УДК 534.222.2;539.2

Лазерная деструкция полимерных материалов
Laser destruction of polymeric materials

З.С. ТОРШХОЕВА

Z.S. TORSHHOEVA

Ингушский государственный университет, Назрань

Ingush State University, Nazran, Russian Federation

torshhoeva.zina@yandex.ru

В данной работе проанализированы свойства полимеров, которые делают их незаменимыми при изготовлении элементов, используемых в оптике, так как основным требованием к полимерам является устойчивость при воздействии лазерного излучения. В настоящее время полимеры используются в качестве активных лазерных сред. Наиболее часто применяемым является полиметилметакрилат, обладающий высокой прозрачностью. Он является самым стойким по отношению к лазерному воздействию.

Ключевые слова: полиметилметакрилат (ПММА), разрушение, трещина, лазерный импульс, абляция

This work analyzes the properties of polymers, which make them indispensable in the manufacture of elements used in optics, since the main requirement for polymers is stability when exposed to laser radiation. Currently, polymers are used as active laser media. The most commonly used is polymethyl methacrylate, which is highly transparent and the most resistant in relation to laser exposure.

Keywords: polymethylmethacrylate (PMMA), the destruction, the laser pulse, crack, ablation

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-49-50

Разрушение полимерных материалов может быть вызвано различными механизмами поглощения энергии лазерного излучения – это механизмы, связанные со свойствами самой полимерной матрицы (собственные механизмы), или механизмы, обусловленные поглощающими включениями.

Основным требованием к полимерным материалам является устойчивость при воздействии излучения лазера накачки I_p (лазерная прочность), которая определяется как величина интенсивности, при которой в объеме полимера возникает микроразрушение порядка 10^{-2} см с вероятностью $P = 0,5$. При таком уровне интенсивности I порог лазерного разрушения зависит от размера области взаимодействия d, а при фиксированных размерах лазерного луча он зависит от интенсивности.

Лазерная стойкость полимеров зависит от оптической чистоты материала, размеров области, подвергающейся воздействию излучения, частоты излучения, длительности импульса, температуры образца, режима воздействия.

Особенностью полимерных материалов при лазерном облучении является высокая стойкость поверхности по сравнению с объемом. На контактной поверхности и в некотором объеме, прилегающем к ней, разрушения образца как целого не происходит. Такое соотношение порогов разрушения остается справедливым при разных способах воздействия на поверхность полимеров. Это обстоятельство является весьма важным, так как поверхностная стойкость прозрачных полимеров является лимитирующим фактором при их использовании в лазерных системах.

Конечная стадия лазерной деструкции в полимерах – плавление, образование трещины, абляция.

Образование трещины – это основной механизм деструкции при милли-пикосекундной длительности лазерного импульса. Механизм теплового взрыва, обусловленного поглощающими включениями, является наиболее вероятным при нано-пикосекундной длительности импульса.

При лазерных импульсах длительностью менее 10 пс практически у всех полимеров превалирующим механизмом разрушения является абляция [1].

Разрушения, возникающие в полимерах при лазерном воздействии, подразделяются на разрушения, возникающие в идеально чистых средах, и разрушения, обусловленные примесями. В таких случаях различны и механизмы, приводящие к разрушению. В первом случае – это оптический пробой, аналогичный пробою в газе, а во втором – разрушение, связанное с нагревом примесей.

Таблица 1. Зависимость плотности энергии (P_d) полиметилметакрилата от чистоты образцов.

Полимер	Размер пор фильтра, мкм				
	16	1,6	0,8	0,45	0,22
При d = 110 мкм, λ = 0,69 мкм					
Полиметилметакрилат	0,08	0,11	0,16	0,21	0,28
При d = 4,6 мкм, λ = 1,06 мкм					
Полиметилметакрилат	0,24	0,31	0,38	0,43	0,53

В области импульсов наносекундного диапазона разрушение определяется несобственным механизмом поглощения излучения, т.е. поглощением инородными включениями, при воздействии импульсов длительностью 10^{-15}–10^{-12} с собственным механизмом поглощения – ударной и многофотонной ионизацией. Завершающая стадия разрушения – формирование повреждения – определяется только поглощенной энергией, размерами области лазерного воздействия и отводом тепла из области.

Формирование трещины не зависит от механизма поглощения энергии лазерного облучения, который одинаков для собственных и несобственных механизмов поглощения. Трещина формируется по механизму отрыва. Необходимое условие ее формирования:

$$max\ \sigma_{\Phi}(r,t) \geq \sigma_{ih}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\Phi}(r,t)$ – тангенциальная компонента тензора напряжений, σ_{ih} – предел прочности твердого тела.

Для формирования трещины, помимо выполнения этого неравенства, необходима энергия, так как трещина всегда имеет конечный

размер. В случае сферической области взаимодействия с радиусом R эта энергия равна:

$$E_T = 39R^2\gamma, \quad (2)$$

где γ – плотность поверхностной энергии твердого тела.

Трещина будет формироваться, если энергия поля деформации в окрестности локального нагрева будет превышать E_T:

$$\eta\vartheta E_u \geq E_T, \quad (3)$$

где E_u – энергия ионизации; η – коэффициент, определяющий долю поглощенной энергии; ϑ – коэффициент связности.

Причем

$$\vartheta = \frac{T_o}{9c_h}\left[\frac{1+\nu_h}{1-\nu_h}\right]^2 \alpha_h^2 c_l^2,$$

где α_h – коэффициент линейного расширения, c_h –теплоемкость, ν_h – коэффициент Пуассона, c_l – продольная скорость звука, T_0 – температура до воздействия лазерного излучения. Индекс h означает, что все характеристики относятся к самому полимеру.

В области взаимодействия энергия импульса связана с мощностью излучения F_u соотношением

$$E_и = \frac{\sqrt{\pi}}{2} F_u \tau_u,$$

где $\tau_и$ – длительность импульса. Тогда (3) можно записать в виде:

$$\tau_u \geq \tau_{крит} \approx \frac{78R^2\gamma}{\eta\vartheta F_u}. \quad (4)$$

Следовательно, в области импульсов малой длительности ($\tau_u \geq \tau_{крит}$) при воздействии излучения с пороговой интенсивностью I_{th} образование трещины невозможно.

Из неравенства (3) следует ограничение, связанное с требованием конечности размера области локального нагрева для формирования разрушения. Действительно, величина η определяет долю поглощенной энергии лазерного импульса. Для сферической области взаимодействия

$$\eta E_u \cong \frac{4}{3}\pi R^3 k_\alpha W_u, \quad (5)$$

где k_α – коэффициент поглощения, W_u – плотность энергии в импульсе.

Тогда (3) запишется в виде:

$$R \geq R_{крит} \cong \frac{10\gamma}{\vartheta k_\alpha W_u}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) позволяют сделать вывод, что поглощенная энергия лазерного излучения зависит от радиуса R^3, а энергия трещины – от R^2. Энергия, необходимая для возникновения трещины, уменьшается медленнее, чем поглощенная энергия, с уменьшением радиуса R. Поэтому для формирования трещины будет недостаточно малого размера области поглощенной энергии. Для малых областей взаимодействия выполняется неравенство (1), а условие (3) – нет.

Зависимость порогов разрушения полимеров I_p снижается более чем в 20 раз при увеличении диаметра облучаемой зоны от 30 до 640 мкм. Поглощающие дефекты влияют на скорость разрушения полимеров под действием лазерного излучения. Это подтверждают исследования зависимости порогов разрушения от длительности импульсов в диапазоне 10–40 нс и длины волны излучения в диапазоне 1,06–0,53 мкм, а также наличие флуктуации разрушения от точки к точке внутри образца [2].

В таблице 2 приведена зависимость порога I_{p1} для полиметилметакрилата от оптической чистоты исходной мономерной композиции, диаметра лазерного луча и длины волны излучения. Степень очистки регулировалась размерами пор фильтров. В качестве базового был взят порог одноимпульсного разрушения полиметилметакрилата, полученного при очистке исходной мономерной композиции фильтром с размером пор 0,2 мкм при воздействии широкого (d = 100 мкм) лазерного пучка с λ = 0,7 мкм.

Таблица 2. Зависимость порога I_{p1} для полиметилметакрилата от оптической чистоты, диаметра лазерного луча и длины волны лазера.

Полимер	Размер пор фильтра, мкм				
	16	1,6	0,8	0,45	0,22
При d = 110мкм, λ = 0,69мкм					
Полиметилметакрилат	0,29	0,40	0,54	0,74	1
При d = 3,6 мкм, λ = 0,69мкм					
Полиметилметакрилат	200	240	280	330	380
При d = 4,6 мкм, λ = 1,06 мкм					
Полиметилметакрилат	160	210	250	290	350

При использовании для очистки мономеров фильтров с размером пор от 16 до 0,22 мкм значение порога I_{p1} монотонно увеличивается.

Заключение

Всегда присутствующие в полимерах поглощающие дефекты являются доминирующим источником лазерного разрушения как поверхностей, так и объемов оптических элементов из различных материалов. В частности, исследования лазерного разрушения высокотемпературных кристаллов и неорганических стекол подтвердили определяющую роль поглощающих дефектов в их разрушении под действием высокоинтенсивного светового излучения [3].

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что разрушения в прозрачных полимерах связаны с поглощающими дефектами с различными порогами одноимпульсного разрушения.

Литература

1. Виноградов Б.А., Перепелкин К.Е., Мещерякова Г.П. Действие лазерного излучения на полимерные материалы. // Научные основы и прикладные задачи. М.: Наука. 2006.
2. Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслюков А.П. и др. Взаимодействие лазерного излучения с оптическими полимерами. М.: Наука. 1991.
3. Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Термоупругий и упругий механизмы лазерного повреждения поверхности прозрачных твёрдых тел. //Квантовая электроника. 1998. Т.3. С. 277–281.