
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**
**DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT ENGINEERING
AND RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT**

УДК 621.373.8
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-789-797

**ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ КАНАЛОВ
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАМЕТРА В ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ
ИЗЛУЧЕНИЕМ СО- И СО₂-ЛАЗЕРОВ**

А. А. Ионин, М. В. Ионин*, Ю. М. Климачев,
А. Ю. Козлов, Д. В. Синецын, О. А. Рулев

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
**maximionin@gmail.com*

Аннотация. Представлены результаты экспериментов по формированию в полиметилметакрилате каналов субмиллиметрового диаметра с большим аспектным отношением (~100) за счет подобранных параметров фокусировки лазерного луча и средней мощности СО-лазера с высокочастотной накачкой. Выполнен сравнительный анализ возможностей формирования каналов в полиметилметакрилате излучением СО- и СО₂-лазеров с высокочастотной накачкой. Субмиллиметровые каналы с высоким аспектным соотношением могут быть применены для создания микрофлюидных чипов.

Ключевые слова: СО-лазер, СО₂-лазер, ПММА, высокоаспектные каналы, средний ИК-диапазон

Ссылка для цитирования: Ионин А. А., Ионин М. В., Климачев Ю. М., Козлов А. Ю., Синецын Д. В., Рулев О. А. Формирование высокоаспектных каналов субмиллиметрового диаметра в полиметилметакрилате излучением СО- и СО₂-лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 9. С. 789—797. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-789-797.

**FORMATION OF HIGH-ASPECT-RATIO CHANNELS
OF SUBMILLIMETER DIAMETER IN POLYMETHYL METHACRYLATE
BY CO AND CO₂ LASERS RADIATION**

A. A. Ionin, M. V. Ionin*, Yu. M. Klimachev, A. Yu. Kozlov, D. V. Sinitsyn, O. A. Rulev

P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia
**maximionin@gmail.com*

Abstract. Results of experiments on the formation of submillimeter-diameter channels with a large aspect ratio (~100) in polymethyl methacrylate due to selected laser beam focusing parameters and the average power of a high-frequency pumped CO laser are presented. A comparative analysis of the possibilities of forming channels in polymethyl methacrylate using radiation from CO and CO₂ lasers with high-frequency pumping is performed. Submillimeter channels with high aspect ratio can be used to create microfluidic chips.

Keywords: CO laser, CO₂ laser, PMMA, high aspect ratio channels, mid-IR

For citation: Ionin A. A., Ionin M. V., Klimachev Yu. M., Kozlov A. Yu., Sinitsyn D. V., Rulev O. A. Formation of high-aspect-ratio channels of submillimeter diameter in polymethyl methacrylate by CO and CO₂ lasers radiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 9. P. 789—797 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-9-789-797.

Полиметилметакрилат (ПММА) представляет собой жесткий аморфный полимер $(C_5O_2H_8)_n$, относящийся к термопластам. Он обладает высокой прозрачностью в видимой части спектра, стойкостью к различным воздействиям окружающей среды, хорошими физико-механическими и электроизоляционными свойствами. При комнатной температуре ПММА находится в твердом состоянии, при нагревании свыше $130\text{ }^\circ\text{C}$ размягчается и переходит в вязко-текучее (пластичное) состояние, а при последующем охлаждении твердеет и возвращается в первоначальное состояние. ПММА обладает уникальной атмосферостойкостью среди прозрачных полимеров, а также устойчивостью к ультрафиолетовому излучению. Благодаря этим свойствам ПММА широко применяется в светотехнике, авиа- и машиностроении, микро- и наноэлектронике [1], а благодаря высокой биосовместимости [2] используется в медицине и медицинских исследованиях.

При механической обработке ПММА из-за увеличения вязкости материала при нагреве возникают трудности. Особенно это заметно при сверлении глубоких каналов малого диаметра, при формировании пропилов малой ширины или при формировании микроканалов. Каналы субмиллиметрового диаметра с высоким аспектным соотношением могут быть применены для создания микрофлюидных чипов [3] или, другими словами, микросистем типа „Lab-on-a-Chip“ [4]. Использование таких чипов позволяет проводить ПЦР тесты [3], что активно применяется в современных медицинских исследованиях. Приборы на основе микрофлюидных чипов для биохимического анализа обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными аналитическими системами. Прежде всего, это малый расход реагентов и пробы; высокая чувствительность определения компонентов; компактные размеры, низкое энергопотребление. Топология и конструкция микрочипа различна, но в простейшем случае микрофлюидные чипы представляют собой конструкцию из двух герметично соединенных пластин: на одной пластине формируются канавки для микроканалов, реакторы, клапаны, электроды и другие функциональные элементы, другая пластина — защитная [3]. Лазерное сверление каналов субмиллиметрового диаметра с высоким аспектным соотношением может существенно упростить метод создания микрофлюидных чипов [5].

Для выполнения таких операций можно использовать лазерное излучение ИК-, видимого или УФ-диапазонов [5—9]. При этом из-за высокой прозрачности материала в видимом и ближнем ИК-диапазонах обработка ПММА в этих диапазонах возможна только методом абляции высокоинтенсивными лазерными импульсами. Такой метод удаления материала из канала достаточно эффективен за счет использования ударной волны и потока плазмы [8]. Однако ограничивающим фактором в этом случае являются абляционные частицы, блокирующие каналы или оседающие на боковых стенках, а также сильное нелинейное взаимодействие лазерных импульсов с окружающим воздухом [9].

В среднем ИК-диапазоне ПММА имеет интенсивные полосы поглощения, а в спектральном диапазоне от 5,6 до 12 мкм практически непрозрачен уже при толщине образца $\sim 0,3$ мм (рис. 1, кривая 2). На рис. 1 представлена зависимость пропускания (T) ПММА от длины волны: 1 — испаренного материала ПММА в оптической ячейке длиной 17 см при давлении 0,01 атм, 2 — пластины ПММА толщиной 0,3 мм, 3 — пленки ПММА толщиной 0,015 мм; данные получены с помощью ИК-фурье-спектрометра АФ-3.

Интенсивное поглощение излучения позволяет обрабатывать материал без помощи абляции за счет испарения. С помощью излучения лазера на диоксиде углерода (CO_2 -лазера) с длиной волны 10,6 мкм для изготовления микроканалов на данный момент используются три известные стратегии: сфокусированная обработка, расфокусированная обработка и метод растрового сканирования [7]. Лазерное сверление каналов с высоким аспектным соотношением с помощью лазера на монооксиде углерода (CO -лазера), насколько известно, для изготовления микрофлюидных чипов пока не реализовано.

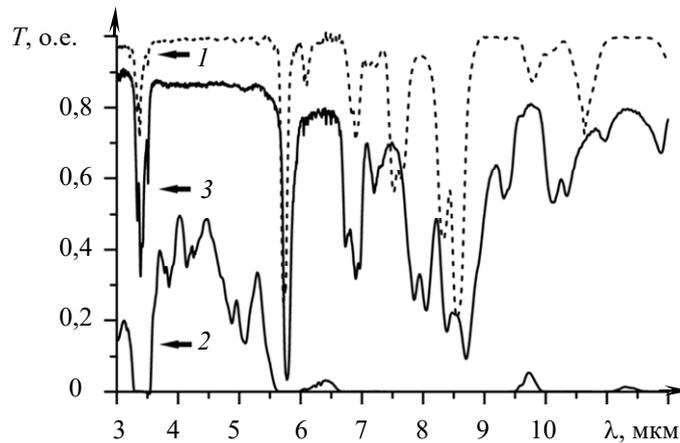


Рис. 1

Одним из эффективных лазерных источников в среднем ИК-диапазоне является СО-лазер, работающий на многочисленных фундаментальных колебательно-вращательных переходах молекулы СО в диапазоне длин волн 5—7 мкм. В настоящей статье представлены результаты исследования по формированию каналов субмиллиметрового диаметра в ПММА с аспектным соотношением выше 50 за счет варьирования параметров фокусировки и мощности лазера. Также представлены результаты экспериментов по исследованию особенностей сверления высокоаспектных каналов в ПММА излучением импульсно-периодических щелевых СО- и СО₂-лазеров с высокочастотной (ВЧ) накачкой.

Характеристики и режимы работы использованного импульсно-периодического щелевого СО-лазера с ВЧ-накачкой подробно описаны в [10]. Средняя мощность СО-лазера варьировалась в диапазоне от 5 до 30 Вт. Использовался гибридный волноводно-неустойчивый резонатор. В резонаторе такого типа конфигурация лазерного пучка на выходе является смесью низшей моды неустойчивого резонатора и мод щелевого (волноводного) резонатора [11]. Основная волноводная мода составляет ~60 % от мощности лазерной генерации, остальная мощность распределена между модами высшего порядка [12]. Частота следования импульсов (f) лазерного излучения составляет 400—1000 Гц, а длительность ~500 мкс. Характерная форма импульса показана на рис. 2, где P — мощность генерации излучения, $P_{ВЧ}$ — мощность ВЧ-разряда. Спектр излучения используемого СО-лазера находился в диапазоне длин волн 5—5,5 мкм с самой сильной линией 5,1 мкм и насчитывал ~25 линий.

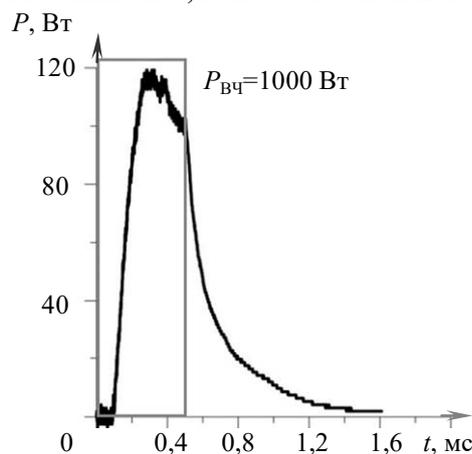


Рис. 2

Эксперименты по сверлению каналов в ПММА проводились путем фокусировки луча СО-лазера на поверхность образца (рис. 3). При этом изменялись следующие параметры: острота фокусировки (использовались линзы с фокусным расстоянием 300, 200 и 80 мм), смещение

образца относительно положения геометрического фокуса линзы и средняя мощность импульсно-периодического лазерного излучения.

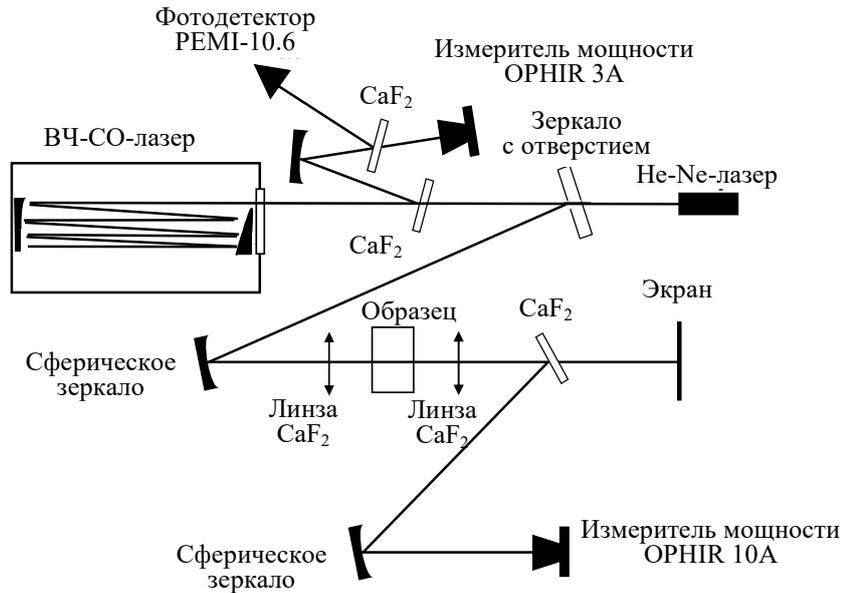


Рис. 3

Излучение из резонатора лазера посредством отражения от подложки из фторида кальция CaF_2 направляется на измеритель мощности OPHIR 3A (OPHIR® Photonics) и фотодетектор РЕМ-10.6 (Photoelectromagnetic Detector Optically Immersed, VIGO System SA) для измерения мощности и формы импульсов. Основная часть излучения (~95 %) отражается от юстировочного зеркала с отверстием и фокусируется сферическим зеркалом на линзу из CaF_2 , после чего попадает на образец. Далее, несфокусированное излучение с помощью еще одной подложки и сферического зеркала отводится на второй измеритель мощности OPHIR 10A (OPHIR® Photonics).

На рис. 4 показано распределение поля излучения (1 — вид сбоку, 2 — вид спереди), попадающего на фокусирующую линзу, полученное путем выжигания пластины ПММА. Диаметр пучка на входе в линзу ~5 мм.

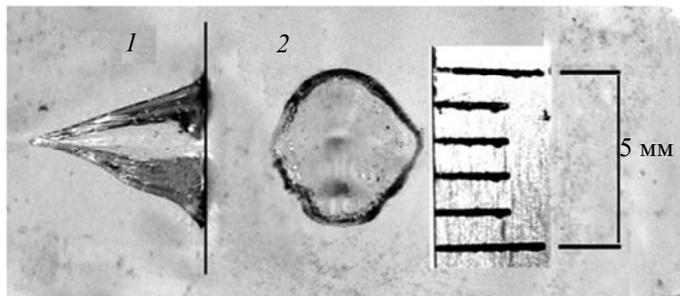


Рис. 4

В ходе экспериментов установлено, что при фокусировке лазерного луча на поверхность ПММА за счет деполимеризации материала и выброса в виде пара или дыма формировался своего рода волновод, по которому происходило дальнейшее распространение лазерного луча, что позволяло сверлить протяженные каналы с большим аспектным соотношением. Принудительное выдувание и откачка продуктов взаимодействия не осуществлялись. При этом пока продолжалась обработка лазерным излучением, вокруг формируемого канала визуально наблюдалась небольшая (диаметром до 7 мм) зона нагрева и размягчения материала, которая после прекращения лазерного воздействия застывала. На рис. 5 представлен образец ПММА толщиной 40 мм с каналом, просверленным лучом СО-лазера; средняя мощность лазера ~20 Вт, время воздействия 15 с; изображение на рис. 5, а получено при освещении линейно поляризованным светом, а на рис. 5, б — неполяризованным.

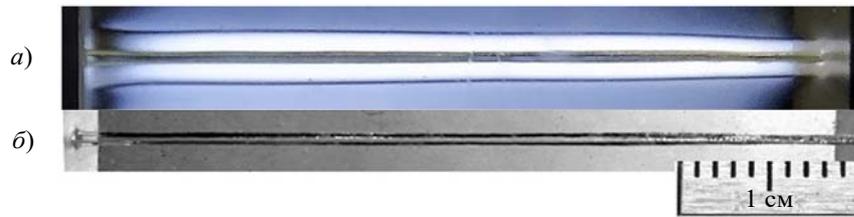


Рис. 5

При определенной подобранной фокусировке (фокусное расстояние линзы $F=200$ мм, расстояние до поверхности ПММА 215 мм) в ПММА формировался канал практически постоянного субмиллиметрового диаметра (среднее значение $D\sim 0,5$ мм) длиной до 40 мм (аспектное отношение ~ 100) с уменьшением диаметра к концу канала до 0,3 мм (см. рис. 5, б).

Время сверления канала в образце зависит, помимо фокусного расстояния линзы, от средней мощности СО-лазера. На рис. 6 представлена зависимость времени сверления канала в образце ПММА толщиной 40 мм (с момента включения лазера до момента выхода лазерного луча из образца) от средней мощности лазера $\langle P_{\text{л}} \rangle$ при использовании линзы с $F=200$ мм. Момент выхода лазерного луча из образца определялся визуально как момент прорыва канала, сопровождающегося резким испусканием паров ПММА с обратной стороны образца. Средняя мощность лазера в этих экспериментах варьировалась путем изменения параметров импульсов ВЧ-разряда накачки, таких как мощность и длительность импульса накачки. Частота импульсов при этом составляла 400 Гц.

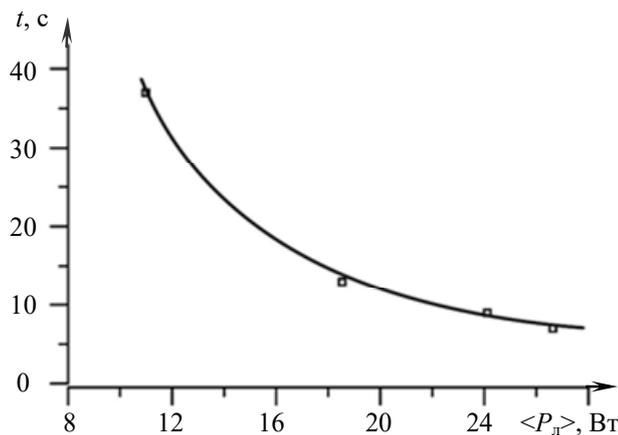


Рис. 6

На рис. 7 показана зависимость увеличения длины просверленного канала (L) в образце ПММА от времени действия излучения СО-лазера для двух значений $\langle P_{\text{л}} \rangle$ при различной частоте f и фокусном расстоянии линзы $F=200$ мм: здесь 1 — $\langle P_{\text{л}} \rangle=11,4$ Вт, $f=500$ Гц; 2 — $\langle P_{\text{л}} \rangle=15,6$ Вт, $f=1000$ Гц.

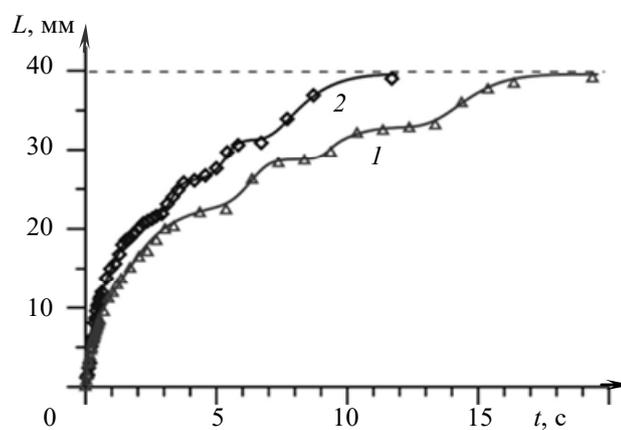


Рис. 7

Данные, приведенные на рис. 7, получены путем покадровой обработки видеозаписей процесса лазерного сверления, которые были сняты во время эксперимента. Цифровая видеокамера устанавливалась напротив образца, к которому крепилась шкала для измерения длины канала, и фиксировала весь процесс сверления. Средняя мощность лазера варьировалась путем изменения частоты f следования импульсов ВЧ-разряда и, следовательно, частоты генерации излучения СО-лазера при одинаковой длительности импульсов накачки. Неравномерную динамику сверления каналов можно объяснить тем, что в сформированном канале испарившиеся частицы материала в течение достаточно длительного времени (1—3 с) экранируют излучение лазера, пока не покинут канал за счет диффузии. При повторе этих экспериментов в оптической ячейке при пониженном давлении (0,1 атм) установлено, что время сверления снижается на 30 %. Испаренный в оптической ячейке материал не поглощает на длинах волн СО-лазера (см. рис. 1, кривая 1), так как имеет низкое давление (~0,01 атм), однако в самом канале, по-видимому, он имеет давление существенно большее. Кроме этого, частицы испаряемого материала внутри канала могут рассеивать лазерное излучение. Учитывая эти процессы, можно предположить, что процесс сверления имеет волнообразный характер из-за циклического накопления и испускания продуктов испарения ПММА вовне канала.

Аналогичные эксперименты по сверлению каналов в ПММА проводились с использованием импульсно-периодического щелевого ВЧ-разрядного СО₂-лазера, работающего на длине волны 10,6 мкм. Конструкция лазера описана в [13], но как конструкция именно СО-лазера с криогенным охлаждением. В ходе экспериментов указанная установка работала с охлаждением электродов проточной водой как СО₂-лазер на длине волны 10,6 мкм. Использовался ВЧ-генератор с несущей частотой 40 МГц мощностью до 1 кВт.

Длительность импульсов данного лазера составляет ~500 мкс, частота следования 500 Гц. Форма импульса (рис. 8) существенно отличается от формы импульсов СО-лазера. Появление генерации запаздывает примерно на 100 мкс от начала импульса ВЧ-накачки. В начале импульса наблюдается мощный пик до 70 Вт с длительностью по полувысоте ~80 нс, после генерации мощность спадет практически до нуля. Затем идет генерация на уровне мощности ~30 Вт за счет межмолекулярного колебательно-колебательного обмена. Генерация практически заканчивается после окончания импульса ВЧ-накачки. Модовый состав СО₂-лазера был аналогичен модовому составу СО-лазера.

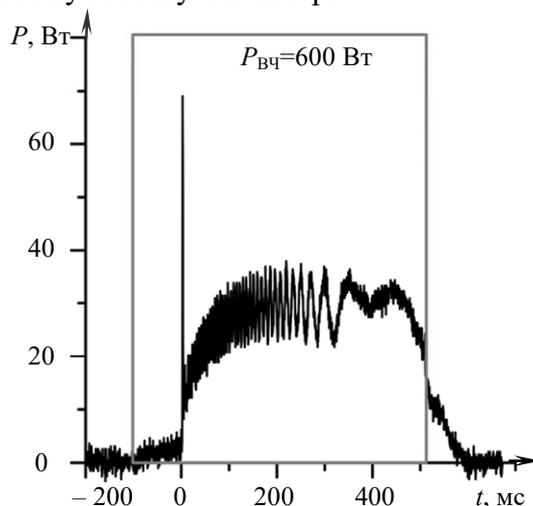


Рис. 8

Однако сформировать каналы такой же длины и с таким же аспектным соотношением, как в предыдущих экспериментах, при средней мощности СО₂-лазера, сравнимой с мощностью СО-лазера, не удалось. Кроме того, диаметр получаемых каналов почти всегда был неравномерным по длине просверливаемого канала: см. рис. 9, где a — канал, просверленный

СО-лазером, $\langle P_{\text{л}} \rangle = 11$ Вт, $F = 200$ мм; б, в, г — каналы, просверленные СО₂-лазером, $\langle P_{\text{л}} \rangle = 11,5$ Вт, при F , равном 180, 100 и 50 мм соответственно.



Рис. 9

Неспособность СО₂-лазера формировать волноводные каналы в ПММА может быть связана с тем, что испаряемый материал имеет полосу поглощения с максимумом вблизи 10,6 мкм (см. рис. 1, кривая 1), т.е. образующиеся в канале пары ПММА сильно поглощают лазерное излучение. Кроме этого, образованию глубоких каналов препятствует тот факт, что стенки сформированного канала сильнее поглощают излучение СО₂-лазера, чем излучение СО-лазера.

На рис. 10 приведены результаты сравнения коэффициентов (K) пропускания излучения СО- и СО₂-лазеров в волноводном канале ПММА. Для измерения пропускания были использованы пластины разной толщины — 5, 10, 20, 22 и 40 мм. Излучение лазеров проходило через уже готовые каналы, при этом измерялись потери мощности, возникающие из-за поглощения излучения стенками канала. Излучение СО₂-лазера средней мощностью до 6 Вт прошло через пластинку толщиной 22 мм. При установке пластинки толщиной 25 мм излучение на выходе не было зарегистрировано. В то же время излучение СО-лазера средней мощностью до 12 Вт прошло через пластинку толщиной 40 мм. Уровень пропускания 0,2 для СО₂-лазера достигается при $L = 10$ мм, а для СО-лазера — при $L = 40$ мм, т.е. в 4 раза больше. Данный факт связан с тем, что коэффициент поглощения ПММА на длине волны СО₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) в десять раз выше, чем на длинах волн СО-лазера ($\lambda = 5,0 \dots 5,5$ мкм).

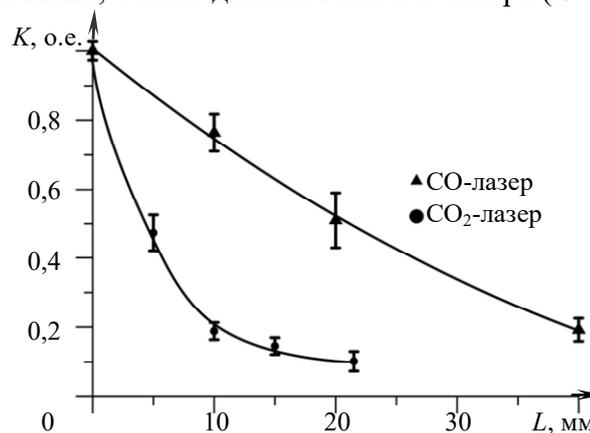


Рис. 10

Таким образом использование излучения СО-лазера (длина волны $\sim 5,0$ — $5,5$ мкм) для сверления ПММА позволяет сформировать каналы с большим аспектным отношением (~ 100) за счет выбора параметров фокусировки лазерного луча и средней мощности лазера. Для создания каналов с более высоким аспектным соотношением и постоянным диаметром по всей длине целесообразно, по-видимому, выбрать специальный режим работы СО-лазера — увеличение мощности лазера со временем, по мере углубления лазерного луча в образец. Такой режим, возможно, позволит компенсировать потери излучения в волноводе ПММА.

При использовании CO₂-лазера в тех же условиях получить аналогичные результаты оказалось невозможным из-за существенного различия степени поглощения излучения СО- и СО₂-лазеров как самим ПММА, так и продуктами его испарения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисовская Е. М., Карманова О. В., Щербакова М. С., Калмыков В. В. Исследование физико-механических и оптических свойств ПММА при введении вторичного полимера // Вестн. ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 1. С. 264—270. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-264-270.
2. Борзенко С. А., Малюгин Б. Э., Измайлова С. Б. и др. Изучение биосовместимости полимерных материалов (полиметилметакрилат и бисфенол-А-диглицидилметакрилат) на модели культуры клеток стромы роговицы // Офтальмохирургия. 2016. № 4. С. 16—19. DOI: 10.25276/0235-4160-2016-4-16-19.
3. Евстратов А. А. Микрофлюидные чипы для биологических и медицинских исследований // Рос. хим. журн. 2011. Т. LV, № 2. С. 99—110D.
4. Mark D., Haerberle S., Roth G., von Stetten F., Zengerle R. Microfluidic Lab-on-a-Chip Platforms: Requirements, Characteristics and Applications // Chemical Society Reviews. 2010. Vol. 39(3). P.1153—82. DOI: 10.1039/b820557b.
5. Klank H., Kutter J. P., Geschke O. CO₂-laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA-based microfluidic systems // Lab on a Chip. 2002. Vol. 2. P. 242. DOI: 10.1039/b206409j.
6. Löhr C., La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J. A., Calvo J. Kerf profile analysis and neural network-based modeling of increasing thickness PMMA sheets cut by CO₂ laser // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 144. P. 107386. DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107386.
7. Prakash S., Kumar S. Determining the suitable CO₂ laser based technique for microchannel fabrication on PMMA // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 139. P. 107017.
8. Токарев В. Н. Механизм лазерного сверления сверхвысокоаспектных отверстий в полимерах // Квантовая электроника. 2006. Т. 36 (7). С. 624—637.
9. Bo Xia, Lan Jiang, Xiaowei Li, Xueliang Yan, Weiwei Zhao, Yongfeng Lu. High aspect ratio, high-quality microholes in PMMA: a comparison between femtosecond laser drilling in air and in vacuum // Appl. Phys. A. 2014. N 119(1). P. 61—68. DOI: 10.1007/s00339-014-8955-5.
10. Ionin A. A., Klimachev Yu. M., Kotkov A. A. et al. Multifunctional compact dual band repetitively pulsed slab RF discharge CO laser with average output power up to 40 W // Infrared Physics & Technology. 2022. N 120. P. 103921. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103921.
11. Минеев А. П., Нефедов С. М., Паушин П. П. Высокочастотный планарный СО₂-лазер с полностью металлической электродно-волноводной структурой и неустойчивым резонатором // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 7. С. 656—663.
12. Dutov A. I., Kuleshov A. A., Novoselov N. A., Semenov V. E., Sokolov A. A. RF-excited slab CO₂ laser with intracavity mode selection // Proc. SPIE 5120, XIV Intern. Symp. on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. 2003. P. 84—86. DOI: 10.1117/12.515476.
13. Ионин А. А., Козлов А. Ю., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Компактный криогенный щелевой СО-лазер с накачкой емкостным ВЧ-разрядом. М., 2008. (Препринт/ФИАН № 1).

Сведения об авторах

- Андрей Алексеевич Ионин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; руководитель отделения; E-mail: ioninaa@lebedev.ru
- Максим Владимирович Ионин** — Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; мл. научный сотрудник; E-mail: maximionin@gmail.com
- Юрий Михайлович Климачев** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; ст. научный сотрудник; E-mail: klimachevym@lebedev.ru
- Андрей Юрьевич Козлов** — канд. физ.-мат. наук; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; ст. научный сотрудник; E-mail: kozlovay@lebedev.ru

- Дмитрий Васильевич Сеницын** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; вед. научный сотрудник; E-mail: dvsmailru@mail.ru
- Олег Алексеевич Рулев** — Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, лаборатория газовых лазеров; мл. научный сотрудник; E-mail: rulevoa@lebedev.ru

Поступила в редакцию 26.04.2023; одобрена после рецензирования 23.06.2023; принята к публикации 31.07.2023.

REFERENCES

1. Borisovskaya E.M., Karmanova O.V., Shcherbakova M.S., Kalmikov V.V. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, no. 1(79), pp. 264–270. (in Russ.)
2. Borzenok S.A., Malyugin B.E., Izmaylova S.B. et al. *Fyodorov journal of ophthalmic*, 2016, no. 4, pp. 16–19. (in Russ.)
3. Evstrapov A.A. *Russian Journal of General Chemistry*, 2011, no. 2(LV), pp. 99–110. (in Russ.)
4. Mark D., Haerberle S., Roth G., von Stetten F., Zengerle R. *Chemical Society Reviews*, 2010, no. 3(39), pp. 1153–1182.
5. Klank H., Kutter J.P., Geschke O. *Lab Chip*, 2002, vol. 2, pp. 242.
6. Löhr C., La Fé-Perdomo I., Ramos-Grez J.A., Calvo J. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 144, pp. 107386.
7. Prakash S., Kumar S. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 139, pp. 107017.
8. Tokarev V.N. *Quantum Electronics*, 2006, no. 7(36), pp. 624–637. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n07ABEH013181>.
9. Bo Xia, Lan Jiang, Xiaowei Li, Xueliang Yan, Weiwei Zhao, Yongfeng Lu. *Appl. Phys. A*, 2014, no. 1(119), pp. 61–68.
10. Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A. et al. *Infrared Physics & Technology*, 2022, vol. 120, pp. 103921.
11. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P. *Quantum Electronics*, 2006, no. 7(36), pp. 656–663. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n07ABEH013201>.
12. Dutov A.I., Kuleshov A.A., Novoselov N.A., Semenov V.E., Sokolov A.A. *Proc. SPIE, XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*, 2003, vol. 5120, pp. 84–86, DOI: 10.1117/12.515476.
13. Ionin A.A., Kozlov A.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. *Kompaktnyy kriogennyy shchelevoy SO-lazer s nakachkoy yemkostnym VCH-razryadom* (Compact Cryogenic Slab CO Laser Pumped by a Capacitive RF Discharge), Preprint FIAN, 2008, no. 1. (in Russ.)

Data on authors

- Andrey A. Ionin** — Dr. Sci., Professor; P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Director of Department; E-mail: ioninaa@lebedev.ru
- Maxim V. Ionin** — P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Junior Researcher; E-mail: maximionin@gmail.com
- Yuriy M. Klimachev** — PhD, Associate Professor; P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Senior Researcher; E-mail: klimachevym@lebedev.ru
- Andrey Yu. Kozlov** — PhD; P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Senior Researcher; E-mail: kozlovay@lebedev.ru
- Dmitry V. Sinitsyn** — PhD, Associate Professor; P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Leading Researcher; E-mail: dvsmailru@mail.ru
- Oleg A. Rulev** — P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Gas Lasers Lab; Junior Researcher; E-mail: rulevoa@lebedev.ru

Received 26.04.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication 31.07.2023.