

УДК 621.9.048.7

**А.Н. Малов¹, А.М. Оришич¹, А.В. Достовалов²,
А.Г. Кузнецов², С.А. Бабин²**

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО CO₂-, ВОЛОКОННОГО НАНОСЕКУНДНОГО И ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ

Применение импульсно-периодических CO₂- и волоконного лазеров для лазерной микро-обработки и, в частности, для гравировки различных материалов подробно описано в литературе. Однако большинство работ выполнены на установках, имеющих различные энергетические и временные характеристики, что не позволяет получить однозначное представление о связи физических процессов, происходящих при микрообработке, с параметрами лазеров. В статье проанализированы тепловые процессы плавления и испарения материалов при воздействии на них импульсного лазерного излучения в микро-, нано- и фемтосекундном диапазоне времени. Показано, что соотношение этих процессов обеспечивает качество изготовления отверстий.

Ключевые слова: CO₂-лазер, волоконный лазер, микрообработка материалов, фемтосекундный лазер.

**A.N. Malov¹, A.M. Orishich¹, A.V. Dostovalov²,
A.G. Kuznetsov², S.A. Babin²**

¹ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute for Automation and Electrometry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PULSE-PERIODIC CO₂-, FIBER NANOSECOND AND FEMTOSECOND LASERS FOR MICRO-DRILLING

Application of the periodic pulse CO₂-lasers and fiber lasers for micro-machining, and in particular for engraving on various materials is described in detail in the literature. However, most of the works is carried out on setups with different energy and temporal characteristics that can not give an unambiguous representation of the relationship between physical processes in micromachining and laser pa-

rameters. The paper provides an analysis of thermal processes at melting and evaporation of materials exposed to the pulsed laser radiation of micro-, nano- and femtosecond time scale. It is shown that the ratio of these processes influences the quality of laser drilling.

Keywords: CO₂-laser, fiber laser, material processing, micro-machining, femtosecond laser.

Введение

Для обработки материалов широко используются классические твердотельные (Nd:YAG) и газовые CO₂-лазеры, технология которых достаточно хорошо отработана [1, 2]. Однако в последние годы все большее распространение получают волоконные лазеры, обладающие высокой стабильностью, качеством пучка, компактностью и другими преимуществами. В частности, для маркировки поверхности широко применяются наносекундные волоконные импульсные лазеры с модуляцией добротности резонатора и волоконным усилителем [3, 4]. Для прецизионной микрообработки и микроструктурирования поверхности (в том числе прозрачных материалов) используются пикосекундные и фемтосекундные лазеры [5].

Наиболее распространенной технологией микрообработки материалов с использованием промышленных лазеров являются гравировка, т.е. нанесение изображений на рабочие поверхности с большой точностью, а также изготовление микроотверстий.

Целью данного исследования являлась разработка сравнительных критериев применения для высокоточной микрообработки материалов нано- и фемтосекундных волоконных лазеров, имеющих большую энергию в импульсе при высоком качестве пучка и мощного импульсно-периодического CO₂-лазера.

1. Теоретические основы лазерной микрообработки материалов

Процесс лазерной гравировки сопровождается последовательными физическими процессами:

- Поглощение лазерного излучения по закону $q(x) = q_0(1 - R)e^{-\alpha x}$ на глубине проникновения $l_\alpha = 1/\alpha \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ см (для металлов), где R – коэффициент отражения материала, α – коэффициент поглощения, q – мощность излучения на единицу поверхности.

- Нагрев материалов до точки плавления $T_{пл}$.
- Плавление после поглощения скрытой теплоты плавления $L_{пл}$.
- Нагрев до температуры испарения (кипения) $T_{и} = T_{к}|_{p = p_{атм}}$.

- Испарение после поглощения скрытой теплоты испарения $L_{и}$.
- Движение фронта испарения внутрь материала со скоростью $V_0 = q/L_{и}$.

Таким образом, требуемая для лазерной гравировки энергия (пренебрегая теплопроводностью)

$$E = \Omega[\rho c T_{пл} + L_{пл} + \rho c (T_u - T_{пл}) + L_{и}],$$

где $\Omega = hS$ – объем зоны нагрева. Учитывая, что для эффективного испарения необходимо нагревать материал выше температуры кипения при атмосферном давлении, получим $q > \frac{E}{S\tau}$, где τ – длительность оптического импульса.

Главный фактор, ограничивающий качество лазерной микрообработки, – это появление жидкой фазы и ее неполное удаление. Удаление жидкой фазы в процессе лазерной микрообработки в отсутствие внешних факторов осуществляется за счет действия паров отдачи, которое оценивается как [6]

$$P_{отд} \sim F_{отд}/S = mV_0/S\tau \sim V_0/\tau \sim q/\tau,$$

где S – микрогеометрия внутренней поверхности реза; m – количество отходов (грата) на единицу поверхности.

В случае воздействия на вещество сверхкоротких импульсов (длительностью менее 10 пс) характерное время перехода световой энергии в тепловую оказывается больше длительности импульса; таким образом, все тепловые процессы происходят уже после прохождения оптического импульса. В этом случае механизм обработки материалов иной, нежели в случае, например, наносекундных импульсов.

Так, при использовании традиционной двухтемпературной модели предполагается, что почти вся энергия, поглощенная металлом, запасается в электронном газе. Однако эта модель не применима к процессу лазерной абляции, когда при воздействии сверхкоротких импульсов перегрев обрабатываемой поверхности выше температуры плавления. Кроме того, до конца не сформирована модель силового действия сверхкоротких лазерных импульсов на прозрачные материалы, когда оптические свойства последнего являются функцией напряженности светового поля.

Рассмотрим более подробно эффект лазерной абляции для сверхкоротких (пс-фс) импульсов. В отличие от наносекундных импульсов, когда абляция нечувствительна к скорости обмена энергией между решеткой и электронами, при использовании сверхкоротких импульсов электронная температура характеризуется более быстрым ростом, по сравнению с решеточной. При этом наблюдается эффект уменьшения порога абляции при укорочении оптического импульса. Процесс абляции начинается до того, как нормализуется поглощенная лазерная энергия. Во время расширения в вакуум и охлаждения система существует в жидко-газовым состоянии.

При действии сверхкоротких импульсов на прозрачные диэлектрики пороги абляции оказываются выше порогов абляции металлов, так как требуется ионизация всех атомов в зоне воздействия. Разрушение диэлектрика происходит в момент, когда достигается такая концентрация свободных электронов и такая их энергия, что запасенной в электронном газе энергии будет достаточно для начала абляции.

Сформулируем основные критерии лазера, предназначенного для обработки материалов. Очевидно, что для требуемого качества микрообработки лазер должен обладать определенными параметрами. К примеру, мощность излучения лазера должна обеспечить нагревание поверхности до $T \sim 10\,000$ К в зависимости от материала (например, для вольфрама $T = 5600$ К). Типичный минимум плотности мощности, который требуется для гравировки, например, стали оценивается как $\sim 3 \cdot 10^6$ Вт/см², или ~ 1 кВт пиковой мощности для фокального пятна 100 мкм. Если пиковой мощности недостаточно, то в месте гравировки происходит неполное удаление жидкой фазы и качество обработки существенно снижается. Длина волны лазера должна лежать в области большой поглощающей способности материала, зависящей от оптических характеристик материала: в видимом диапазоне спектра – для металлов и других конструктивных материалов, в ИК-области – для стекла, в ультрафиолете – для полимеров и т.д. Длительность импульса определяет глубину проплавленного слоя [7] ($l_{th} \approx 2\sqrt{a\tau}$, где a – коэффициент температуропроводности), величину давления отдачи паров $\left(P_{отд} \sim \frac{q}{\tau} \right)$, величину термомеханических напряжений ($F \sim \sqrt{\tau}$), эффект экранирования падающего излучения парами, стабильность

размеров облучаемой площадки (нестабильность $\sim \sqrt{\tau}$), стабильность пороговой плотности мощности (также зависит от размера облучаемой зоны). По всем этим причинам можно заключить, что чем меньше длительность импульса, тем выше будет качество микрообработки. Частота следования импульсов влияет главным образом на температуру материала, которая меняется после окончания каждого импульса, и средняя температура с понижением частоты следования может также снижаться. Таким образом, есть оптимальная частота следования импульсов, когда материал достаточно сильно разогревается и плавление и испарение вещества происходят в момент прихода импульса сравнительно малой мощности. И наконец, еще один параметр – это качество выходного пучка. Для большинства применений лазерный пучок должен иметь гауссов профиль распределения интенсивности с параметром $M^2 \approx 1$, соответствующим дифракционно-ограниченному пучку.

Диаметр фокальной области, определяющий ширину реза для лазерных пучков, определяется из следующего выражения:

$$d_{foc} = \theta F = \frac{4M^2\lambda F}{\pi D}, \quad (1)$$

где θ – расходимость; F – фокусное расстояние линзы; $M^2 = \pi\theta D/4\lambda$ – параметр качества, характеризующий расходимость пучка по отношению к дифракционно-ограниченному, обратно пропорциональный параметру K , используемому в [1]: $M^2 = 1/K$ ($M^2 = K = 1$ для гауссова пучка), λ – длина волны, D – диаметр пучка на линзе на уровне $1/e^2$.

В работе [8] требование к излучению лазера для качественной резки материалов сформулировано следующим образом:

$$\frac{\theta D}{2} \leq 6 \text{ мрад}\cdot\text{мм}. \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), получаем выражения для расчета параметров M^2 и K из экспериментально измеренной ширины реза:

$$M^2 = \frac{d_{foc} D \pi}{4\lambda F}, \quad (3)$$

и условие (2) выглядит следующим образом:

$$\frac{d_{foc} D}{2F} \leq 6 \text{ мрад}\cdot\text{мм}. \quad (4)$$

Таким образом, из измерения ширины реза можно оценить все основные параметры, которые определяют характеристики лазера с точки зрения применимости его для эффективной и прецизионной лазерной гравировки и сверления микроотверстий.

2. Микрообработка поверхностей материалов с помощью различных источников лазерного излучения

В эксперименте были исследованы процессы лазерной микрообработки с использованием трех различных типов лазеров:

1. Импульсно-периодический CO₂-лазер мощностью 40–70 Вт с частотой следования импульсов 50–100 кГц и длительностью 500 нс. Длина волны лазера 10,6 мкм [9].

2. Импульсно-периодический волоконный лазер собственной разработки с длиной волны 1,064 мкм, частотой следования импульсов 20–200 кГц при средней мощности 1–20 Вт. Импульсная мощность при этом составляла значение от 100 Вт до 10 кВт. Скорость обработки изменялась от 8 до 40 мм/с. Более детальное описание лазера представлено в следующем разделе.

3. Фемтосекундный лазер с длиной волны 1026 нм, длительность импульса 232 фс, частотой следования 2 кГц, энергия импульса 700 нДж, скорость 0,4 мм/с в составе установки с прецизионным 3D-нанопозиционером, которая будет описана ниже.

2.1. Волоконный иттербиевый лазер

На рис. 1 представлена схема разработанного волоконного лазера с модуляцией добротности резонатора в конфигурации MOPA (Master Oscillator with Power Amplifier). В этом лазере использовался коммерчески доступный акусто-оптический модулятор (АОМ), пигтейлированный оптическим волокном, имеющий время отклика <20 нс. Длина Yb волокна составляла ~1 м (коэффициент поглощения накачки >900 дБ/м), накачка осуществлялась одномодовым лазерным диодом на длине волны 976 нм. Мощность накачки непосредственно после направленного ответвителя составила около 500 мВт. Для контроля ширины спектральной линии генерации была применена волоконная брэгговская решетка (ВБР) с шириной спектра отражения 2 нм. Максимальная средняя мощность задающего осциллятора при частоте повторения импульсов 20 кГц составила 57 мВт, а пиковая – 102 Вт, при

этом минимальная длительность импульса составила 28 нс. На рис. 2 приведены зависимости длительности импульса от частоты повторения импульсов, откуда видно, что длительность импульса сокращается с уменьшением частоты. Формы импульсов на частотах повторения 20 кГц и 200 кГц приведены на рис. 3.

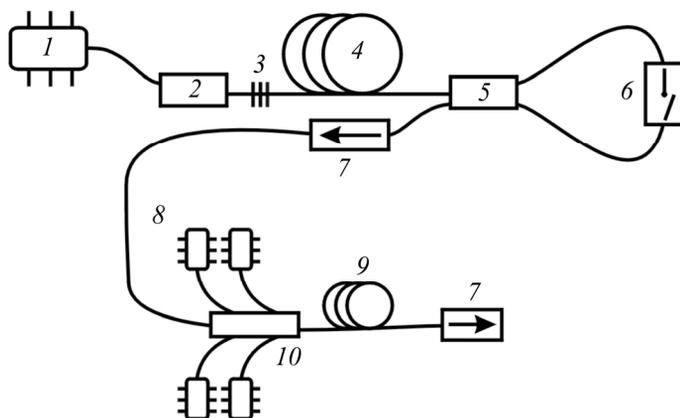


Рис. 1. Схема лазера: 1 – одномодовый диодный лазер накачки на длине волны 976нм; 2 – направленный ответвитель; 3 – волоконная брэгговская решетка; 4 – активное иттербиевое волокно; 5 – волоконный ответвитель; 6 – акустооптический модулятор; 7 – изолятор; 8 – многомодовые диоды накачки на длине волны 976 нм; 9 – иттербиевое волокно с двойной оболочкой; 10 – объединитель накачки

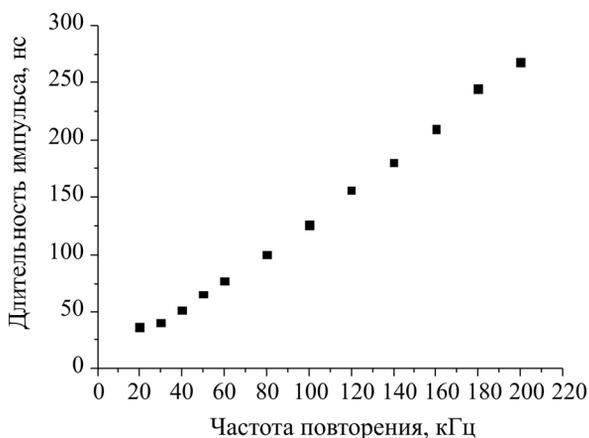
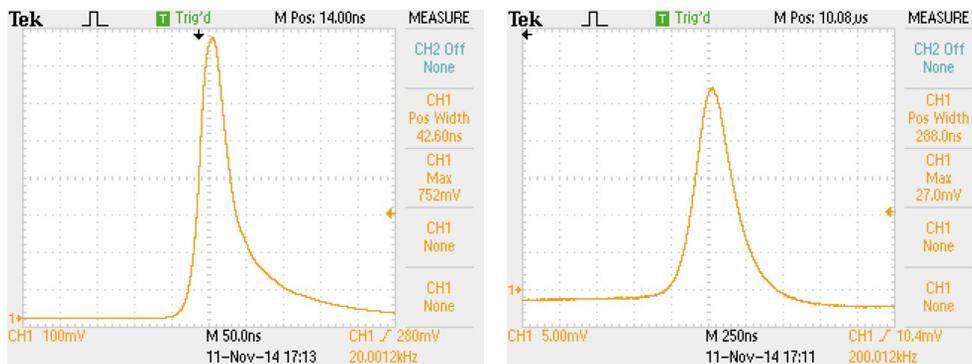


Рис. 2. Зависимость длительности импульса от частоты повторения



а

б

Рис. 3. Формы импульсов при частоте повторения 20 кГц (а) и 200 кГц (б)

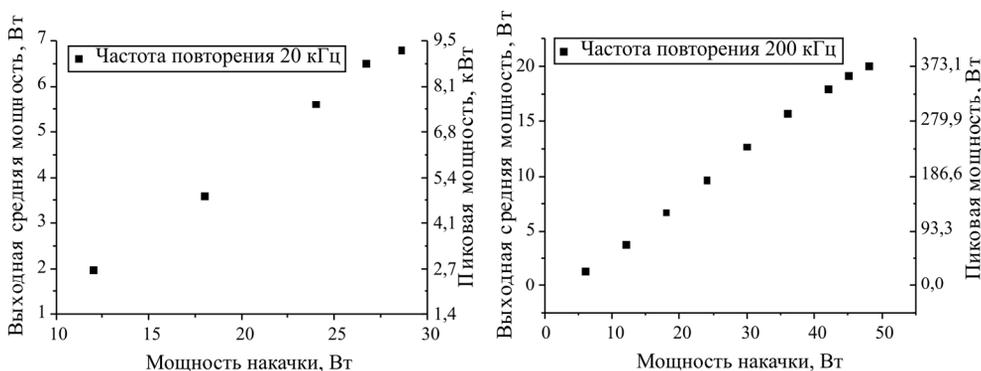


Рис. 4. Зависимости средней и пиковой мощности на выходе лазера для разных частот повторения

В усилителе использовалось LMA (Large Mode Area) волокно с увеличенным диаметром сердцевины (25 мкм) и двойной оболочкой (диаметр внутренней светопроводящей оболочки 250 мкм). Длина Yb волокна усилителя составляла 6 м. Для того чтобы завести в оболочку волокна излучение накачки от нескольких многомодовых диодов, использовался коммерчески доступный объединитель накачки (*pump-combiner*), который позволил использовать 4 диода с мощностью по 25 Вт каждый. Поскольку числовая апертура сердцевины данного волокна составляет 0,06, то это волокно не является строго одномодовым (V-фактор равен 4,43). Для обеспечения одномодового режима работы усилителя активное волокно сворачивалось в кольца диаметром около 10 см, что создавало дополнительные потери для мод высших порядков, в то время как потери фундаментальной моды увеличивались не-

значительно (см. [10]). На выходе усилителя ставились изолятор для предотвращения отражения сигнала от торца волокна, что может повредить диоды накачки, и система коллиматоров, формирующих пучок диаметром 10 мм. Максимальная средняя мощность усиленного сигнала достигала 20 Вт при частоте повторения импульсов 200 кГц. Максимальная пиковая мощность составила более 10 кВт, при частоте повторения импульсов 20 кГц. Максимальные значения средней и пиковой мощностей ограничивались предельными параметрами выходного изолятора (рис. 4).

Работа по микрогравировке материалов выполнялась с использованием специальной координатной системы, которая обеспечивала автоматическое перемещение лазерного луча по заданной программе в плоскости координат X – Y и перемещение точки фокусировки в направлении оси Z . Данная система обладала высоким пространственным разрешением и скоростными характеристиками. Точность позиционирования координатной системы составляла ± 30 мкм, точность обработки ± 10 мкм. Диапазон изменения скорости 0–50 м/мин с ускорением g .

2.2. Установка фемтосекундной микрообработки

Схема экспериментальной установки по фемтосекундной лазерной модификации представлена на рис. 5. За основу были взяты установка, ранее использовавшаяся для микроструктурирования металлов [11], и записи периодических структур показателя преломления в волоконных световодах [12].

Излучение фемтосекундного лазера Light Conversion PHAROS 6W (длина волны основной гармоники 1026 нм, частотой повторения импульсов 1–200 кГц, длительностью импульса на полувывоте 232 фс, через систему поворотных зеркал (З1–2, ДЗ) заводилось на фокусирующую оптику – асферическую линзу (О) с фокусным расстоянием 11 мм. Данная установка является уникальной на сегодняшний день, поскольку позволяет проводить высокоточные модификации поверхности с предельным пространственным разрешением, что обеспечивается использованием 3D-позиционера на основе координатных столов Aerotech ABL100 (АКС) с полем сканирования $25 \times 100 \times 6$ мм², точностью позиционирования – 200 нм, повторяемостью 50 нм и разрешением 0,5 нм. Кроме того, система синхронизации управления лазера

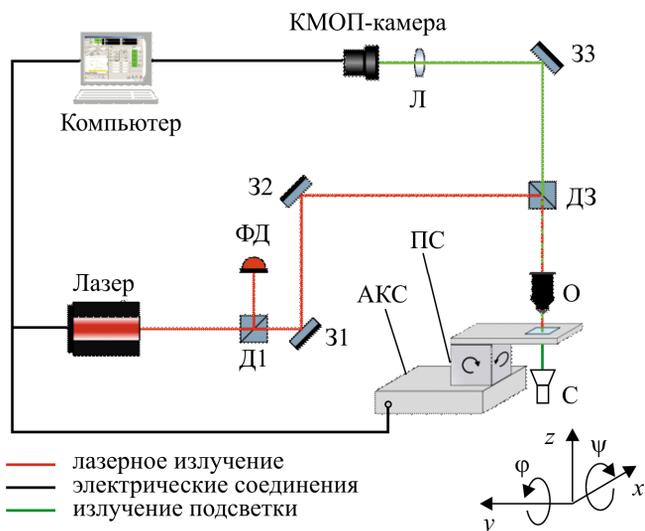


Рис. 5. Схема экспериментальной установки по фемтосекундной лазерной модификации поверхности стекла

и координатных столов позволяет создавать сложные трехмерные модификации с заданными параметрами в объеме материала. С помощью подсветки (С) и КМОП-камеры выполнялась настройка положения области фокусировки и плоскостность при перемещениях. Энергия импульсов лазерного излучения контролировалась измерителем энергии импульсов Coherent J-10MT-10KHZ (ФД). Контроллер координатного стола, также связанный с системой управления лазера, позволяет осуществлять управление затвором лазера и открывать его в заданных координатах. Более подробно данная схема описана в работе [12].

3. Результаты обработки материалов с помощью различных источников излучения

Относительную эффективность удаления расплава, определяемую давлением паров отдачи $P_{отд}$ для используемых импульсно-периодического CO₂-лазера (500 нс), наносекундного волоконного лазера (30 нс) и фемтосекундного (232 фс) лазера характеризуют значения параметра $\frac{q}{\tau}$, которые равны $1,2 \times 10^{13}$ Вт/см²с; $1,6 \times 10^{15}$ Вт/см²с и 10^{23} Вт/см²с соответственно. Видно, что фемтосекундный лазер облада-

ет большим запасом эффективности удаления расплавленного материала, что исключает возможность формирования наплава вокруг лунки.

В табл. 1 приведены характеристики тестируемых лазерных источников.

Таблица 1

Сравнительные характеристики лазерных источников

Лазерные источники	Характеристики			
	E , мДж	q , Вт/см ²	τ , нс	$P_{отд} \sim q/\tau$
СО ₂ -лазер	0,3	7,5·10 ⁶ 0,6–10 ³ Вт 0,8·10 ⁻⁴ см ²	0,5·10 ³	1,2·10 ¹³
Yb наносекундный волоконный лазер	0,3	50·10 ⁶ 10 ⁴ Вт 0,2·10 ⁻⁴ см ²	30	2,5·10 ¹⁵
Фемтосекундный лазер	0,7·10 ⁻³	2·10 ¹⁰ 3,5·10 ³ Вт 16·10 ⁻⁸ см ²	2·10 ⁻⁴	10 ²³

Для используемых лазеров были рассмотрены процессы изготовления отверстий в прозрачных материалах (оргстекло, стекло) в сравнении с непрозрачным материалом (сталью) (табл. 2).

Таблица 2

Параметры обрабатываемых материалов

Материалы	Параметры				
	$T_{пл}$, °С	$T_{исп}$, °С	$L_{пл}$, Дж/кг	$L_{исп}$, Дж/см ³	Теплопроводность K , Вт/(м·К)
Сталь	1450–1510	2860	1300–1400	10 ⁴	32
Оргстекло	160	200	–	–	–

Эксперименты по фемтосекундной лазерной абляции производились при следующих параметрах излучения: частота следования 2 кГц, энергия импульса 700 нДж, скорость 0,4 мм/с, 50%-ное перекрытие по соседним трекам. Для достижения определенной глубины количество проходов было выбрано равным 4.

На рис. 6 приведен результат обработки стальной пластины толщиной 50 мкм. Аналогичные результаты экспериментов по обработке материалов с СО₂-наносекундным лазером приведены на рис. 7, 8.

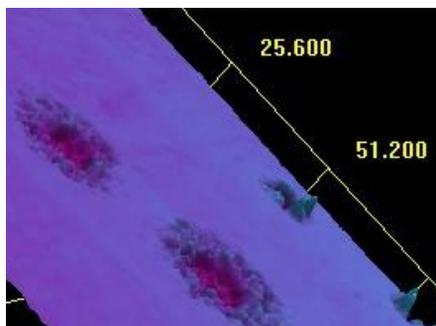


Рис. 6. Микрообработка фемтосекундным лазером стали $\delta = 50$ мкм

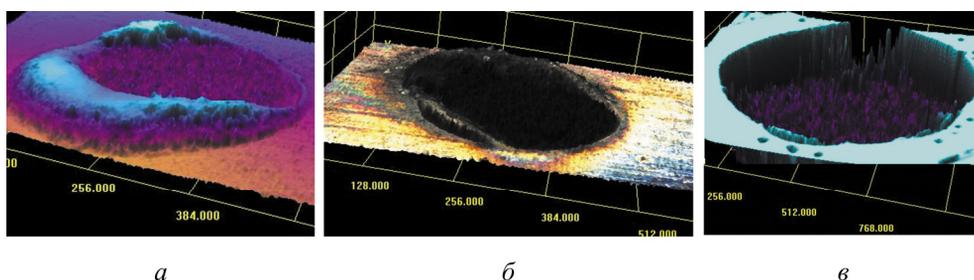


Рис. 7. Обработка материалов CO₂-лазером: *a* – сталь $\delta = 50$ мкм (прямая сторона); *б* – сталь $\delta = 50$ мкм (обратная сторона); *в* – оргстекло

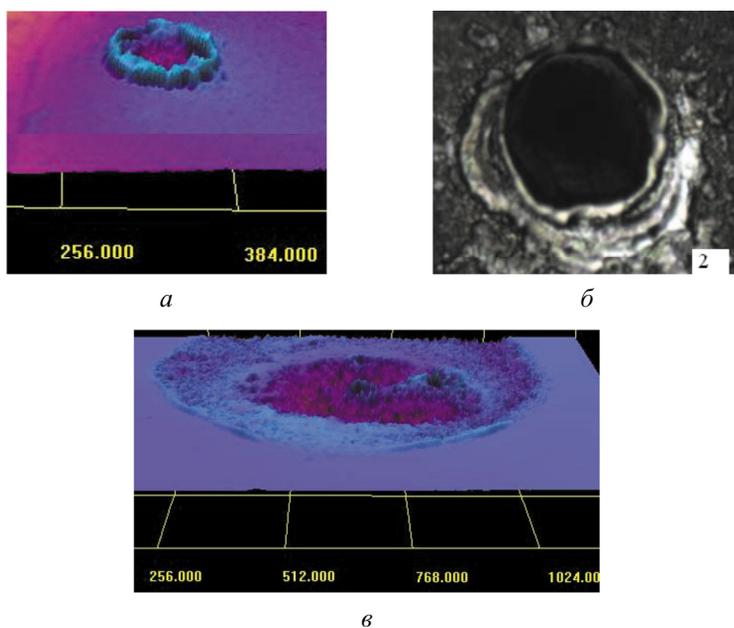


Рис. 8. Обработка материалов наносекундным лазером: *a* – сталь $\delta = 1,5$ мкм; *б* – сталь $\delta = 50$ мкм; *в* – оргстекло

4. Обсуждение результатов и выводы

Проведенный анализ тепловых процессов плавления и испарения материалов при воздействии на них импульсного лазерного излучения в микро-, нано-, и фемтосекундном диапазоне времени демонстрирует их влияние на качество обработки. В частности, наблюдаемое различие в качестве заключается в наличии выбросов расплавленного материала на кромки отверстий как снизу, так и сверху для микросекундного CO₂ и наносекундного волоконного лазера при воздействии на металл и отсутствии такого процесса для фемтосекундного лазера. Принимая параметр качества для волоконного лазера $K = 0,8$ с выходным пучком, близким к гауссовому, из (1) имеем $d_{foc} = 72$ мкм. Экспериментально измеренное значение ширины реза в несколько превышает приведенное значение. Для случая CO₂-лазера с диаметром пучка 30 мм, для линзы с фокусным расстоянием 190 мм и параметром качества $K = 0,6$ оценка дает значение 135 мкм плюс аберрацию 30 мкм. При этом минимальная ширина реза тонких материалов составляет значение 180–200 мкм.

В наших экспериментах выполнялись условия: l_α и $l_{th} \ll b$, где $l_{th} = 2\sqrt{\alpha\tau}$ – тепловая диффузионная длина. Следовательно, можно использовать простейшую оценку в одномерном приближении для температуры поверхности до начала активного испарения:

$$T = T_0 + \frac{2(1-R)I_0}{\lambda_m} \sqrt{\frac{\alpha\tau}{\pi}} \quad \text{для } l_{th} \gg l_\alpha;$$

$$T = T_0 + \frac{\alpha(1-R)I_0}{\rho C_p} \tau \quad \text{для } l_{th} \ll l_\alpha.$$

Из приведенных формул хорошо видно влияние отдельных параметров на эффективность взаимодействия излучения с веществом. От длины волны излучения зависит не только величина полной поглощенной мощности $(1 - R)$, но и глубина поглощения $l_\alpha = 1/\alpha$.

В условиях $l_{th} \ll l_\alpha$, которые чаще всего выполняются для диэлектриков, температура поверхности определяется потоком энергии в импульсе, однако его длительность ограничена условием $\tau < \frac{l_\alpha^2}{4\alpha}$.

В нашем случае это условие выполняется для оргстекла для всех типов лазеров. Лунки имеют ровные края без выброса расплава. В условиях $l_{th} \gg l_a$, т.е. для металлов, при использовании лазеров с длительностью более 1 нс независимо от длины волны существенную роль начинает играть формирование и выброс из лунки расплава, который и наблюдаем на рис. 7, а и рис. 8, а.

Принципиально другая ситуация реализуется при использовании очень коротких импульсов. Согласно существующим моделям лазерное излучение первоначально поглощается свободными электронами (для металлов) и связанными электронами в диэлектриках. Последующие столкновения между электронами в металле приводят к их термализации за время около 100 фс (1 фс = 10^{-15} с) с электронной температурой T_e . Время электрон-фононной релаксации составляет для различных материалов от 0,5 до 100 пс (1 пс = 10^{-12} с) [13]. При этом охлаждение сильно нагретого слоя материала происходит по двум каналам: с одной стороны – за счет теплопроводности в глубь материала и с другой – за счет адиабатического расширения слоя перегретого пара наружу с характерным временем $\tau_{ад} \approx \frac{l_a}{V_T}$, где V_T – пара и l – характерная глубина

расплавленного слоя, определяемая максимальной из величин: l_{th} или l_a . Принимая $l_a = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм и скорость расширения, близкую к скорости звука, $V_T = 10^6$ мм/с, получим характерное время расширения облака $10^{-10} - 10^{-11}$ с. За это время тепло успеет распространиться в боковую сторону на характерный размер $(4,5 - 1,4) \cdot 10^{-5}$ мм, т.е. на малую величину. Выполняются условия $d_{фоc} \gg l_{th}$ и $l_a \geq l_{th}$. Таким образом, при использовании длительности лазерного импульса в фемтосекундном диапазоне все процессы испарения (абляции) материала происходят после завершения воздействия излучения; влияние жидкой фазы на боковые стенки несущественно, а из глубины лунки расплав удаляется, по видимому, мощным импульсом отдачи (см. рис. б).

Работа выполнена при поддержке средствами интеграционного проекта № 68 СО РАН (А.Н.М. и А.М.О.) и гранта Российского научного фонда № 14-22-00118 (А.В.Д, А.Г.К. и С.А.Б.).

Список литературы

1. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Резка металлов излучением СО₂-лазера с самофильтрующим резонатором // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 2. – С. 191–196.
2. Улучшение характеристик автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода методом прогрессивного лазерного структурирования / Д.А. Бессонов, А.В. Конюшин, И.А. Попов, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 112–119.
3. Hoult T. High Precision Laser Marking with novel nano-second-pulsed MOPA Fibre Lasers // Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. – Munich, 2007.
4. Сравнительные характеристики применения волоконного и СО₂-лазера для микрообработки материалов / А.Н. Малов, А.М. Оришич, А.Г. Кузнецов, С.А. Бабин // Материалы Российского семинара по волоконным лазерам (Новосибирск, Академгородок, 27–30 марта 2012 г.). – Новосибирск, 2012. – С. 141–142.
5. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 219–225.
6. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Лазерная микрообработка. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 111 с.
7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углоев, И.В. Зуев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
8. Schlueter H. Advances in industrial power lasers // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5777. – P. 8–15.
9. Малов А.Н., Оришич А.М. Предельные энергетические характеристики СО₂-лазера с механической модуляцией добротности // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, вып. 4. – С. 63–71.
10. Koplw J.P., Kliner D.A.V., Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier // Optics Letters. – 2000. – Vol. 25, no. 7. – P. 442–444.
11. Особенности формирования самоиндуцированных решеток на металлических фольгах при сканировании остросфокусированным фемтосекундным лазерным пучком / А.В. Достовалов, В.П. Корольков, С.К. Голубцов, В.И. Кондратьев // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 4. – С. 330–334.

12. Достовалов А.В., Вольф А.А., Бабин С.А. Поточечная запись ВБР первого и второго порядка через полиимидное покрытие фемтосекундным излучением с длиной волны 1026 нм // Прикладная фотоника. – 2014. – № 2. – С. 48–61.

13. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов, Ю.В. Ходыко. – М.: Наука, 1970. – 269 с.

References

1. Malikov A.G., Orishich A.M., Shuliat'ev V.B. Rezka metallov izlucheniem CO₂-lazera s samofil'truiushchim rezonatorom [Metal cutting by radiation from a CO₂ laser with a self-filtering cavity]. *Kvantovaya elektronika*, 2009, vol. 39, no. 2, pp. 191-196.

2. Bessonov D.A., Koniushin A.V., Popov I.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L. Uluchshenie kharakteristik avtoemissionnykh katodov iz steklougleroda metodom progressivnogo lazernogo strukturirovaniia [Improving the characteristics of field-emission glass-carbon cathodes with progressive method of laser structuring]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 112-119.

3. Hoult T. High Precision Laser Marking with novelnano-second-pulsed MOPA Fibre Lasers. *Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*. Munich, 2007.

4. Malov A.N., Orishich A.M., Kuznetsov A.G., Babin S.A. Sravnitel'nye kharakteristiki primeneniia volokonnoogo i SO₂-lazera dlia mikroobrabotki materialov [Comparative characteristics of fiber and CO₂ laser for micromachining of materials]. *Materialy Rossiiskogo seminara po volokonnyim lazeram*. Novosibirsk, 2012, pp. 141-142.

5. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nature Photonics*, 2008, vol. 2, pp. 219-225.

6. Veiko V.P. Opornyi konspekt leksii po kursu "Fiziko-tekhnicheskie osnovy lazernykh tekhnologii". Lazernaia mikroobrabotka [Reference lecture notes for the course "Physical and technical bases of laser technology". Laser microprocessing]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet, 2007. 111 p.

7. Rykalin N.N., Ugloev A.A., Zuev I.V. [et al.] Lazernaia i elektronno-luchevaia obrabotka materialov [Laser and electron beam processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 496 p.

8. Schlueter H. Advances in industrial power lasers. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5777, pp. 8-15.

9. Malov A.N., Orishich A.M. Predel'nye energeticheskie kharakteristiki CO₂-lazera s mekhanicheskoi moduliatsiei dobrotnosti [Marginal energy characteristics of CO₂-laser with a mechanical q-switched]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2014, vol. 40, iss. 4, pp. 63-71.

10. Koplw J.P., Kliner D.A.V., Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier. *Optics Letters*, 2000, vol. 25, no. 7, pp. 442-444.

11. Dostovalov A.V., Korol'kov V.P., Golubtsov S.K., Kondrat'ev V.I. Osobennosti formirovaniia samoindutsirovannykh reshetok na metallicheskih fol'gakh pri skanirovanii ostrosfokusirovannym femtosekundnym lazernym puchkom [Specific features of formation of self-induced gratings on metal foils during scanning by a tightly focused femtosecond laser beam]. *Kvantovaya elektronika*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 330-334.

12. Dostovalov A.V., Vol'f A.A., Babin S.A. Potochechnaia zapis' VBR pervogo i vtorogo poriadka cherez poliimidnoe pokrytie femtosekundnym izlucheniem s dlinoi volny 1026 nm [Point-by-point writing of first and second order FBGs through polyimide coating with femtosecond radiation at 1026 nm]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 2, pp. 48-61.

13. Anisimov S.I., Imas Ia.A., Romanov G.S., Khodyko Iu.V. Deistvie izlucheniia bol'shoi moshchnosti na metally [The action of high power radiation on metals]. Moscow: Nauka, 1970. 269 p.

Получено 5.06.2015