

Динамика поверхностных процессов при лазерном воздействии на прозрачный диэлектрик в различных внешних условиях

С. В. Васильев, А. Л. Ситкевич

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,
e-mail: s.vasilijev@grsu.by

С помощью скоростной интерференционной киносъемки исследована динамика развития зоны разрушения, приповерхностного пароплазменного образования при воздействии лазерного излучения с плотностями потока до 10^7 Вт/см² и длительностью импульса ~ 1 мс на образец из полиметилметакрилата толщиной. Экспериментально показано, что развитие зоны лазерного разрушения объясняется в основном тепловым механизмом при возможном влиянии возникающих упругих колебаний.

Ключевые слова: зона лазерного разрушения, прозрачный диэлектрик, акустические волны.

Dynamics of surface processes under laser irradiation of a transparent dielectric under various external conditions

S. V. Vasiliev, A. L. Sitkevich

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus, e-mail: s.vasilijev@grsu.by

Using high-speed interference filming, the dynamics of the development of the destruction zone and the near-surface vapor-plasma formation were studied under the influence of laser radiation with flux densities of up to 10^7 W/cm² and a pulse duration of ~ 1 ms on a sample made of polymethyl methacrylate with a thickness of.

Keywords: laser destruction zone, transparent dielectric, acoustic waves.

Введение

Большое внимание уделяется исследованию разрушения прозрачных твердых тел под действием лазерного излучения (ЛИ) [1–6]. Это объясняется широким применением прозрачных сред в лазерной технике (активные среды, системы формирования и транспортировки пучков ЛИ, нелинейные преобразователи). В частности, значительные успехи достигнуты в использовании полиметилметакрилата (ПММА) при изготовлении полимерных матриц для активных элементов лазерных систем. Во многом это обусловлено относительной простотой изготовления и достаточно хорошими оптическими качествами получаемых матриц [7, 8]. 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.

1. Экспериментальная установка и методика исследований

Для изучения развития необратимо изменённой зоны в прозрачных веществах, подвергшихся лазерному воздействию, были выбраны теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей. Их основные преимущества при данных исследованиях заключались в следующем: оптические методы не вводят вредных возмущений в исследуемое пространство и не вызывают изменения физических свойств среды; они обладают большой чувствительностью; дают возможность одновременно исследовать всё пространство, занятое изучаемым явлением; их успешно можно применять для исследования нестационарных быстротекущих явлений.

Схема экспериментальной установки, использовавшейся в работе, приведена на рис. 1. Излучение рубинового лазера 1 (ГОР-100М), работавшего в режиме свободной генерации (длительность импульса $\tau = 1,2$ мс, $\lambda = 0,694$ мкм), пройдя через фокусирующую систему 2, направлялось на образец 3. Диаметр полученного таким образом пятна излучения с резкими краями варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм.

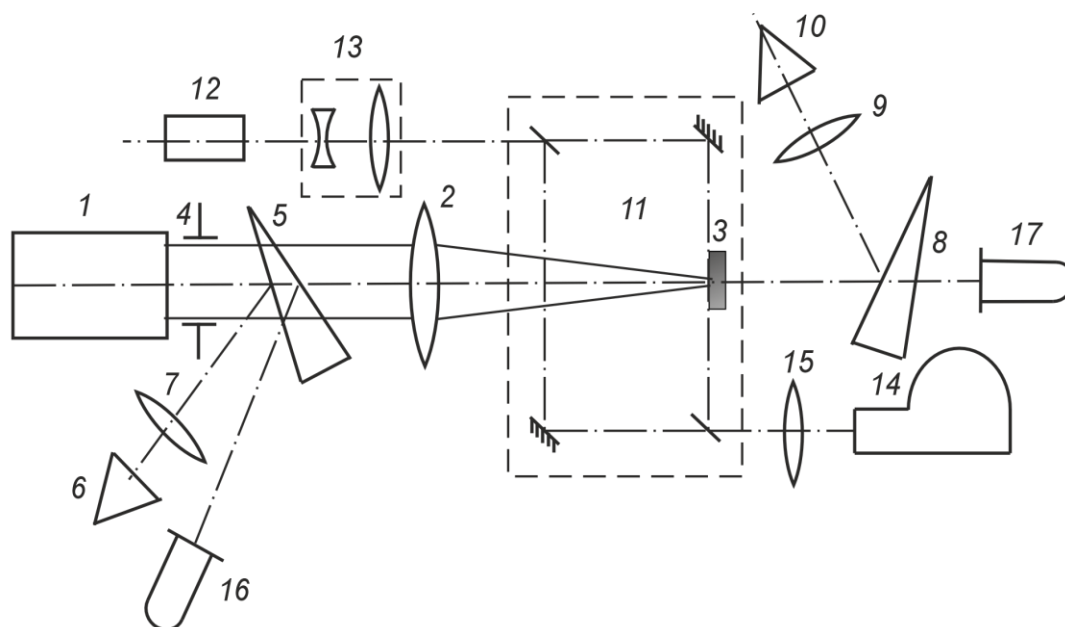


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментально определенный размер фокальной области (области каустики) системы 2 при использовании лазера 1 не превышал 2 мм. Часть ЛИ (~ 4 %) направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в измеритель энергии ИМО-2Н 6, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы 7. Энергия лазерных импульсов варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Часть излучения (~ 4 %), прошедшего через образец 3, при помощи второго клина 8 и линзы 9 направлялась на второй измеритель энергии ИМО-2Н 10. По показаниям ИМО-2Н 6 и 10 (рис. 1) определялась величина коэффициента поглощения

$k_{\text{погл}}$. Коаксиальные фотоэлементы ФЭК 16 – 17, сигнал с которых подавался на вход осциллографов С8-13, использовался для регистрации временной формы лазерного импульса.

Для изучения приповерхностных процессов в образце 3 в ходе воздействия на него ЛИ, упомянутый образец помещался в одно из плеч голографического интерферометра Маха-Цендера 11. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера 12 ($\lambda = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Селекция поперечных мод зондирующего лазера осуществлялась диафрагмой, помещенной внутрь резонатора, а продольных – эталоном Фабри-Перо, использовавшимся в качестве выходного зеркала. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор 13, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром до 3 см и превышающим толщину облучаемого образца, что позволило наблюдать за ростом кратера, развитием пароплазменного облака, а также за формированием и распространением упругих волн в веществе мишени.

Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М 14, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива 15. Скоростная камера работала в режиме лупы времени и обеспечивала пространственное разрешение по полю объекта ~ 50 мкм. Временное разрешение составляло ~ 1 мкс.

2. Особенности формирования кратера в полиметилметакрилате

На рис. 2 представлены теневые картины, полученные при воздействии импульсного лазерного излучения на образец из ПММА, окруженный воздухом при давлении 10^{-3} Па.

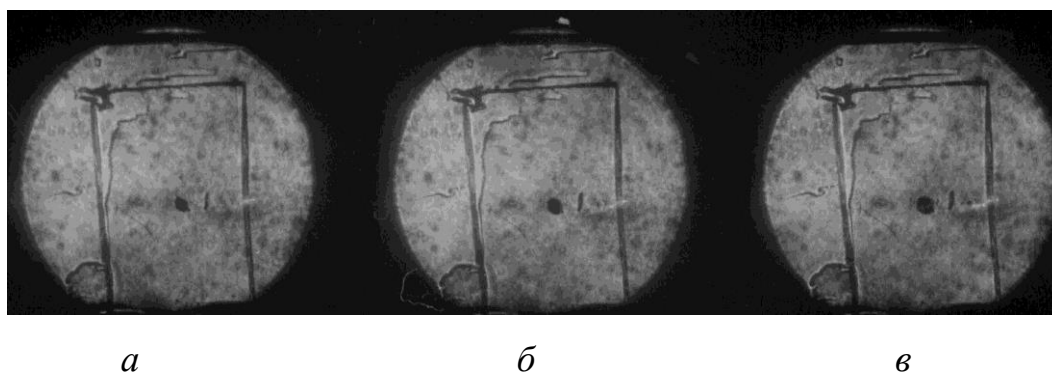


Рис. 2. Теневые картины в разные моменты времени относительно начала воздействия:
 $a - t = 38$ мкс; $б - t = 44$ мкс; $в - t = 52$ мкс

Видно, что в данном случае на поверхности облучаемого образца образования макроскопической (видимой) зоны разрушения первоначально не наблюдается. При почти полном отсутствии кислорода горения ПММА не происходит, соответственно не происходит и экранировки излучения поверхностью образца. Лазерное излучение беспрепятственно проходит вглубь образца и поглощается на

неоднородностях (дефектах) материала, как при лазерном пробое в стекле и других прозрачных аморфных силикатах, а также кристаллах. В результате внутри образца возникают и увеличиваются в размерах видимые зоны разрушения (каверны). 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 располагается достаточно далеко от облучаемой поверхности, она на поверхность не «выходит», и кратер не образуется.

При воздействии лазерного излучения на образец из ПММА, расположенный в воде, наблюдаются явления аналогичные при воздействии ЛИ на металлический образец, расположенный в воде. Воспользовавшись предложенной методикой расчета параметров парогАЗового образования возможен расчет температуры поверхности ПММА.

Оптический пробой прозрачных полимеров обусловлен наличием поглощающих включений, которые всегда присутствуют в объеме образца. Также, в процессе развития кратера, в образце возникают акустические волны. На рис. 3 представлена интерференционная картина процесса воздействия ЛИ на ПММА.

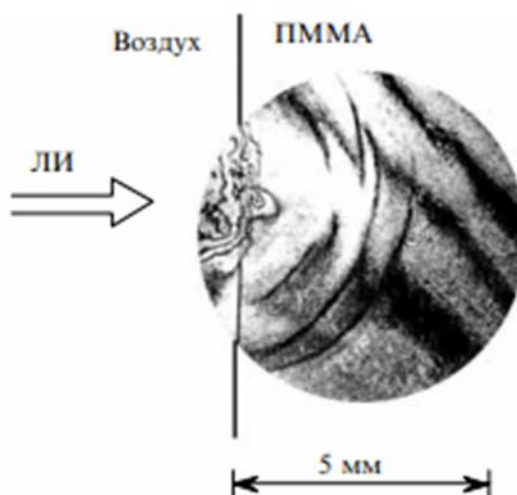


Рис. 3. Интерферограмма акустической волны в момент времени $t = 50$ мкс относительно начала воздействия на ПММА ЛИ с энергией 20 Дж

Для регистрации давления упругих колебаний, формирующихся в обрабатываемом материале, использовался датчик на основе пьезокерамики ЦТС-19 с устройством для компенсации отражений. Датчик регистрировал нормальную к рабочему срезу компоненту тензора напряжений. Полоса пропускания датчика позволяла достоверно регистрировать упругие колебания с частотами до 1 МГц.

Датчик прикреплялся к тыльной стороне облучаемого образца, сигнал подавался на вход осциллографа С8-13, запуск которого был синхронизирован с запуском осциллографа, регистрирующего временную форму лазерного импульса. По осциллограммам было получено значение максимального давления упругих колебаний, которое составило ≈ 5 кПа.

Заключение.

Экспериментально показано, что развитие зоны лазерного разрушения объясняется в основном действием механизма теплового нагрева поглощающих включений в объеме образца, при возможном влиянии возникающих упругих колебаний.

При расположении облучаемого образца в камере с пониженным давлением 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).

В ПММА, находящемся в воде, поглощение излучения и экранировка поверхности осуществляется за счет парогазового образования и каверн на неоднородностях внутри образца не наблюдается.

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. Разрушение прозрачных диэлектриков под действием мощного лазерного излучения / Б. М. Ашкинадзе [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1966. Т. 50, № 5. С. 1187–1201.
2. Маненков А. А., Нечитайло В. С. Роль поглощающих дефектов в лазерном разрушении прозрачных полимеров // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 3. С. 616–619.
3. Маненков А. А. К механизму эффекта накопления в лазерном разрушении полимеров: возникновение макроразрушения вследствие ионизационной волны поглощения / А. А. Маненков, Г. А. Матюшин, В. С. Нечитайло // Квантовая электроника. 1984. Т. 11, № 4. С. 839 – 841.
4. Маненков, А. А., Прохоров А. М. Лазерное разрушение прозрачных твердых тел // Успехи физических наук. 1986. Т. 148, № 1. С. 179–211.
5. Взаимодействие лазерного излучения с оптическими полимерами / К. М. Дюмаев [и др.] // Труды ИОФАН. – М. : Наука, 1991. Т. 33. 144 с.
6. Колдунов, М. Ф. Механическое разрушение прозрачных твердых тел лазерными импульсами разной длительности / М. Ф. Колдунов, А. А. Маненков, И. Л. Покотило // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 4. С. 335–340.
7. Активные полимерные элементы для лазеров на красителях / Д. А. Громов [и др.] // Известия АН СССР. Серия физическая. 1982. Т. 46, № 10. С. 1956–1958.
8. Прозрачные полимеры – новый класс оптических материалов для лазеров / К. М. Дюмаев [и др.] // Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 4. С. 810– 818.