

Фокусировка пучка компактного импульсно-периодического рентгеновского лазера для изучения взаимодействия излучения с металлическими мишенями и рентгеновской рефлектометрии

И.А.Артюков*, Б.Р.Бенвер**, А.В.Виноградов*, Ю.С.Касьянов,*** В.В.Кондратенко****, К.Д.Мачетто**, А.Озолс**, Х.Х.Рокка**, Х.Л.А.Чилла**

Экспериментально исследовано взаимодействие сфокусированного лазерного мягкого рентгеновского излучения с металлическими мишенями. Излучение лазера на Ne-подобных ионах Ag в капиллярном разряде ($\lambda = 46.9$ нм) с частотой повторения 1 Гц фокусировалось на поверхность металлических образцов с помощью многослойного сферического Si/Sc-зеркала. Интенсивность излучения на поверхности мишеней значительно превышала порог лазерной абляции используемых материалов – алюминия, латуни, нержавеющей стали. Исследование зависимости формы лазерных кратеров от положения каустики фокусирующего зеркала совместно с результатами компьютерного расчета хода лучей позволило определить распределение интенсивности излучения в фокальной области зеркала. Плотность энергии излучения в центральной области размером 2 мкм внутри фокального пятна составила 10^2 Дж/см², а соответствующая ей интенсивность была равна 10^{11} Вт/см². Измерен коэффициент отражения многослойного Si/Sc-зеркала в зависимости от угла падения излучения.

Ключевые слова: рентгеновские лазеры, многослойная оптика, лазерная абляция, рентгеновская рефлектометрия.

Введение

В силу специфики лазеров, генерирующих мягкое рентгеновское излучение (МРИ) (отсутствие резонатора, неоднородность усиливающей среды), требуется тщательное исследование пространственно-временных и энергетических характеристик их излучения, степени его когерентности, спектрального состава и т. д. В настоящей работе исследуется пространственное распределение интенсивности лазерного пучка установки, описанной в работе [1], в каустике фокусирующего сферического зеркала по форме кратеров облучаемых мишеней и применение лазера МРИ в рефлектометрии.

1. Лазерная абляция при фокусировке МРИ

При фокусировке пучка МРИ могут быть достигнуты значительные интенсивности излучения, что открывает новые возможности для его применений. В недавнем эксперименте [2] наноджоульный импульс рекомбинационного лазера на Li-подобных ионах Al ($\lambda = 15.47$ нм) был сфокусирован в пятно субмикронных размеров с интенсивностью $\sim 10^7$ Вт/см². Предварительные результаты по фокусировке лазерных импульсов МРИ большой энергии приведены в [3].

Данный раздел посвящен исследованию распределения интенсивности излучения в фокальной области сфокусированного лазерного пучка с длиной волны 46.9 нм, генерируемого лазером на Ne-подобных ионах Ag в капиллярном разряде. Здесь же обсуждаются результаты первых экспериментов по абляции различных материалов лазерным МРИ. Схема эксперимента по исследованию распределения интенсивности излучения в области фокусировки приведена на рис.1. Лазерные импульсы генерировались в Ag-плазме капиллярного разряда длиной 18.2 см, возбуждаемой короткими импульсами тока.

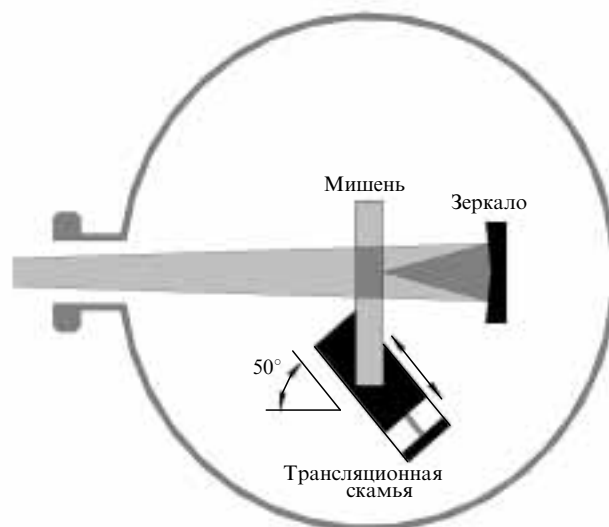


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования абляции и распределения излучения при фокусировке МРИ.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53

**Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

***Институт общей физики РАН, Россия, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38

****Харьковский политехнический университет, Украина, 310002 Харьков, ул. Фрунзе, 21

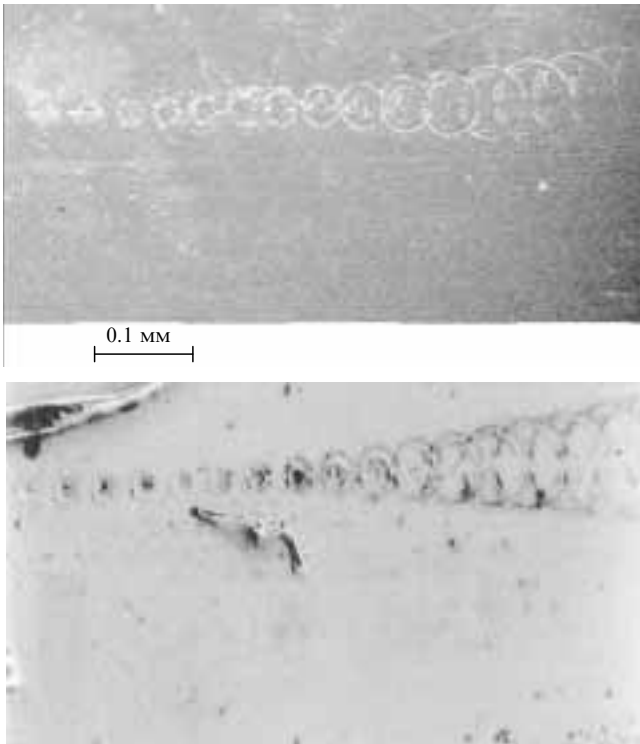


Рис.2. Следы абляции на латунной (вверху) и стальной (внизу) мишенях. Каждый след получен в результате воздействия одного лазерного импульса.

Параметры разряда в капилляре приведены в [1]. Энергия лазерного импульса составляла около 0.13 мДж, длительность – 1.2 нс. Поле излучения лазера в дальней зоне имело кольцеобразную форму с угловой расходимостью между максимумами ~ 4.6 мрад [1]. Кольцеобразная форма пучка обусловлена рефракцией излучения на радиальных градиентах плотности в усиливающей среде [4, 5]. Лазерный пучок фокусировался многослойным сферическим зеркалом с радиусом кривизны $R = 10$ см, находящимся в вакуумной камере на расстоянии 256.5 см от выходной апертуры капилляра.

Многослойное покрытие зеркал наносилось с помощью магнетронного распыления на сверхгладкую боросиликатную подложку диаметром 2.5 см с размером шероховатости ~ 0.1 нм [6]. Коэффициент отражения зеркала при нормальном падении излучения составлял 43 % на длине волны 46.9 нм (см. разд. 2). С целью минимизации внеосевых aberrаций плоскость зеркала располагалась перпендикулярно падающему пучку. Отраженный пучок фокусировался на ребро тонкой (1.6 мм) металлической пластины, служившей мишенью. При такой схеме облучения мишень перекрывала часть пучка, падающего на зеркало, однако это не вносило существенных изменений, поскольку диаметр пучка составлял около 12 мм и экранировалась лишь небольшая его часть.

Сфокусированный лазерный пучок имел достаточно высокую интенсивность, чтобы вызвать абляцию алюминия, латуни и нержавеющей стали в аксиальной области на расстоянии нескольких сотен микрометров от фокуса. Характеристики кратера на металлической поверхности зависят не только от распределения излучения, но и от длительности импульса, температуры плавления и коэффициента теплопроводности металла [7]. Тем не менее они могут достаточно полно характеризовать дву-

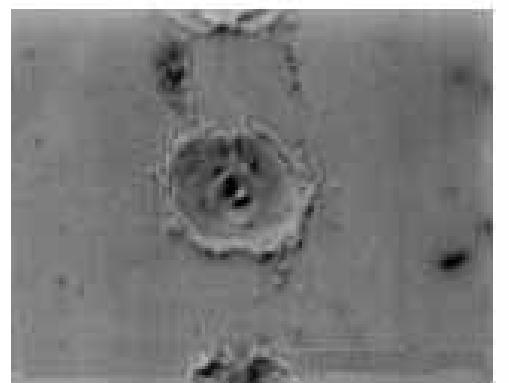
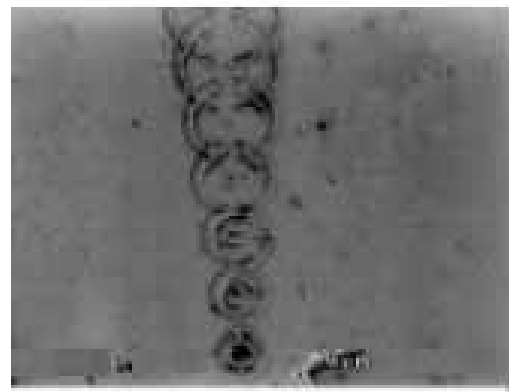


Рис.3. Следы абляции на латунной мишени при ее движении от зеркала к фокусу. Каждый след получен в результате воздействия одного лазерного импульса.

мерное распределение интенсивности в сфокусированном лазерном пучке. Распределение интенсивности вдоль оптической оси определялось путем смещения под углом к оптической оси трансляционной скамьи с мишенью с помощью шагового двигателя, управляемого компьютером.

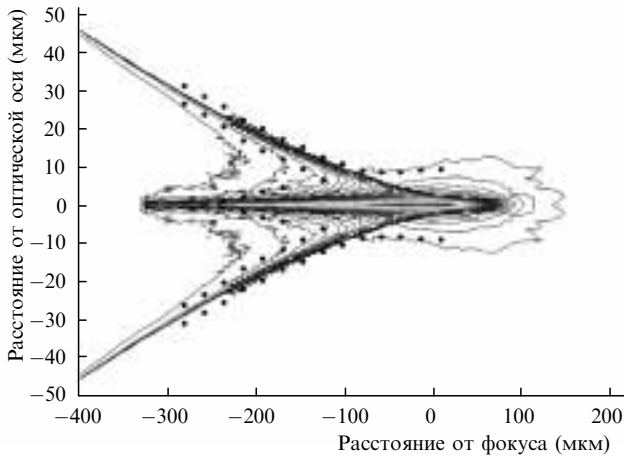


Рис.4. Изолинии распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной области зеркала, полученные методом построения хода лучей. Точками обозначены границы области абляции, определенные экспериментально.

Были получены серии следов воздействия лазерного пучка на поверхность для различных положений мишени на оптической оси пучка. Каждая серия реализовывалась при непрерывном движении трансляционной скамьи и периодическом следовании лазерных импульсов с частотой 1 Гц. На рис.2 (вверху) приведена фотография следов абляции на поверхности латунной мишени, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Она охватывает область сходимости лазерного пучка, начиная с расстояний ~ 450 мкм от фокуса.

На рис.2 видно увеличение абляции вещества при смещении мишени от зеркала к фокусу. Расстояние вдоль оптической оси между двумя смежными пятнами составило 22.2 мкм. Отметим, что это расстояние гораздо меньше смещения, возникающего вследствие движения образца перпендикулярно оптической оси. Каждый след представляет собой результат воздействия одного лазерного импульса. На рис.2 (внизу) показана последовательность следов абляции на поверхности образца из нержавеющей стали.

На рис.3 представлена фотография поверхности латунной мишени под большим увеличением. На расстояниях нескольких сотен микрометров от фокуса следы абляции на поверхности имеют форму узких колец с круговой симметрией, нарушенной вблизи области, в которой падающий на зеркало пучок экранировался мишенью. С приближением к фокальной области размер абляционных колец возрастает и появляется центральное пятно. Глубина абляционных колец, измеренная с помощью профилометра фирмы ZYGO, составила около 2 мкм. Наконец, вблизи фокуса след абляции вырождается в характерный лазерный кратер. Наружный диаметр наименьшего пятна составлял приблизительно 17 мкм, диаметр углубления в нем равен $\sim 2-3$ мкм. Не показанные на рис.3 следы абляции в области, расположенной за фокусом, быстро становятся диффузными и трудноразличимыми.

Для получения количественных характеристик распределения излучения в фокальной области использовался компьютерный метод построения хода лучей. В качестве источника излучения рассматривался расположенный на расстоянии 263 см от зеркала точечный источник с угловым распределением, подобранным так, чтобы опи-

сать известное из эксперимента [4] распределение лазерного излучения как в ближней, так и в дальней зонах. Отметим, что расчеты с использованием модели источника конечных размеров (300 мкм) дали тот же результат. Для моделирования распространения пучка прослеживались траектории 13000 лучей. На рис.4 показано радиальное распределение интенсивности излучения в фокальной области, полученное таким образом; черными точками отмечены границы области абляции, определенные в эксперименте.

Как видно из рис.4, все наиболее существенные детали профиля следов абляции хорошо описываются лучевым методом. Вычисления показывают, что в фокальной области в несколько сотен микрометров высокая концентрация лучей определяет тонкие кольцевые области, в которых сосредоточена основная часть энергии пучка. С приближением к фокусу в распределении энергии начинает доминировать центральный пик, что также находится в полном соответствии с экспериментом. Подобная картина распределения излучения характерна для сферических aberrаций. Отметим, что наблюдаемая структура пучка в фокальной области не обязательно является следствием кольцевой формы исходного пучка. Когда наиболее удаленные лучи начинают сходить к оптической оси, в распределении излучения преобладает острый центральный пик, соответствующий углублению, видимому на фотографиях. Средняя интенсивность излучения внутри этой области диаметром 2 мкм, рассчитанная по доле пересекающих ее лучей, оценивается как 10^{11} Вт/см². Оценки показывают, что минимальный размер фокального пятна, полученного в эксперименте, определяется сферическими aberrациями фокусирующего зеркала [8].

Экспериментальная установка для исследования абляции при многократном облучении мишени показана на рис.5. Сначала лазерный пучок отражается от плоского многослойного Si/Sc-зеркала, которое имеет в центре отверстие диаметром 3 мм. Через это отверстие излучение затем фокусируется на мишень с помощью многослойного сферического Si/Sc-зеркала с радиусом кривизны $R = 20$ см. Несмотря на то что коэффициент отражения плоского зеркала составляет $\sim 40\%$ и вносит в пучок дополнительные потери, интенсивность на мишени оказывается выше порога абляции внутри пятна размером несколько сотен микрометров. Многократное облучение

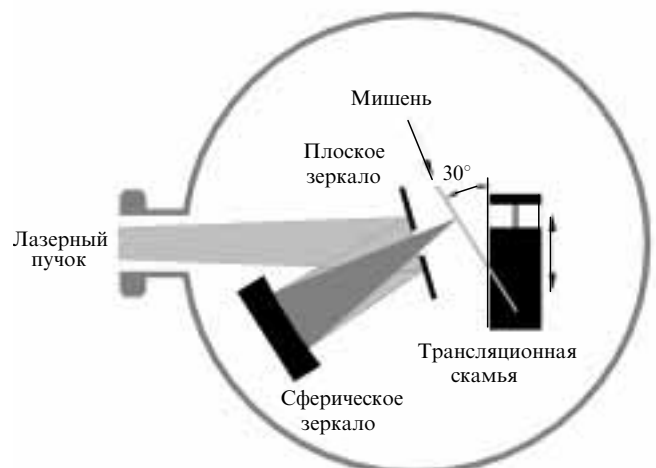


Рис.5. Схема экспериментальной установки для исследования абляции, возникающей при многократном воздействии лазерных импульсов на мишень.

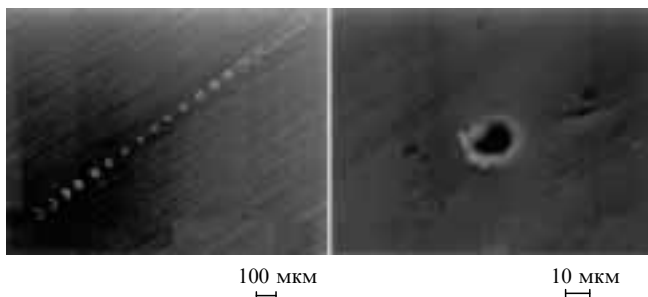


Рис.6. Следы абляции на алюминиевой мишени (слева) при ее движении от зеркала к фокусу. Отверстие (справа) получено при воздействии 40 лазерных импульсов вблизи фокуса.

мишени приводит в результате абляции к образованию глубоких кратеров. В левой части рис.6 показана последовательность лазерных кратеров на алюминиевой мишени, полученных при экспонировании 40 импульсами при каждом положении мишени. На рис.6 (справа) приведено изображение отверстия диаметром около 10 мкм, полученного вблизи фокуса.

2. Рефлектометрия МРИ

Экспериментальная установка для измерения коэффициентов отражения материалов показана на рис.7. Источником излучения служил лазер на капиллярном раз-

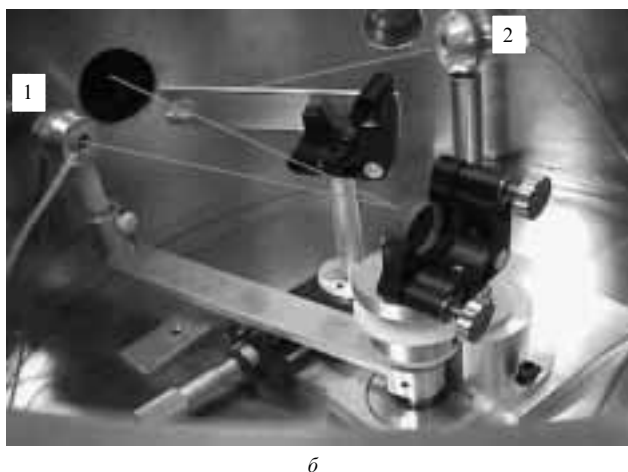
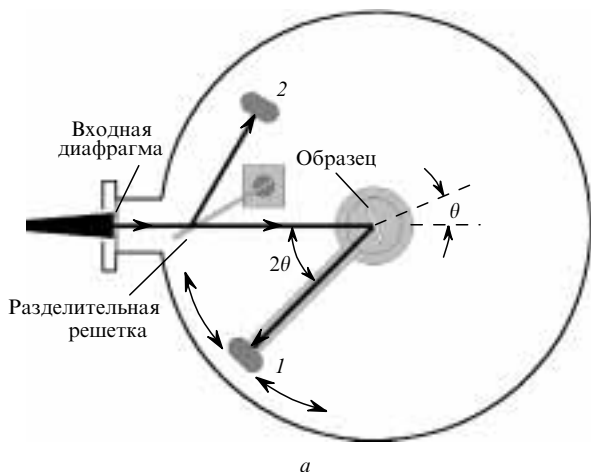


Рис.7. Схема (а) и фотография (б) установки для лазерной рефлектометрии на основе компактного частотного рентгеновского лазера; 1, 2 – вакуумные фотодиоды..

ряде, генерирующий на длине волны 46.9 нм. Эксперимент проводился в вакуумной камере, на расстоянии 150 см от выходной апертуры капилляра. Образцы устанавливались на оси скамьи, поворачивающейся с помощью шагового двигателя, угол поворота менялся от нуля до 90°. Интенсивность отраженного пучка регистрировалась с помощью вакуумного фотодиода 1, размещавшегося на подвижной штанге, которая следовала за угловым движением отраженного пучка. Для ограничения размера лазерного пучка, падающего на образец, на входе камеры помещалась диафрагма диаметром 1 мм, что является важным при малых углах скольжения.

Для проведения абсолютных рефлектометрических измерений интенсивность отраженного пучка в каждой вспышке нормировалась на интенсивность падающего. С этой целью с помощью разделительной решетки, выполненной в виде позолоченной сетки с коэффициентом пропускания 50 %, образовывался реперный пучок. Коэффициент пропускания сетки был измерен с погрешностью менее 0.5 %. Интенсивность реперного пучка измерялась вакуумным фотодиодом 2. Угловая зависимость коэффициента отражения определялась сканированием углов падения при непрерывном следовании лазерных импульсов с частотой повторения 1 Гц. Сигналы с фотодиодов для каждого лазерного импульса записывались и запоминались цифровым осциллографом (Hewlett-Packard, модель 54825A).

На рис. 8 приведен пример измеренной зависимости коэффициента отражения от угла падения для полированного кристаллического кремния. Перед помещением в вакуумную камеру образец обрабатывался в течение 5 мин в 5%-ном водном растворе HF и затем промывался в ацетоне и метаноле. Кривая получена за 300 лазерных импульсов, что типично для проведенных экспериментов. При углах падения, близких к нормальным, фотодиод экранирует образец от падающего пучка, что приводит к ограничению минимального измеренного угла на уровне 1.6°. Этот угол соответствует первой экспериментальной точке вблизи нормали и определяется геометрией установки; все дальнейшие угловые отсчеты берутся относительно него. В другом предельном случае, когда углы падения приближаются к 90°, проекция падающего на образец пучка становится больше его размеров, что ограничивает максимальный угол, при котором могут быть получены экспериментальные данные. Диаметр падающего пучка в 1 мм приводит к ограничению максимального угла падения на уровне 85.5°.

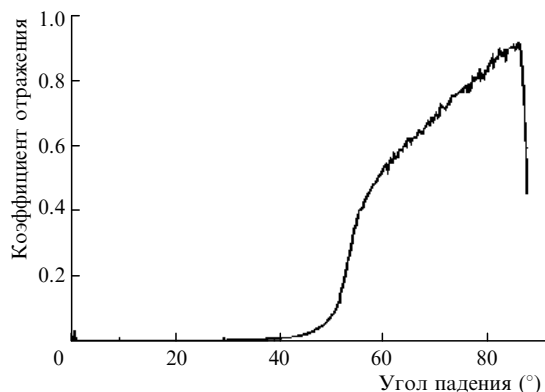


Рис.8. Зависимость коэффициента отражения кристаллического Si от угла падения излучения.

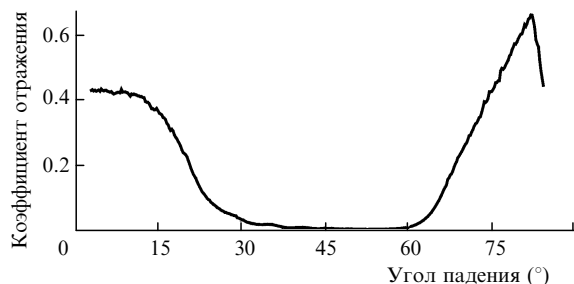


Рис.9. Зависимость коэффициента отражения многослойного Si/Sc-зеркала от угла падения излучения с длиной волны $\lambda = 46.9$ нм.

На этой же установке была определена угловая зависимость коэффициента отражения многослойного Si/Sc-зеркала на длине волны $\lambda = 46.9$ нм. Многослойное покрытие с периодом 18–27 нм и отношением толщин слоев $H(\text{Sc})/H(\text{Si}) = 0.786$ напылялось на боросиликатную подложку методом магнетронного распыления. Параметры такого зеркала ранее подробно обсуждались в работе [6]. На рис.9 приведена угловая зависимость коэффициента отражения для зеркала, которое было спроектировано и изготовлено на рабочую длину волны $\lambda = 46.9$ нм при нормальном падении. График построен усреднением по 4 сериям измерений. Эти серии различались числом отсчетов, которое изменялось от 200 до 400 при сканировании угла в пределах $0-90^\circ$. Каждая серия измерений давала близкие результаты, и усреднение осуществлялось лишь для уменьшения случайных шумов. Отметим, что при угле падения 1.6° коэффициент отражения составил 43%. «Завал» на графике коэффициента отражения при углах свыше 80° связан с тем, что проекция пучка на зеркало становится больше размеров последнего. Следует подчеркнуть, что использование импульсно-периодического лазера в рефлектометрических экспериментах существенно упрощает методику и во много раз сокращает время проведения измерений.

Заключение

Итак, впервые выполнены эксперименты по абляции различных материалов сфокусированным лазерным МРИ. Для фокусировки излучения лазера использовалось сферическое многослойное зеркало. При энергии импульса 0.13 мДж интенсивность излучения в пятне фокусировки ограничена, главным образом, сферическими aberrациями и составляет 10^{11} Вт/см². Благодаря высокой частоте повторения лазерных импульсов значительно упрощена методика рефлектометрических экспе-

риментов в диапазоне МРИ. Проведены измерения зависимости коэффициента отражения многослойного Si/Sc-зеркала от угла падения излучения.

Авторы выражают благодарность Ю.А.Успенскому и Ю.П.Першину за полезные обсуждения. Работа была поддержана Национальным научным фондом (NSF, грант DMR-9512282). Мы также благодарны за поддержку Гражданскому научно-исследовательскому фонду США (CRDF, грант RP1-240), позволившую создать в интернациональном сотрудничестве многослойную оптику для наших экспериментов. Участники работы со стороны Университета штата Колорадо выражают благодарность Институту современных технологий того же штата.

1. Benware B.R., Macchietto C.D., Moreno C.H., Rocca J.J. *Phys.Rev. Letts*, **81**, 5804 (1998).
2. Ohchi T., Yamaguchi N., Fujikawa C., Hara T. *Proc.VI Int. Conf.X-ray Lasers* (Bristol, Philidelphia, Institute of Physics publishing, 1998, p. 683).
3. Zeitoun Ph., Sebban S., Murai K., Tang H. et.al. *Proc.IV Int. Conf.X-ray Lasers* (Bristol, Philidelphia, Institute of Physics publishing, 1998, p. 677-680).
4. Moreno C.H., Marconi M.C., Shlyaptsev V.N., Benware B.R., Macchietto C.D., Chilla J.L.A., Rocca J.J., Osterheld A.L. *Phys. Rev.A*, **58**, 1509 (1998).
5. Chilla J.L.A., Rocca J.J. *J.Opt.Soc.Amer.B*, **13**, 2841 (1996).
6. Uspenskii Yu.A., Levashov V.E., Vinogradov A.V., Fedorenko A.I., Kondratenko V.V., Pershin Yu.P., Zubarev E.N., Fedotov V.Yu. *Optics Letts*, **23**, 771 (1998).
7. Miller J.C., Haglund R.F. *Laser ablation and desorption* (San Diego, Academic Press, 1998).
8. Marconi M.C., Chilla J.L.A., Moreno C.H., Benware B.R., Rocca J.J. *Phys.Rev.Letts*, **79**, 2799 (1997).

I.A.Artyukov, B.R.Benware, A.V.Vinogradov, Yu.S.Kas'yanov, V.V.Kondratenko, K.D.Macchetto, A.Ozols, J.J.Rocca, J.L.A.Chilla. Focusing of the beam of a compact, repetitively pulsed x-ray laser for studying the interaction of radiation with metallic targets and x-ray reflectometry.

The interaction of focused soft x-ray laser radiation with metallic targets was studied experimentally. The radiation of a capillary-discharge Ne-like Ar ion laser ($\lambda = 46.9$ nm) with a repetition rate of 1 Hz was focused on the surface of metallic samples using a spherical Si/Sc multilayer mirror. The radiation intensity at the target surface was far greater than the threshold for laser ablation of the materials in use – aluminium, brass, and stainless steel. A study of the shape of laser craters in relation to the position of the caustic of the focusing mirror, combined with computer ray-trace simulations, made it possible to determine the radiation intensity distribution in the focal region of the mirror. The radiation energy density in the 2- μm central domain of the focal spot was 10^2 J/cm², while the corresponding intensity was 10^{11} W/cm². The reflectivity of a Si/Sc multilayer mirror was measured as a function of the angle of radiation incidence.