

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТ

3

Н.Г.Борисенко,
Ю.А.Меркульев

Предварительный прогрев
лазерной мишени сквозь слой
микрогетерогенной плазмы, о
чем свидетельствуют
сигналы, немного
превышающие уровень фона.

Москва 2008

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОГРЕВ ЛАЗЕРНОЙ МИШЕНИ СКВОЗЬ СЛОЙ МИКРОГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ, О ЧЕМ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ СИГНАЛЫ, НЕМНОГО ПРЕВЫШАЮЩИЕ УРОВЕНЬ ФОНА.

Н. Г. Борисенко, Ю.А. Меркульев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Аннотация

Последние опубликованные данные о пропускании лазерного излучения в начале действия импульса через плазму из полимерного аэрогеля, полученные на установках LIL (Франция) и PALS (Чехия) доказали, что возникает предварительный прогрев подложки из металлической фольги, моделирующей оболочку термоядерной мишени. Такой слабый прогрев был выявлен нами при тщательной обработке снимков с рентгеновской и оптической стрик-камер (ЭОК) более ранних экспериментов по изучению переноса энергии в плазме на лазере PALS, основные результаты которых были опубликованы двумя годами ранее. Эффект проявляется в виде сигналов, немного превышающих фон, которые появляются практически сразу с началом действия лазерного импульса и затем ослабевают, несмотря на продолжающееся воздействие на плазму лазерного излучения. Хотя доля лазерной энергии, прошедшей через микрогетерогенную плазму к фольге или оболочке, мала по сравнению с полной энергией в импульсе, но она поступает на мишень (фольгу или оболочку) в начальный период действия лазерного импульса и может оказывать существенное влияние на динамику плазмы и эффективность сферических криогенных термоядерных мишеней. Поэтому эффект требует специального изучения, т.к. имеющийся экспериментальный материал не дает возможности объяснить физику переноса лучистой энергии, найти однозначные зависимости доли пропускаемой лазерной энергии от длины волны и интенсивности лазерного излучения, а также от плотности и структуры малоплотного полимерного материала.

Мы благодарны за частичную поддержку РФФИ (проекты №06-02-17526 и 07-02-01148).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРОГРЕВ ЛАЗЕРНОЙ МИШЕНИ СКВОЗЬ СЛОЙ МИКРОГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ, О ЧЕМ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ СИГНАЛЫ, НЕМНОГО ПРЕВЫШАЮЩИЕ УРОВЕНЬ ФОНА.

Н. Г. Борисенко, Ю.А. Меркульев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

1. Введение

Более 20 лет ведутся исследования микрогетерогенной плазмы при воздействии интенсивного лазерного излучения на мишени из полимерной пены [1-3]. Главной целью этих работ является создание конструкции мишеней, в которых малоплотный слой позволяет сгладить неравномерность лазерного облучения на поверхности рабочей оболочки – мишени. Основные процессы переноса энергии в плазме, полученной из пен или аэрогелей, уже хорошо изучены. В последние годы стали использоваться рентгеновские и оптические стрик-камеры (электронно-оптические камеры - ЭОК) с высоким временным (до пикосекунд) и пространственным (до микрометров) разрешением. Это дало возможность уточнить константы переноса: скорость формирования рентгеновского свечения в малоплотном полимерном слое и время прохождения через полимерный слой ударной волны (скорости переноса энергии в плазме с плотностью близкой к критической). Высокая точность измерения этих параметров плазмы обеспечивалась как хорошей повторяемостью условий лазерного облучения, так и повторяемостью параметров мишеней (плотности, субмикронной структуры) в объемах формирования плазмы (этот объем – произведение площади пучка на высоту полимерной «пены»). В последние годы удалось создать малоплотные ($1-5 \text{ мг/см}^3$) полимерные структуры - аэрогели в виде трехмерных полимерных сеток с наноразмерными (30-50 нм) волокнами и с микронными (0.7-1.6 мкм) расстояниями между волокнами [4-7]. Кроме того, появилось новое поколение камер (дорогостоящих) с динамическим диапазоном регистрации черно-белого сигнала до 14 бит.

Динамика плазмы и оптическое излучение тыльной стороны мишени (обычно, двухслойной мишени – полимерная пена на поверхности тонкой металлической фольги) исследовались более 20 лет интерференционными (или теневыми) методами, оптическими датчиками (светодиодами с наносекундным разрешением) или оптическими стрик-камерами (ЭОП) уже после нагревания ударной волной металлической фольги на тыльной стороне малоплотного слоя. Прямые измерения прошедшего сквозь плазму лазерного излучения после интерференционного светофильтра или зеркала на ЭОП (стрик-камере) с большим динамическим диапазоном регистрации не проводились, т.к., во-первых, такие ЭОП появились недавно и, во-вторых,

измеренная десятилетие тому назад доля энергии в прошедшем излучении была мала ($<0.5\%$). Это действительно так при облучении мишеней излучением большой длины волны (на основной частоте лазера) и при плотности мишени в виде полимерной пены с ячейками 20-50 мкм заметно выше критической, как это в основном было в 90х годах, когда проводились первые опыты по сглаживанию неоднородностей освещенности лазерной мишени за счет применения внешнего малоплотного аблятора. Однако в последние годы стали применяться лазеры с короткой длиной волны ($\lambda < 0.5$ мкм) и ЭОП с большим динамическим диапазоном регистрации, что позволило зарегистрировать «слабые сигналы» предварительного прогрева алюминиевой фольги за счет прохождения энергии мощного лазерного излучения сквозь микротурбулентную плазму и остатки трехмерной полимерной сетки - аэрогеля.

В экспериментах по взаимодействию интенсивного лазерного излучения с такими полимерными аэрогелями было установлено, что в начале действия лазерного импульса плазма пропускает часть лазерной энергии, пока не ясно каким образом (смотри, рисунок 1 из публикаций [8-11]).

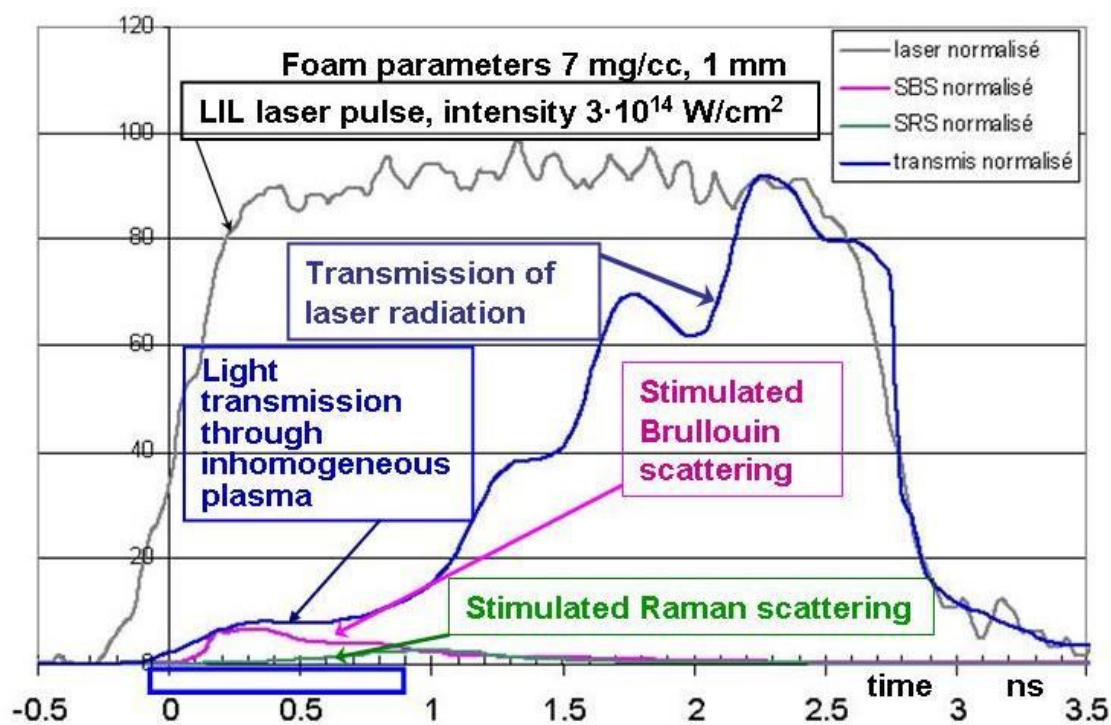


Рисунок 1. Нормированные зависимости от времени: пропускания греющего лазерного (LIL) излучения плазмой (синяя линия), интенсивности обратного ВРМБ (фиолетовая) и обратного комбинационного рассеяния (зеленая) от слоя полимерного аэрогеля толщиной 0.95 мм с плотностью 6.7 мг/см³. [8-11]

На рисунке 1 приведены нормированные к лазерному излучению данные от выстрела на установке LIL по пропусканию излучения (в зависимости от времени от начала лазерного импульса) плазмой, сформированной при лазерном воздействии из мишени в виде трехмерной сетки из триацетата целлюлозы с плотностью около 7 мг/см^3 (точнее $6,7 \text{ мг/см}^3$) с толщиной слоя 1 мм. В этом выстреле на тыльной стороне полимерного слоя не было медной фольги и оптическая стрик-камера (ЭОК) регистрировала излучение, прошедшее через плазму и полимерный аэрогель, - лазерное и/или рассеяное (ВРМБ). Хорошо видно, что в течение первой наносекунды сквозь неомогенную (турбулентную) плазму и остатки аэрогеля проходит свет с интенсивностью в 10-14 раз более слабой, чем та, что падает на поверхность мишени $4 \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$. Но эта интенсивность $3 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ достаточна для того, чтобы нагреть и испарить металлическую фольгу и прилежащий аэрогель.

Начиная с времени 1-1.2 нс, пропускание увеличивается, что связано с окончанием формирования плазмы по всей глубине аэрогеля и ее постепенной гомогенизацией. Пульсации пропускания с периодом около 0.5 нс свидетельствуют о том, что плазма еще не успокоилась, и происходят какие-то осцилляции плотности.

В этих же публикациях [8-11] обращалось внимание на замедление скорости формирования горячей плазмы при распространении ударной волны и тепла вглубь полимерного аэрогеля. В то же время в работе [12] в однослойных толстых мишенях из полимерного и кремниевого аэрогеля с подкритической плотностью скорость формирования плазмы оставалась неизменной в течение 1-1.2 нс (длительность лазерного импульса была 1 нс). Изменение скорости формирования плазмы можно объяснить, с одной стороны, боковыми потерями в узком и длинном цилиндре или, с другой стороны, объясняется нами [13-15] преднагревом пропроходящим излучением тыльной медной фольги и возникновением движения нагретого вещества навстречу ускоряемому абляцией потоку плазмы. Очевидно, что в уже выполненных экспериментах на других лазерных установках пропускание и как следствие предварительный слабый прогрев фольги должны были фиксироваться.

Данная работа содержит анализ результатов по пропусканию излучения в начальный период действия лазера и данных уже опубликованных [4-7,13-17] экспериментов 2005-2006 годов на лазерной установке PALS в Праге с попыткой получить новую дополнительную информацию со снимков от рентгеновских и оптических ЭОК с усилением сигналов при компьютерной обработке с целью выделения начальной стадии нагревания внешней поверхности Al-фольги (РЭОК) и тыльной стороны фольги (ЭОК). Слабые сигналы превосходят фон лишь в несколько раз.

2. Краткое описание экспериментов на установке PALS.

Две серии экспериментов на лазерной установке PALS (Prague Asterix Laser System) в Праге в 2005 г. (140 выстрелов) и 2006 г. (80 выстрелов) были посвящены изучению переноса энергии в плазме с плотностью вблизи критической при взаимодействии мощного лазерного излучения с мишенями в виде трехмерных полимерных сеток [3-6], предоставленных Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН. Схема эксперимента показана на рисунке 2 [6,7] и детально описана в [6,7,13-16].

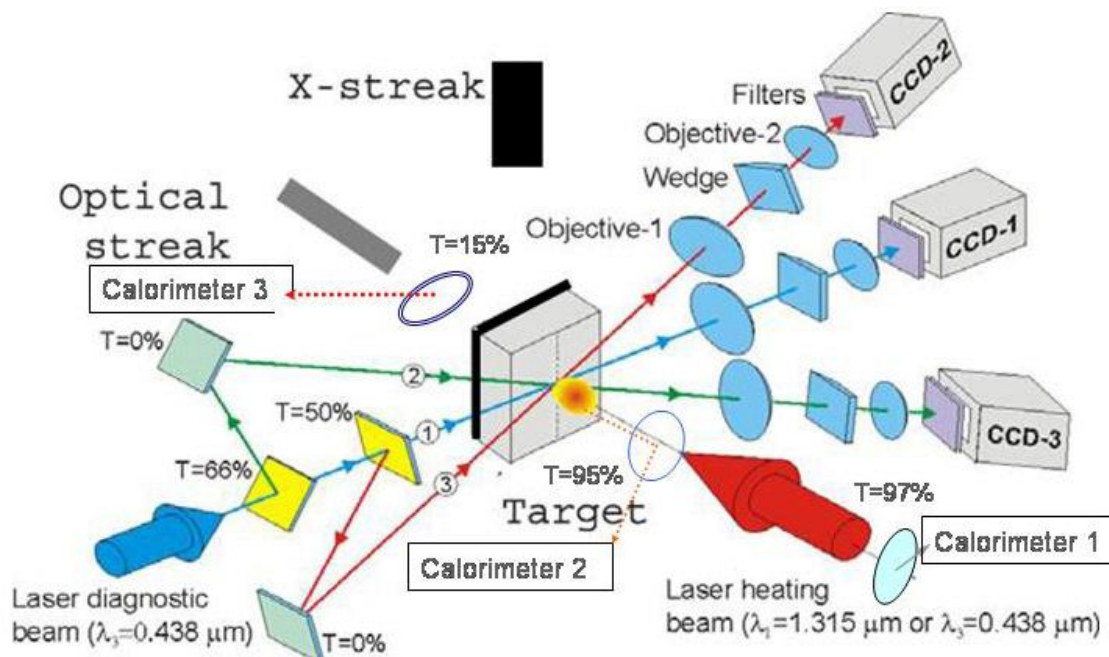


Рисунок 2. Диагностический комплекс установки PALS. РЭОП и ПЗС-датчики расположены в плоскости мишени, лазерное излучение падает по нормали к поверхности полимерной «пены», оптическая стрик-камера (ЭОП) расположена по нормали к тыльной стороне мишени, зеркала отводят 5-10% энергии пучков на калориметры. Диагностический луч используется для получения тенеграм.

PALS - йодный однопучковый лазер, работающий на основной частоте (длина волны $\lambda=1.315$ мкм) или на третьей гармонике (длина волны $\lambda=0.438$ мкм) [6-7,13-17] при длительности импульса на полувывоте 0.38 и 0.32 нс, соответственно. В первой серии экспериментов на тыльной стороне полимерного слоя крепилась алюминиевая фольга толщиной 5 мкм, а калориметры 2 и 3 с зеркалами, отводящими на них излучение, отсутствовали. Во второй серии экспериментов они работали, но были отключены все приборы, регистрирующие процессы с боковой поверхности мишени.

Лазерное излучение падает по нормали к поверхности полимерного аэрогеля. Небольшая часть излучения подается на калориметр, измеряющий лазерную энергию в импульсе, а отраженное от плазмы в апертуру лазерного

пучка излучение измеряется (см. рис. 2) дополнительным калориметром. Все калориметры предварительно откалиброваны. Рентгеновское излучение плазмы в плоскости мишени через специальную прорезь в кольце-держателе мишени регистрируется электронно-оптической камерой (РЭОК). Рентгеновская камера KENTECH снимает кадр 1024x1024 пикселей. Пространственное и временное разрешение регистрирующей системы - 50 мкм и 70 пс, соответственно. Оптическое излучение с тыльной стороны мишени отражается на калориметр специальным зеркалом, пропускающим 94% в полосе излучения 3^{ей} гармоники йодного лазера и 15% вне линии шириной 1.5 нм. А прошедшее излучение фокусируется на щель оптической электронно-оптической камеры (ЭОК) Hamamatsu C7700 с фотокатодом S-1.

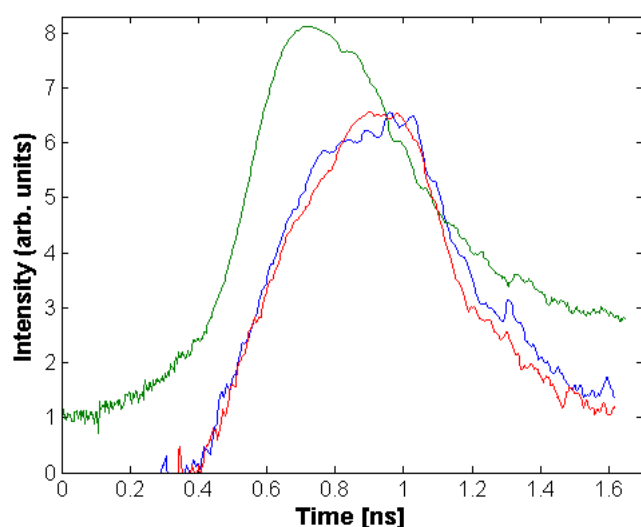


Рисунок 3. На графике из [11] в натуральном логарифмическом масштабе показаны результаты пропускания лазерного излучения без мишени (выстрел №30255) и прошедшее сквозь азрогель из ТАЦ с плотностью 4.5 мг/см³ и толщиной 200 мкм выстрелы 30251 и 30252).

хотя при переходе на третью гармонику форма чуть отличается и длительность импульса немного уменьшается. Длительность и форма импульса на частоте 3 ω измерялась также на ЭОК в опытах без мишени.

Здесь мы не будем обсуждать характеристики и параметры мишеней, приведя лишь вид мишени на сканирующем электронном микроскопе (смотри рисунок 4). Отметим, что перед съемкой на полимерный азрогель (триацетат целлюлозы – ТАЦ) наносится для снятия заряда тонкий (30-40 нм) слой золота, который делает структуру несколько более грубой. Обратим внимание на то, что полимерная структура открыто-пористая, подобная морской губке, но размеры волокон тонкие 50-100 нм, т.е. заметно меньше

Камера имеет динамический диапазон (см. рис. 3) почти 10⁴ (12 бит в черно-белом цвете) на кадре 512 x 512 пикселей с временной и пространственной разверткой на кадр 1.6 нс (или 5.2 нс) и 2 мм, соответственно.

В опытах с двухслойными мишенями оптическое излучение с тыльной стороны Al фольги измерялось только ЭОК. Регистрируемый на том же кадре оптической стрик – камеры (ЭОК) лазерный импульс на первой гармонике (fiducial mark) позволяет иметь временную привязку и судить о длительности импульса,

длины волны излучения. Если измерять волокна по снимкам то, волокна обладают плотностью меньше, чем плотность полимера ТАЦ. В лазерных экспериментах использовались такие же мишени из полимерного аэрогеля, в которых вводились наночастицы меди вместо части полимера, так, что электронная плотность не изменялась (9.1 мг/см^3), оставаясь близкой к половине критической плотности для третьей гармоники йодного лазера.

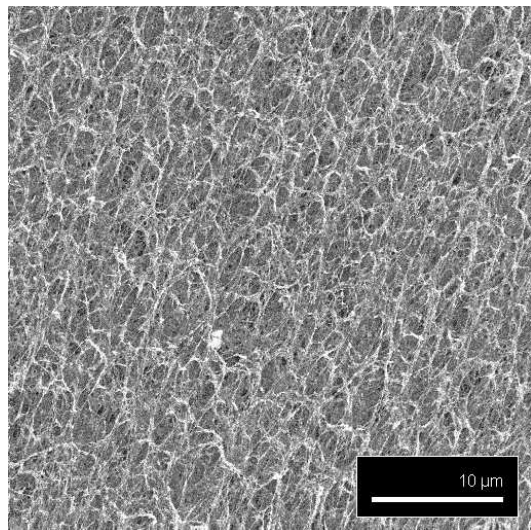


Рисунок 4. Структура малоплотного полимерного аэрогеля с плотностью 2 мг/см^3 . Масштаб – 10 мкм.

В первой серии экспериментов на PALS использовались мишени не только из ТАЦ ($\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{O}_8$), но и из триметилпропан-триакрилата – ТМПА ($\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_6$), изготовленные В. Назаровым (университет Св. Андрея, Шотландия) [16], со структурой аналогичной ТАЦ. Причем структура этих веществ уже мало меняется при изменении плотности от 20 мг/см^3 до 2 мг/см^3 , оставаясь полностью открыто-пористой трехмерной сеткой с увеличивающимся от 0.8 мкм до 1.7 мкм расстоянием между волокнами, а введение в ТАЦ наночастиц меди лишь слегка огрубляло структуру. Кроме того, применялись мишени из агара ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_9$) с относительно крупноячеистой структурой (40 мкм) со

смешенными закрытыми и открытыми порами, имевшими толщины структурных элементов $0.5\text{-}1 \text{ мкм}$, которые были изготовлены С.Ф. Медовщиковым (ТРИНИТИ, г. Троицк, Россия) [6,17].

Измерения флуктуаций средней плотности по пропусканию мягкого рентгеновского излучения показали, что во всей мишени из ТАЦ диаметром 2.5 мм в объемах лазерного воздействия (диаметр 300 мкм при толщине $100\text{-}400 \text{ мкм}$) флуктуации плотности аэрогеля с плотностью 9 мг/см^3 и 4.5 мг/см^3 не превышают 1% [20,25]. Флуктуации плотности трехмерных сеток ТАЦ с плотностью 2.25 мг/см^3 не превышают 3% .

3. Измерение пропускания лазерной энергии микротурбулентной плазмой.

Во второй серии экспериментов (в 2006 г.) на тыльной стороне мишени не было Al-фольги, и проходящий через мишень свет (смотри рис. 2), регистрировался параллельно ЭОК и калориметром. Прямым доказательством того, что сквозь микрогетерогенную плазму с плотностью вблизи критической проходит часть лазерного излучения, являются результаты, показанные на рисунках 5-7 из работ [15], для условий облучения: диаметр фокального пятна 300 мкм , энергия в импульсе 170 ± 15

Дж или 84 ± 12 Дж, при длине волны лазерного излучения 0.438 мкм , и с мишенями из триацетата целлюлозы (ТАЦ), которые имели три варианта плотности (9.1 мг/см^3 , 4.5 мг/см^3 и 2.25 мг/см^3), приводившими к формированию плазмы с плотностью $\frac{1}{2} N_{cr}$, $\frac{1}{4} N_{cr}$ и $\frac{1}{8} N_{cr}$, с 3 толщинами слоев (400 мкм , 200 мкм и 100 мкм), что позволило работать в широком диапазоне изменения погонной массы мишени от 0.36 мг/см^2 до 0.02 мг/см^2 .

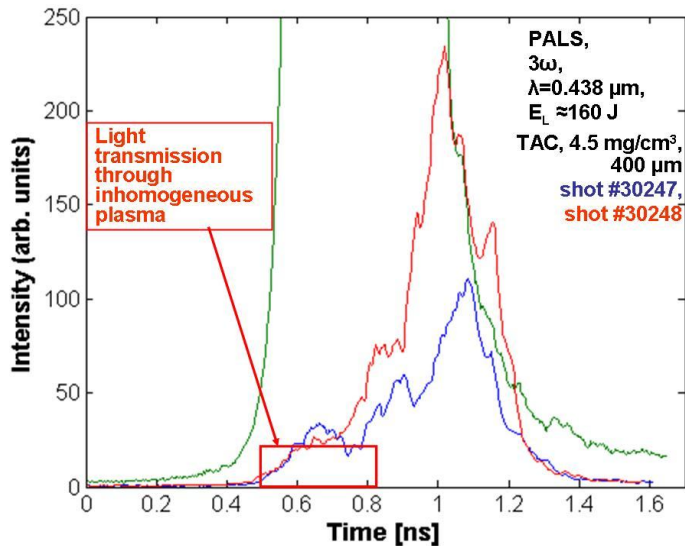


Рисунок 5. Временная зависимость интенсивности прошедшего лазерного излучения сквозь плазму полимерного аэрогеля. Зеленая – внешняя линия интенсивность без мишени (выстрел 30255), синяя и красная пропускание ТАЦ с плотностью 4.5 мг/см^3 и толщиной 400 мкм при энергии на мишени 160 Дж .

калориметром, действующим параллельно с ЭОК (см. рис. 2). Зависимости прошедшей сквозь подкритическую плазму энергии от плотности аэрогеля и толщины слоев, а также от интенсивности лазерного излучения обсуждались в наших ранних статьях [11,15,22-24]. Здесь же мы будем обсуждать лишь пропускание лазерной энергии в начальный момент действия излучения на полимерный аэрогель.

Хорошо видно, что пока плазма не стала гомогенной сквозь нее и остатки трехмерной полимерной сетки ТАЦ проходит часть излучения, которая и нагревает алюминиевую фольгу, как будет показано ниже. Затем плазма становится более гомогенной на всей глубине слоя мишени и сквозь нее, как сквозь плазму с плотностью равной половине, четверти или одной восьмой части (см. рис. 5-7) критической плотности, проходит та часть лазерного излучения, которая не претерпела обратно-тормозного рассеяния.

Основная доля прошедшей энергии лазерного излучения сквозь плазму полной толщины аэрогеля приходится в большинстве случаев на вторую половину длительности лазерного импульса. Отметим, что плазма из аэрогеля с плотностью 9.1 мг/см^3 и толщиной 400 мкм не успевает сформироваться до

окончания лазерного импульса и такого пропускания не наблюдается, а пропускание $2\text{-}5\%$ от энергии, падающей на мишень, проходит в начальный период действия лазерного импульса, что зафиксировано ЭОК и

Использованные во второй серии экспериментов 3 плотности слоев полимерного аэрогеля от 9.1 мг/см³ до 2.25 мг/см³, соответствующие 1/2, 1/4 и 1/8 критической плотности для третьей гармоники йодного лазера,

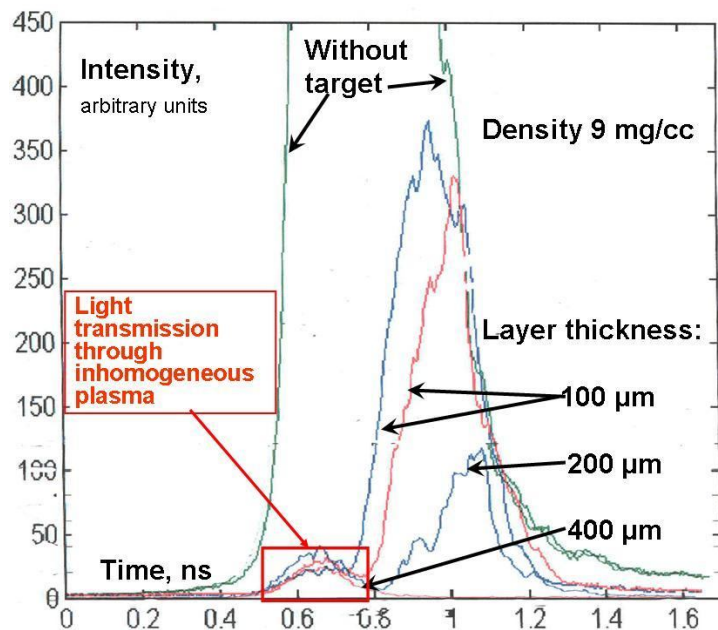


Рисунок 6. Временная зависимость интенсивности прошедшего лазерного излучения сквозь плазму полимерного аэрогеля с плотностью 9 мг/см³. Зеленая – внешняя линия интенсивность без мишени.

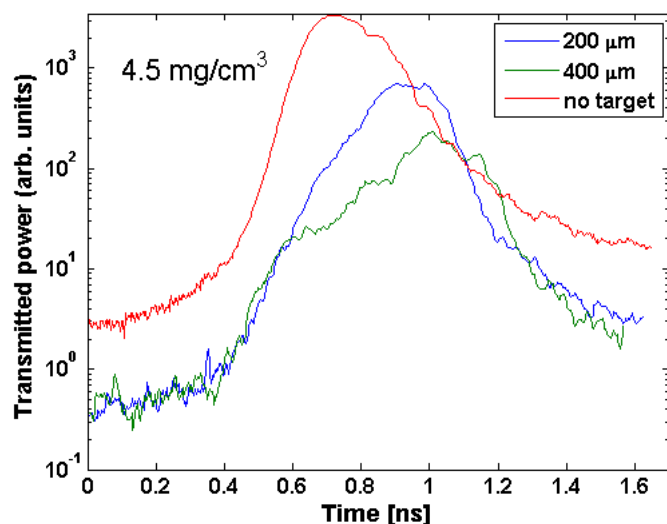


Рисунок 7. На графике из [11,15] в логарифмическом масштабе показаны результаты пропускания лазерного излучения 30255 – красная без мишени, 30245 – синяя ТАЦ 9.1 мг/см³, 200 мкм и 30250 – зеленая 9.1 мг/см³, 400 мкм.

позволили изучить при оригинальном построении опытов по пропусканию лазерного излучения влияние исходной плотности аэрогеля на время гомогенизации микрогетерогенной подкритической плазмы. Оказалось, что поглощение и пропускание лазерного излучения плазмой вплоть почти до четверти критической плотности ведут себя, как будто происходят в критической плазме. Начиная с четверти критической плазмы и ниже, процесс поглощения лазерного излучения в плазме после завершения процесса гомогенизации становится объемным, а процесс формирования плазмы заметно ускоряется [11,15,22-24].

Данные о пропускании гомогенной плазмой, полученные по результатам измерения на калориметре и ЭОК в тех же экспериментах, обработаны и приведены в предыдущих публикациях [11,15,22-24]. Динамический (10-12 бит) диапазон регистрации на ЭОК можно оценить по данным, приведенным на рисунках 3 и 7. Хорошо видно, что при

демонстрации пропускания на графиках в логарифмическом масштабе [11,15] начальное пропускание через турбулентную плазму почти не заметно, а в линейном масштабе при усилении сигнала оно хорошо видно (см. рис. 6).

3. Результаты обработки экспериментальных данных о переносе энергии в плазме.

Экспериментальные результаты исследования плазмы от каждого лазерного выстрела заносятся в паспорт (смотри рисунок 8), картинки от ЭОК и рентгеновского ЭОК обрабатываются с применением простых программ. Наклон прямых от начала свечения по касательной к области начала рентгеновского свечения V_x – скорость формирования плазмы (точнее скорость распространения фронта рентгеновского свечения) и по зависимости от времени максимума рентгеновского свечения V_{ht} - скорость теплопереноса являются основными результатами первой серии измерений. Набор результатов для однотипных мишеней при одинаковых условиях облучения после усреднения приведен в виде таблиц в работах [4-7,13-15].

По ременной развертке оптического сигнала (нижняя картинка рис. 8) определялось время начала яркого оптического свечения t_{ht} , которое дает скорость тепловой (ударной) волны V_{opt} , если разделить толщину полимерного слоя на t_{ht} , исключив время прохождения ударной волны по Al-фольге (от 0.15 нс до 0.5 нс) для разных плотностей мишеней, т.е. разных скоростей движения ударной волны в плазме. Изучавшиеся в первой серии экспериментов зависимости V_x и V_{ht} от плотности подкритической (при плотностях 9.1 мг/см³ и 4.5 мг/см³) плазмы (длина волны лазерного излучения 0.438 мкм и критическая плотность 18 г/см³) показали сильную их зависимость от плотности полимерного аэрогеля [4-7,13-15]. Для плотности мишени 4.5 мг/см³ V_{ht} и V_{opt} хорошо согласуются, но для мишеней с плотностью 9.1 мг/см³ V_{ht} существенно выше V_{opt} , т.к. лазерный импульс заканчивается намного раньше момента, когда ударная волна достигнет алюминиевой фольги. Скорость V_{ht} определяется по рентгеновской картине движения ударной волны горячей плазмы, а V_{opt} свидетельствует, в основном, о скорости движения остывающей плазмы в полимерном аэрогеле, постепенно уменьшающейся и чувствительной к введению наночастиц меди [4-7,11-13].

При подготовке публикаций по материалам исследования динамики подкритической плазмы на установке LIL было отмечено [8-10], что скорость распространения начала рентгеновского свечения V_x вглубь мишени постепенно уменьшается. Поэтому мы вновь обработали картинки от РЭОК, полученные во время экспериментов на установке PALS, и получили результаты, приведенные в таблице 1.

Date: 9.02.2005	Shot Number: 28204	Focus: 300mcm in front
Inc.Energy: 157 J	Frequency: 3ω	Ereflected:+
Target: microscope image file: t28204.jpg		
Holder: ring Washer: with hole	Foam: Type: TAC, density: 4.5 mg/cc, thickness: 420mcm	Foil: Al Thickness: 5mcm
Comments:		

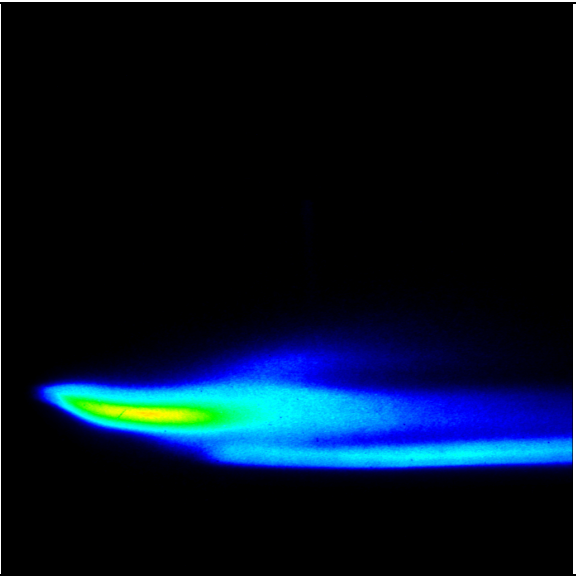
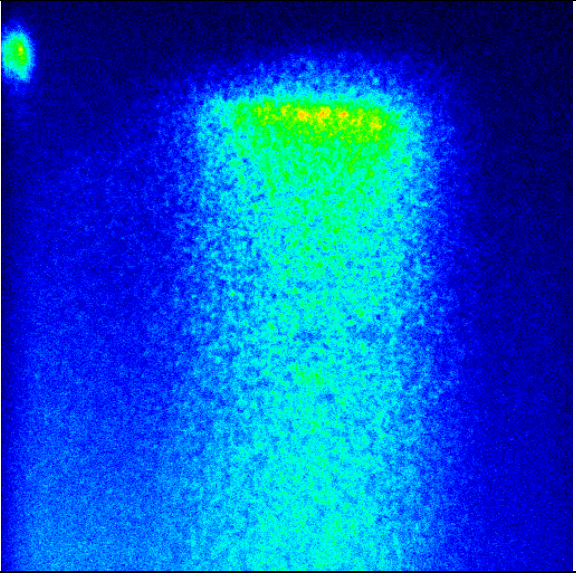
X-ray streak camera: File: k28204.img Photocathode: CsI Sweep: 3, v=2.027 ps/pi Slit: 50mcm Gain: 9 Delay: 1 Filter: Magnification: Background file: Comments:	
Optical streak camera: File: 28204.tif Sweep: 5.68ns/512pi Slit: Gain: 10 Delay: Filter: Magnification: Fiducial: Background file: Comments:	
3-frame probing (interferometry) 1 st frame delay: Delay between frames: File: Comments:	

Рисунок 8. Обычный паспорт выстрела на установке PALS. Опыт №28204, 09.02.05, $E_L=157$ Дж, $\lambda=0.438$ мкм, мишень ТАЦ, плотность 4.5 мг/см³, толщина 420 мкм. Верхняя картинка – временная зависимость рентгеновского свечения, развертка слева направо – 2 нс, высота кадра 2 мм, нижняя – временная зависимость оптического свечения, развертка – сверху вниз – 5.2 нс, а ширина картинка – 2 мм.

В таблице приведены значения скорости формирования плазмы, полученные из данных ЭОК по пропусканию и определяемые как толщина слоя аэрогеля H деленная на время начала интенсивного пропускания t_t : $V_p = H / t_t$. Поскольку время t_t нами рассчитывалось как интервал между передним фронтом (на полувысоте) сигнала без мишени и передним фронтом сигнала ЭОК с мишенью на полувысоте, а не в начале его появления, то значение скорости V_p меньше V_x , но больше V_{ht} .

Напомним, что через специальный разрез в кольцевом держателе мишени из полимерного аэрогеля [4-7,11-13] с плотностью около $1/4$ критической плотности рентгеновское излучение плазмы попадало на щель рентгеновских электронно-оптических камер (x-ray streak camera), характеристики которых приведены в публикациях [4,6,11-13]. Результаты от РЭОК приведены на рисунках 9 и 10 до и после повышения яркости. Хорошо видно, что скорость распространения начала рентгеновского свечения V_x вглубь мишени существенно уменьшается.

Абсолютные значения скоростей V_x для опытов на установках LIL и PALS отличаются (смотри таблицу 1), но это может объясняться различием в плотности мишени и различием в средней интенсивности лазерного излучения, которая, как оказалось, слабо влияет на скорость V_x . Площадь лазерного пятна на мишени на установке LIL – $1 \times 1 \text{ мм}^2$ при толщине мишени 0.5 мм и 1.0 мм, а на установке PALS диаметр пятна фокусировки составлял 0.3 мм и толщина мишени 0.4 мм. Возможно, что скорость V_x на установке PALS могла быть уменьшена за счет более интенсивного бокового теплопереноса. Однако, характер заметного (в 1.5-2 раза) уменьшения скорости V_x в течение движения вглубь мишени в обоих экспериментах одинаков.

Надо заметить, что в экспериментальных результатах [12] и расчетных значениях для V_x при сходных интенсивностях лазерного излучения второй гармоники неодимового лазера для плазмы с плотностью 4 и 8 мг/см³ скорости не меняются со временем, (или меняются в расчете не более чем на 30%), что может быть объяснено, с одной стороны, большим объемом плазмы (малыми боковыми потерями), а, с другой стороны, отсутствием фольги на тыльной стороне мишени. Абсолютные расчетные значения [12] в 2 раза выше, чем полученные из опытов, т.к. в расчетах не учитывался процесс гомогенизации микрогетерогенной плазмы.

Таблица 1. V_x для ТАЦ, кремнеаэрогеля и агара, [4-14,17-24]

Вещество ρ_f mg/cc	Высота H, mm	R_L , μm	Энергия E_L , J	I_L , 10^{15} W/cm ²	τ_L , ns	λ_L , μm	$10^{-7} \cdot V_x$, cm/s t=0.2 ns	$10^{-7} \cdot V_x$, cm/s t=0.5 ns	$10^{-7} \cdot V_p$, cm/s
ТАЦ2,25	0.1-0.4	150	≈165	0,7	0,33	0,438			14±2.5
ТАЦ4,5	0.1-0,4	150	≈165	0,7	0,33	0,438	11±1,5	8±1,5	7.2±1.2
ТАЦ4,5	0.1-0,4	150	≈165	0,7	0,38	1.32	7±1	4±1	
ТАЦ9,1	0.1-0,4	150	≈165	0,7	0,33	0.438	9±1,5	6±1,5	3.5±1.1
ТАЦ9,1	0.1-0,4	150	≈165	0,7	0,38	1.32	8±1	4±1	
ТАЦ9,1 Cu 10%	≈0,4	150	≈165	0,7	0,35	0.438	8.5±1,5	6±1,5	
ТАЦ9,1 Cu 10%	≈0,4	150	≈165	0,7	0,38	1.32	7.5±1,5	4 ±1,5	
LLNL, 8 (SiO ₂) _n	2,0	500	1000	0,4	1,0	0,53	3,5±0,3		
LLNL, 8 (SiO ₂) _n	2,0	500	1000	1,6	1,0	0,53	4,5±0,5		
LLNL, 8 (SiO ₂) _n	2,0	500	1000	12	1,0	0,53	8,4±0,7	5,2±0,7	
агар 4 LLNL,	2,0	500	1000	1,5	1,0	0,53	10,5±0,5		
агар 9 LLNL,	2,0	500	1000	1,5	1,0	0,53	4,2±0,2		
агар 5 PALS	≈0,5	150	≈165	0,7	0,33	0,44	7±1		
агар 10	≈0,5	150	≈165	0,7	0,33	0,44	8±0,7	5,4±0,7	
агар 10	≈0,5	150	≈165	0,7	0,38	1,32	5±0,5	2,7±0,5	
ТМПА 10, LIL	0.95	500	10 кДж	0.4	2.7	0.35	8±1	4.5±1	

В таблице 1 следующие обозначения: ρ_f – плотность слоя аэрогеля, H – толщина слоя аэрогеля, R_L – радиусы пятна фокусировки, E_L – энергия в лазерном выстреле, I_L – интенсивность излучения на поверхности мишени, τ_L – длительность лазерного импульса на полувывсоте, λ_L – длина волны лазерного излучения, V_x – скорость распространения вглубь аэрогеля начала свечения плазмы (скорость формирования плазмы) в двух интервалах времени от t-0.15 нс до t+0.15 нс.

4. Новые результаты о предварительном нагреве Al-фольги после специальной обработки экспериментальных данных.

Представление картинок с рентгеновской (РЭОК) и оптической (ЭОК) стрик-камер для печати на принтере или для демонстрации на экране компьютера (см. рис. 8) приводит к уменьшению динамического диапазона данных с 10-12 бит до 7-8 бит. Аналогично представление прописей в логарифмическом масштабе делает просто невидимыми рассматриваемые в статье малые сигналы. Это приводит к потере части информации,

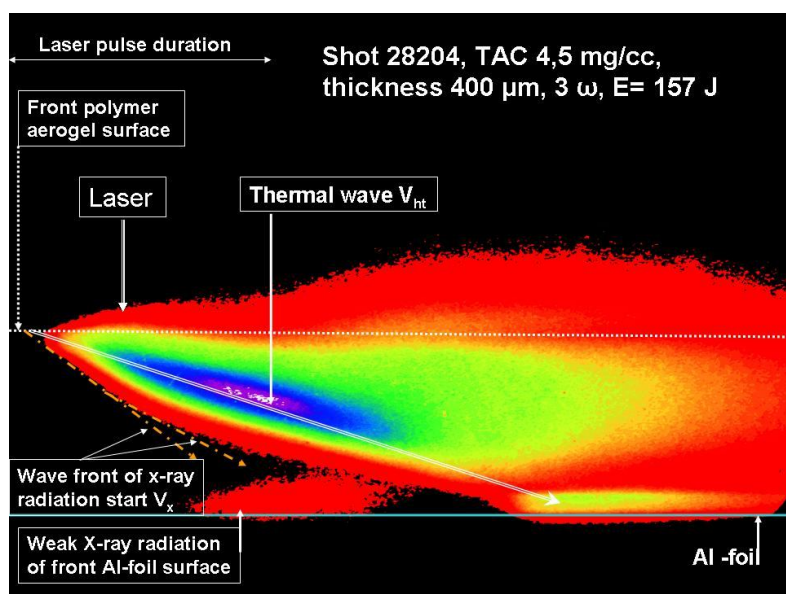


Рисунок 9. Картинка от рентгеновской стрик-камеры (РЭОП), с усилением яркости. Лазерный импульс №28204, длина волны - 0.438 мкм, энергия в выстреле - 157 Дж, мишень из ТАЦ, плотностью 4.5 мг/см³, толщиной 420 мкм, с Al-фольгой 5 мкм.

наблюдать слабые сигналы, но яркие сигналы уходили при печати в область насыщения. При измерении пропускания излучения плазмой и толстым (400 мкм) слоем аэрогеля, имеющий плотность 9.1 мг/см³, с применением калориметров оказалось, что 0.5-5% энергии от полной энергии в лазерном импульсе проходят насквозь. При этом лазерный импульс кончается, когда весь слой аэрогеля еще не превратился в плазму и не начал пропускать лазерное излучение сквозь гомогенную подкритическую плазму. Прямое доказательство этого явления позволило объяснить причину предварительного нагревания (еще до прихода основной ударной и тепловой волны) алюминиевой фольги, наблюдавшегося как «слабое свечение», лишь в несколько раз превышающее уровень фона, на рентгеновских и оптических изображениях плазмы.

относящейся к слабым (лишь в несколько раз превышающих уровень фона) сигналам (смотри рис. 9 и 10 для того же опыта, что показан в обычном виде на рис. 8). Напомним, что плотность полимерного аэрогеля соответствует $\frac{1}{4}$ критической плотности плазмы, а толщина слоя 420 мкм. Применяемая нами

специальная компьютерная обработка реальных результатов от РЭОК и ЭОК приводит к возможности на экране компьютера и принтере

Попробуем проанализировать те же картинки (рис. 8 верх и низ) после увеличения яркости изображения (смотри рисунки 9 и 10). Хорошо видно, что сравнительно рано, задолго до прихода ударной волны к Al-фольге,

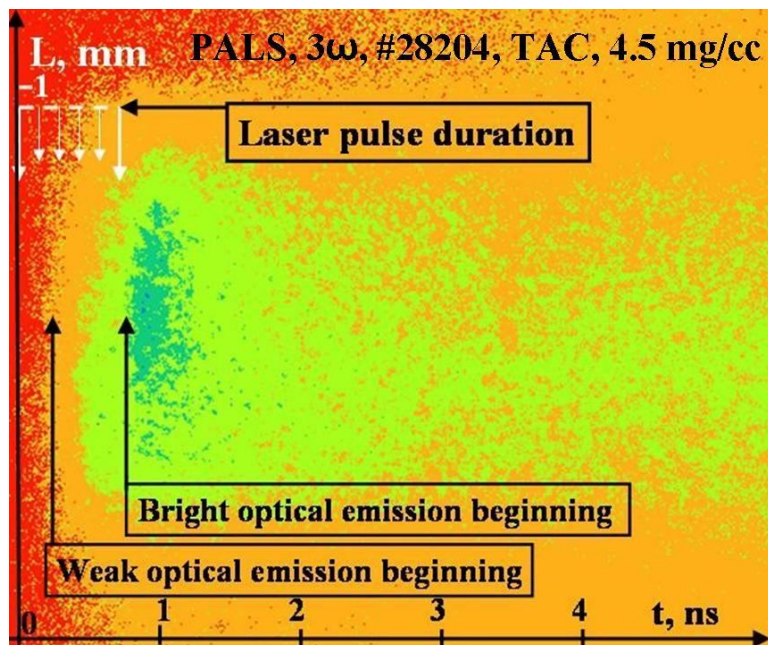


Рисунок 10. Фрагмент картинки от (ЭОП) с усилением яркости. Лазерный выстрел №28204, длина волны лазера - 0.438 мкм, энергия в выстреле - 157 Дж, мишень из ТАЦ, с плотностью 4.5 мг/см³ и толщиной 420 мкм, на тыльной стороне Al-фольга толщиной 5 мкм.

возникает слабое (лишь в несколько раз превосходящее фон) рентгеновское и оптическое свечение фольги, т.е. она нагревается за счет части энергии лазерного импульса, которая в самом начале импульса каким-то образом доставлена к алюминию. Также в начале действия лазерного излучения на поверхность мишени проходит некоторое время, за которое в веществе (плазме) накапливается энергия и поднимается температура, достаточная для преодоления порога обрезания (минимальной энергии регистрируемой

через фильтры, в опытах на PALS – 1.5 кэВ) рентгеновской стрик-камеры. Поэтому свечение плазмы, как в рентгеновском излучении, так и в оптическом излучении возникает с запаздыванием. Горячая плазма короны разлетается навстречу лазерному лучу.

После окончания действия лазера на лицевой поверхности мишени горячая (0.7-0.8 кэВ) плазма начинает разлетаться быстрее и вид короны в рентгеновских лучах становится более протяженным, а более холодная (20-50 эВ) алюминиевая плазма, окруженная полимером, остывает и гаснет до прихода ударной и тепловой волны, идущей по полимерному аэрогелю. Затем после прихода ударной волны алюминий сильно нагревается, а ударная волна выходит на тыльную сторону фольги, вызывая яркое оптическое свечение (смотри рис. 8). Обращаем внимание на то, что временной масштаб на рисунках 9 и 10 существенно различный (полная длительность кадра на рисунке 9 – 2 нс, а на рисунке 10 длительность – 5.2 нс. Судя по картинке с РЭОК (см. рис. 9), плазменный цилиндр с диаметром ≈ 400 мкм и толщиной ≈ 300 мкм, образованный из малоплотного

полимерного аэрогеля с плотностью 4.5 мг/см^3 после окончания лазерного импульса сравнительно быстро (с временем экспоненциального спада $\tau \approx 0.08 \text{ нс}$) остывает, разлетаясь, в основном, в направлении лазерного луча [6,12]. Остывание плотного и тонкого слоя алюминиевой плазмы после интенсивного нагрева происходит медленнее, чем полимерной плазмы (у плотной плазмы фольги декремент характеризуется временем $\tau \approx 0.3 \text{ нс}$).

Обсуждать физические причины предварительного нагрева фольги мы будем в следующем разделе, а здесь приведем характерные примеры анализа рентгеновских и оптических изображений плазмы для опытов с мишенями

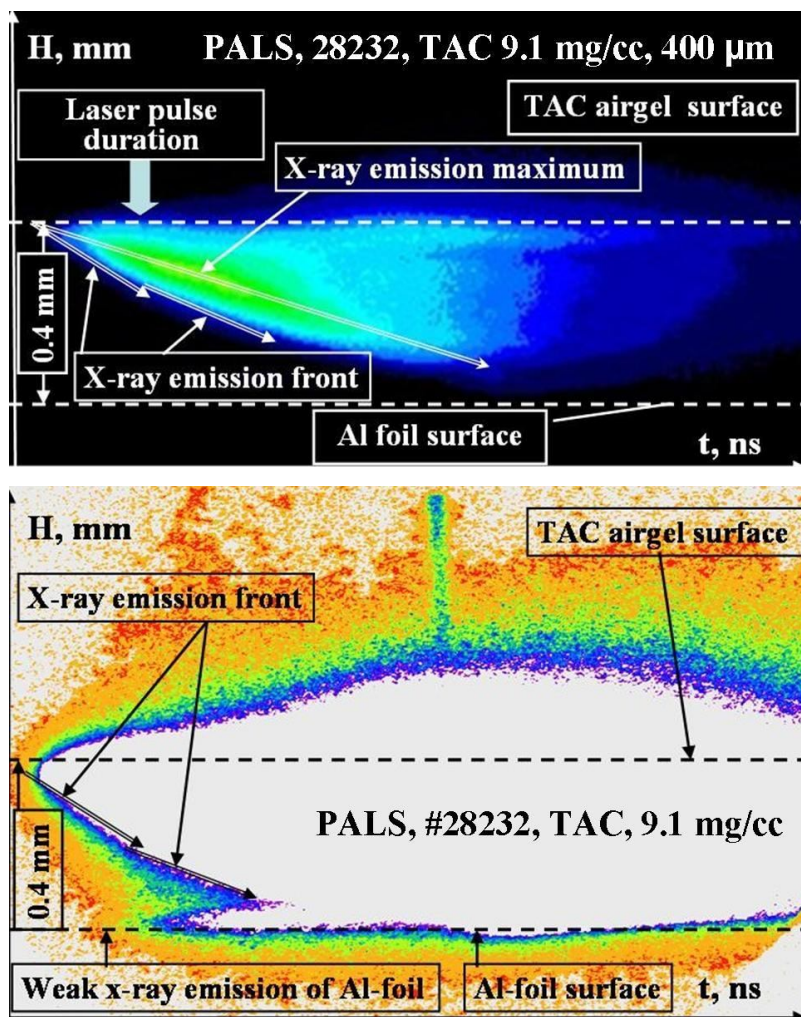


Рисунок 11. Картинки от рентгеновской стрик-камеры (РЭОК): сверху - без усиления яркости и внизу - с усилением яркости. Лазерный выстрел №28232, длина волны - 0.438 мкм , энергия в выстреле - 163 Дж , мишень из ТАЦ, плотностью 9.1 мг/см^3 , толщиной 400 мкм , с Al-фольгой 5 мкм . Длительность кадра – 1.6 нс .

одинаковой плотности 9.1 мг/см^3 без добавок и с наночастицами меди ($10\% \text{ масс.}$), замещающих 10% массы полимера. В иллюстрациях (смотри рисунки 11-14) даются изображения с большим усилением яркости, чтобы

наблюдать предварительный прогрев алюминиевой фольги. При резком увеличении яркости рентгеновского изображения проявляются, как в опытах с менее плотными мишенями, слабое свечение алюминиевой фольги, но скорости V_x почти в 2 раза меньше по сравнению с V_x для плотности 4.5 мг/см^3 .

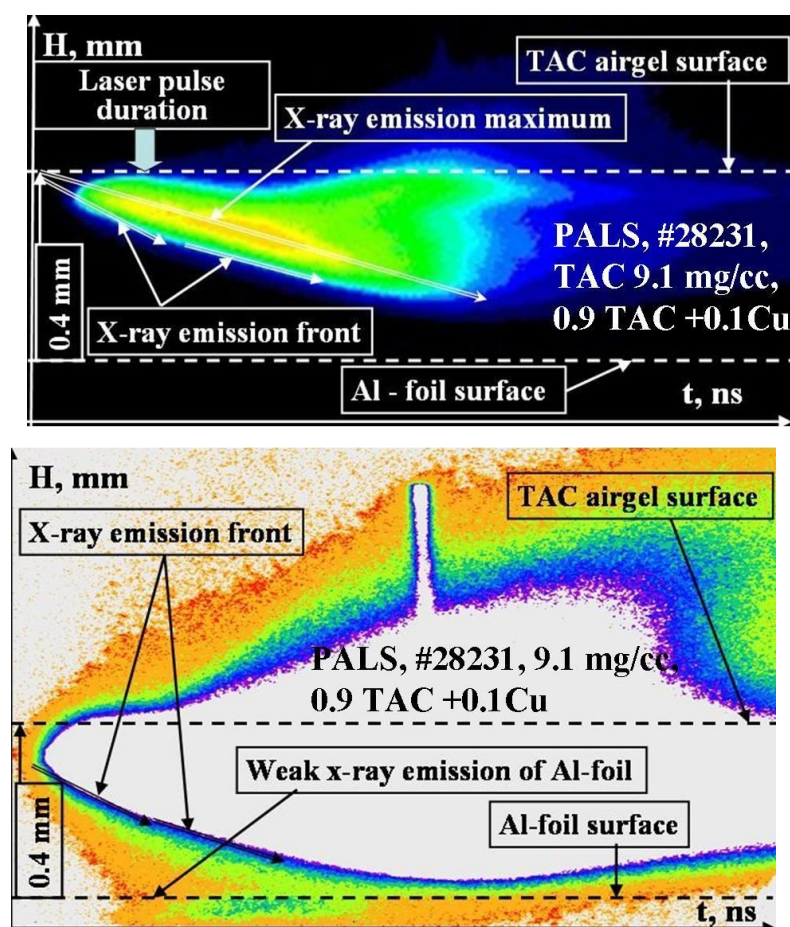


Рисунок 12. Картинки от рентгеновской стрик-камеры (РЭОП): сверху - без усиления яркости и внизу - с усилением яркости. Лазерный выстрел №28231, длина волны - 0.438 мкм, энергия в выстреле – 166 Дж, мишень из ТАЦ с добавками меди, плотностью 9.1 мг/см³, толщиной 400 мкм, с Al-фольгой 5 мкм. Длительность кадра – 1.6 нс.

греющего лазерного излучения (1.32 мкм и 0.438 мкм) и от структуры и химического состава малоплотного полимера. В качестве полимеров использовались (смотри таблицу 1) ТМПТА [3-4,13-16] и ТАЦ [1-11,13-24] в виде трехмерных полимерных сеток – аэрогелей - с микронными расстояниями между волокнами и агар в виде крупно ячейистой пены (средний размер частично открытой ячейки ≈ 40 мкм) [6,17-19]. В составе полимеров присутствует кислород (12%, 16% и 19% масс., соответственно).

При сравнении рентгеновских картин рис. 9 с рис. 11 и 12 становится очевидным, что начало слабого рентгеновского свечения происходит почти в одно и тоже время, или даже немного раньше при плотности мишеней 9.1 мг/см³.

На снимках от оптической стрик-камеры (ЭОК) (рис. 13 и 14), как при плотности 4.5 мг/см³, так и при плотностях 9.1 мг/см³ ТАЦ с добавками наночастиц меди и без добавок для тех же выстрелов, что и на (см. рис. 11 и 12) после резкого повышения яркости хорошо видно быстрое нагревание и постепенный спад свечения за время до прихода ударной волны (яркой вспышки).

В этой серии опытов на установке PALS изучались зависимости V_x и V_{ht} от длины волны

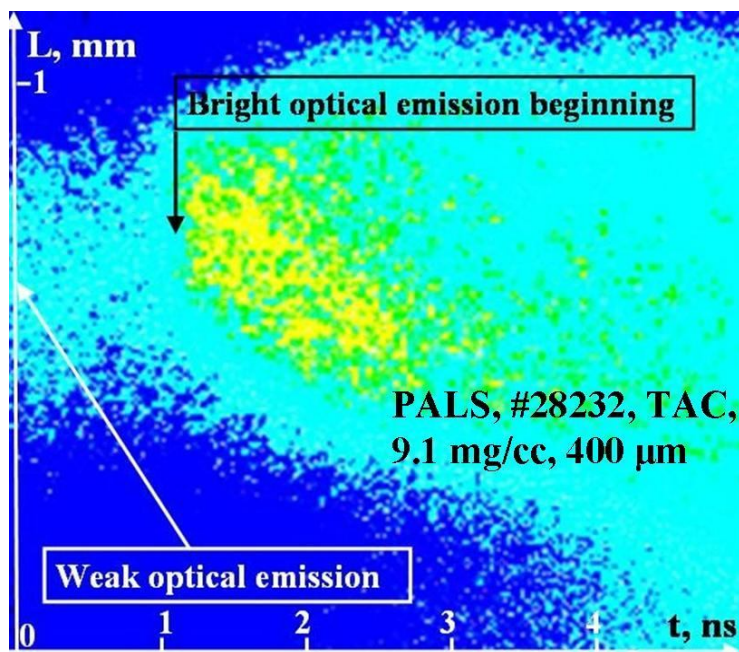


Рисунок 13. Картинка от оптической стрик-камеры (ЭОП) с усилением яркости. Лазерный импульс №28232, длина волны - 0.438 мкм, энергия в выстреле - 163 Дж, мишень из ТАЦ, плотностью 9.1 мг/см³, толщиной 400 мкм, с Al-фольгой 5 мкм. Длительность кадра – 5.2 нс.

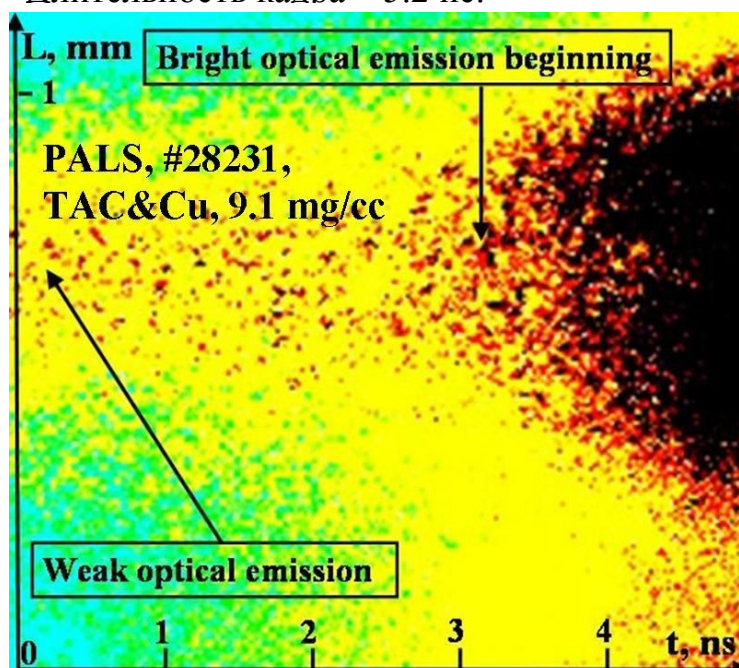


Рисунок 14. Картинка от ЭОП с усилением яркости. Лазерный импульс №28231, длина волны - 0.438 мкм, энергия в выстреле - 166 Дж, мишень из ТАЦ с добавками меди, плотностью 9.1 мг/см³, толщиной 400 мкм, с Al-фольгой 5 мкм.

Оказалось, что структура и химический состав влияли на V_x и V_{ht} слабо, а изменение длины волны греющего излучения было существенным. Это связано с большим изменением критической плотности от 18 мг/см³ до 2 мг/см³ для основной частоты и третьей гармоники, соответственно, что изменяет условия поглощения и рассеяния лазерного излучения, а также скорость формирования плазмы.

Предварительный прогрев Al-фольги (по данным РЭОК и ЭОК) при плотности 4.5-5 мг/см³ и 9-10 мг/см³ при длине волны лазера 0.438 мкм в мишенях из ТМПТА (смотри рис. 15) и ТАЦ уверенно наблюдался (см. рис. 9-14), а на мишенях из агара (даже с плотностью 5 мг/см³) отсутствовал (смотри рис. 16). Надо отметить, что статистическая точность результатов с агаром намного хуже (5 выстрелов, против 32 с ТАЦ и ТМПТА на третьей гармонике).

Отметим, что слабое оптическое свечение тыльной стороны Al-фольги (смотри рис. 13 и 14) начинается несколько позже, чем слабое рентгеновское свечение, что связано с необходимостью

накопления энергии и передачи ее на тыльную сторону Al-фольги. Во многих выстрелах видно, что это оптическое свечение затем ослабевает и вновь возникает в момент прихода к фольге основной ударной (тепловой) волны.

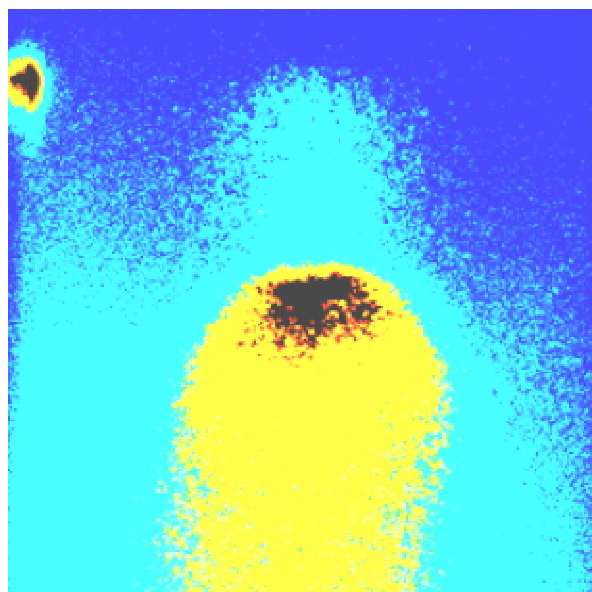


Рисунок 15. №28195, $\lambda=0.438$ мкм, $E_L=156$ Дж, мишень из ТМПТА, плотность 10 мг/см^3 , толщина 470 мкм, 10 мг/см^3 , 480 мкм

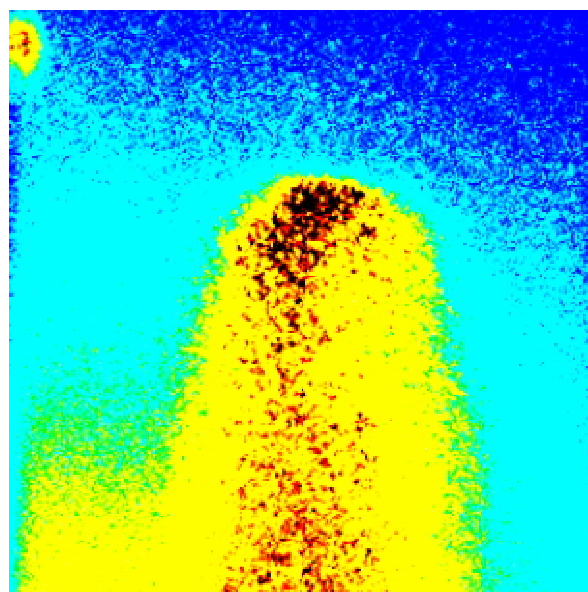


Рисунок 16. №28209, $\lambda=0.438$ мкм, $E_L=170$ Дж, мишень из агара, плотность 5 мг/см^3 , с толщиной 380 мкм,

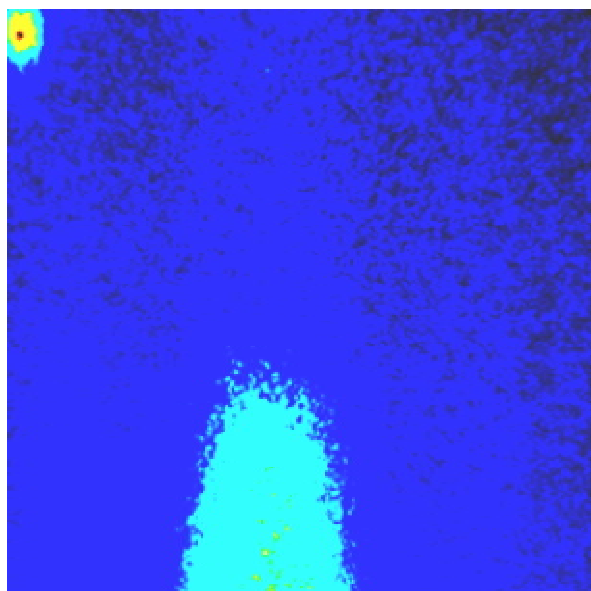


Рисунок 17. Выстрел №28267, $\lambda=1.315$ мкм, $E_L=173$ Дж, мишень из ТМПТА, плотность 10 мг/см^3 , толщина 470 мкм, Al-фольга толщиной 5 мкм, слева метка синхронизации задержана на 3 нс.

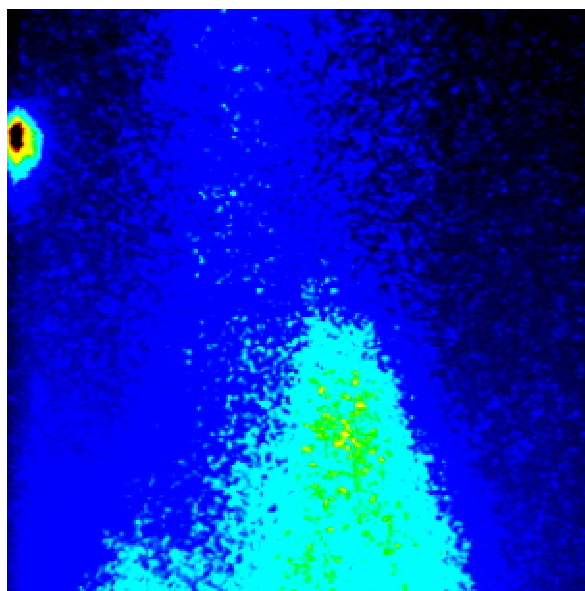


Рисунок 18. Выстрел №28297, $\lambda=1.315$ мкм, $E_L=160$ Дж, мишень из ТАЦ, плотность 9.1 мг/см^3 , толщина 400 мкм, Al-фольга толщиной 2 мкм, слева метка синхронизации задержана на 3 нс.

На основной частоте лазера ($\lambda=1.315$ мкм) в опытах с мишенями из ТАЦ и ТМПТА наблюдался предварительный прогрев Al-фольги **только на снимках ЭОК**, но он был заметно слабее, чем при облучении на третьей гармонике (смотри рисунки 17 и 18). Поскольку в задачу этой серии экспериментов не входило изучение предварительного прогрева, то для оптической стрик-камеры устанавливалась задержка включения от 1 до 4 нс, чтобы максимум оптического свечения попадал в кадр. Поэтому старт лазерного облучения на основной частоте на большинстве кадров ЭОК отсутствует, но на участках до начала яркой вспышки заметно слабое свечение. В экспериментах с мишенями из агара такого свечения не наблюдалось, несмотря на то, что данном случае статистическая точность была достаточно высока.

5. Обсуждение результатов.

Интенсивность прошедшего в начальный момент лазерного излучения при плотности слоя аэрогеля 9.1 мг/см^3 ($1/2$ критической плотности N_{cr}) не меньше, а возможно несколько выше, чем при плотности 4.5 мг/см^3 ($1/4 N_{cr}$) и тем более выше, чем при плотности 2.25 мг/см^3 ($1/8 N_{cr}$). Удивительно то, что от толщины слоя доля прошедшей в начальный момент энергии не зависит (смотри рисунки 5-6).

Вернемся к рис. 1. Хорошо видно, что пропускание излучения начинается с момента падения лазерного излучения на аэрогель. Пропускание увеличивается и выходит на плато (лазерное излучение также постоянно). Затем ко времени 1-1.2 нс аэрогель превращается в плазму, которая, постепенно становясь все более однородной, пропускает лазерное излучение почти полностью (как и положено плазме с плотностью вблизи четверти критической плотности). Осцилляции в пропускании свидетельствуют о пульсациях плотности плазмы и не окончившейся ее гомогенизации. На том же рисунке приведены зависящие от времени интенсивности обратного вынужденного рассеяния Мандельштама-Брюллиэна. Они характеризуют флуктуации плотности и температуру плазмы и вынужденного комбинационного рассеяния (Рамана) [8-11]. Уменьшение интенсивности рассеяния Мандельштама-Брюллиэна объясняется, с одной стороны, уменьшением флуктуаций плотности при повышении температуры плазмы, близкой к 1.5 кэВ, судя по красному сдвигу спектра рассеяния Мандельштама-Брюллиэна, а, с другой стороны, может объясняться поглощением рассеянного излучения в горячей плазме. Комбинационное рассеяние менее интенсивное, чем ВРМБ, но интенсивность его постепенно увеличивается со временем из-за увеличения объема горячей плазмы.

Прямые измерения пропускания греющего лазерного излучения сквозь только что сформированную (негомогенную, микрогетерогенную или

микротурбулентную) плазму и остатки полимерного аэрогеля убедили нас в том, что наблюдавшиеся слабые (немного превышающие фон) сигналы на РЭОК и ЭОК в начальный момент действия лазерного импульса есть результат прогрева фольги прошедшим сквозь плазму излучением. При этом интенсивность прошедшего сквозь плазму и аэрогель излучения оценивается на уровне $(3\div 7) \cdot 10^{13}$ Вт/см² т.е. очень высока. При таких условиях лазерное излучение должно поглощаться в полимере и объяснить этот эффект на основе общепринятой теории прохождения лазерного излучения сквозь трехмерную полимерную сетку и плазму [26,27] не удастся. Кроме того, не поддается объяснению тот факт, что интенсивность прошедшего в начальный момент лазерного излучения при плотности слоя аэрогеля 9.1 мг/см³ ($1/2$ критической плотности N_{cr}) не меньше, а возможно несколько выше, чем при плотности 4.5 мг/см³ ($1/4$ N_{cr}) и тем более выше, чем при плотности 2.25 мг/см³ ($1/8$ N_{cr}). Вынужденным рассеянием Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) вперед лазерного излучения эти результаты трудно объяснить, т.к. в отличие от лазерного излучения, имеющего слабую расходимость, рассеянное излучение распространяется в большой телесный угол и для объяснения измеренных величин потребовалось бы допустить, что 30-40% лазерного излучения участвует в ВРМБ.

Слабый (или отсутствующий) предварительный прогрев фольги при облучении аэрогеля лазерным излучением на основной частоте (плотность аэрогеля соответствовала $4.6 N_{cr}$ и $2.3 N_{cr}$) также ничего не объясняет, т.к. оптическое пропускание плазмы должно было очень резко упасть (по закону отратно-тормозного рассеяния), а интенсивность ВРМБ также должна была уменьшиться на порядок в соответствии с формулами из работ [27,28].

6. Заключение.

Полный анализ экспериментальных данных энергетического баланса при взаимодействии мощного лазерного излучения с малоплотными слоями вещества [7-11,21-24] вместе с данными о пропускании лазерной энергии сквозь микроячеистые трехмерные полимерные сетки с плотностью близкой к критической и существенно подкритической ($1/2$, $1/4$) плотности [22-24] показал, что заметная доля лазерного излучения претерпевает рассеяние как назад (в аперттуру греющего излучения до 5-18%) так и вперед, обеспечивая пропускание излучения (до 3-12% в зависимости от интенсивности падающего излучения).

1. Впервые наблюдалось в начальный момент облучения прохождение сквозь слой плазмы и остаточный слой трехмерной полимерной сетки энергии мощного лазерного излучения (до $1/10$ от падающего лазерного излучения, в виде собственно лазерного излучения или рассеянного вперед излучения при рассеянии Мандельштама-Бриллюэна) при

плотности полимерного вещества от критической плотности и ниже (до $1/8$ критической плотности).

2. Удивительным фактом явилось то, что при уменьшении плотности полимерной сетки доля предварительно прошедшего излучения не увеличивалась (скорее немного уменьшалась). Неожиданными оказались результаты, свидетельствующие о том, что пропускание слабо зависит от толщины малоплотного полимерного слоя.
3. Специальная компьютерная обработка снимков от рентгеновской и оптической стрик-камер, имеющих большой динамический диапазон регистрации 10-12 бит на пиксель), позволил выделить до прихода основных мощных сигналов более слабые сигналы, свидетельствующие о нагревании (в двухслойных мишенях слой полимерной сетки и алюминиевая фольга) Al-фольги в начальный момент действия на мишень лазерного излучения задолго до прихода к фольге сверхзвуковой ударной волны.
4. Доказано, что предварительный прогрев металлической фольги происходит вследствие пропускания неомогенной (турбулентной) плазмой и остатками слоя трехмерной полимерной сетки энергии лазерного излучения (в виде собственно лазерного излучения или ВРМБ).
5. Строгого теоретического объяснения прохождения интенсивного излучения ($4 \cdot 10^{13}$ Вт/см² - $7 \cdot 10^{13}$ Вт/см² т.е. 0.05-0.1 от греющего излучения) сквозь субмикронную полимерную трехмерную сетку не существует. Помочь объяснить заметную долю рассеяния вперед (пропускания) сквозь плазму и неиспаренный слой трехмерной полимерной сетки лазерного излучения могут данные экспериментов на установке LIL (Бордо, Франция) [8-11], которые обнаружили большую долю в энергетическом балансе энергии рассеянного лазерного излучения (ВРМБ и ВКР). По-видимому, высокий уровень ВРМБ связан с тем, что структура трехмерной полимерной сетки предопределяет формирование флуктуаций плотности плазмы с характерным размером близким к длине волны падающего лазерного излучения.
6. Зафиксирована заметная доля энергии (7-15%) рассеяния назад (в апертуру греющего излучения) от падающего излучения третьей гармоники неодимового и йодного лазеров, что в опубликованных работах мы не обнаружили.
7. Предварительный прогрев металлической фольги излучением, прошедшим сквозь плазму и неиспаренную часть полимерной сетки, и, как следствие, испарение металла и прилегающего полимера позволяют объяснить уменьшение со временем скорости начала рентгеновского свечения (начала образования плазмы) при движении ударной тепловой волны вглубь малоплотного полимерного слоя тем, что движущийся

навстречу волне поток плазмы и паров металла и полимера приводит к формированию слоя с возрастающей плотностью.

8. Аналогичные эксперименты со слоями полимера с более грубой структурой и частично закрытыми ячейками показали, что пропускание энергии излучения отсутствует и предварительного прогрева Al-фольги не происходит.
9. При увеличении длины волны греющего излучения от 0.438 мкм до 1.326 мкм предварительное пропускание лазерной энергии резко уменьшается или исчезает, что, возможно, связано с уменьшением интенсивности генерации ВРМБ в соответствии с общеизвестными закономерностями ВРМБ.

7. Цитированная литература.

1. 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.
2. 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.
3. N.G. Borisenko, A.I. Gromov, YU. A. Merkuliev, A.V. Mitrofanov, W. Nazarov. Regular Foams, Loaded Foams and Capsule Suspension in the Foam for Hohlraums in ICF. // Fusion Technology (2000), v. **38**, #1, p. 115-118.
4. Limpouch J., Borisenko N.G., Demchenko N.N., Gus'kov S.Yu., Kalal M., Kasperczuk A., et al. Laser interaction with foam –foil layered targets. // 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27 June – 1 July 2005, ECA Vol.29C, O-2.022 (2005).
5. N. G. Borisenko, I. V. Akimova, A. I. Gromov, A. M. Khlenkov, V. N. Kondrashov, J. Limpouch, Yu. A. Merkuliev, and V. G. Pimenov. Intensive (up to 10^{15} W/cm²) Laser Light Absorption and Energy Transfer in Subcritical Media with or Without High-Z Dopants. // AIP Conference Proceedings Volume 849, ZABABAKHIN SCIENTIFIC TALKS - 2005: ISBN: 0-7354-0345-7, Editor(s): E.N. Avrorin, V.A. Simonenko, pp. 242-246.
6. 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. Крауский, И. Куба, К. Масек, М. Пфайфер, Поглощение интенсивного лазерного излучения (до 10^{15} Вт/см²) и перенос энергии в подкритических средах, в т.ч. содержащих добавки тяжелых элементов. //Труды VIII Забабахинских научных чтений, Снежинск, 2005, №3-5, 26 стр. (секция 3) site: <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/8zst/8zst.html>.
7. A.M. Khlenkov, N.G. Borisenko, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, Yu.A. Merkuliev, V.G.Pimenov, Experience of microheterogeneous target fabrication

- to study energy transport in plasma near critical density. // Laser & Particle Beams, 2006, Vol. 24, pp. 283-290.
8. C. Labaune, S. Depierreux, D.T. Michel, M. Grech, P. Nicolai, C. Stenz, V.T. Tikhonchuk, S. Weber, C. Riconda, N.G. Borisenko, W. Nazarov, et. al. Smoothing of laser beam intensity fluctuations in low density foam plasmas with the LIL laser. // 35th EPS Conference on Plasma Phys. Hersonissos, 9-13 June 2008, ECA Vol. 32D, O-2.013 (2008).
 9. S. Depierreux, C. Labaune, D.T. Michel, V.T. Tikhonchuk, V. Tassin, C. Stenz, N.G. Borisenko, W. Nazarov, M. Grech, S. Huller, J. Limpouch, P. Loiseau, P. Nicolai, D. Pesme, W. Rozmus, C. Meyer, P. Di-Nicola, R. Wrobel, E. Alozy, P. Romary, G. Thiell, G. Soullie, C. Reverdin, B. Villette, M. Rabec-le-Gloahec, C. Godinho. Optimization of some laser and target features for laser-plasma interaction in the context of fusion. // The 5th International Conference on Inertial Fusion and Applications. (IFSA 2007) Journal of Physics: Conference Series **112** (2008) 022041.
 10. S. Depierreux, C. Labaune, D.T. Michel, V.T. Tikhonchuk, C. Stenz, Nataliya Borisenko, W. Nazarov, M. Grech, S. Huller, J. Limpouch, P. Nicolai, D. Pesme, W. Rozmus, C. Meyer, P. Di-Nicola, R. Wrobel, E. Alozy, P. Romary, G. Thiell, G. Soullie, C. Reverdin, B. Villette. Plasma Smoothing of the Laser Beam in Foam Target (LIL Experiment). // 3rd Moscow Workshop on Targets and Applications, 15-19 October, 2007, Moscow, Russia. Book of Abstract, p.38. Presentation on site: <http://mw2007ta.lebedev.ru/schedule1/>
 11. N. G. Borisenko, A. A. Akunets, A. M. Khlenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, Yu. A. Merkuliev, M. Pfeifer, V. G. Pimenov, and J. Ullschmied. Transmission of laser radiation with a wavelength of 0.438 μm and intensity of $(3-7) \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$ through undercritical plasma from polymer aerogels. // 3rd Moscow Workshop on Targets and Applications, 15-19 October, 2007, Moscow, Russia. Book of Abstract, p.33. Presentation on site: <http://mw2007ta.lebedev.ru/schedule1/>
 12. J.A. Koch, K.G. Estabrook, J.D. Bauer, C.A. Back, A.M. Rubenchik, E.J. Hsieh, R.C. Cook, B.J. MacGowan, J.D. Moody, J.C. Moreno, D. Kalantar, R.W. Lee. Time-Resolved X-ray Imaging of High-Power Laser-Irradiated Underdense Silica Aerogels and Agar Foams. // Phys. Plasmas **2**, (1995), #10, pp. 3820-3831.
 13. N.G. Borisenko, I.V. Akimova, A.I. Gromov, A.M. Khlenkov, Yu.A. Merkuliev, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, J. Kuba, E. Krousky, K. Masek, W. Nazarov, V.G. Pimenov, Regular 3-D networks with clusters for controlled energy transport studies in laser plasma near critical density. // Fusion Sciences and Technology, 2006, V. 49, #4, pp. 676-685.
 14. J. Limpouch, N.G. Borisenko, et al. Laser Absorption and Energy Transfer in Foams of Various Pore Structures and Chemical Compositions. // Journal de Physique IV (France), June 2006, Vol. 133, pp. 457-459.

15. J. Limpouch, P. Adamek, N.G. Borisenko, N.N. Demchenko, T. Kapin, A.M. Khalenkov, et. al. Impact of Foam Structure and Composition on Laser Absorption and Energy Transfer. 33nd EPS Conference on Plasma Phys. Roma, 19-23 June 2006, ECA Vol. 30I, P-5.001 (2006).
16. W. Nazarov, N. Borisenko, Yu. Merkuliev, D. Battani, M. Koenig. Chemistry and Physics of Low-density Foams in Laser Experiments. // Proceeding of SPIE, 2003, pp. 706-711.
17. Н.Г. Борисенко, А.Э. Бугров, И.Н. Бурдонский, В.В. Гаврилов, А.Ю. Гольцов, А.И. Громов, В.В. Димитренко, Е.В. Жужукало, Н.Г. Ковальский, А.И. Магунов, Б.Н. Миронов, Ю.А. Меркульев, С.Ф. Медовщиков, Т.А. Пикуз, М.В. Путилин, И.Ю. Скобелев, А.М. Халенков, А.Я. Фаенов, И.К. Фасахов. Изучение физических процессов в облучаемых мощными лазерными пучками пористых средах с различной микроструктурой. // Сборник докладов Международной конференции – VIII Харитоновские научные чтения по проблемам высоких плотностей энергий, г. Саров 21-24 марта 2006 г., стр. 31-38, Издательско-полиграфический комплекс РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006 г.
18. N.G. Borisenko, A.E Bugrov, I.N. Burdonskiy, I.K. Fasakhov, V.V.Gavrilov, A.Yu. Goltsov, A.I. Gromov, A.M. Khalenkov, N.G. Kovalskii, S.F. Medovchshikov, Yu.A. Merkuliev, V.M. Petryakov, M.V. Putilin, G.M. Yankovskii, and E.V Zhuzhukalo. Physical processes in laser interaction with porous low-density materials. // Laser and Particle Beams, 2008, V. 26, #04, pp. 537-543.
19. A.E. Bugrov, I.N. Burdonskiy, N.G. Borisenko, et al. Study of physical processes in laser-irradiated porous targets of different microstructure. // Journal de Physique IV (France), June 2006, Vol. 133, pp. 343-346.
20. И.А. Артюков, Н.Г. Борисенко, А.В. Виноградов, Ю.С. Касьянов, В.Г. Пименов, Р.М. Фещенко, А.М. Халенков. Контроль параметров лазерных мишеней с помощью мягкого рентгеновского излучения. // Краткие сообщения по физике, ФИАН, 2006, №4, с.46-51.
21. N.G. Borisenko, I.V. Akimova, A.I. Gromov, A.M. Khalenkov, Yu.A. Merkuliev, V.N. Kondrashov, J. Limpouch, V.G.Pimenov, The influence of underdense polymer target with/without high-Z nanoparticles on laser radiation absorption and energy transport. // Journal de Physique IV (France), June 2006, Vol. 133, pp. 305-308.
22. N.G. Borisenko, A.M. Khalenkov, V. Kmetik, J. Limpouch, Yu.A. Merkuliev, V.G. Pimenov. Plastic aerogel targets and optical transparency of undercritical microheterogeneous plasma. // Fusion Sciences and Technology, 2007, Vol. 51, May, pp. 655-664.
23. N.G. Borisenko, A.A. Akunets, A.M. Khalenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, J. Limpouch, K. Masek, Yu.A. Merkuliev, M. Pfeifer, V.G. Pimenov, J. Ullschmied. Particular features of the transmission of laser radiation with wavelength $0.438\text{ }\mu\text{m}$ and intensity $(3-7)\cdot 10^{14}\text{ W/cm}^2$ through an undercritical

- plasma from polymer aerogels. // Journal of Russian Laser Research. 2007, Vol. 28, No 6, pp. 500-518
24. Н.Г.Борисенко и Ю.А.Меркульев. Сравнение процессов переноса энергии в плазме с плотностью ниже четверти критической по результатам экспериментов на лазерах LULI и LIL (Франция) и PALS (Чехия). // Труды X Международной конференции «Харитоновские научные чтения», 11–15 марта 2008 г., г. Саров, «Мощные лазеры и высокие плотности энергии», ред. С.Г. Гаранин, Издательско-полиграфический комплекс РФЯЦ ВНИИЭФ, 2008, с. 117-126.
 25. I.A. Artyukov, N.G.Borisenko, Y.S.Kasyanov, A.M.Khalenkov, V.G.Pimenov, A.V.Vinogradov. Fabrication and characterization of low-density polymer laser targets both with or without high-Z dopants. // Proceedings of 29th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM), June, Madrid, 2006, pp. 147-151.
 26. 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.
 27. B.I. Cohen, C.J. McKinstrie, E.A. Startsev. Forward and backward stimulated Brilluoin scattering in a nonuniform plasma. // Phys. Plasmas, 2002, V. 10, #9, p. 4375
 28. W. L. Kruer. The Physics of Laser Plasma Interactions. Addison-Wesley, New York, 1988.