

## РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, Е.О. Семенчук  
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
ул. Ожешко 22, 230023 Гродно, Беларусь, ion\_ne@mail.ru

Проведено сравнение результатов воздействия лазерного излучения на полиметилметакрилат при различных условиях: на воздухе при нормальном давлении, на воздухе при пониженном давлении и в воде. Показано, что процесс разрушения материала в указанных условиях имеет существенные отличия. В частности, при помещении облучаемого образца в атмосферу воздуха, имеющего нормальное давление, на поверхности мишени образуется и развивается кратер. Существенно, что развитие кратера протекает неравномерно: сначала увеличивается его диаметр, и только после того, как он (диаметр) становится в полтора раза больше диаметра пятна фокусировки лазерного излучения, рост кратера приобретает трехмерный характер. При расположении облучаемого образца в камере с пониженным давлением и в воде излучение лазера свободно проникает вглубь материала, что позволяет формироваться очагам пробоя в объеме образца на дефектах и неоднородностях. При этом развитие каверн, расположенных ближе к облучаемой поверхности, препятствует развитию более удаленных каверн (экранировка). При отсутствии доступа кислорода кратер на поверхности облучаемого образца не образуется. Следовательно, основным механизмом образования кратера на поверхности полиметилметакрилата при его лазерной обработке является горение пластика.

**Ключевые слова:** импульсное лазерное излучение; кратер; каверна; лазерный пробой; зона лазерного разрушения; экранировка излучения; кислород.

## DESTRUCTION OF POLIMETHILMETHACRILATE DURING ACTION ON ITS SURFACE OF LASER RADIATION

S.V. Vasiliev, A.Yu. Ivanov, E.O. Semenchuk  
Yanka Kupala State University of Grodno, 22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, ion\_ne@mail

The comparison of the results of laser treating of polimethylmethacrilate sample under different conditions: in the air with normal pressure, in the air with low pressure and in water was carried out. It was shown that matter destruction process under mentioned conditions considerably differs. Specifically, on location of irradiated sample in atmosphere of air with normal pressure on the surface of the target a crater is forming and growing. It is sufficient that crater evolution proceeds not uniformly: at first its diameter grows and only then it (diameter) becomes in one and a half more than the laser radiation focusing spot diameter the crater growth assumes three-dimensional character. On location of irradiated sample in the chamber with low pressure or in the water laser radiation free penetrates deep into the material that allows to form the centers of destruction in the bulk of the target on the defects and non-homogeneities. It is sufficient that evolution of cavities placed near the irradiated surface prevents formation and evolution of more remote cavities (screening). It is pointed that on the absence of oxygen access crater on the surface of irradiated sample don't forms. Consequently, the main mechanism of formation of crater on the surface of polimethylmethacrilate during its laser treating is the plastic burning.

**Keywords:** pulse laser radiation; crater; cavity; laser breakdown; zone of laser destruction; screening of radiation; oxygen.

### Введение

В наши дни заложены основные представления о механизмах разрушения твердых тел, находящихся в газовой среде, лазерным излучением с плотностью потока  $\sim 10^5 - 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Было установлено, что конечный результат воздействия лазерного излучения на материал весьма чувствителен к параметрам излучения (длине волны, пространственно-временной структуре), а также к состоянию поверхности обрабатываемого вещества и его составу; при этом внутренняя взаимосвязь перечисленных выше процессов приводит к весьма сложной картине протекания лазерной обработки материалов.

Большое внимание уделяется исследованию разрушения прозрачных твердых тел под действием лазерного излучения (ЛИ). Это объясняется широким применением прозрачных сред в лазерной технике (активные среды, системы формирования и транспортировки пучков ЛИ и др.). Значительные успехи достигнуты в использовании полиметилметакрилата (ПММА) при изготовлении полимерных матриц для активных элементов лазер-

ных систем. Однако существенным недостатком ПММА является его невысокая лучевая стойкость. В связи с этим выявление особенностей разрушения прозрачных полимеров в различных средах и при различных режимах лазерного воздействия является актуальным. При этом исследование воздействия лазерных импульсов сложной временной формы длительностью  $\sim 1$  мс с плотностями потока  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> на образцы из ПММА представляет особый интерес по той причине, что воздействие ЛИ именно с такими параметрами приводит не только к разрушению мишени, но и изменению атомно-молекулярной структуры образца.

Эрозия металлов при лазерном разрушении происходит за счет интенсивного («взрывного») испарения вещества в ходе поглощения излучения воздействующего лазера. Однако у ПММА коэффициент поглощения для излучения видимого диапазона существенно ниже, чем у металлов (ПММА – прозрачный диэлектрик). Кроме того, ПММА горит в атмосфере кислорода.

В данной работе рассматривается динамика формирования зоны разрушения при различных

условиях воздействия лазерного излучения на образцы из ПММА, окруженные как воздухом при различном давлении, так и водой. Целью работы является определение основного механизма формирования кратера при воздействии лазерного излучения на поверхность ПММА

### Методика эксперимента

Излучение рубинового лазера ГОР-100М, работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса  $\tau \sim 1.2$  мс, длина волны  $\lambda = 0.694$  мкм), пройдя через фокусирующую систему, направлялось на образец, располагавшийся либо в вакуумной камере, либо в кювете с водой. В качестве фокусирующих применялись как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, которые позволяли строить изображение диафрагмы на поверхности образца. Это позволяло получать на поверхности мишени однородное пятно фокусировки излучения с резкими границами. Диаметр  $D$  полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм. Энергия лазерных импульсов  $E_0$  варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж.

Для изучения пространственной и временной эволюции зоны лазерного разрушения в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической кино съемки. Образец помещался в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера ( $\lambda = 0.694$  мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Длительность импульса излучения зондирующего лазера составляла  $\sim 400$  мкс. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутрь резонатора, а продольных – эталонном Фабри-Перо, использовавшимся в качестве выходного зеркала. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор, позволявший получить параллельный световой пучок диаметром до 3 см, что было вполне достаточно для наблюдения за развитием зоны лазерного разрушения в прозрачном диэлектрике, за ростом кратера, изменением плотности и температуры вещества в неупругой зоне, а также за процессами, протекающими в газе и плазменном облаке вблизи мишени. Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива. Скоростная камера работала в режиме лупы времени. Угол голографирования ограничивался конструкцией камеры и был равен  $\sim 10^{-2}$  рад, что соответствует фотографической разрешающей способности  $\sim 16$  лин/мм. Полученные отдельные кадры голограмм сфокусированных изображений обеспечивали временное разрешение не хуже 0.8 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта  $\approx 50$  мкм. Дифракционная эффективность голограмм позволяла в стационарных условиях восстанавливать и регистрировать интерференционные и теневые картины исследуемого процесса. Погрешность измерений показателя преломления и связанных с ним величин определя-

лась точностью регистрации смещенных полос на восстановленных интерференционных картинах и не превышала  $\sim 10\%$  при доверительной вероятности 95 %.

### Результаты и их обсуждение

Динамика лазерного разрушения образца из ПММА, окруженного воздухом, находящимся в нормальных условиях (температура  $\sim 300$  К, давление  $\sim 10^5$  Па) достаточно подробно описана [1]. Временные зависимости диаметра  $d_1$ , глубины  $h_1$  и объема  $V$  кратера имеют нелинейный характер. Рост размеров кратера сначала осуществлялся преимущественно за счет увеличения его диаметра  $d$ , а затем, когда  $d$  достигает размеров  $\sim 1.5D$ , начинается трехмерный рост кратера. При этом на первой стадии объем  $V$  изменяется по закону:

$$V = F \exp[C(E - E_0)], \quad (1)$$

где  $E_0 \approx 7$  Дж;  $C \approx 0.2$  Дж $^{-1}$  и  $F = 0.05$  мм $^3$ , а на второй стадии – по закону:

$$V = V_b + A(E - E_0)^\alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha \approx 1.5$ ;  $A \approx 2$  мм $^3$ /Дж $^{3/2}$ ;  $V_b \approx 0.5$  мм $^3$  (последняя величина определяется объемом  $V$ , при котором происходит смена режима изменения объема).

Вышесказанному можно дать следующее объяснение. Вначале рост кратера происходит за счет однородного (и слабого) поглощения лазерного излучения в прозрачной среде. ПММА быстро размягчается, затем образуется паровой (далее пароплазменный) факел, размеры которого превышают диаметр пятна фокусировки. Происходит разогрев поверхности мишени за счет теплопередачи от пароплазменного факела, что и способствует увеличению диаметра кратера.

Также резкость границ светового пучка приводит к большому  $|\text{grad } T|$  по периметру пятна фокусировки. В то же время прозрачность среды приводит к малому  $|\text{grad } T|$  в направлении оси  $z$ . Поскольку поток тепловой энергии  $g_r \sim -\text{grad } T$ , то более интенсивно нагревается периферийная (по отношению к оси системы) часть поверхности образца. При этом, так как масса испаренного вещества:

$$\Delta m = \rho h \Delta S = \Delta g_r / \beta \sim \Delta E S / L_b,$$

где  $L_b$  – удельная теплота парообразования, имеет:  $S \sim \exp E / (\rho h L_b)$ , что при почти постоянном  $h_1$  (так как компонента  $\text{grad } T$ , направленная вдоль оси  $z$ , мала) хорошо согласуется с уравнением (1).

На второй стадии роста кратера поглощение лазерного излучения по оси  $z$  уже сильно размягченного и менее прозрачного ПММА увеличивается. Кроме того, после выхода границ зоны испарения за пределы пятна фокусировки излучения градиент температуры по его периметру уменьшается и со временем происходит выравнивание градиента по всему профилю кратера. Поток тепла по всем направлениям также выравнивается, и испарение становится трёхмерным. Наступает вторая стадия процесса, на которой  $\Delta d \sim \Delta h$ . Если считать кра-

тер сферическим сегментом (для неглубоких кратеров, образующихся в таких экспериментах  $h_1 \ll d_1$ ), что допустимо в первом приближении, то  $\Delta V = 4\pi R^2 \Delta R$ , где  $R$  – радиус кривизны кратера.

Поскольку для процессов, обладающих осевой симметрией (а описанный процесс такой симметрией обладает),  $R \sim E^{1/2}$ , то имеем  $V \sim E^{3/2}$ , что хорошо согласуется с уравнением (2).

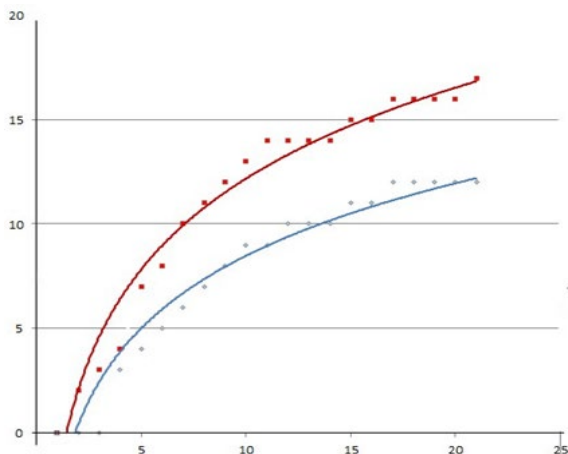


Рис. 1. Временные зависимости глубины и ширины образовавшегося кратера под действием лазерного излучения на образец из ПММА с заранее нанесенным на его поверхность черным пятном

Fig. 1. Temporal dependences of depth and width of crater formed on laser treating of PMMA sample with a black spot marked on its surface before irradiation

Принципиально иная картина наблюдается при воздействии импульсного лазерного излучения с аналогичными параметрами на образец из ПММА, окруженный воздухом при давлении  $\sim 10^{-5}$  Па (рис. 1). Для получения кривых использованы восстановленные с голограмм прямотеневые картины необратимо измененных зон, образовавшихся при воздействии лазерного излучения на образец из ПММА при пониженном давлении окружающего мишень воздуха. Видно, что в данном случае на поверхности облучаемого образца образования макроскопической (видимой) зоны разрушения первоначально не наблюдается. Лазерное излучение беспрепятственно проходит вглубь образца и поглощается на неоднородностях (дефектах) материала. В результате внутри образца возникают и увеличиваются в размерах видимые зоны разрушения (каверн). При этом первоначально развивается каверна на большем (более грубом) дефекте вдали от облучаемой поверхности. Параллельно начинает формироваться каверна и на меньшем дефекте, расположенном ближе к облучаемой поверхности. С течением времени «ближний» дефект начинает «затенять» (экранировать) дальний, и его рост замедляется. Если «ближний» дефект выходит на поверхность, в точке выхода начинается развитие кратера. Если «ближняя» каверна распо-

лагается достаточно далеко от облучаемой поверхности, она на поверхность не выходит, и кратер не образуется.

Аналогичная картина наблюдается и при воздействии лазерного излучения на образец из ПММА, расположенный в воде (рис/ 2).

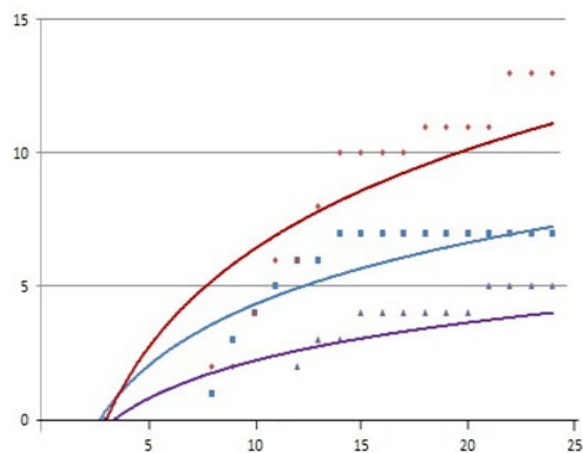


Рис. 2. Временные зависимости размеров каверн и кратера, образовавшихся под действием лазерного излучения на нечерненный образец из ПММА, расположенный в жидкости

Fig. 2. Temporal dependences of sizes of cavities and crater formed on laser treating of PMMA sample without a black spot disposed in water

## Заключение

При расположении облучаемого образца в камере с пониженным давлением и в воде излучение лазера свободно проникает вглубь материала, что позволяет формироваться очагам пробоя в объеме образца на дефектах и неоднородностях. При этом развитие каверн, расположенных ближе к облучаемой поверхности, препятствует развитию более удаленных каверн (экранировка).

Таким образом, в вакууме и в воде (т.е. при отсутствии доступа кислорода), кратер не образуется. Следовательно, основным механизмом образования кратера на поверхности полиметилметакрилата является горение пластика.

## Библиографические ссылки

1. Васильев С.В., Иванов А.Ю., Недолугов В.И. Динамика роста кратера и формирования упругих волн при действии на поверхность прозрачного диэлектрика миллисекундного лазерного импульса. *Квантовая электроника* 1994; 21(4): 324-328.

## References

1. Vasiliev S.V., Ivanov A.Yu., Nedolugov V.I. Dinamika rosta kratera i formirovaniya uprugih voln pri deistvii na poverhnost prozrachnogo dielektrika millisekundnogo lasernogo impulsa [Dynamics of crater growth and elastic waves formation during action of millisecond laser on the transparent insulator surface]. *Kvantovaya Elektronika* [Sov. J. Quantum Electron] 1994; 21(4): 324-328. (In Russian).