

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ПЛАЗМЫ ПРОБОЯ ВОЗДУХА
ВБЛИЗИ МИШЕНИ МЕТОДАМИ СВЧ

В. П. Агеев, В. И. Конов, Т. М. Мурзина, А. С. Силенок,
Н. И. Чаплиев

УДК 621.378.33 + 535.214

Методом отсечки зондирующего СВЧ-излучения изучены времена релаксаций плазмы, образующейся при фокусировке излучения CO_2 -лазера на металлическую и диэлектрическую мишени в воздухе. Обнаружена линейная зависимость времени отсечки от плотности энергии падающего излучения.

В интенсивно ведущихся в последнее время исследованиях пробоя газа вблизи мишени (см., например, обзор /1/) одной из актуальных задач является изучение скорости охлаждения плазмы после окончания лазерного воздействия. Такие данные необходимы, в частности, для анализа механизма передачи тепла мишени от плазмы и воздуха, нагретого при ее расширении /2,3/. Эффективным методом изучения процесса релаксации лазерной плазмы является хорошо известный в диагностике плазмы метод отсечки зондирующего электромагнитного излучения /4/. Он основан на возникновении полного отражения зондирующего излучения с частотой ω от плазменной области, плотность электронов в которой превышает критическое значение $n_{кр} = \frac{m^2}{4\pi e^2}$, где e, m - заряд и масса электрона. При этом должно выполняться условие $\omega^2 \gg \omega_{эфф}^2$ ($\omega_{эфф}$ - эффективная частота соударений электронов с нейтралами). Такая методика применялась в работе /5/ для обнаружения ореола ионизации плазмы пробоя воздуха излучением рубинового лазера.

В настоящей работе изучались времена полной отсечки зондирующего СВЧ-излучения с длиной волны $\lambda \approx 0,8$ см плазмой низкочастотного пробоя воздуха, инициируемой вблизи мишени импульсным CO_2 -лазером. Так как для $\lambda \approx 0,8$ см величина $n_{кр} \approx 10^{13}$ см⁻³,

то экспериментально определялось время, в течение которого концентрация электронов в плазме $n_e > 10^{13} \text{ см}^{-3}$. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Лазерное излучение с энергией до 25 Дж и длительностью импульса $\tau = 1 \text{ мкс}$ фокусировалось вертикально сверху вниз в центр мишени в пятно

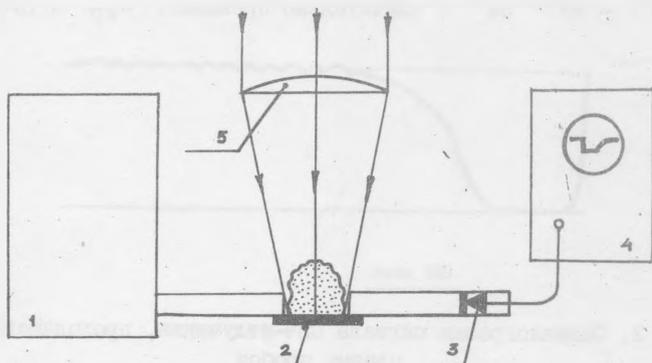
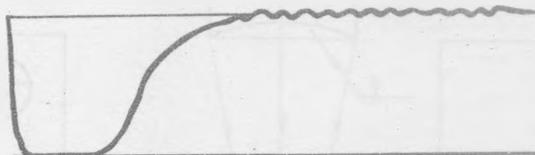


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - генератор СВЧ, 2 - мишень, 3 - детектор, 4 - осциллограф, 5 - линза из BaF_2

площадью $\approx 0,5 \text{ см}^2$. Мишень закреплялась горизонтально между двумя прямоугольными волноводами, расположенными на расстоянии 1 см между собой, и выставлялась на одной высоте с нижней широкой стенкой волновода. Один из волноводов служил передающей, другой приемной антенной зондирующего излучения. Такая геометрия опыта позволяла осуществить полное перекрытие зондирующего луча плазмой пробоя уже через время $\sim 1 \text{ мкс}$ после начала лазерного воздействия. В волноводном тракте от генератора ГК4-4I возбуждалась непрерывная бегущая волна на частоте $f = 37,35 \text{ ГГц}$. В качестве детектора микроволнового излучения, прошедшего через плазму, использовался приемник Д-402, сигнал с которого подавался на осциллограф СИ-37.

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма изменения амплитуды микроволнового сигнала, проходящего через плазму пробоя воздуха вблизи твердой мишени. Видно, что отсечка зондиру-

ющего излучения начинается во время лазерного воздействия, когда возникает и распространяется по лазерному лучу плазма оптического разряда в воздухе. Это связано с тем, что, согласно /6/, при реализуемых в наших опытах плотностях потока энергии излучения $I \approx 5 \cdot 10^6 - 10^8$ Вт/см² электронная концентрация в плазме $n_e \sim 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³ и значительно превышает $n_{кр}$. В течение



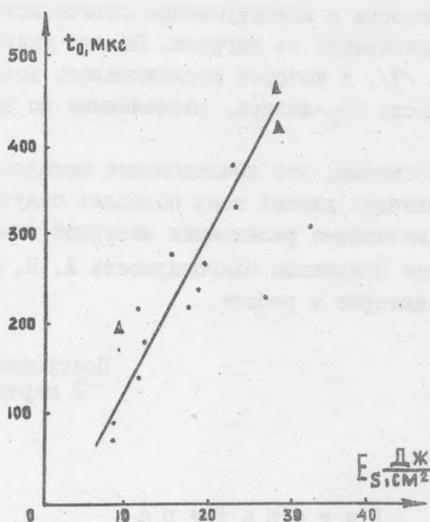
100 мкс

Р и с. 2. Оциллограмма сигнала СВЧ-излучения, проходящего через плазму пробоя

времени отсечки t_0 (для рис. 2 $t_0 \sim 100$ мкс) электронная концентрация в зоне зондирования убывает в результате охлаждения плазмы и изменения ее плотности. На поздних стадиях развития пробоя плазменная область состоит из центрального горячего ядра с давлением близким к атмосферному, окруженного слоями более холодного газа, нагретого ударной волной. В условиях наших опытов диаметр пятна облучения выбирался близким к размеру поперечной стенки волновода, и поэтому отсечка зондирующего излучения определялась, главным образом, центральной областью плазмы. После того, как выполнится условие $n_e < n_{кр}$ микроволновое излучение начинает проникать через плазму и амплитуда сигнала через время $t_1 \approx 100$ мкс выходит на первоначальный уровень. Опыты, проведенные с металлическими и диэлектрическими мишенями показали, что при интенсивностях излучения, превышающих порог пробоя воздуха, характерные времена t_0 и t_1 не зависят от материала мишени и определяются лишь свойствами воздушной плазмы. Пороговая для пробоя плотность энергии излучения CO_2 -лазера составляла ≈ 8 Дж/см². Вместе с тем, на диэлектрических мишенях отсечка наблюдалась и в допороговых условиях, когда

реализовывался режим развитого испарения мишени и в результате нагрева паров лазерным излучением электронная концентрация в них превышала критическую.

Зависимость времени отсечки от плотности энергии излучения E_S для двух мишеней (латунь и ситалл) приведена на рис. 3. Не-



Р и с. 3. Экспериментальная зависимость времени отсечки зондирующего излучения t_0 от плотности падающей энергии E_S .

● - диэлектрик, ▲ - металл

который разброс экспериментальных данных связан с неравномерным распределением энергии по пятну облучения и как следствие этого различным энерговыделением в плазму пробоя воздуха при одинаковых значениях E_S . Видно, что в исследуемом диапазоне с увеличением E_S растет и t_0 , достигая величины 500 мкс при $E_S \approx 30$ Дж/см², причем эту зависимость можно аппроксимировать как $t_0 \sim E_S$. Значение t_1 слабо меняется с увеличением плотности светового потока и во всем исследованном диапазоне лежит в диапазоне 100-200 мкс.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, одинаковые значения t_0 для металлических и диэлектри-

ческих мишеней указывают, что на начальной стадии охлаждения плазмы пробоя, когда электронная концентрация в ней уменьшается до $n_{кр}$, роль материала мишени в процессах релаксации незначительна. И, во-вторых, относительно "большие" времена $t_0 \sim 100$ мкс показывают, что при облучении твердых мишеней импульсно-периодическим излучением с периодом следования импульсов $T_0 \sim t_0$ должны наблюдаться особенности в иницировании оптического пробоя вблизи мишени и соответственно ее нагрева. На это указывают также результаты работы /7/, в которой исследовалось воздействие на мишень двух импульсов CO_2 -лазера, разделенные по времени на 10-1000 мкс.

В заключение отметим, что исследование методом отсечки при измерениях на различных длинах волн позволит получить более полную информацию о механизме релаксации лазерной плазмы.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. И. Барчукову и Ф. В. Бункину за интерес к работе.

Поступила в редакцию .
2 марта 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. П. Агеев, А. И. Барчуков, Ф. В. Бункин, В. И. Конов, С. М. Метев, А. С. Силенок, Н. И. Чаплиев, *изв. ВУЗов, Физика*, № II, 34 (1977).
2. S. Marcus, J. E. Lowder, D. L. Mooney, *J. Appl. Phys.*, **47**, 2966 (1976).
3. В. П. Агеев, В. И. Конов, А. С. Силенок, Н. И. Чаплиев, *Письма в ЖТФ*, **3**, 677 (1977).
4. А. В. Чернетский, О. А. Зиновьев, О. В. Козлов, *Аппаратура и методы плазменных исследований*, Атомиздат, М., 1965 г.
5. Г. А. Аскарьян, М. С. Рабинович, М. М. Савченко, А. Д. Смирнова, *Письма в ЖТФ*, **I**, 18 (1965).
6. W. E. Maher, R. V. Hall, R. R. Johnson, *J. Appl. Phys.*, **45**, 2138 (1974).
7. W. E. Maher, R. V. Hall, *J. Appl. Phys.*, **47**, 2486 (1976).