

Исследование структуры и параметров луча KrF-эксимерного лазера

© Ю.М. Задиранов,¹ С.Г. Калмыков,¹ М.Э. Сасин,¹ П.Ю. Сердобинцев²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sergei.kalmykov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 22 декабря 2011 г.)

Распределение энергии по сечению луча ультрафиолетового KrF-эксимерного лазера с конфокальным неустойчивым резонатором измерено по люминесценции ультрафиолетового излучения на стекле. Обнаружена сложная тонкая структура луча. Двумя разными методами — по почернению термобумаги и по абляционным кратерам на поверхности стекла — выполнены измерения вблизи фокуса; показано, что упомянутая сложная структура сохраняется также и в районе перетяжки каустической поверхности. Оценки размеров поперечного сечения в этом месте заметно зависят от примененных методов измерения значения угла расходимости исходного луча, определенные разными способами, варьируют от 0.3 до 0.6–1.3 mrad. При фокусировке с помощью специально сконструированного безаберрационного объектива удается получить фокальное пятно с линейными размерами в несколько десятков микрон.

Введение

Скорость процессов ионизации и нагрева лазерной плазмы сильнейшим образом зависит от интенсивности излучения (т.е. мощности, отнесенной к площади поперечного сечения) в фокусе лазерного луча. Поэтому измерения геометрии фокального пятна и структуры распределения энергии в нем играют важную роль для предпринятых недавно в ФТИ экспериментов по программе оптимизации лазерно-плазменного источника коротковолнового излучения [1]. В силу некоторых соображений, рассматриваемых в работе [2], было предложено инициировать плазму на газовой мишени с помощью ультрафиолетового (УФ) эксимерного лазера с неустойчивым конфокальным резонатором, примененным в нем для уменьшения расходимости. Заранее ясно, что структура луча в таком лазере не является простой, и этим в основном объясняется первичная мотивация для выполнения настоящего исследования. Отметим, что в научной литературе редко встречаются работы, где описываются измерения структуры и качества луча УФ-лазеров; авторам настоящей работы известна лишь одна такая публикация [3].

В настоящей работе сначала исследуется структура поперечного сечения нефокусированного луча. Затем с помощью длиннофокусной линзы измеряется минимальный диаметр каустической поверхности, что дает возможность определить параметр качества луча, M^2 , подсчитать расходимость исходного, нефокусированного луча и сделать прогноз для размеров фокального пятна в опытах с лазерной плазмой, когда применяется специально для этих опытов изготовленный короткофокусный объектив. Наконец, проводятся микроскопические исследования отпечатков лазерного луча, полученных в непосредственной близости к фокусу вышеупомянутого короткофокусного объектива. В каждом из трех измерений использовались различные методы визуализации

луча, которые описываются в работе. Измерения выполнялись на установке, схема которой приведена на рис. 1.

1. KrF-эксимерный лазер

В работе использовался изготовленный в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова для вспомогательных целей и впоследствии переданный в ФТИ ArF/KrF-эксимерный лазер. В первоначальных опытах в нем был установлен устойчивый плоскопараллельный резонатор с полупрозрачным выходным зеркалом, с помощью которого удавалось получить расходимость луча около 3–5 mrad. Впоследствии этот резонатор был заменен конфокальным неустойчивым, состоящим из двух зеркал со 100%-ным отражением — вогнутого заднего зеркала и выпуклого зеркала малого диаметра в центре плоскопараллельного прозрачного выходного окна

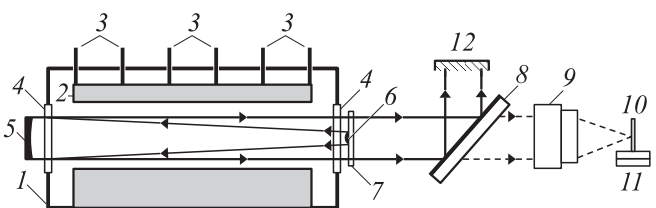


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции лазера и экспериментальной установки. 1 — разрядная камера лазера, 2 — высоковольтный электрод, 3 — высоковольтные герметизированные подводы тока, 4 — окна разрядной камеры, 5 — заднее вогнутое зеркало резонатора со 100%-ным отражением, 6 — переднее выпуклое зеркало резонатора со 100%-ным отражением, 7 — прозрачное плоскопараллельное выходное окно резонатора, 8 — поворотное интерференционное зеркало, используемое в качестве ослабителя луча, 9 — объектив или линза, 10 — стеклянная пластинка или термобумага, 11 — двухкоординатный позиционер, 12 — поглотитель выведенной из луча энергии.

(рис. 1). Замена резонатора привела к существенному уменьшению расходимости луча, но сопровождалась 15–20%-ной потерей выходной энергии. Однако за счет более точной юстировки высоковольтного электрода в разрядной камере, небольших вариаций состава рабочей смеси ($F_2 + He, Kr, Ne$) и длительной разрядной тренировки (пассивации) стенок разрядной камеры энергию удалось увеличить и одновременно повысить стабильность работы лазера. Разброс энергий от импульса к импульсу варьировал по мере „старения“ газовой смеси в лазере от единиц процентов до примерно 15%. В описываемых опытах (с KrF-газовой смесью) выходная энергия $E_{las} \approx 250–450$ мДж, длина волны $\lambda = 248$ нм, длительность импульса $\tau_{las} \approx 30–40$ нс (по основанию).

2. Распределение энергии в сечении нефокусированного лазерного луча

В этих измерениях использовалась визуализация лазерного излучения на плоскопараллельной пластине обыкновенного лабораторного химического стекла толщиной 1–1.5 мм. УФ-излучение лазера вызывает люминесценцию стекла, и на нем возникает в видимом, голубовато-синем диапазоне изображение поперечного сечения луча (пример такого изображения показан на рис. 2), которое фиксировалось цифровой фотокамерой Canon EOS 400D с 10-мегапиксельной матрицей памяти.

Из рис. 2 видно, что сечение луча имеет приблизительно прямоугольную форму со сторонами $v \approx 22$ мм по вертикали и $h = 9$ мм по горизонтали. Отчетливо наблюдаются особенности распределения интенсивности излучения. В первую очередь обращает на себя внимание центральное темное пятно — результат затенения

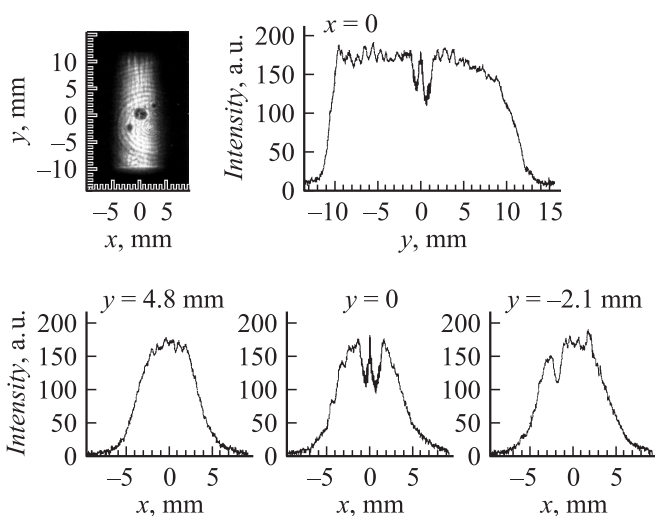


Рис. 2. На фотографии представлена визуализация поперечного сечения нефокусированного луча с помощью люминесценции на стекле. Графики изображают распределение интенсивности свечения на этой фотографии вдоль нескольких прямых, параллельных ее осям.

луча выпуклым зеркалом резонатора на выходном окне. Также видны вторичные пятна, вызванные паразитными отражениями от различных поверхностей оптического тракта (например, от поверхностей окон разрядной камеры). В зависимости от количества элементов тракта и их взаимной юстировки, что неоднократно подвергалось изменениям в ходе экспериментов, взаимное расположение пятен могло изменяться, в некоторых случаях внутри центрального пятна наблюдалась яркая точка. Другой характерной особенностью, видимой на рис. 2, *a*, являются интерференционные кольца, вызываемые либо дифракцией на апертурах, либо отражениями от близко расположенных параллельных поверхностей.

Чувствительности как фотокамеры, рассматриваемой в качестве измерительно-регистрирующего прибора, так и стекла — переизлучателя первичного УФ-излучения в видимый диапазон — могут быть нелинейными функциями от интенсивности падающего излучения. Поэтому для получения объективных данных из сохранных на ПЗС-матрице фотокамеры изображений для всей системы переизлучатель-фотокамера в целом были выполнены калибровочные измерения, в которых энергия лазерного импульса определялась с помощью пироэлектрического датчика фирмы Gentec, Канада.

Примеры полученных распределений интенсивности излучения лазера вдоль различных прямых, параллельных вертикальной и горизонтальной осям фотографии, также показаны на рис. 2. На них отчетливо видны вышеупомянутые особенности. Соответствующая им глубина модуляции яркости велика лишь для пятен затенения, где она приближается к 50% в центральном пятне, прочие особенности приводят к модуляции порядка 10% и меньше.

3. Измерение фокального пятна длиннофокусной линзы

В этих опытах лазерный луч фокусировался с помощью линзы с большим фокусным расстоянием $F_1 = 950$ мм, и его сечение в области вблизи фокуса визуализировалось с помощью бумаги с термочувствительным слоем. Поскольку размеры фокального пятна пропорциональны фокусному расстоянию линзы, в этом эксперименте их легко можно измерить на бумаге, не применяя трудоемких микроскопических методов. Однако во избежание разрушения термочувствительного слоя при получении изображений вблизи фокуса этот простой метод требует разработки способа многократного, более чем на 2 порядка, ослабления энергии лазерного импульса (естественный для эксимерных лазеров способ понижения напряжения на разрядной камере позволяет уменьшить энергию в луче не более чем в 2 раза). Для решения этой задачи на пути луча перед линзой устанавливалось интерференционное зеркало (рис. 1), которое имеет почти 100%-ное отражение излучения с $\lambda = 248$ нм при угле падения 45° . В определенном диапазоне углов оно пропускает некоторую малую долю

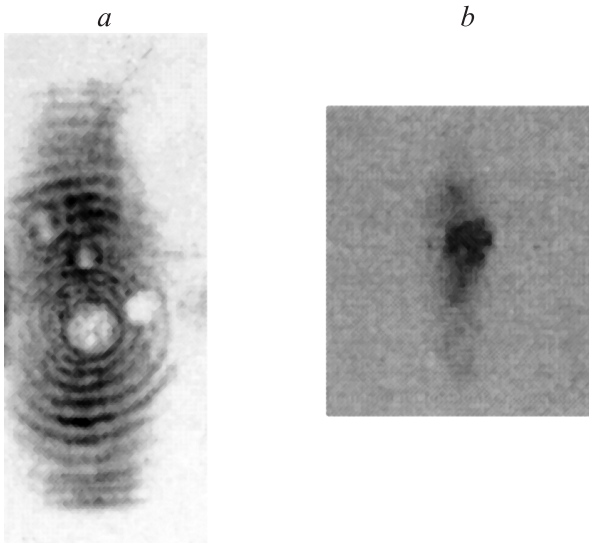


Рис. 3. *a* — визуализация поперечного сечения несфокусированного луча на термобумаге, *b* — отпечаток на термобумаге поперечного сечения луча вблизи фокуса линзы с фокусным расстоянием $F_1 = 950$ mm.

энергии, по порядку величины меньшую 1%, которую легко можно регулировать изменением угла поворота зеркала. Эта прошедшая сквозь зеркало часть луча использовалась для получения изображения.

Изображение сечения несфокусированного луча на термобумаге показано на рис. 3, *a*. Так же как и на рис. 2, *a*, в центре хорошо видны область затенения луча зеркалом резонатора на выходном окне, ее паразитные отражения, система интерференционных колец. На рис. 3, *b* представлено изображение сечения сфокусированного луча в районе фокуса при сильном — на пределе регистрации бумагой — ослаблении луча (до 2.3 мДж за импульс). Оно представляет собой плотное темное практически круглое пятно, окруженное еле заметным, сильно вытянутым по вертикали ореолом. В отличие от рис. 3, *a* на этом изображении практически невозможно увидеть какой-либо выраженной тонкой структуры. Причиной этого, вероятно, является диффузия тепла по термочувствительному слою бумаги.

Диаметр сечения луча в фокусе, т.е. диаметр так называемой „перетяжки“ каустической поверхности, составляет $d_{\min} \approx 0.27-0.29$ mm.

4. Параметры качества луча

Полученные данные позволяют рассчитать характеризующие лазерный луч константы, с помощью которых можно определить, насколько остро он может быть сфокусирован, — произведение параметров луча, ВРР (beam parameter product), и параметр качества луча, M^2 (см., например, [4]).

$\text{ВРР} = d_{\min} \cdot \theta$, где d_{\min} — диаметр луча в перетяжке, θ — полный угол расходимости луча от перетяжки.

Для идеального гауссовского пучка величина ВРР имеет наименьшее значение, так называемый дифракционный предел — $\text{ВРР}_{\lim} = 4\lambda/\pi$. Поскольку угол расходимости луча от перетяжки (или сходимости к ней) в дальней полевой зоне определяется размерами сечения падающего на линзу луча (или апертурой самой линзы) и фокусным расстоянием, то в описываемых измерениях, при вертикальном угле — $\theta_{v1} = v/F_1 = 0.023$ rad и горизонтальном — $\theta_{h1} = h/F_1 = 0.0095$ rad, по вертикали сечения $\text{ВРР}_v \approx 0.0065$ mm · rad, а по горизонтали $\text{ВРР}_h \approx 0.0027$ mm · rad.

Безразмерный параметр качества луча M^2 показывает, во сколько раз ВРР луча превышает дифракционный предел: $M^2 = \pi \cdot \text{ВРР}/4\lambda = \pi \cdot d_{\min} \cdot \theta/4\lambda$. Для описываемых измерений $M_v^2 = 20.6$, $M_h^2 = 8.6$.

Наконец, полученные результаты позволяют определить угловую расходимость исходного, несфокусированного пучка с размерами сечения $v \times h = 22 \times 9$ mm²: $\theta_{v0} = 4\lambda M_v^2/\pi v = 0.3$ mrad и $\theta_{h0} = 4\lambda M_h^2/\pi h = 0.3$ mrad — расходимость луча в обоих перпендикулярных оси распространения направлениях оказывается одинаковой.

5. Исследование луча вблизи фокуса короткофокусного объектива

Для достижения как можно более высокой концентрации энергии в опытах с лазерной плазмой, возбуждаемой излучением вышеописанного эксимерного лазера, по заказу ФТИ в Институте лазерной физики (НИИЛФ, СПб.) был спроектирован и изготовлен безаберрационный объектив, оптимизированный под длину волны $\lambda = 248$ nm. Объектив состоит из трех линз и плоскопараллельного выходного защитного стекла и имеет эффективный задний фокальный отрезок $F_2 = 60$ mm (51 mm, если измерять его от наружной поверхности защитного стекла). В соответствии с данными о качестве луча лазера, полученными в предыдущем разделе, в опытах с этим объективом можно было надеяться получить фокальное пятно диаметром около 20 μm. Задача исследований настоящего раздела состояла в экспериментальном определении размеров фокального пятна короткофокусного объектива.

Сначала была проведена серия измерений с визуализацией луча, как и в предыдущем разделе, с помощью термобумаги. Результаты представлены на рис. 4. При этих измерениях использовалась более высокая энергия лазерного импульса, чем в опытах, описанных в разд. 3. Это обстоятельство позволило различить на отпечатках вблизи фокуса (рис. 4, *a*) две пространственные моды лазера: плотное, темное пятно в центральной части, почти круглое вблизи фокуса и вытянутое по вертикали эллиптическое вдали от него — это основная мода TEM_{00} и окружающий ее разреженный ореол, состоящий из четырех симметричных лепестков, — это мода TEM_{11} . Характерно, что положение фокуса для двух мод различно: мода TEM_{00} фокусируется вблизи

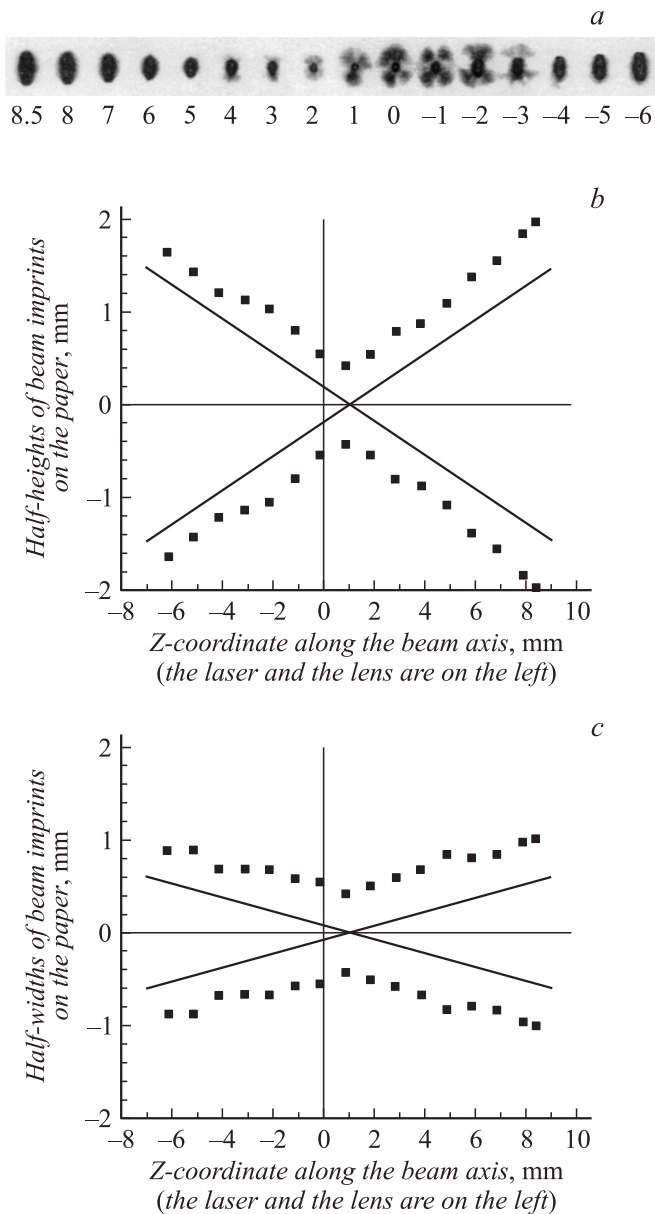


Рис. 4. *a* — отпечатки на термобумаге поперечного сечения луча вблизи фокуса объектива ЭКСИМ-1; числа внизу — координата Z вдоль луча в мм, отрицательные значения Z — ближе к объективу, положительные — дальше от него. *b* и *c* — размеры поперечного сечения луча по двум осям в функции от координаты Z вдоль луча. По оси ординат в обе стороны от 0-го значения отложены: на рис. *b* — половина высоты отпечатка, на рис. *c* — половина ширины. Прямыми линиями показаны геометрические углы сходимости/расходимости луча для точечного фокуса.

координаты вдоль оси распространения $Z = 1$ мм, а мода TEM_{11} — вблизи $Z = -1$ мм, т.е. в пространстве между фокусом и линзой. Это означает, во-первых, что та область вдоль луча, где проводятся измерения, не является, строго говоря, дальнейшей полевой зоной, а во-вторых, что мода TEM_{11} формируется в отличие от почти параллельного, слабо расходящегося пучка

основной моды сходящимися за выходным окном лазера лучами с малым числом проходов в активной среде.

Описанная выше тонкая структура — интерференционные кольца и пятна затенения — в отпечатках, показанных на рис. 4, *a*, не прослеживается. На них внутренняя часть сечения пучка имеет против ожидания более светлый цвет, который при самой острой фокусировке становится полностью белым; по-видимому, это — область разрушения термочувствительного слоя вплоть до его полного удаления с поверхности бумажной основы.

Представленные на рис. 4, *b* результаты измерения размеров сечения луча (моды TEM_{00}) показывают, что значения углов сходимости луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях весьма близки к тем, которые определяются геометрией эксперимента ($\theta_{v2} = v/F_2 = 0.37$ rad по вертикали и $\theta_{h2} = h/F_2 = 0.15$ rad по горизонтали), т.е. размерами входной апертуры пучка и фокусным расстоянием объектива. Однако наименьший размер темного пятна оказывается лишь чуть меньше 1 мм, а измеряемые по отпечаткам границы пучка не сходятся асимптотически к границам „геометрических“ углов θ_{v2} и θ_{h2} с вершиной в точке фокуса, внутри которых луч должен распространяться вдали от перетяжки, а параллельны им на всем протяжении луча, где выполнялись измерения. Наиболее правдоподобным объяснением, по-видимому, является диффузия тепла по термослою в сочетании с избыточно высокой плотностью энергии в луче. Диффузионное уширение отпечатков, Δ_{dif} , не зависит от геометрии луча и плотности энергии внутри него, а лишь от коэффициента диффузии тепла, D_{heat} , и длительности теплового воздействия, τ_{las} , $-\Delta_{dif} \approx \sqrt{(D_{heat} \tau_{las})}$. Очевидно, именно поэтому на всем наблюдаемом протяжении

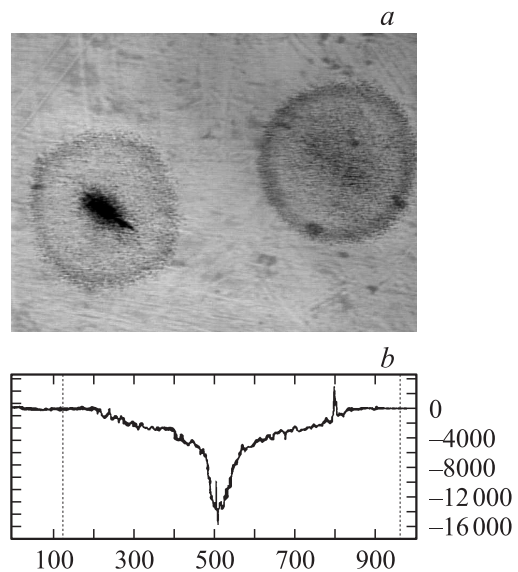


Рис. 5. Отпечаток сечения луча эксимерного лазера с устойчивым плоскопараллельным резонатором, полученный на поверхности стеклянной пластины вблизи фокуса в вакууме. *a* — микрофотография. *b* — микропрофилограмма, числа вдоль оси абсцисс на ней в μm , вдоль оси ординат в Å .

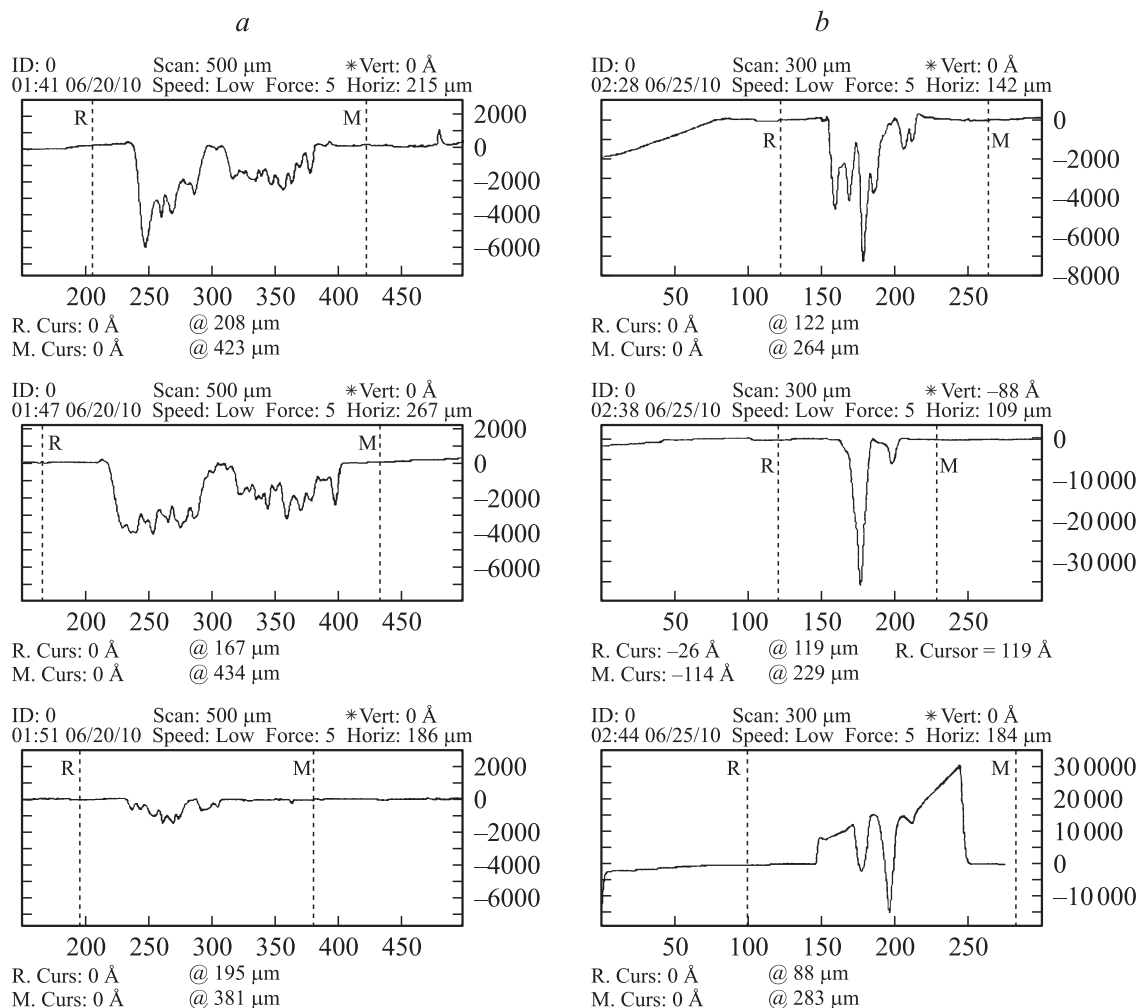


Рис. 6. Микропрофилограммы абляционных кратеров, остающихся на поверхности стеклянного образца при взаимодействии с лучом эксимерного лазера с неустойчивым конфокальным резонатором на разных расстояниях от точки геометрического фокуса. Во всех случаях энергия лазерного импульса, попадающая после его ослабления на поверхность стеклянного образца, около 2 мДж. На профилограммах поперечные размеры кратеров (ось абсцисс) в μm , глубина (ось ординат) в \AA . *a*, сверху вниз — расстояния по мере удаления от точки фокуса: 550, 650 и 750 μm . Направление сканирования профилометра — вдоль длинной оси сечения луча. *b*, сверху вниз — расстояния по мере приближения к точке фокуса: 250, 100 и $\approx 0 \mu\text{m}$. Направление сканирования профилометра — вдоль короткой оси.

луча измеряемые по отпечаткам размеры его сечения уширены с каждой стороны на практически неизменную величину 0.3–0.5 мм по отношению к сечениям вышеупомянутого „геометрического“ угла распространения.

Очевидно, что термобумага не является достаточно пригодным материалом для визуализации лучистой энергии в широком диапазоне ее плотностей. Привлекательно выглядит механизм лазерной абляции с гладкой твердой поверхности. Материал мишени, отвечающий требованиям этого эксперимента, должен обладать низкой теплопроводностью для предотвращения размытия теплового отпечатка и относительно высокой температурой плавления/испарения для повышения абляционного порога и расширения диапазона, в пределах которого глубина абляционного кратера линейна по отношению к интенсивности излучения. Ну и конечно, такой материал должен хорошо поглощать УФ-лазерное излу-

чение. Всем этим требованиям отвечает обыкновенное известково-натриевое стекло.

Первые опыты с получением отпечатков лазерного луча на поверхности стекла были выполнены несколько лет тому назад,¹ когда в лазере использовался устойчивый резонатор с плоскопараллельными зеркалами. Мишенью служила тонкая (0.1–0.2 мм) пластинка покровного стекла, применяемого в медицине и биологии для микроскопических исследований, которая устанавливалась в вакуумном объеме при разрежении 10^{-4} – 10^{-5} мм Hg. При взаимодействии лазерного импульса с поверхностью стекла возбуждалась плазма, и в результате сопутствующего абляционного процесса на стекле оставался кратер, геометрия которого за-

¹ Авторы выражают благодарность М.Р. Рымалису за участие в тех измерениях.

тем измерялась на микропрофилометре DekTak 3000. Пример результатов тех давних измерений показан на рис. 5. Отчетливо виден отпечаток слабого ореола и относительно глубокого кратера, соответствующего центральной интенсивной области луча.

Эта же методика была применена и в настоящих экспериментах с той разницей, что теперь опыты производились не в вакууме, а при атмосферном давлении — это гораздо проще технически, а с другой стороны, было показано, что вовлечение атмосферного воздуха в образующуюся на поверхности стекла плазму не отражается на конфигурации абляционных кратеров. Образцы микропрофилограмм кратеров показаны на рис. 6, *a, b*.

Первое, что бросается в глаза на рисунках, — та тонкая структура поперечного сечения луча, которая обсуждалась в разд. 2 и которая хорошо видна на изображениях сечения несфокусированного луча (рис. 2, *a* и 3, *a*), также хорошо с высоким пространственным разрешением видна на профилях абляционных кратеров как угодно близко к фокусу. Это обстоятельство демонстрирует, во-первых, высокое качество объектива, во-вторых, высокую степень линейности абляционного процесса по отношению к интенсивности излучения и, наконец, правильный выбор материала облучаемых образцов — из-за низкой теплопроводности стекла диффузия тепла не приводит к размытию тонкой структуры профилограмм. Видно также, что абляционные кратеры вблизи фокуса имеют примерно то же аспектное отношение высоты к ширине, что и сечение несфокусированного луча.

Полученные результаты указывают на существование двух критических значений интенсивности луча. Первое — это порог абляционного процесса, значение которого близко к 15 J/cm^2 (усредненная плотность энергии для среднего из рисунков 6, *a*); когда плотность энергии падает ниже этой величины, абляция становится ненаблюдаемой на большей части изображения на стекле, неглубокие следы видны лишь в точках с наибольшей локальной плотностью энергии (нижний из рисунков 6, *a*). При приближении стеклянного образца к фокусу средняя плотность энергии в сечении луча растет и глубина кратера увеличивается, достигая при наивысших значениях плотности энергии не менее $4 \mu\text{m}$. Вблизи фокуса можно наблюдать второе критическое значение — когда плотность энергии в луче превосходит примерно 400 J/cm^2 (например, на среднем из рисунков 6, *b* усредненная плотность энергии — 300 J/cm^2), усиливая, возникающие при абляционном взрыве, превышают предел прочности стекла, и оно растрескивается, при этом крупные обломки стекла выталкиваются вверх произошедшим в глубине взрывом (нижний из рисунков 6, *b*). Чтобы это явление не мешало измерениям, энергию пучка приходилось ослаблять так же, как в опытах с термобумагой. Показанные на рис. 6 кратеры были получены при энергиях около 2 mJ .

На рис. 7 представлены определенные по абляционным кратерам размеры поперечного сечения луча в функции от положения стеклянного образца на оси

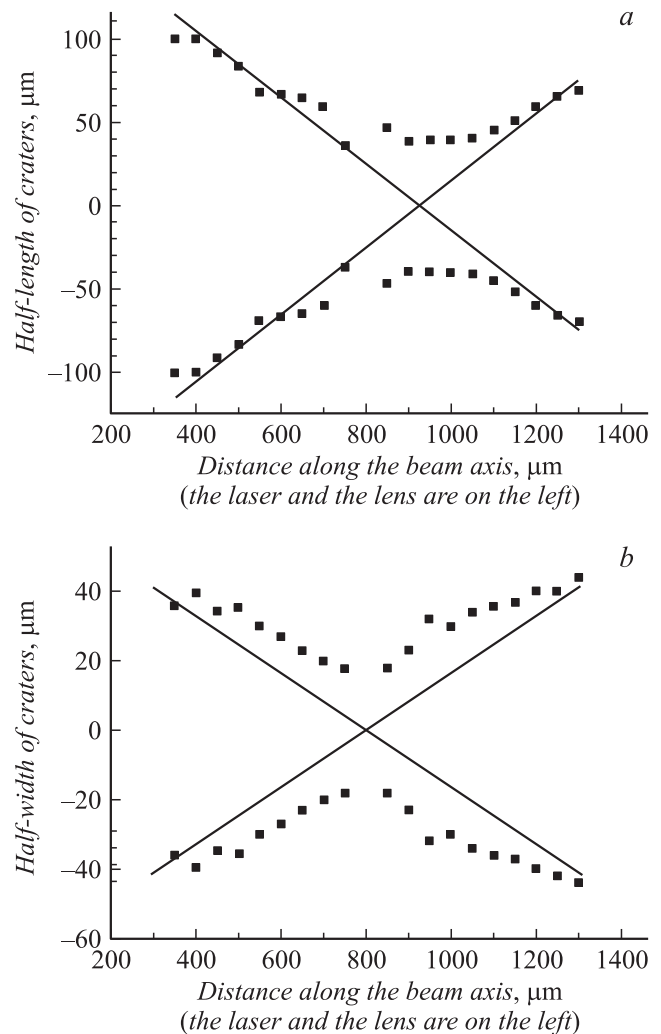


Рис. 7. Размеры абляционных кратеров, измеренные по их краям на поверхности стеклянного образца, в функции от координаты вдоль оси распространения луча. Меньшие значения этой координаты — ближе к объективу, большие — дальше от него. По оси ординат в обе стороны от 0-го значения отложены: на рис. *a* — половина высоты, т.е. размера вдоль длинной (вертикальной) оси отпечатка, на рис. *b* — половина ширины, т.е. размера вдоль короткой оси. Прямыми линиями показаны геометрические углы сходимости/расходимости луча для точечного фокуса.

распространения луча. Размеры кратеров измерялись по их краям на поверхности стекла. Несмотря на разброс точек на рисунках, который объясняется, по-видимому, разбросом энергий от импульса к импульсу, хорошо видно, что по мере удаления от фокуса границы луча закономерно приближаются к границам углов сходимости/расходимости, определяемых входной апертурой пучка и фокусным расстоянием объектива. Однако минимальные размеры фокального пятна, $\approx 75 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$, существенно больше, чем предсказанные на основании измерений и расчетов в разд. 3 и 4. Соответственно большими получаются и параметры ВРР и M^2 , и углы расходимости несфокусированного

луча — $\theta_{v0} = 1.3 \text{ mrad}$ и $\theta_{h0} = 0.6 \text{ mrad}$. Неравенство углов расходимости лазерного луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях приводит к астигматизму при его фокусировке, что заметно при сравнении рис. 7, *a* и 7, *b*, — точка с наименьшим поперечным размером перетяжки в вертикальной плоскости находится примерно на $130 \mu\text{m}$ дальше от объектива, чем в горизонтальной.

Различия в параметрах лазерного луча, полученных с помощью различных измерительных методик, по-видимому, объясняются различной плотностью энергии, попадающей на образец-визуализатор в опытах с термобумагой (разд. 3) и в опытах со стеклом. Можно предположить, что в опытах с абляцией на стеклянной поверхности, когда падающая на нее плотность энергии варьировала в указанных выше пределах от 15 до 400 J/cm^2 , регистрировалась более „далекая“ периферия пятна, чем в измерениях с помощью термобумаги, когда даже в фокальной плоскости (рис. 3, *b*) средняя плотность энергии в пятне была не более 3.5 J/cm^2 . Если же поперечные размеры абляционных кратеров определять не по их краям на стекле, а на глубине около 25% от усредненной глубины кратера, т.е. исключая периферию с меньшей плотностью энергии, то минимальные размеры фокального пятна получаются заметно меньшими: $\approx 35 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, т.е. весьма близкими к тем, которые предсказывались на основании измерений, описанных в разд. 3.

6. Заключение

По-видимому, к основным результатам настоящей работы следует отнести разработанную здесь методику фиксации поперечного сечения луча УФ-лазера в прифокальной области на гладкой стеклянной поверхности. Получающиеся на ней абляционные кратеры с высокой степенью детальности и с высоким разрешением передают все особенности распределения энергии по сечению луча. Измеренные с помощью этой методики размеры сечения перетяжки сфокусированного луча составляют $\approx 75 \mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$.

Свойства материала, на котором производится фиксация структуры сечения луча, его теплопроводность, порог чувствительности и порог нелинейности в заметной степени влияют на величины, вычисляемые на основе измеренной геометрии фокального пятна, в том числе такие важные, как параметр M^2 и угол расходимости. В результате значения этих параметров в некоторой степени перестают быть объективной характеристикой собственно лазера, но также зависят от качества измерений.

Проведенное исследование показало, что установка конфокального неустойчивого резонатора позволила в несколько раз уменьшить угол расходимости — с 3–5 до 0.6–1.3 mrad, но в сечении луча появились резко контрастные детали с существенным перепадом плотности энергии.

Работа была поддержана РФФИ, проект № 10-02-00935-а, и МНТЦ, проект № 3857.

Список литературы

- [1] Калмыков С.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 4. С. 23.
- [2] Калмыков С.Г. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 17. С. 65.
- [3] Осипов В.В. и др. // Квант. электрон. 1999. Т. 28. Вып. 8. С. 157.
- [4] Paschotta R. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. Wiley-VCH, Berlin, 2008. (также см. http://www.rp-photonics.com/beam_quality.html).