

Свойства микрогетерогенной плазмы, образованной при взаимодействии мощного лазерного излучения с мишенью из полимерного аэрогеля

*Н.Г. Борисенко¹, Н.К. Гупта², Л.Дж. Даришвар², П. Лешма²,
Ю.А. Меркульев¹, Д.С. Мунда², А.С. Орехов¹, В.Г. Пименов³, С. Трипати²,
Ш. Чаурасия²*

¹ *Физический институт академии наук им. П.Н. Лебедева*

² *Отдел лазерной и нейтронной физики, Центр атомных исследований им. Баба, Мумбай-85, Индия*

³ *Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского*

Аннотация

Используя мощный ($\sim 10^{14}$ Вт/см²) Nd-лазер с короткой (0,5 нс) длительностью импульса изучались свойства околокритической и надкритической микрогетерогенной плазмы, образованной из полимерного аэрогеля с субмикронной структурой. Длительность излучения соизмерима со временем гомогенизации плазмы из структурированного вещества, что позволило наблюдать пропускание лазерного излучения сквозь микротурбулентную плазму и обнаружить изменение динамики плазменного потока при снижении электронной плотности плазмы до подкритической для основной гармоники Nd-лазера.

Properties of Microheterogeneous Plasma Formed in Powerful Laser Beam Interaction with Polymer Aerogel Target

*N.G. Borisenko¹, S. Chaurasia², L.J. Dhareshwar², N.K. Gupta², P. Leshma²,
Yu.A. Merkuliev¹, D.S. Munda², A.S. Orekhov¹, V.G. Pimenov³ and S. Tripathi²*

¹ *P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

² *High Pressure & Synchrotron Radiation Physics Division, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai-85, India*

³ *N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Moscow, Russia*

Abstract

Properties of near-critical and overcritical microheterogeneous plasma were studied using powerful Nd-laser beam with intensity $\sim 10^{14}$ W/cm² and with short pulse length (0.5 ns). Plasma was generated from polymer aerogel with submicron structure. Pulse length is comparable with homogenization time in plasma from structured material. This enabled to observe the laser transmission through microturbulent plasma and to notice the changed dynamics of plasma flux when electron density is decreased down to undercritical plasma density (for fundamental harmonic of Nd-laser).

Введение

Метод сглаживания интенсивности лазерного излучения на мишени при применении малоплотных веществ с концентрацией электронов близкой к критической для данной волны лазера подразумевал применение структурированных полимерных веществ (пены) [1-3]. При этом возникла экспериментальная задача доказать, что структура вещества не создает возмущений, приводящих к ухудшению однородности (равномерности) гидродинамического движения [4-5]. Другими словами, доказать, что отсутствует «структурный импринт». Структурированные вещества несут в себе много новых параметров: закрытые или открытые поры, средний диаметр пор и их распределение по размерам (флуктуации плотности вещества), толщина структурных элементов и т.д. Кроме того, влияние параметров структуры может быть разнообразным для лазерного излучения различной интенсивности и длины волны. Поэтому доказательство того, что структурный импринт не влияет на сглаживание неоднородности облучения мишени оказалось трудоемкой задачей, которая полностью не решена до сих пор. К тому же, в последние 7-8 лет были созданы и введены в эксперимент новые структуры полимерной пены – полимерные аэрогели [6-7]. Эти аэрогели имеют вид трехмерной микронной полимерной сетки с волокнами диаметром 30-80 нм. Применение слоев таких аэрогелей в качестве лазерных мишеней привело к обнаружению явлений, которые ранее не учитывались в моделях переноса энергии и массы: предварительный прогрев металлической фольги за слоем аэрогеля, пропускание лазерной энергии плазмой и остатками аэрогеля, составляющей 1%-7% от полной падающей на мишень лазерной энергии [7-9].

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия мощного (10^{14} Вт/см²) лазерного пучка с полимерными аэрогелями из триацетата целлюлозы (ТАЦ), технология которого описана в [6-8]. Достоинством лазера в Центре атомных исследований им. Баба являлась короткая (0.3-0.5 нс) длительность импульса, позволявшая исследовать взаимодействие излучения с неомогенной (турбулентной) плазмой.

Описание эксперимента

Эксперименты проводились в Центре атомных исследований им. Баба (BARC) в Индии с использованием многокаскадной мощной неодимовой лазерной установки (энергия 16 Дж, длительность 300-500 пс, длина волны 1,053 мкм) при участии сотрудников ФИАН.

В экспериментах использовалась лазерная установка, разработанная в BARC на основе мощного лазера на неодимовом стекле с энергией 12 Дж и длительностью 300-500 пс [13-14]. В этих экспериментах лазерная система была модернизирована для получения рабочего значения энергии до 16 Дж. Лазерная система состояла из промышленного генератора (100 мДж, 300-800 пс), двух усилителей 19 мм x 300 мм, накачиваемых шестью ксеноновыми лампами, двух усилителей 38 мм x 300 мм, одного усилителя 50 мм x 300 мм, накачиваемыми двенадцатью ксеноновыми лампами, пространственного фильтра и системы ретрансляции для последовательного расширения пучка. Пространственный фильтр помещался между вторым и третьим каскадами усиления, а система ретрансляции между четвертым и пятым выходным каскадом. Для предотвращения разрушения генератора и оптики, из-за паразитного обратного отражения от мишени использовались две фарадеевские развязки (фарадеевские затворы). Лазерная система работала в одномодовом режиме с энергией 10 Дж и длительностью импульса 500 пс. На выходе лазерной линейки помещалась полуволновая пластинка для вращения поляризации согласно требованиям эксперимента. Система зеркал обеспечивает оптическую задержку, которая необходима в ряде экспериментов для синхронизации лазерного импульса с диагностической аппаратурой. Лазерный пучок с интенсивностью порядка 10^{13} - 2×10^{14} Вт/см² фокусировался с помощью линзы f/5 в вакуумную камеру, откачиваемую до давления 4×10^{-5} мбар.

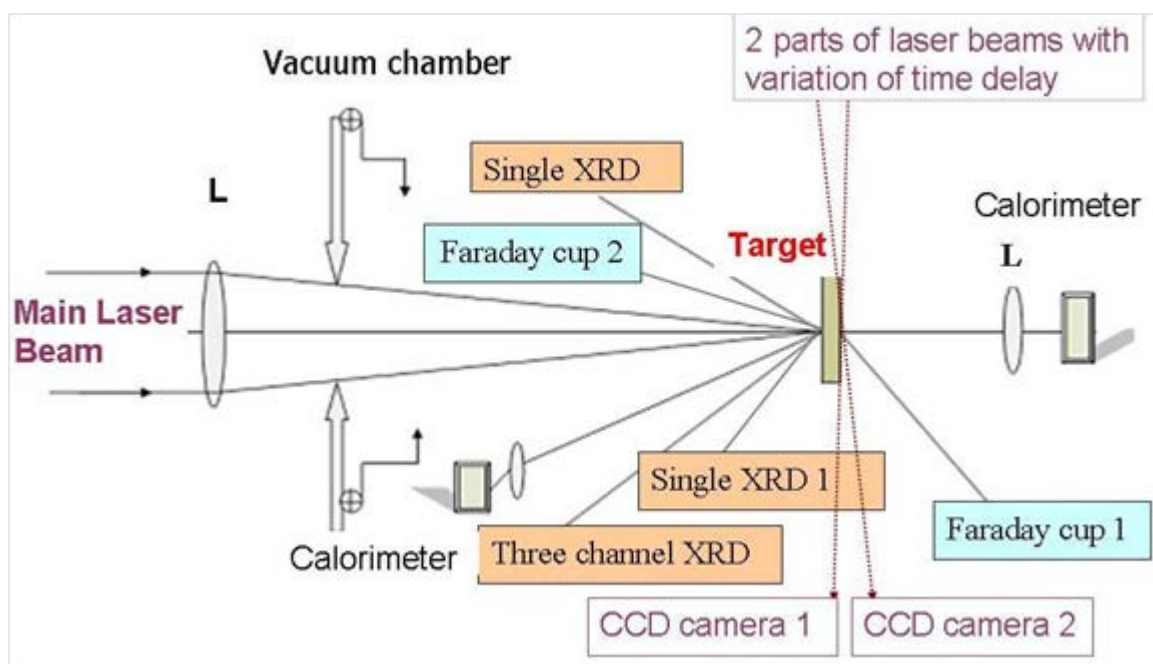


Рис.1. Схема измерительного комплекса. **XRD** - рентгеновский детектор, **L** – линза, перпендикулярно к лазерному лучу изображение мишени записывалось оптической стрик-камерой с разверткой около 10 нс.

Измерение энергетического баланса осуществлялось тремя калориметрами. Схема эксперимента и измерительного комплекса приведена на Рис.1.

Один калориметр использовался для контроля греющего пучка, другой для измерения рассеянного в обратном направлении от мишени излучения и третий помещался за мишенью для измерения доли прошедшего через мишень основного излучения. Перед мишенью размещались пять чувствительных к рентгеновскому излучению фотодиодов, которые были прикрыты соответствующими рентгеновскими фильтрами. Для измерения спектра рентгеновского излучения использовался детектор AXUV с фильтрами, состоящим из фольг В10 (пропускание $>0,9$ кэВ), никеля 5 мкм и алюминия 20 мкм. Детектор размещался на расстоянии 65 см от мишени под углом 45° и под углом близком к оси пучка. Детектор с 5-микронным алюминиевым фильтром (пропускание 0,8-1,56 кэВ и >2.4 кэВ) располагался на расстоянии 40 см с угловыми координатами $\theta=45^{\circ}$ и $\phi=55^{\circ}$ по отношению к нормали к

плоскости мишени. Детектор с 12-микронным титановым фильтром (пропускание 3-5 кэВ) располагался на расстоянии 40,7 см под углами к нормали 45° или 10° . Для измерения параметров эмитируемых ионов использовались два ионных коллектора. Один коллектор FC1 располагался на расстоянии 54,7 см перед мишенью (45° и 35°), а другой коллектор FC2 на расстоянии 55 см сзади мишени (45° или 0°). Конструктивные особенности детекторов обсуждались ранее в работе [14]. Две пластины использовались для того, чтобы выделить пучки с небольшой энергией, которые после задержки от 2 нс до 9 нс применялись для регистрации картин разлета плазмы (shadowgraphy).

Мишени

В экспериментах использовались специально приготовленные мишени в виде малоплотных полимерных слоев в том числе с электронной плотностью

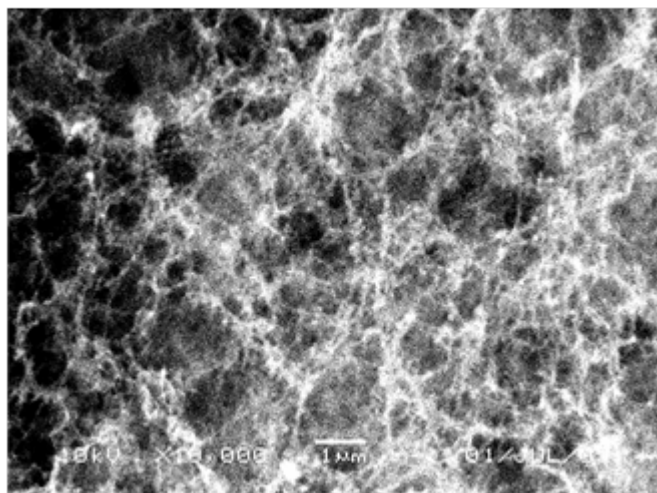


Рис. 2. Вид сетки из триацетата целлюлозы ТАЦ на сканирующем электронном микроскопе. Длина масштабной линии – 1 мкм.

при полной ионизации близкой к критической. Применялись мишени из чистых полимеров и полимеров с примесью наночастиц металлов. Для изготовления мишеней использовался триацетат целлюлозы (ТАЦ - $C_{12}H_{16}O_8$) с плотностями 2, 4, 7 $мг/см^3$ и 10, 20, 30, 50 $мг/см^3$. Реализованная структура представляла собой аэрогель в виде трехмерной сетки с расстоянием между нитями 1-2 мкм и с диаметром нитей около 0.04 мкм

(Рис.2.). Также использовались мишени из ТАС с примесью 10 весовых процентов металла (Cu) в виде наночастиц со средним диаметром 50 нм. Плотность мишени с добавками была около 7 $мг/см^3$, а толщина варьировалась от 100 мкм до 1000 мкм. Применялись два типа мишеней двухслойные (из полимерного аэрогеля и Al-фольги толщиной 5 мкм) и однослойные из слоя

полимерного аэрогеля или в виде алюминиевой фольги толщиной 0.8, 2, 5, 10 и 20 мкм.

Поскольку энергия в лазерном выстреле случайным образом варьировалась в интервале от 7 Дж до 14 Дж, то при обработке данных полученные экспериментальные значения (отраженная и прошедшая лазерная энергия, интенсивность рентгеновского излучения) приводились к стандартной энергии 10 Дж.

Представленные ниже данные являются средними значениями для мишеней одинаковой плотности и толщины. Разброс относительно средних значений не превышал 15%. Доля энергии лазерного излучения, отраженной от плазмы в сторону падающего луча, в большинстве опытов была менее 10%, в редких случаях до 17%. В малоплотном слое как подкритическом так и надкритическом (с учетом нелинейного рассеяния и излучения в мягком рентгеновском диапазоне) преобразовывалось 80-85% падающего лазерного излучения.

Результаты с мишенями из Al-фольги давали значения, близкие к получаемым обычно; лишь в некоторых случаях было зарегистрировано пропускание лазерного излучения сквозь плазму мишени, не превышающее 0.2-0.3% от падающей на мишень энергии. Последнее мы отнесли к дефекту фольги или регистрации фотодиодом излучения горячей плазмы.

Обсуждение результатов

В последнее время обнаружены эффекты переноса излучения и энергии, составляющие от нескольких процентов до десятков процентов, которые могут существенно сказаться на эффективности термоядерных мишеней [6,7]. Обнаружено, что в начальный момент действия мощного лазерного импульса на структурированное вещество (полимерный аэрогель), превращающего его в плазму, заметная доля (от нескольких процентов до почти 10%) лазерного излучения проходит сквозь плазму, несмотря на то, что средняя концентрация электронов несколько выше критической или немного ниже. В однородной (спокойной) плазме при толщине 100-200 мкм с такой плотностью и

температурой из-за обратно-тормозного рассеяния интенсивность прошедшего сквозь плазму лазерного излучения должна была уменьшиться до уровня в десятые доли процента от падающей на мишень интенсивности лазерного излучения. Объяснение более высокого уровня пропускания лазерного излучения, по нашему мнению, заключается в том, что плазма, сформированная из микроструктурированного вещества, заметное время (0.5-1.0 нс) остается гетерогенной (турбулентной). Ранее сделанные оценки [8-9] времени гомогенизации плазмы, сделанные на основе оценки времени заполнения полости (поры пены) плазмой от взорвавшихся перегородок полости, давали времена почти на два порядка более короткие, чем получается на опыте. По-видимому, надо учитывать вихревые течения плазмы и особенности последующей динамики турбулентного течения плазмы.

Наиболее интересные результаты получались при измерении E_{tr} лазерной энергии, прошедшей через неоднородную плазму и остаточный полимерный аэрогель, (см. Рис.3 и 4).

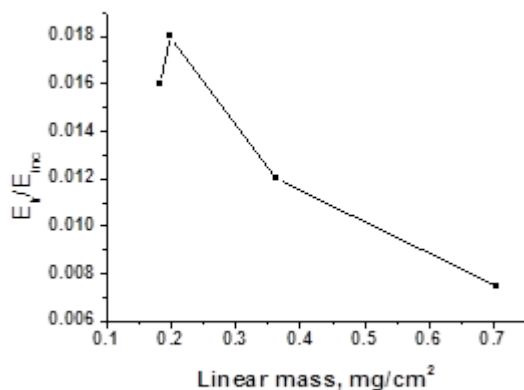


Рис.3. Зависимость прошедшей лазерной энергии E_{tr} от погонной плотности полимерного аэрогеля в mg/cm^2 . (Толщина аэрогеля 0,9-1,0 мм при переменной плотности).

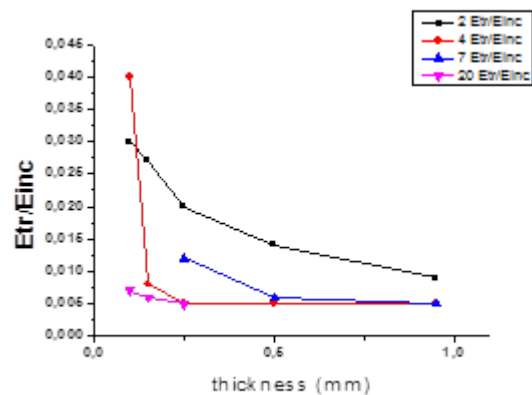


Рис.4. Зависимость прошедшей лазерной энергии E_{tr} от толщины аэрогеля для разных плотностей.

Прошедшая лазерная энергия приведена E_{tr}/E_{inc} как доля от падающей на мишень энергии E_{inc} . Опубликованные данные для длины волны лазера 1 мкм и более на таких же мишенях свидетельствуют о том, что формируемый объем

горячей плазмы глубиной от 80 мкм до 150 мкм (не толще 150 мкм), сквозь который проходит 0.3-1.0% от падающей энергии в начальный период действия лазерного импульса (пока плазма еще турбулентная)

Анализируя опубликованные в [11-12,15] данные, можно констатировать, что наши результаты близки к ожидаемым, особенно, если принять во внимание нелинейные комбинационное рассеяние SRS и рассеяние Мандельштама–Бриллюена SBS лазерного излучения в плазме. Разумно предположить, что последнее дает вклад в полную измеряемую прошедшую энергию в направлении пучка, которая прежде интерпретировалась как “пропускание мишени”.

Для обратного рассеяния аналогично рассеянию вперед коэффициенты усиления SRS и SBS пропорциональны плотности потока лазерного излучения на поверхность мишени (плазмы) и соответствующим образом зависят от длины волны и от электронной плотности относительно критической. Зависимость коэффициентов усиления SRS и SBS от электронной температуры плазмы существенно различна $G_{SRS} \sim T_e^{3/2}$, а $G_{SBS} \sim 1/T_e$.

Пропускание лазерного излучения существенно возрастает только для тонких мишеней при толщинах 0,1 мм и менее, когда коэффициенты усиления SBS могут возрастать по отношению к ожидаемым в 2-2,5 раза. Такое увеличение может происходить за счет того, что за время действия лазерного импульса весь слой аэрогеля превращается в подкритическую плазму, которая пропускает заметную часть лазерного излучения.

Спектры рентгеновского излучения в пределах ошибки не зависели от плотности и толщины полимерного слоя, но оказались чувствительными к введению добавок в виде наночастиц меди (спектр с добавками оказался несколько мягче). Интенсивность рентгеновского излучения плазмы увеличивалась при уменьшении плотности и при уменьшении толщины полимерного слоя, что, по-видимому, связано с одной стороны, с повышением температуры плазмы [11-12,16], а, с другой стороны, с увеличением телесного угла наблюдения плазмы для тонких образцов.

Интенсивность рентгеновского излучения плазмы возросла почти в 2 раза при введении (10% масс.) добавок меди (см. рис.5 и 6).

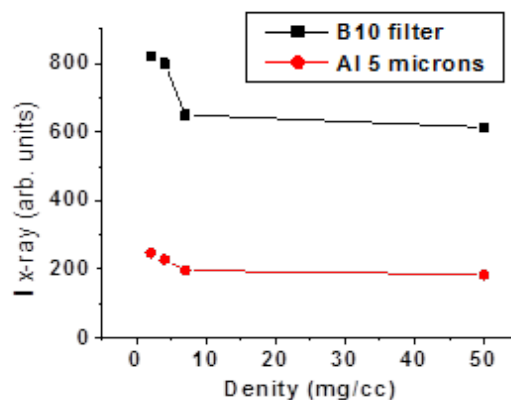
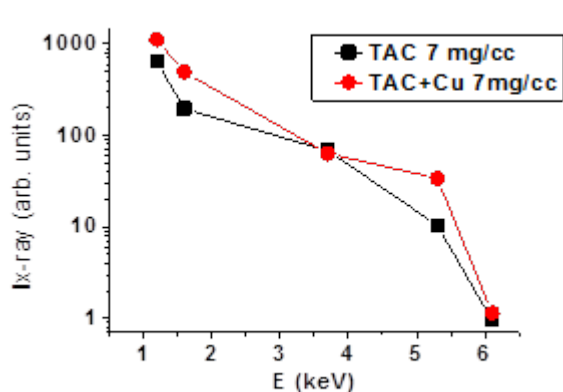


Рис. 5. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от энергии (обрезания) для разных фильтров.

Рис. 6. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от плотности полимера (ТАЦ) однослойной мишени.

Динамика лазерной плазмы на тыльной стороне мишеней, судя по теневым картинам (см. рис. 7-8), несет в себе информацию о скорости движения плазмы по направлению движения вдоль по лучу, падающему перпендикулярно к поверхности мишени. Зависимости скорости плазмы от плотности (и толщины) мишени приведены на рис. 9. Результаты для тонких и малоплотных мишеней отсутствуют, поскольку горячая плазма, движущаяся вдоль по «греющему» лучу, становится существенно подкритической и прозрачной для диагностических лучей с $\lambda=0.53$ мкм. Кроме того, судя по тыльным (периферийным) областям плазмы, плотность плазмы по оси движения быстро убывает не только из-за движения вперед, но и из-за быстрого тангенциального разлета (см. рис. 10). На теневых картинах видно распределение плотности, характерное для полого цилиндрического потока (кольцевое уплотнение к границе кольца). Кроме того, в мишенях в виде субмикронных трехмерных сеток с нановолокнами при плотностях ниже 10 мг/см^3 тангенциальное расширение плазменной волны существенно увеличивается при понижении плотности [17]. Зависимости скорости тангенциального движения от плотности, приведенные на рис. 9, в первом приближении описываются хорошо известными решениями задачи взрыва в безвоздушном пространстве [18-19]. Для строгого решения надо учитывать начальную скорость плазмы от мишени и

неоднородное распределение плазмы по радиусу температуры, плотности и начальной (осевой) скорости [20].

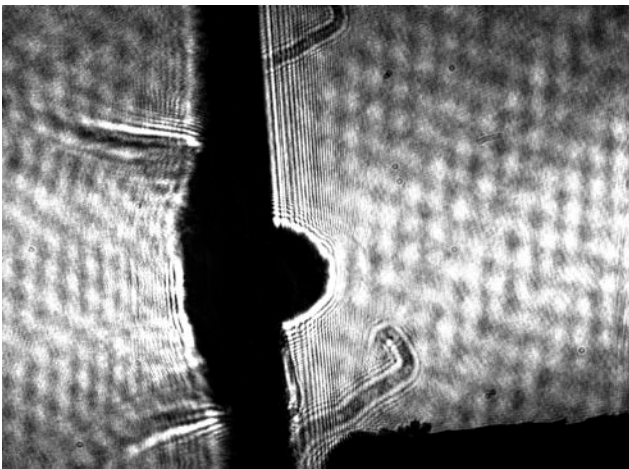


Рис. 7а. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 30 мг/см³ и толщиной 100 мкм, энергия в выстреле 7.65 Дж, задержка 2.92 нс. Опыт №18 от 23.07.10.

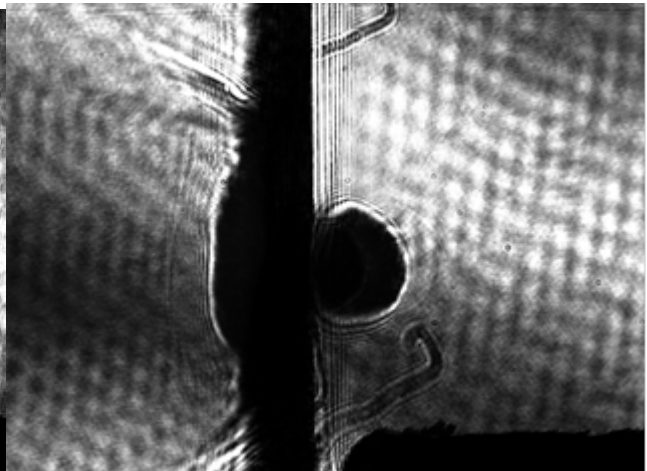


Рис. 7в. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 30 мг/см³ и толщиной 100 мкм, энергия в выстреле 7.65 Дж, задержка 6.39 нс. Опыт №18 от 23.07.10.



Рис. 8а. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 7 мг/см³ и толщиной 280 мкм, энергия в выстреле 6.43 Дж, задержка 2.92 нс. Опыт №2 от 23.07.10.



Рис. 8а. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 7 мг/см³ и толщиной 280 мкм, энергия в выстреле 6.43 Дж, задержка 2.92 нс. Опыт №2 от 23.07.10.

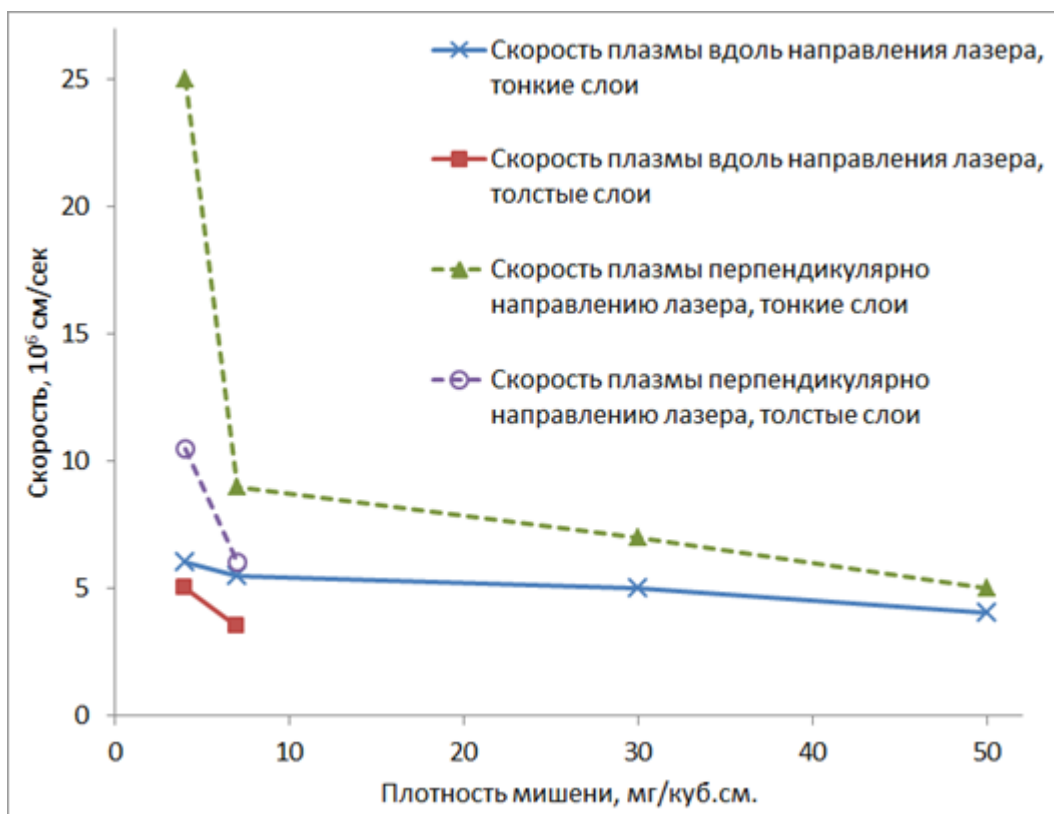


Рис. 9. Зависимости скорости движения плазмы вдоль по лазерному лучу от плотности аэрогеля. Параметр – толщина слоя.

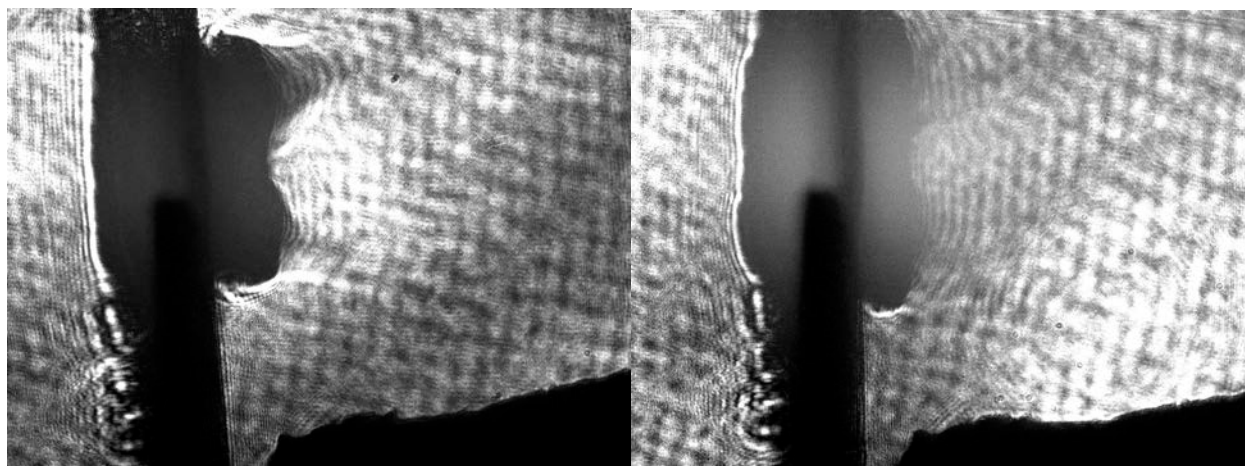


Рис. 10а. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 4 мг/см³ и толщиной 170 мкм, энергия в выстреле 9.5 Дж, задержка 4.82 нс. Опыт №6 от 21.07.10.

Рис. 10в. Теневая картина плазмы от мишени с плотностью 4 мг/см³ и толщиной 170 мкм, энергия в выстреле 9.5 Дж, задержка 8.28 нс. Опыт №6 от 21.07.10.

Для тонких мишеней из полимерного аэрогеля разной плотности скорости быстрых ионов, вылетающих под углом 45° в полупространство вперед и обратно по отношению к лучу, мало отличаются (см. рис. 11), что свидетельствует с точностью до 30% о близости температур плазмы при плотностях от 20 мг/см^3 до 2 мг/см^3 в осевой области.

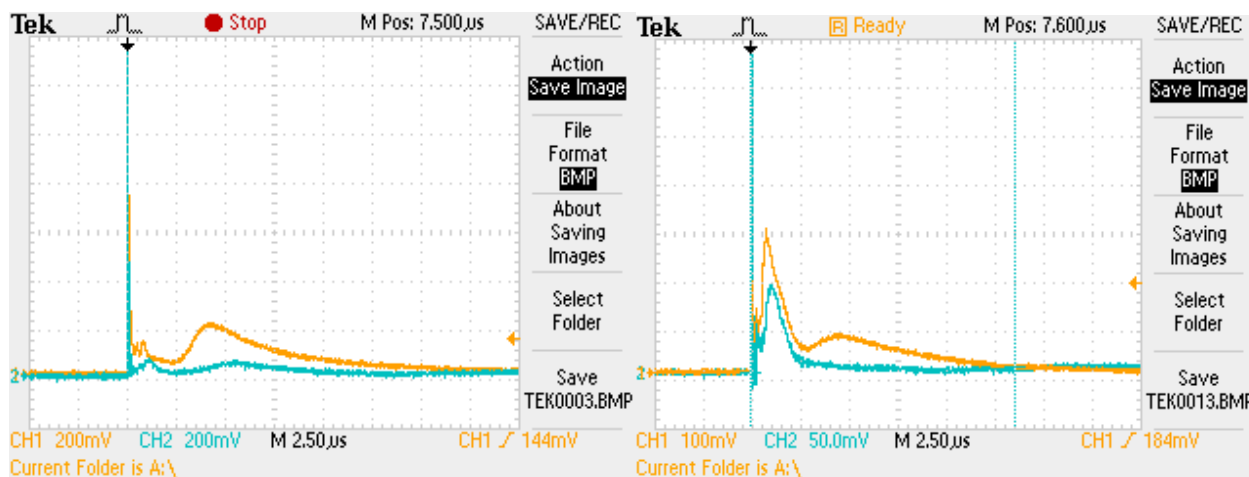


Рис. 11а. Данные ионных коллекторов от мишени с плотностью 4 мг/см^3 и толщиной 520 мкм , энергия в выстреле 7.4 Дж . Опыт №4 21.07.10

Рис. 11в. Данные ионных коллекторов от мишени с плотностью 50 мг/см^3 и толщиной 110 мкм , энергия в выстреле 7.65 Дж . Опыт №14 23.07.10

Доктор Н.Г. Борисенко признательна программе российско-индийского научного сотрудничества ILTP (проект INT/ILTP/A-3.43) за поддержку в организации совместных экспериментов.

References

1. Nuckolls J.H., Thiessen A.R., Dahlbacka G.H. Foam encapsulated targets US Patent 4376752 at March 15, 1983, приоритет от 1975 г.
2. Dresselberger M., Jones M.W., Edwards J., Dunne M., Willi O., 1995, Phys. Rev. Letters, 74, 2961.
3. Koch J.A., Estebrook K.G., Bauer J.D., Back, Rubenchik C.A., et al., 1995, Phys. Plasmas. 2С. 3820.
4. A. E. Bugrov, I. N. Burdonskiy, V. V. Gavrilov, et al., Zh. Eksp. Teor. Fiz., 111, 903–918 (1997).
5. Khalenkov A.M., Borisenko N.G., Kondrashov V.N., Merkuliev Yu.A., Limpouch J., Pimenov V.G., 2006, Laser & Particle Beams, 24, 283.
6. 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, and J. Ullschmied, J. Russ. Laser Research, 28(6), 500–518 (2007).

7. J. Limpouch, P. Adamek, N. G. Borisenko, N. N. Demchenko, T. Kapin, M. Kalal, A. M. Khalenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, M. Kucharik, R. Liska, K. Masek, W. Nazarov, M. Pfeifer, M. Sinor, and J. Ullschmied, in: *33rd EPS Conference on Plasma Physics*, Rome 19–23 June 2006, ECA **30I**, P-5.001 (2006).
8. 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.
9. Limpouch J., Demchenko N.N., Gus'kov S.Yu., Kalal M., Kasperczyk A., et al. Laser interaction with plastic foam – metallic foil layered targets. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. – 2004, - V. 46, - P. 1831- 1846.
10. Borisenko N.G., Akimova I.V., 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., 2006, *Fusion Sciences and Technology*, **49**, 676.
11. Borisenko N.G., Khalenkov A.M., Kmetik V., Limpouch J., Merkuliev Yu.A., Pimenov V.G., 2007, *Fusion Sciences and Technology*, **51**, 655.
12. 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, and J. Ullschmied, *J. Russ. Laser Research*, **28(6)**, 500–518 (2007).
13. Chaurasia S., Munda D. S., Dhareshwar L. J., 2008, BARC Report, BARC/2008/E/006.
14. Chaurasia S., Munda D. S., Murali C. G., Gupta N. K., Dhareshwar L. J., Rajshree V., Narayan B. S., 2008, BARC Report, BARC/2008/E/019.
15. Depierreux S., Labaune C., Michel D.T., Stenz C., Nicolai P., Grech M., Raizuelo G., et.al., 2009, *Physical Review Letters*, **102**, 195005.
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. 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. // *IFSA 2007, Journal of Physics: conference Series* **112**, (2009) 022041
18. Л.И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М. Наука, 1987, 432 с.
19. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. Наука, 2009.
20. J. Limpouch, P. Adamek, N.G. Borisenko, N.N. Demchenko, T. Kapin, M. Kalal, A.M. Khalenkov, D. Klir, V. Kmetik, E. Krousky, M. Kucharik, R. Liska, K. Masek, W. Nazarov, M. Pfeifer, M. Sinor, J. Ullschmied. Impact of Foam Structure and Composition on Absorption and Energy Transfer. // *33rd EPS Conference on Plasma Phys. Rome 19-23 June 2006, ECA Vol. 30I*, P-5.001 (2006).