

УДК

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. А. Артюков, Н. Г. Борисенко, А. В. Виноградов, Ю. С. Касьянов¹,
В. Г. Пименов², Р. М. Фещенко, А. М. Халенков

Предложен метод контроля параметров малоплотных слоев лазерных мишеней с помощью мягкого рентгеновского излучения. Метод позволяет оценивать флуктуации плотности по всему объему малоплотной мишени без разрушения последней, а также, в случае присутствия добавок, регистрировать и оценивать равномерность распределения по объему крупных агломератов тяжелых примесей. Приведены первые результаты по аттестации малоплотных мишеней из триацетата целлюлозы (ТАЦ), как с добавками, так и без.

Малоплотные среды широко используются в мишенях инерциального термоядерного синтеза с целью повышения эффективности сжатия и нагрева плазмы, а также в различных исследованиях по физике высоких плотностей энергии [1]. Труднейшей методической задачей является изготовление и контроль параметров слоев малоплотных ($\sim 10 \text{ мг/см}^3$) веществ, в том числе содержащих добавки в виде наночастиц. Наличие субмикронной ячеистой полимерной структуры и добавок в виде наночастиц тяжелого элемента с характерными размерами порядка 100 нм предполагает широкое применение методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Однако, с одной стороны, СЭМ позволяет получать информацию только о структуре поверхности малоплотного слоя и не дает точных сведений о наличии флуктуаций плотности и крупномасштабных

¹Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, Россия.

²Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского, Москва, Россия.

агломератов примесей в объеме слоя, а с другой стороны, требует нанесения проводящих покрытий на поверхность мишени, т.е. является разрушающим методом аттестации. В случае оптически прозрачных слоев для измерений можно использовать методы оптической микроскопии. Однако получить пространственное разрешение лучше ~ 0.5 мкм с помощью оптического микроскопа при исследовании малоплотных сред практически невозможно.

Исследование структуры в проходящем пучке мягкого рентгеновского излучения обладает рядом преимуществ по сравнению с указанными ранее методами. Во-первых, высокий абсорбционный контраст на длинах волн 4–5 нм позволяет выявлять и оценивать флуктуации плотности, связанные с нарушением регулярной структуры трехмерной полимерной сетки и наличием агломератов тяжелого элемента в объеме малоплотного слоя мишени. Во-вторых, за счет малой длины волны уже достигнуто пространственное разрешение около 0.1 мкм при достаточной большой глубине резкости по сравнению с СЭМ и оптической микроскопией [2]. Наконец, мягкое рентгеновское излучение не оказывает сильного влияния на микроструктуру малоплотного слоя, т.е. метод является неразрушающим для мишени. Таким образом, целью данной работы являлась разработка метода неразрушающего рентгеновского контроля параметров структуры малоплотных сред с добавками тяжелого элемента, применяющихся в конструкциях лазерных мишеней [3].

Метод контроля параметров. Исследования проводились на лазерной установке ФЕНИКС [4]: Nd-лазер обладает энергией в импульсе до 30 Дж (во второй гармонике), длительностью импульса ~ 2 нс, диаметром пятна фокусировки 30 мкм. В экспериментах по рентгеновскому просвечиванию малоплотных слоев из триацетата целлюлозы толщиной 200–300 мкм требуемая энергия импульса лазера составляла всего 0.5–1.5 Дж, так как этого оказалось достаточно для получения изображения с нормальным почернением. Размер лазер-плазменного источника на длине волны ~ 4.5 нм не измерялся.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Излучение на второй гармонике лазера (8) фокусировалось на массивную мишень из рения (1), в результате чего возникало плазменное облако (2). Далее рентгеновское излучение плазмы падало на сферическое ($R_{\text{кривизны}} = 100$ мм) многослойное Co/C рентгеновское зеркало нормального падения (3) [6] с апертурой ~ 1 см, которое одновременно служило в качестве коллиматора пучка и рентгеновского монохроматора со средним разрешением ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1/200$). В результате после прохождения тонкопленочных скандиевых фильтров (4) [7] исследуемый образец

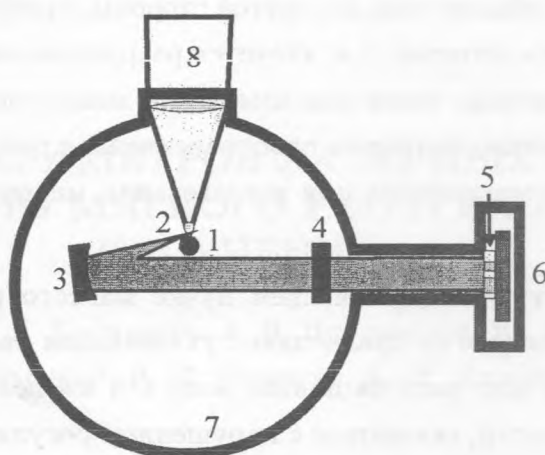


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – массивная мишень из рения; 2 – плазменное облако; 3 – сферическое зеркало с многослойным рентгеновским покрытием Co/C ; 4 – фильтр Sc/C на основе полиимидной пленки; 5 – исследуемый образец; 6 – рентгеновская фотопленка УФ-4; 7 – вакуумная камера; 8 – лазерное излучение ($\lambda = 0.53 \text{ мкм}$).

(5) облучался квазипараллельным пучком мягкого ($\lambda \sim 4.5 \text{ нм}$, $E \sim 286 \text{ эВ}$) рентгеновского излучения. Прошедшее излучение регистрировалось с помощью рентгеновской фотопленки УФ-4 (6). Короткая длина волны, узкая спектральная полоса ($\Delta O \sim 0.02 \text{ нм}$), малая угловая расходимость ($\sim 20 \text{ мрад.}$) пучка и небольшое расстояние (100–200 мкм) между исследуемым образцом и фотопленкой позволяют получать контрастные рентгеновские изображения с разрешением, практически равным зерну используемой пленки (1–5 мкм) [5]. Все оптические компоненты располагались внутри вакуумной камеры (7), рабочее давление составляло 10^{-2} Торр .

Образцы. В данной работе исследовались слои из полностью открыто пористых малоплотных полимерных трехмерных сеток триацетата целлюлозы ($C_{12}H_{16}O_8$) [8] с плотностями 10 мг/см^3 , в том числе с добавками 10% и 20% меди в виде ультрадисперсного порошка с характерным размером частиц 50–100 нм, причем в этом случае средняя плотность также составляла 10 мг/см^3 . Толщины малоплотных слоев составляли 200 и 300 мкм. Мишени, содержащие слои триацетата целлюлозы с указанными параметрами, применяются в экспериментах на различных лазерных установках [2].

Регулярная микроструктура ТАЦ (рис. 2а, б) с характерным размером ячейки 1–2 мкм, образованная волокнами с диаметром 0.1 мкм и плотностями около 0.1 г/см^3 реализуется с помощью метода закритической сушки гелей с малой концентрацией полимера. Сканирующая электронная микроскопия позволяет оценивать распределе-

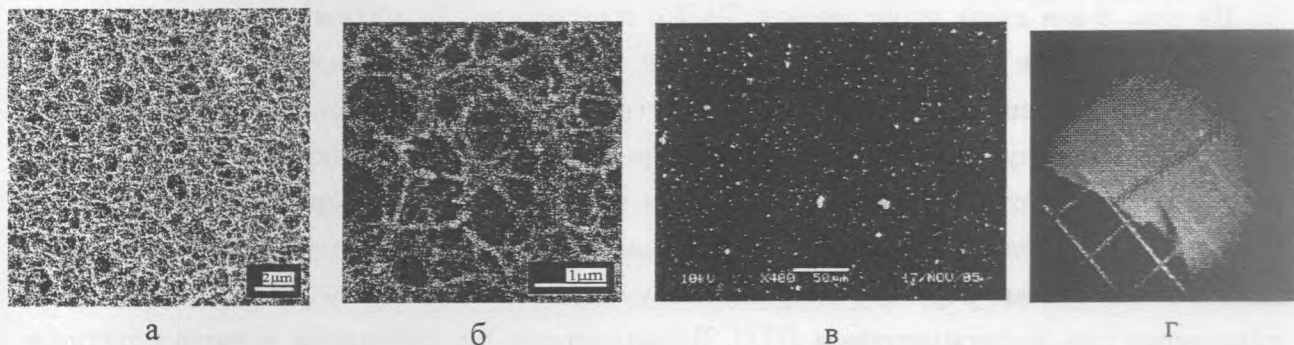


Рис. 2. Сканирующая электронная и оптическая микроскопия ТАЦ. а, б – СЭМ поверхности, масштабы 2 и 1 мкм; в – СЭМ поверхности малоплотного ТАЦ с добавками 10% меди по весу и плотностью 10 мг/см³. Снимок без напыления проводящего слоя, темное пятно в середине – разрушение структуры под действием пучка электронов микроскопа, масштаб 50 мкм, видно распределение частиц меди по поверхности малоплотного слоя; г – снимок слоя ТАЦ 10 мг/см³ с примесью 10% меди по весу, толщиной 300 мкм в оптическом диапазоне. Расстояние между большими делениями шкалы – 140 мкм. Сквозь слой видны квадраты сетки-подложки 500 × 500 мкм.

ние наночастиц тяжелых элементов по поверхности малоплотного слоя (рис. 2в). При этом высушенные слои ТАЦ могут обладать определенной оптической прозрачностью (рис. 2г).

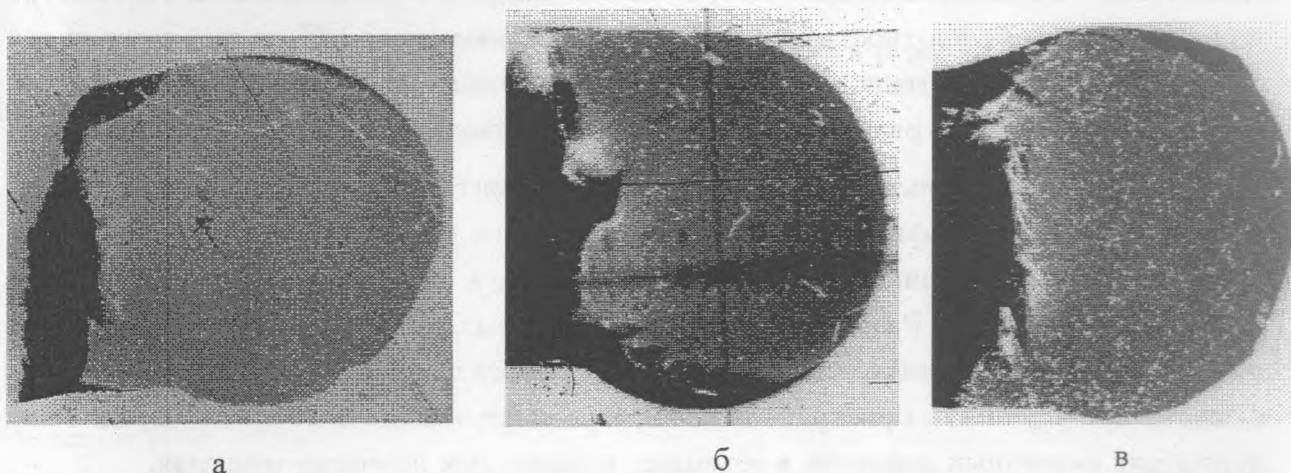


Рис. 3. Изображение слоев ТАЦ 10 мг/см³ в мягком рентгеновском излучении. а – ТАЦ без примесей, б – с примесью 10% меди по весу, в – с примесью 20% меди по весу.

Результаты. В результате облучения малоплотных мишеней мягким рентгеновским излучением были получены изображения, представленные на рис. 3.

На рис. 3 а-в даны изображения ТАЦ с плотностью 10 мг/см^3 без примеси меди (толщина 200 мкм), с примесью 10% меди по весу (толщина 300 мкм) и примесью 20% меди по весу (толщина 200 мкм) соответственно. Видно наличие светлых и темных областей. На черную засвеченную область регистрирующей пленки (слева) излучение падало беспрепятственно. Светлые области являются менее прозрачными для проходящего пучка, равномерное серое поле означает отсутствие существенных флуктуаций плотности в объеме образца, во всяком случае, на масштабах $\sim 300 \times 300 \text{ мкм}$, характерных для экспериментов в ЛТС. Параллельные темные линии и черное пятно в середине первого кадра являются дефектами фотопленки.

В результате анализа на микроденситометре подобных изображений было выявлено, что флуктуации плотности в объеме малоплотного слоя составляют менее 1% независимо от наличия добавок, т.е. распределение ячеек и волокон по размерам остается равномерным не только в поверхностном слое образца, как было получено с помощью СЭМ. Также по приведенным и аналогичным изображениям было выявлено, что в случае присутствия меди молекулы полимера стремятся объединяться вокруг конгломератов медных частиц, образуя “клубки”, которые выпадают на стадии гелеобразования на одну из поверхностей малоплотного слоя вследствие седиментации. Характерные размеры подобных образований $3\text{--}5 \text{ мкм}$, их количество растет с увеличением концентрации меди (ср. рис. 3 б, в), однако распределение по образцу остается равномерным, а число их сравнительно невелико. Помимо этого, из оценок следует, что в кубическом сантиметре малоплотного слоя с плотностью 10 мг/см^3 и с добавками меди 10% по весу содержится около 10^{12} наночастиц меди. Таким образом, по данным рентгеновского контроля, на долю крупных частиц с размерами более $3\text{--}5 \text{ мкм}$ приходится менее 1% от веса добавок.

Заключение. В результате проведенных экспериментов показана эффективность метода микрорентгенографии на длине волны $\lambda = 4.5 \text{ нм}$ ($E = 286 \text{ эВ}$) для исследования малоплотных слоев полимерных лазерных мишеней, в том числе содержащих примеси тяжелых элементов. Разработка и применение новых рентгенооптических систем на основе эффективных многослойных зеркал нормального падения позволит в дальнейшем существенно улучшить пространственное разрешение метода и точность определения положения различных дефектов в объемных полимерных лазерных мишенях.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. В.В.Кондратенко и его сотрудникам (Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, Украина) за предоставленные рентгенооптические зеркала и фильтры. Работа поддерживалась грантом Международного научно-технического центра (Проект

МНТЦ N 2297), грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ 06-02-17526).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Borisenko N. G., Akunets A. A., Bushuev V. S., et al. *Laser and Particle Beams*, **21**, 505 (2003).
- [2] Виноградов А. В. *Квантовая электроника*, **32**, N 12, 1113 (2002).
- [3] Борисенко Н. Г., Акимова И. В., Громов А. И. и др. Препринт ФИАН, N 26, М., 2005.
- [4] Андреев Н. Е., Арцимович В. Л., Касьянов Ю. С., Тихончук В. Т. *ЖЭТФ*, **98**, вып. 3(9), 881 (1990).
- [5] Artioukov I. A., Vinogradov A. V., Asadchikov V. E., et al. *Optics Letters*, **20**, 2451 (1995).
- [6] Artuyukov I. A., Bugayev E., Devizenko O. Yu., et al. *Proc. of SPIE*, **5919**, 94 (2005).
- [7] Artioukov I. A., Kasyanov Yu. S., Kopylets I. A., et al. *Review of Scientific Instruments*, **74**, No. 11, 4964 (2003).
- [8] Пименов В. Г., Дрожжин В. С., Сахаров А. М. *Высокомолекулярные соединения, серия Б*, **45**, N 1, 106 (2003).

Поступила в редакцию 3 апреля 2006 г.