

## Инициация электрического пробоя газа в поле бегущей вдоль металлической поверхности сверхвысокочастотной волны

© Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.Г. Северинов

Акционерное общество „Московский радиотехнический институт РАН“,  
117519 Москва, Россия  
e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 25 декабря 2017 г.)

Описаны результаты экспериментов по электрическому пробую воздуха в линейно-поляризованной бегущей сверхвысокочастотной (СВЧ) волне с глубоко подкритическим уровнем поля. Пробой инициирован линейным электромагнитным вибратором или их системой. Вибраторы расположены над металлической поверхностью, лежащей в плоскости, содержащей волновой вектор СВЧ волны и ее электрическую составляющую. При этом оси вибраторов параллельны этой составляющей поля, и их расстояние до металлической плоскости меньше четверти длины волны поля. В опытах с единичным вибратором это расстояние варьирует. При экспериментах с системой вибраторов они расположены последовательно друг за другом вдоль волнового вектора поля.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46166.2613

### Введение

Используемый термин сверхвысокочастотная (СВЧ) волна в общем случае подразумевает электромагнитные (ЭМ) волны в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 10 м до 0.1 мм, чему соответствуют частоты колебаний  $f$  от 30 МГц до  $3 \cdot 10^3$  GHz [1]. В настоящей работе, являющейся логическим продолжением исследований, представленных в работе [2], имеется в виду преимущественно диапазон дециметровых и сантиметровых  $\lambda$ . В этом диапазоне в ближней зоне излучающей системы на практике может быть реализован квазиоптический линейно поляризованный СВЧ пучок с ТЕМ структурой поля. Термин квазиоптический подразумевает, что в поперечном волновому вектору  $\mathbf{k}$  направлении пучок имеет размеры, не превышающие единиц  $\lambda$ .

В некоторых практических схемах желательно осуществить электрический разряд в газе, по которому распространяется СВЧ волна. В этом случае амплитуда ее электрической составляющей  $E_0$  должна быть больше пробойного уровня  $E_{br}$ , который в свою очередь, как правило, больше некоего критического уровня  $E_{cr}$ . Поле  $E_{cr}$  является минимальным пробойным полем в случае его пространственной однородности и непрерывности. При СВЧ пробое воздуха атмосферного состава и сравнительно высоких газовых давлениях  $p$  поле  $E_{cr}$  оценивается по формуле  $E_{cr} = 42p$  В/см, где, как и в последующих аналогичных зависимостях, размерность  $p$  — Торг. Эта формула справедлива в рассматриваемом в настоящей статье диапазоне значений  $\lambda$  при  $p$ , больших десятков–сотни Торг. При этих  $p$  в образующейся в процессе пробоя воздуха разрядной плазме круговая частота поля  $\omega = 2\pi f$  намного меньше частоты столкновений плазменных электронов с молекулами воздуха  $\nu_c = 4 \cdot 10^9 p$  с<sup>-1</sup>, т.е. нарабатываемая плазма является столкновительной [2].

При указанных  $\lambda$  и  $p$  с помощью доступных СВЧ генераторов практически не удается реализовать в бегущей СВЧ волне условие  $E_0 > E_{br}$ , и электрический разряд в газе необходимо инициировать. В литературе рассмотрены несколько способов инициации [3–5]. Одним из них, например, является вспомогательная реализация в СВЧ пучке импульсного лазерного пробоя газа [4,5].

В работе [6] рассмотрен способ инициации СВЧ пробоя газа путем помещения в ЭМ пучок с глубоко подкритическим уровнем поля ( $E_0 \ll E_{cr}$ ) параллельно его вектору  $\mathbf{E}_0$  линейного ЭМ вибратора. Он представляет собой металлический пруток диаметром  $2a \ll (\lambda/4)$ . Длина прутка  $2L$  близка к резонансной длине  $2L_{res} \approx (\lambda/2)$ , а концы, например, сферически закруглены.

При помещении такого вибратора в пучок бегущей СВЧ волны поле на его полюсах  $E_{pol}$  существенно превышает поле  $E_0$ . В практических схемах при мощности СВЧ пучка  $P_{beam}$  порядка 1 kW этого может оказаться недостаточно для инициации пробоя газа при высоких давлениях  $p$  порядка или больше атмосферного. В этом случае перпендикулярно вектору  $\mathbf{k}$  бегущей ЭМ волны может быть помещен плоский металлический лист. При этом амплитуда поля в ближайшей к его поверхности пучности удвоится. Следовательно, при помещении в нее инициирующего вибратора, т.е. на расстоянии от экрана  $h = \lambda/4$ , его способность к инициированию пробоя, по крайней мере, удвоится.

В работе [7] приведены экспериментально подтвержденные теоретические соображения по существенному росту отношения  $E_{pol}/E_0$  при приближении ЭМ вибратора к экрану, т.е. при  $h < \lambda/4$ . В этой работе описаны результаты опытов, в которых это условие выполняется. В них осуществлен пробой воздуха при атмосферном  $p$  в ЭМ пучке с  $\lambda = 12.3$  см при  $P_{beam} \approx 1$  kW и исходной амплитуде поля  $E_0 \approx 50$  В/см. В то же время из приве-

денной выше формулы следует, что при атмосферном  $p \approx 760$  Torr поле  $E_{cr} \approx 30$  kV/cm. В этой же работе приводятся данные по зажиганию в таком ЭМ пучке при атмосферном  $p$  семи глубоко подкритических СВЧ разрядов. Они инициированы линейной системой параллельных  $E_0$  ЭМ вибраторов, расположенных над экраном при  $h = 5$  mm.

В настоящей работе описываются эксперименты по инициации пробоя воздуха в бегущей СВЧ волне с глубоко подкритическим уровнем поля с помощью ЭМ вибраторов, помещаемых над металлической плоскостью, не перпендикулярной волновому вектору ЭМ пучка  $\mathbf{k}$ , а идущей вдоль него и параллельной вектору электрической составляющей поля  $E_0$ .

### Экспериментальные условия

В экспериментах СВЧ магнетрон мощностью  $P_{gen} = 1$  kW на частоте  $f = 2.44$  GHz ( $\lambda = 12.3$  cm) в одиночных импульсах длительностью  $\tau_{pul} = 0.4$  s возбуждает  $TE_{10}$ -волну в прямоугольном волноводе сечением  $45 \times 90$  mm. К выходу волновода герметично пристыкован прямоугольный излучающий рупор с входным сечением  $45 \times 90$  mm, выходным —  $90 \times 90$  mm и длиной 150 mm. СВЧ волна излучается в рабочую камеру. В предположении, что в выходном сечении рупора сохраняется  $TE_{10}$  распределение поля, амплитуда его электрической составляющей в центральной области рупора

$$E_0 = (2/D)\sqrt{P_{gen}Z_0} = 136 \text{ V/cm},$$

где  $D = 9$  cm — размер раскрытия рупора и  $Z_0 = 120\pi \Omega$  — волновое сопротивление вакуума. Давление воздуха  $p$  в рабочей камере может устанавливаться в диапазоне от атмосферного значения до  $p = 10$  Torr и измеряться с точностью  $\pm 1.5$  Torr.

Взаимное расположение помещаемых в излучаемый ЭМ пучок элементов в процессе выполнения экспериментов ясно из приведенной на рис. 1 фотографии. На ней сверху расположен выходной участок рупора. Размер его нижней горизонтальной грани  $D = 90$  mm может служить масштабом изображений. Волновой вектор излучаемой рупором СВЧ волны  $\mathbf{k}$  направлен вертикально вниз. Вектор ее электрической составляющей  $E_0$  горизонтален и лежит в плоскости изображения. К дальней на фотографии выходной грани рупора, вдоль которой поле  $E_0 = 0$ , пристыкован вертикальный металлический лист шириной 120 mm. Снизу этот лист имеет горизонтальную полку, на которую помещен СВЧ поглотитель с конусообразными выступами. Наличие поглотителя обеспечивает режим бегущей волны в излучаемом рупором ЭМ пучке.

На поверхность вертикального листа симметрично относительно оси СВЧ пучка прикреплен пенопластовый радиопрозрачный брусок. Его длина 80 mm, высота над плоскостью листа 32 mm и ширина 20 mm. В бруске параллельно поверхности листа имеются две системы

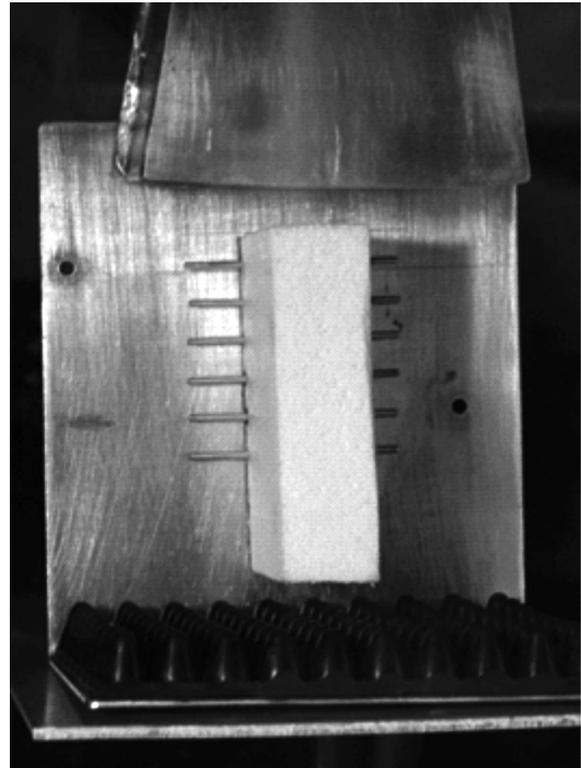


Рис. 1. Взаимное расположение элементов в экспериментальной схеме.

отверстий диаметром 2.1 mm. Первая система, вертикальная относительно плоскости листа, состоит из пяти отверстий, расстояние от которых до выходного сечения рупора равно 30 mm, а расстояния до плоскости листа  $h = 2.5, 8, 14.5, 20.5$  и 25.5 mm. Вторая система, горизонтальная относительно плоскости листа и вертикальная на фотографии, содержит семь отверстий с одинаковым расстоянием от плоскости листа  $h = 2.5$  mm. Расстояние между ними  $\Delta = 10$  mm. Верхнее отверстие этой системы является нижним для вертикальной системы отверстий.

В эти отверстия могут быть помещены выполненные из алюминиевых прутков диаметром  $2a = 2$  mm со сферически закругленными концами ЭМ вибраторы. На приведенной на рис. 1 фотографии это проиллюстрировано вертикальной системой из шести вибраторов.

Для начала развития процесса разряда у концов вибраторов в областях с  $E > E_{br}$  необходимо наличие начальных электронов. Для этого в описываемых экспериментах в качестве вспомогательного источника ультрафиолетового (УФ) излучения использовался синхронизованный с передним фронтом СВЧ импульса высоковольтный разряд длительностью в несколько микросекунд. Этот разряд длиной в несколько миллиметров зажегся между внутренней жилой высоковольтного кабеля и поверхностью листа. Кабель пропускался в видимое на рис. 1 с правой стороны от вибраторов отверстие.

## Результаты экспериментов

Первоначально эксперименты выполнялись с одним вибратором. В них была определена его длина  $2L$ , обеспечивающая инициацию пробоя воздуха при максимальном давлении воздуха  $p_{br}$ . Вибратор имел начальную длину  $2L = 60$  мм. Она лишь на 1.5 мм меньше размера  $\lambda/2$ . Этот вибратор был помещен в верхнее отверстие в пенопластовом бруске, соответствующее  $h = 2.5$  мм. В этом случае при постепенной с шагом 15 Torr откачке рабочей камеры вибратор начал инициировать СВЧ пробой воздуха при давлении  $p_{br} \approx 50$  Torr. При этом, как и в последующих опытах, разрядная область реализовывалась только у обращенного к УФ источнику конца вибратора. Затем длина вибратора с шагом, не превышающим 0.5 мм, последовательно уменьшалась. При этом давление  $p_{br}$  увеличивалось, и при  $2L = 57$  мм вибратор инициировал СВЧ пробой заполняющего рабочую камеру воздуха уже при атмосферном его давлении. Затем длина вибратора дополнительно уменьшилась на 0.4 мм. Такой вибратор также обеспечивал инициацию пробоя воздуха атмосферного  $p$ .

В опытах этот же вибратор был помещен и в нижнее отверстие бруска при  $h = 2.5$  мм. При таком расположении в СВЧ пучке он также продолжал инициировать пробой воздуха атмосферного  $p$ . Во всех последующих экспериментах использовались именно такие инициаторы с  $2L = 56.6 \pm 0.1$  мм.

В следующей экспериментальной серии вибратор последовательно помещался в вертикальную серию отверстий с различными  $h$ , и при каждом этом размере определялась величина  $p_{br}$ . Полученные экспериментальные результаты приведены на рис. 2.

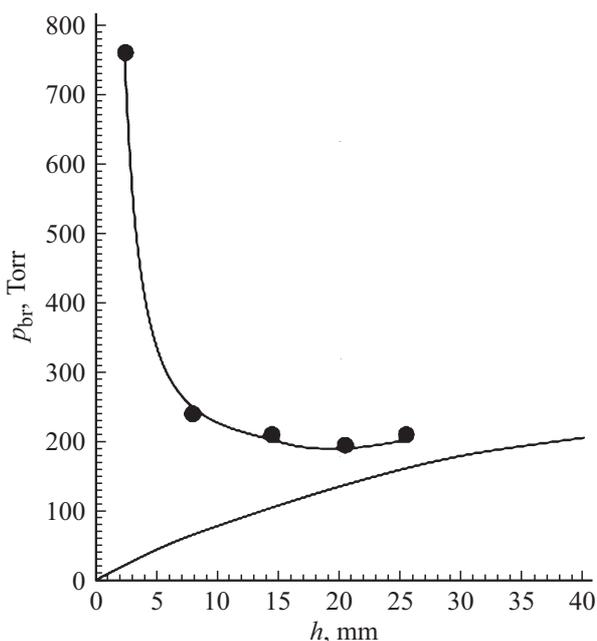


Рис. 2. Результаты экспериментов.

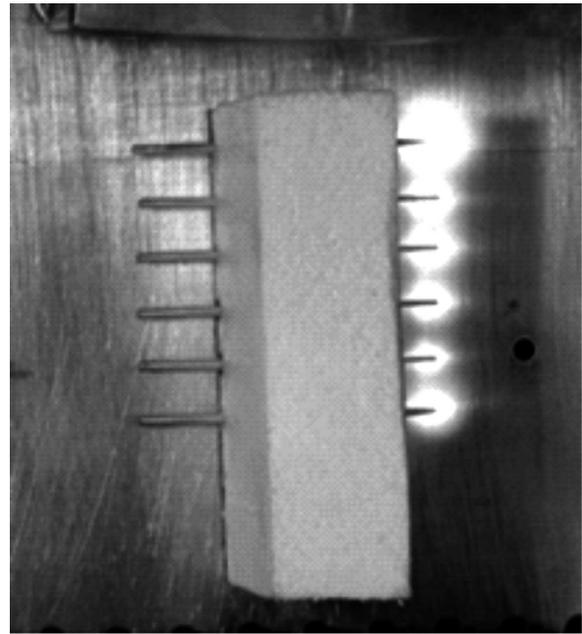


Рис. 3. Внешний вид иницированных ЭМ вибраторами газовых разрядов в СВЧ пучке с глубоко подкритическим уровнем поля.

На рис. 2 экспериментальные значения  $p_{br}$  при различных  $h$  соединены аппроксимирующей кривой. На нем дополнительной линией показана условная гармоническая зависимость величины поля СВЧ пучка от расстояния до плоскости листа. Как и следует, возбуждающее вибраторы поле  $E_0$  равно нулю на проводящей поверхности листа и максимально в центральной осевой области пучка при  $h \approx (D/2) = 45$  мм. И тем не менее в опытах с уменьшением размера  $h$  давление  $p_{br}$  растет. Этот экспериментальный результат практически повторяет результаты опытов при расположении вибратора над проводящей плоскостью, перпендикулярной вектору  $\mathbf{k}$  ЭМ пучка [7].

Физическое объяснение этого феномена в обоих случаях одно и то же. Основные активные потери возбуждающей вибратор ЭМ энергии при отсутствии иницированного им СВЧ разряда — это потери на ее переизлучение. Количественно они характеризуются величиной сопротивления излучения  $R_{\Sigma}$ . При расположении вибратора резонансной длины в поле бегущей СВЧ волны величина  $R_{\Sigma} = 73 \Omega$  [8]. Она на порядки превышает активное сопротивление материала вибратора  $R_{\sigma}$  и задает сравнительно малую величину его электрической добротности  $Q$ . Последняя и определяет величину отношения  $E_{pol}/E_0$ . Из развитой в работе [7] теории следует, что при уменьшении размера  $h$  величина  $R_{\Sigma}$  уменьшается, и добротность  $Q$  эквивалентной электрической схемы вибратора как колебательного контура лавинообразно растет. В результате это и компенсирует падение величины поля  $E_0$ .

В заключительной экспериментальной серии исследовалась возможность реализации системы СВЧ разрядов в поле бегущей ЭМ волны. Из предварительных соображений ясно, что взаимное электродинамическое влияние вибраторов будет минимальным при их близком расположении к проводящей плоскости, т.е. малом  $h$ . Именно из этих соображений вертикальная система отверстий в диэлектрическом бруске и была выполнена при  $h = 2.5 \text{ mm}$ . В опытах последовательно увеличивалось количество вибраторов, начиная с помещения первого вибратора в ближайшее к излучающему рупору отверстие. Затем количество вибраторов  $N$  последовательно увеличивалось, и определялась возможность одновременной инициации ими СВЧ пробоя воздуха при атмосферном  $p$ . В опытах в каждом СВЧ импульсе разряд зажигался только до  $N = 6$ . При наличии седьмого вибратора все верхние вибраторы иницировали пробой воздуха, а нижний — нет. На рис. 3 приведена фотография горящей линейки из шести разрядов.

В данных опытах, как и во всех предыдущих, первоначально использовалась вспомогательная УФ подсветка вибраторов. Контрольные эксперименты показали, что при наличии системы вибраторов, начиная с  $N = 5$ , УФ подсветка уже не требовалась. Рис. 3 и соответствует горению разрядов без предварительной УФ подсветки.

Следующая из фотографии различная интенсивность горения разрядов связана, в первую очередь, с их расстоянием до излучающего раскрытия рупора. На ее величину может сказываться и продольная неоднородность величины поля вдоль СВЧ пучка. Она может быть как начальной, так и обусловленной факторами, связанными со взаимным электродинамическим влиянием вибраторов.

## Заключение

Таким образом, эксперименты показали, что иницированный линейным ЭМ вибратором глубоко подкритический СВЧ разряд может быть зажжен в квазиоптическом СВЧ пучке при помещении вибратора над проводящей плоскостью, параллельной волновому вектору ЭМ пучка. При этом, как и при помещении вибратора над плоскостью, перпендикулярной волновому вектору, расстояние его до проводящей плоскости должно быть существенно меньше четверти длины волны СВЧ поля. В обеих этих схемах в СВЧ пучке возможна реализация системы из нескольких разрядов.

Полученные результаты открывают возможности для применения такого вида СВЧ разряда в практических схемах при использовании широко распространенных СВЧ генераторов с малым уровнем выходной мощности масштаба сотен  $W$ . При этом встанет требующий предварительной проработки вопрос крепления вибраторов к поверхности экрана. Почти очевидно, что при увеличении расстояния между вибраторами в их линейной системе может возрасти и количество одновременно

зажигаемых разрядов. С точки зрения применения такого вида разряда, например в работе [9], описаны результаты экспериментов, демонстрирующие принципиальную возможность поджига им пропан-воздушной горючей смеси в ее высокоскоростном потоке. Система разрядов в поле бегущей СВЧ волны может осуществить практически мгновенный мультиочаговый поджиг такой смеси, например, в трубчатой камере сгорания.

## Список литературы

- [1] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. 439 с.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Александров К.В., Раваев А.А., Северинов Л.Г., Ходатаев К.В. Газовый электрический разряд в квазиоптическом СВЧ пучке. М.: АО МРТИ РАН, 2015. 187 с.
- [3] Богатов Н.А., Быков Ю.В., Венедиктов Н.П. и др. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 6. С. 725.
- [4] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А. и др. // Труды ФИАН. 1985. Т. 160. С. 174.
- [5] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.
- [7] Грачев Л.П., Есаков И.И., Лавров П.Б., Раваев А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С.73–78.
- [8] Дракшин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
- [9] 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.