

03;04

Электрический пробой газа в глубоко подкритическом поле СВЧ-пучка, инициированный закрепленным на экране электромагнитным вибратором

© К.В. Александров, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, Л.Г. Северинов

Московский радиотехнический институт РАН
E-mail: grachev@mrtiran.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2013 г.

Приведены результаты экспериментов по электрическому пробую воздуха в квазиоптическом СВЧ-пучке с глубоко подкритическим уровнем поля. Пробой инициировался закрепленным на экране линейным электромагнитным (ЭМ) вибратором или вибратором Г-образной формы. Подтверждено, что при расположении вибратора над экраном на расстояниях, меньших четверти длины волны ЭМ-поля, он позволяет осуществлять электрический пробой воздуха при высоких газовых давлениях и малом уровне поля. При этом использование Г-образного вибратора дает возможность пространственно задать область пробоя.

Опыты с газовыми электрическими разрядами, зажигаемыми в зоне Френеля СВЧ-пучка [1], показали, что плазма таких разрядов при высоких газовых давлениях p энергетически эффективно взаимодействует с возбуждающим разряд ЭМ-полем. Это стимулирует поиск путей практического применения СВЧ-разрядов этого типа и проведение их дальнейших физических исследований. Разряды данного типа могут быть реализованы и при амплитуде электрической составляющей исходного поля E_0 в ЭМ-пучке, меньшей минимального (критического) поля электрического пробоя газа E_{cr} при заданном p . Для этого необходимо каким-либо способом в требуемой области ЭМ-пучка инициировать электрический пробой газа. В работе [2] описан способ инициации пробоя с помощью помещенного в бегущую СВЧ-волну цилиндрического ЭМ-вибратора. Индуцированное поле на полюсных поверхностях такого вибратора E_{pol} может существенно превышать возбуждающее его поле E . Это дает возможность зажигать СВЧ-разряды

рассматриваемого типа в газах высокого p при малой мощности СВЧ-пучка P_{beam} и в непрерывном режиме горения. К примеру, при p в сотни Torr надкритические разряды с $E_0 > E_{cr}$ могут быть реализованы только в импульсном режиме при длительности СВЧ-импульсов τ_{pul} в десятки микросекунд [1].

При неизменной мощности P_{beam} возбуждающее ЭМ-вибратор поле E может быть увеличено в два раза по сравнению с E_0 , если в ЭМ-пучок перпендикулярно его вектору Пойнтинга Π поместить металлический экран, а вибратор расположить на расстоянии h от его плоскости, равном четверти длины волны ЭМ-поля λ , т.е. в пучности поля прямой и отраженной волн [3]. В то же время теория показала, а эксперименты подтвердили, что с уменьшением h относительно $\lambda/4$ индуцированное E_{pol} начинает дополнительно возрастать [4]. На практике это позволяет зажигать глубоко подкритические СВЧ-разряды при $E_0 \ll E_{cr}$, используя работающие в непрерывном режиме широкодоступные СВЧ-генераторы.

В настоящее время остаются нерешенными две задачи. В опытах с уменьшением h разряд начинает локализоваться между боковыми полюсными поверхностями вибратора и плоскостью экрана, и при существенном уменьшении h он неконтролируемо загорается лишь у одного конца вибратора. Должна быть решена и задача механического крепления вибратора над экраном. Их решению и были посвящены данные исследования.

Эксперименты проводились на описанной в работе [3] установке. В ней линейно поляризованный СВЧ-пучок с $\lambda = 12.24$ см и $\tau_{pul} = 0.2$ с излучался вертикально вниз в СВЧ-безэховую рабочую камеру. Давление воздуха p в ней можно было менять в диапазоне от 10 Torr до атмосферного значения. Калибровочные измерения, выполненные по описанной в работе [5] методике, дали в заданной области СВЧ-пучка значение $E_0 \approx 100$ В/см. В опытах в этой области перпендикулярно вектору Π ЭМ-волны помещался металлический лист-экран. Над ним симметрично оси пучка вдоль его вектора E_0 и располагался ЭМ-вибратор. В опытах варьировались его геометрия, размеры и расстояние до экрана. При этом все вибраторы выполнялись из алюминиевого прутка диаметром $2a = 2.25$ мм со сферически закругленными концами. Эксперименты начинались с вибратора наибольшей длины, затем она уменьшалась с шагом, примерно равным 1 мм. С каждым конкретным вибратором определялось максимальное давление воздуха в рабочей

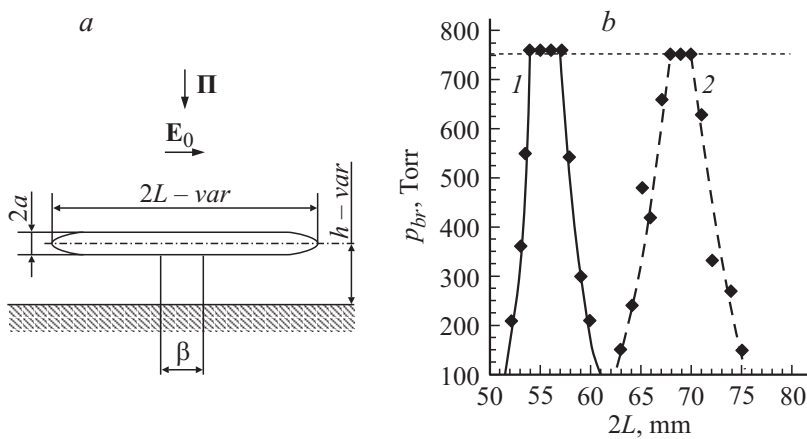


Рис. 1. Схема и результаты опытов с линейным ЭМ-вибратором.

камере $p = p_{br}$, при котором он еще инициировал электрический пробой.

В начальной серии, как иллюстрирует схема на рис. 1, *a*, вибратор был линейным. Он помещался на пенопластовой стойке, которая и задавала расстояние h от оси вибратора до плоскости экрана.

Опыты в такой постановке подтвердили результаты работы [4]. Так, при каждом размере h зависимости $p_{br}(2L)$ имели резонансный характер. С уменьшением h , по сравнению с $\lambda/4$, для вибраторов резонансной длины $2L = 2L_{res}$ значения $p_{br} = p_{br \max}$ росли. При $h > 7$ mm пробойные области локализовались у полюсов вибратора приблизительно симметрично относительно его оси. При $h < 7$ mm они локализовались между боковыми полюсными поверхностями вибратора и поверхностью экрана. При $h \lesssim 3$ mm разряд начинал случайным образом локализоваться лишь между одной полюсной поверхностью вибратора и экраном и, главное, при варьировании $2L$ значения p_{br} теряли „регулярный“ характер в последовательных опытах.

На рис. 1, *b* помещены полученные в такой опытной постановке при $h = 5$ mm величины p_{br} для конкретных значений $2L$ и линия 1, аппроксимирующая выявленную зависимость $p_{br}(2L)$. Из нее следует, что при экспериментальном значении E_0 в диапа-

зоне $\Delta 2L = 3 \text{ mm}$ вибратор инициирует пробой воздуха и при атмосферном p . При этом длину $2L_{res}$ можно оценить в 55.5 mm . Используя при обработке опытных данных известную аппроксимацию резонансных кривых в области максимума [6] $p_{br} = p_{br \max} / \sqrt{1 + Q^2(2L_{res}/2L - 2L/2L_{res})^2}$, получим электродинамическую добротность вибратора $Q \approx 30$ и $p_{br \max} \approx 1400 \text{ Torr} = 1.9 \text{ atm}$. Учитывая, что для воздуха $E_{cr} = 42 \text{ p V/cm}$ при размерности p — Torr, получим резонансное значение $E_{pot} \approx 60 \text{ kV/cm}$. Следовательно, данный вибратор способен инициировать пробой воздуха при подкритичности поля $\eta = E_e/E_{pot} \approx 1.7 \cdot 10^{-3}$.

Пунктирная линия 2 на рис. 1, *b* аппроксимирует результаты опытов также с линейным вибратором, но помещенным на задающей размер $h = 5 \text{ mm}$ гальванически закрепленной на экране металлической прямоугольной стойке. Ее поперечный оси вибратора размер равен $2a$, а продольный $\beta = 15 \text{ mm}$. В опытах при варьировании $2L$ „плечи“ вибратора выдерживались равными. Линия 2 демонстрирует, что в этом случае резонансная кривая зависимости $p_{br}(2L)$ смещается в сторону больших значений $2L$ примерно на размер β . Ее добротность Q падает. В результате размер $\Delta 2L$ уменьшился до 2 mm . Кроме того, даже при $h = 5 \text{ mm}$ результаты измерений значений p_{br} при варьировании $2L$ носят ярко выраженный нерегулярный характер.

Следующая экспериментальная серия выполнялась по показанной на рис. 2, *a* схеме. Она проводилась при размере $h = 5 \text{ mm}$ с вибратором Г-образной формы. Его один конец длиной 4 mm загнут под прямым углом в сторону экрана.

Опыты показали, что при инициации пробоя размещенным на пенопластовой подставке вибратором такой формы пробой происходил в зазоре δ между закругленной поверхностью загнутого конца вибратора и экраном. При этом зависимость $p_{br}(2L)$ практически повторила приведенную на рис. 1, *b* линию 1, если под размером $2L$ понимать полную длину осевой линии Г-образного вибратора, включая и загнутую его часть. Сохранение размера $\Delta 2L = 3 \text{ mm}$, вероятно, может быть объяснено тем, что, несмотря на уменьшение размера пробиваемого зазора δ приблизительно до 1 mm , сокращается на 4 mm и размер вибратора вдоль вектора E_0 .

И наконец, на рис. 2, *b* помещена аппроксимирующая опытные данные, полученные при $h = 5 \text{ mm}$, зависимость $p_{br}(2L)$ для Г-образного вибратора, расположенного на металлической стойке с $\beta = 15 \text{ mm}$. На

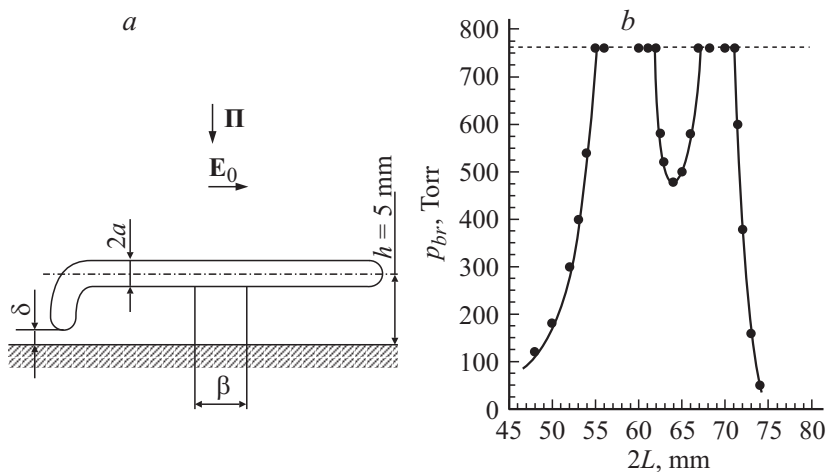


Рис. 2. Схема и результаты опытов с Г-образным ЭМ-вибратором.

графике по-прежнему размер $2L$ — полная длина вибратора. В опытах при варьировании размера $2L$ вибратор укорачивался с его прямолинейного конца. В них выдерживались равными размеры параллельных экрану плеч вибратора. Из приведенной зависимости видно, что она имеет два резонансных максимума.

В опытах с уменьшением $2L$ первоначально фиксировался пробой между концевой поверхностью параллельного экрану плеча вибратора и плоскостью экрана. Пробой в этой области фиксировался и при атмосферном давлении воздуха в диапазоне $\Delta 2L_1 = 4$ mm. Среднее значение $2L$ этого диапазона можно принять за первую резонансную длину вибратора $2L_{res 1} = 69$ mm. Затем значения p_{br} начинали уменьшаться.

В области минимума зависимости $p_{br}(2L)$ между двумя максимумами в опытах пробой воздуха начинал дополнительно фиксироваться и в зазоре δ . При дальнейшем уменьшении размера $2L$ пробой локализовался уже только в этом зазоре. В диапазоне $\Delta 2L_2 = 7$ mm(!) он происходил и при атмосферном p . Резонансную длину вибратора для этого максимума можно оценить величиной $2L_{res 2} = 58.5$ mm. Затем p_{br} начинало уменьшаться, а пробой продолжал локализоваться в зазоре δ .

Выполненные по помещенному на рис. 2, *b* графику оценки дают для $2L_{res 1}$ значение $p_{br \max 1} \approx 1100 \text{ Torr} = 1.5 \text{ atm}$, а для $2L_{res 2}$ — $p_{br \max 2} \approx 1900 \text{ Torr} = 2.5 \text{ atm}$. Следовательно, такой гальванически закрепленный на экране Г-образный вибратор позволяет инициировать пробой газов при подкритичности поля $\eta \approx 1.2 \cdot 10^{-3}$.

Таким образом, в работе предложены форма ЭМ-вибратора и способ его крепления к экрану, которые дают возможность инициировать электрический пробой газов при существенной подкритичности исходного поля. При этом, варьируя размеры вибратора, можно задавать положение области пробоя, а следовательно, области горения СВЧ-разряда. Полученные результаты могут быть применены, например, в схемах генерации СВЧ-плазмы в высокоскоростных потоках воздуха и горючих газовых смесей [7] с использованием широкодоступных маломощных СВЧ-генераторов. Приведенные данные могут явиться опорными при численных решениях электродинамических задач определения индуцированных полей в конкретных практических схемах.

Список литературы

- [1] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 11. С. 52–60.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 7. С. 60–67.
- [3] Александров К.В., Волков А.А., Грачев Л.П., Есаков И.И., Северинов Л.Г. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 3. С. 35–39.
- [4] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Раваев А.А., Северинов Л.Г. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 11. С. 1–7.
- [5] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 12. С. 26–30.
- [6] Молчанов А.П., Занадворов П.Н. Курс электротехники и радиотехники. М.: Наука, 1969. 679 с.
- [7] Esakov I., Grachev L., Khodataev K., Vinogradov V., Van Wie D. // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, Jan. 4–7. 2010. P. AIAA-2010-1197.