

Академик Н. Н. РЫКАЛИН, А. А. УГЛОВ,
М. М. НИЗАМЕТДИНОВ

О ПРОБОЕ ГАЗА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА ПРИ МАЛЫХ ПЛОТНОСТЯХ ПОТОКА И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Пробой газов мощным излучением лазеров подробно исследован в ряде экспериментальных работ, например (¹⁻³), наиболее подробно представления о развитии процесса пробоя изложены в обзоре (³).

При фокусировке излучения в газ пробой обычно наступает при напряжениях поля $\sim 10^7$ в/см. Снижение порога пробоя для большинства газов наблюдается при росте давления, наложения СВЧ-поля (⁴), приложения импульса электрического поля (⁵). Однако и в этих случаях порог пробоя газа достаточно высок (например, для азота минимум порога при давлении 100 атм составляет $q_{пр} \sim 5 \cdot 10^8$ вт/см² (¹)).

Нами наблюдался эффект пробоя газа (азот) при плотностях потока $(1-10) \cdot 10^6$ вт/см² и давлениях 90–120 атм. Были выполнены эксперименты по воздействию излучения неодимового лазера в режиме свободной генерации на ряд металлов при высоких давлениях окружающей среды. Луч лазера (длительность импульса с пиковой структурой $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ сек., энергия до 10 дж, площадь фокусировки $\sim 10^{-2}$ см²) вводился через одно из окон камеры высокого давления и фокусировался линзой с $f=15$ см, расположенной внутри камеры, на образцы (пластинки из молибдена и нержавеющей стали толщиной 1–2 мм) при давлении азота до 120 атм. Конструкция камеры высокого давления позволяла перемещать образцы внутри камеры при данном давлении и через другое окно регистрировать протекающие в зоне воздействия процессы с помощью скоростного фоторегистратора, работающего в режиме луны времени. Средняя плотность потока излучения была почти на два порядка ниже порогового для пробоя азота.

Эксперименты показали, что характер зоны воздействия излучения на металлы существенно зависит от давления газа в камере. При давлении азота 90–120 атм поверхность материала практически полностью экранируется от излучения. Она только слегка «обожжена» в середине зоны воздействия и имеет внешнее темное кольцо, причем капли жидкой фазы, следы разрушения или зоны плавления отсутствуют. Снижение давления ниже 90 атм приводит к появлению в центре зоны воздействия области оплавления, а при более низких давлениях образуется кратер. При давлениях ниже ~ 10 атм в пластинах образуется сквозное отверстие.

Скоростная киносъемка зоны воздействия с помощью СФР показала, что эффективная экранировка зоны воздействия при больших давлениях газа ~ 90 атм начинается спустя 30–50 мксек. после начала действия импульса на мишень. Фоторегистрограмма зоны воздействия излучения на нержавеющую сталь показана на рис. 1. Видно, что плазменное облако формируется в непосредственной близости от поверхности воздействия и затем начинает перемещаться навстречу лазерному лучу, экранируя зону воздействия от прямого попадания излучения. Яркость свечения плазменного облака сравнима с яркостью свечения зоны воздействия на металле. Отметим, что без металлической мишени пробой газа при данном давлении и плотности потока не наблюдается. Многократное повторение (до 6 раз) воздействия излучения на мишень в одно и то же место каждый раз вызывает пробой газа и экранировку излучения.

Средняя скорость перемещения экранирующего плазменного облака в направлении луча составляет ~ 10 м/сек, что соизмеримо со скоростями зоны «лазерного горения» в экспериментах ⁽⁵⁾, где пробой газа вызывался синхронным включением с началом действия лазерного импульса высоковольтного электрического поля в 6 кв. Аналогичная скорость движения ионизированного газа зафиксирована в опубликованной недавно работе ⁽⁶⁾ при действии последовательности импульсов СО₂-лазера длительностью 15 мксек. на мишень из металла при атмосферном давлении (плотность потока $(5-10) \cdot 10^6$ вт/см²). Образование плазменного облака над поверхностью металла, экранирующего зону воздействия, наблюдалось в работе

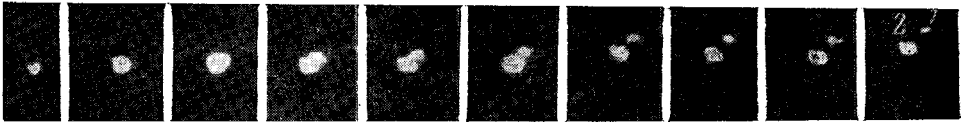


Рис. 1. Регистрограмма зоны воздействия излучения лазера на мишень (нержавеющая сталь). Промежуток времени между отдельными кадрами ~ 60 мксек. $P=120$ атм, $E=10$ дж; 1 — металл, 2 — плазма

⁽⁷⁾ при действии непрерывного излучения электроразрядного и газодинамического лазеров мощностью 8 и 20 квт. Отмеченное в ⁽⁷⁾ явление носит пороговый характер по мощности излучения.

Механизм пробоя газа, приводящего к почти полной экранировке зоны воздействия при малых плотностях потока, наблюдаемый в наших экспериментах, по-видимому, связан с развитием лавинной ионизации газа в условиях, когда «поставщиком» затравочных электронов в зону пробоя является термоэлектронная эмиссия с нагреваемой поверхности металла. Оценки показывают, что за время $\sim 10-50$ мксек. число электронов, выделенных механизмом термоэмиссии с поверхности мишени, в зоне фокуса достигает $\sim 10^{13}-10^{14}$, что условно можно принять за критерий пробоя газа ⁽³⁾. Температура поверхности металла по прошествии этого времени в соответствии с выполненными оценками несколько превосходит температуру плавления. Дальнейшее увеличение числа заряженных частиц в зоне воздействия может быть связано с набором энергии электронами в поле световой волны и последующей ионизацией нейтральных атомов. Существенно, что высокие давления газа препятствуют «разбеганию» (из-за малости диффузионной длины l_D) электронов из области фокусировки излучения и способствуют развитию пробоя. По-видимому, пробой газа начинается из области пространственной неоднородности поля световой волны. Такая картина развития пробоя, возможно, не противоречит наблюдаемым эффектам.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
27 IX 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ G. H. Gill, A. A. Dougall, Phys. Rev. Lett., v. 15, 845 (1965). ² A. F. Haught, R. G. Meyerand, D. C. Smith, Physics of Quantum Electronics, N. Y., 1966, p. 509. ³ Ю. П. Райзер, УФН, т. 87, № 1 (1965). ⁴ А. П. Дарманян, В. Е. Мицук, В. А. Черников, Письма ЖЭТФ, т. 8, 117 (1968). ⁵ Ф. В. Бункин, В. И. Конов и др., Письма ЖЭТФ, т. 9, 609 (1969). ⁶ А. И. Барчуков, Ф. В. Бункин и др., Письма ЖЭТФ, т. 17, 413 (1973). ⁷ E. Locke, E. Hoag, R. Hella, Weld. J., v. 51, 245 (1972).