

04;05;07;09

О перспективах комбинированного применения лазерного и СВЧ излучений для эффективного воздействия на металлическую мишень

© Е.Т. Протасевич

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: lev@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2003 г.)

Для усиления взаимодействия лазерного излучения с мишенью предлагается использовать СВЧ излучение сантиметрового диапазона длин волн.

Известно [1], что лазерное излучение большой мощности способно создавать на малом участке поверхности мишени высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого материала. Протекание перечисленных процессов обусловлено термическим эффектом поглощения излучения твердыми телами. Однако если мишень выполнена из металла, то ее поверхность хорошо отражает излучение оптического диапазона длин волн. В частности, для вольфрама коэффициент отражения излучения CO₂ лазера равен приблизительно 0.9, т.е. в этом случае коэффициент поглощения излучения холодной мишенью не превышает 10% [1].

Когда интенсивность излучения составляет $\sim 10^{10}$ W/cm², над поверхностью мишени наблюдается оптический пробой воздуха и образуется плазма с температурой десятки тысяч Кельвинов [2]. В зависимости от условий эксперимента формирование плазмы вблизи мишени может сильно изменить характер ее взаимодействия с мишенью: ослабить или усилить это взаимодействие.

Усиление взаимодействия для коротких импульсов ($\tau \sim 1 \mu\text{s}$) наблюдается, когда за время действия импульса плазма не успевает отойти от мишени. В этом случае передача энергии возрастает за счет более полного поглощения излучения с последующей передачей тепла за счет теплопроводности или за счет излучения плазмой коротковолнового излучения в видимом или ультрафиолетовом диапазонах, которое поглощается мишенью более эффективно, чем первичное длинноволновое излучение CO₂ лазера.

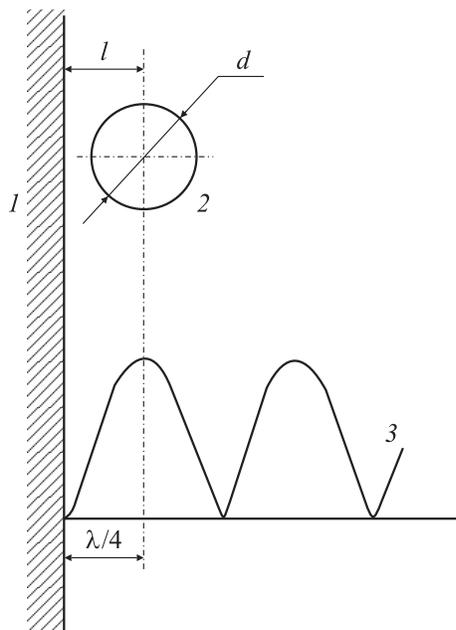
Значение эффективного коэффициента поглощения излучения мишенью α максимально при достижении порога плазмообразования. При дальнейшем росте интенсивности излучения α быстро падает из-за роста скорости волны распространения плазмы, вследствие чего плазменное образование за время действия импульса успевает отойти от мишени. Противоречие, заключающееся в том, что для инициирования пробоя требуется высокая интенсивность оптического излучения, а для эффективного энерговыклада в плазму, наоборот, низкая,

традиционно на практике устраняется выбором формы импульса лазерного излучения. Для этого формируется импульс, состоящий из узкого пика длительностью ~ 200 ns (для поджига разряда) и длинного хвоста, в котором сосредоточена основная энергия импульса (предназначенная для энерговыклада в плазму).

В данной заметке обращается внимание на то, что решить поставленную задачу можно также за счет применения комбинированного воздействия на мишень лазерного и СВЧ излучений. При таком комбинированном воздействии лазерное излучение обеспечивает пробой воздуха над поверхностью мишени, а эффективный энерговыклад в образовавшуюся плазму происходит за счет СВЧ излучения. Рассмотрим эти процессы подробнее.

При отражении СВЧ излучения от проводящей поверхности мишени образуется стоячая волна. Согласно граничным условиям тангенциальная составляющая электрического поля падающей волны на поверхности проводника равна нулю. Тогда первый максимум стоячей волны поля будет находиться приблизительно на расстоянии $l = \lambda/4$ от поверхности мишени (здесь λ — длина волн СВЧ излучения). Очевидно, что для получения максимального энерговыклада в плазму необходимо, чтобы $l \rightarrow 0$. На практике это означает, что оптимальным с точки зрения энерговыклада является трехсантиметровый диапазон длин волн, поскольку при переходе к более коротким миллиметровым волнам резко падает уровень мощности генерирующего излучения [3]. При $\lambda = 3$ см получаем, что $l \sim 0.75$ см.

Наши измерения показывают [4], что при относительной влажности воздуха, равной $\sim 70\%$, и температуре $T = 292.5$ К в зависимости от времени, прошедшего с момента начала пробоя, скорость перемещения фронта расширяющегося плазменного образования, полученного с помощью CO₂ лазера ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $I = 10^8 \dots 10^{10}$ W/cm² и $\tau = 100$ ns), линейно падает на начальном участке, а затем через $3.5 \mu\text{s}$ зависимость изменения скорости испытывает резкий перегиб и ее значения становятся меньше или сравнимы со скоростью звука. Среднее значение скорости на падающем участке кривой $V = f(t)$ составляет приблизительно $3 \cdot 10^3$ м/с.



Схематическое представление комбинированного воздействия лазерного и СВЧ излучений: 1 — мишень, 2 — лазерная плазма, 3 — стоячая волна.

Тогда, если принять $3.5 \mu\text{s}$ за время отхода лазерной плазмы от мишени, то нетрудно получить, что за это время плазма окажется на расстоянии ~ 1 см от поверхности мишени, т.е. на расстоянии, приблизительно равном $\lambda/4$ СВЧ излучения, энергия которого обеспечивает необходимый в плазму энерговклад, поскольку сгусток окажется в первом от мишени максимуме электрического поля стоячей волны, как это показано на рисунке.

Для обеспечения максимального энерговклада в плазму необходимо выполнение условия [5]

$$\lambda = 3.65d, \quad (1)$$

d — диаметр плазменного образования.

Для нашего случая выполнение условия (1) означает, что $d \sim 0.8$ см, т.е. радиус плазмы $d/2$ получается меньше, чем расстояние до мишени l . Резонансный характер процесса поглощения СВЧ энергии приводит к тому, что размер лазерной плазмы стабилизируется, вследствие чего возрастает эффективность ее воздействия на мишень при поглощении СВЧ энергии. Поскольку $\lambda > l$, то структура поля стоячей волны сохранится без заметного искажения в течение всего времени действия СВЧ импульса. Модельные эксперименты, выполненные в поле стоячей волны с пробным телом, размеры которого близки к диаметру плазмы, также показали, что структура поля практически не искажается.

Таким образом, из проведенного рассмотрения следует, что при комбинированном воздействии лазерного и СВЧ излучений открываются новые технологические возможности для изготовления отверстий в металлических мишенях.

Список литературы

- [1] Веденев А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [2] Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Чистякова Л.К., Шишковский В.И. Воздействие лазерного и ВЧ-излучений на воздушную среду. Новосибирск: Наука, 1992. 190 с.
- [3] Swegle D.A., Benford J.N. High-power Microwaves at 25 Years: The Current State of Development // Beanes' 98. Proc. 12th Intern. Conf. On High-Power Particle Beanes. Haifa (Israel), 1998. Vol. 1. P. 149–152.
- [4] Протасевич Е.Т., Хан В.А. Распространение пучков электромагнитных волн через атмосферу. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. 209 с.
- [5] Капица П.Л. // ДАН СССР. 1995. Т. 101. № 2. С. 245–247.