

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЖЕСТКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ С ПОМОЩЬЮ СОСТАВНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ

IMAGING OF LASER PLASMA IN HARD X-RAYS BY COMPOUND REFRACTIVE X-RAY LENS

Р. В. Гаранин, Н. В. Жидков, Н. А. Суслов
R. V. Garanin, N. V. Zhidkov, N. A. Suslov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Centre – All Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В докладе сообщается о регистрации изображения лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении в эксперименте на лазерной установке «Искра-5» с помощью составной преломляющей рентгеновской линзы. Описана постановка эксперимента, процедура сборки и юстировки рентгеновской линзы. Представлены результаты регистрации изображения лазерной плазмы в квантах с энергией $h\nu \approx 8$ кэВ при облучении плоской Cu мишени. Обсуждается возможность применения рентгеновских линз для диагностики плазмы в экстремальном состоянии.

Imaging of laser plasma in hard x-rays by compound refractive x-ray lens in experiment at «Iskra-5» laser facility is reported in this paper. Experimental setup, processes of arrangement and alignment of compound x-ray lens are described. The results of laser plasma imaging in x-rays with energy $h\nu \approx 8$ keV created by Cu-target irradiation are presented. A capability of application of x-ray lenses for diagnostics of plasmas in extreme conditions are discussed.

Плазма ряда веществ при сверхвысоких давлениях, температурах и плотностях внутренней энергии была получена в ударно-волновых экспериментах, при облучении мишеней интенсивными короткими лазерными импульсами или пучками тяжелых ионов [1–5]. Исследования такой плазмы актуальны для различных приложений. Они позволяют получить данные о характере быстропротекающих процессов, теплофизических свойствах веществ в экстремальных состояниях и условиях реализации ЛТС.

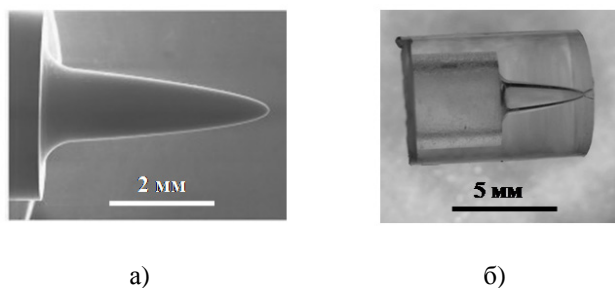
В докладе предлагается диагностика лазерной плазмы по её излучению в жестком рентгеновском диапазоне с использованием рентгеновских преломляющих линз с аксиальной симметрией [6], объединенных в составную линзу для достижения необходимых параметров [7–9]. В работе описывается эксперимент, в котором составная рентгеновская линза впервые применена для изображения лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении, возникающем при острой фокусировке на мишень мощного импульса лазерного излучения.

Преломление рентгеновского излучения в веществе описывается действительной частью (1– δ) комплексного показателем преломления $n = 1 - \delta + i\beta$. Значения δ для рентгеновского излучения составляют малую величину 10^{-5} – 10^{-6} , поэтому показатель преломления несколько меньше 1, а фокусирующая рентгеновская линза представляет собой углубление в материале определенной формы [7]. Фокусное расстояние F_s одиночной преломляющей рентгеновской линзы с аксиальной симметрией определяется выражением $F_s = R/\delta$, где R – радиус кривизны в вершине углубления. Поэтому такие линзы характеризуются очень длинным фокусным расстоянием (до десятков метров) и требуют очень малых (десятки микрон) радиусов кривизны преломляющей поверхности. На практике для получения более короткого фокусного расстояния используются составные линзы, состоящие из N одинаковых линз. Фокусное расстояние такой составной линзы определяется соотношением $F_N = F_s/N$.

Использование преломляющих линз для фокусировки рентгеновского излучения быстро рас-

ширятся. Наиболее широко они применяются в исследованиях с использованием синхротронных источников рентгеновского излучения. Разработаны различные по конструкции планарные и аксиальные линзы. Для их изготовления применяются различные материалы и технологии [6–11]. В работах [6, 8, 9] описана фокусирующая аксиальная 3D линза с параболическим профилем преломляющей поверхности. Технология их изготовления описана в работах [12, 13]. Линзы с параболическим профилем обладают минимальными сферическими aberrациями, а их пространственное разрешение близко к дифракционному пределу.

Изображение единичной такой рентгеновской линзы и штамп для её изготовления представлены на рис. 1.



а)

б)

Рис. 1. Штамп (а) и одиночная аксиально симметричная преломляющая рентгеновская линза (б)

Регистрация изображения лазерной плазмы в жестком рентгеновском излучении $E \approx 8$ кэВ с по-

мощью составной преломляющей рентгеновской линзы, состоящей из 10 идентичных линз осуществлена в эксперименте на йодной лазерной установке «Искра-5» [14]. Схема эксперимента показана на рис. 2.

Мишень облучалась первой гармоникой лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1.315$ мкм одного из каналов установки «Искра-5». Плотность потока лазерного излучения в пятне облучения достигала $1,3 \cdot 10^{16}$ Вт/см². При такой плотности потока лазерного излучения спектр рентгеновского излучения плазмы для материалов со средним $Z \approx 30$ наряду с непрерывной компонентой содержит достаточно интенсивную и узкую К-полосу линейчатого излучения с энергией квантов $E \approx 8$ –10 кэВ. В качестве материала мишени в эксперименте использовалась медь.

Изображение лазерной плазмы с фронтальной стороны мишени регистрировалось камерой-обскурой на рентгеновскую фотопленку в излучении с $E > 4$ кэВ. Изображение плазмы в жестком рентгеновском излучении, сформированное составной рентгеновской линзой, регистрировалось с тыльной стороны мишени рентгеновской CCD-камерой с прямой регистрацией излучения. Для подавления излучения с энергией квантов менее ≈ 6 кэВ на CCD-камере были установлены ряд фильтров. Оба направления наблюдения со стороны камеры-обскуры и составной рентгеновской линзы были симметричны относительно плоскости мишени.

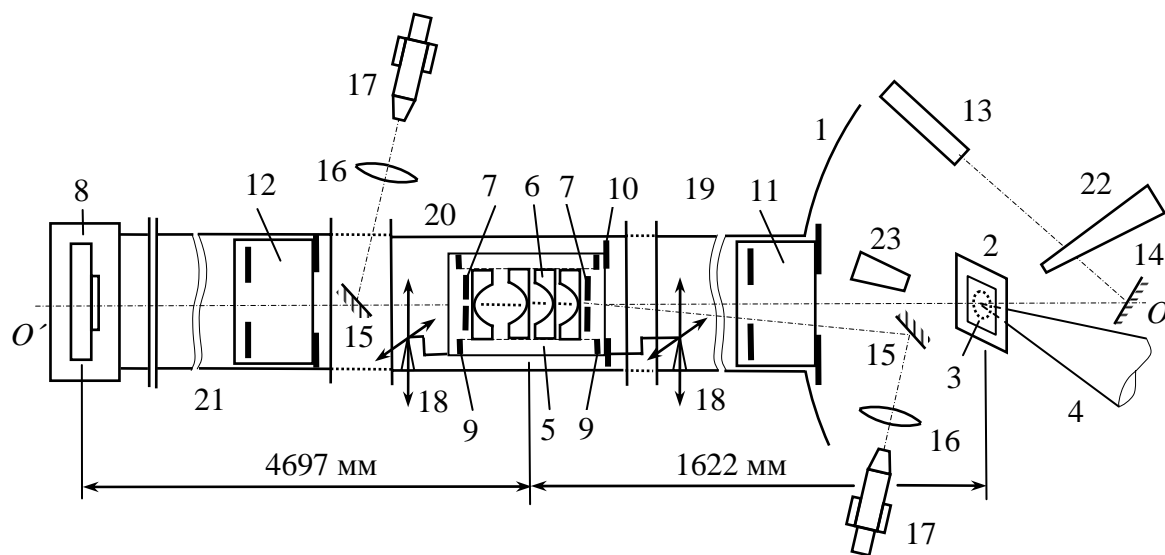


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – стенка вакуумной камеры, 2 – держатель мишени, 3 – мишень, 4 – пучок лазерного излучения, 5 – блок составной рентгеновской линзы, 6 – отдельная рентгеновская линза, 7 – метка центра, 8 – CCD-регистратор, 9 – Та диафрагмы, 10 – Рb диафрагма, 11 и 12 – блоки диафрагм, 13 – юстировочный He-Ne лазер, 14 и 15 – зеркала, 16 – объективы, 17 – микроскопы, 18 – юстируемые узлы крепления, 19 – переходник, 20 – патрубок, 21 – труба, 22 – камера обскуры, 23 – кристаллический спектрограф

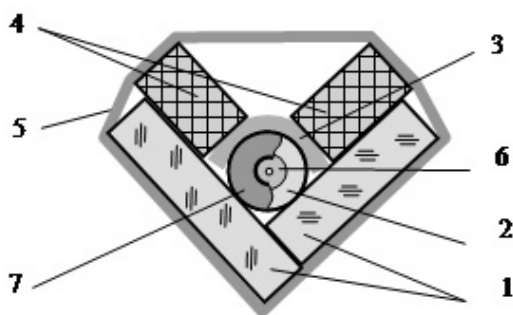
Спектр линейчатого рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\approx 7-9,5$ кэВ контролировался с тыльной стороны мишени с помощью спектрографа на плоском кристалле LiF.

Фокусное расстояние одиночной рентгеновской линзы F_s рассчитывалось методом трассировки хода лучей с учетом поглощения излучения в материале линзы. Для наиболее интенсивной компоненты экспериментально измеренного спектра линейчатого рентгеновского излучения с энергией квантов $E = 8,03$ кэВ расчетное значение для составной линзы, состоящей из 10 одинаковых одиночных линз, составило $F_N = 1205,5$ мм. В эксперименте расстояние от середины составной рентгеновской линзы до плоскости регистрации изображения составляло $S_2 = 4697$ мм, а расстояние от середины линзы до мишени в соответствии с формулой тонкой линзы устанавливалось равным $S_1 = 1622$ мм, увеличение при этом составляло $M = 2,90$.

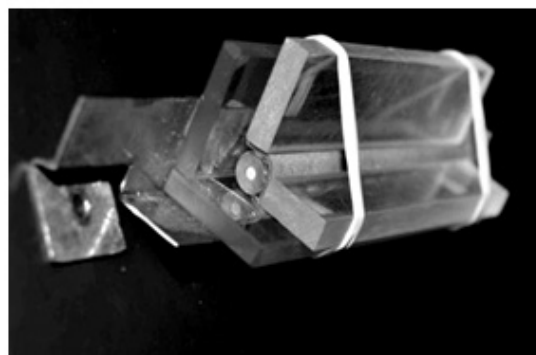
Схематическое изображение составной линзы и её внешний вид представлены на рис. 3. Для ориентации отдельных элементов составной рентгеновской линзы вдоль единой оси они укладывались в уголок, склеенный из двух стеклянных пластин с плоскими поверхностями, и плотно прижимались к ним через эластичную резиновую прокладку. Поскольку каждая одиночная линза изготовлена на одной и той же технологической сборке, а ось параболической полости линзы с высокой точностью совпадает с осью её внешней цилиндрической поверхности, то такой способ сборки составной линзы практически не ухудшает качество её фокусировки в сравнении с одиночной линзой.

Для получения метки вершины одиночной рентгеновской линзы на её плоское дно приклеивалась диафрагма с отверстием диаметром 150 мкм из тонкой, прозрачной для жесткого рентгеновского излучения, алюминиевой фольги. Относительно вершины линзы отверстие диафрагмы центрировалось с точностью 25 мкм. Для ограничения рабочего диаметра линзы и снижения фона жесткого рентгеновского излучения, рассеянного из не рабочего её объема, поверх Al диафрагмы приклеивалась дополнительная диафрагма с отверстием диаметром 1,5 мм из танталовой фольги толщиной 100 мкм. Такая фольга практически не прозрачна для рентгеновского излучения с энергией квантов $E < 35$ кэВ. Линзы с метками были установлены на входе и выходе составной рентгеновской линзы. Метки на них были обращены в сторону оптических систем наблюдения, что позволяло с их помощью наблюдать обе метки в процессе юстировки блока составной рентгеновской линзы. Апертура всего блока составной линзы на входе дополнительно была закрыта диафрагмой из свинцовой фольги толщиной 200 мкм.

Юстировка составной линзы в эксперименте осуществлялась с помощью узкого пучка He-Ne лазера. Пучок He-Ne лазера заводился в камеру взаимодействия и с помощью зеркала 14 выставлялся по оси (OO') длинного переходника 19. К переходнику последовательно пристыковываются патрубок 20 и длинная труба 21. Труба и патрубок установлены на специальные узлы, которые обеспечивают их перемещение как вдоль оси OO', так и поперек неё, при этом при скольжении вдоль оси их положение поперёк оси практически не изменяется.



а)



б)

Рис. 3. Схема составной рентгеновской линзы (вид вдоль оптической оси) (а): и её вид (б): 1 – две плоские стеклянные пластины, склеенные углом, 2 – отдельная рентгеновская линза (вид вдоль оси), 3 – эластичная резиновая прокладка, 4 – два прижимающих бруска, 5 – два стягивающих резиновых кольца, 6 – Al фольга с отверстием для указания вершины линзы, 7 – Ta диафрагма

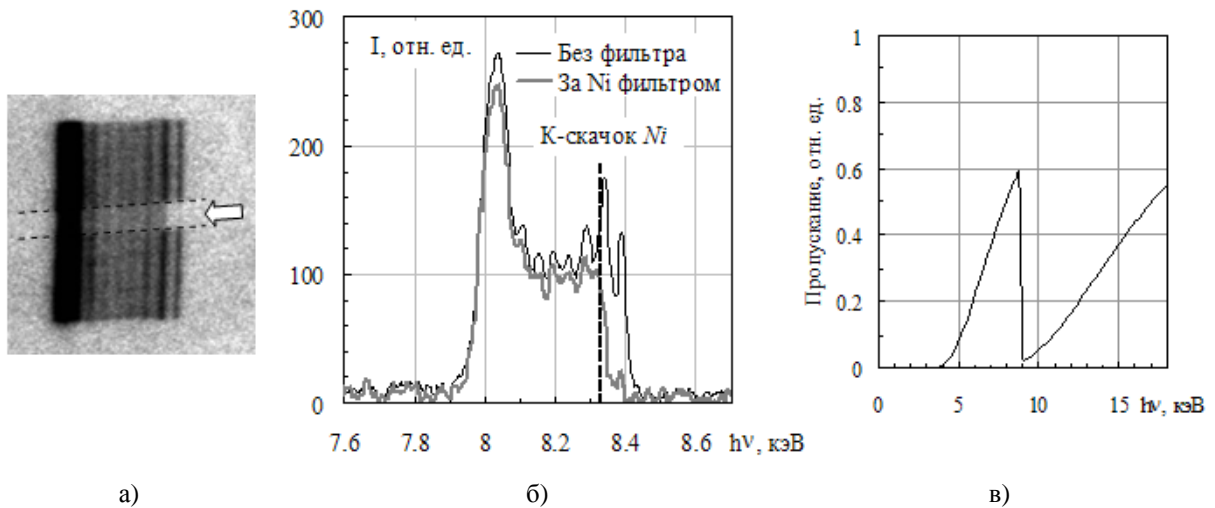


Рис. 4. Характеристики источника рентгеновского излучения: а) – спектрограмма, стрелка показывает спектр за полоской Ni-фильтра; б) – прописи спектрограммы, в) – пропускание 15 мкм Cu-мишени

Блок составной рентгеновской линзы крепился в патрубке 20 с помощью переднего и заднего юстируемых узлов крепления 18. Передний узел крепился в переходнике 19 и обеспечивал перемещение входа линзового блока поперек оси OO' . Задний узел крепился в патрубке 20 и кроме перемещений выхода линзового блока поперек оси OO' обеспечивал скольжение патрубка относительно линзового блока вдоль оси OO' .

Положение меток на входной и выходной линзах линзового блока контролировалось с помощью двух оптических систем (первой и второй соответственно), состоящих из зеркала 15, объектива 16 и микроскопа 17. Затем в отсутствие блока составной линзы центр изображения узкого пучка He-Ne лазера во второй оптической системе устанавливался в перекрестие в окуляре микроскопа. Далее блок составной линзы возвращался в патрубок 20 и с помощью переднего узла 18 вход составной линзы юстировался до совпадения метки с центром узкого пучка лазера. Положение метки относительно центра пучка контролировалось с помощью первой оптической схемы. Затем с помощью заднего узла 18 выход составной линзы юстировался до совпадения метки с перекрестием, установленным в центр пучка He-Ne лазера во второй оптической схеме. Далее патрубок 20 стыковался с переходником 19 и жестко фиксировался, при этом положения меток на входе и выходе составной линзы относительно центров пучка контролировались с помощью обеих оптических систем. Затем к нему стыковалась длинная труба 21. Для защиты от рентгеновского излучения, проходящего мимо блока составной рентгеновской лин-

зы, в трубу 21 и переходник 19 были установлены блоки свинцовых диафрагм 11 и 12 с небольшими отверстиями с общей толщиной свинца 4 мм.

Далее на пучок He-Ne лазера на заданном расстоянии от середины составной рентгеновской линзы устанавливался держатель мишени в виде тонкой пластинки с отверстием диаметром 1 мм. На тыльную относительно силового лазерного излучения сторону пластинки крепилась мишень из медной фольги толщиной 15 мкм. Держатель мишени устанавливался таким образом, чтобы центр пятна от узкого пучка He-Ne лазера на мишени совпадал с центром отверстия. Положение центра отверстия определяется визуально относительно его краёв.

Точность совмещения меток с осью пучка He-Ne лазера по нашим оценкам не хуже 100 мкм. Соответственно точность совмещения оси составной линзы с осью пучка He-Ne лазера с учетом точности установки меток на одиночных линзах по углу не хуже 2,1 мрад. Точности совмещения центра мишени с осью пучка He-Ne лазера и попадания в него силового лазерного излучения не хуже 100 мкм, а их вклад составляет не более 4 %.

Зарегистрированный в эксперименте спектр линейчатого рентгеновского излучения меди содержит ряд хорошо различимых компонент, отвечающих ионам с различной степенью ионизации от He-подобных до O-подобных ионов (см. рис. 4). Компоненты ионов меньшей кратности ионизации, а также K_{α} -линии слились в интенсивную полосу со средней энергией квантов $E \approx 8,03$ кэВ, которая использовалась в эксперименте для формирования изображения.

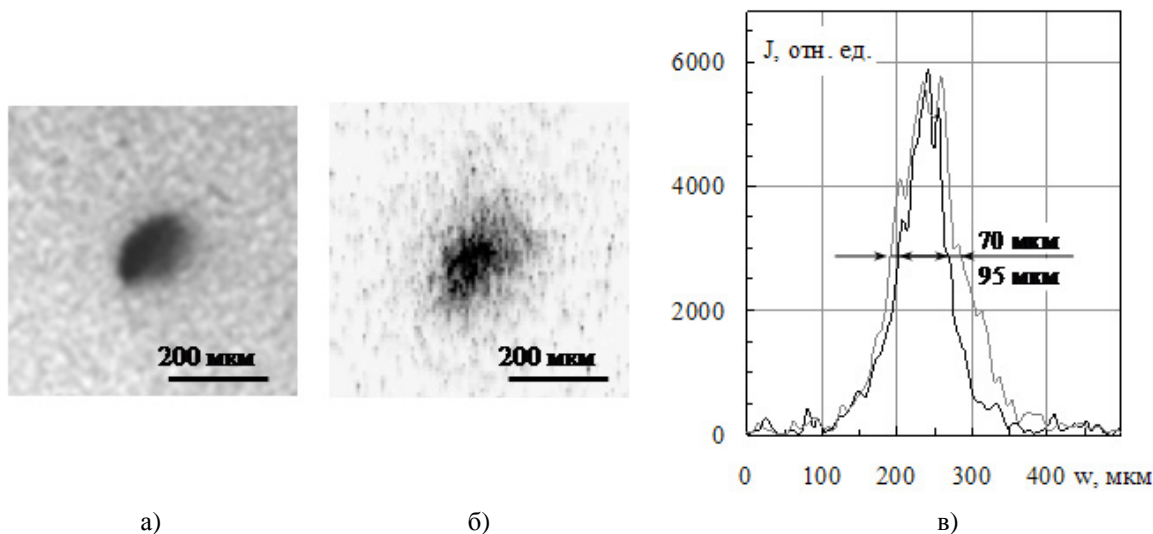


Рис. 5. Изображения плазмы, зарегистрированные камерой обскуры (а) и составной рентгеновской линзой (б), (в) – прописи изображения (б) в двух перпендикулярных направлениях

Отметим, что поскольку регистрация изображения рентгеновской линзой велась с тыльной стороны мишени, то для рентгеновского излучения, участвующего в формировании изображения, мишень играла роль дополнительного фильтра с полосой пропускания в диапазоне $\approx 6,5\text{--}9$ кэВ.

Изображения плазмы, зарегистрированные в эксперименте с помощью камеры-обскуры и рентгеновской линзы в жестком рентгеновском излучении, представлены на рис. 5.

Из рисунков видно, что оба изображения близки друг к другу как по форме и взаимной ориентации, так и по характеру неоднородного распределения яркости на них. Согласно прописям размер источника рентгеновского излучения, зарегистрированного с помощью рентгеновской линзы, составил $75\text{ мкм} \times 90\text{ мкм}$. Протяженность наиболее резкого края изображения, зарегистрированного с помощью рентгеновской линзы, составляет примерно 20 мкм . Максимальная яркость изображения, зарегистрированного с помощью рентгеновской линзы, достаточно высока и примерно в 50 раз превышает уровень фона на CCD-камере. Таким образом, можно утверждать, что в условиях лазерного эксперимента с помощью составной рентгеновской линзы в квантах с энергией ≈ 8 кэВ впервые получено детальное рентгеновское изображение лазерной плазмы с высоким пространственным разрешением.

Изображение, зарегистрированное с помощью рентгеновской линзы, выглядит в значительной степени более неоднородным, чем изображение, зарегистрированное с помощью камеры-обскуры, на нём видны несколько ярких пятен. Наличие яр-

ких пятен может быть связано с появлением в пятне облучения узконаправленных пучков «горячих» электронов, которые вызывают вспышки монохроматического характеристического излучения материала мишени. Поэтому в силу хроматической избирательности рентгеновской линзы такие пятна на изображении, полученном с её помощью, могут выглядеть более контрастно, чем на изображении, полученном с помощью камеры-обскуры принципиально в существенно более широком спектральном диапазоне. В то же время следует отметить, что наличие более ярких пятен может быть обусловлено статистическими флуктуациями из-за недостаточного количества зарегистрированных квантов.

Эффективность камеры-обскуры не зависит от энергии рентгеновского излучения, прозрачность же рентгеновской линзы значительно возрастает для излучения с большей энергией квантов. Кроме того, для излучения с большей энергией для камеры-обскуры необходимы диафрагмы с большей толщиной, которые трудно изготавливать и с которыми сложно работать.

Таким образом, показано, что использование составных рентгеновских линз с осесимметричным параболическим профилем преломляющей поверхности позволяет получать локальные, достаточно подробные, экспериментальные данные о пространственной структуре (а при наличии аппаратуры и временной динамике) лазерной плазмы в экстремальном состоянии. Полученные характеристики размеров плазмы, степени её однородности и временной динамике можно корректно сопоставить с результатами компьютерного модели-

рования соответствующих газодинамических процессов, реализующихся в полномасштабных экспериментах, определить адекватность теоретических моделей вещества при высоких давлениях и концентрациях энергии.

Список литературы

1. Regan S. P., Falk K., Gregori G. et al. Inelastic X-Ray Scattering from Shocked Liquid Deuterium // *Phys. Rev. Lett.*, 2012, V. 109, P. 265003.
2. Sinars D. B., McBride R. D., Pikuz S. A et al. Investigation of High-Temperature Bright Plasma X-ray Sources Produced in 5-MA X-Pinch Experiments // *Phys. Rev. Lett.*, 2012, V. 109, P. 155002.
3. Ma T., Döppner T., Falcone R. W. et al. X-Ray Scattering Measurements of Strong Ion-Ion Correlations in Shock-Compressed Aluminum // *Phys. Rev. Lett.*, 2013, V. 110, P. 065001.
4. J. Colgan, J. Abdallah, Jr., A.Ya. Faenov et al., Exotic Dense-Matter States Pumped by a Relativistic Laser Plasma in the Radiation-Dominated Regime // *Phys. Rev. Lett.*, 2013, V. 110, P. 125001.
5. Fortov V. E., Ilkaev R. I., Arinin V. A. et al. Phase transition in a strongly non-ideal deuterium plasma generated by quasi-isentropical compression at Megabar pressures // *Phys. Rev. Lett.*, 2007, V. 99, P.185001.
6. Треушников В. М., Треушников В. В., Павлов Г. А. Способ и форма для изготовления рентгеновских фокусирующих линз, *Патент РФ*, № 2470271.

7. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I. et al. A compound refractive lens for focusing high-energy x-rays // *Nature*, 1996, V. 384, P. 49.

8. Pavlov G. , Snigireva I. , Snigirev A. et al. Refractive X-ray shape memory polymer 3D lenses with axial symmetry // *X-Ray Spectrom.*, 2012, V. 41, P. 313.

9. Павлов Г., Snigireva I., Snigirev A. и др. Исследование свойств полимерных рентгеновских линз // *Письма в ЖТФ*, 2012, Т. 38, № 5, С.104.

10. Сагдуллин Т. А., Шабельников Л. Г., Иржак Д. В. // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования*, 2010, № 10, С. 3.

11. Schroer C., Kuhlmann M., Lengeler B. et al. Beryllium parabolic refractive X-ray lenses // *Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics*, 2002, V. 4783 P. 10.

12. Чесноков С. А., Треушников В. М., Четч Ю. В. и др., Основные условия и экспериментальная реализация незатухающей фронтальной фотополимеризации в жидких фотополимеризующихся композициях // *ВМС А*, 2008, Т. 50, С. 456.

13. Treushnikov V. M., Chesnokov S. A., Single-stage processes of polymer products photochemical synthesis with optical accuracy // *J. Photochem. Photobiol. A*, 2008, V. 196, P. 201.

14. Анненков В. И., Беспалов В. И., Бредихин В. И. и др., Перевод йодного лазера «Искра-5» в режим работы на второй гармонике // *Квантовая электроника*, 2005, V. 35, P. 993.