

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂ ЛАЗЕРА

*В. Г. Бровкин, Д. Ф. Быков, С. К. Голубев, С. И. Грицинин, Г. Г. Гумберидзе,
И. А. Косый, М. И. Тактакишвили*

Экспериментально изучались разряды в импульсных пучках СВЧ волн в воздухе атмосферного давления. Уровень СВЧ электрических полей, используемых в эксперименте, был недостаточен для возбуждения в фокусе излучения самоподдерживающегося газового разряда. СВЧ разряд инициировался лазерной искрой, возбуждаемой в свободном пространстве сфокусированным излучением CO₂ лазера. Определены пороговые СВЧ поля и временные задержки между СВЧ и лазерным импульсом, при которых возникает СВЧ пробой. Сделаны заключения о возможных механизмах инициации СВЧ разряда. Существенный способ инициации СВЧ разряда представляет интерес для целей особо чистой плазмохимии.

Разряды высокого давления, создаваемые пучками СВЧ волн, экспериментально изучены в ряде работ [1-3]. Условия, в которых возбуждались эти разряды, характеризуются выполнением следующих соотношений:

$$\nu_{\text{eff}} \gg \omega, \quad (1)$$

$$\left[\frac{E_s}{n_m} \right] < \left[\frac{E_s}{n_m} \right]_{\text{пор}}. \quad (2)$$

Здесь ν_{eff} — эффективная частота соударений электрон—нейтрал, ω — угловая частота СВЧ излучения, $E_s = E_m / \sqrt{2(1 + \omega^2/\nu_{\text{eff}}^2)}$ — эффективное электрическое поле, E_m — амплитуда СВЧ электрического поля, n_m — концентрация молекул в исходном состоянии, $[E_s/n_m]_{\text{пор}}$ — пороговое по отношению к возбуждению самоподдерживающегося разряда значение параметра.

В условиях, когда выполнено соотношение (2), возбуждение разряда, носящего специфический характер самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) [1], возможно лишь в случае инициации его. В качестве инициаторов обычно используются диэлектрики или металлдиэлектрические пластины, многоострые металлические метелки, лазерный факел на твердой мишени и т. д. [1].

Механизм инициации разряда состоит в увеличении параметра $[E_s/n_m]$ до порогового значения путем изменения либо E_s , либо n_m (либо и то и другое одновременно). Следует отметить, однако, что все перечисленные способы обладают одним существенным недостатком — необходимостью ввода в СВЧ пучок твердотельных мишеней или электродов. Это лишает разряд, возбуждаемый СВЧ пучком, одного из основных преимуществ — возможности формирования плазменного образования в истинно свободном пространстве. Именно это потенциально достижимое свойство разряда делает его применение особенно привлекательным для таких областей приложений, как плазмохимия и техника мощных молекулярных лазеров. Осуществление разряда в стороне от стенок камеры, электродов, инициаторов сделает возможным создание особо чистого

плазмохимического реактора, в котором чистота конечного продукта определяется лишь чистотой реагентов [3].

С другой стороны, при выполнении условий (1) и (2) возможно достижение в разряде высоких энерговыделов в газ из-за малой скорости движения разряда навстречу излучению [1], что также очень важно для плазмохимических приложений. Разряд в свободном пространстве должен обладать повышенной стабильностью, именно это может оказаться существенным при использовании пучков СВЧ излучения для накачки молекулярных лазеров [4].

Реализации СВЧ разряда в истинно свободном пространстве и посвящена настоящая работа. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Пучок СВЧ излучения (сантиметровый диапазон), формируемый квазиоптической системой, фокусируется в камере в пятно с поперечным размером порядка длины волны $a \approx \lambda$ (много меньшим диаметра камеры). Рабочий газ — воздух при атмосферном давлении. Параметр $[E_e/n_m]$ составлял $(0.3-1.5) \cdot 10^{-16}$ В·см² и был существенно ниже порогового для самоподдерживающегося (самоподжигающегося) разряда ($[E_e/n_m]_{\text{пор}} \approx 10^{-15}$ В·см²), но в то же время близким к оптимальному

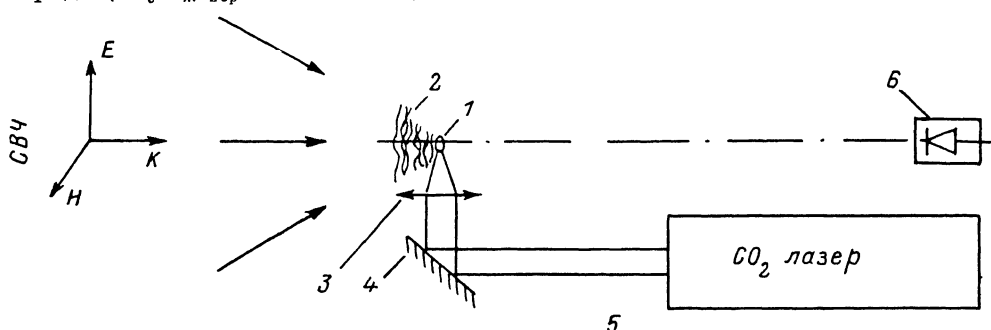


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — лазерная искра; 2 — СВЧ разряд; 3 — линза, фокусирующая ИК излучение; 4 — зеркала; 5 — CO₂ лазер; 6 — датчик проходящего сигнала.

для создания сильно неравновесной газовой среды (отрыв колебательной температуры T_v от газовой T_g). Длительность СВЧ импульса составляла $\tau_f = 750$ мкс.

В фокальную плоскость СВЧ пучка вводился луч мощного CO₂ лазера (полная энергия в импульсе $W \leq 20$ Дж, длительность «начального пика» 100 нс, длительность излучения в «хвосте» 2 мкс, приблизительно три четверти энергии лазерного импульса сосредоточено в «хвосте»). Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием $f = 15$ см. Плотность мощности в «начальном пике» лазерного излучения составляла $\sim 5 \cdot 10^8$ Вт/см². Оси лазерного и СВЧ пучков пересекались, фокусы пучков совпадали с точкой пересечения.

Методом двухэкспозиционной лазерной голографии производилась съемка газодинамической картины, характеризующей как лазерную искру, так и СВЧ разряд (в направлении, перпендикулярном плоскости) (рис. 1). Проводилось фотографирование разряда в собственном свете. Регистрировался уровень проходящей СВЧ мощности (датчиком 6 на рис. 1).

Как следует из эксперимента, искра в свободном пространстве, возбуждаемая CO₂ лазером, является инициатором СВЧ разряда. На рис. 2 приведены характерные осциллограммы проходящего за фокальную область СВЧ излучения. Развитие СВЧ пробоя регистрируется по резкому уменьшению уровня прошедшей СВЧ мощности. Иницирующее действие лазерной искры изучалось как при одновременном действии CO₂ излучения и СВЧ импульса, так и при включении СВЧ излучения с задержкой τ_d относительно излучения CO₂ лазера (последовательность действий элементов схемы приведена на рис. 2, б). Установлено, что при одновременном действии CO₂ и СВЧ излучения (импульс CO₂ лазера спустя 50 мкс от начала СВЧ импульса) минимальное СВЧ электрическое поле E_e , при котором развивается СВЧ разряд, равно $E_e = 1.2$ кВ/см.

Для случая включения СВЧ излучения с задержкой τ_d относительно лазерного пробоя определены времена τ_d , при которых инициирующее действие лазерной искры прекращается: при $E_e = 1.6-3$ кВ/см $\tau_d = 1.5-2.5$ мс.

Характерные интерферограммы, отражающие состояние газовой среды в фокальной плоскости, приведены на рис. 3, а, б. Энерговыведение в фокусе CO_2 лазера сопровождается ударной волной, за которой регистрируется расширяющаяся область разрежения. Сопоставление газодинамических характеристик CO_2 искры (радиус ударной волны в зависимости от времени) с расчетами, выполненными в рамках теории точечного взрыва [5] (рис. 4), показывает, что энерговыведение в области лазерного пробоя достигает 5-10 Дж. Разброс экспериментальных точек на графике рис. 4 связан с нестабильностью работы CO_2 лазера от выстрела к выстрелу.

Из интерферограмм следует, что, возникая вблизи границы области разрежения, созданной лазерной искрой, разряд «убегает» навстречу СВЧ излучению, занимая тем больший объем микроволнового пучка, чем больше длительность микроволнового импульса. Структура разряда, как видно из интегральных фотографий (рис. 5), обычна для СВЧ разрядов высокого давления, описанных в [1-3]. Разряд представляет совокупность ярко светящихся нитей, вытянутых вдоль вектора E высокочастотного поля. Нити являются результатом

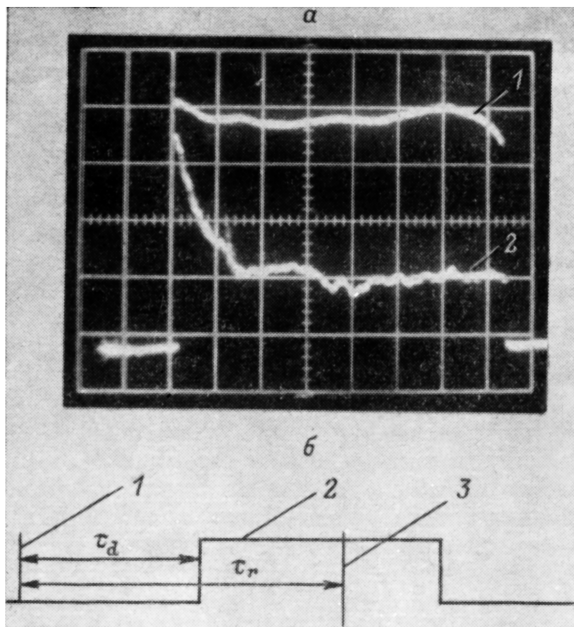


Рис. 2.

а — сигнал с датчика проходящего сигнала (рис. 1, б): верхний — без излучения CO_2 лазера, нижний — с излучением CO_2 лазера; $\tau_d = 100$ мкс; б — последовательность действий элементов схемы: 1 — импульс CO_2 лазера; 2 — импульс СВЧ излучения; 3 — импульс лазера, записываемого голограмму.

развития в СВЧ несамостоятельном разряде высокого давления нелинейной («взрывной») стадии ионизационно-перегревной неустойчивости [6], предсказанной теорией [7]. Как показали измерения [8], они представляют собой области с чрезвычайно высокой концентрацией $n_e > 2-6 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, существенно превосходящей «критическую» $n_e = (\omega^2 + \nu_{eff}^2)/(4\pi e^2) = 4.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, относительно высокой электронной температурой $T_e \approx 3-5$ эВ (много большей расчетной для исходного $[E_e/n_m]$) и малым (много меньшим длины волны СВЧ излучения) диаметром ≤ 0.3 мм. Объем, захваченный разрядом, в настоящем эксперименте составляет $V \geq 3500$ см 3 . При этом объем области, занятой лазерной искрой, не превышает 70 см 3 .

Величина порогового для самовозбуждающегося разряда параметра E_e/n_m могла быть определена из соотношения [1]

$$\left[\frac{E_e}{n_m} \right] \leq 3 \cdot 10^{-17} \sqrt{2 \cdot \left(1 + \frac{\omega^2}{\nu_{eff}^2} \right)} \cdot \left(7.5 \cdot 10^7 + \frac{1.25 \cdot 10^8}{P_0 \cdot \tau_f} \ln \left(\frac{n_e^2 \text{ cr}}{n_e^2} \right) \right)^{0.2}. \quad (3)$$

Легко видеть, что для $\tau_f = 750$ мкс и начального давления $P_0 = 760$ Тор величина пробойного СВЧ электрического поля составит $E_e \approx 23$ кВ/см. Так как в описанных экспериментах величина электрического поля не превышала $E_e \approx 3.7$ кВ/см, то, следовательно, применение CO_2 лазера приводит к существенному (почти на порядок) снижению порога возбуждения СВЧ разряда по полю.

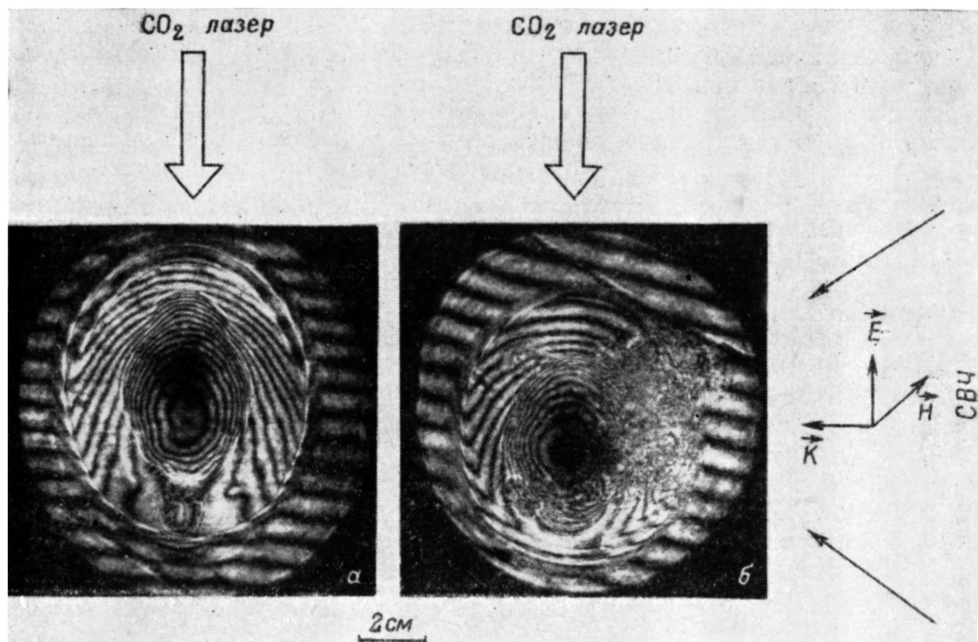


Рис. 3. Интерферограммы газодинамических возмущений в фокальной области без СВЧ излучения ($\tau_r=100$ мкс) (а), с СВЧ излучением ($E_s=2$ кВ/см) и излучением CO_2 лазера ($\tau_d=50$ мкс, $\tau_r=100$ мкс) (б).

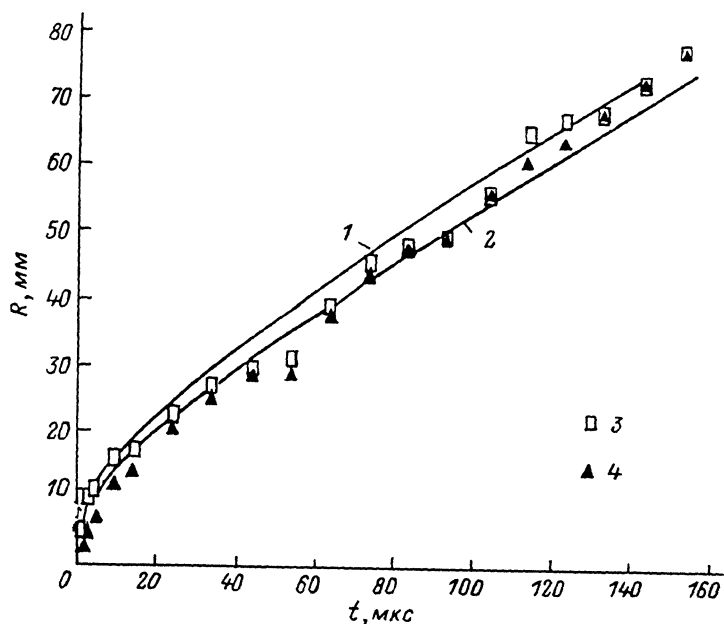


Рис. 4. Зависимость радиуса ударной волны от пробоя лазером от времени.

1, 2 — теория точечного взрыва, вложенная энергия 10 и 5 Дж соответственно; 3 — эксперимент, продольный радиус ударной волны; 4 — эксперимент, поперечный радиус ударной волны.

Эффект инициации разряда в сильноподпороговых СВЧ полях в описанном эксперименте, по-видимому, связан с локальным уменьшением плотности газовой среды в месте возбуждения лазерной искры и соответственно с локальным увеличением параметра $[E_e/n_m]$ вплоть до порогового значения.

Однако нельзя отбросить и такой источник инициации, как возбуждение метастабильных электронных состояний молекул воздушной среды с последую-

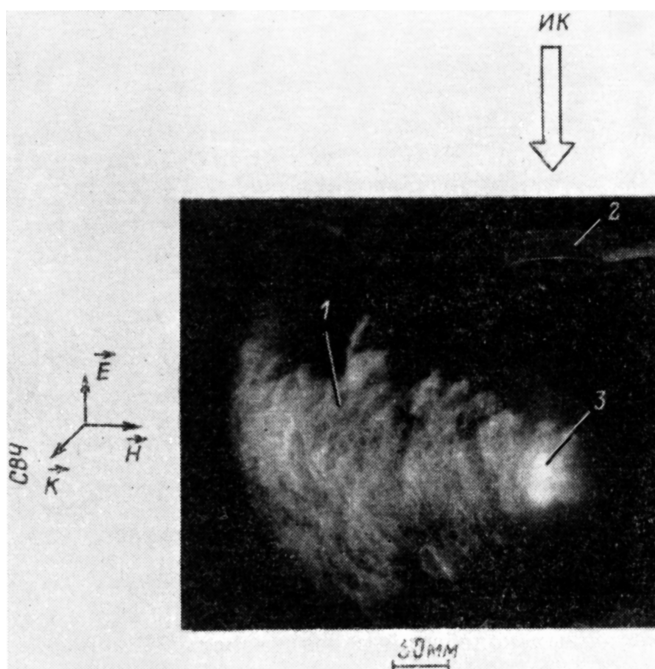


Рис. 5. Интегральная фотография разряда.

$\tau_d = 50$ мкс, $E_0 = 2$ кВ/см.

щей ступенчатой ионизацией с этих уровней (эффективное увеличение частоты ионизации). Возможно, что оба отмеченных механизма в совокупности оказывают влияние на снижение порога пробоя газа пучками СВЧ волн.

Результат работы в том, что, используя искру, возбуждаемую CO_2 лазером, нам удалось иницировать СВЧ разряд в воздухе в свободном пространстве при давлениях, достигающих атмосферного и при уровнях СВЧ мощности почти на два порядка ниже пороговых. Отсутствие каких-либо электродов, значительное удаление стенок камеры от возбуждающего разряда СВЧ пучка делают описанный способ инициации весьма перспективным для целей особо чистой плазмохимии и для техники мощных молекулярных лазеров.

Список литературы

- [1] Батанов Г. М., Грицинин С. И., Косый И. А. и др. // Тр. ФИАН. М.: Наука, 1985. Т. 160. С. 174—203.
- [2] Бродский Ю. Я., Венедиктов Н. И., Голубев С. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 3. С. 187—190.
- [3] Батанов Г. М., Косый И. А., Лукьянчиков Г. С. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 2. С. 346—350.
- [4] Анаин В. Б., Голант К. М., Грицинин С. И. и др. // Тез. докл. I Всесоюз. совещания. Горький, 1987. С. 67.
- [5] Коробейников В. П., Мельникова Н. С., Рязанов Е. В. Теория точечного взрыва. М.: Физматгиз, 1961. 332 с.
- [6] Аветисов В. Г., Грицинин С. И., Ким А. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 51. Вып. 6. С. 306—309.
- [7] Ким А. В., Фрайман Г. М. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 3. С. 613—617.
- [8] Аветисов В. Г., Грицинин С. И., Косый И. А. и др. // Тез. докл. II Всесоюз. совещания «Высокочастотный разряд в волновых полях». Куйбышев, 1989. С. 25—26.