

ДОЛГОЖИВУЩАЯ АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЛАЗМА, ИНИЦИИРУЕМАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО CO₂ ЛАЗЕРА

С. Ф. Баландин, Ю. Д. Копытин, И. А. Тихомиров, И. С. Тюлькин,
В. А. Хан, В. А. Юданов

Приведена методика экспериментальных исследований по определению зависимости времени жизни плазмы оптического пробоя от влажности воздуха. Обнаружено, что при температуре воздуха 21 °С, влажности 97—97.5 %, давлении 752—761 Тор наблюдается аномально большое время жизни плазмы. Наблюдалось увеличение времени жизни во влажном воздухе по сравнению с «сухим» в 20—25 раз. Приведен возможный механизм полученной зависимости. Дан анализ протекающих процессов.!

Исследование процессов, протекающих в плазме, и влияние среды на ее характеристики представляют большой интерес в проблеме создания долгоживущей плазмы в связи с созданием плазменных преотражателей энергии, управлением разрядом грозового электричества, для целей термоядерного синтеза [1-5].

Цель данной работы заключалась в проведении исследований по определению влияния влажности воздуха на время жизни плазмы с момента пробоя до минимальной обнаружимой на стадии распада концентрации электронов от изменения влажности воздуха φ при температуре $t=19.5 \div 21$ °С и давлении $P=752 \div 761$ Тор.

Эксперименты проводились на известной установке, в составе которой электроионизационный CO₂ лазер с энергией 50 Дж и длительностью 1 мкс и термобарокамера объемом 5 м³, длиной 3 м [6].

Поскольку плазма лазерной искры, возникающая в фокусе параболического зеркала, характерна малыми, сравнимыми с длинами волны СВЧ диапазона, поперечными размерами, то при исследовании плазменного образования (ПО) такого типа возникает проблема локализации электромагнитного поля в определенном (малом) объеме. В настоящей работе эта проблема была решена применением двухпроводных линий, с помощью которых можно осуществить локализацию поля до 0.1 величины рабочей длины волны [7]. Измерения осуществлялись с помощью двух СВЧ установок с повышенным пространственным разрешением.

Для исследования зависимости времени распада плазмы $\tau=f(\varphi)$ был применен микроволновый интерферометр (рис. 1). В качестве СВЧ генератора применялся ГКЧ-61 с диапазоном перестраиваемой частоты от 8.15 до 12.05 ГГц. Измерительная секция, представляющая собой два жестко связанных каркасом перехода с прямоугольного волновода на двухпроводную линию передачи, позволяла изменять расстояние между проволоками ($\varnothing 0.2$) от 2 до 15 мм.

Иницирование между проводами лазерной искры изменяло условия распространения электромагнитной волны в линии, а следовательно, амплитудно-фазовые соотношения сигналов в смесительном тройнике. Запущенный от импульса накачки лазера осциллограф записывал осциллограмму интерференционного сигнала. С помощью направленного ответвителя, включенного перед измерительной секцией, регистрировалось изменение модуля коэффициента отражения R , обусловленного возникновением и существованием плазменного

образования ПО. Минимально обнаруживаемая концентрация электронов, которую можно определить с помощью примененной схемы, составляла $\bar{n}_{\min} \approx \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

В процессе измерений для облегчения интерпретации осциллограмм интерферометр иногда использовался в качестве схемы диагностики по проходящей волне, для чего опорное плечо перекрывалось аттенуатором. При выбранных скоростях развертки в обоих режимах работы интерферометра в окрестностях точки с влажностью $\varphi = 97\%$ были зарегистрированы аномально большие времена существования плазмы с начала пробы до концентрации порядка 10^{10} см^{-3} (рис. 2).

С целью проверки полученной зависимости $\tau = f(\varphi)$ был применен двухчастотный метод, в котором повышенное пространственное разрешение достигалось за счет возникновения ПО в перекрестке двухпроводных линий. Запитанная от генератора X1-25 (частотный диапазон 11.5—17.0 ГГц) двухпровод-

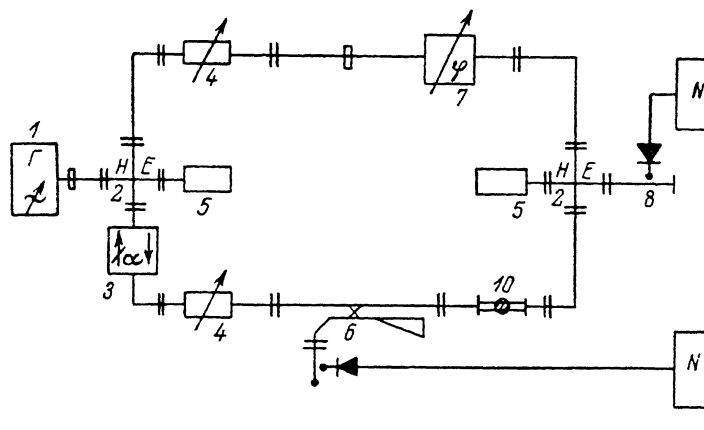


Рис. 1. Схема СВЧ интерферометра.

1 — генератор сигналов высокочастотный, 2 — тройник двойной волноводный, 3 — вентиль, 4 — аттенуатор переменный, 5 — нагрузка поглощающая оконечная, 6 — ответвитель направленный, 7 — фазовращатель регулируемый, 8 — секция детекторная, 9 — осциллограф, 10 — секция измерительная.

ная линия с расстоянием между проводами 6 мм пропускалась под прямым углом внутри отстоящих друг от друга на 8 мм проволок линии, запитанной от генератора ГКЧ-61 (8.15—12.05 ГГц). Для подавления приема излучения волн с боковых направлений переходы волновод—двухсвязная линия были снабжены коллимирующими поглощающими нагрузками, которые выполняли и функцию согласующих элементов перехода.

Из-за флуктуации внутренних параметров искры (концентрация электронов и частота соударений), геометрической формы и расположения в пространстве «отсечка» более коротковолнового зондирующего излучения иногда длилась дольше, чем излучение с большей длиной волны, и поэтому схема использовалась лишь для определения τ , которое выбиралось наибольшим из зарегистрированных на осциллограммах проходящих волн частот f_1 и f_2 . Чувствительность аппаратуры позволяла регистрировать плазму до $\bar{n}_{\min} \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$, но на некоторых осциллограммах отчетливо наблюдается увеличение мощности проходящего излучения после распада плазмы до концентраций, меньших 10^9 см^{-3} , с постоянным выходом кривой сигнала на линию, соответствующей мощности волны, проходящей по «пустой» (без ПО).

Результаты, полученные с помощью этой методики, подтвердили результаты предыдущей.

Увеличение времени жизни плазмы оптического пробы может быть связано с термохимическими и фотохимическими реакциями, приводящими к образованию возбужденных атомов и молекул, таких как, например, O_2^* , Ne^* , O^* , N^* , обладающих сравнительно большими временами жизни [8, 9]. Энергия, запасенная на метастабильных уровнях, может освобождаться длительное время, способствуя поддержанию ионизации. Наиболее интенсивное свечение от O_2 ($a^1 \Delta g$) и OH [$8-10$].

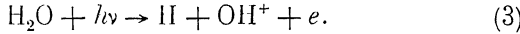
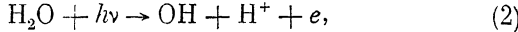
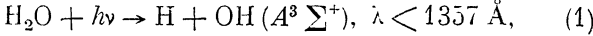
Учесть все виды реакций, происходящих в плазме, чрезвычайно трудно. Поэтому для оценки заселенностей уровней используем формулу Больцмана

$$N_n = (N_0 g_1 / g_2) e^{-E_n / kT},$$

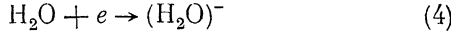
где g_1, g_2 — статистические веса уровней; N_0 — начальная концентрация; N_n — концентрация возбужденных частиц; E_n — энергия метастабильного состояния; $T \approx T_e, T_e$ — температура электронов.

В таблице приведены данные по расчету концентрации (см^{-3}) возбужденных частиц в плазме при различных температурах. Из расчетов видно, что наибольшая энергия накапливается возбужденными молекулами кислорода

Общая энергия, накопленная на возбужденных метастабильных уровнях при $T=11\,000$ К, оценивается величиной порядка 1 Дж/ см^3 . При наличии паров воды в плазме возможны следующие реакции:



Состояние $A^3 \Sigma^+$ для OH метастабильно со временем жизни $6.4 \cdot 10^{-2}$ с. Реакции (2) и (3) могут сопровождаться генерацией электронов, способствуя поддержанию плазмы. Однако такой процесс возможен только при наличии достаточно энергичных фотонов, т. е. в сравнительно горячей плазме. Для холодной плазмы будет характерен обратный процесс



с образованием кластерных ионов [9].

Процесс скачкообразного увеличения электронной концентрации при достаточно высокой влажности (порядка 95—98 %) может быть связан с эффектом конденсации и образования кластерных ионов в перенасыщенных парах воды. В этом случае в «холодной» плазме замедляется реакция (4), что вызывает уменьшение спада N_e и соответственно увеличивает время жизни плазмы. Образовавшиеся кластерные соединения могут изменить также коэффициент ионной рекомбинации [9].

При прилипании части электронов к молекулам воды и кластерным системам, образованным при охлаждении, образуются ионы с отрицательным сум-

марным зарядом, которые рассеивают электроны, уменьшая в целом коэффициент рекомбинации. Положительные ионы также недостаточно хорошо рекомбинируют с электронами из-за их низкой плотности (порядка 10^9 см^{-3}). Кроме того, эти ионы захватываются кластерными ионами, а образующийся комплекс имеет более низкий коэффициент рекомбинации, чем первоначальный



Здесь M — молекула газа, n — число объединенных молекул. Реакция (5) — образование кластерных ионов или начало конденсации, (6) — прилипание электронов к молекулам H_2O , (7) — прилипание электрона к кластерному иону H_2O , (8) — рекомбинация ионов и электронов в плазме, (9) — рекомбина-

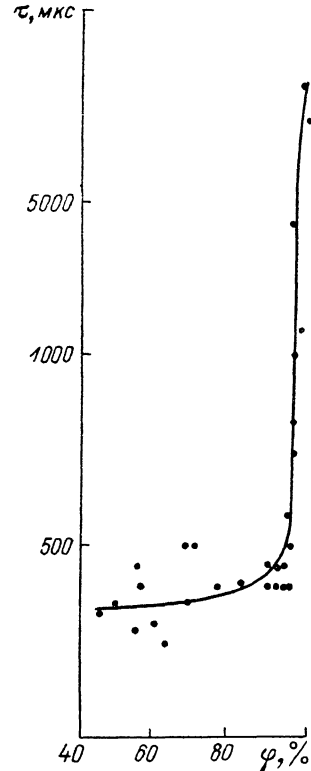


Рис. 2. Зависимость времени жизни ПО от влажности атмосферы.

	T, K			
	300	3700	5500	11000
O ₂	10 ¹⁹			
N ₂	4 · 10 ¹⁹			
O (1D)		4.1 · 10 ⁸	6 · 10 ¹²	2.5 · 10 ¹⁶
O (1S)		3.3 · 10 ⁵	8 · 10 ¹⁰	9.5 · 10 ¹⁴
N (2D)		10 ²	10 ⁹	2 · 10 ¹⁴
N (2P)		2.5	10 ⁸	6 · 10 ¹³
O ₂ (a ¹ Δg)		0.4 · 10 ¹⁸	1.5 · 10 ¹⁸	0.4 · 10 ¹⁹
O ₂ (b ¹ Σg ⁺)		4.4 · 10 ¹⁶	3 · 10 ¹⁷	2 · 10 ¹⁸
N ₂ (A ³ Σu ⁺)		8 · 10 ¹⁰	1.6 · 10 ¹⁴	8 · 10 ¹⁶
N ₂ (a ¹ Σu ⁻)		2.8 · 10 ⁷	1.64 · 10 ¹²	8.4 · 10 ¹⁵

ция положительных ионов и кластерных ионов H₂O. В результате возрастания скорости реакции (9) (из-за образования (H₂O)_n) уменьшается скорость реакции (8), что способствует замедлению распада электронов в плазме.

Таким образом:

1. Получена зависимость времени жизни плазмы оптического пробоя от влажности воздуха при его температуре $t=19.5 \div 21$ °C и давлении $P=752 \div 761$ Тор. Обнаружено, что при $t=21$ °C и $\varphi=97 \div 97.5$ % наблюдается аномально большое время жизни плазменного очага. В нашем случае $\tau \approx 8$ мс, т. е. оно при этих условиях увеличивается по сравнению с временем жизни в «сухом» воздухе приблизительно в 20—25 раз.

2. Зависимость $\tau=f(\varphi)$ носит ярко выраженный резонансный характер с максимальным значением τ при $\varphi=97 \div 97.5$ %. Резкое увеличение τ наблюдается при значениях $\varphi > 94$ %.

3. Увеличение τ (φ) может быть связано с эффектом образования метастабильных состояний молекул кислорода, а также понижением температуры плазмы вследствие ее взаимодействия с парами воды, что приводит к уменьшению скорости рекомбинации в газовой фазе.

Резонансный характер зависимости τ (φ) может быть связан с тем, что конденсация и кластерообразование в системе «плазма оптического пробоя + H₂O» происходит при определенных уровнях перенасыщения и температуры плазмы (~1000 K).

В заключение авторы выражают благодарность М. Ф. Небольсину и М. Е. Левицкому за оказанную помощь в постановке эксперимента и участие в обсуждении данной статьи.

Литература

- [1] Баландин С. Ф., Копытин Ю. Д., Мышкин В. Ф. и др. Тез. докл. III Всес. совещ. по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. Обнинск, 1985, ч. IV, с. 28—31.
- [2] Грещинин С. И., Косой И. А., Силаков В. П. и др. ТВТ, 1986, т. 24, № 4, с. 662—667.
- [3] Александров В. Я., Подмошеский И. В., Салль С. А. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 20, с. 1230—1233.
- [4] Лащук Н. А., Протасевич Е. Т., Толмачев В. И., Хан В. А. ПМТФ, 1985, № 5, с. 3—5.
- [5] Протасевич Е. Т. Химия высоких энергий, 1985, т. 19, № 16, с. 535—540.
- [6] Баландин С. Ф., Копытин Ю. Д., Тихомиров И. А. и др. Тез. докл. XIV Всес. конф. «Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем». Одесса, 1986, ч. II, с. 108.
- [7] Загарин Д. Т., Рождественский В. В., Туманов Г. К. В сб.: Диагностика низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1979, с. 154—158.
- [8] Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981, с. 500.
- [9] Смирнов Б. М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, с. 456.
- [10] Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. М.: Мир, 1978, с. 376.