

03;04;07

## **Влияние газодинамических процессов на структуру и пороги СВЧ-разряда при инициации лазерной искрой**

© С.А. Афанасьев, В.Г. Бровкин, Ю.Ф. Колесниченко, И.Ч. Машек

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
Санкт-Петербургский государственный университет  
E-mail: brovkin47@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2011 г.

Представлены экспериментальные результаты по инициации СВЧ-разряда в свободном пространстве в воздухе посредством лазерной искры. Показано, что при заданном уровне СВЧ-поля максимальное время, при котором еще сохраняется иницирующая способность лазерной искры, возрастает с увеличением энергии лазерного импульса. Продемонстрировано, что в интервале давления воздуха 150–750 Торг существенное понижение порогов зажигания СВЧ-разряда и величина времени сохранения иницирующей способности лазерной искры обусловлены созданными ею газодинамическими возмущениями.

Некоторые аспекты процесса инициации микроволнового разряда в свободном пространстве в воздухе посредством лазерной искры изучались в работах [1–5]. Было показано, что применение лазерного излучения заметно понижает пороги пробоя как при атмосферном, так и при пониженных давлениях воздуха. Более того, при определенных задержках СВЧ-импульса относительно лазерного удается существенно уменьшить как уровень пробойного поля [1], так и необходимую для осуществления пробоя длительность СВЧ-импульса, что позволяет локализовать зону энерговыделения в области лазерного луча. Данная работа является продолжением упомянутых исследований и посвящена более детальному изучению пороговых характеристик и газодинамических процессов, оказывающих влияние на формирование СВЧ-разряда.

В настоящей работе, как и в [1], использовался магнетрон сантиметрового диапазона ( $\lambda_{MW} = 2.3$  см), выходная мощность которого достигала  $\sim 600$  kW. Линейно поляризованное СВЧ-излучение фокусировалось в вакуумной камере с помощью металлического зеркала в пятно с поперечным размером порядка длины волны. Амплитуда

электрического поля  $E$  в фокусе достигала  $5.5 \text{ kV/cm}$ . Длительность СВЧ-импульса  $\tau_{\text{MW}}$  не превышала  $4 \mu\text{s}$ . Луч Nd:YAG-лазера (LF117, SOLAR TII, Минск) с длиной волны  $\lambda_{\text{las}} = 532 \text{ nm}$  и длительностью импульса  $\tau_{\text{las}} = 10 \text{ ns}$  вводился вертикально в камеру через зеркало вдоль вектора электрического поля СВЧ-волны. Лазерная искра (ЛИ) создавалась в воздухе в диапазоне давлений  $P$  от 150 до 750 Torr посредством фокусировки светового пучка линзой ( $f = 45 \text{ mm}$ ) в область главного лепестка СВЧ-излучения. Энергия в лазерном импульсе  $w$  составляла от 200 до 550 mJ. В ходе проведения экспериментов время задержки подачи СВЧ-импульса относительно лазерного  $T_{\text{del}}$  варьировалось в широких (от нуля до нескольких десятков миллисекунд) пределах. Частота следования синхронизованных СВЧ- и лазерных импульсов составляла 1 Hz.

Динамика газодинамических возмущений, создаваемых инициирующей лазерной искрой и СВЧ-разрядом, регистрировалась с помощью импульсной шпирен-системы. Фокусное расстояние освещающего и приемного зеркальных объективов равнялось 700 mm, ширины входной и выходной щели —  $100 \mu\text{m}$ . В качестве источника использовался сверхяркий светодиод, питаемый от импульсного источника тока с амплитудой 25A и длительностью  $5 \mu\text{s}$ . Наблюдение исследуемой области производилось через две защитные (от СВЧ-излучения) сетки, расположенные на окнах вакуумной камеры, что существенно снижало достижимые пространственные разрешения. Временное разрешение системы определялось временем экспозиции регистрирующей камеры (Sensicam PCO AG, Germany), включаемой в момент максимальной яркости светодиода и достигало 500 ns. При области наблюдаемого пространства  $70 \times 60 \text{ mm}$  реальное пространственное разрешение системы составило величину 0.15–0.2 mm, что при указанных выше параметрах шпирен-системы и характерных размерах наблюдаемых объектов 10 mm позволило получить минимально обнаруживаемые относительные изменения плотности на уровне  $10^{-4}$ . Полученные чувствительности не являются рекордными, но вполне достаточны для исследования как ударно-волновых структур, возникающих на начальных стадиях лазерного и СВЧ-разрядов, так и их тепловых следов на более поздних стадиях.

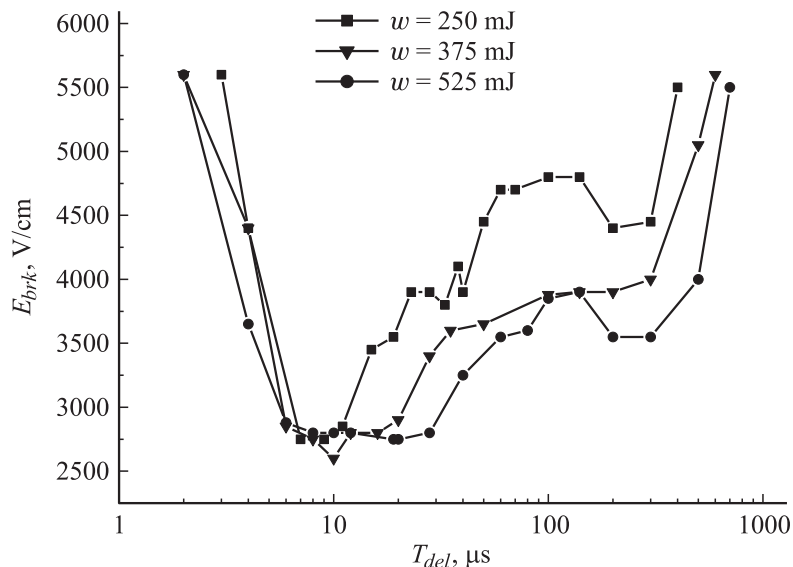
Необходимые задержки, экспозиции и режимы работы во время проведения эксперимента устанавливались с помощью ПК, на который была введена программа управления PCO.Sensicam. Интенсивность и

длительность СВЧ-излучения, световые импульсы ЛИ и СВЧ инициированного разряда (СВЧ ИР), а также импульсы запуска камеры, лазера и светодиода через соответствующие устройства выводились на 4-лучевой осциллограф фирмы Tektronix типа TDS 3014В.

Используя указанные средства, были измерены пороговые характеристики СВЧ-разряда, инициированного искрами различной интенсивности — 250, 375 и 525 мДж — при различных задержках СВЧ-импульса относительно лазерного. После включения лазера с заданной выходной энергией осуществлялось плавное повышение уровня падающей микроволновой энергии до момента появления свечения из зоны взаимодействия. В ходе проведения экспериментов уровень пробойного поля  $E_{brk}$  фиксировался, когда задержка сигнала свечения относительно начала СВЧ-импульса составляла в среднем  $\sim 2-3 \mu\text{s}$ . Были зафиксированы пробойные поля как на стадии свечения ЛИ, так и на более поздних временах ее распада. Для достижения наибольшего эффекта понижения пороговых уровней СВЧ-пробоя обеспечивалась высокая точность совмещения фокальных областей СВЧ- и лазерного пучков.

Результаты, полученные в воздухе атмосферного давления, представлены на рис. 1. В целом наблюдается тенденция понижения порогов пробоя и увеличения времени инициирующей способности СВЧ-разряда с ростом интенсивности искры. Имеется, однако, интервал времен в районе  $10 \mu\text{s}$ , где пороги пробоя минимальны и практически совпадают при всех исследованных энергиях лазерного импульса. Наиболее существенно повышение энергии лазера влияет на образование СВЧ ИР при задержках от нескольких десятков микросекунд до миллисекунд и больше. С понижением давления инициирующая способность ЛИ возрастает до времен в десятки и даже сотни миллисекунд.

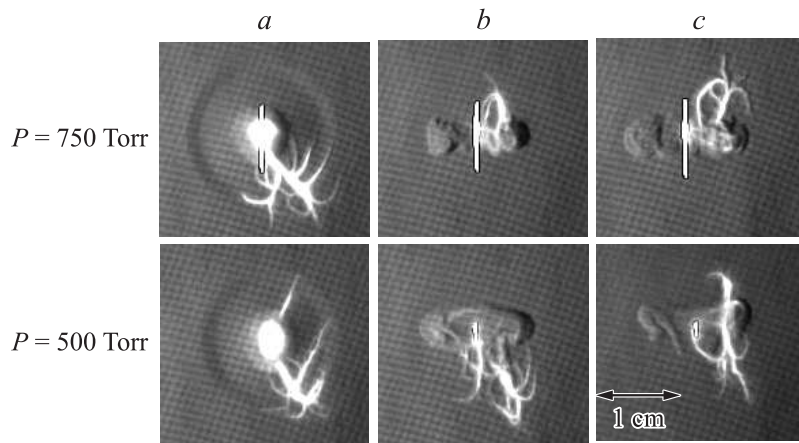
Фрагменты динамики развития СВЧ-разряда на лазерной искре в видимом диапазоне были представлены в опубликованной ранее работе [1]. В данной работе более детальное изучение картины формирования СВЧ ИР осуществлено с помощью описанной выше шлирен-системы. Для этого при различных давлениях воздуха в широком диапазоне задержек фиксировались послеискровые газодинамические фазы с одновременной инициацией СВЧ-разряда. Такие экспериментальные результаты позволяют определить пространственные области зарождения каналов в разные моменты взаимодействия СВЧ-волны с остаточными газодинамическими возмущениями среды.



**Рис. 1.** Пробойные характеристики инициированного лазерной искрой СВЧ-разряда с длительностью излучения  $\tau_{MW} = 4 \mu s$  при различных энергиях лазерного импульса.

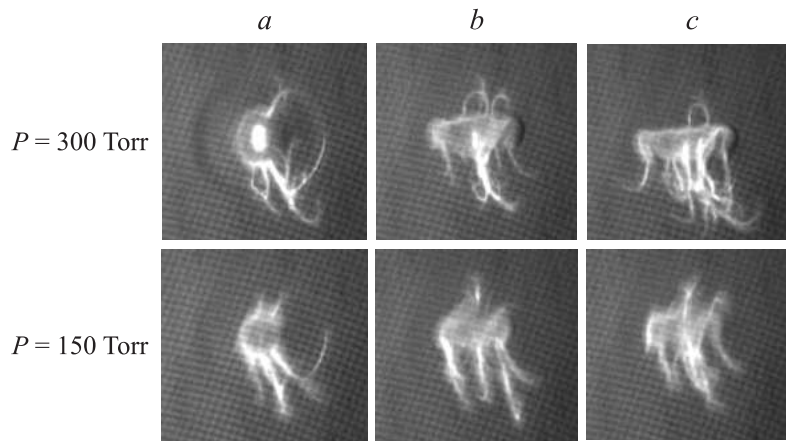
Через несколько микросекунд после образования ЛИ начинают проявляться газодинамические возмущения в виде расходящейся ударной волны (УВ). К десятой микросекунде на фоне послесвечения ЛИ отчетливо наблюдается сформировавшаяся после лазерного энерговыделения слегка вытянутая вдоль направления лазерного луча эллипсоидная область нагретого разреженного газа („яма“ плотности). В дальнейшем в этой зоне постепенно развивается вихревое течение, которое при атмосферном давлении фиксируется до времен порядка миллисекунды и более. Как показали эксперименты, различие в характере газодинамических возмущений приводит к различным механизмам инициации СВЧ-разряда на малых ( $\leq 30 \mu s$ ) и больших ( $\geq 100 \mu s$ ) задержках.

До  $\sim 20\text{--}30 \mu s$  СВЧ ИР формируется в условиях остаточного свечения плазмы ядра ЛИ (все еще обладающей высокой проводимостью [2,3]), наличия расходящейся УВ и области разрежения (рис. 2, а). В диапазоне давлений, близких к атмосферному, канал



**Рис. 2.** Теневые фото СВЧ-разряда инициированного ЛИ, время экспозиции  $3.5\mu\text{s}$  (*a-c*). Задержки лазер–СВЧ: *a* —  $10\mu\text{s}$ , *b* —  $300\mu\text{s}$ , *c* —  $500\mu\text{s}$ . СВЧ-пучок распространяется слева направо —  $E \approx 5\text{kV/cm}$ ,  $\tau_{\text{MW}} = 4\mu\text{s}$ . Луч лазера идет сверху вниз —  $w = 370\text{mJ}$  (*a-c*),  $\tau_{\text{las}} = 10\text{ns}$ .

СВЧ ИР формируется внутри „ямы“ плотности в области полюса ядра ЛИ. Далее канал развивается в плоскости поляризации СВЧ-волны в соответствии с электродинамикой инициированного СВЧ-разряда [6]. Часто СВЧ-канал (или один из СВЧ-каналов) затем распространяется вдоль фронта УВ (см. также [1]). При пересечении СВЧ-каналом фронта УВ фиксируются ее разрыв и смещение. При пониженных давлениях инициация СВЧ-каналов происходит точно на границе „ямы“ плотности уже в области ее полюсов (рис. 3, *a*) с дальнейшим развитием по сценарию разряда высокого давления. Анализ полученных теневых фото позволяет уточнить сделанные в [1] предположения о причинах существенного понижения порогов пробоя на малых временах задержек. Понижение пробойных полей в этом диапазоне задержек может объясняться сочетанием усиления СВЧ-поля на полюсах ядра ЛИ (ядро ЛИ сохраняет высокую проводимость вплоть до времени порядка  $100\mu\text{s}$  [2,3]) с понижением плотности газа в области усиленного поля при совместной эволюции области разрежения и ядра лазерной искры. Этот вопрос требует проведения дополнительных более детальных экспериментальных и теоретических исследований.



**Рис. 3.** Теневые фото СВЧ-разряда инициированного ЛИ, время экспозиции  $3.5 \mu\text{s}$  ( $a-c$ ). Задержки лазер–СВЧ:  $a - 10 \mu\text{s}$ ,  $b - 300 \mu\text{s}$ ,  $c - 500 \mu\text{s}$ . СВЧ-пучок распространяется слева направо —  $E \approx 5 \text{ kV/cm}$  для  $P = 300 \text{ Torr}$ ,  $E \approx 4 \text{ kV/cm}$  для  $P = 150 \text{ Torr}$ ,  $\tau_{\text{MW}} = 4 \mu\text{s}$ . Луч лазера идет сверху вниз —  $w = 370 \text{ mJ}$  ( $a-c$ ),  $\tau_{\text{las}} = 10 \text{ ns}$ .

В диапазоне больших задержек, спустя  $100-300 \mu\text{s}$ , характер газодинамических возмущений меняется — начинает формироваться возмущение тороидального типа и на более поздних стадиях ( $t \geq 400 \mu\text{s}$ ) без СВЧ-излучения в воздухе хорошо виден вихревой, остаточный после ЛИ, след. Именно в этих областях при наложении СВЧ-поля сначала наблюдается появление диффузного объемного свечения с последующим развитием СВЧ-каналов, ориентированных вдоль вектора электрического поля СВЧ-волны (рис. 3,  $b, c$ ). Кроме того, часть СВЧ-каналов достаточно явно отслеживают и геометрию вихревой возмущенной зоны, т.е. их развитие идет вдоль плотностных границ (рис. 2,  $b, c$ ). Данный сценарий инициации наблюдается еще достаточно длительное время, пока существует газодинамическое возмущение в фокальной области СВЧ-излучения. В данном диапазоне задержек основной вклад в понижение порогов, вероятно, вносит пониженная плотность воздуха [1] в остывающем газе вихревого образования, хотя и этот вопрос требует более детального анализа.

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить факторы, влияющие на инициацию СВЧ-разряда в воздухе лазерной искрой на всех стадиях ее распада. Важным параметром, определяющим пороги образования СВЧ-разряда в зависимости от времени задержки излучения СВЧ-импульса относительно лазерного, является энергия лазерного импульса. При заданном уровне СВЧ-поля максимальное время задержки, при которой еще сохраняется иницирующая способность ЛИ, возрастает с увеличением энергии лазерного импульса. Установлено, что как при нормальном, так и при пониженном давлении воздуха существенное уменьшение порогов зажигания СВЧ-разряда и величина времени сохранения иницирующей способности лазерной искры обусловлены созданными ею газодинамическими возмущениями.

Авторы выражают благодарность Р. Хоронжуку за помощь, оказанную при подготовке и проведении экспериментов.

Работа частично поддержана EOARD (грант МНТЦ № 3058) и Российской академией наук (программа президиума РАН 11).

## Список литературы

- [1] *Афанасьев С.А., Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 73–78.
- [2] *Kolesnichenko Yu., Khmara D., Brovkin V., Afanas'ev S.* // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (Reno, NV, 8–11 January 2007). AIAA Paper 2007–1228.
- [3] *MW Discharge: Fundamentals and Applications* / Ed. Prof. Yu.A. Lebedev. Moscow: Yanus-K, 2006.
- [4] *Бровкин В.Г., Быков Д.Ф., Голубев С.К., Грицинин С.И., Гумберидзе Г.Г., Косый И.А., Тактакишвили М.И.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 2. С. 153–157.
- [5] *Mashek I., Anisimov Yu., Lashkov V., Kolesnichenko Yu., Brovkin V., Rivkin M.* // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (Reno, NV, 5–8 January 2004). AIAA Paper 2004–0358.
- [6] *Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 3. С. 55–58.