

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 534.2

Эффективность формирования ударных волн, создаваемых оптическими пробоями на поверхности твердых тел

В.Н. Тищенко, В.Г. Посух, Э.Л. Бояринцев, А.В. Мелехов,
Л.С. Голобокова, И.Б. Мирошниченко*

*Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13/3*

Поступила в редакцию 15.11.2011 г.

Исследована возможность эффективного формирования ударных волн, создаваемых оптическими пробоями на поверхности твердых тел, состоящих из различных материалов. Показано, что в ударные волны преобразуется ~ 15–20% энергии импульсов при оптимальных параметрах излучения CO₂-лазера.

Ключевые слова: лазерное излучение, оптический пробой, ударные волны, мишень; laser light, optical disruptive discharge, shock waves, target.

Оптические пробой на поверхности твердых тел (далее – мишень) сопровождаются формированием ударных волн (УВ) [1], которые могут уносить до 20% подводимой энергии при использовании коротких лазерных импульсов (~ 1-мкс) [2]. Длительность t_c фазы сжатия УВ, так же как и при точечном взрыве, слабо зависит от энергии, что ограничивает возможность формирования низкочастотного звука и область применения оптоакустических методов. Так, при энергии импульсов $Q \sim 20$ мДж $t_c \sim 15$ мкс, а при 200 Дж – 60 мкс [3, 4].

Генерация низкочастотного звука возможна при использовании механизма объединения УВ [3, 4], создаваемых периодическими оптическими пробоями. При определенном соотношении между энергией и частотой повторения лазерных импульсов фазы сжатия соседних УВ, частично перекрываясь, создают волну, длина которой линейно зависит от числа импульсов. Механизм действует в разных газах и при облучении мишеней из различных материалов [4].

В настоящей статье, являющейся второй частью [4], изучается преобразование энергии лазерных импульсов в УВ при облучении различных материалов, что актуально в задачах дистанционного создания звука на мишенях, материал которых может быть неизвестен.

Цель работы – исследование эффективности формирования УВ, создаваемых оптическими пробоями

на мишенях, поглощающих излучение CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм). Длительность импульсов ~ 1 мкс, размер зоны облучения ~ 1–4 см, что соответствует размеру луча в фокусе при большом расстоянии до мишени. Эффективность характеризуется отношением энергии УВ к энергии лазерных импульсов ($\eta = Q_s/Q$).

Для обоснования возможности создания звука при облучении «произвольной» мишени опыты проведены с использованием специально отобранного ряда металлов и диэлектриков, свойства которых сильно различаются. Серебро имеет высокую теплопроводность и отражение излучения, титан обладает противоположными свойствами, сталь занимает промежуточное положение. Для оконного стекла характерны высокая температура плавления и поглощение излучения в тонком поверхностном слое. Капролон, оргстекло отличаются от стекла большей глубиной поглощения излучения и малыми затратами энергии на испарение.

Оптические пробой создавались в центре мишеней, имевших форму диска диаметром 50 см, толщиной более 3 мм. Серебряная мишень закреплялась на стальном диске. Мишень подвешивалась на тонких проволоках между линзой и фокусом лучей (120 см) на расстоянии 20–60 см от фокуса. Площадь луча на мишени варьировалась за счет изменения положения мишени между линзой и фокусом. С целью изучения влияния формы импульса на η в опытах использовались два CO₂-лазера, импульсы которых показаны на рис. 1.

Осцилляции сигналов с характерным временем ~ 20 нс являются приборными. Второй пик импульса

* Владимир Николаевич Тищенко (tvn25@ngs.ru); Виталий Георгиевич Посух (posukh@mail.ru); Эдуард Леонидович Бояринцев; Александр Викторович Мелехов; Людмила Сергеевна Голобокова; Илья Борисович Мирошниченко.

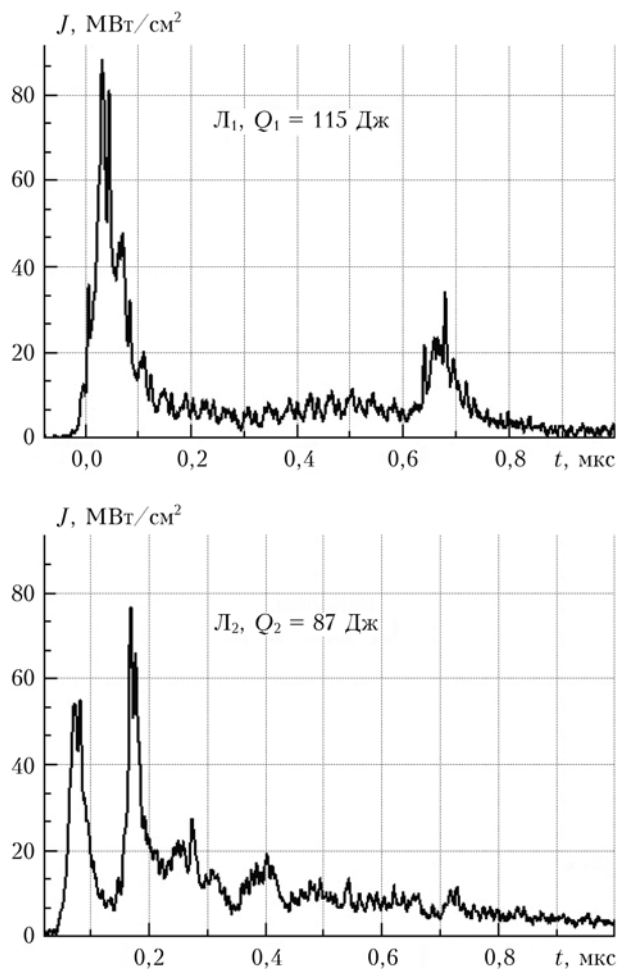


Рис. 1. Форма импульсов излучения, создаваемых первым (L_1) и вторым (L_2) лазерами. Плотности энергии импульсов на мишени $q_1 = 10,8 \text{ Дж/см}^2$ и $q_2 = 12,3 \text{ Дж/см}^2$ соответственно

лазера L_1 соответствует усилению отраженного от плазмы излучения. Рабочая смесь и оптический резонатор лазера L_2 обеспечивали генерацию двойного импульса, что позволяло повысить η при малых плотностях энергии излучения на мишени ($q = Q/S$). Индексы «1» и «2» при Q и q соответствуют первому (L_1) и второму (L_2) лазерам. Варьировались энергия импульсов $Q = 20 \div 250 \text{ Дж}$, площадь лучей на мишени $S = 2,5 \div 38 \text{ см}^2$ и $q = 1 \div 50 \text{ Дж/см}^2$. Излучение направлено к мишени снизу вверх под углом $\sim 90^\circ$.

Из фотоснимков свечения плазмы и теневых снимков [4] следует, что оптический пробой локализован вблизи поверхности на расстоянии $\sim 1\text{--}2 \text{ см}$. При $q > 15 \text{ Дж/см}^2$ оптический пробой происходил на мишени и аэрозолях воздуха. При $q > 10 \text{ Дж/см}^2$ облучение оргстекла сопровождается вспышкой свечения (горение паров), оторванной от поверхности. Характерный размер свечения $\sim 30 \text{ см}$, задержка вспышки относительно лазерного импульса равна нескольким микросекундам, длительность свечения $\sim 10 \div 20 \text{ мс}$.

Энергия УВ определялась датчиком избыточного давления УВ $P = (p - p_0)$, расположенного на расстоянии $R_p = 27 \text{ см}$ от центра облучения, где выполняется условие $R_d < R_p < R_M$ и УВ имеет форму полусферы [4] (R_M – радиус мишени, $R_d = (Q/p_0)^{1/3}$ – динамический радиус искры). Расстояние от датчика до мишени по нормали $\sim 23 \text{ см}$, R_d не превышало 15 см . Эффективность формирования ударных волн можно определить из выражения

$$\eta = \frac{2\pi R_p^2}{\rho_0 C_0 Q} \int_{t_1}^{t_2} P^2 dt,$$

где ρ_0 , p_0 – плотность и давление воздуха; C_0 – скорость звука в нем.

УВ уносят значительную энергию импульсов $\eta \approx 1 - (p_0/p)^{(\gamma-1)/\gamma} \approx 0,3$ при $p/p_0 > 10$ [5], что соответствует $q(\text{Дж/см}^2) = \delta^{-1}(p_0/p)(\gamma_0 - 1)\epsilon_0 h/(\gamma - 1) \approx 5 \div 10 \text{ Дж/см}^2$. Для оценки принято $\delta = 0,5$ – доля поглощаемой в плазме энергии; $h = 0,5 \div 1 \text{ см}$ – толщина пробоя; ϵ_0 – плотность энергии воздуха, Дж/см^3 ; $\gamma_0 = 1,4$ и $\gamma \sim 1,2$ – показатели адиабаты для воздуха и для плазмы. Значения δ , h и γ зависят от q , формы импульсов и материала мишени. Для слабо отражающих мишеней $\delta = 0,3$, на металлах $\delta = 0,8$ [2]. Выражая давление через q , получаем оценку эффективности $\eta \approx 1 - \{h/[\delta q(\gamma - 1)]\}^{1-1/\gamma}$. Полагая $h = 0,5 \text{ см}$, $\gamma \sim 1,2$ и $\delta = 0,7$, получим $\eta \approx 1 - 1,24/q^{0,17}$.

На рис. 2, а представлена расчетная зависимость $\eta(q)$ и измеренная для титана. Для сравнения приведены данные для графита, полученные при разной длительности лазерного импульса с использованием $R - t$ диаграммы УВ.

Зависимости $\eta(q)$ для мишеней из разных материалов и при разной форме лазерных импульсов представлены на рис. 2, б, в.

При малых q использование коротких импульсов или состоящих из двух пучков позволяет существенно повысить значение η . Пониженное значение η на стекле и на графите связано с большими затратами энергии на испарение материала. Серебро сильно отражает лазерное излучение.

Эффективность формирования ударных волн повышается при увеличении плотности энергии облучения. Однако при большом фокусном расстоянии оптические пробои на аэрозолях [6] могут ограничивать достижение максимальных η .

Таким образом, результаты опытов указывают на возможность эффективного формирования ударных волн при облучении излучением CO_2 -лазера широкого круга материалов. Высокая эффективность $\sim 15\text{--}20\%$ достигается при использовании коротких лазерных импульсов и плотности энергии $\sim 10 \text{ Дж/см}^2$.

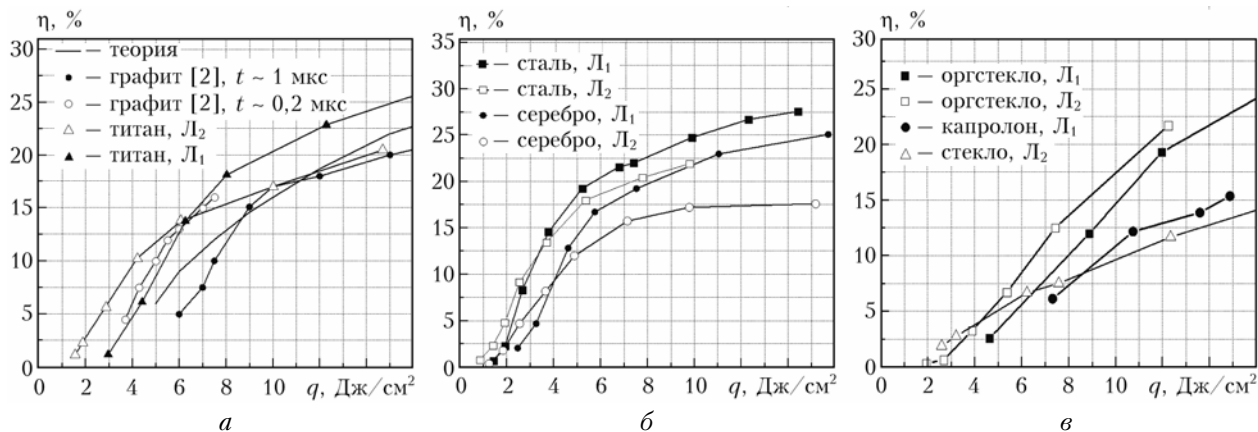


Рис. 2. Зависимость эффективности преобразования энергии лазерных импульсов в ударные волны от плотности облучения мишени при разной форме лазерных импульсов: а – расчет, графит и титан; б – серебро и сталь; в – диэлектрики

Исследования проведены при поддержке РФФИ, проект № 09-08-00830-а.

Авторы выражают благодарность А.Г. Пономаренко за поддержку работы и полезные обсуждения.

1. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
2. Оршич А.М., Пономаренко А.Г., Посух В.Г. Влияние длительности импульса на эффективность взаимодействия излучения с мишенью в воздухе // Прикл. мех. и техн. физ. 1987. № 2. С. 27–30.
3. Тищенко В.Н., Аполлонов В.В., Грачев Г.Н., Гулидов А.И., Запрыгаев В.И., Меньшиков Я.Г., Смирнов А.Л., Соболев А.В. Взаимодействие оптического пульсирующего разряда с газом: условия стабильной

генерации и объединения ударных волн // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 10. С. 941–947.

4. Тищенко В.Н., Посух В.Г., Гулидов А.И., Запрыгаев В.И., Павлов А.А., Бояринцев Э.Л., Голубев М.П., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Голобокова Л.С., Мирошниченко И.Б., Павлов Ал.А., Шмаков А.С. Критерии формирования низкочастотного звука при облучении твердых тел широкоапертурным импульсно-периодическим лазерным излучением // Квант. электрон. 2011. Т. 41, № 10. С. 895–900.
5. Прохоров А.И., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 537 с.
6. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 259 с.

V.N. Tishchenko, V.G. Posukh, E.L. Boyarintsev, A.V. Melekhov, L.S. Golobokova, I.B. Miroshnichenko. **Effectiveness of forming of the shock waves created by optical breakdowns on the surface of solid bodies.**

The possibility of effective formation of shock waves created by optical disruptive discharges on the surface of solid bodies consisting of different materials was studied. It is shown that ~15–20% of pulse energy is converted to shock waves at optimal parameters of CO₂-laser radiation.