

04;07;09;12

МИКРОВОЛНОВОЙ РАЗРЯД В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

© В.Н.Тищенко, В.М.Антонов, А.В.Мелехов, С.А.Никитин,
В.Г.Посух, П.К.Третьяков, И.Ф.Шайхисламов

Впервые осуществлен микроволновой разряд, локализованный в плазме распадающегося оптического пробоя газа. Определены условия, при которых лазерная плазма длительное время (до ~ 2 мс) поглощает мощный микроволновой пучок. В зависимости от параметров среды и пучка наблюдалось формирование несамостоятельного или самостоятельного, диффузного или искрового разряда в воздухе, аргоне при атмосферном давлении. Показано, что эти свойства объяснимы в рамках механизма турбулентного остывания плазмы. Измерена температуропроводность этого процесса.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) разряды с лазерным иницированием горят вне искры [1], поглощение СВЧ энергии в искре не изучалось. Объем распадающейся лазерной плазмы, достаточный для поглощения СВЧ излучения большой мощности, может формироваться в перспективных системах лазерного управления полетом тел [2-6]. Цель работы — показать возможность существования локализованного в лазерной плазме СВЧ разряда, его тип и структуру, эффективность и длительность поглощения излучения.

В эксперименте оптический пробой протяженностью $L \sim 7$ см создавался сфокусированным излучением CO_2 лазера с энергией $Q = 17$ Дж и длительность 1.5 мкс. К лазерной плазме подводился СВЧ пучок с параметрами: мощность 50–100 кВт, длительность 2 мкс, четыре импульса с интервалом следования 20 мкс, длина волны $\lambda = 3$ см, максимальная напряженность поля в фокусе $E = 1.5$ кВ/см ($E = E_0/\sqrt{2}$). Ось оптического пробоя пересекала СВЧ пучок в фокальной плоскости под углом 90° . Здесь поперечный размер пучка равен λ . Разряд осуществлялся в воздухе и аргоне при атмосферном давлении в свободном пространстве.

Изобарическое расширение распадающейся лазерной плазмы происходит в условиях ее турбулентного движения [7]. Влияние этого процесса на СВЧ разряд можно учесть через турбулентную температуропроводность (φ), известную для воздуха. Для аргона на рис. 1 и 2, а показаны: радиусы области разрежения R (каверны) и ударной волны,

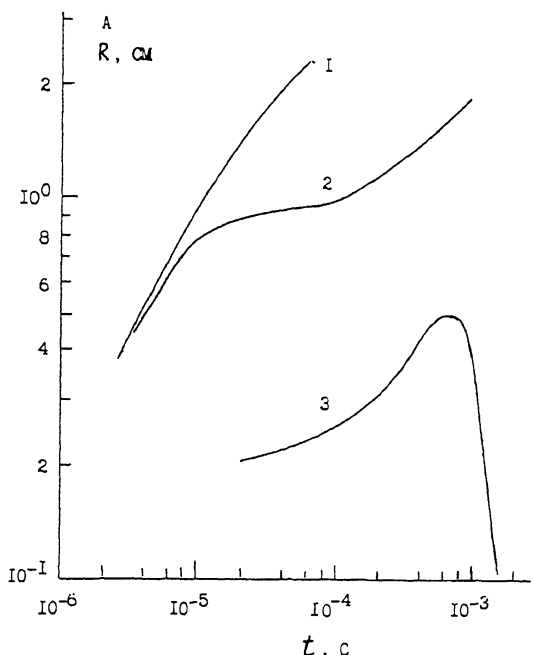


Рис. 1. Изменение во времени радиуса ударной волны (1) и каверны (2); 3 — доля (A) поглощаемой энергии СВЧ излучения в зависимости от времени задержки СВЧ пучка относительно начала лазерного импульса. Аргон.

структура каверны оптического пробоя. Отсчет времени — от начала лазерного импульса. В условиях эксперимента каверна неразрывна. Переход цилиндр — тор не наблюдался. Турбулентность проявлялась в виде “ячеистой” неоднородности (~ 3 мм) среды и при $t > 30$ мкс неустойчивостью границы каверны. Изобарическое расширение начиналось при $t > \tau \simeq 20$ мкс. Из зависимости $R(t > \tau)$ получено выражение для φ и характерного времени охлаждения среды в каверне в ~ 2 раза $t_T = r'/4\varphi$. В аргоне $\varphi = 965r' \text{ см}^2/\text{с}$, $t_T = 1.63 \cdot 10^{-4} (Q/L)^{0.5}$ с; в воздухе — $\varphi = 600r'$ (близко к данным [8]), $t_T = 1.74 \cdot 10^{-4} Q^{0.25}$. Здесь $r' = R(\tau) = 0.63(Q/L)^{0.5}$. Температура среды, концентрация нейтралов и электронов в каверне были определены с использованием t_T , условия изобаричности, формулы Саха и экспериментального результата [8] — $T(\tau) = 8000$ К. Расчет, выполненный для этих данных, показал, что оптимальным для поглощения СВЧ пучка является диапазон температур $T = 4000\text{--}5500$ К. При меньших значениях T плазма прозрачна, а при больших — преобладает отражение. Умень-

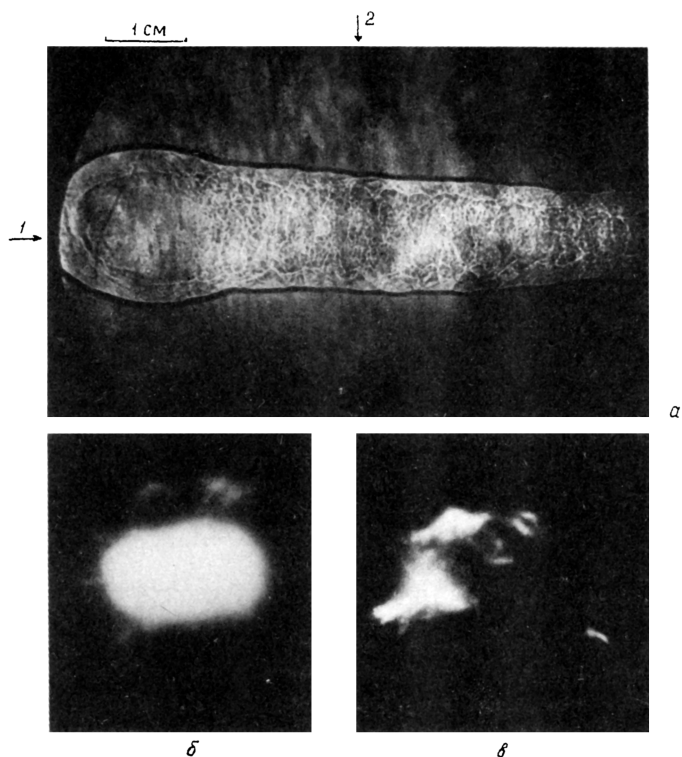


Рис. 2. Теневой снимок оптического пробоя в аргоне при $t = 10$ мкс (а) и свечение СВЧ разряда в камере при задержках СВЧ пучка 50 мкс (б) и 1 мс (в); б, в соответствуют концу первого СВЧ импульса; 1, 2 — направления и оси лазерного и СВЧ пучков.

шение температуры и рост плотности среды при распаде оптического пробоя ограничивают предельную задержку СВЧ пучка относительно лазерного импульса: несамостоятельный разряд возможен при $t' < t_T$, а самостоятельный при $t' < Kt_T$, где $K = 5-10$ и зависит от величины E . В эксперименте с воздухом $t_T = 350$ мкс, а в аргоне $t_T = 213$ мкс. С учетом турбулентного охлаждения лазерной плазмы объяснимы следующие экспериментальные данные: предельная задержка при лазерном поджиге СВЧ разряда [1]; параметры плазмы и канала разрежения [2]; время существования проводимости в оптическом пробое воздуха [9]; приводимые ниже результаты.

В эксперименте варьировалось время задержки t' пуга СВЧ импульсов относительно начала лазерного излучения. В отсутствие оптического пробоя СВЧ разряд не происходил, поскольку относительная напряженность поля

$E/N_0 \sim 7 \cdot 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ ниже критической (N, N_0 — концентрация газа в каверне и вне ее).

В воздушной лазерной плазме поглощалось $\sim 50\%$ энергии СВЧ пучка при $t' < t_T$. Далее плазма становилась прозрачной. Тип разряда — несамостоятельный, так как значение $E/N \sim 6 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{см}^2$ в каверне ниже порога СВЧ пробоя. Взаимодействие не сопровождалось свечением — возбуждались вращательные и колебательные уровни молекул.

В аргоновой плазме формировался самостоятельный разряд. На рис. 2, а-в показаны структура каверны и свечение СВЧ разряда в ней при разных временах запаздывания СВЧ излучения относительно оптического пробоя. СВЧ разряд имел диффузную структуру при заметном превышении порога пробоя A_T в каверне. Так, при $E=1.5 \text{ кВ/см}$ свечение диффузно до $t' < t_T$, а при $E = 3 \text{ кВ/см}$ до $t' \sim 10t_T \sim 2 \text{ мс}$. Разряд неоднороден на границе области пересечения пучка с каверной, где E/N мало (рис. 2, б). При $E = 1.5 \text{ кВ/см}$ и $t' > 300 \text{ мкс}$ формировался искровой СВЧ разряд с размером отдельных элементов $\sim \lambda/4$. Смена структуры обусловлена снижением температуры и ростом концентрации газа. Разряд инициировался на локальных неоднородностях турбулентной среды в каверне. Взаимодействие СВЧ излучения с лазерной плазмой происходило при $t' \sim 6t_T \sim 1.2 \text{ мс}$. На рис. 1 показана зависимость от t' доли энергии СВЧ пучка, поглощаемой в аргоновой плазме.

Локализация СВЧ разряда в объеме лазерной плазмы достигалась за счет малой длительности отдельного СВЧ импульса. При частоте повторения $f = 50 \text{ кГц}$ в пуге импульсов СВЧ разряд не выходил за пределы каверны. Средняя мощность, поглощаемая на 1 см длины каверны, составляла $\sim 2.5 - 3 \text{ кВт/см}$. Решение проблемы ввода в газ высокой мощности представляется возможным при использовании свойств оптического разряда [2,3].

Авторы выражают благодарность А.Г. Пономаренко за поддержку работы и обсуждение результатов.

Работа выполнена в рамках программы “Планета” и проекта № 96-01-01464 РФФИ.

Список литературы

- [1] Бровкин В.Г., Быков Д.Ф., Голубев С.К. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 2. С. 153-157.
- [2] Grachev G.N., Ponomarenko A.G., Tischenko V.N. et al. // Laser Physics. 1996. V. 6. N 2. P. 376-379.
- [3] Третьяков П.К., Грачев Г.Н., Иванченко А.И. и др. // ДАН. 1994. Т. 336. В. 4. С. 466-467.

- [4] Raizer Y.P., Myrabo L.N. // 25th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Colorado Springs. 1994. AIAA 94-2451. P. 1-13.
- [5] Nemchinov I.V., Artem'ev V.I., Bergelson V.I. et al. // Shock Waves. 1994. N 4. P. 35-40.
- [6] Борзов В.Ю., Михайлов В.М., Рыбка И.В. и др. // ИФЖ. 1994. Т. 66. В. 5. С. 515-520.
- [7] Буфетов И.А., Проторов А.М., Федоров В.Б. и др. // ДАН. 1991. Т. 261. № 3. С. 586-588.
- [8] Кабанов С.Н., Маслова Л.И., Тархова Т.И. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 6. С. 37-41.
- [9] Зуев В.Е. Оптический разряд в аэрозолях. Новосибирск: Наука, 1990. С. 156.

Институт лазерной физики
СО РАН
г. Новосибирск

Поступило в Редакцию
17 октября 1996 г.