

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

PACS 79.20.Eb; 42.65.Jx; 42.65.Re

Формирование циклических внутриобъемных структур в прозрачных диэлектриках с помощью фемтосекундного лазера

С.К.Вартапетов, Д.В.Ганин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин

Представлены результаты экспериментов по созданию технологии прецизионной микрообработки материалов при фокусировке излучения фемтосекундных (ФС) лазерных импульсов в объем прозрачного материала, важной в частности, при обработке биоматериалов в офтальмологии. Определены условия возникновения и описаны некоторые характерные признаки особого режима микрообработки, когда при определенном соотношении между скоростью сканирования образца и частотой следования ФС импульсов разрушенная лазерным излучением область смещается вдоль оптической оси к объективу и обратно, формируя внутри образца циклические структуры. Предполагается, что основными причинами смещения области разрушения являются наведенное изменение показателя преломления и уменьшение порога разрушения вследствие изменения плотности и структуры материала в микрообласти, которая примыкает к границе полости, образовавшейся под действием предыдущего импульса. Результаты проведенного исследования с учетом влияния описанного режима были использованы в технологии прецизионной резки кристаллов, стекол, полимеров. Лучшее качество поверхностей реза достигается в условиях, исключающих возникновение такого режима. В образцах из поликарбоната, полиметилметакрилата и плавящего кварца получены цилиндрические полости с аспектными соотношениями более 200, направленные вдоль лазерного пучка, и микрокапилляры диаметром 1–2 мкм в направлении, перпендикулярном этому пучку.

Ключевые слова: фемтосекундный лазерный импульс, микроструктуры, филамент, взаимодействие фемтосекундного излучения с прозрачными диэлектриками, фоторазрушение, фокусировка в объем материала.

1. Введение

Фемтосекундные (ФС) лазеры являются предпочтительным инструментом для микро- и нанообработки материалов, производства фотонных и жидкостных устройств – волноводов, каплеров, оптоэлектронных систем, микрокапилляров [1] – на основе прозрачных полимеров, стекол и плавящего кварца [2–5]. С тех пор как была продемонстрирована высокая точность обработки различных биоматериалов с помощью ФС лазеров, появилась реальная возможность применять их в офтальмологии для коррекции кривизны роговицы и для удалению катаракты.

Полимеры, стекла, биоматериалы имеют очень малое линейное поглощение в случае излучения ближнего ИК диапазона, но при жесткой фокусировке такого излучения в них появляется сильное нелинейное поглощение. В области фокальной перетяжки объектива это ведет к образованию плазменного микроканала, к изменению показателя преломления Δn на оси и в окрестности микроканала и, в конечном счете, к оптическому пробую и микроразрушению материала [6–10]. Поскольку все эти процессы имеют сильно нелинейный и, следовательно, пороговый характер, то подбором интенсивности чуть выше порогового значения, характерного для данного процесса, можно достичь субдифракционного качества обработки материала. Достоинство данного метода –

возможность локального воздействия на небольшие (объемом до нескольких кубических микрометров) зоны внутри прозрачных образцов, не затрагивающего прилегающие области, в том числе те, по которым распространялось излучение.

В последнее время появился ряд работ по формированию пустот внутри образцов SiO_2 с заданными наноразмерными параметрами с помощью ФС лазера [11, 12]. В работе [13] сообщалось о формировании полостей диаметром $d \sim 200$ нм и длиной $l \sim 20$ мкм на глубине 20–70 мкм. Считается, что происхождение таких высокоаспектных ($l/d \gg 1$) пустот и их характеристики связаны с самофокусировкой ФС импульса в кварце. Влияние теплового накопления при высоких частотах следования ФС импульсов на изменение показателя преломления Δn в области фокальной перетяжки исследовано в [14, 15]. Образование вытянутых микрополостей при воздействии ФС импульса вследствие быстрого уплотнения материала, приводящего к локальному разрыву области воздействия, продемонстрировано в [16] и также объясняется эффектом самофокусировки.

Помимо самофокусировки, для формирования сильно вытянутых в направлении пучка пустот и филаментов с измененным показателем преломления важную роль играет продольная сферическая аберрация (СА), которая может значительно модифицировать профиль распределения интенсивности в фокальной перетяжке [17, 18]. В работе [19] исследовано влияние так называемой собственной СА, эффекта самофокусировки, а также продольной (интерфейсной) СА, возникающей на границе воздух–стекло, на длину люминесценции плазменного канала (филамента) в образцах SiO_2 при фокусировке в них ФС импульсов. Наличие капиллярного эффекта,

С.К.Вартапетов, Д.В.Ганин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, 142190, Москва, Троицк; e-mail: svart@pic.troitsk.ru

Поступила в редакцию 8 апреля 2014 г., после доработки – 2 декабря 2014 г.

а также измерения с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) подтвердили, что микроразрушение (модификация) внутри образца в виде филамента представляет собой цилиндрическую полость с достаточно качественной поверхностью [20, 21].

Для решения многих задач необходима точная фокусировка энергии лазерного излучения в микрообласти внутри обрабатываемого объекта. Однако при наличии продольной сферической aberrации форма внутренних микроразрушений при ФС микрообработке может сильно отличаться от сферической и иметь вид филаментов, форма и размеры которых зависят от параметров ФС лазера, образца и условий эксперимента [19, 22].

Целью настоящей работы являлось определение условий возникновения ранее недостаточно изученного явления, заключающегося в том, что в прозрачных диэлектриках область микроразрушения, образованная сфокусированным ФС лазерным излучением, самоиндуцированно смещается по глубине к объективу и обратно, образуя внутри образца циклические структуры с характерным набором признаков. Исследование технологии формирования и подавления таких структур и демонстрация возможности использования полученных результатов при обработке материалов также является целью работы.

2. Экспериментальная установка, образцы, методика эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис.1,а. Источником фемтосекундных лазерных импульсов была лазерная система RYF-10/35 («Авеста-Проект») со следующими параметрами излучения: длина волны 1025 нм, частота следования импульсов f от 1 Гц до 2 кГц, энергия импульса 150 мкДж, длительность импульса менее 350 фс, диаметр выходного пучка 3.2 мм по уровню 1/е.

Энергия импульсов регулировалась attenuатором, состоящим из пластины $\lambda/2$ и поляризатора. Для расширения лазерного пучка служил телескоп VIS-YAG 4X (LINOS) с увеличением 4 \times .

В экспериментах использовался объектив 54-18-23-1064 (Special Optics) с NA = 0.39. Объектив устанавливался на z-транслятор, что позволяло управлять глубиной фокусировки излучения в образец, установленный перпендикулярно пучку на x-y-трансляторе 8MT173-50 (Standa), ко-

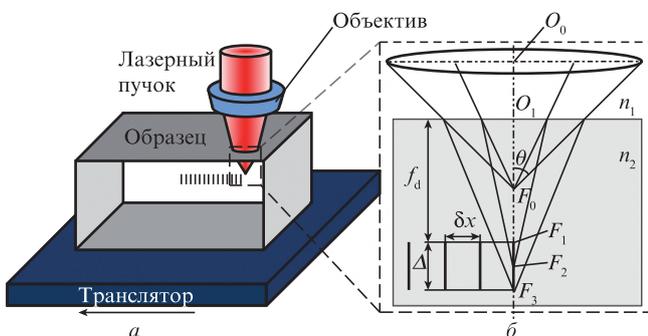


Рис. 1. Схема фокусировки ФС импульсов в объем образца (а) и ход лучей при их фокусировке (б); F_0 – геометрический фокус в воздухе, F_1 – фокальная точка при параксиальной аппроксимации, $f_d = nO_1F_0$ – глубина фокусировки, F_3 – фокальная точка периферийных лучей, $\Delta = f_d/n[(n^2 - NA^2)/(1 - NA^2) - n]^{1/2}$ – длина фокальной перетяжки с учетом сферической aberrации на границе раздела воздух–образец [19], δx – расстояние между центрами пятен фокусировки.

торый имел максимальную скорость сканирования до 800 мкм/с. Для измерения мощности применялся датчик PD300-1W (350–1100 нм) и измеритель мощности Nova (Ophir Photonics).

В экспериментах использовались образцы из поликарбоната (ПК), представляющие собой пластины 50x20x3 мм с полированными гранями. На рис.2 представлены снимки следов воздействия ФС импульсов в виде гребенки треков различной длины. Лазерный пучок падает сверху, образец смещается перпендикулярно пучку. Каждая область разрушения (филамент) соответствует одному импульсу. Видно, что филаменты отделены друг от друга и имеют высокий контраст. Снимки получены с помощью микроскопа NIKON LV100D. Диаметр сечения филаментов на половине их длины составил 2 ± 0.05 мкм. Разрушение в виде филаментов отчетливо наблюдалось при интенсивности излучения $I \sim 8 \times 10^{13}$ Вт/см 2 , пороговые точечные разрушения – при $I \sim (1-2) \cdot 10^{13}$ Вт/см 2 . За время между импульсами $\tau = 10^{-2}$ с ($f = 100$ Гц) и при скорости перемещения образца $v_{sc} = 800$ мкм/с образец смещается на шаг $\delta x = v_{sc}/f$, что составляет 8 мкм, и, сделав 12 таких шагов, останавливается. На следующем участке из 12 шагов (96 мкм) энергия импульса увеличивается. Таким образом, серии, разделенные «точками стояния» ($v_{sc} = 0$), представляют собой гребенки филаментов, созданных на постоянной глубине фокусировки f_d при различных энергиях импульса для каждого отдельного участка. Результаты обработки снимков показали, что длина филамента увеличивается с ростом энергии им-

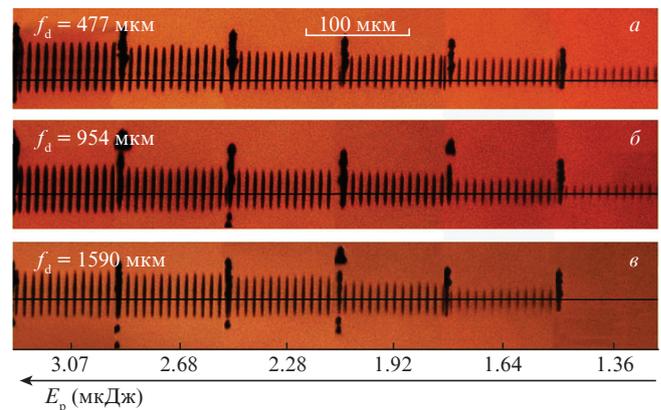


Рис. 2. Филаменты, полученные при облучении ФС импульсами ПК при различных глубинах фокусировки f_d (горизонтальная линия) и энергиях E_p ; NA = 0.39 (вид сбоку).

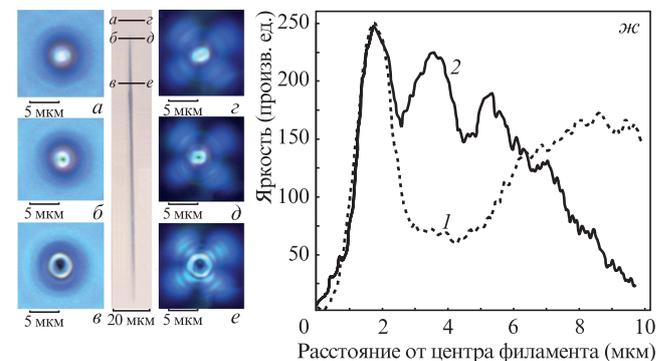


Рис. 3. Микрофотографии единичного филамента и его поперечных сечений, снятых в естественном свете (1; а, б, в) и в скрещенных поляризаторах (2; г, д, е), а также зависимости яркости свечения от расстояния до центра филамента (ж), построенные по снимкам в и е.

пульса и глубины фокусировки, а Δ изменяется по закону, близкому к линейному ($\Delta \propto f_d$).

На рис.3 (в центре) представлен вид сбоку единичного филамента и нескольких его поперечных сечений при наблюдении в скрещенных поляризаторах и в проходящем свете. Видно, что кольцевая область в окрестности разрушения имеет большую яркость, сменяясь зоной с меньшей, по сравнению с фоновой засветкой, яркостью (рис.3,б,в). Кольцевая структура наблюдается на всей длине филамента. Это может быть связано с изменением показателя преломления в окрестности филамента и, как следствие, вести к дополнительной подфокусировке следующего импульса в зону, расположенную ближе к объективу. Из рис.3,г–е видна оптическая анизотропия в окрестности филамента, свидетельствующая об остаточных механических напряжениях в образце и о модификации его микроструктуры, что может вести к снижению порога разрушения для следующего импульса. По этим микроснимкам (рис.3,в,е) построены радиальные профили распределения яркости свечения, соответствующие наведенному Δn (кривая 1) и остаточному (кривая 2) напряжению в окрестностях филамента (рис.3,ж).

Согласно рис.3,ж область модификации много больше области разрушения и области наведенного показателя преломления. Полученные зависимости имеют максимумы вблизи стенок филамента. Непосредственно перед острым разрушенной областью также наблюдается (рис.3,а–г) цилиндрический участок длиной 7–10 мкм с повышенной яркостью и остаточными механическими напряжениями. Такова общая картина изменений структуры образца после воздействия пространственно разделенных одиночных импульсов: канал разрушения окружен оболочкой с наведенным Δn и областью с модифицированной микроструктурой большего размера.

3. Формирование циклических внутриобъемных пространственных структур

Совсем иная картина наблюдается при сканировании образца с перекрытием пятен фокусировки излучения. Хорошо известно [23], что степень перекрытия играет важную роль в процессе микрообработки практически любых материалов. Для того чтобы определить роль этого параметра применительно к нашему случаю, был поставлен следующий эксперимент. Образец устанавливался на трансляционный столик (см. рис.1) и перемещался перпендикулярно пучку излучения слева направо с дискретным набором скоростей $v_{sc} = 40–280$ мкм/с. Частота следования ФС импульсов $f = 100$ Гц, энергия импульса $E_p = 1.1$ мкДж, глубина фокусировки в образце $f_d \approx 1$ мм. На рис.4 представлены следы воздействия ФС импульсов при различных v_{sc} в виде наклонных полостей разрушения в образцах поликарбоната. Скорость v_{sc} в каждой строке постоянна, E_p постоянна для всех строк (рис.4,а).

Анализ этого рисунка позволяет выявить набор признаков, характерных для исследуемого режима. При сканировании образца область разрушения смещается также и по направлению к объективу от импульса к импульсу, затем возвращается в исходное положение (на глубину f_d), и далее следует очередной цикл. Число импульсов, задействованных в одном цикле, т.е. в формировании одной полости, уменьшается с ростом скорости сканирования.

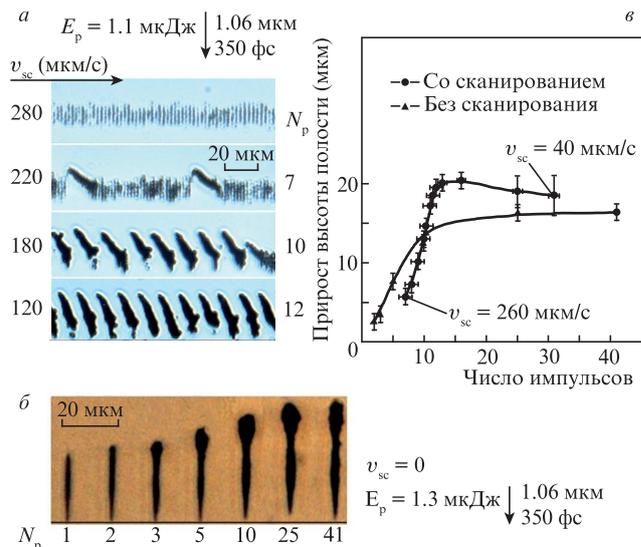


Рис.4. Микрофотографии объемных разрушений образца из ПК, созданных ФС импульсами при различных скоростях сканирования ($E_p = 1.1$ мкДж, $f = 100$ Гц) (а) и при $v_{sc} = 0$ ($E_p = 1.3$ мкДж) (б), а также зависимость суммарного увеличения длины разрушения от числа импульсов N_p , входящих в один цикл (в).

Длина каждой полости также уменьшается с ростом v_{sc} , при этом угол наклона этих внутренних полостей к направлению сканирования уменьшается по мере роста v_{sc} .

На рис.4,в представлено увеличение длины разрушения Δz за один цикл по сравнению с начальной длиной разрушения при одиночном импульсе (строка 280 мкм/с на рис.4,а), когда взаимодействие филаментов отсутствует. В этом случае суммарная длина полости может более чем в два раза превышать длину исходного филамента. Вместе с тем при $v_{sc} = 0$ происходит быстрый рост филамента (за 9–10 импульсов), затем наступает насыщение увеличения длины разрушения с одновременным увеличением его сечения при почти постоянной длине филамента. Для сравнения на рис.4,б и в представлены следы разрушения в отсутствие сканирования и зависимость роста длины разрушения от числа импульсов N_p .

4. Обсуждение результатов

Поскольку в этом эксперименте изменялся только параметр v_{sc} , то очевидно, что все наблюдаемые явления связаны с параметром $\delta x = v_{sc}/f$. Известно, что ФС импульсы, сфокусированные внутри образца, могут вызывать различные модификации структуры материала, такие как полное разрушение материала в области перетяжки, деполимеризация, увеличение плотности вещества и другие [24, 25]. Следствием этого является изменение оптических характеристик материала (поглощение, рассеяние и преломление света), появление оптической анизотропии из-за остаточных механических напряжений, а также снижение порога пробоя в результате изменения структуры и частичного разрушения материала в непосредственной близости от филамента [26, 27]. На рис.3 и 5 представлены снимки, подтверждающие сказанное. Особый интерес представляет рис.5,а, поскольку на нем отчетливо просматривается филамент, окруженный оболочкой с более высокой яркостью свечения и яркие полосы, являющиеся, очевидно, волноводами (рис.5,г).

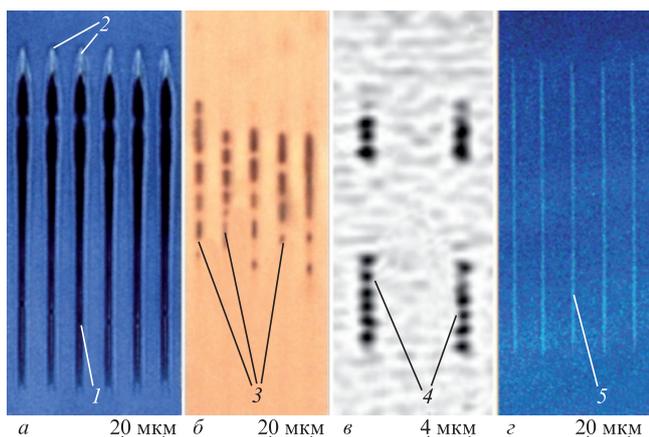
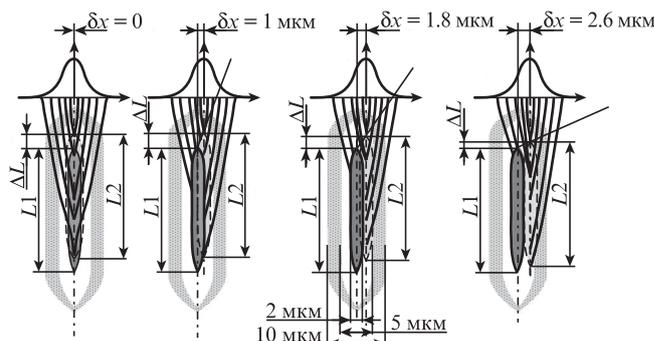


Рис.5. Модификация структуры материала под действием одиночных ФС импульсов для ПК (*a*, *с*), ПММА (*б*) и плавленого кварца (*в*). Указаны области разрушения в виде филамента (*1*), изменения показателя преломления вне зоны разрушения (*2*), границы жидкой (ММА) и газообразной (в виде мениска) фаз (*3*), цепи областей разрушения в виде полых сфер (*4*) и внутриобъемных волноводных структур (*5*).

Для разработки технологии создания внутриобъемных воспроизводимых структур (или технологии их подавления) важно понимание процесса воздействия сфокусированного излучения последующего импульса на модификацию, оставленную в материале предыдущим импульсом. На рис.6 представлены предполагаемые схемы такого воздействия для случаев $v_{sc} = 0$ (*a*) и $v_{sc} \neq 0$ (*б*, *в*, *г*). После воздействия ФС импульса в образце образуется область разрушения в виде филамента диаметром порядка 2 мкм, окруженная оболочкой с повышенными плотностью $\Delta\rho$ [28] и показателями преломления Δn (рис.5,*a*), а также оболочкой с измененной микроструктурой большего диаметра, о чем свидетельствует наличие остаточных механических напряжений (рис.3,*г*–*е*). Такие представления не противоречат результатам работ [28–30], в которых показано, что в полиметилметакрилате (ПММА), поликарбонате (ПК) и других полимерах при изготовлении брэгговских структур и волноводов в объемных образцах основной вклад в изменение Δn вносят изменение плотности $\Delta\rho$ и структурные изменения материала.

В настоящее время количественных данных по изменению Δn под действием ФС импульсов недостаточно. Однако в [31, 32] сообщается об изменении Δn в ПК до 1×10^{-4} (при тех же условиях в ПММА $\Delta n \approx 0,4 \times 10^{-4}$); более того, в ПММА, по физическим и оптическим свойствам схожем с ПК, подбором условий эксперимента достигается изменение Δn от $0,4 \times 10^{-4}$ до 4×10^{-3} [33–35]. С использованием этих данных и схемы хода лучей, представленной на рис.6, было рассчитано удлинение полости ΔL при различном смещении образца относительно оси объектива и без смещения. В этих оценочных расчетах, целью которых было качественное объяснение результатов эксперимента, величина $\Delta n \approx 2 \times 10^{-3}$ из приведенного выше диапазона изменений Δn дала наилучшее соответствие экспериментальным результатам. Из рис.6,*a* видно, что при $v_{sc} = 0$ основная часть лучей второго и последующих импульсов фокусируется в разрушенную область, где они почти полностью поглощаются, в результате чего увеличивается диаметр области.

При наличии смещения (рис.6,*б*–*г*) основная часть лучей фокусируется в области с измененным показателем преломления Δn , что приводит к дополнительной фоку-



- Последствия воздействия первого импульса:
- Область остаточных механических напряжений
 - Область с изменением показателя преломления
 - Разрушенная область
- Последствия разрушения второго импульса:
- ⊖ Область разрушения после воздействия второго импульса

Рис.6. Предполагаемая схема формирования наклонных полостей: модификации материала под действием первого ФС импульса и ход лучей при фокусировке второго гауссова импульса без смещения (*a*) и со смещением (*б*, *в*, *г*); L_1 – длина полости, образованной первым импульсом, L_2 – длина полости, образованной вторым импульсом, ΔL – прирост длины полости.

сировке излучения, к изменению ΔL и к образованию полых структур с различным наклоном, причем угол наклона уменьшается по мере роста v_{sc} и δx . Следует отметить, что такие значения ΔL получены без учета структурных изменений материала и их пространственной конфигурации на границе с полостью, которые могут снизить порог разрушения в этой области, увеличить размер и изменить форму разрушения после воздействия следующего импульса. Из рис.4,*б* видно, что при числе импульсов $N_p \geq 2$ увеличивается сечение филамента, особенно в его головной части, а следовательно, изменяется его форма. При $N_p \geq 5$ этот процесс становится доминирующим, что, видимо, и приводит к насыщению роста длины филамента, а затем и к прекращению роста при $N_p \geq 40$ (рис.4,*в*). Такое поведение, вероятно, связано с тем, что упомянутые ранее оболочки с повышенными Δn (рис.5,*a*) и $\Delta\rho$, а также изменение микроструктуры материала имеют сложную пространственную конфигурацию и соответствуют более сложному распределению интенсивности излучения и плотности электронов в области геометрического фокуса, такому, например, как в [27] (рис.7).

Самоиндуцированное смещение области разрушения ФС лазерным излучением внутри образца при его сканировании наблюдается и в случае высокочастотных (0.5 – 2 МГц) режимов микрообработки. На рис.8 представлены снимки микроразрушений в ПК при использовании нами лазера с $f = 2$ МГц, $\tau_p = 300$ фс, $E_p = 150$ нДж. Видно, что картина схожа с наблюдаемой при низких частотах, однако есть и существенные различия. Например, число импульсов в цикле при $f = 2$ МГц почти в 100 раз больше, чем при $f = 100$ Гц; прирост Δz для этих значений f имеет максимум при $\delta x \sim 0.02$ и 1 мкм соответственно (рис.9). При этом структуры могут иметь вид капель, клякс, перемычек с контурами, похожими на оплавленные, т.е. наиболее вероятно, что механизм их образования – тепловой. Действительно для ПК с коэффициентом термодиффузии $D \approx 1.43 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [36] время теплоотвода из объема диаметром $d \sim 2$ мкм есть $\tau_D = d^2/4D \approx 7 \times 10^{-6} \text{ с}$ [23].

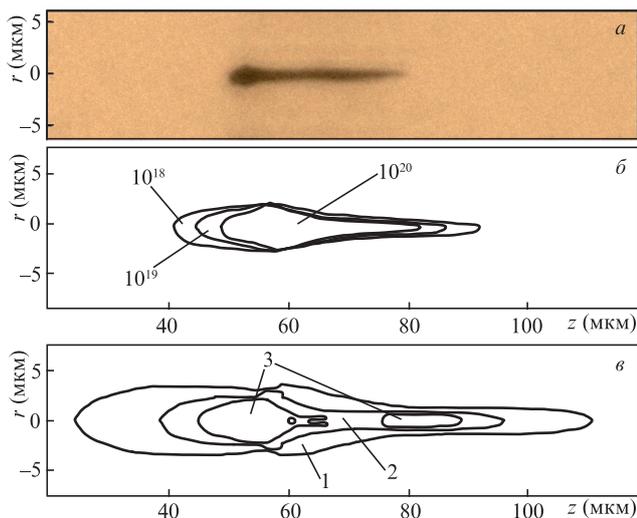


Рис.7. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов: фотография полости, образованной тремя импульсами в ПК (1025 нм, 350 фс, $E_p=1.3$ мкДж, 100 Гц, $NA = 0.39$) – настоящая работа (а); числовая симуляция (кривые являются изолиниями концентрации электронов 10^{18} , 10^{19} , 10^{20} см $^{-3}$) при 800 нм, 160 фс, $NA = 0.5$, 1 мкДж (б); числовая симуляция (кривые являются изолиниями плотности энергии 1, 2 и 3 Дж/см 2) при 800 нм, 160 фс, $NA = 0.5$, 1.1 мкДж (в). Расчетные данные для кварца взяты из [27].

Таким образом, если $f \ll 1$ МГц, то все тепловые процессы успевают завершиться к приходу следующего импульса, и такой режим практически не отличается от одноимпульсного. Для высоких частот f ситуация меняется. Если энергия E_p равна пороговой или даже меньше ее, то тепло, переданное в фокальный объем, при воздействии серии импульсов не успевает диффундировать и начинает накапливаться в нем, температура фокального объема возрастает и тепло, выходя из него, нагревает и расплавляет прилегающие микрообласти.

Учет представлений о формировании циклов в случае сканирования образца при высокочастотном режи-

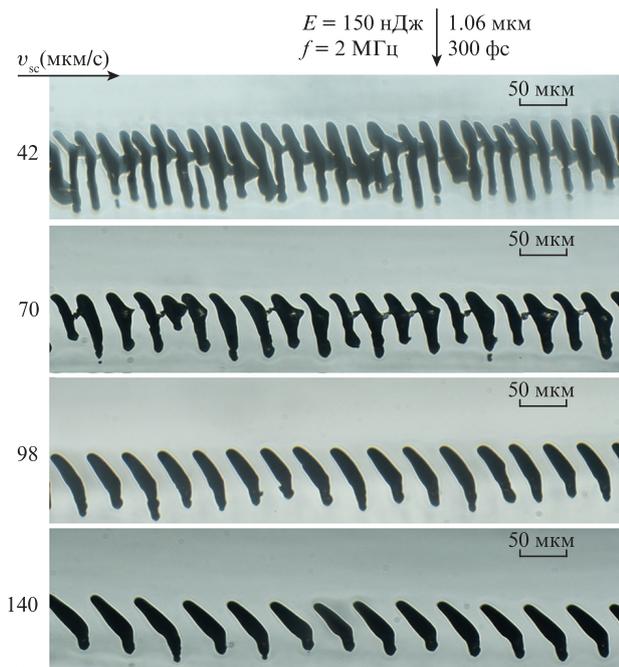


Рис.8. Микрофотографии объемных разрушений образца ПК ФС импульсами при различных скоростях сканирования; $NA = 0.39$.

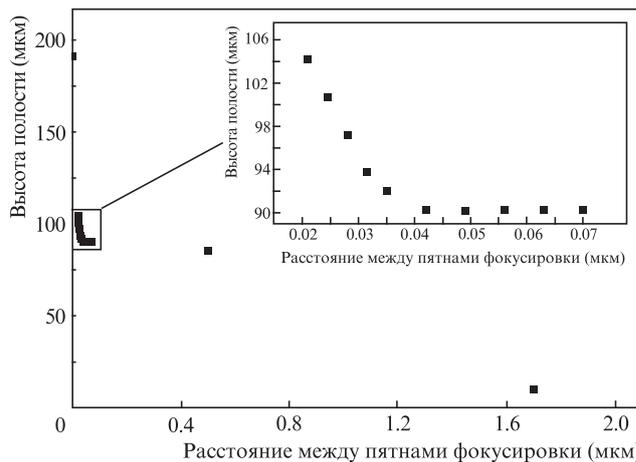


Рис.9. Зависимость высоты полости от расстояния между соседними пятнами фокусировки. $NA = 0.39$, $E_p = 150$ нДж, $f = 2$ кГц.

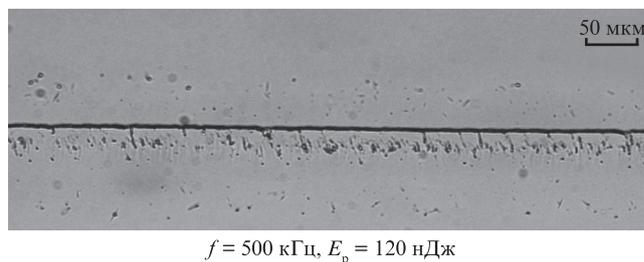


Рис.10. Микрофотография микрокапилляра; $f = 500$ кГц, $E_p = 120$ нДж, $v_{sc} = 600$ мкм/с, $NA = 0.39$.

ме обработки и тщательный подбор условий эксперимента позволил создать в образце ПК микрокапилляр, перпендикулярный оптической оси. На рис.10 представлена такая полая структура, созданная при $f = 500$ кГц, $v_{sc} = 600$ мкм/с и уменьшении энергии импульса до 120 нДж. Видно, что капилляр является результатом перекрытия огромного числа наклонных субмикронных полостей, возникающих при самоиндуцированном смещении пятна разрушения к объективу, максимальном для данных условий.

Результаты проведенного исследования были использованы для реализации прецизионной резки и скрайбирования прозрачных диэлектриков ФС лазером (рис.11, 12). Полимерный коронарный стент из поли-л-лактида (ПЛЛ) диаметром 1.4 мм был разрезан по спирали

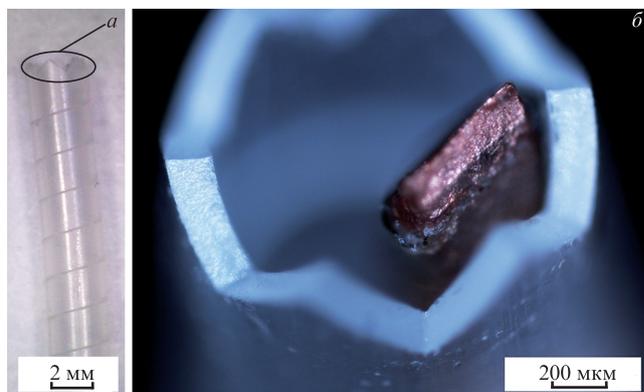


Рис.11. Фотография медицинского полимерного коронарного стента из ПЛЛ, разрезанного по спирали; $E_p = 40$ мкДж, $f = 2$ кГц, $v_{sc} = 800$ мкм/с, $NA = 0.39$.

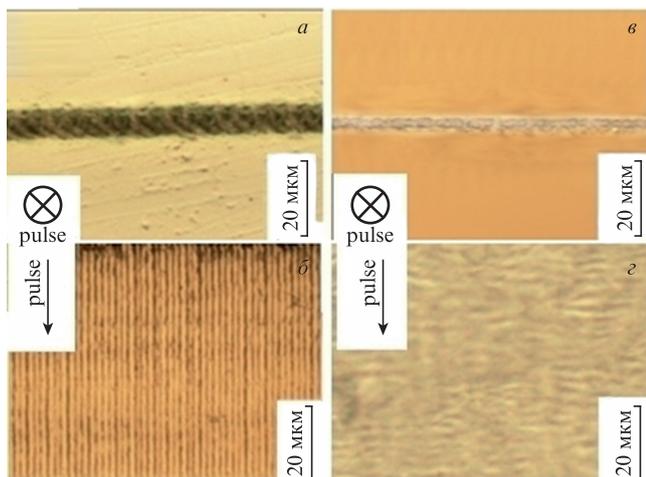


Рис.12. Микроснимки реза образца ПК толщиной 3 мм, ширина реза 4 мкм (вид реза сверху (а) и вид его поверхности (б)), а также стекла ВК7 толщиной 1.03 мм, ширина реза 2 мкм (вид реза сверху (в) и вид его поверхности (д)); $E_p = 10$ мкДж, $NA = 0.545$, $v_{sc} = 800$ мкм/с, $f = 200$ Гц.

(рис.11,а). Качество реза можно оценить из рис.11,б. Образец из ПК (рис.12,а) толщиной 3 мм разрезан на две части. Ширина реза составила 4 мкм. Шероховатость поверхности $R_z \leq 1.5$ мкм. С использованием этой же методики были разрезаны образцы из кварцевого оптического стекла ВК7 (рис.12,б), шероховатость поверхности $R_z \leq 2.5$ мкм. Наиболее качественный рез достигается при таких параметрах эксперимента, когда циклический режим разрушения не возникает.

Таким образом, гибкое использование результатов проведенных исследований в технологии микрообработки прозрачных материалов и подбор оптимальных параметров эксперимента для каждого материала позволяют добиться улучшения качества реза.

5. Заключение

Осуществляя сканирование прозрачных материалов ФС излучением, путем подбора его параметров можно добиться различных режимов и результатов обработки. Так, сканирование одиночными, пространственно разделенными импульсами с энергией вблизи порога пробоя приводит к созданию ряда отдельных филаментов или волноводов, ориентированных по направлению пучка. В случае сканирования образца импульсами с энергией, меньшей порога разрушения, но при значительном перекрытии пятен фокусировки формируются линейные полости, направленные перпендикулярно лазерному пучку. Нами были исследованы условия возникновения и определены характерные признаки промежуточного режима, при котором в процессе сканирования образца область разрушения при каждом следующем импульсе смещается также по направлению к объективу и, достигнув некоторого предельного значения, возвращается на линию геометрического фокуса, формируя в объеме полую периодическую структуру. Основным условием возникновения описанного режима является попадание пятна фокусировки излучения последующего импульса в микрообласть необратимых изменений материала, произведенных предыдущим

импульсом. Предполагается, что основными причинами смещения области разрушения при облучении последующими импульсами и возникновения такого режима являются изменение показателя преломления и уменьшение порога разрушения вследствие изменения плотности $\Delta\rho$ и структуры материала в микрообласти, примыкающей к стенке полости, созданной предыдущим импульсом.

Показано, что результаты проведенного исследования могут быть использованы в технологии прецизионной резки, скрайбирования и создания различных структур внутри прозрачных диэлектриков (ПУ, ПЛЛ, плавленый кварц) ФС лазерным излучением. Лучшее качество микрообработки достигается при отсутствии циклического режима.

Авторы выражают благодарность А. С. Сувориной за помощь в проведении экспериментов.

- Gattass R.G., Mazur E. *Nature Photon.*, **2**, 219 (2008).
- Farson D.F., Choi H.W., et al. *J. Micromech. Microeng.*, **18**, 035020 (2008).
- Kim T.N., Campbell K., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 201106 (2005).
- Gomez D., Tekniker F., et al. *Opt. Eng.*, **44**, 051105 (2005).
- Li X., Hofmeister W., Shen G., Davis L., Daniel C. *Proc. Materials and Processes for Medical Devices (MPMD) Conference and Exposition* (Palm Desert, USA, 2007).
- Stuart B.C., Feit M.D., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, 459 (1996).
- Schaffer C.B., Brodeur A., et al. *Opt. Lett.*, **26**, 93 (2001).
- Burakov I.M., Bulgakova N.M., et al. *J. Appl. Phys.*, **101**, 043506 (2007).
- Nikumb S., Chen Q., Li C., Reshef H., Zheng H.Y., Qiu H., Low D. *Thin Sol. Films*, **477**, 216 (2005).
- Davis K.M., Miura K., et al. *Opt. Lett.*, **21**, 1729 (1996).
- White Y.V. et al. *Opt. Express*, **16**, 14411 (2008).
- White Y.V., Parrish M., Li X., Davis L.M., Hofmeister W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7039**, 70390J (2008).
- Toratani E., Kamata M., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 171103 (2005).
- Lenzner M., Kruger J., et al. *Rev. Lett.*, **80**, 4076 (1998).
- Gattass R.R., Cerami L.R., Mazur E. *Opt. Express*, **14**, 5279 (2006).
- Glezer E.N., Mazur E. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 882 (1997).
- Pu J., Zhang H. *Opt. Commun.*, **151**, 331 (1998).
- Karman G.P., Van Duijl A., Woerdman J.P. *J. Mod. Opt.*, **45**, 2513 (1998).
- Sun Q., Jiang H., et al. *Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **7**, 655 (2005).
- Watanabe W., Tome T., Yamada K., Nishii J., Hayashi K., Itoh K. *Opt. Lett.*, **25**, 1669 (2000).
- Sowa S., Watanabe W., Nishii J., Itoh K. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc.*, **81**, 1587 (2005).
- Saerchen E., Liedtke S., Schlage F., Will F., Lubatschowski H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8803**, 880305 (2013).
- Lubatschowski H., Rathjen C. Patent № US20070055221 (2007).
- Schaffer C., Brodeur A., Nishimura N., Mazur E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3616**, 143 (1999).
- Juodkazis S., Nishimura K., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **96** (16), 166101 (2006).
- Liu D., Li Y., Liu M., et al. *Appl. Phys. B*, **91**(3–4), 597 (2008).
- Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. *Phys. Rev. B*, **71**, 125435 (2005).
- Poumellec B., Lancry M., et al. *Opt. Mater. Express*, **1**, 766 (2011).
- Mochizuki H., Watanabe W. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091120 (2008).
- Zoubir A., Lopez C., et al. *Opt. Lett.*, **29**, 1840 (2004).
- Mochizuki H. et al. *Thin Sol. Films*, **518**, 714 (2009).
- Mochizuki H., Watanabe W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7585**, 75850B (2010).
- Sowa S., Watanabe W., et al. *Opt. Express*, **14**, 291 (2006).
- Hirono S., Kasuya M., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 241122 (2009).
- Baum A., Scully P.J., et al. *Opt. Lett.*, **32**, 190 (2007).
- Zhang X., Hendro W., et al. *Intern. J. Thermophys.*, **23**, 1077, (2002).