

НИЗКОПороГОВЫЙ ПРобой ВОЗДУХА ВБЛИЗИ МИШЕНИ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂-ЛАЗЕРА И СВЯЗАННЫЙ С НИМ ВЫСОКИЙ ИМПУЛЬС ОТДАЧИ

*А. И. Барчуков, Ф. В. Бункин, В. И. Конов,
А. М. Прохоров*

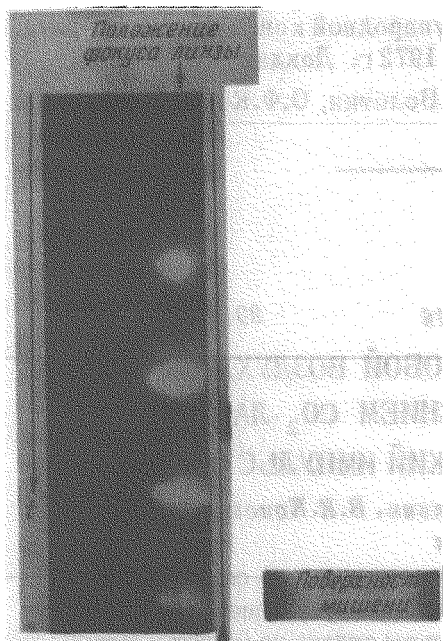
Обнаружено резкое (более, чем на два порядка) снижение пороговой интенсивности для пробоя воздуха излучением CO₂-лазера вблизи мишеней. Измерены импульсы отдачи на мишень, вызванные оптическим пробоем воздуха. Экспериментальные данные интерпретируются на основе теории точечного взрыва.

В работе [1] сообщалось об образовании плазмы вблизи мишени при фокусировке на ее поверхность лазерного излучения с $\lambda = 2,36 \text{ мкм}$ и интенсивностях света меньших пороговых для пробоя воздуха. Недавно было показано [2], что порог пробоя воздуха излучением CO₂-лазера сильно зависит от чистоты газа и при искусственном введении примесных микрочастиц может быть снижен до 10^8 вт/см^2 .

В настоящей работе обнаружено, что вблизи поверхности твердых мишеней из различных исследованных материалов (Al, Cu, Mg, NaCl и другие) оптический пробой воздуха излучением импульсного CO₂-лазера наступает при значительно меньших интенсивностях света $S = (5 + 10) \cdot 10^6 \text{ вт/см}^2$. При примерно таких же значениях интенсивности пробой возникает вблизи оптических поверхностей. Плазма пробоя практически полностью поглощает лазерное излучение и экранирует поверхность мишени. Образующаяся при пробое ударная волна вызывает импульс отдачи I на мишень; в наших экспериментах удельный импульс отдачи $P = I/E$ (E — энергия лазерного импульса) достигая высоких значений порядка $45 \text{ дин} \cdot \text{сек/дж}$ для мишеней специальной формы.

В экспериментах использовался многомодовый CO₂-лазер с поперечным разрядом, позволяющий получать разовые импульсы с длительностью по основанию $\tau = 15 \text{ нсек}$ и энергией E до 4 дж ; последняя контролировалась дисковым графитовым калориметром. Излучение лазера имело расходимость $2\theta = 10^{-2} \text{ рад}$ по уровню половинной мощности и фокусировалось вблизи поверхности мишени с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 10 \text{ см}$. При этом внутри каустики линзы образо-

ывался оптический пробой воздуха, появление которого сопровождалось световой искрой и характерным "щелчком". Без мишени пробой воздуха одиночными импульсами не наблюдался.



Скоростная развертка картины пробоя воздуха вблизи мишени из магния. Временной интервал между кадрами ≈ 6 мксек. Масштаб 1:1. Энергия в импульсе $E \approx 1,5$ дж

Быстрая покадровая съемка на скоростной кинокамере (СФР) показывает (рисунок), что пробой воздуха начинается в фокальном объеме, удаленном от поверхности мишени на расстояние $\approx 0,5$ см. В течение лазерного импульса плазма заполняет каустику линзы (примерно симметрично относительно фокуса), а затем гаснет. Характер процесса пробоя не меняется, если излучение падает под некоторым углом к мишени. При этом кратеров на поверхности мишени не образуется. Было замечено, что порог пробоя слабо зависит от материала мишени и определяется главным образом чистотой поверхности и давлением окружающего газа. Так, если для неполированной медной пластинки пороговая интенсивность имела значение $S_{\text{пор}} \approx (5 + 10) \cdot 10^6$ *вт/см²* и пробой возникал практически с каждым импульсом генерации, то для медного зеркала с поглощением $\sim 1\%$ порог увеличивался в 4 раза и при повторном облучении не возникал вовсе — первый импульс как бы очищал поверхность от центров поглощения. Микроскопические исследования пятен облучения на зеркале показали, что на его поверхности образуются локальные повреждения диаметром порядка $10 + 50$ мкм. Оптический пробой, по-видимому, инициируется сильнопоглощающими макроскопическими частицами с поверхности мишени.

Калориметрические измерения поглощения в плазме пробоя показали, что к поверхности мишени проходит 10 — 20% энергии лазерного импульса.

Удельный импульс отдачи P определялся по горизонтальному отклонению маятника. Для плоской мишени из меди при энергии в импульсе $E \approx 1$ дж максимальное значение $P \approx 10$ *дин·сек/дж* и зависит от взаимного положения мишени и линзы. Сильной зависимости импульса отдачи от поперечных размеров плоской мишени обнаружено не было

(в интервале диаметров мишеней от 1 до 4 см), однако при фокусировке излучения внутрь полого цилиндра из магния диаметром ≈ 1 см, закрытого с одной стороны, значение удельного импульса отдачи достигало $45 \text{ дин} \cdot \text{сек}/\text{дж}$ при той же энергии $E = 1 \text{ дж}$. Нами был проведен также опыт с маятником, помещенным вблизи неподвижной мишени, плоскость качания которого была перпендикулярна световому лучу. При возникновении пробоя вблизи поверхности мишени был зарегистрирован боковой импульс отдачи, который имел примерно такое же значение, как и в прямом направлении.

Наши экспериментальные значения для импульса отдачи согласуются с результатами работы [3], в которой исследовалось взаимодействие близкого к коллимированному луча CO_2 -лазера с интенсивностью $(10^7 \div 4 \cdot 10^8 \text{ вт}/\text{см}^2)$ на непрозрачные плоские мишени. Авторы интерпретировали давление на мишень механизмом возникновения светодетонационной волны, распространяющейся от мишени навстречу световому лучу. Уменьшение удельного импульса отдачи при увеличении плотности потока энергии E_1 объяснялось ростом скорости распространения фронта светодетонационной волны $D \sim E_1^{1/3}$ и связанной с этим фактом более эффективной экранировкой поверхности от падающего излучения.

Полученные нами результаты по импульсу отдачи для плоских и цилиндрических мишеней находят вполне удовлетворительную интерпретацию, если считать, что импульс отдачи целиком обусловлен ударной волной, возникающей в воздухе в результате точечного взрыва с энергосвободением E в фокальном объеме, когда $l \sim \sqrt{E}$, а $P \sim 1/\sqrt{E}$ (см. [4]). Для плоской мишени при этом имеем [4]:

$$P_{\text{пл}} = 0,5 \sqrt{\ell \rho / E_1} \quad (1)$$

где ρ — плотность воздуха, ℓ — расстояние от фокуса линзы ("точки взрыва") до мишени. При $\ell = 0,5 \text{ см}$, $E_1 = 50 \text{ дж}/\text{см}^2$ формула (1) дает $P \approx 6 \text{ дин} \cdot \text{сек}/\text{дж}$. В случае цилиндрической мишени можно приближенно воспользоваться выражением для удельного импульса $P_{\text{сф}}$, возникающего в сферической ударной волне [4]:

$$P_{\text{сф}} = \sqrt{\rho R_0^3 / E}, \quad (2)$$

где R_0 — радиус полусферы, воспринимающей импульс отдачи. При $R_0 = 0,5 \text{ см}$, $E = 1 \text{ дж}$ формула (2) дает $P_{\text{сф}} \approx 41 \text{ дин} \cdot \text{сек}/\text{дж}$.

На основании проделанных нами опытов можно утверждать, что при взаимодействии с мишенями излучения CO_2 -лазеров с интенсивностью $S \geq (5 \div 10) \cdot 10^6 \text{ вт}/\text{см}^2$ вблизи поверхности мишени происходит оптический пробой воздуха. Вопрос о механизме возникновения пробоя пока остается открытым. Энергосвободение лазерного импульса происходит в фокальном объеме, при этом импульс отдачи должен быть симметричен, что хорошо иллюстрируется опытами с боковым маятником и цилиндрической мишенью.

Авторы благодарны П.П.Машинину за обсуждение экспериментов, Г.П.Кузьмину за консультации при проектировании лазерной установки.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 марта 1973 г.

Литература

- [1] V.V.Kostin, L.A.Kulevsky, T.M.Murina, A.M.Prokhorov, A.A.Tikhonov. IEEE J. Quantum Electronics, QE-2, 611, 1966.
 - [2] D.Lencioni, R.Hull, L.Marquet. Bull. Am. Phys. Soc., 16, ser. II, 1292, 1971.
 - [3] A.Pirri, R.Schlier, D.Northam. Appl. Phys. Lett., 21, 79, 1972.
 - [4] К.П.Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды, М., изд. Наука, 1971.
-