

04

## Эффективная площадь энергетического взаимодействия плазмы глубоко подкритического СВЧ разряда с возбуждающим его электромагнитным полем

© К.В. Александров, Л.П. Грачев,<sup>¶</sup> И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.Г. Северинов

Московский радиотехнический институт РАН,  
117519 Москва, Россия

<sup>¶</sup> e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 29 сентября 2016 г.)

Описаны результаты экспериментов по зажиганию электрического разряда в воздухе в радиопрозрачном герметичном объеме. Разряд зажигается в квазиоптическом линейно поляризованном СВЧ пучке с глубоко подкритическим уровнем поля и разряд инициируется закрепленным над экраном электромагнитным вибратором. Обработка полученных результатов позволила рассчитать эффективную площадь энергетического взаимодействия разрядной плазмы с возбуждающим его СВЧ полем. Показано, что эта площадь существенно превышает площадь поперечного сечения области разряда.

DOI: 10.21883/JTF.2017.05.44441.2050

### Введение

Исследования газового электрического разряда, зажигаемого в поле квазиоптического СВЧ пучка [1], показали, что при сравнительно высоких газовых давлениях  $p$  он реализуется в высокотемпературной форме [2]. Это позволяет рассматривать пути его практического применения, например, для поджига газовых горючих смесей, в том числе и в их высокоскоростных потоках [3,4].

В работе [2] исследовался разряд при исходной амплитуде электрической составляющей поля  $E_0$  в линейно поляризованном СВЧ пучке с ТЕМ структурой поля, на много порядков меньшей минимального пробойного (критического) уровня  $E_{cr}$ , необходимого для безэлектродного электрического пробоя воздуха в пространственно однородном и непрерывном во времени СВЧ поле. В описанных в этой работе опытах пробой инициировался параллельным вектору  $\mathbf{E}$  электромагнитного (ЭМ) поля СВЧ пучка линейным „полуволновым“ ЭМ вибратором. Вибратор закреплялся над помещенным в пучок металлическим экраном, перпендикулярным волновому вектору  $\mathbf{k}$  СВЧ пучка. При этом расстояние от вибратора до плоскости экрана  $h$  было существенно меньшим четверти длины волны ЭМ поля  $\lambda$ .

На практике возникает вопрос, какая же энергия выделяется в плазме реализующегося в этом случае глубоко подкритического СВЧ разряда? Ответить на этот вопрос можно, если ввести понятие и количественно определить величину эффективной площади  $S_{eff}$  энергетического взаимодействия разряда с ЭМ полем СВЧ пучка. Действительно, если известна амплитуда электрической составляющей исходного поля СВЧ пучка  $E_0$  в предполагаемой области зажигания разряда, то локальное значение плотности потока ЭМ энергии  $\Pi$ , протекающей через поперечное сечение этой области,

определится выражением

$$\Pi = E_0^2 / (2Z_0), \text{ W/cm}^2, \quad (1)$$

где  $Z_0 = 120\pi$ ;  $\Omega$  — волновое сопротивление „свободного“ пространства, а размерность поля  $E_0$ , V/cm. При рассчитанной величине  $\Pi$  темп выделения энергии в разрядной плазме

$$P_{dis} = \Pi \cdot S_{eff} W. \quad (2)$$

Это выражение и вводит понятие эффективной площади  $S_{eff}$  энергетического взаимодействия разрядной плазмы с ЭМ полем.

В работе [5] величина площади  $S_{eff}$  была оценена по результатам экспериментов. Они выполнялись с трубчатым вибратором резонансной длины, расположенным на расстоянии  $h = \lambda/4$  над плоскостью экрана, т.е. в пучности поля падающей на экран и отраженной от него ЭМ волн. Вибратор продувался потоком воздуха. СВЧ разряд горел в кормовой области вибратора. В спутном следе горящего разряда снималось поперечное распределение температуры торможения потока. Это позволило оценить мощность  $P_{dis}$  и по рассчитанной величине  $\Pi$  определить величину площади  $S_{eff}$ . Она оказалась существенно больше площади продольного сечения разрядной области, т.е. в ее формировании участвует и инициирующий пробой газа ЭМ вибратор.

В настоящей работе описываются эксперименты, по результатам которых оценивается площадь  $S_{eff}$  для СВЧ разряда, инициированного резонансным ЭМ вибратором, закрепленным над помещенным в квазиоптический СВЧ пучок экраном, но на расстоянии от его плоскости  $h \ll \lambda/4$ . Как констатировано в работе [2], именно такой способ инициации электрического пробоя газа позволяет зажигать СВЧ разряд в ЭМ поле с  $E_0 \ll E_{cr}$ . В описываемой работе экспериментальная

методика оценки  $S_{\text{eff}}$  отличалась от используемой в работе [5]. В данных исследованиях разряд зажигался в герметичном объеме, и по мере горения разряда измерялось увеличение давления воздуха  $\Delta p$  в этом объеме.

Описываемые исследования были стимулированы результатами работы [5], которые позволяли надеяться на высокую эффективность энергетического взаимодействия разрядной плазмы с полем ЭМ пучка при данном способе инициации электрического пробоя газа. В результате может существенно расшириться зона поиска путей практического применения этого вида разряда.

## Экспериментальная установка

Эксперименты выполнялись на описанной в работе [5] установке.

Установка содержит СВЧ генератор магнетронного типа. Он генерирует ЭМ колебания на частоте  $f = 2.44 \text{ GHz}$ . В „свободном“ пространстве им соответствует длина волны излучения  $\lambda = 12.3 \text{ cm}$ . В экспериментах генерируемая мощность  $P_{\text{gen}}$  находилась в диапазоне (1–1.5) kW. В них использовались одиночные СВЧ импульсы с прямоугольной огибающей длительностью  $\tau_{\text{pul}}$  в несколько десятков долей секунды. Генерируемое магнетроном ЭМ излучение распространяется по прямоугольному волноводу с внутренним сечением  $9 \times 4.5 \text{ cm}$ . Волноводный тракт оканчивается рупорной антенной в форме обелиска длиной 15 см. Ее излучающий раскрыв имеет размер  $9 \times 9 \text{ cm}$ . Линейно поляризованная СВЧ волна излучается вертикально вниз в герметичную ЭМ безэховую рабочую камеру. Давление воздуха в ней  $p_c$  может устанавливаться в диапазоне от 10 Torr до атмосферного значения и контролируется с точностью  $\pm 1.5 \text{ Torr}$ . При этом при уменьшении давления в камере давление во внутреннем объеме рупорной антенны отслеживает давление  $p_c$ . Давление же в волноводе, к которому подсоединен рупор, продолжает оставаться атмосферным. Для этого в сечении их сочленения установлена герметизирующая радиопрозрачная стеклотекстолитовая пластина толщиной 2 мм.

В опытах в рабочей камере симметрично оси ЭМ пучка располагался дюралевый диск — экран диаметром 160 мм и толщиной 10 мм. Его обращенная к излучающему раскрыву плоскость перпендикулярна волновому вектору излучения  $\mathbf{k}$  и удалена от раскрыва рупора на расстояние  $H = 71 \text{ mm}$ . На экране, как проиллюстрировано на рис. 1, симметрично оси ЭМ пучка может располагаться дополнительный радиопрозрачный цилиндрический объем. Его внутренний диаметр равен 75 мм, а расстояние от экрана до внутренней плоскости верхнего торцевого ситаллового диска толщиной 6 мм равно 23 мм. Таким образом, объем этой полости  $V = 10^2 \text{ cm}^3$ . В зависимости от экспериментальных требований этот объем может быть или негерметичным и давление в нем будет отслеживать давление

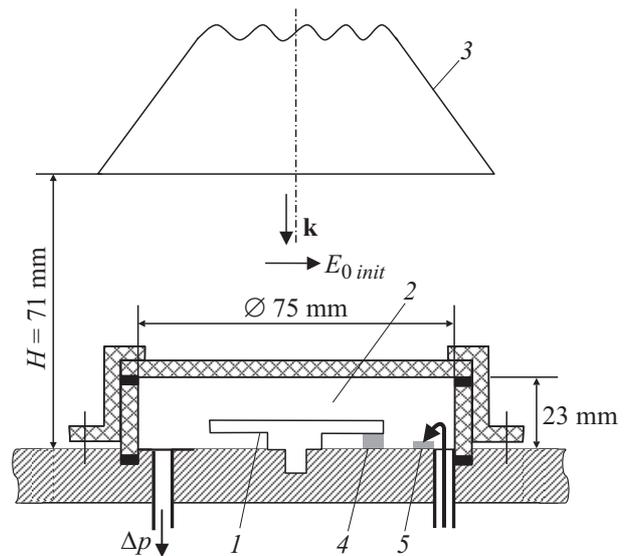


Рис. 1. Экспериментальная схема: 1 — ЭМ вибратор, 2 — вспомогательный объем, 3 — излучающий рупор, 4 — СВЧ разряд, 5 — вспомогательный разрядник.

в рабочей камере  $p_c$ , или герметичным и выдерживать внутреннее избыточное давление  $\Delta p$  до 2.5 atm. В опытах давление  $\Delta p$  можно измерять. Электрический сигнал с измерительного датчика подается на вход „запоминающего“ осциллографа.

Внутри дополнительного объема, как показано на рис. 1, симметрично оси ЭМ пучка и параллельно его вектору  $\mathbf{E}$  может помещаться линейный ЭМ вибратор. Он выполняется из дюралюминиевого листа толщиной 2 мм и крепится к экрану на центральной стойке. Ее ширина вдоль вибратора равна 10 мм. Ширина плеч вибратора равна 4 мм. Стойка обеспечивает зазор между плечами вибратора и плоскостью экрана  $h = 4.3 \text{ mm}$ . Этот размер для каждого плеча в опытах выдерживался с точностью 0.1 мм. С целью обеспечения резонансной длины вибратора его полная длина  $2l$ , начиная с  $2l_{\text{max}} = 65 \text{ mm} > (\lambda/2)$ , в опытах уменьшалась с шагом в 1 мм при сохранении равенства длин плеч.

В дополнительном объеме около его боковой поверхности может быть реализован вспомогательный искровой разряд длительностью в сотые доли секунды в миллиметровом зазоре между высоковольтным вспомогательным электродом и поверхностью экрана.

## Результаты экспериментов

Эксперименты можно условно разделить на несколько этапов. На первом измерялась амплитуда исходного поля  $E_{0 \text{ init}}$  в предполагаемом месте расположения дополнительного объема. На втором этапе определялась степень ослабления этого поля внутри дополнительного объема, т.е., по существу, амплитуда поля  $E_0$ . На следующем определялась резонансная длина вибратора  $2l_{\text{res}}$ . И на

заключительном этапе измерялся временной темп роста давления воздуха в герметичном объеме  $\Delta p(t)$  в процессе горения инициированного вибратором резонансной длины СВЧ разряда.

Опыты по измерению  $E_{0\text{init}}$  проводились при снятом с экрана дополнительном объеме. В них на оси ЭМ пучка на расстоянии от плоскости экрана  $h = 31 \text{ mm} \approx \lambda/4$  на пенопластовой стойке параллельно вектору  $\mathbf{E}$  помещался „короткий“ цилиндрический алюминиевый ЭМ вибратор со сферически закругленными концами диаметром  $2a = 5.6 \text{ mm}$  и длиной  $2l = 22.4 \text{ mm}$ , т.е. при отношении  $\eta = 2l/2a = 4$ . В эксперименте определялось максимальное давление воздуха в рабочей камере установки  $p_c = p_{br}$ , при котором данный вибратор обеспечивал пробой воздуха в СВЧ импульсе с  $\tau_{\text{pul}} = 0.4 \text{ s}$ .

В этом опыте выяснилось, что при  $p_c \leq p_{br}$  разряд зажигается в каждом СВЧ импульсе только при синхронном с ним включении вспомогательного разряда. Последнее объяснимо. Плазма вспомогательного разряда является источником сравнительно жесткого ультрафиолетового (УФ) излучения [6]. В опытах оно обеспечивает в течение  $\tau_{\text{pul}}$  наличие начальных электронов около одной из полюсных поверхностей инициатора.

Измерения дали значение  $p_{br} = 15 \text{ Torr}$ . Оно по формуле

$$2E_{0\text{init}} = \frac{E_{\text{cr}}}{\chi} \xi \quad (3)$$

позволяет рассчитать поле  $E_{0\text{init}}$  [7]. В этой формуле двойка учитывает, что измерения выполнялись в пучности прямой и отраженной от экрана волн; поле

$$E_{\text{cr}} = 42p_{br} \sqrt{1 + (\omega/v_c)^2}, \text{ V/cm} \quad (4)$$

— критическое поле пробоя, где  $\omega$  — круговая частота поля, а

$$v_c = 4 \cdot 10^9 p_{br}, \text{ 1/s} \quad (5)$$

— частота столкновений плазменных электронов с молекулами воздуха; коэффициент  $\chi = E_{\text{pol}}/2E_{0\text{init}}$  учитывает степень усиления поля на полюсах вибратора; коэффициент  $\xi > 1$  учитывает существенную пространственную неоднородность поля  $E_{\text{pol}}$ . В формулах (4) и (5) размерность  $p_{br}$  — Torr.

В анализируемом эксперименте при  $\lambda = 12.3 \text{ cm}$  частота  $\omega = 1.53 \cdot 10^{10} \text{ 1/s}$ , а при  $p_{br} = 15 \text{ Torr}$  частота  $v_c = 6 \cdot 10^{10} \text{ 1/s}$ , т.е. разрядная плазма является существенно столкновительной с  $v_c \gg \omega$ , следовательно, поле  $E_{\text{cr}} = 42p_{br} = 630 \text{ V/cm}$ . Для используемого в опыте вибратора со значением  $\eta = 4$  коэффициент  $\chi = 10$ , а коэффициент  $\xi = 2.15$  [7]. Таким образом, измерения дали  $E_{0\text{init}} = 67.5 \text{ V/cm}$ .

Поле  $E_0$  внутри дополнительного объема ослаблено по сравнению с  $E_{0\text{init}}$ . Определение величины поля  $E_0$  также выполнялось экспериментально. В этих опытах первоначально при снятом дополнительном объеме на поверхности экрана симметрично оси ЭМ пучка и вдоль вектора его электрической составляющей помещался

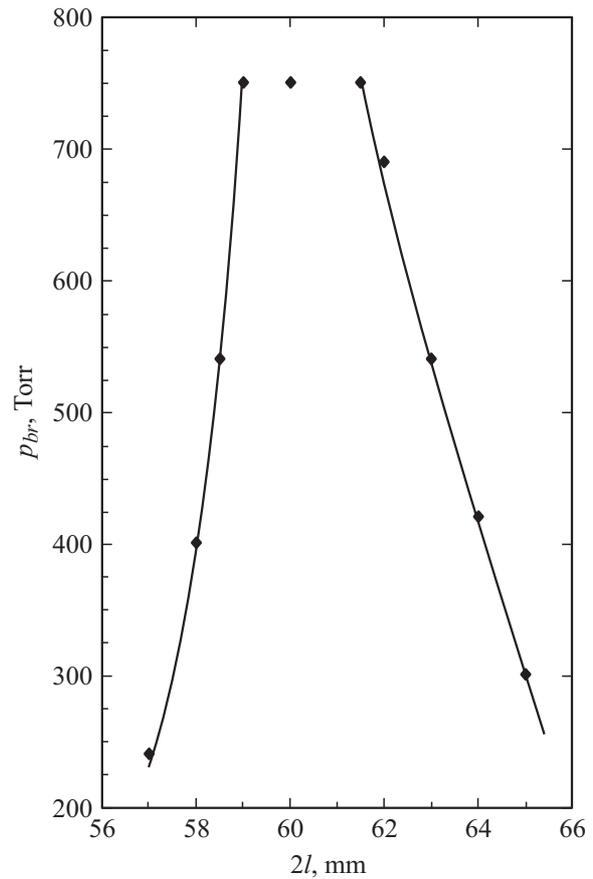


Рис. 2. Резонансная кривая инициирующего пробой воздуха ЭМ вибратора, закрепленного над проводящим экраном при  $h < \lambda/4$ .

вибратор с  $2a = 2.25 \text{ mm}$  и  $2l = 55 \text{ mm} > 2l_{\text{res}}$ . Вибратор располагался на пенопластовой опоре, которая обеспечивала высоту его оси над плоскостью экрана  $h = 10 \text{ mm}$ . В опытах такой вибратор обеспечивал пробой воздуха при давлении  $p_c = p_{br1} = 615 \text{ Torr}$ . Значение  $p_{br1}$  по существу соответствует измеренному ранее полю  $E_{0\text{init}}$ . Затем вибратор „накрывался“ дополнительным объемом, негерметизированным относительно объема рабочей камеры установки. В этом случае вибратор инициировал пробой воздуха уже при давлении  $p_c = p_{br2} = 520 \text{ Torr}$ . Рассчитанное по формулам (3)–(5) отношение возбуждающих его полей  $E_{0\text{init}}/E_0$  дало значение 1.18. Таким образом,  $E_0 = 57.5 \text{ V/cm}$ .

На следующем этапе экспериментов определялась резонансная длина  $2l_{\text{res}}$  помещаемого в дополнительный объем и механически закрепленного на экране ЭМ вибратора. Как указывалось, его длина в опытах постепенно уменьшалась с шагом  $1 \text{ mm}$ , начиная от  $2l_{\text{max}} = 65 \text{ mm}$ , и при каждом значении  $2l$  определялось давление  $p_{br}$ . Результаты этих опытов приведены на рис. 2. Из них видно, что первоначально давления  $p_{br}$  растут; в диапазоне  $2l = (59–61.5) \text{ mm}$  вибратор инициирует пробой воздуха и при атмосферном давлении;

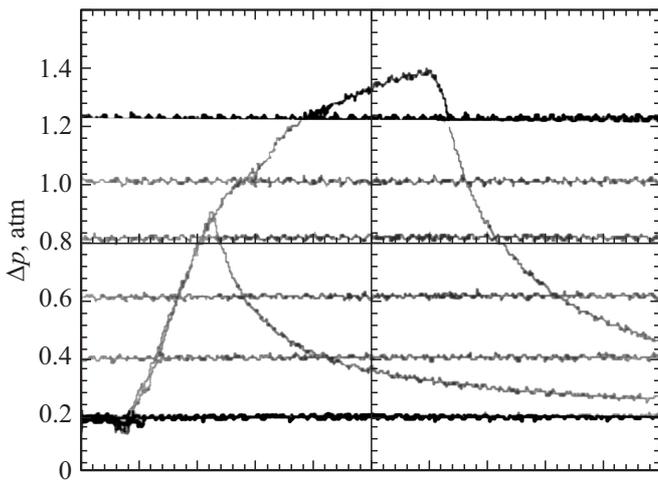


Рис. 3. Осциллограммы изменения давления воздуха в герметичном объеме, обусловленного горением СВЧ разряда.

затем значения  $p_{br}$  падают. По рис. 2 резонансную длину вибратора можно определить величиной  $2l_{res} = 60.5 \text{ mm}$ .

На заключительном этапе опытов измерялось временное изменение давления воздуха в герметичном объеме  $\Delta p(t)$ , обусловленное процессом горения разряда, инициированного вибратором резонансной длины. Характерные осциллограммы, иллюстрирующие результаты этих опытов, приведены на рис. 3. На нем горизонтальный масштаб равен  $0.1 \text{ s/div}$ , а вертикальный задан калибровочными опытами. В этих опытах, начиная от  $\Delta p = 0$  и с шагом  $0.2 \text{ atm}$ , устанавливались конкретные значения  $\Delta p$ , и включалась развертка луча осциллографа. Соответствующие „линии“ на рис. 3 и дают масштаб по вертикальной оси.

В контрольных опытах без СВЧ импульса включался вспомогательный разрядник. При его срабатывании чувствительность схемы измерения  $\Delta p$  не позволяла фиксировать изменения давления воздуха в герметичном вспомогательном объеме.

## Обсуждение результатов экспериментов

На рис. 3 приведены осциллограммы при  $\tau_{pul} = 0.15$  и  $0.6 \text{ s}$ . Из них следует, что с момента загорания разряда в течение  $\Delta t \approx 0.13 \text{ s}$  в герметичном объеме происходит линейный рост избыточного давления со скоростью  $\Delta p/\Delta t = 0.68 \text{ atm}/0.13 \text{ s} = 5.23 \text{ atm/s}$ . Учитывая, что  $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2 \equiv 10^5 \text{ J/m}^3$ , это значение  $\Delta p/\Delta t = 5.23 \cdot 10^5 \text{ J}/(\text{m}^3 \text{ s})$ . Величина герметичного объема  $V = 10^2 \text{ cm}^3$ , следовательно, темп выделения тепловой энергии в разрядной плазме  $P_{dis} = (\Delta p/\Delta t) V = 52.3 \text{ J/s}$ . Измеренная амплитуда электрической составляющей поля в исходном СВЧ пучке  $E_0 = 57.5 \text{ V/cm}$  по формуле (1) дает значение плотности потока ЭМ энергии  $\Pi = 4.4 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ . Следовательно, по (2) площадь  $S_{eff} = 12 \text{ cm}^2$ .

Осциллограмма, соответствующая  $\tau_{pul} = 0.6 \text{ s}$ , показывает, что в данной экспериментальной постановке при времени горения разряда, большем  $0.13 \text{ s}$ , темп выделения тепловой энергии в разрядной плазме начинает замедляться. Это связано с влиянием конвективных процессов, обусловленных нагревом воздуха в разрядной области. Контрольные эксперименты по зажиганию такого вида разряда в неподвижном воздухе без герметичного объема показали, что при увеличении времени горения разряда воздух, естественно, включая и его заряженные компоненты, из области разряда начинает „всплывать“. Это приводит к изменению схемы взаимодействия СВЧ излучения с ЭМ вибратором.

## Заключение

Таким образом, полученные экспериментальные результаты и их теоретическая обработка дали масштаб величины эффективной площади энергетического взаимодействия плазмы глубоко подкритического СВЧ разряда, возбужденного полем квазиоптического СВЧ пучка и инициированного расположенным сравнительно близко к экрану при  $h < \lambda/4$  и закрепленным на нем линейным ЭМ вибратором  $S_{eff} = 12 \text{ cm}^2$ . Описанные в работе [5] опыты с  $h = \lambda/4$  дали значение  $S_{eff} = 10 \text{ cm}^2$ . Естественно предположить, что в каждом конкретном случае в зависимости от величины  $h$  и конструктивного исполнения вибратора величина  $S_{eff}$  может меняться, но ее масштаб сохранится и будет существенно больше площади поперечного сечения разрядной области. Определенный масштаб размера  $S_{eff}$  открывает возможность оценки перспективности практического применения такого вида разряда. При этом более перспективным является зажигание его в газовых потоках [3,4], которые будут нейтрализовать нежелательные конвективные процессы и снимут ограничения на продолжительность горения разряда.

## Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389–391.
- [2] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Яковлев А.Ю. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 4. С. 28–33.
- [3] Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Vinogradov V.A., Van Wie David M. // Ieee Transaction on Plasma Science. 2006. Vol. 34. N 6. P. 2497–2506.
- [4] Bychkov D.V., Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Van Wie D.M. // 47<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Orlando, USA. 2009. AIAA P. 2009–1551.
- [5] Бычков Д.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 3. С. 39–45.
- [6] Богатов Н.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. Вып. 11. С. 1369–1375.
- [7] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 26–30.