

Воздействие фемтосекундных импульсов Ti:Sa-лазера на оптические материалы

А.А. Землянов¹, А.М. Кабанов¹, Г.Г. Матвиенко¹, А.Н. Степанов²,
С.Б. Бодров², Н.С. Захаров³, С.В. Холод^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

³12 Центральный научно-исследовательский институт МО РФ,
г. Сергиев Посад

Поступила в редакцию 8.05.2008 г.

Представлены экспериментальные результаты по воздействию импульсов Ti:Sa-лазера с длительностью 50 фс на различные типы оптических материалов. Определены пороговые уровни воздействия импульсов излучения на конденсированные среды, исследован характер деградации поверхностей. Результаты данных исследований могут быть использованы как при проектировании лазерной техники, так и для развития новых технологий обработки материалов. В ходе исследований определены спектрально-энергетические зависимости свечения филаментированного лазерного пучка для различных энергий в лазерном импульсе, определены спектральные характеристики суперконтинуума, образующегося на выходе из прозрачных оптических сред. Для конденсированных сред показано преобладание коротковолнового крыла спектра континуума, определена зависимость энергии суперконтинуума от энергии падающего излучения.

Ключевые слова: лазерное излучение, самофокусировка, филаментация, плазма.

Введение

Развитие фемтосекундных лазерных систем и ориентация созданных комплексов для решения атмосферно-оптических задач, например для проводки молниевых разрядов по заданной траектории [1], требуют создания технически сложных и оптически насыщенных оптоэлектронных конструкций. При этом оптическая прочность используемых оптических элементов для высокоинтенсивных лазерных фемтоимпульсов до настоящего времени количественно не исследована. Интерес представляют не только пороговые характеристики пробоя, абляции, разрушения материала, но и трансформация пространственных и спектральных характеристик лазерных пучков, прошедших через оптические элементы.

Методики проведения экспериментов

Экспериментальные исследования по определению пороговых уровней воздействия фемтосекундных лазерных импульсов проводились в лаборатории сверхсильных полей отдела сверхбыстрых процессов отделения нелинейной динамики и оптики

Института прикладной физики РАН на стенде с тераваттной фемтосекундной лазерной системой на основе лазера на титане с сапфиром (Ti:Al₂O₃, Ti:Sa, длина волны $\lambda = 800$ нм). Характеристики комплекса подробно описаны в [2]. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1, 2. Юстировка оптической схемы осуществлялась импульсами излучения той же длиной волны 800 нм, длительностью ~ 10 нс и частотой повторения 10 Гц. За порог повреждения оптических материалов принималось среднее значение плотности энергии между облучениями с максимальной плотностью энергии, не приводящей к повреждению, и минимальной плотностью энергии, приводящей к появлению необратимых изменений оптических свойств. Под необратимыми изменениями оптических свойств понимались появление дифракции на дефектах, отслоение либо разрушение подложки или покрытия.

Для измерения характеристик воздействия лазерного излучения на материалы и трансформации спектра воздействующего импульса использовались следующие измерительные приборы.

Измерения энергии в лазерном импульсе и калибровка измерительных фотодиодов осуществлялись пирокалориметром Moletron J25LP.

CCD-камера 320×240 ячеек, 20×20 мкм, 12 бит (PixelFly VGA, PCO Imaging, Kelheim, Germany) использовалась для измерения пространственного профиля импульсов лазерного излучения и для контроля за изменениями в образцах.

* Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Андрей Николаевич Степанов; Сергей Борисович Бодров; Николай Семенович Захаров; Сергей Владимирович Холод.

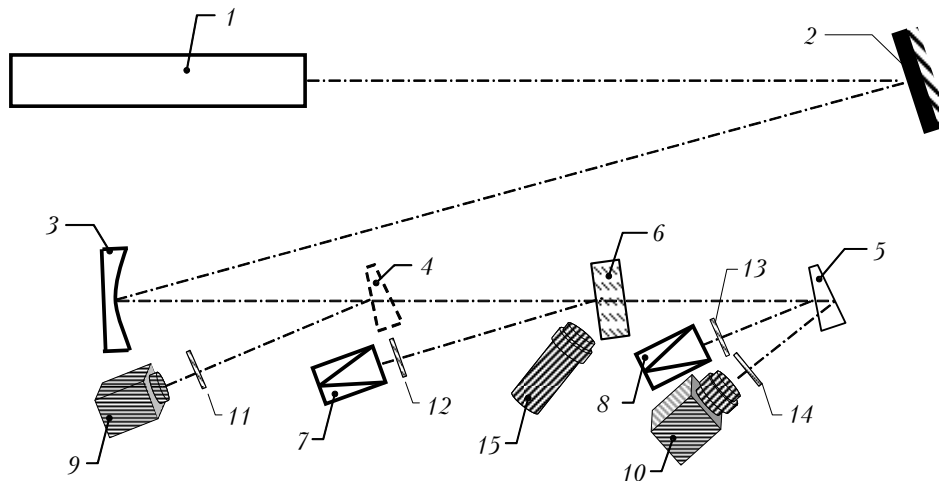


Рис. 1. Схема измерения пороговых уровней воздействия: 1 – источник излучения; 2 – глухое зеркало; 3 – сферическое зеркало (фокусное расстояние $F = 80,6$ см); 4, 5 – клин; 6 – образец; 7 – фотодиод для измерения энергии отраженного излучения; 8 – фотодиод для измерения энергии прошедшего излучения; 9 – CCD-камера с объективом; 10 – CCD-камера без объектива; 11–14 – светофильтры; 15 – микроскоп

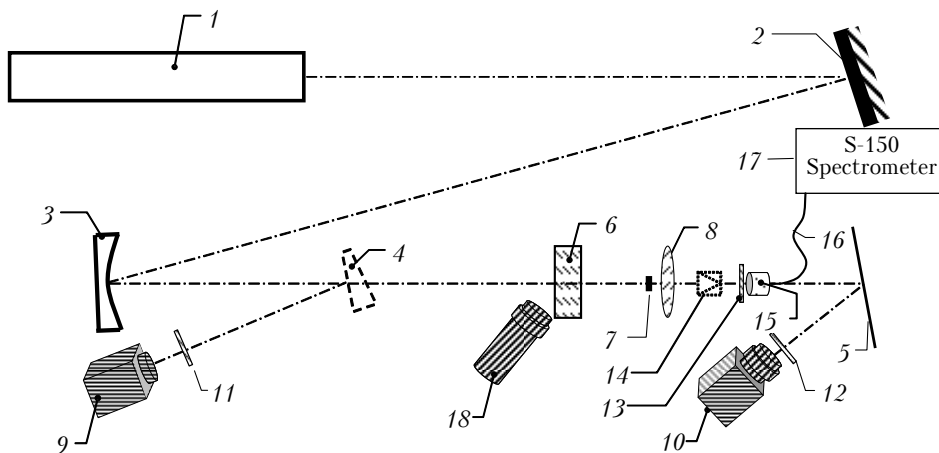


Рис. 2. Схема измерения спектрально-энергетических характеристик излучения: 1 – источник излучения; 2 – глухое зеркало; 3 – сферическое зеркало ($R = 1,613$ м); 4 – клин; 5 – экран; 6 – образец; 7 – заслонка ($\varnothing 7$ мм); 8 – собирающая линза ($f = 10$ см); 9 – CCD-камера без объектива; 10 – CCD-камера с объективом; 11–13 – светофильтры; 14 – измеритель энергии лазерного импульса; 15 – головка спектрометра; 16 – световод; 17 – спектрометр; 18 – микроскоп

Измерения уровней сигнала на фотодиодах и пирокалориметре, измеряющих энергию падающего, прошедшего и отраженного излучения, проводились осциллографами TDS 3052B, TDS 2014. Спектрометр S-150 использовался для измерения спектральных характеристик прошедшего излучения.

Измерение пороговых уровней воздействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности на оптические материалы проводилось в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1 по методике [3, 7] измерения зависимостей прошедшего и отраженного уровней сигнала от воздействующей энергии лазерного импульса. Излом зависимости соответствует энергетическому порогу повреждения образца.

Согласно этой схеме излучение вначале фокусировалось сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 80,6 см. На некотором расстоянии перед фокусом располагался образец под небольшим

углом к нормали оси воздействующего излучения так, чтобы отраженный сигнал мог быть принят измерительным фотодиодом. После образца устанавливался клин, который выполнял две функции. Во-первых, он ослаблял прошедший импульс излучения, во-вторых, клин делил луч на два, направляемых на измерительный фотодиод и CCD-камеру. Для исключения фоновой засветки и выбора линейных участков рабочих характеристик измерителей энергии перед фотодиодами и камерой устанавливались нейтральные светофильтры. Процессы, происходящие в образцах во время воздействия лазерным импульсом, наблюдались в микроскоп (рис. 1, 15).

Измерение спектрально-энергетических характеристик излучения, прошедших через образец лазерных импульсов фемтосекундной длительности в режиме генерации филаментов, проводилось в соответствии

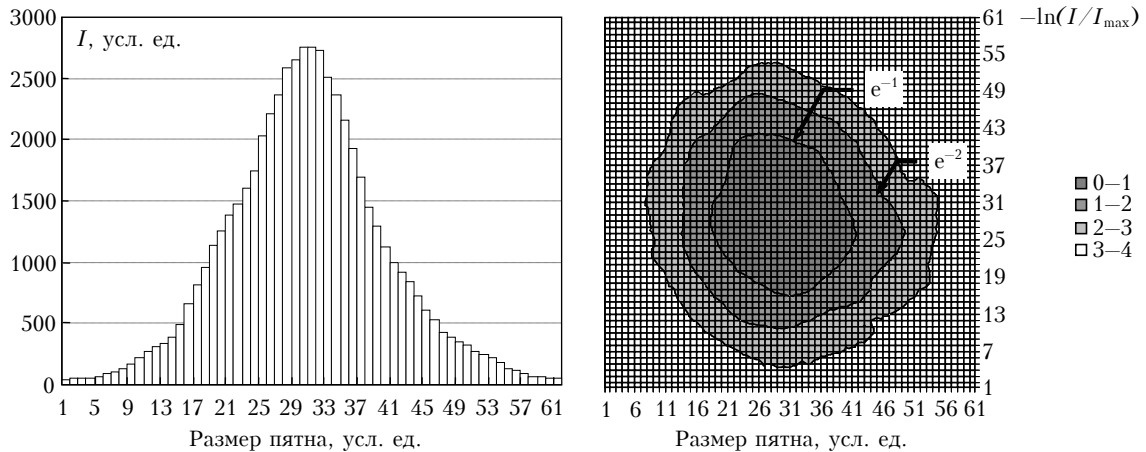


Рис. 3. Профиль пятна излучения на расстоянии 76,5 см от сферического зеркала

со схемой, изображенной на рис. 2. На некотором расстоянии перед фокусом располагался образец по нормали к оптической оси. После образца устанавливалась собирающая линза с фокусным расстоянием 10 см. За линзой на месте расположения действительного изображения образца располагалась приемная головка оптоволокна, отходящего от спектрометра. Перед линзой размещалась заслонка, перекрывающая луч прошедшего излучения. Для измерения энергетических характеристик излучения от филамента вместо головки спектрометра размещался фотодиод либо пирокалориметр. Для определения пространственных характеристик излучения на место всей собирающей системы после образца устанавливался экран, изображение с которого снималось CCD-камерой.

В качестве объектов исследований были использованы следующие типовые оптические материалы и элементы оптических приборов: 1 – стекло К8, ГОСТ 3514-94, толщина 9 мм; 2 – зеркало на 1,06 мкм: многослойная ZrO_2/SiO_2 структура на подложке из стекла К8; 3 – склейка (К8 + бальзамин + К8); 4 – алюминиевое напыление толщиной ~ 1 мкм на подложке из стекла К8; 6 – светофильтр ЖС-18; 6 – алюминиевое напыление толщиной ~ 2 мкм на подложке из стекла К8; 8 – стекло К8, ГОСТ 3514-94, толщиной 4,5 мм.

Для определения размеров области на образцах, подвергаемых воздействию фемтосекундных лазерных импульсов, и для контроля качества лазерного импульса проводилось прямое измерение пространственного профиля пятна облучения. Для этого перед образцом располагалась стеклянная клинообразная пластинка (см. рис. 1, 2). Профиль интенсивности определялся CCD-камерой без объектива, матрица которой располагалась на том же расстоянии от передней поверхности клина, что и передняя поверхность клина от передней поверхности исследуемого образца. Полученные распределения интенсивности в пятне облучения на расстоянии 76,5 см показаны на рис. 3, а изменения размера пятна от расстояния от фокусирующего зеркала – на рис. 4.

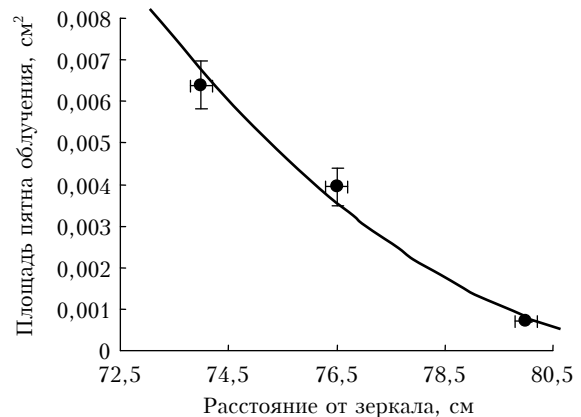


Рис. 4. Зависимость размеров пятна облучения от расстояния до фокуса

Каждая клетка на рис. 3 соответствует отдельной ячейке на CCD-камере, размер которой составляет 20×20 мкм. Погрешность измерения определялась числом ячеек, попадающих на границу пятна.

Как видно из рис. 3, 4, профиль импульса сохранял свою гауссову форму, а площадь пятна изменялась по квадратичному закону в пределах погрешности.

Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на оптические материалы

Плотность энергии излучения в максимуме пятна с гауссовым пространственным профилем может быть выражена как

$$w_{\max} = 2 \langle w \rangle = 2 \frac{W}{S}, \quad (1)$$

где $\langle w \rangle$ – средняя плотность энергии по пятну; W – энергия в импульсе; S – площадь пятна по уровню e^{-2} , а коэффициент 2 может быть получен из нормировки по плотности энергии

$$\frac{\omega_{\max}}{\langle \omega \rangle} = \frac{\pi R^2}{\int_0^{\infty} \exp\left(\frac{-r^2}{2R^2}\right) 2\pi r dr} = 2,$$

где R – радиус пятна по уровню e^{-2} .

Аналогично для гауссова временного профиля можно определить плотность мощности в центре пятна

$$q_{\max} = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \langle q \rangle = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\omega_{\max}}{\tau_{0,5}} \approx 0,939 \frac{\omega_{\max}}{\tau_{0,5}}, \quad (2)$$

где $\tau_{0,5}$ – длительность импульса по полувысоте, а коэффициент 0,939 получается из нормировки по плотности мощности

$$\frac{q_{\max}}{\langle q \rangle} = \frac{\tau_{0,5}}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-4\ln 2 \frac{t^2}{\tau_{0,5}^2}\right) dt} = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \approx 0,939.$$

Таким образом, экспериментально измерив энергию, при которой наступает повреждение на образце, пространственный и временной профили пятна облучения, из формул (1) и (2) можно рассчитать пороговые плотность энергии и плотность мощности разрушения.

Результаты измерений пороговых уровней воздействия рассмотрим на примере одного из образцов – стекла К8.

При воздействии на образцы из стекла К8 было отмечено образование пятен абляции. Они представляли собой малозаметные в прямом освещении овальные кратеры с гладким дном и резкими границами. Площадь пятна облучения составляла $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, длительность импульса по полувысоте – 50 фс.

В соответствии с методикой [3, 7] измерялись зависимости уровней сигнала прошедшего и отраженного излучения от энергии в падающем импульсе (рис. 5, 6).

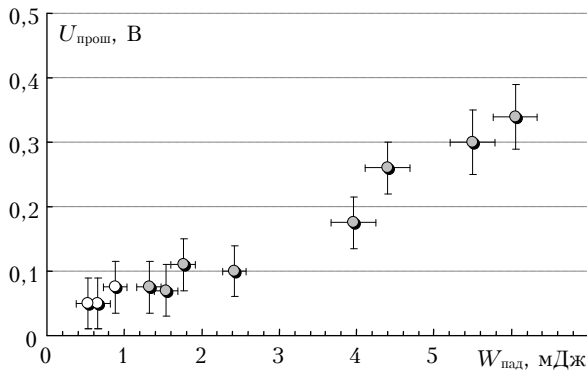


Рис. 5. Зависимость уровня сигнала прошедшего излучения от падающей энергии на образец из стекла К8 (○ – образец без изменений; ● – с изменениями)

Из рис. 5 видно, что даже при наличии абляции коэффициент прохождения не испытывает никаких изменений. На рис. 6 заметен некоторый излом, связанный с увеличением коэффициента отра-

жения за счет образования плазмы на поверхности образца. Это связано с тем, что изменения коэффициентов прохождения и отражения составляли единицы процентов, что в разной степени заметно на фоне коэффициентов прохождения и отражения стекла (92 и 8% соответственно). По положению излома можно оценить порог повреждения стекла К8 как $(2,5 \pm 1,0)$ мДж.

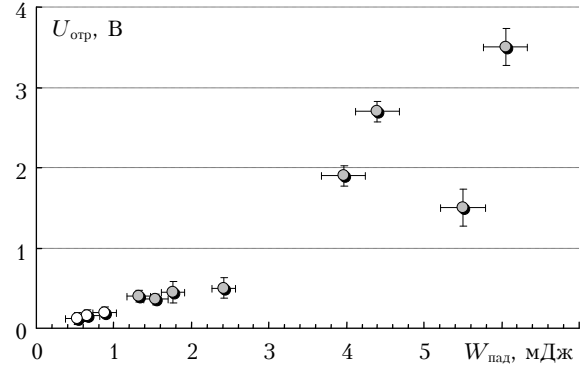


Рис. 6. Зависимость уровня сигнала отраженного излучения от падающей энергии на образец из стекла К8 (○ – образец без изменений; ● – с изменениями)

Величина энергии в импульсе, определенная как среднее значение между максимальной энергией в импульсе, при которой не происходило повреждения стекла К8, и минимальной энергией в импульсе, при которой регистрировалась абляция, составила 1 мДж, что по формуле (1) дает значение порога абляции, равное $2,78 \text{ Дж/см}^2$.

По размерам пятен абляции можно также определить порог абляции с большей точностью, чем вышеуказанные подходы. На границе пятна абляции плотность энергии может быть выражена как

$$\omega_{\text{абл}} = \omega_{\max} \exp\left(-\frac{r_{\text{абл}}^2}{2R^2}\right),$$

тогда пороговая энергия

$$W_{\text{абл}} = W_{\text{пад}} \exp\left(-\frac{r_{\text{абл}}^2}{2R^2}\right),$$

что для стекла К8 составляет 1 мДж (рис. 7). Это близко к тому, что было определено выше. Достоинством такого метода является отсутствие необходимости как экспериментальных точек вблизи порога, так и импульсов с энергиями ниже пороговых, что значительно упрощает эксперимент.

Другим, более известным [5], способом является измерение зависимости площади пятна абляции от логарифма падающей энергии (рис. 8). В этом случае пересечение линейной тенденции (тренда) с осью Ox , соответствующее нулевому радиусу пятна, дает логарифм пороговой энергии в импульсе. В соответствии с таким построением для стекла К8 пороговый уровень энергии составляет 1,1 мДж. Этот метод, помимо достоинств, присущих предыдущему методу, удобен тем, что в определение порогов явно не входят размеры пятен облучения R , что делает его предпочтительным для использования.

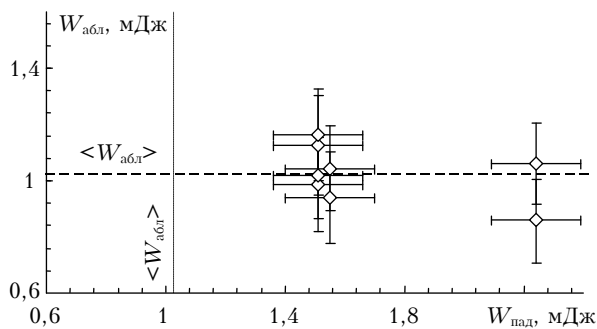


Рис. 7. К определению порога абляции по радиусам пятен на образце

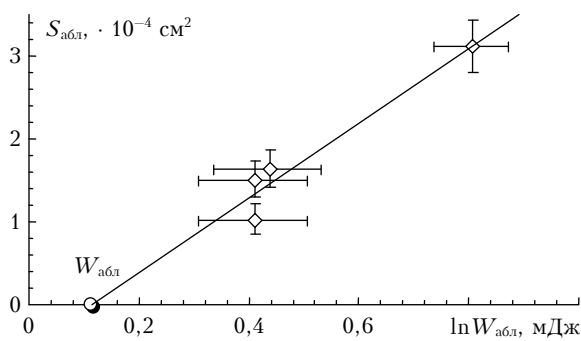


Рис. 8. Определение порога абляции стекла К8

Были исследованы зависимости энергии прошедшего и отраженного излучения от энергии падающего лазерного импульса для различных оптических материалов в режимах до пробоя и при пробое поверхности образца. Ожидалось, что при пробое того или иного материала будет наблюдаться изменение в зависимостях $W_{\text{прош}}(W_{\text{пад}})$ и $W_{\text{отр}}(W_{\text{пад}})$. Однако, как показали измерения, качественный скачок в поведении графиков $W_{\text{прош}}(W_{\text{пад}})$ и $W_{\text{отр}}(W_{\text{пад}})$ наблюдался не всегда: линейная зависимость $W_{\text{прош}}(W_{\text{пад}})$ при больших энергиях сохранялась для стекла К8 и бальзаминовой склейки, а линейная зависимость $W_{\text{отр}}(W_{\text{пад}})$ – для зеркала на длину волны 1,06 мкм и светофильтра ЖС-18. Тем не менее по остальным графикам наблюдалось изменение указанных зависимостей вблизи порога пробоя.

Резюмируя, можно сказать, что данный метод определения порога пробоя может быть использован, но его точность сравнительно небольшая, поскольку интерпретация снятых зависимостей (отклонение от линейной зависимости и т.д.) не всегда однозначна. Кроме того, необходимо провести много выстрелов в различные точки исследуемого образца для набора достаточного количества экспериментальных точек.

Пробой вещества приводит к изменению оптических свойств этого вещества в области пробоя. Например, на поверхности вещества возможно образование впадин или бугорков вследствие выброса расплавленного вещества, в объеме возможна модификация вещества или даже образование полых каналов. Наличие таких неоднородностей можно обнаружить путем зондирования области пробоя пробными лазерными импульсами малой энергии. В ча-

стности, можно исследовать дифракцию такого зондирующего импульса. По появлению дифракционных колец в зондирующем импульсе, прошедшем через образец, можно судить о наличии изменения на поверхности и/или в объеме образца и, как следствие, о наличии пробоя.

Методика эксперимента по определению порога пробоя методом лазерного зондирования области пробоя следующая. Вначале производился одиночный выстрел в образец фемтосекундным лазерным импульсом. Затем в ту же область образца направлялся зондирующий наносекундный импульс с малой энергией в импульсе. Поперечный профиль пучка как наносекундного, так и фемтосекундного импульса восстанавливался по зафиксированным ССД-камерой изображениям лазерного пучка на экране, расположенном на расстоянии $D = 50\text{--}60$ см от образца. Данным методом были проведены измерения порога пробоя в образцах № 1, 2, 3, 5 и 7.

На рис. 9 показаны характерные поперечные распределения интенсивности лазерного пучка после прохождения образца № 1 (стекло К8) в случаях, когда пробой не фиксировался (*а, б*) и когда он фиксировался (*в, г*).

Наличие пробоя определялось визуально под микроскопом по повреждению поверхности. Рис. 9, *а, в* соответствуют интенсивным фемтосекундным лазерным импульсам, рис. 9, *б, г* – низкоэнергичным зондирующим наносекундным импульсам. При сравнении распределений лазерного излучения в пробных наносекундных импульсах, изображенных на рис. 9, *б, г*, видно образование кольца вокруг основного максимума распределения на последнем, что можно объяснить дифракцией лазерного излучения на неоднородностях, появляющихся после пробоя.

Таким образом, появление такого дифракционного кольца в распределении пробного наносекундного импульса, прошедшего через образец по следу мощного фемтосекундного импульса, может являться критерием, позволяющим определить появление пробоя в образце.

Максимальная энергия падающего излучения, при которой еще не наблюдались кольца в поперечном профиле зондирующего сигнала, составила $W_{\text{пад}} \approx 0,86$ мДж; минимальная энергия, когда кольца наблюдались, равна $W_{\text{пад}} \approx 1,3$ мДж. Таким образом, можно сказать, что энергия пробоя $W_{\text{пад}} \approx 1$ мДж, что соответствует пороговой плотности энергии $W = 2,8$ Дж/см².

Кроме описанных методик определения порогов осуществлялся визуальный контроль поврежденных исследуемых образцов с помощью микроскопа Leica 020-518.500 DM/LS (Leica Microsystems Wetzlar GmbH, Germany), объектив N PLAN 10x/0,25, окуляр HC PLAN 10x/20. Для определения размеров сеток и кадрирующих рамок микроскопа использовался объект-микрометр ОМП. Результаты визуализации повреждений на примере образцов – стекло К8 и Al-пленка (~ 2 мкм) на подложке из стекла К8 – представлены на рис. 10, 11 соответственно.

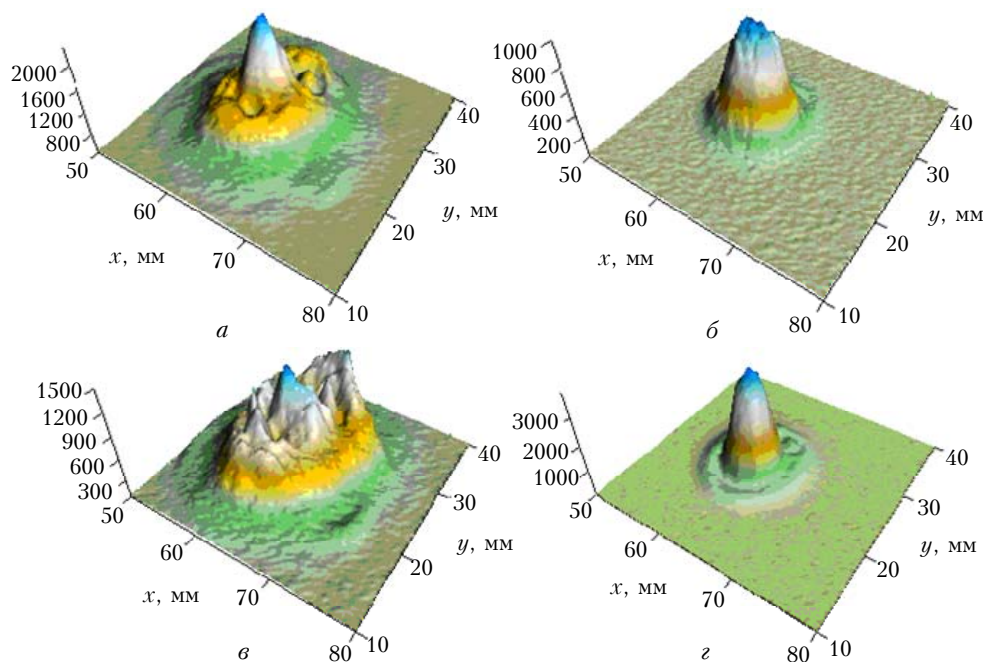
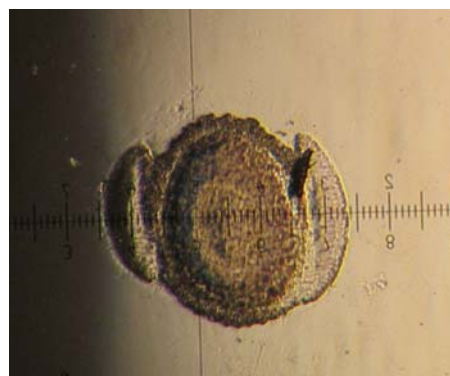


Рис. 9. Поперечные распределения энергии в лазерном пучке после прохождения образца № 1 (стекло К8): *а* и *б* – для фемтосекундного импульса с энергией $W_{\text{пад}} = 0,77$ мДж и наносекундного импульса, прошедшего через область облучения данным фемтосекундным импульсом; *в* и *г* – для фемтосекундного импульса с энергией $W_{\text{пад}} = 1,55$ мДж и наносекундного импульса, прошедшего через область облучения данным фемтосекундным импульсом

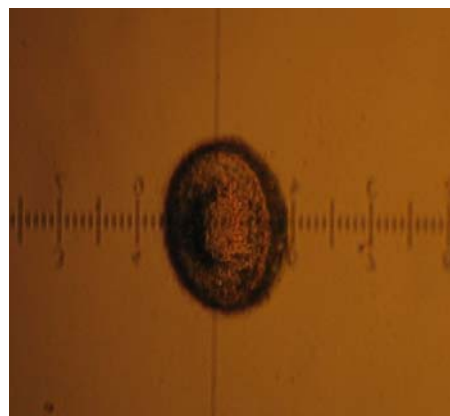
На рис. 10, 11 показаны снимки повреждений поверхности при многократном облучении стекла К8 фемтосекундными лазерными импульсами. Как видно, размер области повреждений увеличивается при росте энергии в лазерном импульсе, что согласуется с ранее предложенной моделью зависимости радиуса повреждений от энергии излучения. При сравнении повреждений многократными импульсами с повреждениями, образованными одиночными импульсами (рис. 11) наблюдается более «изрытое» углубление, в центре которого находится возвышение.

При воздействии излучения на образцы алюминиевых покрытий различной толщины, нанесенных на стекло К8, было зарегистрировано многообразие процессов разрушения. Так, для покрытия в 1 мкм (пятно облучения $6,4 \cdot 10^{-3}$ см²) наблюдались четко очерченные области эрозии поверхности покрытия, разрушения покрытия и подложки. Для более толстого покрытия (~ 2 мкм, пятно облучения $3,9 \cdot 10^{-3}$ см²) наблюдались те же эффекты, но разрушение покрытия сопровождалось его отслоением, поэтому область повреждения имела рваные края (рис. 11, *а*, *в*). Характер повреждений сходен с результатами численного моделирования, описанными в [6]. Воздействие в частотном режиме с уровнями энергии, близкими к пороговым, привело к образованию повреждений размером 130 мкм (рис. 11, *в*).

По результатам проведенных экспериментов по воздействию лазерных импульсов фемтосекундной длительности на испытываемые образцы были определены пороговые значения энергии $W_{\text{п}}$, плотности энергии $w_{\text{п}}$ и плотности мощности $q_{\text{п}}$ повреждения оптических материалов. Результаты представлены в таблице.



а



б

Рис. 10. Снимки (через микроскоп) повреждений поверхности стекла К8 (образец № 1) при многократном облучении с частотой 10 Гц, временем экспозиции ~ 2–3 с и средней энергией в одном импульсе: *а* – 11,8 мДж; *б* – ~ 2 мДж

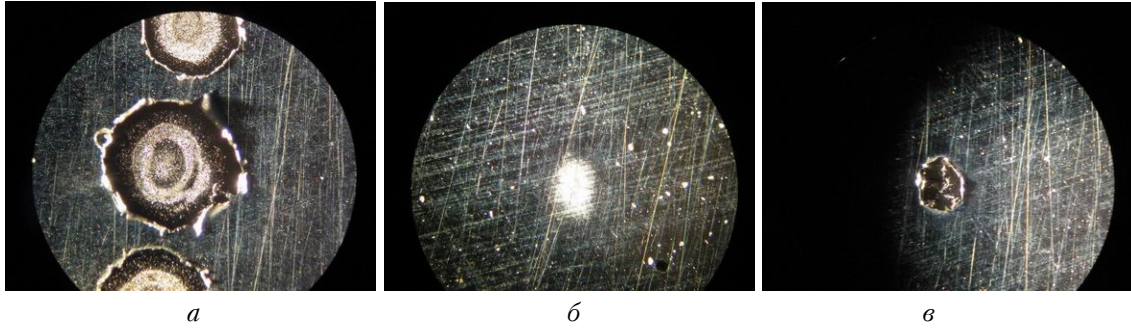


Рис. 11. Воздействие излучения на слой Al толщиной ~ 2 мкм: $a - 7,92$, $b - 1,06$, $c - 1,10$ мДж; частота следования импульсов 10 Гц; экспозиция 1 с

Пороговые значения параметров ФСЛИ, требуемых для повреждений оптических материалов

Образец	$\tau_{0,5}$, фс	S , см ²	W_p , мДж	w_p , Дж/см ²	q_p , ТВТ/см ²
Стекло К8	50,0	$7,2 \cdot 10^{-4}$	1,1	3,06	57,4
ZrO ₂ /SiO ₂	50,0	$7,2 \cdot 10^{-4}$	0,43	1,19	22,4
К8 + Бальзамин + К8	51,2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	2,0	0,63	11,5
Al (1 мкм)	51,2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,66	0,21	3,78
Al (~ 2 мкм)	50,0	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,66	0,34	6,36
ПЗС-матрицы	51,2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,13	2,30
Стекло ЖС-18	51,2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	3,9	1,23	22,5

Генерация суперконтинуума из оптических материалов

При филаментации излучения фемтосекундной длительности в стекле К8 проходящее излучение представляло собой пучок прошедшего излучения с той же длиной волны и ореол суперконтинуума с большой угловой расходимостью. Для отсечки длины волны воздействующего излучения (800 нм), находящейся в центральной части пучка от ореола с трансформированным спектром излучения использовались заслонка, расположенная на оптической оси (рис. 12, *a*), либо светофильтр СЗС21.

Спектр излучения из области филамента представляет собой континуум (рис. 12, *b*) в диапазоне от 350 до 1050 нм, простирающийся в обе стороны от воздействующей длины волны лазерного гендера 800 нм (рис. 12, *в*). Измеренный в эксперименте угол высвета суперконтинуума из образца составляет $\sim 10^\circ$, что соответствует дифракционному углу расходимости в предположении, что диаметр филамента в стекле порядка 5 мкм. Экспериментально показано, что в излучение ореола трансформируется значительная доля падающего излучения – 10–15% (рис. 13).

Интересным фактом является то, что заметным суперконтинуум становится при потоках энергии ниже порога абляции. Кроме того, наблюдалась большая расходимость коротковолновой части излучения суперконтинуума, что выражалось в наличии синеволнового внешнего края у пятна излучения.

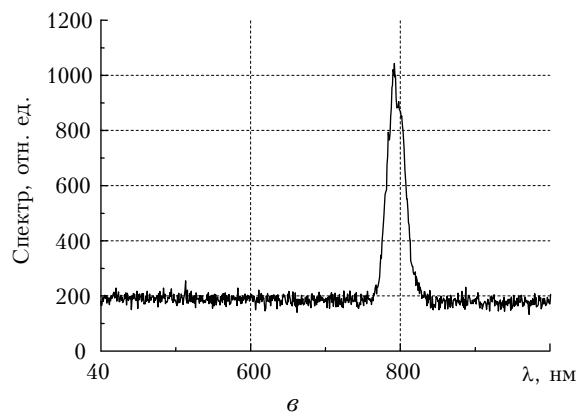
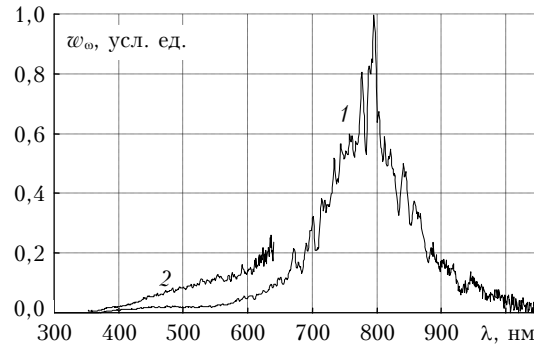
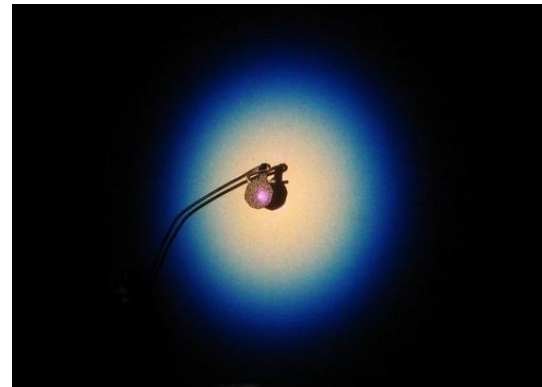


Рис. 12. Свечение при генерации суперконтинуума в стекле К8 (*a*): *b* – спектральная плотность энергии суперконтинуума (1 – 0,56 мДж; 2 – 6,09 мДж, часть излучения вырезана светофильтром СЗС21 ГОСТ 9411-91); *в* – исходный спектр излучения, воздействующего на образец

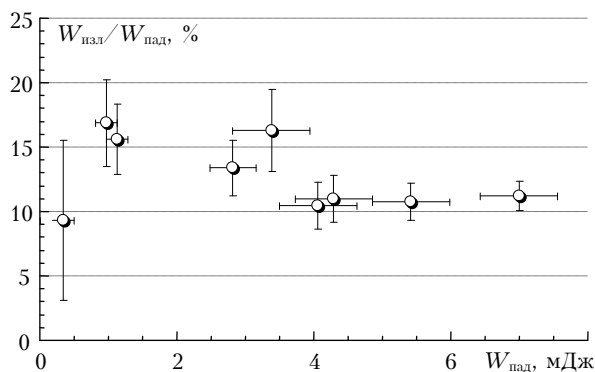


Рис. 13. Зависимость доли переизлучаемой энергии от плотности энергии в центре пятна облучения на стекле К8

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны и опробованы методики определения порога пробоя оптических сред при воздействии на них интенсивного фемтосекундного лазерного излучения. Для определения порогов пробоя были применены следующие методики: измерение зависимостей прошедшего через образец и отраженного излучений; дифракция пробного лазерного импульса; визуальный контроль исследуемых образцов. Определены пороги пробоя наиболее характерных элементов оптических систем, которые, как было показано, лежат в области плотностей энергии $W = 0,1-3 \text{ Дж/см}^2$. Исследованы спектры лазерного излучения, прошедшего через образцы. Показано, что спектр прошедшего излучения существенно уширяется, причем уширение спектра в коротковолновой области простирается до ультрафиолетового диапазона.

A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, G.G. Matvienko, A.N. Stepanov, S.B. Bodrov, N.S. Zakharov, S.V. Kholod. **Influence of femtosecond Ti:Sa laser pulses on optical condensed media.**

Experimental results of influence of Ti:Sapphire laser pulses with a duration of 50 fs on different types of optical materials are presented. Threshold levels of radiation pulse action on condensed media were determined; a character of surface degradation was investigated. Differences in evolution of the interaction processes of radiation pulses of femtosecond and nanosecond durations were shown. The results of these investigations can be used both for design of laser technique and development of new technologies of material processing. At the investigations, spectral-energy dependences of filamented laser pulse emission for various laser pulse energies were determined, as well as spectral characteristics of supercontinuum, formed at the output from transparent optical media. Prevalence of short-wave spectrum wing of a supercontinuum was shown for condensed media. Dependence of supercontinuum energy on incident radiation energy was determined.

1. Kasparian J., Ackermann R., André Y.-B., Méchain G., Méjean G., Prade B., Rohwetter P., Salmon E., Stelmaszczyk K., Yu J., Mysyrowicz A., Sauerbrey R., Woeste L., Wolf J.-P. Electric events synchronized with laser filaments in thunderclouds // *Opt. Express*. 2008. V. 16. Is. 8. P. 5757–5763.
2. Багаев С.Н., Ге́йц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г., Пестряков Е.В., Степанов А.Н., Трунов В.И. Лабораторные и численные эксперименты по прохождению мощного лазерного фемтосекундного излучения через воздушную и капельную среды // *Оптика атмосф. и океана*. 2007. Т. 20. № 5. С. 413–419.
3. Siders C.W., Siders J.L.W., Omenetto F.G., Taylor A.J. Multipulse Interferometric Frequency-Resolved Optical Gating // *IEEE J. Quant. Electron*. 1999. V. 35. N 4. P. 432–440.
4. Zhang J.-Yu., Shreenath A.P., Kimmel M., Zeek E., Trebino R., Link S. Measurement of the intensity and phase of attojoule femtosecond light pulses using Optical-Parametric-Amplification Cross-Correlation Frequency-Resolved Optical Gating // *Opt. Express*. 2003. V. 11. N 6. P. 601–608.
5. Агранат М.Б., Анисимов С.И., Ашитков С.И. О механизме поглощения фемтосекундных лазерных импульсов при плавлении и абляции Si и GaAs // *Письма в ЖЭТФ*. 2006. Т. 83. Вып. 11. С. 592–595.
6. Поварницын М.Е., Итина Т.Е., Левашов П.Р., Хищенко К.В. Моделирование абляции металлических мишеней фемтосекундными лазерными импульсами // *Тез. XXII Междунар. конф. «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество»*. Черноголовка: ИПХФ, 2007. С. 26–27.
7. Захаров Н.С., Козлов А.В., Никонов А.В., Павлов В.А., Руденко В.В. Разрушение оптических покрытий в условиях квазиравномерного распределения интенсивности лазерного излучения // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 1997. Т. 61. № 7. С. 1306–1314.