

УДК 621.039.66

## ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2011 И.А. Артюков<sup>1</sup>, Н.Г. Борисенко<sup>1</sup>, Б.Л. Васин<sup>1</sup>, А.В. Виноградов<sup>1</sup>, А.И. Громов<sup>1</sup>,  
Ю.А. Меркульев<sup>1</sup>, М.В. Осипов<sup>1</sup>, В.Н. Пузырёв<sup>1</sup>, А.Н. Стародуб<sup>1</sup>, А.А. Фроня<sup>1</sup>,  
М.Л. Чернодуб<sup>1,2</sup>, О.Ф. Якушев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Самара

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, г. Москва

Поступила в редакцию 10.03.2011

Разработан и создан диагностический канал на основе объектива Шварцшильда, позволяющий регистрировать изображение лазерной плазмы в спектральном диапазоне 18 – 20 нм с пространственным разрешением ~ 2.5 мкм. Данная диагностика была использована в экспериментах по взаимодействию наносекундного импульса лазерного излучения интенсивностью  $10^{13}$  –  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> с материалами различной плотности и структуры.

Ключевые слова: рентгеновская микроскопия, диагностика лазерной плазмы, взаимодействие лазерного излучения с веществом.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение плазмы, образуемой при воздействии лазерного излучения на различные материалы, имеет огромное значение, как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений [см. например, 1, 2, 3]. При облучении вещества лазерным излуче-

нием интенсивностью  $10^{12}$ - $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> температура возникающей плазмы может достигать нескольких тысяч эВ, при этом максимум излучательной способности приходится на рентгеновскую область спектра. Для лазерной плазмы рентгеновское излучение является источником очень важной информации о процессах, протекающих в плазме [4]. Изучение распределения интенсивности этого излучения позволяет судить об эффективности поглощения лазерной энергии, о размерах излучающей области, а также о развитии различных нелинейных процессов в плазме. Именно поэтому актуальной и важной задачей является развитие методов диагностики лазерной плазмы, позволяющих изучать распределение светимости плазмы с высоким пространственным разрешением в рентгеновском спектральном диапазоне, в частности, мягком рентгеновском.

Экспериментальная техника и методы, используемые в мягком рентгеновском диапазоне длин волн, определяются следующими свойствами:

1. Глубина проникновения излучения во все материалы составляет единицы и доли микрометра;
2. Отражательная способность всех материалов в указанной области спектра крайне низка – от тысячных долей до нескольких процентов;
3. Излучение поглощается в воздухе, поэтому исследования должны проводиться в вакууме.

Поскольку лазерная плазма является источником электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне, необходимо использовать такие методики, которые позволяют осуществлять селективную спектральную регистрацию излучения плазмы.

*Артюков Игорь Анатольевич, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.*

*E-mail: iart@sci.lebedev.ru.*

*Борисенко Наталья Глебовна, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.*

*E-mail: ngbor@sci.lebedev.ru.*

*Васин Борис Лаврентьевич, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.*

*Виноградов Александр Владимирович, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук.*

*E-mail: vinograd@sci.lebedev.ru.*

*Громов Александр Иванович, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.*

*E-mail: agromov@sci.lebedev.ru.*

*Меркульев Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией.*

*E-mail: merkuli@sci.lebedev.ru.*

*Осипов Михаил Владимирович, старший научный сотрудник. E-mail: mosipoff@yandex.ru*

*Пузырёв Виктор Николаевич, научный сотрудник.*

*E-mail: puz@sci.lebedev.ru.*

*Стародуб Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией.*

*E-mail: starodub@sci.lebedev.ru.*

*Фроня Анастасия Андреевна, младший научный сотрудник. E-mail: anastasiya@fronya.com.*

*Чернодуб Михаил Леонидович, аспирант НИЯУ МИФИ, инженер ФИАИ. E-mail: mchernodub@mail.ru*

*Якушев Олег Фелксович, старший научный сотрудник. E-mail: yakush@sci.lebedev.ru.*

В настоящее время существуют разнообразные методы формирования изображения освещаемых и светящихся объектов в рентгеновском излучении, например, камера-обскура, рентгеновские микроскопы и т.д. [4, 5]. В основе рентгеновской микроскопии лежит использование различных отражающих элементов рентгенооптики: зеркала скользящего падения в виде полированных поверхностей различных материалов и многослойных интерференционных структур (МИС), а также отражатели на основе кристаллов и МИС, работающие при углах падения излучения, близких к нормальным. Наиболее характерными особенностями многослойной рентгеновской оптики являются возможность малых углов падения излучения на поверхность зеркала вплоть до нормального и высокая спектральная селективность, обусловленная интерференционным характером отражения [6, 7].

Зеркала нормального падения на основе МИС могут применяться для коллимации расходящегося пучка мягкого рентгеновского излучения от точечных источников в параллельные пучки, для фокусировки и передачи изображения исследуемого объекта в необходимую точку пространства с требуемым увеличением [8]. Такие зеркала могут быть изготовлены со значительно более высокой точностью, чем используемые в рентгеновских микроскопах оптические элементы скользящего падения. Более того, переход к зеркалам нормального падения позволяет увеличить апертуру прибора и их поле зрения и снизить абберации. Примером использования многослойных зеркал в лазерных экспериментах с плазмой может служить [9].

В объективе Шварцшильда реализованы все описанные выше преимущества зеркал нормального падения на основе МИС. Он сочетает в себе такие качества как большое поле зрения и возможность исследовать структуру объектов в мягком рентгеновском диапазоне, а также субмикронное пространственное разрешение [10].

Объектив Шварцшильда находит применение в биологии, медицине, материаловедении, используется в системах рентгеновской литографии [11], а также для исследований самосветящихся объектов, таких как лазерная плазма [12].

В работах [13, 14] экспериментально продемонстрировано эффективное использование объектива Шварцшильда для исследования структуры различных объектов, как органических (биологических), так и неорганических. Источником рентгеновского излучения для освещения изучаемых объектов служила лазерная плазма. Полученные данные были подтверждены независимыми исследованиями структур объектов с помощью электронной микроскопии.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению изображения наносекундной лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении. Для формирования изображения плазмы использовался объектив Шварцшильда с рабочим спектральным диапазоном 18 – 20 нм.

## 2. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТИВА ШВАРЦШИЛЬДА

В лаборатории воздействия лазерного излучения ОКРФ ФИАН на лазерной установке “Канал-2” [15], позволяющей проводить исследования по взаимодействию низкокогерентного лазерного излучения с веществом, разработан и создан диагностический канал на основе объектива Шварцшильда, который состоит из трёх основных элементов:

1. Объектив Шварцшильда, позволяющий строить изображения микрообъектов с предельным разрешением  $\sim 0,2$  мкм в рентгеновском спектральном диапазоне 18 – 20 нм;

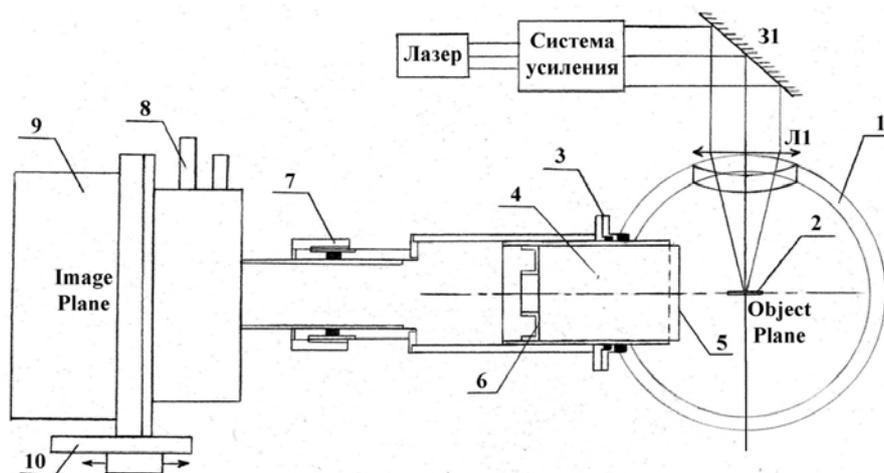
2. ССD-камера, регистрирующая изображения созданные объективом Шварцшильда микрообъектов как в видимом, так и в мягком рентгеновском диапазоне;

3. Персональный компьютер, предназначенный для визуализации полученных изображений и их дальнейшей обработки.

Схема диагностического канала для исследования лазерной плазмы в мягком рентгеновском диапазоне представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлена оптическая схема объектива Шварцшильда. Объектив Шварцшильда представляет собой систему, состоящую из двух сферических зеркал с совпадающим центром кривизны. В данной работе использовался концентрический объектив Шварцшильда, особенность которого в том, что он позволяет компенсировать сферические абберации третьего порядка [10].

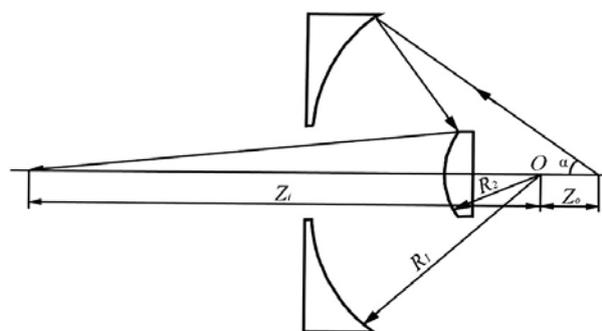
У концентрического объектива Шварцшильда зеркала имеют общий центр кривизны, со следующими параметрами: радиус кривизны большого зеркала  $R_1 = 100$  мм, радиус кривизны малого зеркала  $R_2 = 35$  мм. При этом фокусное расстояние – 26,92 мм, увеличение  $\sim 15,5$ . Расстояние между объектом и центром кривизны  $Z_1 = 28,66$  мм, расстояние между изображением и центром кривизны  $Z_0 = 444,18$  мм. Геометрические размеры зеркал  $D_1 = 50$  мм,  $D_2 = 10,6$  мм. Зеркала имеют Mo/Si многослойные покрытия, обеспечивающие коэффициент отражения  $\sim 20$  % на рабочей длине волны  $\lambda = 20$  нм. Тонкий слой Si служил для предотвращения временной деградации. Период покрытия  $d = 9,89$  нм, доля толщины слоя Mo в периоде составляет 0,34, число периодов  $\sim 20$ .



**Рис. 1.** Диагностический канал для исследования лазерной плазмы в мягком рентгеновском диапазоне: 31 – поворотное зеркало, Л1 – фокусирующая линза, 1 – камера взаимодействия, 2 – мишень, 3, 6, 7 – крепёжные элементы, 4 – объектив Шварцшильда, 5 – алюминиевый фильтр, 8 – азотная ловушка, 9 – ПЗС-матрица, чувствительная к излучению в мягком рентгеновском диапазоне, 10 – юстировочный столик

Объектив Шварцшильда располагался в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного излучения, падающего по нормали к поверхности мишени. Исходя из условий и задач эксперимента (размер лазерной плазмы ~ 500 мкм; размеры матрицы CCD камеры ~ 13 × 13 мм<sup>2</sup>) расстояния между объектом, расположенным в центре камеры взаимодействия, его изображением и центром кривизны зеркал были рассчитаны таким образом, чтобы увеличенное в 15,5 раз изображение объекта полностью заполняло приёмную матрицу CCD-камеры. Данная схема эксперимента позволяет изучать особенности разлёта лазерной плазмы для мишеней различного состава и формы.

Особенность схемы представленного эксперимента заключается в том, что регистрировалось изображение самой лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении. Излучение непосредственно, без каких-либо дополнительных зеркал, попадало в объектив Шварцшильда



**Рис. 2.** Объектив Шварцшильда:

$R_1, R_2$  – радиусы выпуклого и вогнутого зеркал с общим центром кривизны (точка  $O$ ),  $Z_0, Z_i$  – расстояния от точки  $O$  до объекта и изображения, соответственно [10]

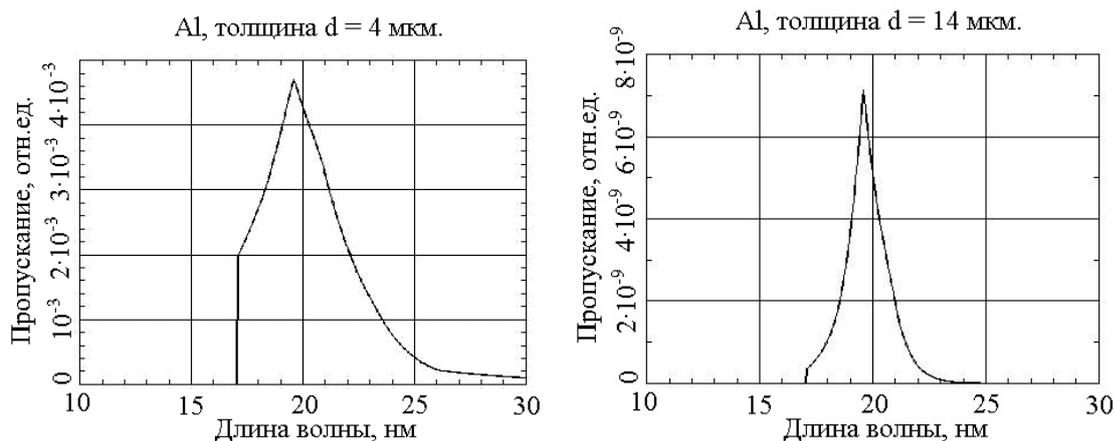
и затем регистрировалось детектором, что привело к необходимости использовать фильтры для выделения рабочего спектрального диапазона объектива из излучения плазмы.

В качестве детектора использовалась рентгеновская CCD камера, что позволяло выводить изображения на персональный компьютер (ПК) и подвергать их дальнейшей обработке и анализу.

Все эксперименты проводились в вакууме при давлении не хуже  $10^{-4}$  мм рт. ст. Для снижения шумов на матрице регистрация изображений осуществлялась при низкой рабочей температуре CCD камеры ( $-50^\circ\text{C}$ ). Для предотвращения конденсации водяных паров на поверхности матрицы непосредственно перед CCD камерой устанавливалась “азотная ловушка”.

Основная сложность конструирования диагностического канала заключалась в необходимости обеспечения независимой юстировки, как самого объектива Шварцшильда, так и приёмника, т.е. CCD-камеры, без нарушения вакуума внутри камеры взаимодействия. Ещё одна проблема, которую пришлось решать при создании канала, это проблема паразитной засветки рассеянным излучением внутри камеры взаимодействия и достижения необходимого контраста при регистрации изображения плазмы. Для выделения рабочей спектральной области (18 – 20 нм) использовались алюминиевые фильтры различной толщины. Зависимость коэффициента пропускания алюминия от длины волны излучения для различной толщины представлена на рис. 3.

Конструкция крепления, с помощью которого фильтры устанавливались на объектив Шварцшильда, была разработана таким образом, чтобы препятствовать попаданию рассеянного излучения на регистрирующий детектор. В



**Рис. 3.** Коэффициент пропускания алюминиевого фильтра, плотностью  $\rho=2,67 \text{ г/см}^3$  для различных толщин [16]

дополнение к этому все поверхности, от которых рассеянное излучение могло отразиться и проникнуть в диагностический канал, были зачернены для снижения коэффициента отражения. Кроме того, данная конструкция не препятствовала процессу откачки воздуха из диагностического канала.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была проведена серия экспериментов по исследованию взаимодействия излучения неодимового лазера управляемой когерентности с объектами различной плотности и структуры. Параметры лазерного излучения, приходящего на мишень, представлены в табл. 1.

В качестве объектов использовались твердотельные мишени из алюминия с плотностью  $\rho = 2700 \text{ мг/см}^3$  и толщиной  $\sim 100 \text{ мкм}$ , полимерные аэрогели [17] с плотностью  $4 \text{ мг/см}^3$  и толщиной  $500 \text{ мкм}$  и мишени из нанокластеров олова [18, 19] толщиной  $15 \text{ мкм}$ , объёмная плотность которых составляла  $0,1 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, в зависимости от типа мишени плотность взаимодействующего вещества могла изменяться в пределах трёх порядков. Для длины волны

**Таблица 1.** Параметры лазерного излучения

Длина волны	$\sim 1060 \text{ нм}$
Длительность импульса	$\sim 2,5 \text{ нс}$
Ширина линии излучения	$24 \text{ \AA}$
Энергия излучения	$10 - 100 \text{ Дж}$
Плотность потока мощности	$10^{12} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$
Расходимость	$\sim 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$
Число поперечных мод	$\sim 10^3$

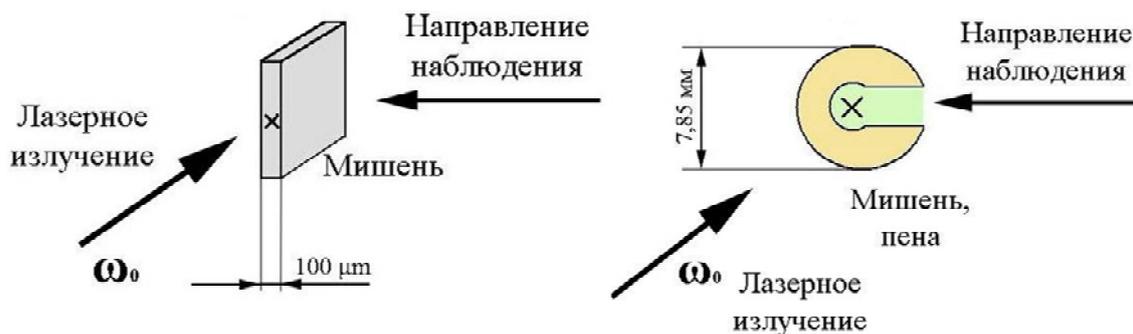
греющего излучения  $\lambda_0 = 1060 \text{ нм}$  величина критической плотности составляет  $\sim 3 \text{ мг/см}^3$ . Таким образом, в экспериментах исследовалось взаимодействие излучения с мишенями, имеющими только надкритическую плотность. Схемы облучения мишеней представлены на рис. 4.

При взаимодействии греющего излучения с алюминиевой и полимерными мишенями, а также мишенью из нанокластеров олова были получены изображения области лазерной плазмы, излучающей в мягком рентгеновском диапазоне спектра (рис. 5).

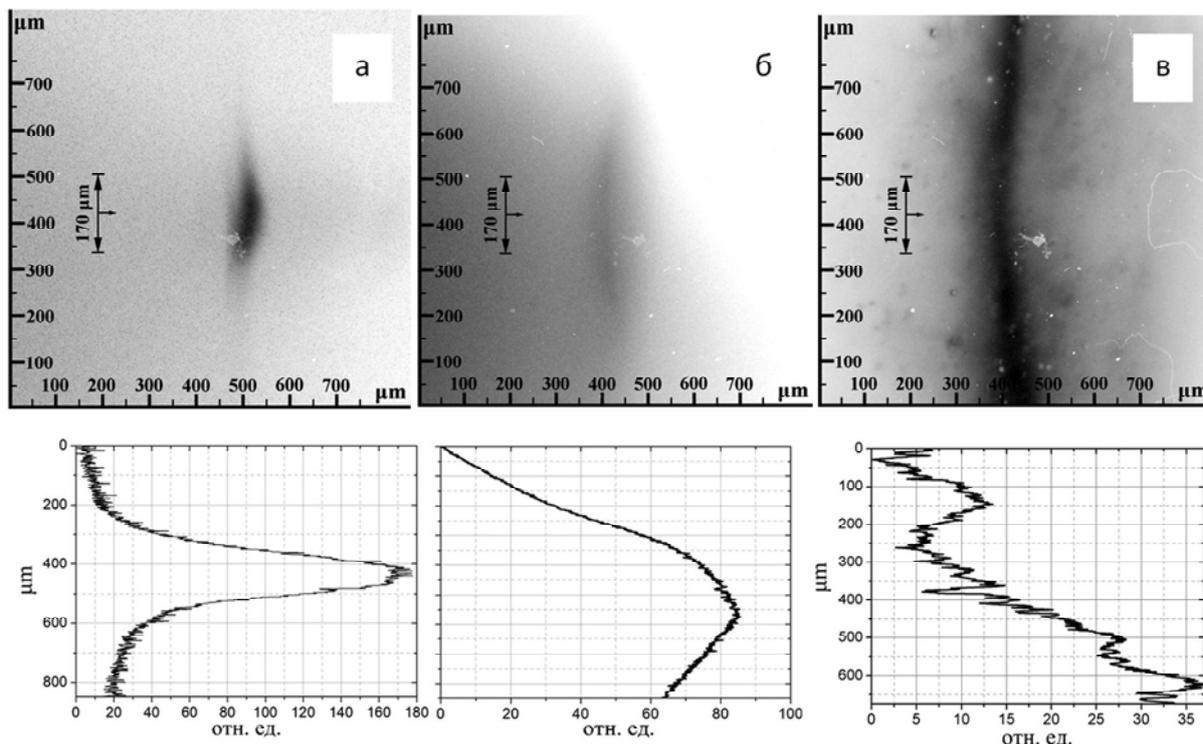
Эксперименты показали, что интенсивность рентгеновского излучения плазмы твердотельных мишеней и мишеней из нанокластеров значительно превосходит интенсивность рентгеновского излучения плазмы малоплотного аэрогеля, что необходимо учитывать при регистрации.

В первом случае (рис. 5, а) излучающая область в поперечном направлении по отношению к направлению распространения греющего излучения имеет размеры порядка размера фокального пятна. Напротив, в случае полимерного аэрогеля (рис. 5, б) и мишени из нанокластеров олова (рис. 5, в) излучающая область в поперечном направлении имеет размеры, превышающие размер фокального пятна, причем в последнем случае весьма значительно. Превышение поперечных размеров плазмы над размером фокального пятна свидетельствует о том, что в поперечном направлении происходит прогрев мишени.

При сравнении изображений плазмы малоплотных объемноструктурированных мишеней, то видно, что для полимерного аэрогеля (рис. 5, б) характерно более равномерное распределение интенсивности рентгеновского излучения, чем для мишени из нанокластеров (рис. 5, в). В тоже время для плазмы твердотельных мишеней (рис. 5, а) характерно наличие области выделяющейся более высокой интенсивностью и имеющей ограниченные пространственные размеры.



**Рис. 4.** Схемы облучения:  
 а – твердотельная мишень; б – полимерный аэрогель и мишень из нанокластеров



**Рис. 5.** Изображения лазерной плазмы в МРД и распределение интенсивности излучения в поперечном направлении (по отношению к направлению распространения лазерного излучения), полученные при взаимодействии излучения с различными мишенями: а – алюминиевая мишень, энергия греющего излучения 32,8 Дж; б – полимерный аэрогель с плотностью 4 мг/см<sup>3</sup> и толщиной 500 мкм, энергия греющего излучения 37,8 Дж; в – мишень из нанокластеров олова с плотностью 0,1 г/см<sup>3</sup> и толщиной 15 мкм, энергия греющего излучения 80,8 Дж

В случае мишени из нанокластеров олова неоднородности излучения были выявлены в поперечном направлении. Интенсивность неравномерно возрастает от одного края изображения к другому. При этом область наиболее интенсивного излучения сосредоточена в нижней части полученного изображения. Это можно объяснить неравномерным распределением энергии по сечению пучка лазерного излучения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен метод рентгеновской диагностики наносекундной лазерной плазмы, позволяющий регистрировать изображение лазерной плазмы в спектральном диапа-

зоне 18 – 20 нм с пространственным разрешением ~ 2.5 мкм. Разработанная методика была применена в экспериментах по взаимодействию лазерного излучения интенсивностью 10<sup>12</sup> – 10<sup>14</sup> Вт/см<sup>2</sup> с веществом, в результате которых были зарегистрированы изображения плазмы алюминиевой мишени, полимерного аэрогеля и мишени из нанокластеров олова в собственном рентгеновском излучении.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-02-00113 и № 07-02-01148) и Федеральной целевой программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (грант № 2009-1.1-122-052-025).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н.* Лазерная плазма. Физика и применения. М.: Наука, 2003.
2. *Басов Н.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И.* Лазерные термоядерные установки // Итоги науки и техники. Радиотехника. М.: ВИНТИ. 1984. Т. 25.
3. *Бессонов Е.Г., Виноградов А.В.* Ондюляторные и лазерные источники мягкого рентгеновского излучения // УФН. 1989. Том 159. Вып. 1.
4. Диагностика плотной плазмы [под ред. Н.Г. Басова]. Москва: Наука, 1989.
5. Рентгеновская оптика и микроскопия: пер. с англ. / Под ред. Г. Шмала и Д. Рудольфа. Москва: Мир, 1987.
6. *Виноградов А.В.* Многослойная рентгеновская оптика // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. №12.
7. *Мишет А.* Оптика мягкого рентгеновского излучения: пер. с англ. М.: Мир, 1989.
8. *Артюков И.А., Бенвер Б.Р., Виноградов А.В., Касьянов Ю.С., Кондратенко В.В., Мачетто К.Д., Озолс А., Рокка Х.Х., Чилла Х.Л.А.* Фокусировка пучка компактного импульсно-периодического рентгеновского лазера для изучения взаимодействия излучения с металлическими мишенями и рентгеновской рефлектометрии // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, №4.
9. *Willi O.W., Barringer L., Vickers C., Hoarty D.* Study of super- and subsonic ionization fronts in low-density soft x-ray irradiation foam targets. *Astrophysical Journal Supplement Series* 127, pp. 527-531, (2000)
10. *Артюков И.А., Крымский К.М.* The design and performance of Schwarzschild objective: preprint № 30. М.: ФИАН, 1998.
11. *Tichenor D.A., Kubiak G.D., Malinowski M.E., Stulen R.H., Haney, S.J., Berger K.W., Brown L.A., Sweatt W.C., Bjorkholm J.E., Free-man R.R., Himel M.D., MacDowell A.A., Tennant D.M., Wood O.R., Bokor J., Jewell T.E., Manséeld W.M., Waskiewicz W.K., White D.L., Windt D.L.* Appl. Optics. 32, 7068, 1993.
12. *Seeley J.F., Holland J.E., Giasson J.V.* Appl. Optics, 32, 6294 1993.
13. *Артюков И.А., Асадчиков В.Е., Виноградов А.В., Касьянов Ю.С., Кондратенко В.В., Серов Р.В., Федоренко А.И., Юлин С.А.* Зеркальный рентгеновский микроскоп для исследования объектов, освещаемых излучением лазерной плазмы // Квантовая электроника. 1995. Т. 22, № 9. С. 951-954.
14. *Андреев А.В., Асадчиков В.Е., Артюков И.А., Бузмаков А.В., Виноградов А.В., Дудчик Ю.И., Зрюев В.Н., Касьянов Ю.С., Кольчевский Н.Н., Комаров Ф.Ф., Кондратенко В.В., Мчедlishvili Б.В., Пономарев Ю.В., Попов А.В., Постнов А.А., Савельев С.В., Сенин Р.А., Сулов И.В.* Рентгеномикроскопические методы в исследовании трековых мембран и биологических объектов // Серия. Критические технологии. Мембраны. 2005. № 3 (27). С. 17-27.
15. *Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., Starodub A.N.* Lasers for ICF with a Controllable Function of Mutual Coherence of Radiation // Journal of Russian Laser Research, 2004. Vol. 25, 1.
16. X-Ray Interactions With Matter. URL: [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/](http://henke.lbl.gov/optical_constants/) (дата обращения 15.02.2011)
17. *Khalenkov A.M., Borisenko N.G., Kondrashov V.N., Merkuliev Yu.A., Limpouch J., Pimenov V.G.* Experience of microheterogeneous target fabrication to study energy transport in plasma near critical density // Laser & Particle Beams, 2006. Vol. 24, pp. 283-290.
18. *Громов А.И., Меркульев Ю.А.* Лазерные диагностические мишени // Лазерные термоядерные мишени и сверхпрочные микробаллоны. Труды ФИАН т.220, Москва, Наука, (1992), с. 28-46.
19. *Gromov A.I., Borisenko N.G., Gus'kov S.Y., Merkul'ev Yu.A., Mitrofanov A.V.* Fabrication and monitoring of advanced low-density media for ICF targets // Laser and Particle Beams, 1999. Vol. 17, No 4, pp. 661-670.

## DIAGNOSTICS OF LASER PLASMA IN SOFT X-RAY SPECTRAL BAND WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

© 2011 I.A. Artyukov<sup>1</sup>, N.G. Borisenko<sup>1</sup>, B.L. Vasin<sup>1</sup>, A.V. Vinogradov<sup>1</sup>, A.I. Gromov<sup>1</sup>, Yu.A. Merkuliev<sup>1</sup>, M.V. Osipov<sup>1</sup>, V.N. Puzyrev<sup>1</sup>, A.N. Starodub<sup>1</sup>, A.A. Fronya<sup>1</sup>, M.L. Chernodub<sup>1,2</sup>, O.F. Yakushev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara

<sup>2</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow

Diagnostic channel on basis of the Schwarzschild objective has been developed. It allows registering an image of laser plasma in spectral range of 18 – 20 nm with spatial resolution of ~2.5 nm. The diagnostic channel has been used in experiments on interaction of nanosecond  $10^{13} - 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> laser pulse with materials of different densities and structure.

Key words: X-ray microscopy, laser plasma diagnostics, laser-matter interaction.

*Igor Artyukov, Candidate of Physics and Mathematics, Leading Scientific Associate. E-mail: iart@sci.lebedev.ru.*

*Nataliya Borisenko, Candidate of Physics and Mathematics, Leading Scientific Associate. E-mail: ngbor@sci.lebedev.ru.*  
*Boris Vasin, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Staff Scientist.*

*Alexander Vinogradov, Doctor of Physics and Mathematics, Chief Scientific Associate. E-mail: vinograd@sci.lebedev.ru.*

*Alexander Gromov, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Staff Scientist. E-mail: agromov@sci.lebedev.ru.*

*Yuriy Merkuliev, Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory. E-mail: merkuli@sci.lebedev.ru.*

*Mikhail Osipov, Senior Staff Scientist.*

*E-mail: mosipoff@yandex.ru.*

*Victor Puzyrev, Scientific Associate.*

*E-mail: puz@sci.lebedev.ru.*

*Aleksandr Starodub, Candidate of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory. E-mail: starodub@sci.lebedev.ru.*

*Anastasiya Fronya, Junior Researcher.*

*E-mail: anastasiya@fronya.com.*

*Mikhail Chernodub, Graduate Student of the dep.70 NRNU "MEPhI", Engineer LPI RAS. E-mail: mchernodub@mail.ru.*

*Oleg Yakushev, Senior Staff Scientist.*

*E-mail: yakush@sci.lebedev.ru.*