т.Ч. СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВКИ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поглощение интенсивного лазерного излучения (до 10¹⁵ Bт/см²) и перенос энергии в подкритических средах, в т.ч. содержащих добавки тяжелых элементов.

Н.Г. Борисенко¹, И.В. Акимова¹, А.И. Громов¹, Ю.А. Меркульев¹, А.М. Халенков¹, В.Г. Пименов², В.Н. Кондрашов³, С.Ф. Медовщиков³, И. Лимпоух⁴, Е. Кроуский⁵, И. Куба⁴, К. Масек⁵, М. Пфайфер⁵

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, Ленинский пр., 53, 119991, Москва

² Институт Органической Химии им. Зелинского, Ленинский пр., 49, 199991, Москва

³Троицкий Институт Инноваций и Термоядерных Исследований, Троицк, Московская обл.

⁴ Чешский Технический Университет, Прага, Чехия

⁵ Физический Институт, Прага, Чехия

Исследования взаимодействия интенсивного лазерного излучения с малоплотными, в том числе подкритическими средами демонстрируют сильную зависимость свойств поглощения и распространения гидротепловой волны от структуры мишени (размера пор и распределения пор по размерам, формы составляющих вещество элементов, типа добавок, размеров кластеров и т.д.). Структура вещества мишени зависит от концентрации и вида различных добавок. Существуют технологические ограничения на минимально достижимую плотность вещества с добавкой тяжелого элемента в случае подкритической плотности. Металлические фольги различной толщины, расположенные на тыльной стороне пенной мишени приводят к различным особенностям в процессе поглощения лазерного излучения в тонких подкритических слоях «пены» и в процессах радиационного и гидротеплового переноса. Эти особенности в процессах поглощения и переноса в подкритических структурированных средах демонстрируются на примерах экспериментов на лазерной установке ПАЛС (PALS) в Праге (Чехия) при интенсивностях от 3.10¹⁴ Вт/см² до 3·10¹⁵ Вт/см². Работа частично профинансирована в рамках проекта INTAS №0572.

Intensive (up to 10¹⁵ W/cm²) laser light absorption and energy transfer in subcritical media with or without high-Z dopants.

N.G. Borisenko, I.V. Akimova, A.I. Gromov, Yu. A. Merkuliev, A.M. Khalenkov, V.G. Pimenov, V.N. Kondashov, S.F. Medovshikov, J. Limpouch, E. Krousky, J. Kuba, K. Masek, M. Pfifer

The investigation of intense laser radiation interaction with low density foams (especially undercritical) demonstrates the strong dependence of light absorption properties and hydrothermal wave propagation on the structure of the target (the size of pores, the form of the elements and cluster/dopants type). Details of structuring prove to be sensitive to the presence and concentration of different dopants (clusters). There exist the technology restrictions on minimum average density possible with heavy load of additives in underdense polymer material. The solid film on the boundary of low-density layer imposes particular laser light absorption behavior. The unusual absorption processes and transport are demonstrated in laser shots of PALS facility in Prague (Czech Republic) with flux density ranging from $3 \cdot 10^{14}$ W/cm² up $3 \cdot 10^{15}$ W/cm². The work was partly supported by INTAS project # 0572.

1. Введение

Исследование взаимодействия интенсивного лазерного излучения С малоплотными средами было начато более 25 лет тому назад и преследовало цели: повысить нейтронный утилитарные выход ИЗ шариков ИЗ дейтерированного полиэтилена за счет кавитации микрополостей [1], создать экспериментальную модель протяженной короны сферических мишеней с целью изучения транспорта энергии для расчета эффективности крупных мишеней и/или выровнять распределение лазерной энергии на поверхности оболочки – основной части мишени [2]. Заметим, что подобные цели И сейчас В области сверхвысоких сохраняются лазерных полей экспериментах с пикосекундными лазерами, где делаются попытки за счет структурирования мишени повысить нейтронный выход [3], и изучить транспорт энергии для быстрого зажигания термоядерного горючего [4]. Второй существенной особенностью малоплотных сред, изучающейся более 40 лет, является их способность сжиматься под действием ударной волны до плотностей в несколько раз более высоких, чем те же вещества с полной плотностью. А это эквивалентно повышению в несколько раз давления на границе со сплошной средой. В последние годы эту особенность используют в опытах по определению уравнения состояния при воздействии лазерного излучения [5]. К сожалению, из-за повышения температуры малоплотной прохождении ударной возникновении среды при волны И мягкого рентгеновского излучения исследуемое (сплошное) вещество нагревается, поэтому необходимы специальные меры, чтобы этот метод позволил измерить свойства вещества в холодном состоянии.

Малоплотные мишени модели короны представляли собой миниатюрные газовые струи или частицы полимерной пены (пенопласта). К сожалению, истечение газовой струи в вакуум не удавалось сделать достаточно однородным. Только в последнее время научились исследовать перенос энергии в плазме из спокойного газа, помещенного в тонкопленочный сосуд из полиимида [6]. При сравнении экспериментальных данных с расчетами возникли расхождения, которые привели к введению понятия "ограничение теплопроводности" [2,7]. К тому же напомним, что уже существовала теорема, доказанная Е.П. Аврориным с сотрудниками [8], гласящая, что удаление от центра сферы зоны поглощения лазерного плотности оболочки) приводит излучения (уменьшение К снижению эффективности термоядерной мишени. И по этой теории даже при переходе на малоплотное вещество выгоднее применять коротковолновое излучение и более плотные и тонкие слои малоплотного материала.

Даже в последние 10-15 лет при математическом моделировании процессов поглощения лазерного излучения и транспорта энергии в плазме из

практически, этап малоплотных веществ, не учитывался начальный взаимодействия лазерного излучения структурированными средами: co процесс испарения - ионизации вещества и процесс гомогенизации плазмы (выравнивание плотности и температуры в объеме). Расчеты начинались с состояния гомогенной среды газ-плазма [7] или со структуры из многих пленок с промежутками, заполненными разреженным газом, чтобы не создавать разрывов в среде [9].

Возникшее лет 15 тому назад направление разработок – разравнивание неравномерности лазерного излучения на оболочке-мишени за счет внешнего малоплотного слоя абсорбера-аблятора [2,7,10] сознательно шло на снижение эффективности мишени, но зато должно было достигаться устойчивое симметричное сжатие. Экспериментальная проверка этой идеи, в основном, проводилась на лазерах с большой длинной волны (≈1 мкм), для которых критическая плотность составляет около 3 мг/см³, и, поэтому была выполнена на мишенях с надкритическими плотностями или близкими к критической плотности. В таких опытах можно измерять скорость переноса энергии, но демонстрировать высокую эффективность мишеней нельзя. Лишь небольшая публикаций посвящена лазерному взаимодействию с мишенями, доля имеющими сильно подкритическую плотность [11,12]. Именно в таких исследованиях с очевидностью проявилось влияние ячеистой структуры полимерной пены (можно назвать "foams imprint") на ускоряемый участок фольги. А так же было показано, что перенос энергии через такую микрогетерогенную плазму требует существенной переделки математической модели, особенно, на начальной стадии – гомогенизации, а для всего процесса - уточнения радиационного переноса (и радиационного охлаждения) с учетом линейчатого рентгеновского спектра легких атомов (E_{x-rav} < 1 кэВ). Причем даже в мишенях из мелкоячеистых трехмерных сеток из кремнийаэрогеля (как правило, изготавливаемого для многих лабораторий мира в Новосибирском Институте Катализа РАН) и из полимеров (изготовленных В. Назаровым, Великобритания [13]) перенос энергии можно описать лишь при сильном ограничении теплопроводности [7,9,14].

Только в последние 3-4 года появились теоретические работы, в которых предпринимаются попытки описать начальную стадию превращения структурированной среды в плазму, принимая во внимание фактически два процесса: испарение или тепловой взрыв структурного элемента пены и выравнивание плотности и температуры в объеме плазмы. Очевидно, что на расстояниях зоны поглощения лазерного излучения разных OT В подкритической плазме эти процессы идут с разной скоростью. Вблизи зоны счет поглощения интенсивного теплообмена c участием мягкого 3a рентгеновского жесткого ультрафиолетового излучения скорость И превращения структурированного вещества в плазму будет высокой. Напротив, вдали от зоны поглощения, где теплопередача определяется, в

4

основном, электронной (ограниченной!) теплопроводностью, полимерные структуры могут разлагаться, выделяя легко-летучие компоненты, и переходить в стеклоуглерод, который даже при высоких температурах испаряется очень медленно.

Таким образом, возникает задача за счет состава вещества и введенных добавок найти способ управления процессом перехода твердого вещества в плазму во всем объеме, на который воздействует лазерное излучение.

Довольно давно, 20 лет тому назад мы пытались управлять свойствами плазмы, создавая в мишенях слои с микрогетерогенной структурой, содержащей наночастицы тяжелых элементов (также именуемые далее кластеры) в структуре полно-плотных веществ [15]. Эти идеи применения слоев в мишенях, но уже малоплотных, с кластерами тяжелых элементов для управления процессами поглощения лазерного излучения, гомогенизации плазмы и транспорта энергии в плазме развивались и в последние 5 лет [16-18]. Данная работа, выполненная на лазерной установке PALS [19] в Праге на 3^{-ей} гармонике йодного лазера, показывает, чего можно достичь в экспериментах с подкритическими средами, применяя новейшую технологию изготовления трехмерных полимерных сеток [17], в т.ч. содержащих наночастицы с высоким Z.

Основными целями проведенного эксперимента были следующие: разработка малоплотных слоев различной структуры (включая трехмерные сетки) и плотности (вплоть до 4 мг/см³, что соответствует 0,25 критической электронной плотности при полной ионизации материала мишени); исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с мишенями как надкритической, так и подкритической плотности, в том числе содержащих кластеры; измерение скоростей энергопереноса для пен с различными размерами пор и различной микроструктурой (ячеистой, трехмерными сетками); сравнение результатов взаимодействия лазерного излучения на первой и третьей гармониках с малоплотными средами; исследование процессов сглаживания неоднородностей исходного лазерного пучка при прохождении пен различной толщины и плотности.

2. Эксперимент

Результаты первых экспериментов с малоплотными пенными материалами на лазерной установке PALS были получены в 2003 году [9]. В первых экспериментах использовались несколько типов малоплотных мишеней – тонкие слои полистирольных пен плотностью 8-10 мг/см³ с типичным размером пор 50-70 мкм, пены с плотностью 30 мг/см³ и диаметром пор около 10 мкм, а также пены с плотностью около 20 мг/см³ с диаметром пор около 5 мкм. Также использовались пены из PVA с плотностью 5 мг/см³ и типичным диаметром пор около 5 мкм. На тыльной стороне мишени была наклеена алюминиевая фольга толщиной 2 и 0,8 мкм. В качестве диагностики использовались рентгеновская (чувствительная к фотонам с энергией более 1,5 кэВ) и оптическая электронные камеры, а также установка для получения трехкадровых тенеграмм, принцип работы которой детально описывается в работе [20]. Оптическая камера фиксировала момент прихода ударной волны на тыльную поверхность фольги. В связи с небольшой чувствительностью рентгеновской электронно-оптической камеры, лишь в нескольких выстрелах было зафиксировано распространения области рентгеновского излучения в пене, причем только в пенах с наибольшим диаметром пор – 50-70 мкм. Глубина проникновения лазерного излучения В образовавшуюся сверхкритическую плазму (время образования и гомогенизации которой составляет 50-100 пс, т.е. много меньше длительности импульса и равное времени заполнения поры плазмой образовавшейся при испарении твердых элементов ячейки) составила при этом не более 120 мкм, т.е. 1,5-2 диаметра поры.

Измеренная скорость распространения области рентгеновского излучения составила 1,4·10⁷ см/с, при этом рентгеновское излучение не распространялось на всю глубину пены (400 мкм). Тем не менее, для более тонких слоев пены по данным интерферометрии измерялась скорость разлета фольги на тыльной стороне мишени и было показано, что она растет с увеличением энергии импульса. Также был оценен гидродинамический КПД, составивший 12-14%.

Одним из очевидных способов улучшить детектирование рентгеновского излучения от сравнительно толстых слоев пен (помимо увеличения чувствительности камер) является внедрение в малоплотную структуру примесей в виде атомов или наночастиц тяжелых элементов (например, меди или олова) в качестве эффективных преобразователей падающего лазерного излучения в рентгеновское. Последнее было реализовано на этапе подготовки мишеней для экспериментов на PALS, проведенных в феврале 2005 года и более подробно обсуждается далее, хотя работа по улучшению параметров камер привела к тому, что рентгеновское излучение регистрировалось и в пенах, не содержащих элементы тяжелее кислорода.

Схема эксперимента

Эксперимент проводился на лазерной установке PALS (Prague Asterix Laser System). Установка представляет собой одноканальный йодный лазер с длиной волны излучения 1,315 мкм на первой гармонике и 0,438 мкм на третьей гармонике, что соответствует Nкр_{1 ω} \approx 0,6·10²¹ см⁻³ и Nкр_{3 ω} \approx 5,4·10²¹ см⁻³. Максимальная энергия в импульсе 500 Дж на поверхности мишени, длительность импульса по полувысоте интенсивности 380 пс для первой гармоники и 320 пс для третьей, диаметр фокального пятна при выбранных условиях облучения составлял около 300 мкм (минимальный размер 70 мкм),

контраст по энергии лучше 10⁷, гауссова форма импульса. Плотность потока на мишени в предположении о вышеуказанном диаметре фокального пятна в эксперименте варьировалась от $3 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{15}$ Bt/cm², излучение падало по нормали к поверхности мишени. Лазерная система характеризуется хорошей частотой (выстрелы могут производиться каждые полчаса) и стабильностью параметров лазерного излучения от выстрела к выстрелу, а также достаточно пространственным распределением интенсивности однородным по фокальному пятну. Пространственное распределение интенсивности вблизи фокуса, неоднородности интенсивности излучения в пятне и временная форма импульса приведены на Рис. 1 а, б, в. Были выбраны две основные схемы фокусировки импульса – фокус на некотором расстоянии от мишени и фокус внутри мишени. В обоих случаях положение мишени выбиралось таким образом, чтобы диаметр фокального пятна на поверхности мишени составлял указанные 300 мкм.

Диагностический комплекс эксперимента для данного состоял ИЗ (РЭОК), рентгеновской электронно-оптической камеры электроннотрехкадровой теневой фотографии. оптической камеры И установки Рентгеновская камера КЕМТЕСН с малым увеличением, с пространственным разрешением около 50 мкм (видимый кадр имел размеры 1024x1024 пикселя или 1,9 мкм/пиксель) и временной разверткой 2 пс/пиксель (временное разрешение 70 пс) регистрировала рентгеновское излучение в диапазоне энергий E>1,5 кэВ. РЭОК располагалась в плоскости мишени и позволяла получать изображения процесса распространения фронта рентгеновского излучения по толщине мишени, для чего на боковой поверхности шайбыдержателя был сделан специальный диагностический вырез. Электроннооптическая камера (ЭОК) располагалась перпендикулярно к тыльной стороне фольги и регистрировала оптическое свечение тыльной стороны фольги с временной разверткой 11 пс/пиксель, причем вся шкала по времени составляла 5,68 нс. Для защиты оптики ЭОК от продуктов разлета мишени перед каждым выстрелом на объектив камеры устанавливался одноразовый майларовый фильтр. Для регистрации процесса разлета фольги с тыльной стороны мишени использовалась трехкадровая теневая фотография (с характерными временами регистрации 3,6,9 нс или 7,10,13 нс и экспозицией около 0,3 нс) на основе ПЗС-матриц. Схема расположения диагностического оборудования приведена на Рис. 2.



Рис. 1. Типичные параметры лазерного импульса PALS (с сайта <u>www.pals.cz</u>): а) распределение интенсивности в фокальной плоскости; б) пространственное распределение интенсивности вблизи фокуса; в) форма импульса в развертке по времени;



Рис. 2. Диагностический комплекс установки PALS. РЭОК и ПЗС-приемники расположены в плоскости мишени, излучение на первой или третьей гармонике падает по нормали к поверхности пены, ЭОК расположена по нормали к тыльной стороне мишени, покрытой алюминиевой фольгой. Диагностический луч используется для получения тенеграмм.

Мишени

Задачи достижения сверхвысоких плотностей плазмы при ее сжатии, проблемы получения сверхвысоких давлений (до 100 Мбар), а также разработка альтернативных подходов в ЛТС в настоящее время свелись к поиску конструкций лазерных мишеней, содержащих слои рекордно низкой плотности (до 1 мг/см³) при мелкоячеистой (<3 мкм) структуре и материалов для этих слоев. Микрогетерогенность, т.е. равномерность на шкале >1 мкм при субмикронном структурировании твердых обеспечивает мишеней. устойчивость и однородность изучаемой плазмы. При этом желательно, чтобы структурные элементы таких веществ были субмикронными для быстрой гомогенизации плазмы (за время менее 0.1-0.3 нс). Фиксация в таких структурах добавок из элементов со средним или высоким атомным номером в виде ансамбля наночастиц позволяет, с одной стороны, управлять радиационным переносом в возникающей вначале микрогетерогенной плазме, а с другой стороны, облегчает диагностику микрогетерогенной плазмы при исследовании процесса ее гомогенизации. Оптимальной структурой мишеней для таких исследований является субмикронная трехмерная полимерная сетка, содержащая наночастицы.

В течение последних трех лет разрабатывалась технология получения малоплотного полимерного материала в виде регулярных трехмерных сеток, в том числе и с добавками кластеров тяжелых элементов [16]. Одной из проблем было получение свободностоящего полимерного материала с подкритической для данной длины волны лазерного излучения плотностью и открытопористой структурой с разными размерами пор (пространственным периодом трехмерной структуры). Использование мишеней из подобных материалов позволило бы провести исследования и сравнить результаты по объемному поглощению в мишени подкритической плотности, изучить характерные времена гомогенизации плазмы в микроструктурированных средах и процессы выделения и/или переноса энергии в малоплотных материалах. Полимеры, используемые в мишенях, должны были без изменения структуры и свойств выдерживать нагрев до 170-200°С, в целях использования в оболочечных мишенях для ИТС, заполняемых DT-смесью.

формировались Большая часть мишеней путем растворения твердого полимера соответствующего количества И последующей полимеризации и сушки образовавшегося геля. Добавление значительного количества тяжелых элементов (более 10% по весу) существенно влияет на процесс формирования геля и не могло быть достигнуто в мишенях с концентрацией полимера менее 2-3%. Такие структуры могут рассматриваться как подкритические среды только для третьей гармоники Nd-лазера.

Для создания мишеней использовались или были разработаны биополимеры и их производные, такие как агар, эфиры целлюлозы, а также

поливинилформаль другие. В качестве И наночастиц использовался ультрадисперсный порошок различных металлов (меди, никеля, серебра) со частиц 30-100 нм. средними диаметрами Медь оказалась наиболее подходящим веществом с точки зрения меньшей химической активности, хотя и ее приходилось подвергать пассивированию (обработке гидро- и олеофобными материалами). Также для меди хорошо известны различные константы радиационного переноса, что позволяет более точно проводить расчеты и моделирование происходящих процессов.

Для исследования влияния микроструктуры, плотности и наличия добавок на процессы поглощения лазерного излучения и энергопереноса были изготовлены мишени из триацетата целлюлозы (ТАЦ) и из агара, имеющие существенно различную структуру и размер пор, как с добавкой меди в виде кластеров, так и без добавок. Также, в качестве сравнения и контроля возможных изменений параметров излучения лазера периодически осуществлялись выстрелы по калиброванным мишеням из ТМРТА [24], обладающих равномерной структурой (как макроскопически, так и на микронных масштабах) и постоянными геометрическими размерами. В диагностических целях и для облегчения последующей теоретической интерпретации результатов было произведено несколько выстрелов по мишеням без пены, представляющими собой либо отдельную алюминиевую фольгу, либо слоистую мишень из двух фольг, расположенных одна над другой и разделенных заранее известным промежутком, характерным для толщин используемых пен (180 или 380 мкм). В качестве "верхнего" слоя использовалась либо чистая тонкая фольга алюминия (толщиной 0,8 мкм) либо тонкий слой алюминия (0,02 мкм) напыленный на подложку из майлара толщиной 3,5 мкм.

Мишени из триацетата целлюлозы (ТАЦ)

Малоплотные микроячеистые аэрогели триацетата целлюлозы ИЗ (С₁₂Н₁₆О₈) были изготовлены согласно методу, развитому В.Г. Пименовым соответствии методикой, хлопковая [21]. В С целлюлоза после предварительного активирования ацетилировалась уксусным ангидридом в среде ледяной уксусной кислоты в присутствии концентрированной серной кислоты (катализатор). Условия ацетилирования подобраны таким образом, что бы получить триацетат целлюлозы с максимальной молекулярной массой и степенью замещения 2.85- 2.95, который бы легко растворялся в горячем хлороформе, но с трудом В холодном. При разбавлении горячего хлороформенного раствора такого триацетата равным объемом метанола и последующем охлаждении смеси до 0 °С образуются прочные прозрачные которые сохраняют свои гелеобразующие свойства гели. даже при концентрации 0.1- 0.2 % масс. (1- 2 мг полимера на 1 мл раствора). Гель

термообратим и принадлежит к так называемым системам с термогелеобразованием/кристаллизацией индуцированным в смешанном растворителе. Слой пены в мишенях формировали в стеклянных кюветах между предметными стеклами. Для предотвращения методом заливки обрабатывали прилипания геля разъеме стекол последние при кремнийорганическим модификатором Фторсам-39, фторсодержащим придающим поверхности гидроолео-фобные свойства (предоставлено ИОХ РАН [22]). Метод обеспечивает получение слоя пены однородного по толщине. При получении Си-наполненного аэрогеля использовали медный порошок (средние размеры кластеров 500 A, удельная поверхность 23.6 м²/г), также обработанный кремнийорганическим модификатором. Такая обработка позволила в значительной мере предотвратить повреждение структуры аэрогеля, обычно наблюдаемое при их наполнении. Навеску медного порошка в метаноле обрабатывали ультразвуком в диспергаторе и при интенсивном перемешивании вводили в приготовленный раствор триацетата. Мишени со сформированным слоем геля промывали холодным метанолом и подвергали сверхкритической сушке с двуокисью углерода общепринятым методом, при котором спиртовой растворитель в полимерном геле замещался на жидкую углекислоту СО₂ с последующим нагревом под давлением до температуры, превосходящей критическую точку для СО2. При прохождении критической точки жидкая углекислота превращалась в газ без испарения, что позволяло повреждения тонкой структуры пены счет избежать за эффектов поверхностного натяжения и сохранить равномерную трехмерную сетку в микроструктуре пены. Фотографии поверхности ТАЦ с плотностью 4,5 мг/см³, полученные с помощью СЭМ представлены на Рис. 3.

Мишени из триметилол-пропан-триакрилатных (ТМРТА) аэрогелей

Мишени из ТМРТА ($C_{15}H_{20}O_6$) для эксперимента на PALS были изготовлены В. Назаровым по технологии, описанной в [23], а съемка - оптическая и на сканирующих микроскопах - производилась в ФИАН.

Параллельно в тех же условиях изготовлялись относительно большие образцы правильной формы для проверки плотности получающейся пены путем определения массы и объема большого образца. Опыт показывает, что как в случае ТМРТА, так и в случае образцов ТАЦ и агара, можно выбрать такие условия получения материала, при которых не происходит заметной усадки образцов и значения плотности, измеренной по результатам взвешивания или по концентрации начального мономера в известном количестве растворителя с точностью в несколько процентов соответствуют друг другу. Снимки поверхности ТМРТА представлены на Рис. 4.



Рис. 3. Фотографии поверхности ТАЦ с плотностью 4,5 мг/см³, полученные с помощью СЭМ. Масштаб 10мкм (а) и 1 мкм (б).



Рис. 4. Фотографии поверхности ТМРТА с плотностью 10 мг/см³, полученные с помощью СЭМ. Масштаб 10 мкм (а) и 5 мкм (б).

Мишени из агара

Образцы из агара (C₁₂H₁₈O₉) производились методом сублимационной (вакуумной) сушки, при которой раствор полимера в воде после образования геля заливался в форму и быстро замораживался жидким азотом. Далее замороженный образец помещался в прибор для сублимационной сушки, где в течение нескольких часов растворитель переходил в газообразное состояние и полностью откачивался. Кластеры тяжелых элементов добавлялись В растворитель на этапе гелеобразования, для равномерного распределения кластеров использовался ультразвуковой диспергатор. Недостатком метода подверженность разрушению микроструктуры образца является из-за существенных градиентов температур на этапе замораживания и действия сил поверхностного натяжения при возгонке растворителя в вакууме. В результаты структуры пен агара, полученные с помощью данного метода, обладают существенно более грубой микроструктурой и большими размерами пор по сравнению с ТАЦ и ТМРТА, полученными методами сверхкритической сушки (Рис. 5). Внедрение тяжелого элемента также приводило к существенному изменению структуры пор. Для получения мишеней из больших кусков агара правильной формы после взвешивания и определения плотности вырезались образцы с требуемыми геометрическими размерами.

Параметры мишеней и их контроль

Помимо изготовления мишеней с параметрами, максимально приближенными к заданным условиям эксперимента, перед передачей мишени на лазер необходимо полностью охарактеризовать как ее макроскопические, так и микроскопические свойства (или иметь возможность в последующем измерять параметры мишеней, идентичных используемым в эксперименте). Существуют множество методов контроля параметров мишеней. Основными методами исследования структуры являются оптическая микроскопия (в отраженных И проходящих лучах), рентгеновская (1, 5-4)кэВ) микрорадиография, сканирующая электронная микроскопия и сканирующая зондовая микроскопия. Основное достоинство первого метода состоит в том, что при оптической микроскопии нет необходимости разрушать исследуемую мишень, может исследоваться как поверхность плотного вещества, так и структура малоплотных сред (на просвет), поэтому этот метод применим для контроля непосредственно поставляемых мишеней, на эксперимент. Электронная сканирующая микроскопия – основной метод получения информации о тонкой структуре исследуемого вещества, однако к недостатку метода следует отнести необходимость разрушения части образцов перед съемкой, так как принцип работы СЭМ предполагает нанесение проводящего покрытия (например, золота или углерода) на поверхность исследуемого

непроводящего образца. Рентгеновская микрорадиография применяется для качественного исследования неоднородностей в толщине малоплотного вещества, а также количественно для получения констант пропускания слоев аэрогелей в доступных рентгеновских диапазонах. Зондовая микроскопия, как выяснилось, практически не может быть применена для исследования малоплотного материала в силу структуры исследуемого вещества и особенностей процесса наведения на резкость атомно-силового микроскопа. Обнаружить в толщине малоплотного материала наночастицы тяжелых элементов является нетривиальной задачей, в силу малого размера и большого расстояния между ними, а также ограничениями техники сканирующей микроскопии. Электронная микроскопия с помощью пучка электронов, проходящих сквозь мишень также малоэффективна. На Рис. 6а представлены данные СЭМ, где в образце ТАЦ с плотностью 10 мг/см³, содержащем 10 % кластеров меди по весу, видно распределение последних в части образца. менее других покрытой проводящим покрытием (в данном образце перед передачей на микроскоп напылялось золото толщиной 20-30 нм). На Рис. 6б представлена область (ограниченная кругом), внутри которой был произведен анализ вещества с помощью рентгеновского анализатора спектра. На Рис. 6в приведены данные с анализатора спектра в линиях, по которым явно видно, что данная примесь является ультрадисперсным порошком меди. Присутствие линий углерода (C) и кислорода (O) обусловлено строением ТАЦ, золото (Au) является проводящим покрытием малоплотного образца. Сильная линия в самом начале спектра является эталонным сигналом.

ТАЦ характеризуется оптической прозрачностью для слоев 500 мкм и толще и регулярной трехмерной сетчатой микроструктурой, состоящей из волокон с диаметром 0,1 мкм, и с характерными промежутками между ними около 1-2 мкм. В используемых мишенях сами волокна, по-видимому, были неполноплотными, а тоже пористыми и их плотность составляла около 0,1 г/см³. На характерных размерах площади фокального пятна (100х100 мкм²) ТАЦ имеет малые (<0.5%) флуктуации массовой плотности и распределения пор по размерам.

Оптически непрозрачный агар имеет существенно более грубую структуру с полуоткрытыми порами диаметром вплоть до 100 мкм. Характерные размеры пор менялись в пределах 30-100 мкм, что отражалось на значительных (вплоть до 30%) флуктуациях массовой плотности на характерных масштабах фокального пятна. Как из ТАЦ, так и из агара изготовлялись мишени с добавкой тяжелого элемента. В обоих случаях добавление тяжелого элемента в вещество мишени отражалось в некотором изменении структуры при сохранении средней плотности, как массовой, так и электронной. Это иллюстрирует Рис. 7, где представлены фотографии пен ТАЦ и агара без примесей и с добавлением кластеров тяжелого элемента.



Рис. 5. Фотографии агара с плотностью 10 мг/см³, полученные с помощью СЭМ. Масштаб 100 мкм (а) и 20 мкм (б).



Рис. 6. а) Фотографии СЭМ поверхности образца ТАЦ плотностью 10 мг/см³, содержащего 10% меди по весу, масштаб 2 мкм; б) область (ограниченная кругом), в которой был произведен рентгеновский анализ образца, масштаб 1 мкм; в) рентгеновский спектр образца в линиях.



Рис.7. Изменение микроструктуры пены ТАЦ при добавлении кластеров меди и структуры агара при добавлении тяжелого вещества: а) ТАЦ, плотность 9.1 мг/см³, масштаб 2 мкм; б) ТАЦ + Си 9.9% по весу, плотность 9.1 мг/см³, масштаб 2 мкм; в) агар 20 мг/см³, масштаб 100 мкм; г) агар 10 мг/см³ + SnO₂ 10 мг/см³, масштаб 100 мкм.

Конструкция мишеней

Для экспериментов на установке PALS мишени монтировались в держателе-шайбе с внешним диаметром 8 мм и внутренним диаметром 2,5 мм. В большинстве шайб была сделана прорезь шириной 2 мм для получения изображения с помощью рентгеновской электронно-оптической камеры (РЭОК). С тыльной стороны на все мишени были приклеены алюминиевые фольги с толщинами 2 мкм, 5 мкм (в основном в эксперименте использовалась данная толщина фольги), 9 мкм или 15 мкм. Внутренняя полость шайбыдержателя была заполнена полимерным раствором до превращения последнего в гель и последующей сушки. Толщины пены триацетата целлюлозы и ТМРТА задавались толщиной шайбы-держателя и изменялись приблизительно от 320 мкм до 480 мкм. Толщина каждой мишени дополнительно измерялась перед передачей в мишенную камеру с помощью оптического микроскопа, также с помощью микроскопа на просвет проверялась целостность слоя фольги на тыльной стороне мишени. На Рис. 8 представлен набор собранных и готовых к установке в мишенный узел мишеней, а также фотографии малоплотных пен ТМРТА и ТАЦ в шайбах-держателях без прорези. Хорошо видна поверхность алюминиевой подложки на тыльной стороне мишени сквозь оптически прозрачный слой ТАЦ толщиной 500 мкм.

Для каждого типа мишеней был выбран набор средних плотностей материала, включающий в себя, по возможности, как подкритические для третьей гармоники используемого лазера так и надкртитические для первой гармоники значения соответствующей электронной плотности. В сводной Таблице 1 представлены все типы используемых в эксперименте мишеней с выбранными плотностями. Там же представлены электронные плотности, рассчитанные для первой и третьей гармоник йодного лазера. Видно, что для третьей гармоники йодного лазера все пены из ТАЦ, ТМРТА и агара с плотностями 5 и 10 мг/см³ являются подкритическими, при этом электронные плотности доходят до четверти критической у наименее плотного ТАЦ.



Рис. 8. а) Девять мишеней, установленные внутри шайб диаметром 8 мм и приклеенные на алюминиевые держатели 4 мм высотой. Фольга расположена на тыльной стороне шайб и не видна, прорези в шайбах обеспечивают работу рентгеновской электронно-оптической камеры, прорези в держателях – 3-х кадровую интерферометрию. Отверстие для оптической камеры расположено в держателе непосредственно под пеной. б) Пена ТМРТА в шайбе-держателе. в) Пена ТАЦ в шайбе-держателе, хорошо видна алюминиевая подложка сквозь прозрачный слой пены толщиной 500 мкм.

ТАЦ (максимальный размер пор 2-3 мкм)									
	9.9 % Си по весу, 9.1 мг/см ³ ТАЦ		9.1 мг/см ³		4.5 мг/см ³				
Ne ₃₀	0.53 Νκр_{3ω} 4.76 Νкр _{1ω}		0.54Νκp_{3ω} 4.8 Νκp _{1ω}		0.26Nкр ₃₀				
$Ne_{1\omega}$					2.34 Nкр _{1ω}				
ТМРТА (максимальный размер пор 1 мкм)									
	10 мг/см ³			20 мг/см ³					
Ne _{3w}			1.1 Νκp _{3ω}						
$Ne_{1\omega}$	5 Nκp _{1ω}			10 Νκp _{1ω}					
Agar (максимальный размер пор 30÷100 мкм)									
	20 мг/см ³	10 мг/см ³	5 мг	/см ³	+50%SnO ₂				
Ne ₃₀	1.2Nкр ₃₀	0.6Nкр ₃₀	0.3N	кр _{3ω}	0.5÷0.7 Nкр _{3ю}				
$Ne_{1\omega}$	10.7 Nкр _{1ю}	5.3 Nкр _{1ю}	2.7 N	Кр _{1ω}	4.5÷6.3 Nкр _{1ю}				

Таблица 1. Мишени для экспериментов на установке PALS

3. Результаты лазерных экспериментов и методы обработки результатов.

В качестве результатов экспериментов имеется набор паспортов выстрелов (см. Рис. 9), в которых содержится информация о дате эксперимента, номере выстрела, условиях фокусировки (на поверхность мишени, фокус перед мишенью. фокус внутри мишени), энергии выстрела, используемой гармонике, параметрах держателя мишени, параметров мишени (состав, толщина, наличие кластеров, толщина фольги на тыльной стороне), данных с рентгеновской электронно-оптической камеры и данных с оптической камеры совместно с используемыми параметрами камер – времени развертки, используемых катодов, наличия фильтров и т.д. Дополнительно в некоторых выстрелах могут приводиться параметры трехкадровой интерферометрии. Помимо этого к паспорту приложена оптическая фотография мишени, снятая непосредственно перед монтажом мишени в камеру. На нижней фотографии в паспорте – развертка оптического свечения тыльной стороны алюминиевой фольги, где слева вверху видно световое пятно, максимум которого соответствует максимуму лазерного импульса (часть лазерного пучка пускается через световод непосредственно в ЭОК), на верхней – данные с РЭОК.

PALS foam target experiment (Jan-Feb 2005)

Date: 10.02.2005	Shot Number	: 28220	Focus: 300mcm in fro	Focus: 300mcm in front				
Inc.Energy: 155J	Frequency:	3ω	E reflected:+					
	500 • 4360							
Target: microscope i mage file: t28220.jpg								
Holder. with hole	Foam: 9,9 % Cu	wt]]	ail: Al					
	Type: TAC		Thickness: 5mcm					
Washer: with hole	Density: 9,1 mg/	CC						
a .	Thickness: 380m	ncm						
Comments:								
X-ray streak camera:		1						
File: k28220.img								
Photocathode: CsI								
Sweep: 3, v=2.027 ps/pi,	1024pi							
Slit: 50mcm	a na manana n a sa							
Gain: 5								
Delay: 1								
Filter:								
Magnification:								
Background file:			100					
Comments:								
Optical streak camera:		-						
File: 28220.tif		7* Jak						
Sweep: 5.68ns/512pi								
Slit:		1	Sector Life. As					
Gain: 10				100				
Delay:		1370						
Filter:			AND A CAR STREET					
Magnification:								
Fiducial: 100								
Background file:								
Comments:		65-927						
1. STATUTE (10 10. 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10								
3-frame probing (interfi	erometry)	and the second						
1ª frame delay	//	Delayh	etween frames					
File:								
Comments:								



В связи с тем, что при облучении на первой гармонике появление оптического свечения существенно запаздывает по сравнению с максимумом свечения лазера, то развертка оптического электронно-оптического преобразователя запускалась с задержкой в несколько наносекунд, о чем в паспорте делалась запись.

Типичная запись выстрелов, полученных с помощью РЭОК, представлена на Рис. 10 а, б для третьей и первой гармоник соответственно. Начальное положение невозмущенной поверхности мишени и алюминиевой фольги на тыльной стороне изображены прерывистой и непрерывной горизонтальными линиями соответственно. В нижнем левом углу на Рис. 10а видна область образования плазмы алюминия. Для первой гармоники (Рис. 10 б) область формирования плазмы алюминия не видна вследствие надкритической плотности материала мишени и выбранной яркости изображения. Наклон (слева) стрелки указывает на момент появления слабого первой рентгеновского свечения Al-фольги, что связано с радиационным переносом лазерного излучения. Та же ИЗ зоны поглощения скорость дана приблизительно и для первой гармоники (стрелка 1 на Рис. 10 б). Средняя видимому являющаяся касательной К на записи фронту стрелка, распространения, рентгеновского излучения в начале его определяет начальную скорость распространения рентгеновского (с температурой более 1,5 кэВ) свечения плазмы от полимерной сетки. Наклон касательной нелинейно прохождении глубоких изменяется при всё более слоев малоплотного материала, и скорость распространения фронта замедляется с течением времени и глубиной проникновения. Самая правая скорость (ее показывает прерывистая стрелка с номером 3) проведена вдоль траектории распространения наиболее горячей (яркой) области, она же является наиболее медленной и условно названа "гидротепловой", так как, по-видимому, связана с переносом массы вещества. Интенсивное оптическое свечение на тыльной стороне алюминиевой фольги возникает не раньше (а в случае присутствия кластеров существенно позже), чем произойдет перенос энергии по пене и алюминию с этой скоростью. Также на изображении Рис. 10 а хорошо видно интенсивное расширение короны, момент начала которого может быть связан как с окончанием действия лазерного импульса, так и с наличием быстрого переноса вещества Al-стенки через еще не гомогенизированную плазму, дающего дополнительный вклад в импульс вещества короны.





Рис. 10. Записи с рентгеновской электронно-оптической камеры. а) Выстрел № 28204, ТАЦ 4,5 мг/см³, 3 ω , E_L = 157 Дж; б) выстрел №28255, ТАЦ 9,1 мг/см3 с добавкой 9,9 % меди по весу, 1 ω , E_L =171 Дж;



Рис. 11. Механизмы энергопереноса для трех различных мишеней при облучении на третьей гармонике: а) ТАЦ 4,5 мг/см³ (выстрел 28233, E=164 Дж); б) ТАЦ 9,1 мг/см³ (выстрел 28207, E=157 Дж) и с) ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавкой 9,9% меди по весу (выстрел 28211, E=158 Дж). Толщины пен составляют 400 мкм, алюминиевая фольга на тыльной стороне 5 мкм. Время увеличивается слева направо в каждом фрагменте, масштаб указан на снимках. Лазерное излучение падает сверху, прерывистая горизонтальная линия и непрерывная горизонтальная линия отмечают невозмущенные поверхности пены и фольги соответственно.

На Рис. 11 представлены указанные выше скорости для трех мишеней – ТАЦ 4,5 мг/см³ (а), ТАЦ 9,1 мг/см³ (б) и ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавками меди (в). Наиболее интересные для нас выстрелы, соответствующие взаимодействию лазерного излучения с подкритической средой, производились на третьей гармонике и качественно видно, что соответствующие скорости при увеличении плотности и добавлении кластеров уменьшаются, также различен и вид самого распределения рентгеновской светимости для трех случаев. На первом фрагменте хорошо заметно свечение алюминиевой фольги, характерное для сильно подкритических мишеней, прогреваемых почти сразу и целиком, на третьем фрагменте хорошо заметен выброс ("хвост"), характерный для мишеней с добавками меди.

Скорости, соответствующие стрелкам (кроме левой) на Рис. 11, приведены в Таблице 2 после усреднения по различным выстрелам. При усреднении не принимались во внимание выстрел с максимальным и выстрел с минимальным значением, а для остальных вычислялось среднее арифметическое значение. В таблице представлены предварительные результаты измерений скорости распространения видимого рентгеновского фронта (V_X) и наиболее горячей (яркой) части плазмы - гидротепловой волны (V_{ht}). Для экспериментов на первой гармонике область яркого свечения – короткая, и значения V_X (не показанные в таблице) и V_{ht} близки. Некоторые из скоростей приведены для двух значений энергий, т.к. в ряде выстрелов перед входом в мишенную камеру устанавливался фильтр, снижающий энергию, приходящую на мишень.

	1 ω	3ω	
	V _{ht} , 10 ⁷ см/с	V _X , 10 ⁷ см/с	V _{ht} , 10 ⁷ см/с
ТАЦ 4,5 мг/см ³	3,5	13,3 (Е≈170 Дж)	4,6
		5,6 (Е≈100 Дж)	2,0
ТАЦ 9,1 мг/см ³	3,8	7,7 (Е≈160 Дж)	2,4
	4 (Е≈397 Дж)	5,9 (Е≈100 Дж)	2,4
ТАЦ+Си 9,1 мг/см ³	3	7,5 (Е≈170 Дж)	2,7 (Е≈170 Дж)
			3,4
			(Е≈100 Дж)

Таблица 2. Средние скорости распространения видимого рентгеновского фронта и тепловой волны.

Пример данных с электронно-оптической камеры приведен на Рис. 12 также для трех различных пен ТАЦ на третьей гармонике (верхний ряд) и на первой гармонике (нижний ряд). Время на рисунке увеличивается сверху вниз, полная высота фрагмента соответствует 5,7 нс. На тыльной стороне всех мишеней приклеена фольга 5 мкм. Слева направо в каждом ряду показаны выстрелы для ТАЦ 4,5 мг/см³, ТАЦ 9,1 мг/см³ и ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавками кластеров. Для выстрелов на третье гармонике временная метка соответствует максимуму приходящего импульса (в верхнем левом кадре метка сдвинута на 3 нс позже максимума), на фрагментах с первой гармоникой временная метка сдвинута относительно максимума на 3 нс (приходит позже). Хорошо видно, что яркое свечение тыльной стороны алюминия при выстрелах на первой гармонике (надкритичесая плотность) возникает значительно позже, чем на третьей (подкритическая плотность), также свечение запаздывает при увеличении массовой плотности материала мишени и при добавлении кластеров (при сохранении массовой и электронной плотностей!). Слабое свечение тыльной стороны алюминиевой фольги возникает практически сразу после начала импульса, оно хорошо заметно на третьей гармонике и практически не заметно для более плотных пен в случае первой гармоники.

На Рис. 13 даны записи с оптической камеры для пен разного состава, но крайнем фрагменте практически одинаковой плотности. Ha левом представлена запись выстрела по ТМРТА с плотностью 10 мг/см3, в середине – пена ТАЦ с плотностью 9,1 мг/см³, крайний правый фрагмент - пена ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавкой наночастиц меди 9,9%. При практически равных плотностях (массовых и электронных, см. Таблицу 1) сильное оптическое свечение на тыльной стороне алюминиевой фольги возникает позже в случае присутствия тяжелой добавки. Несмотря на то, что на представленных записях возникновение сильного оптического свечения для ТМРТА и ТАЦ без меди возникают практически одновременно, при тщательной обработке с учетом толщин пены и разницы во времени прихода максимума интенсивности оказалось, что время появления оптического пика приблизительно на 20% короче для ТМРТА и на 40% длиннее для агара [24].

Между окончанием свечения в рентгеновском диапазоне (с E>1,5 кэВ) и временем возникновения яркого свечения тыльной стороны алюминия в оптическом диапазоне существует задержка, которая практически не видна на чистых полимерных трехмерных сетках с плотностью 4,5 мг/см³, и соответствует 0,2-0,4 нс для плотности 9,1 мг/см³. Задержка свечения в оптическом диапазоне для пен с медными наночастицами по отношению к Al-фольги поверхность моменту прихода энергии медленной на (гидротепловой) волны достигает почти 2 нс, что теоретически пока не объяснено. Это продемонстрировано на Рис. 14, где в одном временном масштабе представлены рентгеновские и оптические изображения выстрелов по пене с кластерами и без них на первой гармонике (Рис. 14а) и на третьей

гармонике (Рис. 14б-г). Время на рисунке увеличивается слева направо, масштаб дан на каждом фрагменте. Для сравнения в левом верхнем углу представлен лазерный импульс в том же масштабе. Прерывистые вертикальные линии отмечают максимум импульса и начало яркого свечения алюминия.

Поскольку проанализировать данные рентгеновской с камеры, представленные в виде растровых картинок, затруднительно, была сделана попытка изобразить получившиеся данные в графическом виде, более пригодном для анализа. Некоторые (за неимением места в публикации) из временных сечений рентгеновских разверток, показаны в качестве примера на рисунках (см. Рис. 15-20). Развертки сделаны в определенные дискретные моменты времени (приблизительно равномерно на протяжении всего времени регистрации сигнала рентгеновской камерой или в наиболее интересные моменты времени) и представляют собой зависимость интенсивности свечения плазмы в относительных единицах от глубины полимерной сетки (в соответствии с разверткой рентгеновского ЭОП). Обсуждение особенностей динамики плазмы, извлекаемые из этих данных, даны в следующем разделе.



Рис. 12. Данные с оптической камеры для 6 выстрелов. Верхний ряд – 3-я гармоника, нижний – 1-я. Энергия лазера приблизительно одинакова в каждом выстреле и составляла 170 Дж. Слева направо - ТАЦ 4,5 мг/см³; 9,1 мг/см³ и 9,1 мг/см³ с добавкой меди 9.9 % по весу. Алюминиевая фольга на тыльной стороне толщиной 5 мкм для каждой мишени. Временная метка (пятно в левом верхнем углу) совпадает с максимумом интенсивности лазерного импульса на третьей гармонике и сдвинута на +3 нс (приходит позже после максимума на 3 нс) для первой гармоники. Для левого верхнего фрагмента временная метка сдвинута на +3 нс. Время увеличивается сверху вниз, полная высота каждого фрагмента соответствует 5,7 нс.



Рис. 13. Запись с оптической камеры для трех выстрелов по мишеням близкой плотности и разного химического (ионного) состава. Выстрел 28202, пена ТМРТА 10 мг/см³, толщина 450 мкм (а); выстрел 28207, пена ТАЦ 9.1 мг/см³, толщина 420 мкм (б); выстрел 28211, пена ТАЦ, плотность 9,1 мг/см³ с добавкой 9.9 % наночастиц Си, толщина 440 мкм (в). Все выстрелы на третьей гармонике, энергия в каждом выстреле приблизительно 155 Дж. На тыльной стороне каждой мишени алюминиевая фольга 5 мкм.



Рис. 14. Изображенные в одном временном масштабе (по горизонтальной оси времени) данные с рентгеновской и оптической камер. а) Выстрел #28255, ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавкой 9,9 % меди по весу, 1 ω, Е_L=171 Дж б) выстрел #28233, ТАЦ 4,5 мг/см³, 3 ω, Е_L=164 Дж; в) выстрел #28207, ТАЦ 9,1 мг/см³, 3 ω, E_L=157 Дж; г) выстрел #28211, ТАЦ 9,1 мг/см³ с добавкой 9,9% меди по весу, 3 ω, E_L=158 Дж. Толщины пен 400 мкм, алюминий 5 мкм на тыльной стороне. Время растет слева направо, временной масштаб задан на каждом фрагменте. левом верхнем узле изображен лазерный импульс В В соответствующем масштабе. Вертикальные прерывистые линии отмечают начало слабого и сильного оптического свечения тыльной стороны фольги. Горизонтальные линии отмечают невозмущенные поверхности пены и алюминия.

4. Обсуждение

Многочисленные технологические эксперименты показывают, что внедрение кластеров тяжелых элементов в малоплотный материал делает невозможным получение минимальной средней массовой плотности. достижимой в чистых малоплотных структурах, причем различие в плотностях может достигать порядка величины. Так, например, если необходимо получить одинаковые структуры и плотности у материала с кластерами и без них, средняя плотность полимерных сеток должна превышать 5 мг/см³. При введении в малоплотный материал 10% по весу наночастиц меди можно достичь одинаковой структуры трехмерной полимерной сетки при средних плотностях 9,1 мг/см³ (как для материала с кластерами, так и без них). Таким образом, мишени из подобных пен или аэрогелей могут быть использованы в сравнительных лазерных экспериментах.

Добавка тяжелого элемента в структуру материала мишени существенно меняет поведение плазмы с плотностью, близкой к критической. Несмотря на практически равные массовые и электронные плотности (рассчитанные для случая полной ионизации материала мишени) процесс гомогенизации плазмы замедляется и время нагрева тыльной стороны алюминия существенно увеличивается по сравнению с чистыми (т.е. не содержащими наночастиц) мишенями. Разработанная технология получения трехмерных полимерных сеток позволяет получать относительно гладкие поверхности и одинаковые толщины у используемых в эксперименте мишеней, что приводит к лучшей повторяемости результатов от выстрела к выстрелу по сравнению с пенами более грубой структуры (агаровыми или полистирольными). Технология производства пен из триацетата целлюлозы с кластерами также позволяет получить волокна, которые сами по себе являются малоплотными с плотностью порядка 0,1 г/см³. Такие микроволокнистые структуры могут вести себя подобно газовым мишеням при воздействии пикосекундных или фемтосекундных лазерных импульсов. Помимо кластеров меди или диоксида кремния возможно внедрение в структуру мишени кластеров других элементов – цинка, серебра, золота, платины, свинца, хлора и т.д.

Пока не существуют математические модели, описывающие гомогенизацию трехмерных сеток, и тем более нет моделей, описывающих испарение и превращение в плазму ансамбля наночастиц (кластеров меди), что особенно сложно для областей далеких от зоны поглощения лазерного излучения. Рентгеновское свечение нагретой плазмы попадает на РЭОК, пройдя толщу холодного малоплотного вещества мишени, окружающего область взаимодействия лазерного пучка с мишенью. По сравнению с исходным материалом мишени, оно частично ионизовано излучением из зоны поглощения лазерного излучения, но прямых измерений состояния этого

вещества не проводилось. Эффективно наш размер мишени соответствует толщине 6-7 мкм пленочного полимерного фильтра из ТАЦ. Малоплотная сетка с наночастицами меди при равномерном усреднении соответствует медному фильтру с толщиной 0,1 мкм и пластику с толщиной около 6 мкм. Известно, что при ионизации веществ и превращении в плазму пробеги уменьшаются. Поскольку состояние окружающей плазму среды в данных экспериментах не фиксировалось (а надо делать это с такой же разверткой во времени как основной процесс) можно лишь оценить поправки по порядку величины, что и будет сделано по ходу обсуждения.

Попытаемся продемонстрировать хотя бы качественную картину подкритической плазмы, иллюстрируя динамики выводы набором пространственных распределений свечения в разные моменты времени (см. Рис. 15-19). Начнем с глубоко подкритической (0,26N_{кр}) плазмы - рисунок 15 (выстрел №28236, ТАС 4,5 мг/см³, Е_L=166 Дж) - потому, что все интересующие нас события успевают произойти за 2 нс (время развертки РЭОК). Граница свечения со стороны падения лазерного излучения (отметка L = 730) почти не сдвигается и ко времени t = 183 (здесь и далее время дано в пикселях, 1 пиксель ≈ 2 пс), что соответствует уже спаду интенсивности лазерного излучения, большая часть трехмерной сетки уже прогрета, а через еще не светящуюся часть сетки прогрелась поверхность алюминия (маленький бугорок справа, отметка L = 930). Предположительно, алюминий нагревается потоком горячей плазмы, проникающей через еще не гомогенизированную трехмерную сетку. На отметке t = 295 пикселей свечение алюминия составляет почти 50% от максимума свечения, и горячая плазма уже вплотную подошла к Al-стенке. В момент t = 376, когда лазерное излучение уже почти погасло, а интенсивность свечения плазмы уменьшилась, горячая область vже сомкнулась с алюминием, и его свечение резко возросло. При этом внешняя граница плазмы (со стороны лазера) двигается в сторону стенки, а в следующем кадре (t = 487 пикселей), когда импульс уже кончился, внешняя граница начала движение от стенки. Интересно заметить, что и горячая светящаяся область, остывая, отошла от алюминия, интенсивность свечения которого не уменьшилась. Но удивляет то, что следующий момент времени t = 590 пикселей плазма уже остыла, а алюминий засветился еще сильнее. А после этого общее свечение горячей светящейся области и алюминия ослабевает уже заметно медленнее, чем в предыдущий период. Сигнал с тыльной стороны алюминия на оптической ЭОК для того же выстрела появляется через 1 нс, но в это время входит движение волны по алюминиевой фольге, которое оценивается 0,1-0,15 нс.



Рис. 15. Выстрел # 28236, ТАЦ 4,5 мг/см³, 3 ω , $E_L = 166$ Дж

31



Рис. 16. Выстрел # 28272, ТАЦ 4,5 мг/см³, 1 ω, E_L = 170 Дж

Из всего увиденного можно сделать вывод, что лазерное излучение поглощается в сравнительно узкой области вблизи внешней поверхности сетки, а не глубоко в сетке, т.е. в течение длительности лазерного импульса полной гомогенизации плазмы не происходит. Гидродинамическое движение отстает от движения области нагрева и после окончания лазерного излучения. По-видимому, испарение алюминия охлаждает плазму из полимерной сетки, но кинетическая энергия последней, переходя в тепло, нагревает алюминий и замедляет скорость остывания плазмы в целом.

Убедимся в том, что такая же полимерная сетка, но при облучении на первой гармонике (2,34 №), ведет себя иначе (см. Рис. 16, выстрел №28272, ТАС 4,5 мг/см³, E_L=170 Дж). В то время, когда на третьей гармонике свечение плазмы распространилось почти на всю глубину трехмерной сетки, облучение на первой гармонике при t = 196 пикселей вызвало лишь нагрев (и, повидимому, более слабый) приповерхностных слоев сетки. Эффективность поглощения лазерного излучения на первой гармонике явно ниже. Далее два кадра t = 298 пикселей и t = 349 пикселей идет накопление энергии и расширение зоны свечения, при этом внешняя граница (обращенная к лазерному лучу) очень медленно смещается в глубь сетки, а после прекращения импульса внешняя граница останавливается и начинает двигаться наружу. Интенсивность свечения плазмы после окончания импульса спадает заметно быстрее, чем в плазме на третьей гармонике, что свидетельствует также о меньшем объеме плазмы. Отметим и здесь появление двух максимумов в интенсивности, причем внутренний (ближе к алюминию) максимум интенсивности почти не движется, а его внешняя граница движется, что может быть связано с движением волны сжатия и/или с нагревом за счет электронной теплопроводности. За время развертки РЭОК (2 нс) через пену энергия до алюминия не доходит. Сигнал с тыльной стороны алюминия на ЭОП для того же выстрела появляется через 3 нс, но в это время входит движение волны нагрева и по алюминиевой фольге, которое для этого случая оценивается 0,2-0,3 нс.

Рассмотрим, как меняются процессы поглощения лазерного излучения на третьей гармонике (0,54 N_{кр}) и переноса энергии через малоплотный слой при увеличении плотности трехмерной полимерной сетки из ТАЦ от 4,5 мг/см³ до 9,1 мг/см³. (см. Рис. 17, выстрел №28207, $E_L = 158$ Дж). На начальном этапе рентгеновское свечение возникает вблизи внешней поверхности трехмерной сетки (координата L = 730) при t = 128 пикселей и распространяется в обе стороны (t = 275 пикселей), медленно в сторону луча и быстрее в сторону Alфольги. Заметим, что яркое свечение сосредоточено в узкой области и на левом крыле имеется перегиб (пространственная координата L = 750-760). На следующем кадре (t = 391 пикселей) после окончания лазерного импульса яркость свечения спадает, но оно уже захватило более половины глубины трехмерной сетки. Причем на левом крыле прописи четко проявляется перегиб, который на следующих кадрах выглядит как отдельный максимум свечения. Левая внешняя граница свечения после окончания лазерного импульса постоянно движется наружу. Интенсивность свечения в максимумах постепенно ослабевает, но вся область свечения расширяется, в основном, за счет (гидродинамического?) движения в сторону Al-фольги, которой за время развертки РЭОК не успевает достичь. Сигнал с тыльной стороны алюминия на ЭОК для того же выстрела появляется через 1,7 нс, но в это время входит движение волны по алюминиевой фольге, которое оценивается в данном случае 0,15-0,2 нс.

Наконец, сравним динамику плазмы с одинаковой плотностью (и концентрацией электронов), но отличающейся наличием или отсутствием наночастиц меди (предыдущий Рис. 17 и Рис. 18, выстрел №28211, E_L =159 Дж, ТАС с полной плотностью 9,1 мг/см³, включающей 9,9 вес. % меди). Вначале (первые три прописи t = 88 пикселей, t = 210 пикселей и t = 345 пикселей) расширение светящейся области проходит почти одинаково, образец с медью немного обгоняет. Однако, после окончания лазерного импульса расширение плазмы наружу (в сторону лазерного луча) у образца с медью становится более активным. Форма светящейся области у образца с медью имеет более резкие особенности. Тем не менее, динамика внутренней границы светящейся области (обращенной к Al-фольге) в обоих образцах почти одинакова. Тем более вызывает удивление, что сигнал с тыльной стороны алюминия на ЭОК для того же выстрела (образец с медью) появляется намного позже, чем у образца без наночастиц, через 4,0 нс (вместо 1,7 нс), но в это время также входит время движения волны нагрева по алюминиевой фольге, которое здесь оценивается 0,3-0,5 нс. Нам известна лишь одна публикация [11] с детальным обсуждением взаимодействия интенсивного лазерного излучения с подкритическими средами, включая трехмерные сетки из агара с плотностью 4 мг/см³ и 9 мг/см³, что для второй гармоники неодимового лазера соответствовало электронной плотности 0,32 N_{cr} и 0,76 N_{cr}. Отличие в структуре нашей ТАЦ-сетки (ячейки 1-2 мкм) от полимерной сетки агара (ячейки 10-15 мкм) возможно имеют значения для скоростей переноса энергии, но гораздо более существенным отличием, по нашему мнению, является наличие на расстоянии 0,4 мм у нас второго Al-слоя. Тем не менее, начальные скорости распространения рентгеновского свечения по трехмерной полимерной сетке находятся в удовлетворительном согласии с результатами [11]. Замеченное у нас уменьшение этой скорости по мере приближения к Al-фольге, возможно, связано с встречным движением через еще неиспарившуюся сетку Al-паров (плазмы?).



Рис. 17. Выстрел # 28211, ТАЦ 9,1 мг/см³, 9.9% Си по весу, 3 ω , $E_L = 159$ Дж



Рис. 18. Выстрел # 28207, ТАЦ 9,1 мг/см³, 3 ω , $E_L = 158$ Дж

36

То же включение в процесс переноса Al-плазмы и ионизованных атомов от полимерной трехмерной сетки может, как это в общих чертах отмечалось выше, приводить к ослаблению яркости регистрируемого свечения. И поскольку образование плазмы на периферии изучаемой области - процесс нестационарный во времени, то и ослабление свечения в разные моменты времени и на разных расстояниях от Al-фольги не будет постоянным. Чтобы оценить возможные масштабы поправок и одновременно ту долю от полной вложенной энергии, которая рассеялась в окружающем пространстве мишени (ее нерабочей части), мы рассмотрели лазерные эксперименты без полимерных сеток на мишени (см. Рис. 19 и 20). Отметим попутно, что при всестороннем облучении сферической мишени эта доля энергии, теряемая в случае с плоской мишенью, не пропадет даром, а будет участвовать в процессе разравнивания энергии лазерного излучения по поверхности рабочей капсулы.

При непосредственном облучении на третьей гармонике Al-фольги толщиной 5 мкм (см. Рис. 19, E_L=40 Дж) идет накопление энергии в алюминии рентгеновское свечение возникает уже после максимума яркое И интенсивности (заметно позже, чем в полимерной сетке). Интенсивное рентгеновское свечение возникает к концу импульса и еще 0,5 нс не убывает по яркости, но внешний левый край светящейся области движется от фольги t = 522 пикселей, t = 679 пикселей и t = 833 пикселей. При этом (см. кадр t = 762 пикселей) появляется провал в интенсивности вблизи границы с Al-фольгой, который затем (см. t = 833 пикселей и t = 912 пикселей) углубляется при общем спаде интенсивности свечения. Если мы предположим, что провал появляется вследствие поглощения в алюминия в кольцевой парах периферийной области, то, приняв среднюю энергию квантов за 2,3 кэВ, можем рассчитать оптическую (рентгеновскую) плотность испаренного алюминия $\rho\Delta r$, которая оказывается значительной $\rho\Delta r = 0.3$ мг/см². Скорость истечения пара полагали 3·10⁶ см/с равной половине скорости звука при T=30 эВ, тогда нижняя оценка энергии, вложенной в этот пар, соответствует 0,1 Дж.

Попробуем такую же процедуру применить к анализу результата (см. Рис. 20, выстрел №28234, E_L =161 Дж), полученного при облучении мишени из двух А1-фольг с толщинами 0,8 мкм и 5 мкм. Конечно, энергия в импульсе в 4 раза выше, чем на предыдущем рисунке, и толщина первой фольги в 6 раз тоньше, поэтому она начинает интенсивно светиться уже к моменту времени t = 86 пикселей, расширяясь и прогревая рентгеновским излучением нижнюю фольгу (см. кадр t = 245 пикселей), видно пик на пространственной координате (L = 900). К моменту t = 456 пикселей лазерный импульс уже закончился и плазма летит как внутрь, так и наружу, уже достигая А1-фольги. При «ударе» плазмы первого слоя об А1-фольгу (см. кадры t = 529 пикселей и t = 607 пикселей) свечение А1-фольги становится более интенсивным и очень слабо спадает к последнему кадру t = 947 пикселей. В остальной же плазме, несмотря на очевидную динамику, мы видим лишь слабое смещение в сторону

нижней фольги и постепенное остывание. Наличие промежуточных минимумов в интенсивности, начиная с кадра t = 529 пикселей и до последнего t = 947 пикселей, можно пытаться описать испарением на периферийных участках алюминиевых фольг, но сделать однозначно это тяжело. По той же модели, что и для предыдущей картинки, мы получаем $\rho\Delta r = 1$ мг/см² и энергию (умножая на время 1 нс) в парах алюминия 0,5 Дж, а для нижней $\rho\Delta r$ $= 0.5 \text{ мг/см}^2$ для момента времени t = 758 пикселей (суммарную энергию оценить трудно из-за быстро меняющихся условий (см. кадры t = 529пикселей, t = 607 пикселей, t = 758 пикселей и t = 947 пикселей). Возвращаясь к рисункам 15 и 18, тем же путем можно оценить слой поглощения в парах алюминия Рис. 18 $\rho\Delta r = 1.5 \text{ мг/см}^2$, а энергия в периферийном алюминии 0.3 Дж. Поскольку на Рис. 18 основные события развиваются после окончания развертки РЭОК, а мы пытаемся оценить испарения алюминия по начальным (с t ≈ 100 пикселей) сигналам, близким к фоновым как для РЭОК так и для ЭОК), то результаты расчетов надо рассматривать как оценку по порядку величины: $\rho\Delta r = 0,2 \text{ мг/см}^2$ и масса испаренного за 2 нс периферийного алюминия достигает 5% от массы алюминия, участвующей в ускорении.

Суммируя результаты экспериментов с подкритическими средами, можно сказать, что излучение лазера поглощается в поверхностном слое пены для плотностей >0,5 N_{кр}, а для плотностей ≈0,25 N_{кр} поглощение происходит в объеме плазмы, но не глубоко, что, по-видимому, связано с незавершившейся стадией гомогенизации плазмы. На процессы переноса энергии в столь тонких (350-400 мкм) малоплотных полимерных слоях существенное влияние второй (алюминиевый) слой, приводящий из-за испарения оказывает навстречу потоку к снижению скорости переноса энергии через плазму от трехмерной полимерной сетки, тем самым ослабляя удар волны уплотнения. При облучении мишеней с кластерами существует значительная задержка в появлении сильного оптического свечения на тыльной стороне алюминиевой фольги по сравнению с окончанием свечения в рентгеновском диапазоне с E>1,5 кэВ. Это может быть связано, во-первых, с радиационным охлаждением разреженной плазмы, И, во-вторых, с наличием потока жесткого рентгеновского излучения из короны, нагревающего поверхность алюминия, что приводит к образованию потока относительно холодной плазмы, распространяющейся от поверхности алюминия и препятствующего быстрому прогреву всей толщи фольги. Несмотря на практически равные массовые и электронные плотности (рассчитанные в случае полной ионизации материала мишени) процесс гомогенизации плазмы замедляется и время нагрева тыльной стороны алюминия существенно увеличивается по сравнению с чистыми (т.е. не содержащими кластеров) мишенями. Так как пространственная структура мишеней с добавками и без них практически одинакова, то возможно изучение влияния на механизмы энергопереноса размеров кластеров в диапазоне 5-100 HM.



Рис.19. Выстрел # 28192, алюминиевая фольга толщиной 5 мкм, 3 ω , $E_L = 40 \ Дж$

39



Рис. 20. Выстрел # 28234, две фольги, разделенные промежутком 380 мкм. Верхняя фольга – алюминий 0,8 мкм, напыленный на подложку из полистирола толщиной 3,5 мкм. Нижняя фольга – алюминий 5 мкм, 3 ω , $E_L = 161 \text{ Дж.}$

Проведенные эксперименты с мишенями подкритической плотности показывают, что излучение лазера поглощается в поверхностном слое пены. Мягкое рентгеновское излучение короны проникает через материал мишени, вызывая начальный нагрев и гомогенизацию плазмы. В процессе превращения материала мишени в плазму и при ее гомогенизации эффективно процесс переноса энергии замедляется. Нагрев поверхности алюминиевой пленки приводит к возникновению относительно холодной и плотной плазмы, которая, в свою очередь, снижает скорость переноса. Фронт распространения наблюдаемого рентгеновского излучения связан с переносом энергии мягким рентгеновским излучением в частично гомогенизированной плазме, что также приводит к интенсивной абляции алюминия. Более медленная и горячая область, видимая на развертках рентгеновской камеры, связана с распространением массы и тепла ("гидротепловая" скорость [14]) и отвечает за возникновение второго, более яркого максимума свечения тыльной стороны фольги, наблюдаемого по записям с оптической камеры. Измеренная "гидротепловая" скорость находится в удовлетворительном согласии с данными [12], полученными при облучении плоских мишеней мягким рентгеновским излучением.

Время задержки в появлении пика оптического свечения тыльной стороны фольги приблизительно на 20% короче для мишеней из ТМРТА и на 40% длиннее для мишеней из агара по сравнению с ТАЦ при условиях одинаковой плотности, толщины, частоты лазера и параметров фокусировки. Не исключено, что это следствие различной концентрации кислорода в указанных выше мишенях, который может играть роль тяжелой добавки (такой как хлор или медь в мишенях из ТМРТА и ТАЦ) для мишеней, изначально кислород не содержащих (таких как полистирол). Эта гипотеза косвенно подтверждается результатами экспериментов с агаровыми и полистирольными пенами, описанными в работе [14], где также наблюдалась существенная разница в задержках оптического свечения тыльной стороны мишени, хотя авторы объясняли ее различной микроструктурой используемых мишеней.

5. Заключение

Разработана технология получения малоплотных (вплоть до 4,5 мг/см³) мелкоячеистых трехмерных полимерных сеток из триацетата целлюлозы, в том числе с добавками медных наночастиц – кластеров до 30% по весу. Экспериментально показано при лазерном облучении созданных мишеней, что процесс переноса энергии можно контролировать, вводя добавки различных концентраций и состава в нужные части мишени. А именно:

1. Были разработаны материалы и созданы мишени, использованные в лазерных экспериментах по изучению особенностей поглощения излучения и

переноса энергии в мишени при наличии слоя докритической плотности. Получены средние плотности вещества мишени 4,5 мг/см³, соответствующие 1/4 критической электронной плотности для используемых длин волн лазера в предположении полной ионизации материала мишени. Продемонстрированы структуры с открытыми порами с характерными размерами единицы и десятки микрон. Тщательно измеренные параметры мишеней обеспечили воспроизводимость и повторяемость лазерных экспериментов.

2. Наблюдались особенности поглощения интенсивного лазерного излучения и переноса энергии в двухслойных мишенях со слоем трехмерной сетки докритической плотности на фольге-подложке: приповерхностное поглощение падающего света малоплотной сеткой вместо ожидаемого объемного; величины скоростей радиационного переноса и гидротепловой волн; замедление скоростей распространения энергии по мере релаксации структуры малоплотной плазмы (гомогенизации); важная роль мягкого рентгеновского излучения короны в балансе нагрева-охлаждения малоплотной плазмы и граничащего с ней алюминиевого слоя; значительная задержка появления пика оптического свечения тыльной стороны *Al*-слоя при изменении свойств сетки/пены на поверхности *Al*, не предсказываемая теоретически.

3. Сравнение взаимодействия лазерного излучения с пенами докритической плотности в других лабораториях подтверждает наличие измеренных особенностей в пенах и трехмерных сетках без примесей. Скорости распространения видимого рентгеновского фронта и медленной "гидротепловой" волны согласуются с данными [11], полученными при облучении мишеней из агара с плотностями и структурой, близкой к используемым в описанном выше эксперименте. Измеренная гидротепловая скорость находится в удовлетворительном согласии с данными [12], полученными при облучении при облучении плоских мишеней мягким рентгеном.

Продемонстрированный лазерных экспериментах 4. В характер процессов поглощения переноса энергии трехмерных В сетках И околокритической плотности означает, что эти процессы чувствительны к примесям и временам релаксации, задаваемым компонентами мишени, а, следовательно, могут быть контролируемы введением подходящих добавок в нужное место мишени.

5. Изготовлены слои деликатных трехмерных сеток и пен с равномерно распределенными тяжелыми добавками в структуре или добавками в виде наночастиц ультрадисперсного порошка. Трехмерные сетки ТАЦ имеют субмикронные структурные элементы, незначительные флуктуации плотности на характерных размерах пятна фокусировки и позволяют получить равномерное распределение тяжелой добавки по объему мишени. Впервые сделаны и облучены докритические для 3-ей гармоники йодного лазера сетки

ТАЦ плотностью 9,1 мг/см³, в том числе с 10 % по весу примесей в виде наночастиц меди.

6. Экспериментально доказано, что введение тяжелых частиц меняет характер переноса в малоплотной сетке с фольгой на тыльной стороне. Характерные скорости переноса энергии в мишенях ТАЦ с добавками меди больше, чем в мишенях без меди (при практически одинаковых массовых и электронных плотностях), в то же время кажущееся охлаждение плазмы при облучении мишеней с кластерами сильнее. Наблюдается аккумуляция тепла в мишени с отложенным свечением нагретой фольги. Эти факты ждут своей теоретической интерпретации. Для объяснения задержки оптического сигнала по отношению к рентгеновскому необходимо произвести детальные расчеты, включающие в себя процессы радиационного охлаждения плазмы.

Введение в трехмерную сетку наночастиц с высоким Z за счет излучения более жестких квантов из короны мишени приводит к радиационному нагреву более широкой области, чем та, на которую фокусируется лазерное излучение, а также к предпрогреву этим излучением Al-фольги. Диффузия алюминия в полимерную сетку существенно меняет динамику передачи энергии от короны к ускоряемой фольге. Но именно подбор размеров и теплофизических свойств наночастиц может дать инструмент для управления процессом переноса энергии в подкритических средах.

7. Проведены проверочные эксперименты а) по сравнению действия пен различных производителей (измеренные скорости радиационного переноса и гидротепловой волны близки у имеющих приблизительно скорости одинаковую трехмерную структуру пен ТАЦ и ТМРТА и значительно отличаются по сравнению со скоростями, измеренными в мишенях из агара; б) модельные опыты, поддающиеся численному обсчету на мишенях из двух фольг с зазором между фольгами вместо сеток на фольге (показывают, что результаты экспериментов могут быть объяснены, по-видимому, только совместным действием жесткого и мягкого рентгеновского излучения на каждый из слоев мишени); в) по сравнению характера переноса энергии в докритических и надкритических сетках одинаковой структуры, который существенно различен.

В целом, показано, что добавки тяжелых элементов в вещество мишени околокритической плотности могут являться эффективным инструментом контроля процессов энергопереноса в плазме.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В. Назарову (Великобритания) за предоставленные мишени из ТМРТА.

Работа частично профинансирована в рамках проекта INTAS №0572.

Литература

- 1. Halpern G. M., Kim Hyogun. Methods of fabricating microsponge deuterated hydrocarbon polymer targets which emit neutrons when irradiated by high energy beams. // US patent No 4092381, 1978, May 30.
- 2. Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Розанов В.Б. и др., «Симметричное сжатие мишеней «лазерный парник» малым числом лазерных пучков», Квантовая электроника. 2003, Т. 33, С. 95-104.
- Belyaev V.S., Matafonov A.P., Vinogradov V.I., Garanin S.G., Borisenko N.G., et al. Composition, Density and Structure Dependent Neutron Yields from Deuterated Targets in High-Intensity Laser Shot. // Proceedings of Inertial Fusion Sciences and Applications . France, - 2005, (в печати).
- 4. Tanaka K.A., Kodama R., Mima K. Basic and integrated studies for fast ignition // Physics of Plasmas/ - 2003.- v. 10.- p. 1925.
- Benuzzi A., Koenig M., Krishnan J., Faral B., Nazarov W., et al. Dynamics of laser produced shocks in foam-solid targets. // Physics of Plasmas. – 1998, - V. 5, - No 8, - P. 2827-2829.
- Stevenson R.M., Suter L.J., Oades K., Kruer W., Slark G.E., et al. Effect of plasms composition on backscatter, hot electron production, and propagation in underdense plasmas. // Physics of Plasmas. – 2004, - V. 11, - No 5, - P. 2709-2715.
- 7. Гуськов С.Ю., Розанов В.Б. Взаимодействие лазерного излучения с пористой средой и образование неравновесной плазмы. // Квантовая электроника, 1997, т.24, №8, с.715-720.
- Аврорин Е.Н., Зуев, Карлыханов Н.Г. и др. Расчеты мишеней для ЛТС по программе «Заря». // Вопросы атомной науки и техники, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. - 1985, вып. 2, - С. 21-28.
- Limpoch J., Demchenko N.N., Gus'kov S.Yu., Kalal M., Kasperczuk A., et al. Laser interaction with plastic foam – metallic foil layered targets. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2004, - V. 46, - P. 1831- 1846.
- 10.Bugrov A.E., Burdonskiy I.N., Gavrilov V.V., et al. Study of lateral heat transfer and pressure profile smoothing in laser-irradiated low-density targets. // Proceedings of SPIE. - 2001, - V. 4424, - P. 367-370.
- 11.Koch J.A., Estebrook K.G., Bauer J.D., Back, Rubenchik C.A., et al. Time-Resolved X-ray Imaging of High-Power Laser-Irradiated Underdense Silica Aerogels and Agar Foams. // Phys. Plasmas. – 1995, - V. 2, - C. 3820 -3831.
- 12.Batani D., Desai T., Lower T.H., Hall T.A., Nazarow W., et al. Interaction of soft x-ray thermal radiation with foam-layered targets. // Physical Review E. 2002, V. 65, 066404.

- 13.Nazarov W. An *In-Situ* Polymerization Technique for the Production of Foam-Filled Laser Targets. // J. Moscow Phys. Soc. – 1998, - V. 8, - C. 251-255.
- 14.Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В. и др. Взаимодействие мощного лазерного излучения с малоплотными пористыми средами. // ЖЭТФ. 1997, Т.111, -С. 903-918.
- 15.Борисенко Н.Г., Меркульев Ю.А. Мишени с микрогетерогенной структурой для сферического лазерного облучения. // Труды ФИАН, Москва, Наука, 1992, С. 28-46.
- 16.Khalenkov A.M., Borisenko N.G., Erokhin A.A., Fedotov S.I., Merkuliev Yu.A., et al. Cluster Targets and Experiments on KANAL-2 Laser Installation. // Proc. 28th European Conference on Laser Interaction with Matter., 6-10 September 2004, Roma, Italy, Eds. A. Caruso et al., - C. 277-282.
- 17.Pimenov V.G., Drozhzhin V.S., and Sakharov A.M. Ultra-Low-Density Microcellular Aerogels Based on Cellulose Acetate. // Polymer Science. - Series B, - 2003, - V. 45, - C. 4-9.
- 18.Khalenkov A.M., Borisenko N.G., Kondrashov V.N., Merkulirv Yu.A., Limpouch J., Pimenov V.G. Experience of microheterogeneous target fabrication to study energy transport in plasma near critical density. // Laser and Particle Beams. – 2005. – in press.
- 19.Jungwirth K., Cejnarova A., Juha L., Kralicova B., Krasa J., et al. The Prague Asterix Laser System. // Phys. Plasmas, 2001, V. 8, C. 2495 -3006.
- 20.Pisarczyk T., Arendzikowski R., Parys P., and Patron Z.. Polari-Interferometer with Automatic Images Processing for Laser Plasma Diagnostics. // Laser & Particle Beams, - 1994, - V. 12, C. 549-563.
- Pimenov V. G., Drozhzhin V. S., and Sakharov A. M. Ultra-Low-Density Microcellular Aerogels Based on Cellulose Acetate // Polymer Science series B. - 2003. - , V. 45. - Nos. 1–2. - p. 4.
- 22. Ярош А. А., Круковский С. П. Патент Российской Федерации № 2149151 от 4.12.1998.
- Falconer J., Nazarov W., and Horsfield C. J. In situ production of very low density microporous polymeric foams // J. Vac. Sci. Technol. – 1995. - A 13. – p.1941
- 24. Akimova I.V., Borisenko N.G, Gromov A.I., Khalenkov A.M., Kondrashov V.N., Limpouch J., Krousky E., Kuba J., Masek K., Merkuliev Yu.A., Nazarov W., Pimenov V.G. Regular 3-D Networks for Controlled Energy Transport Studies in Laser Plasma near Critical Density // Fusion Science and Technology. 2005. in press.