

УДК 537.56,533.95

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2017 г. К. С. Хорьков, Д. А. Кочуев, А. С. Черников, Р. В. Чкалов,
С. М. Аракелян, В. Г. Прокошев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых
E-mail: freeod@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований филаментации фемтосекундного лазерного излучения в прозрачной среде. Представлены схемы регистрации плазменных каналов филаментов, конической эмиссии, пространственного распределения интенсивности излучения. Приведены результаты лазерного воздействия в режиме множественной филаментации на мишень из нержавеющей стали.

DOI: 10.7868/S0367676517120110

ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования дисперсионных свойств сред для управления пространственно-временным распределением интенсивности импульса и его спектральными параметрами в процессе нелинейного взаимодействия со средой представляет большой интерес для фундаментальных и прикладных аспектов современной нелинейной оптики.

Самофокусировка излучения является основной физической причиной формирования протяженных световых нитей – филаментов. В процессе филаментации фемтосекундного лазерного импульса происходит формирование плазменных каналов, генерация излучения суперконтинуума и конической эмиссии [1, 2]. Физическая причина самофокусировки – кубичная оптическая поляризуемость среды (нелинейность керровского типа), вызывающая самонаведенное увеличение показателя преломления в областях с высокой интенсивностью излучения и последующее сжатие лазерного пучка в поперечном направлении [3].

Импульсное излучение, пиковая мощность которого в десятки и более раз превышает критическую мощность самофокусировки, формирует множество филаментов. Это является неизбежным следствием пространственно-модуляционной неустойчивости интенсивного светового поля в среде с кубической нелинейностью [4]. Начальная стадия множественной филаментации определяется мелкомасштабной самофокусировкой во временных слоях импульса, в которых формируются нелинейные фокусы. Центрами зарождения нелинейных фокусов являются возмущения интенсивности

и фазы светового поля, которые могут быть обусловлены распределением излучения на выходной апертуре лазерной системы, естественными флуктуациями показателя преломления в среде и рассеянием на частицах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментальных схемах использовали две фемтосекундные лазерные системы: Ti:Sapphire-система, имеющая следующие параметры: длина волны $\lambda = 800$ нм, длительность импульса излучения $\tau = 50$ фс, частота повторения импульсов $f = 1$ кГц, энергия в импульсе $E_{\text{имп}} = 1$ мДж; Yb:KGW-лазерная система, имеющая следующие параметры: длина волны $\lambda = 1030$ нм, длительность импульса излучения $\tau = 280$ фс, частота повторения импульсов $f = 10$ кГц, энергия в импульсе $E_{\text{имп}} = 150$ мкДж.

На рис. 1 представлена экспериментальная схема регистрации плазменных каналов и обработки материалов в режиме множественной филаментации. Наблюдение за областью перетяжки лазерного излучения проводили в режиме реального времени. Цифровой микроскоп закрепляли на координатном столике с хуз-позиционированием. Возможность перемещения микроскопа позволяла сфокусировать его в области оптического пробы. Плазменные каналы филаментов и излучение конической эмиссии, рассеянное в образце, регистрировали через боковую грань образца [5].

На рис. 2 представлены изображения области перетяжки излучения при разных мощностях и средах. На рис. 2а представлены изображения

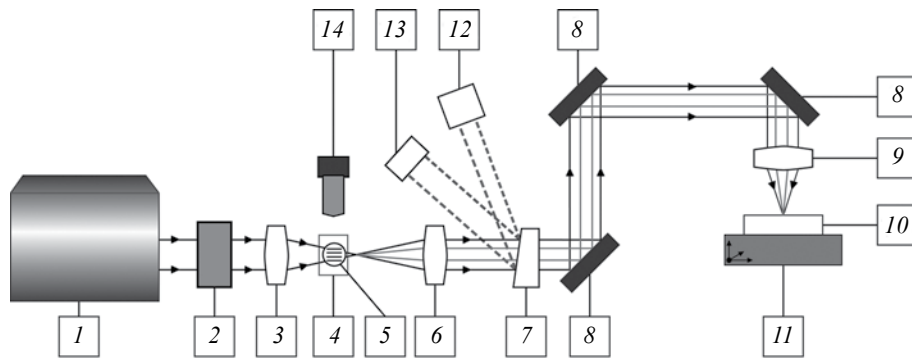


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – источник лазерного излучения, 2 – поляризационный ослабитель, 3 – фокусирующая линза, 4 – свободное место/образец (стеклянная пластина), 5 – область филаментации, 6 – коллимирующий объектив, 7 – оптический клин, 8 – глухое зеркало, 9 – объектив, 10 – образец, 11 – хуэ-позиционер, 12 – измеритель мощности, 13 – измеритель поперечного профиля распределения интенсивности лазерного излучения, 14 – система видеорегистрации.

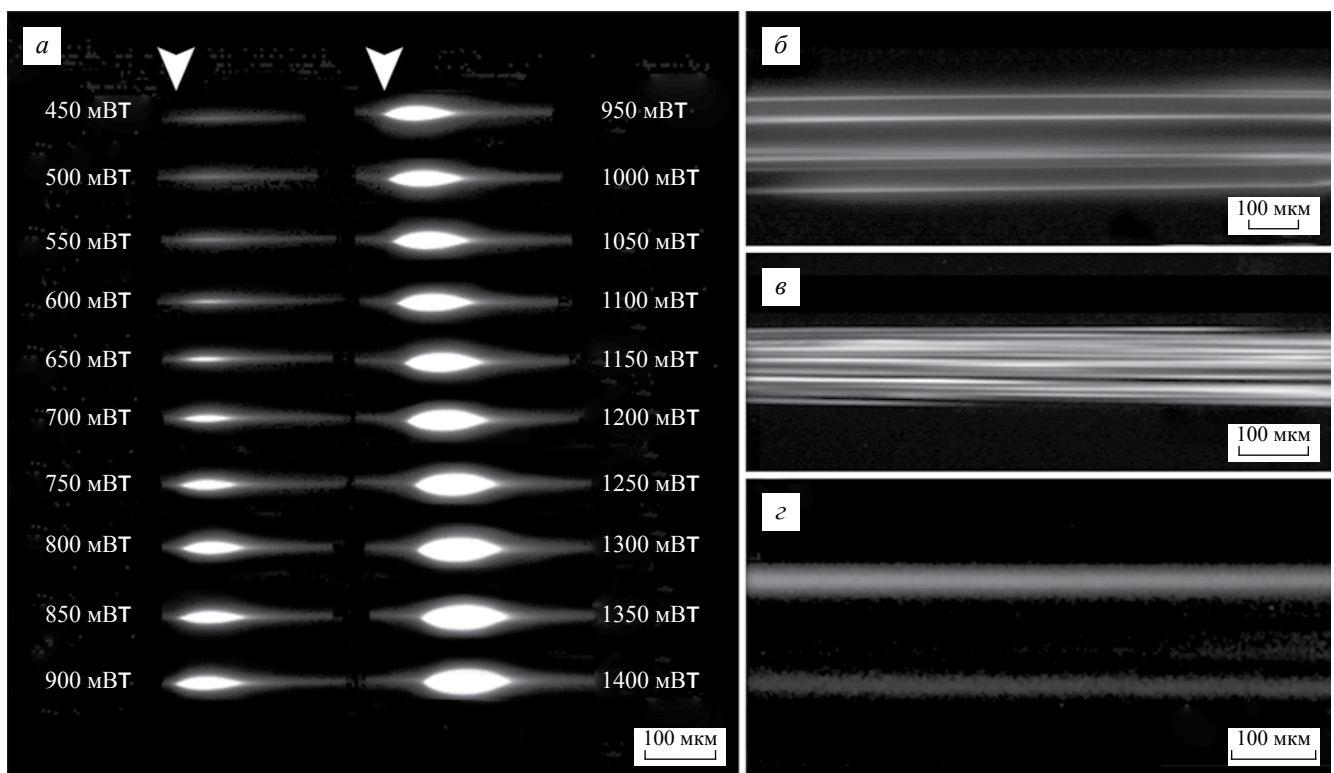


Рис. 2. Динамика изменения плазменных каналов: а – в воздухе; б–г – в стеклянном образце при различном увеличении.

области оптического пробоя воздуха в зависимости от роста мощности излучения (излучение распространяется справа налево). Стрелкой сверху указано положение геометрического фокуса линзы. Видно, что увеличение мощности импульса сопровождается удлинением светящегося образования в канале. Также заметны начало области оптического пробоя и геометрический фокус пучка, который при увеличении мощности смещается в сторону лазерного источника, что соответствует литературным данным.

При превышении критической мощности в несколько раз в образце возникает множественная филаментация. На микрофотографиях, представленных на рис. 2 (б–г), видна неоднородная структура области филаментации. Плазменные каналы филаментов наблюдались в области сечением 500 мкм, а длина отдельного филамента может достигать нескольких сантиметров.

Распределение интенсивности прошедшего через образец лазерного излучения регистрировалось с помощью измерителя профиля поперечного

пучка, который располагали сразу после образца до коллимирующего объектива на линейном трансляторе, позволяющем перемещать измерительную головку вдоль оси распространения лазерного излучения. За счет расходимости происходит смещение локальных максимумов относительно друг друга. Это говорит о том, что образовавшиеся филаменты в объеме образца не претерпевают никаких изменений в пространстве, распространяются без изменения относительного расположения в поперечном сечении лазерного пучка на протяженные расстояния. Данное явление позволяет осуществить управляемое воздействие филаментами лазерного излучения на материалы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Воздействие на материал филаментами лазерного излучения позволяет уменьшить размер образуемых отверстий вплоть до нескольких микрометров. Развитие методов использования нелинейных эффектов, инициируемых фемтосекундным лазерным излучением, обеспечивает реализацию новых технологий микрообработки материалов [6].

Проведение экспериментов при сканировании лазерным излучением по поверхности образца нержавеющей стали (SS304, состав: 70% Fe, 18% Cr, 8% Ni и др.) осуществлялось при различных скоростях (от 1 до 1000 $\text{мм} \cdot \text{с}^{-1}$) с помощью гальваносканера. Обработка осуществлялась таким образом, чтобы обеспечивалось перекрытие сфокусированного лазерного пучка (диаметр порядка 80 мкм) при каждой последующей линии сканирования. Геометрия эксперимента позволяет проводить обработку поверхности в пределах 100×100 мм. После рассмотрения обработанных образцов с помощью оптического микроскопа был проведен анализ на растровом электронном микроскопе (рис. 3), который показал, что на поверхности образцов образовались выделенные структуры в виде конусов или микроколон.

Обработка фемтосекундными лазерными филаментами приводит к структурированию поверхности с комбинированным на микро- и наноуровне рельефом, образованию оксидов основных элементов сплава, что позволяет получить сильное поглощение в широкополосном оптическом диапазоне. Высокая поглощающая способность структурированной поверхности обеспечивается совместным действием поверхностных микроколон и связанных с ними наноструктур. Эта особенность может найти применение в приложениях солнечной энергетики, теплообменных устройствах и биологическом зондировании.

На рис. 4 представлены РЭМ-изображения области воздействия фемтосекундного лазерного излучения при различном увеличении.

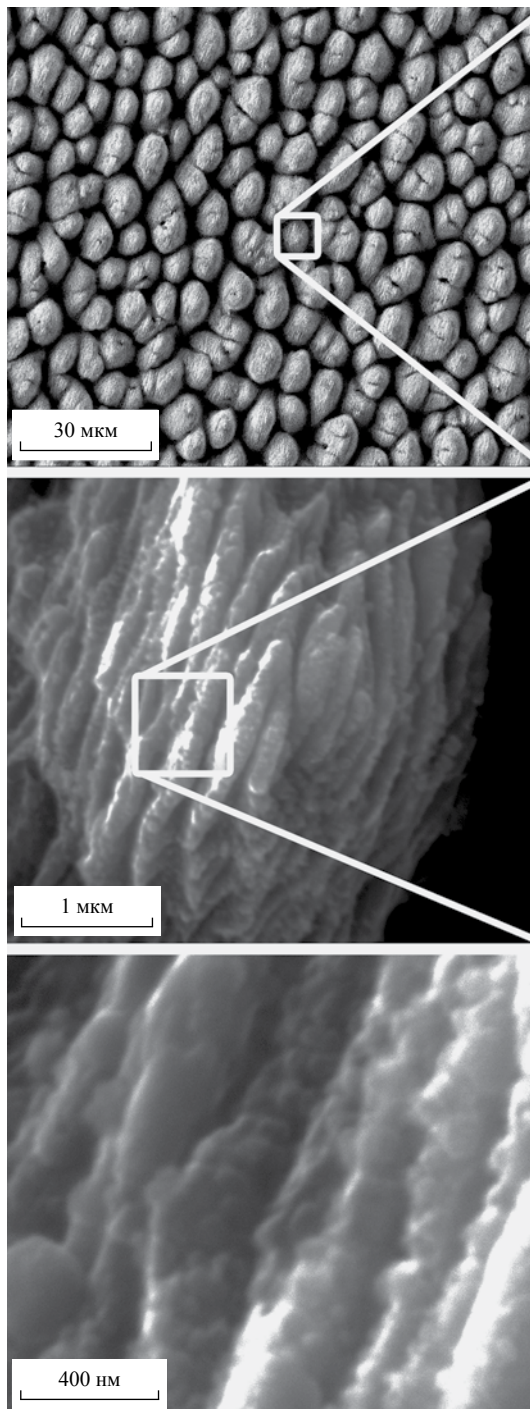


Рис. 3. РЭМ-изображения области воздействия лазерного излучения ($\lambda = 800$ нм, $\tau = 50$ фс, $P_{cp} = 400$ мВт, $f = 1$ кГц) на нержавеющую сталь (SS304).

Происходит модификация поверхности с образованием периодических структур, при этом, как видно на рисунках, общая картина рельефа поверхности меняется при различном масштабе. Происходит изменение направления ориентации поверхностных структур.

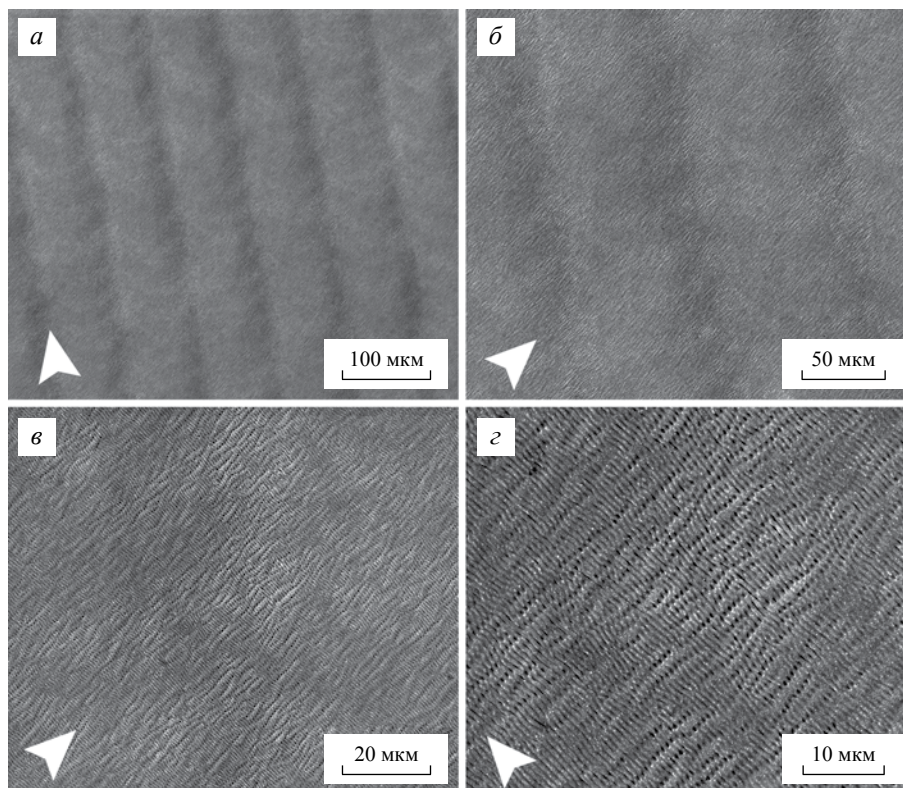


Рис. 4. РЭМ-изображения области воздействия лазерного излучения, стрелками указаны направления ориентации поверхностных структур ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 280$ фс, $P_{cp} = 1$ Вт, $f = 10$ кГц) на нержавеющую сталь (SS304).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований могут найти применение в микрофотонике, микрообработке материалов, в том числе записи волноводных структур. Образование филаментов с высокой плотностью мощности в нелинейном фокусе диаметрами до нескольких микрометров является актуальной задачей лазерной микрообработки поверхностей, в частности, формирования отверстий. Лазерное перфорирование тонких металлических пластин может найти применение в фильтрующих системах, матрицах, растровых микрооптических элементах. Использование лазерной обработки материалов может влиять на их оптические свойства, например, увеличивать поглощательную способность. Перспективна также лазерная обработка в среде специально подобранных жидкостей, в этом случае обеспечивается формирование микроструктур заданного химического состава. Например, лазерная обработка в среде жидкого азота позволяет создавать наноструктурированные слои нитридов металлов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ВлГУ ГБ-1106/17, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00760 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекалин С.В., Кандидов В.П. // УФН. 2013. Т. 183. № 2. С. 133.
2. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. // КЭ. 2009. Т. 39. № 3. С. 205.
3. Алексимов Д.В., Букин О.А., Быкова Е.Е. и др. // Прикл. физ. 2012. № 6. С. 14.
4. Кандидов В.П., Шленов С.А., Силаева Е.П. и др. // Опт. атм. и океана. 2010. Т. 23. № 10. С. 873.
5. Khorkov K.S., Kochuev D.A., Abramov D.V. et al. // Dynam. of Compl. Syst. XXI century. 2015. V. 9. № 4. P. 23.
6. Khorkov K.S., Kochuev D.A., Abramov D.V. et al. // Laser Opt. (LO). 2016 Intern. Conf. P. R8–52.