

**СВЕРЛЕНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ПММА
ИЗЛУЧЕНИЕМ СО-ЛАЗЕРА****Ионин М.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук),**Климачев Ю.М.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук),**Синицын Д.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук)**Научный руководитель – с.н.с., к.ф.-м.н., Климачев Ю.М.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук)

Введение. Полиметилметакрилат (ПММА) представляет собой жесткий аморфный полимер ($C_5O_2H_8$)_n, относящийся к термопластам. Он обладает высокой прозрачностью в видимой части спектра, хорошей стойкостью к различным воздействиям окружающей среды, хорошими физико-механическими и электроизоляционными свойствами. Он находится в твердом состоянии при комнатной температуре, а при нагревании размягчается и переходит в вязко-текучее (пластичное) состояние, при охлаждении твердеет и сохраняет способность снова переходить в вязко-текучее состояние. Среди прозрачных полимеров ПММА обладает уникальной атмосферостойкостью, а также устойчивостью к ультрафиолетовому излучению. Благодаря своим свойствам ПММА широко применяется в светотехнике, авиа- и машиностроении, микро- и нанoeлектронике. Благодаря низкой токсичности (биосовместимости) и высокой устойчивости к бактериям ПММА используется в медицине и медицинских исследованиях.

Из-за увеличения вязкости материала при нагреве возникают трудности при механической обработке ПММА. Особенно это заметно при сверлении глубоких отверстий малого диаметра, при формировании пропилов малой ширины или при формировании микроканалов для производства «лабораторий на чипе» («Lab-on-a-Chip»). Для выполнения таких операций можно использовать лазерное излучение видимого или УФ-диапазона, однако, из-за высокой прозрачности материала обработка ПММА возможна только методом абляции высокоинтенсивными лазерными импульсами. 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 ~1 мм.

Одним из лазерных источников в этом спектральном диапазоне является СО-лазер, работающий на многочисленных фундаментальных колебательно-вращательных переходах молекулы СО в диапазоне длин волн 5-7 мкм. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию особенностей сверления высокоаспектных отверстий субмиллиметрового диаметра в ПММА излучением импульсно-периодического щелевого СО-лазера с ВЧ-накачкой.

Основная часть. Характеристики и режимы работы использованного импульсно-периодического щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой подробно описаны в [1]. В экспериментах использовался гибридный волноводно-неустойчивый лазерный резонатор, средняя мощность СО-лазера варьировалась в диапазоне от 5 до 30 Вт. Лазерное излучение направлялось на образец из ПММА по нормали к его поверхности через фокусирующую линзу. При обработке ПММА излучением среднего ИК-диапазона происходит его поглощение и материал нагревается. При относительно небольшой мощности лазерного излучения в результате нагрева ПММА переходит в вязкотекучее состояние. При более сильном нагреве материал деполимеризуется и выходит из зоны облучения в виде пара или дыма. Вокруг зоны с испарившимся материалом находится участок с расплавленным материалом. Однако, образующаяся область нагретого материала вокруг зоны взаимодействия с лазерным излучением относительно мала из-за низкой теплопроводности ПММА.

Эксперименты по сверлению отверстий в ПММА проводились путем фокусировки луча СО-лазера на поверхность образца. 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. Показано, что при фокусировке лазерного луча на поверхность ПММА в материале формировался своего рода волновод, по которому происходило дальнейшее распространение лазерного луча, что позволяло сверлить протяженные отверстия с большим аспектным соотношением. При этом, пока продолжалась обработка лазерным излучением, вокруг образовавшегося канала визуально наблюдалась небольшая зона нагрева материала.

При фокусировке, подобранной оптимальным образом (фокусное расстояние линзы 200 мм, расстояние до поверхности ПММА 215 мм), в ПММА формировался канал практически постоянного диаметра (среднее значение $D \sim 0.5$ мм) длиной до 40 мм (аспектное отношение ~ 100) с небольшим уменьшением диаметра к концу канала.

Была проанализирована временная динамика длины просверленного отверстия в образце ПММА для различной средней мощности СО-лазера и оптимальных параметров фокусировки. Средняя мощность лазера варьировалась частотой следования f импульсов ВЧ разряда накачки (и генерации) СО-лазера при одинаковой длительности импульсов накачки. Была получена неравномерная динамика сверления отверстий, что можно объяснить накоплением в формирующемся канале частиц испаренного материала, которые удаляются за счет диффузии в течение достаточно длительного времени (принудительное выдувание/отсос продуктов взаимодействия не осуществлялся). И хотя испаренный материал имеет относительно низкое поглощение на длинах волн СО-лазера, его частицы внутри канала могут рассеивать лазерное излучение, и этот процесс может иметь волнообразный характер из-за циклического накопления и испускания продуктов вовне канала.

Выводы. Продемонстрировано, что использование излучения СО-лазера (длина волны $\sim 5.0-5.5$ мкм) для сверления ПММА позволяет получать отверстия с большим аспектным соотношением (~ 100) за счет правильного выбора условий фокусировки лазерного луча и средней мощности лазера. При лазерном сверлении в ПММА формируется волноводно-подобная структура отверстия с почти постоянным субмиллиметровым диаметром по всей его длине. При прохождении луча СО-лазера по сформированному им же волноводному каналу в зоне плавления/испарения мощность лазерного луча уменьшается по мере увеличения длины просверленного отверстия, и скорость сверления падает.

Выбор специального режима работы СО-лазера - увеличение мощности лазера со временем, по мере углубления лазерного луча в образец, вероятно, позволит за счет компенсации потерь излучения в волноводе сформировать в ПММА отверстия с еще большим аспектным соотношением и постоянным диаметром по всей длине отверстия.

Список использованных источников:

1. A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.A. Kotkov, A.Yu. Kozlov, O.A. Rulev, D.V. Sinitsyn, M.V. Ionin, *Infrared Physics & Technology*, **120** (2022)