

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАСВЕЧЕННОЙ ФОТОБУМАГИ

© 2023 г. Л. М. Лавров^а, Е. В. Поздняков^а,
Е. А. Ульмов^а, В. М. Ямщиков^{а,*}, М. А. Ямщикова^а

^аИнститут лазерно-физических исследований РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров, просп. Мира, 37

*e-mail: feynman94@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.12.2022 г.

После доработки 31.01.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

Предложен метод регистрации пространственного распределения рассеянного из лазерной плазмы излучения в широком угловом диапазоне, вплоть до 4π , с использованием предварительно засвеченной и проявленной фотобумаги. Метод позволяет получить диаграмму направленности рассеянного излучения с достаточно высоким пространственным и угловым разрешением. Выполнив калибровку чувствительности фотобумаги, можно измерить величину энергии рассеянного излучения, ее пространственное распределение и определить интегральную величину потерь энергии на рассеяние в широком спектральном диапазоне от УФ- до ИК-области.

DOI: 10.31857/S0032816223050324, EDN: NGYNBP

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов изучения процессов формирования и динамики лазерной плазмы, а также механизмов поглощения лазерного излучения является исследование рассеяния этого излучения возникающей плазмой [1–3]. С этой целью традиционно [4] используются калориметры, с помощью которых измеряется величина энергии рассеянного излучения в зеркальном направлении, а также рассеяние назад с использованием фокусирующей оптики. Для получения диаграммы направленности рассеянного излучения необходимо разместить внутри камеры взаимодействия достаточно большое количество калориметров в определенном порядке и на нужном расстоянии от мишени. Поскольку калориметры имеют относительно большие размеры и требуют близкого расположения к мишени из-за низкой пороговой чувствительности по энергии [4], затруднительно получить картину рассеяния с достаточно высоким пространственным разрешением.

Для измерения диффузной составляющей рассеяния используются более чувствительные приборы, например матрицы на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) или фотопленки [4, 5]. При этом характер диаграммы направленности

диффузной составляющей обычно описывается законом Ламберта. Для получения пространственной картины рассеяния используются также фотолюминесцентные измерения, которые, как и в случае с калориметрическим методом, также подразумевают размещение фоточувствительных элементов внутри камеры взаимодействия. Фоточувствительные элементы обладают большей чувствительностью по сравнению с калориметрами [6, 7], однако имеют ограниченный спектральный диапазон чувствительности в инфракрасной (ИК) области. При этом фотоприемники требуют защиты от собственного светового излучения плазмы.

Фотографический метод применяется также с размещением объектива внутри или вне камеры взаимодействия с дальнейшей регистрацией рассеянного излучения фоточувствительным элементом. При размещении объектива внутри камеры взаимодействия для получения распределения излучения в широком угловом диапазоне необходимо использовать широкоугольные объективы, которые, как правило, являются короткофокусными, вследствие чего их необходимо располагать ближе к мишени. Использование длиннофокусных объективов позволяет размещать их вне камеры взаимодействия, однако они

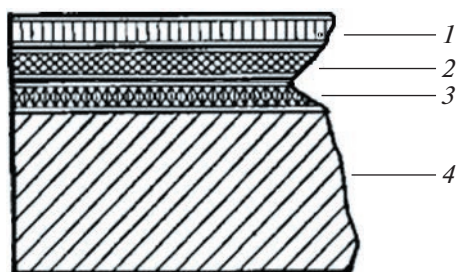


Рис. 1. Структура фотобумаги. 1 — защитный слой, 2 — светочувствительный слой; 3 — баритовый слой; 4 — бумага.

при этом захватывают малый телесный угол в сравнении с широкоугольными объективами.

Основным недостатком рассмотренных методов регистрации рассеянного лазерной плазмой излучения является отсутствие возможности получения картины рассеяния с достаточно высоким пространственным разрешением. Кроме того, использование в эксперименте ограниченного числа фотоприемников не позволяет достоверно определить величину интегральных потерь на рассеяние в 4π .

Авторами статьи предлагается метод диагностики рассеянного излучения, свободный от ряда указанных выше недостатков и позволяющий определять величину энергии рассеянного излучения в различных направлениях с высоким пространственным разрешением. Метод основан на регистрации яркости ожогов, получаемых в результате воздействия рассеянного из плазмы излучения на поверхность предварительно засвеченной и проявленной фотобумаги (ФБ). Метод позволяет получать информацию о диаграмме направленности излучения, а также о величине его энергии в заданном сечении в широком диапазоне углов регистрации (вплоть до 4π) и широком спектральном диапазоне — от УФ- до ИК-области.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Фотобумага представляет собой ряд тонких слоев из различных материалов, нанесенных на бумагу, используемую в качестве подложки. На рис. 1 показано строение ФБ для черно-белой фотографии [5].

Верхний защитный слой ФБ представляет собой пленку из задубленного желатина толщиной 0.5–1 мкм, предохраняющую находящийся под ним эмульсионный слой от механических повреждений. Светочувствительный слой толщиной до 5 мкм — это также пленка желатина, в которой взвешены микрокристаллы галогенидов серебра.

Они являются светочувствительными компонентами фотоматериала. В этот слой вводят и другие вещества, из которых наибольшее значение имеют сенсibilизаторы. Подслой толщиной 20–40 мкм — желатин с дубителем, служащий для механической сцепки эмульсионного слоя с подложкой. Для повышения белизны бумаги в подслей вводят баритовый слой.

В процессе химического проявления засвеченной ФБ серебро восстанавливается из ионов галогенида серебра светочувствительного слоя. При этом проявленная ФБ существенно отличается от непроявленной механизмом взаимодействия с лазерным излучением, поскольку после интенсивного светового воздействия в светочувствительном слое ФБ образуется достаточно плотный слой из частиц серебра толщиной порядка 1 мкм. Такой слой за счет черного цвета практически полностью поглощает падающее излучение в широком спектральном диапазоне, от УФ- до ИК-области. В то же время внешний поверхностный слой желатина достаточно хорошо пропускает излучение в видимой и ближней ИК-областях и в нем происходят объемное поглощение и нагрев вещества.

В области жесткого ультрафиолета с длиной волны менее 0.2 мкм коэффициент поглощения достигает величины, достаточной для того, чтобы все излучение поглотилось в защитном слое ФБ. Таким образом, от длины волны излучения зависит величина поглощения в фотослое. В случае малой величины поглощения излучение может проникать на всю глубину фотослоя вплоть до основы. При этом будет происходить объемный прогрев всей толщи фотоматериала с выделением поглощенного тепла внутри него. При достаточно большом коэффициенте поглощения в желатине большая часть энергии лазерного импульса может поглотиться в защитном слое и даже не дойти до светочувствительного материала. К параметрам регистрируемого излучения относятся: длина волны, длительность импульса, плотность мощности и энергия в импульсе, а также размер облучаемой области. Все перечисленные параметры являются определяющими для характера процессов воздействия исследуемого излучения на ФБ, и их влияние рассматривается более детально.

Длительность импульсов рассеянного излучения, падающего на ФБ, наряду с плотностью энергии, оказывает наиболее сильное влияние на процессы воздействия. При большой длительности падающего излучения нагрев поверхностного слоя сопровождается распространением тепла в толщу мишени, что приводит к снижению предельной температуры нагрева в области поглощения из-

лучения. Скорость распространения тепла в среде определяется температуропроводностью материала χ , так что глубина h прогрева фотослоя определяется выражением: $2(\chi\tau)^{1/2} = 2(\lambda_m\tau/(\rho C_p))$, где τ — длительность излучения; λ_m , ρ , C_p — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и теплоемкость желатина.

При длительности импульсов излучения меньше 1 нс их энергия расходуется на нагрев тонкого слоя поверхности, толщина которого определяется коэффициентом поглощения лазерного излучения в материале фотослоя до температуры его кипения, и на абляцию материала. Глубина прогрева фотослоя для желатина (основные параметры для желатина приведены ниже) равна 37 нм, что указывает на низкие потери энергии за счет теплопроводности. Масса вещества m , которая может быть испарена (без учета абляции) с единицы площади в 1 см² импульсом излучения с энергией $E_{\text{имп}}$, определяется уравнением:

$$m = \frac{E_{\text{имп}}}{C_p (T_{\text{кип}} - T_0) + \lambda_{\text{исп}}},$$

где $\lambda_{\text{исп}}$, Дж/г — удельная теплота испарения.

При небольшой массовой концентрации частиц серебра в используемой ФБ энергия, требуемая для абляции материала, определяется параметрами светочувствительного слоя. При воздействии световым излучением на засвеченную и проявленную ФБ с большей концентрацией серебра необходимо учитывать энергию, идущую на его испарение. Теплопроводность желатина составляет примерно $2 \cdot 10^{-3}$ Дж/(см · с · К), теплоемкость — 0.6 Дж/(г · К), удельная теплота испарения $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2$ — 14 Дж/г, плотность — 0.9 г/см³. Для ФБ толщина испаренного материала составляет примерно 0.5 мкм при плотности энергии излучения 0.1 Дж/см². Для указанной плотности энергии толщина выжигаемого слоя фотоматериалов соответствует толщине защитного слоя ФБ большинства типов. Пороговое значение появления видимой картины ожога для ФБ “Унибром” составляет 0.05 Дж/см². С повышением плотности энергии излучения количество испаренного вещества увеличивается вплоть до полного исчезновения защитного слоя, что происходит при плотности потока свыше 2 Дж/см².

С дальнейшим ростом плотности энергии падающего излучения образуется плазменный факел. Однако хорошо известно, что с увеличением плотности электронов в образующейся плазме до критической величины происходит полное отражение падающего излучения и плазма становится непрозрачной. Это означает, что процесс абля-

ции фотоматериала прекращается после достижения критической плотности электронов, после чего произойдет насыщение испарительного процесса. Поскольку критическая плотность $n_{\text{кр}}$ связана с частотой излучения ω_0 формулой $n_{\text{кр}} \propto \omega_0^2$ и, например, для длины волны 1.06 мкм $n_{\text{кр}} = 10^{21}$ см⁻³, с повышением частоты падающего излучения порог насыщения испарительного процесса будет увеличиваться. Это означает, что верхний предел регистрации плотности энергии рассеянного излучения будет повышаться с ростом частоты этого излучения и с увеличением длительности воздействия.

Проведенные оценки показывают возможность использования засвеченной и проявленной ФБ для количественной регистрации рассеянного в лазерной плазме излучения. В случае применения достаточно больших листов ФБ типа “Унибром”, расположенных вокруг мишени на расстоянии 10–20 см от нее, можно получить пространственную картину рассеяния в широком диапазоне углов при лазерной энергии около 200 Дж и коэффициенте рассеяния свыше 10%.

Для регистрации картины рассеяния большое значение имеет пространственное разрешение приемного устройства. Разрешающая способность фотоматериалов определяется их дискретной структурой, обусловленной наличием эмульсионных микрокристаллов желатина и бромистого серебра [5]. Структурные свойства фотоматериалов определяются зернистостью и гранулярностью, которые изменяются после засветки и воздействия проявителя. Большинство используемых фотоматериалов имеет разрешающую способность в пределах от 25 до 100 линий/мм. Однако эти значения относятся к получению фотографического изображения, и на данный момент отсутствуют данные по разрешающей способности теплового изображения, поскольку в случае импульсного воздействия на фотографический слой минимальные размеры получаемого изображения будут определяться протяженностью распространения тепла. При этом чем короче импульсное воздействие на фотослой, тем выше его разрешающая способность. Возможно, что в пределе, при длительности импульсов несколько пикосекунд, применение ФБ или фотопленок позволит получить картину рассеяния излучения с пространственным разрешением, определяемым размером частиц серебра.

Проведенные оценки показывают наличие определенной зависимости толщины испаренного фотографического слоя от плотности излучения. С увеличением величины абляции фотослоя

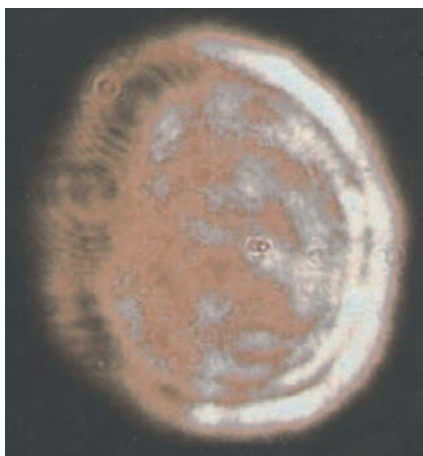


Рис. 2. Изображение ожога на фотобумаге.

происходит выгорание желатина, при этом повышается концентрация серебра, что приводит к увеличению яркости получаемых ожогов, т.е. к повышению величины альбеда ФБ. Наличие количественной связи альбеда ФБ с плотностью падающей на нее энергии излучения позволяет использовать ФБ в качестве инструмента для измерения этой энергии. Экспериментальные исследования показали возможность измерения относительной величины яркости получаемых ожогов с помощью сканера, что позволяет осуществить калибровку чувствительности ФБ к действию лазерного излучения.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОЖОГОВ НА ФОТОБУМАГЕ

В качестве количественного определения яркости ожогов на ФБ, позволяющей определить величину рассеянной энергии, предложен способ оцифровки изображения с помощью однопроходного планшетного сканера Samsung SCX-4100. Качество сканируемого изображения определяется пространственным разрешением прибора, которое составляло 1200 ppi. Результат сканирования представлен на рис. 2.

Полученное в результате сканирования изображение обрабатывалось расчетной программой и преобразовывалось в матрицу, где каждый ее элемент соответствовал яркости пикселя (рис. 3). Далее по полученной матрице строились графики зависимости яркости изображения от координаты (рис. 4). Для определения средней яркости изображения на ФБ использовались гистограммы, характеризующие количество пикселей в данном изображении, имеющих одинаковую яркость.

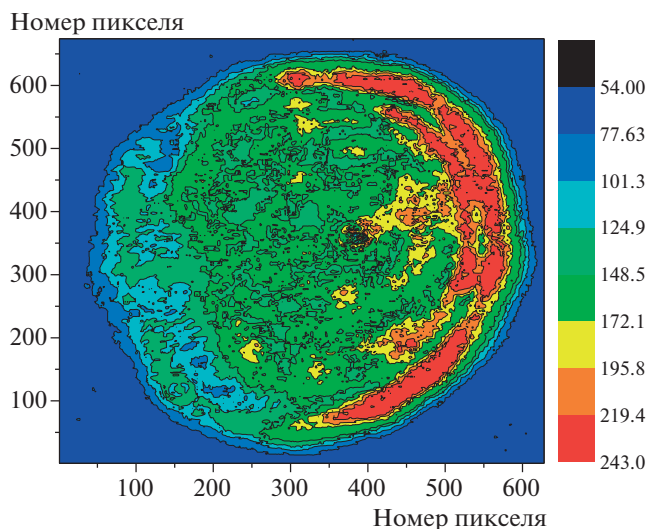


Рис. 3. Оцифрованное двумерное изображение ожога.

С использованием метода сканирования и оцифровки изображения ожогов возможно количественно калибровать чувствительность ФБ.

КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОБУМАГИ

Наряду с диаграммой направленности, значительный интерес представляет информация о величине рассеянной из плазмы энергии. В результате воздействия излучения на ФБ на ней образуется ожог, который визуально существенно отличается от остальной поверхности фотослоя. По размерам и цвету этого ожога можно качественно определить величину рассеянной энергии. Для более точного определения величины рассеянной энергии необходимо осуществить калибровку чувствительности ФБ и определить количественную связь световых параметров ожога с величиной плотности энергии падающего излучения.

Для калибровки чувствительности методики проведено две серии экспериментов. Использовалось излучение второй гармоники неодимового лазера со средней энергией в импульсе 230 мДж и при его длительности 2 пс. Также использовались делительная пластина для измерения с помощью калориметра энергии в импульсе и набор линз как с положительной, так и с отрицательной кривизной поверхности для варьирования интенсивности излучения на ФБ (за счет изменения диаметра пучка относительно исходного размера).

На рис. 5 представлена картина ожогов на ФБ при различной плотности энергии излучения. Ожоги № 1–5 соответствуют низкой интенсивности лазерного излучения (квадратные точки на

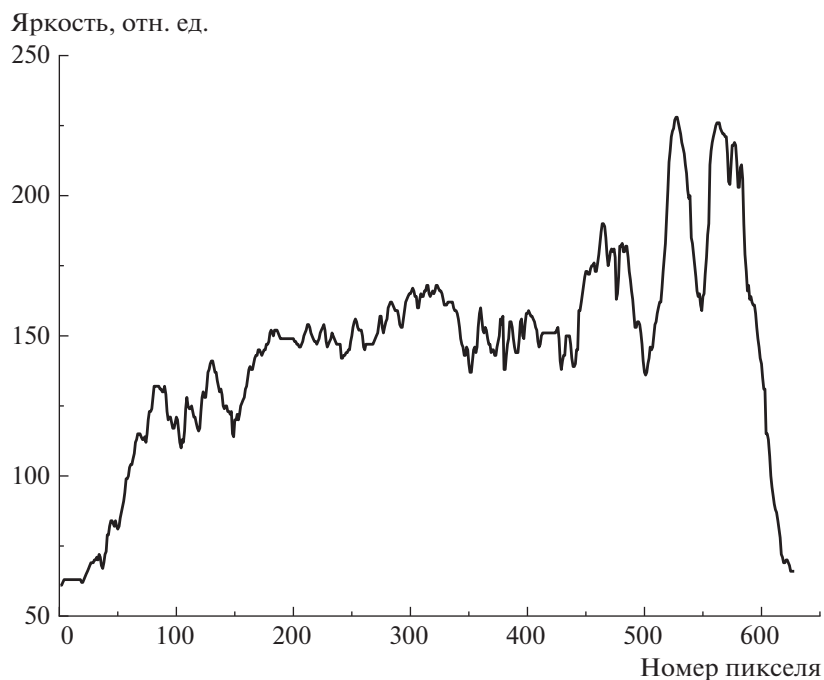


Рис. 4. График распределения интенсивности вдоль центральной линии ожога.

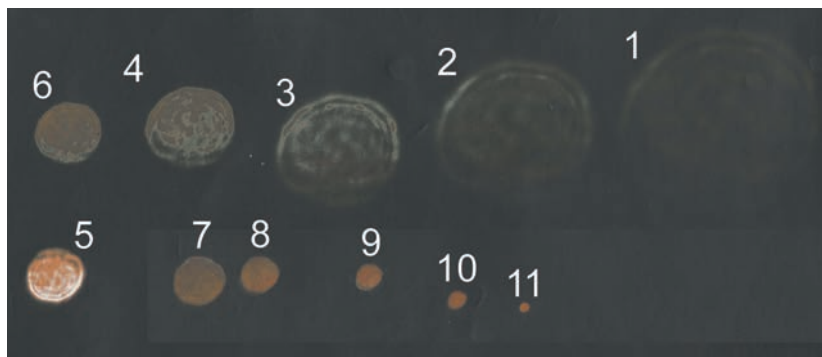


Рис. 5. Картина ожогов на ФБ при различной плотности энергии излучения: № 1–5 — при низкой интенсивности лазерного излучения; № 6–11 — при высокой интенсивности.

рис. 6), ожоги № 6–11 — высокой интенсивности (круглые точки на рис. 6).

Погрешность калибровки чувствительности методики определяется точностью измерения величины падающей энергии, неравномерностью распределения интенсивности по сечению пучка и вариацией параметров ФБ, так как с параметрами (толщиной слоев и однородностью распределения концентрации серебра) связана величина альbedo. Проведенные экспериментальные исследования показали, что указанные факторы приводят к погрешности измерения примерно 20%.

Согласно результатам, представленным в табл. 1 и на рис. 6, с увеличением плотности лазерной

энергии свыше 120–150 мДж/см² при длительности импульса 25 пс яркость ожога не увеличивается. Это обусловлено отражением излучения из плазмы с критической плотностью.

С целью увеличения плотности энергии воздействия лазерного излучения при сохранении заданной длительности импульсов было решено увеличить время воздействия на ФБ за счет увеличения количества импульсов при интенсивности лазерного излучения ниже порога образования плазмы с критической плотностью. Это дало возможность провести калибровку методики в отсутствие экранирующего эффекта плазмы. На рис. 7 приведены изображения ожогов, полу-

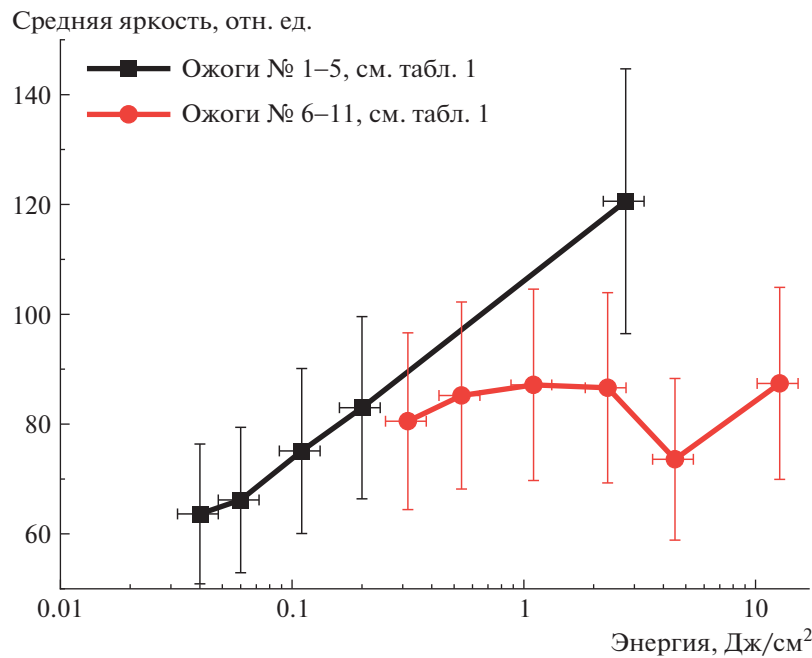


Рис. 6. График зависимости яркости ожога на ФБ от плотности энергии лазерного излучения. Данные взяты из табл. 1.

ченных при воздействии последовательности импульсов в режиме накопления.

В табл. 2 приведены результаты калибровки ФБ в режиме накопления импульсов.

На рис. 8 приведен график зависимости яркости ожога от интенсивности греющего излучения.

Как видно из приведенного на рис. 8 графика, яркость изображения в условиях многократного воздействия коротких импульсов линейно зависит от плотности лазерной энергии в диапазоне от 0.05 до 1.2 Дж/см², а при большей плотности излучения наблюдается насыщение, обусловленное

Таблица 1. Данные, полученные в результате обработки ожогов на ФБ

Номер ожога	Энергия импульса, мДж	Площадь ожога, см ²	Плотность энергии, мДж/см ²	Среднее значение яркости, отн. ед.
1	201	5.0	40.2	63.4
2	227	3.9	58.2	65.5
3	230	2.0	114.4	74
4	221	1.1	200.9	81.4
5	275 · 5	0.50	2750	121
6	230	0.73	316	79
7	207	0.38	538	82
8	218	0.2	1100	84.5
9	221	0.09	2500	84.1
10	218	0.05	4490	72.3
11	230	0.02	12700	84.7

Примечания. Ожог № 5 получен методом последовательного воздействия пяти лазерных импульсов с пониженной интенсивностью и увеличенной примерно до 200 пс длительностью (в таблице указана суммарная энергия по пяти импульсам). Среднее значение яркости в каждом пятне определялось усреднением значений яркости в относительных единицах с использованием программы обработки оцифрованного изображения.

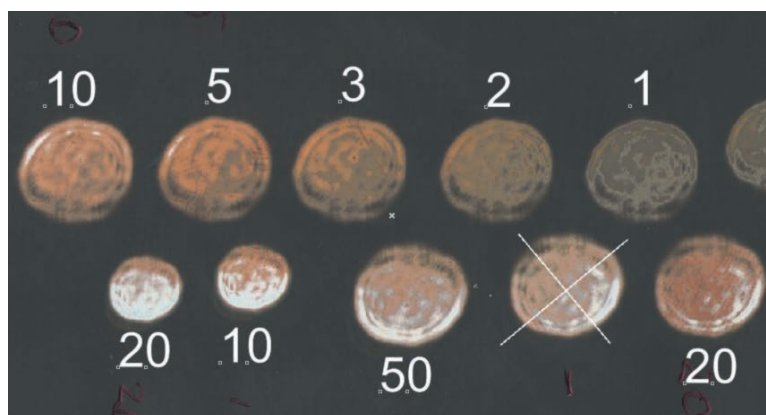


Рис. 7. Изображения ожогов, полученных при воздействии последовательности импульсов в режиме накопления. Цифры на рисунке — количество воздействующих импульсов; перечеркнутый ожог не был обработан.

выжиганием фоточувствительного слоя, вплоть до бумажной основы. При этом величина альбедо ФБ соответствует отражательной способности белой бумаги. Наблюдаемый рост яркости с увеличением плотности энергии свыше 1.5 Дж/см^2 объясняется расширением области полного выжигания фотослоя из-за неравномерности распределения энергии по сечению пучка.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что в случае регистрации излучения с длительностью импульса более 1 нс область линейности регистрации энергии излучения при использовании ФБ ограничена диапазоном от 0.1 до 1.2 Дж/см^2 .

В случае регистрации коротких импульсов, длительность которых существенно меньше времени распространения тепла в фотослое, верхний предел регистрации энергии излучения будет ограничен образованием плазмы, которая отражает падающее излучение при плотности выше критической. Из результатов калибровки с использованием лазерных импульсов длительностью 25 пс определена пороговая величина плотности мощности лазерного излучения с длиной волны 0.53 мкм , свыше которой происходит отражение излучения от плазмы. Для используемой ФБ пороговая величина плотности мощности составляет $5 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$. При этом динамический диапазон регистрации существенно снижен и со-

Таблица 2. Результаты калибровки ФБ в режиме накопления импульсов

Номер ожога	Энергия импульсов, Дж	Количество импульсов	Площадь ожога, см^2	Плотность энергии, Дж/см^2	Среднее значение яркости, отн. ед.
1	0.233	1	1.32	0.176	86
2	0.437	2	1.33	0.329	92
3	0.681	3	1.32	0.514	97
4	1.179	5	1.33	0.889	102
5	2.214	10	1.33	1.669	108
6	4.255	20	1.33	3.207	112
7	10.206	50	1.33	7.693	122.5
8	1.782	10	0.44	4.037	134
9	3.45	20	0.44	7.813	144

Примечание. Для ожогов № 8, № 9 с целью увеличения плотности мощности при ограниченном количестве импульсов была уменьшена площадь фокального пятна, что привело к изменению условий воздействия излучения на ФБ.

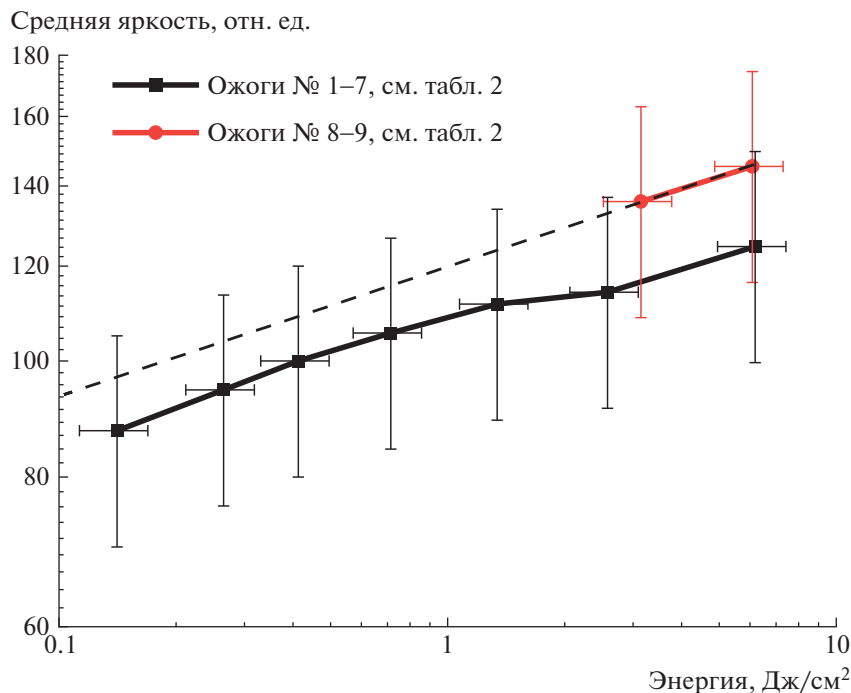


Рис. 8. График зависимости яркости ожога от плотности энергии лазерного излучения. Данные взяты из табл. 2.

ставляет ~ 3 , в то время как для длинных импульсов динамический диапазон равен 12.

Для экспериментальной проверки метода были использованы изображения ожогов, полученных в результате воздействия на ФБ световым излучением с известной энергией в опытах на установке “Ис-

кра-5”. Полученные с помощью описанного метода результаты измерений плотности энергии лазерного излучения на заданном расстоянии от мишени сравнивались с плотностью рассеянной от мишени энергии, измеренной с помощью калориметра. Для этого на расстоянии 75 см от мишени устанавливался калориметр, перед входом которого размещалась ФБ с отверстием в ней диаметром 22 мм. Проведенные эксперименты с использованием фотодиссоционного лазера показали удовлетворительное согласие (около 20%) показаний калориметра с результатами измерений с помощью ФБ.

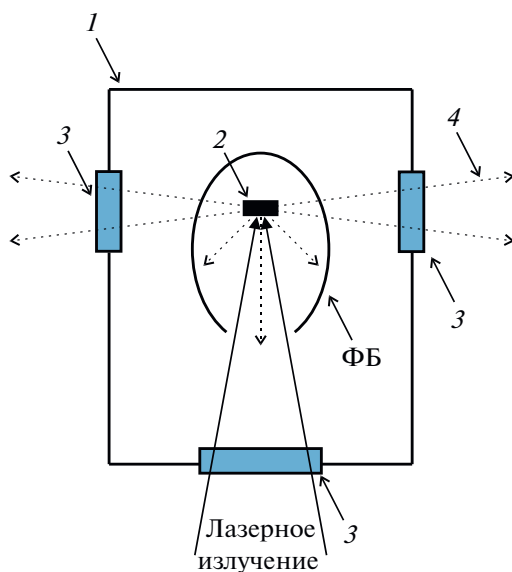


Рис. 9. Схема расположения ФБ в камере взаимодействия. 1 — камера взаимодействия; 2 — мишень; 3 — окна ввода и вывода излучения; 4 — рассеянное излучение от плазмы.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ РАССЕЯННОЙ ЭНЕРГИИ НА УСТАНОВКЕ “ИСКРА-5”

Обоснованность применения методики проверялась в экспериментах по воздействию лазерного излучения с длиной волны 1.315 мкм на мишени из германия или цинка на одном из каналов установки “Искра-5” [8–10]. Для регистрации рассеянного из плазмы излучения использовалась ФБ марки “Унибром”, которая размещалась вокруг мишени на расстоянии от 10 до 20 см (рис. 9).

В экспериментах, проводимых на установке “Искра-5”, длина волны лазерного излучения со-

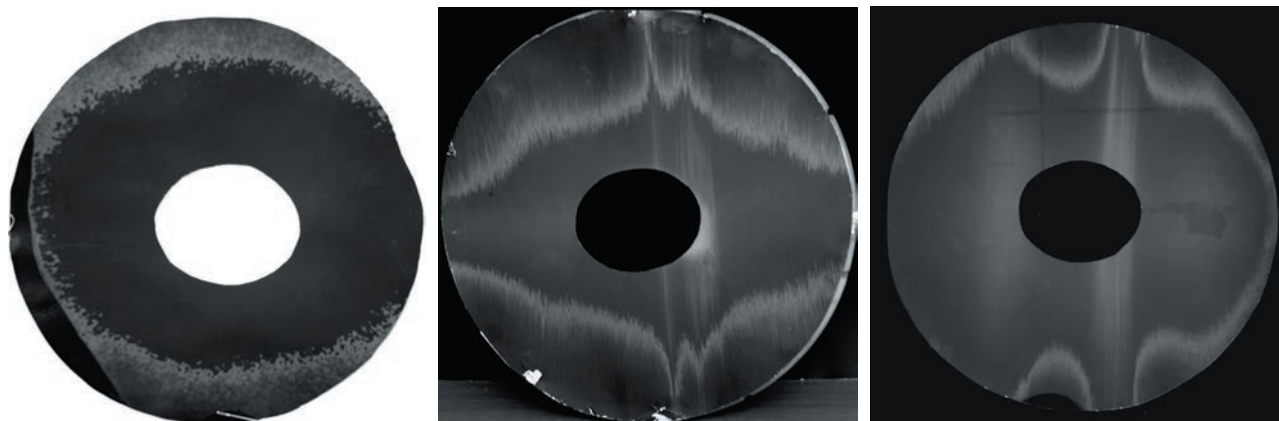


Рис. 10. Характер картины рассеяния назад при различной интенсивности излучения на мишени.



Рис. 11. Круговая картина рассеяния излучения.

ставляла 1.315 мкм. При воздействии на мишень излучения с такой длиной волны спектр рассеянного излучения вплоть до 4-й гармоники не попадал в область сильного поглощения в поверхностном слое фотоматериала. Это позволило использовать результаты калибровки для регистрации рассеянной энергии во всем ожидаемом спектральном диапазоне.

В случаях фокусировки лазерного излучения на мишень в виде строчки длиной около 14 мм и шириной 0.3 мм для измерения диаграммы направленности рассеянного излучения использовалась ФБ в виде полоски шириной 70 мм, охватывающей мишень по эллиптической поверхности, расположенной внутри камеры взаимодействия 1 в горизонтальной плоскости (см. рис. 9). Для ввода и вывода излучения через окна 3 камеры взаимодействия в ФБ выполнены отверстия, которые можно видеть на рис. 10, 11.

Результаты проведенных на установке “Искра-5” экспериментов показали, что диаграмма направленности рассеянного излучения сильно зависит от интенсивности лазерного излучения, падающего на мишень, от размеров фокального пятна и от угла падения. При этом характер кар-

тины рассеяния в различных направлениях имеет ряд отличительных особенностей (см. рис. 10, 11).

Представленные на рис. 10, 11 характерные картины рассеяния назад и в боковые направления показывают, во-первых, что направленность рассеянного из лазерной плазмы излучения зависит от условий воздействия лазерного излучения на мишень, а во-вторых, что картины рассеяния очень далеки от распределения по закону Ламберта. Полученные интегральные значения потерь на рассеяние излучения в телесном угле 4π составляют примерно 55% от падающей энергии лазерного импульса с интенсивностью свыше $2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² и длиной волны 1.315 мкм. Измеренная с помощью ФБ интегральная величина потерь лазерной энергии на рассеяние хорошо согласуется с результатами работ [2, 11, 12].

С использованием представленной выше методики были проведены измерения диаграммы направленности рассеянного излучения из плазмы при фокусировке на мишень лазерного импульса длительностью около 0.3 нс и с энергией примерно 200 Дж в горизонтальную строчку длиной 14 мм и шириной 0.25 мм. В эксперименте основному импульсу предшествовал предимпульс с

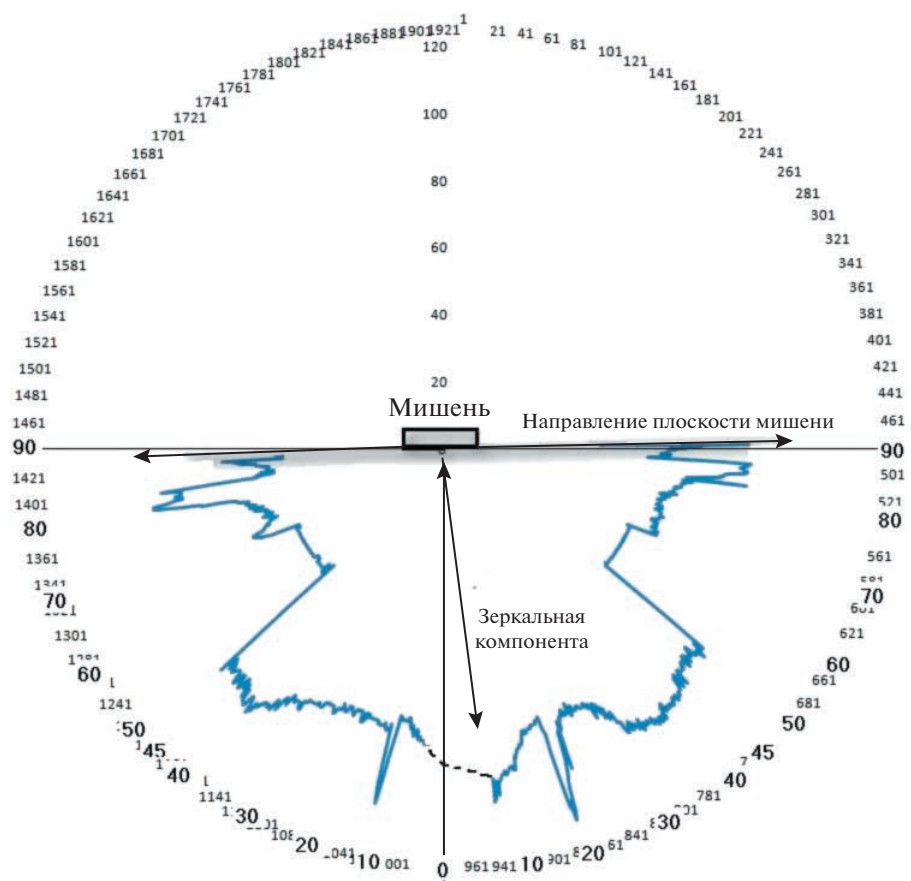


Рис. 12. Вид диаграммы направленности рассеянного излучения, полученной в результате сканирования ожогов на фотобумаге.

энергией, составляющей $\sim 8\%$ от лазерной энергии, опережающий основной импульс на 2.1 нс. На рис. 12 приведена круговая диаграмма направленности рассеянного излучения в горизонтальной плоскости, полученная путем сканирования ожогов на ФБ, перекрывающей телесный угол $\sim 4\pi$, за исключением отверстия ввода лазерного излучения. Полученная диаграмма направленности повернута против часовой стрелки из-за наклона мишени на 7° в горизонтальной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и результаты апробации методики показали возможность регистрации направленности рассеянного из лазерной плазмы излучения с высоким (до 100 линий/мм) пространственным разрешением, а также измерения величины рассеянной в полном телесном угле энергии с использованием проявленной ФБ. Порог образования хорошо видимой картины ожога для ФБ типа “Унибром” составил 0.1 Дж/см^2 .

При этом динамический диапазон регистрации ФБ зависит от длительности импульсов регистрируемого излучения. При регистрации импульсов длительностью 25 пс динамический диапазон равен 3, а при длительности свыше 1 нс — повышается до 12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косарев Н.И. // УФН. 2006. Т. 176. № 12. С. 1267. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612b.1267>
2. Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Быковский Ю.А., Крохин О.Н. Лазерная плазма. Физика и применение. М.: МИФИ, 2003.
3. Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А., Склизов Г.В., Шиканов А.С. Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989.
4. Протасов Ю.Ю., Щепанюк Т.С., Христофоров В.В. // Вестник МГТУ. Серия “Машиностроение”. 2002. № 4. С. 99.
5. Журба Ю.И. Краткий справочник по фотографическим процессам и материалам М.: Искусство, 1988. С. 53.

6. Даниелян Г.Л., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Федотов С.И., Фроня А.А. Препринт № 25. М.: ФИАН, 2007.
7. Андреев А.А., Мак А.А., Серебряков В.А., Соловьев Н.А. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 7. С. 1324.
8. Бессараб А.В., Долголева Г.В., Зарецкий А.И., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Муругов В.М., Насыров Г.Ф., Рогачев В.Г., Романов Ю.А., Сеник А.В., Сухарев С.А. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 4. С. 857.
9. Bessarab A.V., Gaidash V.A., Dolgoleva G.V., Zhidkov N.V., Izgorodin V.M., Kirillov G.A., Kochemasov G.G., Kunin A.V., Litvin D.N., Murugov V.M., Nasyrov G.F., Punin V.T., Rogachev V.G., Senik A.V., Suslov N.A. etc. // JETP. 1992. Т. 102. Р. 970.
10. Гаранин С.Г., Душина Л.А., Елин И.П., Жидков Н.В., Изгородин В.М., Калмыков Н.А., Коваленко В.П., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н., Петров С.И., Поздняков Е.В., Рогачев В.Г., Стародубцев К.В., Суслов Н.А., Тачаев Г.В. и др. // ЖЭТФ. 2019. Т. 155. Вып. 4. С. 759. <https://doi.org/10.1134/S0044451019040199>
11. Sigel R. // Journal de physique. 1977. V. 38 Р. С6. <https://doi.org/10/1051/jphyscol:1977605>
12. Лавров Л.М., Андреев А.А., Бессараб А.В., Марцovenко Д.И., Старилов Ф.А. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. III. № 2. С. 216.