

04;07

Инициация СВЧ-разряда посредством лазерной искры

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

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: brovkin47@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 февраля 2010 г.

Представлены экспериментальные результаты по инициации СВЧ-разряда в свободном пространстве посредством лазерной искры. Продемонстрировано существенное понижение порогов зажигания иницируемого лазерной искрой СВЧ-разряда при атмосферном давлении в широком диапазоне времен задержек СВЧ-импульса относительно лазерного. При пониженных давлениях воздуха также продемонстрирована возможность инициации СВЧ-разряда в лазерно-безыскровом режиме.

Микроволновый разряд в свободном пространстве продолжает оставаться интересным физическим объектом для решения различных прикладных задач [1,2]. Однако для его формирования при давлениях, близких к атмосферному, требуются достаточно высокие уровни СВЧ электрического поля, которые не обеспечиваются современными приборами. Поэтому в экспериментах, как правило, используются различные инициаторы, установленные на пути распространения СВЧ-волны [3]. Одним из способов создания такого разряда стало применение лазерного излучения [4]. Этот перспективный метод дистанционной инициации СВЧ-разряда позволяет локализовать зону энерговыделения (при определенных условиях и перенаправить разряд) и существенно понизить пороги пробоя.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению начальной стадии формирования и пороговых характеристик возникновения СВЧ иницированного разряда (СВЧ ИР) на лазерной искре при атмосферном давлении воздуха. Приведены также данные по инициации разряда при пониженных давлениях посредством только облучения области инициации лазерным лучом (без создания лазерной искры).

Условия проведения экспериментов таковы. Линейно поляризованная СВЧ-волна сантиметрового диапазона ($\lambda_{MW} = 2.3$ см) с амплитудой

электрического поля $E \leq 5 \text{ kV/cm}$ через рупор излучалась в вакуумную камеру, где фокусировалась с помощью металлического зеркала. Размер области фокусировки был порядка $\sim \lambda_{MW}/2$. Длительность СВЧ-импульса i_{MW} не превышала $4 \mu\text{s}$, а частота посылок всегда составляла 1 Hz . Луч на второй гармонике Nd:YAG-лазера ($\lambda_{las} = 532 \text{ nm}$) с длительностью импульса $\tau_{las} = 10 \text{ ns}$, ориентированный вертикально (вдоль вектора электрического поля СВЧ-волны), вводился в камеру через зеркало и верхний кварцевый иллюминатор. Энергия в лазерном импульсе составляла от 50 до 320 mJ , что было достаточно для создания лазерной искры (ЛИ) при атмосферном давлении. Световой пучок фокусировался линзой ($f = 45 \text{ mm}$) в область главного лепестка СВЧ-излучения. Пространственное совмещение осей и центральных зон сфокусированных пучков лазера и СВЧ было не хуже 2 mm . Время задержки подачи СВЧ-импульса относительно лазерного варьировалось в широких пределах.

Появление разряда фиксировалось визуально с помощью ФЭУ и скоростной камерой PCO.Sensicam (время экспозиции $0.5\text{--}1000 \mu\text{s}$). СВЧ-разряд при атмосферном давлении стабильно инициировался либо непосредственно лазерной искрой, либо формировался в газовой среде, сильно возмущенной ЛИ, в течение достаточно продолжительного времени после ее погасания. Ниже, на рис. 1, представлены характерные фото СВЧ ИР, полученные при различных задержках СВЧ-импульса относительно лазерного. Белая вертикальная полоса на фото — результат действия сильной вспышки ЛИ на ПЗС-матрицу камеры.

Размер лазерной искры составлял $\sim 6 \times 3 \text{ mm}$, время ее свечения (по уровню 0.5) не превышало 500 ns . При малых задержках СВЧ-канал развивается прямо из области ЛИ и, как правило, в нижней или в верхней ее части. С увеличением задержки область СВЧ-разряда значительно увеличивается. В пределах задержки в несколько десятков микросекунд часто формируются каналы концентрического типа. При дальнейшем увеличении времени задержки разряд стремится навстречу СВЧ-излучению, и тогда наблюдаются каналы синусоидального вида [5]. Инициация разряда при данном уровне поля достигается вплоть до времен $\sim 1 \text{ ms}$. Средняя скорость каналов при указанных условиях $\sim (1\text{--}5) \cdot 10^5 \text{ cm/s}$.

При изменении времен задержек излучения СВЧ-импульса относительно лазерного наблюдается значительная вариация порогов образования СВЧ-разряда. Поэтому был выполнен отдельный цикл

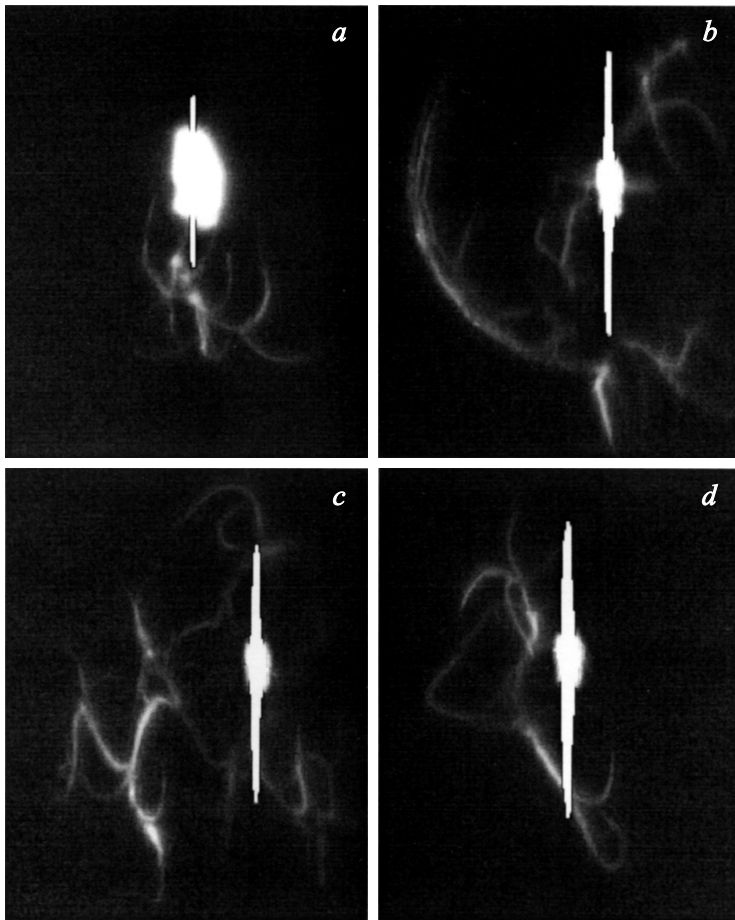


Рис. 1. Фото СВЧ-разряда инициированного ЛИ, время экспозиции $2\mu\text{s}$. Задержки СВЧ — лазер: $a — T_{del} = 0\mu\text{s}$, $b — T_{del} = 12\mu\text{s}$, $c — T_{del} = 20\mu\text{s}$, $d — T_{del} = 700\mu\text{s}$. СВЧ-пучок распространяется слева направо — $E = 5\text{kV/cm}$, длительность СВЧ-импульса — $4\mu\text{s}$. Луч лазера идет сверху вниз — энергия импульса 320mJ , $\tau_{las} = 10\text{ns}$.

экспериментов по определению его пробойных характеристик в воздухе атмосферного давления. Для этого на каждой фиксированной задержке СВЧ-импульса относительно лазерного осуществлялось плавное

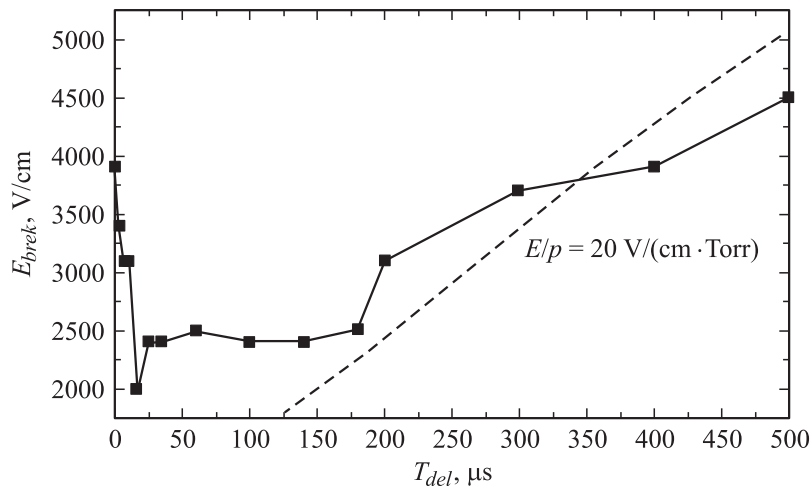


Рис. 2. Зависимость пробойных значений СВЧ-поля при различных задержках.

повышение уровня падающей СВЧ-энергии до момента появления СВЧ-канала. Длительность СВЧ-импульса составляла $4 \mu s$. Лазерная искра создавалась при выходном значении энергии 320 mJ . Полученные результаты представлены на рис. 2.

На рисунке видны резкое падение уровня поля на малых задержках до $15 \mu s$, затем достаточно стабильная стадия и наконец рост пробойного поля вплоть до максимального на больших задержках порядка $\sim 500\text{--}1000 \mu s$.

Скорее всего, на малых задержках вокруг искры за счет фотоионизации образуется плазменная шуба, где и развивается СВЧ-канал, который стартует прямо из ЛИ. Наличие затравочной электронной концентрации и усиление поля на вытянутой искре (в самой искре на этих временах концентрация электронов превышает критическую и туда СВЧ-поле не проникает), размер которой близко к λ_{MW} , создают условия для эффективной инициации разряда на полюсах ЛИ вне ее. Данные эксперименты (как и многочисленные другие) показывают, что СВЧ-разряд хорошо чувствует газодинамические фронты и охотно развивается вдоль них. Так, к $15 \mu s$ уже сформирована уходящая от ЛИ ударная волна (УВ), сферический фронт которой хорошо визу-

ализируется СВЧ-разрядом (рис. 1, *b*). Оценка скорости УВ на этой стадии, полученная по регистрации ее светящегося фронта в различные моменты времени, дает величину $\sim 5 \cdot 10^4$ cm/s.

При задержках, превышающих $100 \mu\text{s}$, плазма в области ЛИ становится прозрачной для СВЧ-поля [6] и фиксируемые значения пробойных полей, скорее всего, отображают изменение плотности газа внутри ЛИ. Постепенно в результате охлаждения области ЛИ плотность газа в зоне энерговыделения повышается (имея в виду, что давление газа в области пробоя уже выровнялось), что приводит к росту пробойных полей. В работе [7] экспериментально была определена зависимость температуры газа лазерной искры, созданной в воздухе атмосферного давления импульсом второй гармоники Nd:YAG-лазера, в процессе эволюции (распада) ЛИ от момента ее создания до момента времени 1 ms (условия, близкие к нашим). Используя эти результаты (а именно зависимость плотности газа в области ЛИ от времени) на рис. 2 приведена пунктирная кривая, наилучшим образом описывающая экспериментальные данные при $T_{del} > 100 \mu\text{s}$. Оказывается, что данной кривой соответствует приведенное электрическое поле $E/p = 20 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$, что существенно ниже уровня стандартных пробойных полей. Это свидетельствует о том, что на величину порога пробоя действуют дополнительные факторы, не сводящиеся лишь к плотности газа. Данный вопрос требует отдельного тщательного исследования.

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 иницилирующая способность ЛИ, уменьшается с уменьшением энергии лазерного импульса. При этом на малых задержках изменение пробойных полей сравнительно невелико. Как показали эксперименты, при атмосферном давлении даже самая слабая лазерная искра успешно инициировала СВЧ-разряд. Однако в безыскровом режиме разряд зажечь не удалось. Понижение давления ($p \leq 130 \text{ Torr}$) дало неожиданный результат. Наличие только светового пучка с энергией $\sim 50 \text{ mJ}$ способствует развитию безэлектродного СВЧ-разряда. Причем фиксируется заметное понижение порогов пробоя по величине СВЧ-поля до ~ 20 –30%.

Таким образом, проведенные исследования показали устойчивую инициацию СВЧ-разряда в воздухе лазерной искрой как на стадии ее

формирования, так и на поздних стадиях распада газодинамических возмущений в области ЛИ, вплоть до ~ 1 ns. Кроме того, эксперименты демонстрируют возможность стабильной инициации СВЧ-разряда при пониженных давлениях одним только световым пучком со значительным понижением порогов пробоя.

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

Список литературы

- [1] *Kolesnichenko Yu., Brovkin V., Azarova O., Grudnitsky V., Lashkov V., Mashesk I.* // 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (Reno, NV, 6–9 January 2003). AIAA Paper 2003-0361.
- [2] *MW Discharge: Fundamentals and Applications* / Ed. Prof. Yu.A. Lebedev. Moscow: Yanus-K, 2006.
- [3] *Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 2. С. 194–196.
- [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] *Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 3. С. 55–58.
- [6] *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.
- [7] *Glumac N., Elliott G., Boguszko M.* // AIAA J. 2005. V. 43. N 9. P. 1984–1994.