

## Электрический разряд в воздухе в глубоко подкритическом поле квазиоптического СВЧ-пучка

© К.В. Александров, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, А.А. Раваев, Л.Г. Северинов, А.Ю. Яковлев

ОАО «Московский радиотехнический институт РАН»,  
117519 Москва, Россия  
e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 5 июня 2015 г.)

Описаны результаты экспериментов по зажиганию укрепленным над экраном электромагнитным вибратором электрического разряда в воздухе в квазиоптическом СВЧ-пучке. Используемый способ инициации электрического пробоя позволил реализовывать разряд при уровне электрической составляющей поля в СВЧ-волне, в сотни раз меньшем минимального критического поля безэлектродного пробоя воздуха. При этом в опытах в зависимости от уровня поля было определено граничное давление воздуха, отделяющее низкотемпературные и высокотемпературные виды СВЧ-разряда.

### Введение

В восьмидесятые годы двадцатого века началось изучение свободно локализованного безэлектродного электрического разряда в воздухе в квазиоптическом электромагнитном (ЭМ) пучке СВЧ-диапазона длин волн [1–4].

В описанных в работе [1] опытах такой разряд зажигался в линейно поляризованном СВЧ-пучке с длиной волны  $\lambda \approx 10$  см, в одиночных импульсах длительностью  $\tau_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$  и при мощности пучка  $P_{\text{beam}} \approx 10^6$  Вт. При этом разрядная область была существенно удалена как от формирующих ЭМ-пучок антенных элементов, так и от окружающих ее элементов конструкции. Опыты показали, что по мере роста давления воздуха  $p$  вид разряда и его свойства существенно меняются. Так, при значениях  $p$ , меньших граничного давления  $p_{\text{thres}} \approx 30$  Торр, разряд является диффузным и низкотемпературным. При  $p > p_{\text{thres}}$  по мере роста давления сначала отдельные плазменные участки разряда становятся высокотемпературными, а затем разрядная область принимает вид объемно-развитой структуры высокотемпературных плазменных каналов-шнуров. Последнее позволяет рассматривать различные варианты практического применения СВЧ-разряда такого вида. Однако используемый в описанных в [1] опытах мощный мегаваттный СВЧ-пучок позволял зажигать разряд только до  $p = 150$  Торр. В них предельно сфокусированный пучок имел в разрядной области максимальную амплитуду электрической составляющей ЭМ-волны  $E_0 = 6.5$  кВ/см. Для пробоя же воздуха требуется минимальное, критическое поле пробоя [5]

$$E_{\text{cr}} = 42p\sqrt{1 + (\omega/v_c)^2} \text{ [V/cm]}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — круговая частота СВЧ-поля, а

$$v_c = 4 \cdot 10^9 p \text{ [1/s]} \quad (2)$$

— частота столкновений рождающихся плазменных электронов с молекулами воздуха. В (1) и (2), как

и во всех дальнейших оценочных формулах,  $p$  имеет размерность Торр. Положив  $E_{\text{cr}} = E_0 = 6.5 \cdot 10^3$  В/см, и получим  $p = 155$  Торр.

Изучение на этой же установке динамики развития шнурового вида разряда [6] показало, что он зарождается в виде вытянутого вдоль вектора  $E_0$  цилиндрического плазменного образования с длиной, несколько меньшей  $\lambda/2$ . Это дало основание авторам работы [7] поместить в разрядную область СВЧ-пучка вдоль вектора  $E_0$  металлический линейный ЭМ-вибратор, что обеспечило пробой воздуха уже до атмосферного давления  $p \approx 760$  Торр, т.е. при подкритичности поля  $\psi = E_{\text{cr}}/E_0 \approx 4.6$ . При этом разряд сохранил высокотемпературную объемно-развитую шнуровую структуру, характерную для свободно локализованного неиницированного разряда, зажигаемого при  $p > p_{\text{thres}}$ .

В опытах на данной установке была возможность уменьшать мощность СВЧ-пучка  $P_{\text{beam}}$ . При этом при наличии в разрядной области ЭМ-инициатора и уменьшении уровня поля  $E_0$  было зафиксировано граничное значение поля  $E_{\text{thres}}$ , ниже которого разрядные каналы уже теряли способность формировать объемно-развитую структуру. В течение всего  $\tau_{\text{pul}}$  они находились только в малых областях, примыкающих к концам-полюсам инициирующего пробоя воздуха ЭМ-вибратора, контактируя с его поверхностью. Изучение этого вида разряда показало, что эффективная площадь его энергетического взаимодействия с возбуждающим разряд полем существенно превышает площадь поперечного сечения приполярных областей инициатора, занятых разрядными каналами. В результате воздух в них имеет высокую газовую температуру  $T$ .

Высокая газовая  $T$  в разрядных каналах подкритического СВЧ-разряда с объемно-развитой шнуровой структурой при  $E_0 < E_{\text{cr}}$  и в привязанных к концам ЭМ-инициатора каналах глубоко подкритического СВЧ-разряда при  $E_0 \ll E_{\text{cr}}$  была оценена экспериментально. В описанных в работе [8] опытах область СВЧ-разряда продувалась пропан-воздушной горючей смесью, тем-

пература поджига которой равна примерно  $10^3 \text{ }^\circ\text{C}$  [9]. В опытах разрядная плазма поджигала эту смесь.

Описанные экспериментальные результаты показали, что для зажигания глубоко подкритических разрядов может быть существенно снижена мощность ЭМ-пучка  $P_{\text{beam}}$ , а следовательно, аппаратно реализован и непрерывный режим их горения. В работе [10] описаны эксперименты по изучению такого разряда при  $P_{\text{beam}} \approx 1 \text{ kW}$ , исходном поле в разрядной области  $E_0 \approx 100 \text{ V/cm}$  и  $\tau_{\text{pul}} = 0.3 \text{ s}$ . В этих опытах инициирующий пробой воздуха параллельно вектору  $E_0$  ЭМ-вibrator первоначально располагался в поле бегущей ЭМ-волны, а затем над помещенным перпендикулярно вектору Пойнтинга  $\Pi$  ЭМ-волны металлическим экраном в ближайшей к нему пучности поля, т.е. на расстоянии от плоскости экрана  $h = \lambda/4$ . При этом численное моделирование такой ситуации показало, что поле на полюсах цилиндрического вибратора со сферически закругленными концами  $E_{\text{pol}}$  при приближении его к экрану, т.е. при размерах  $h < \lambda/4$ , начинает существенно возрастать, несмотря на то что возбуждающее его поле уменьшается. Этот вывод был подтвержден и экспериментально. В описанных в этой работе опытах ЭМ-излучение распространялось сверху вниз, а размер  $h$  задавался расположенной на горизонтальном экране прямоугольной пенопластовой стойкой. На нее параллельно  $E_0$  и помещался ЭМ-вibrator. В работе [11] на этой же установке эти выводы были подтверждены и при механо-гальваническом закреплении вибратора на экране. При этом задающая размер  $h$  перпендикулярная вибратору крепящая металлическая стойка располагалась посередине вибратора. В опытах использование резонансных свойств ЭМ-вibrаторов позволяло зажигать разряды при подкритичности исходного поля, достигающей нескольких сотен.

Целью описываемых в настоящей работе опытов было определение возможности в такой экспериментальной постановке реализации инициированного СВЧ-разряда в квазиоптическом СВЧ-пучке при существенно меньшем уровне его мощности  $P_{\text{beam}}$ , а следовательно, и поля  $E_0$ . Кроме того, в опытах в возможном диапазоне варьирования  $E_0$  определялись граничные давления  $p_{\text{thres}}$ , разделяющие низкотемпературные и высокотемпературные виды разряда.

### 1. Экспериментальная установка

Эксперименты выполнялись на описанной в работе [10] установке. Схема ее основных элементов приведена на рис. 1.

В установке генерируемая магнетроном ЭМ-волна с  $\lambda = 12.3 \text{ cm}$ , мощностью  $P = 1.6 \text{ kW}$  и длительностью  $\tau_{\text{pul}} = 0.2 \text{ s}$  распространяется по прямоугольному волноводу с внутренним сечением  $m \times n = 9 \times 4.5 \text{ cm}$ . Волноводный тракт оканчивается рупорной антенной в форме обелиска длиной  $15 \text{ cm}$ . Ее излучающий раскрыв имеет размер  $9 \times 9 \text{ cm}$ . Для распространяющейся по тракту

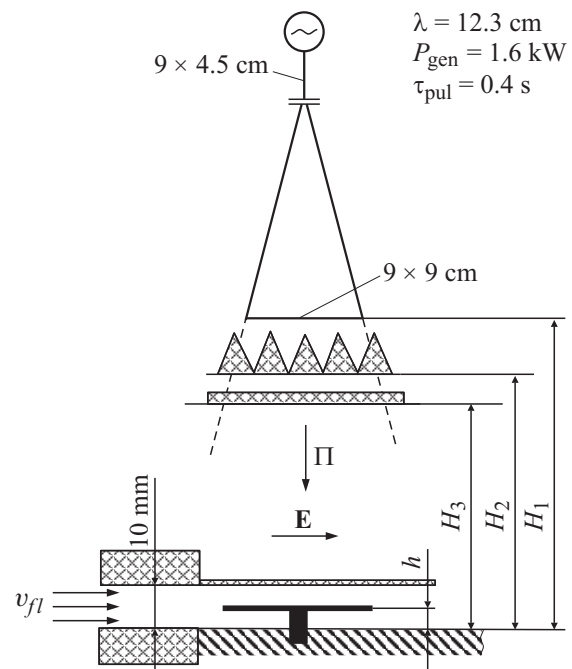


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ТЕ<sub>10</sub>-волны максимальная амплитуда ее электрической составляющей на входе рупора

$$E_{\text{max in}} = 2\sqrt{(PZ_0)/[mn\sqrt{1 - [\lambda/(2m)]^2}] \approx 290 \text{ V/cm}$$

и в излучающем раскрыве рупора при  $m = n - E_{\text{max out}} \approx 200 \text{ V/cm}$ . Линейно поляризованный ЭМ-пучок, сформированный этой антенной, излучается вертикально вниз в центральную область герметичной „СВЧ-безэховой“ рабочей камеры.

Давление воздуха в камере  $p_c$  может устанавливаться в диапазоне от атмосферного  $p_c \approx 760 \text{ Torr}$  до  $p_c = 3 \text{ Torr}$  и измеряться с точностью  $\pm 1.5 \text{ Torr}$ . Давление воздуха в излучающем ЭМ-волну рупоре отслеживает давление в камере, а в пристыкованном к его входу волноводе остается атмосферным. Конструктивно это обеспечивается поперечной сечению волновода герметизирующей радиопрозрачной стеклотекстолитовой перегородкой толщиной  $1.5 \text{ mm}$ . В опытах при уменьшении давления в камере при  $p_c \lesssim 10 \text{ Torr}$  по поверхности этой перегородки со стороны камеры загорался СВЧ-разряд. Это не противоречит выполненной по формулам (1) и (2) для поля  $E_{\text{cr}}$  при  $E_{\text{cr}} = E_{\text{max in}} = 290 \text{ V/cm}$  оценке  $p_{\text{cr}} \approx 7 \text{ Torr}$ . В связи с этим описываемые ниже эксперименты при  $p_c < 10 \text{ Torr}$  не проводились.

В рабочей камере на расстоянии  $H_1 = 95 \text{ mm}$  от раскрыва рупора симметрично оси ЭМ-пучка и перпендикулярно его вектору  $\Pi$  располагается алюминиевая пластина-экран с размерами  $15 \times 15 \text{ cm}$ . На ней симметрично оси пучка и вдоль его вектора  $E$  может располагаться ЭМ-вibrator. На расстоянии  $H_2 = 43 \text{ mm}$

от плоскости экрана укреплена радиопрозрачная стеклотекстолитовая пластина толщиной 1.5 mm. На ней, как показано на рис. 1, может помещаться керамический поглотитель. На расстоянии  $H_3 = 34$  mm от плоскости экрана укреплена дополнительная радиопрозрачная стеклотекстолитовая пластина толщиной 1.5 mm. На ней может помещаться дополнительный СВЧ-поглощающий лист толщиной 5 mm. В опытах вдоль поверхности экрана может реализоваться поток воздуха или его горючей смеси с пропаном  $C_3H_8$ . Скорость потока  $v_{fl}$  имеет масштаб нескольких м/с. Выходное сечение формирующего поток сопла имеет вертикальный размер, равный 10 mm. Этот размер над поверхностью экрана в области СВЧ-пучка задает лист из оргстекла толщиной 1 mm.

Для реализации электрического пробоя газа, кроме того, что в заданной области должен быть обеспечен требуемый уровень поля  $E > E_{br}$ , в ней необходимо и наличие некоторого числа начальных „свободных“ электронов. Лавинно-временной рост их числа, собственно, и определяет явление газового электрического пробоя. В рассматриваемом случае инициации ЭМ-вибратором пробоя воздуха в ЭМ-пучке с глубоко подкритическим уровнем исходного поля  $E_0 \ll E_{cr}$  условие  $E > E_{br}$  соблюдается лишь в весьма малых областях вблизи полюсных концевых поверхностей вибратора. При длительностях СВЧ-импульсов в десятые доли секунды фоновых электронов в этих областях, как правило, нет. В связи с этим в экспериментах в течение  $\tau_{прл}$  на расстоянии 10 cm от оси ЭМ-пучка на плоскости экрана в двухмиллиметровом зазоре реализуется вспомогательный электрический разряд. Он является источником ультрафиолетового (УФ) излучения, которое, облучая поверхность ЭМ-вибратора, за счет фотоэффекта обеспечивает наличие около нее начальных электронов.

## 2. Измерение величины поля в ЭМ-пучке

В опытах первоначально была измерена амплитуда электрической составляющей СВЧ-поля  $E_0$  на расстоянии от поверхности экрана  $h = \lambda/4 = 31$  mm, т.е. в ближайшей к ней пучности поля. Измерения проводились без поглотителей, только с керамическим поглотителем и с двумя поглотителями.

В этих измерениях без перегородки из оргстекла на поверхность экрана по оси ЭМ-пучка устанавливалась пенопластовая стойка, и на нее вдоль вектора  $E_0$  помещался ЭМ-вибратор.

Первоначально в опытах без СВЧ-поглотителей на стойку помещался алюминиевый ЭМ-вибратор со сферически закругленными концами с  $2a = 5.6$  mm и  $2L = 22.4$  mm, т.е. при отношении  $\vartheta = 2L/2a = 4$ . В соответствии с работой [12] этому значению  $\vartheta$  соответствует отношение  $\chi = E_{pol}/E_0 = 10$ , где  $E_{pol}$  — величина поля на вершинах вибратора. Этот вибратор при вклю-

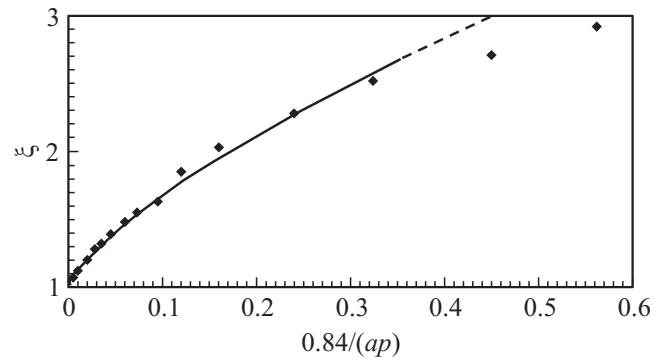


Рис. 2. Зависимость уровня превышения поля  $E_{pol}$  над  $E_{cr}$  при заданном давлении воздуха  $p$  от радиуса закругления конца вибратора  $a$ .

чения СВЧ-импульсов и по мере уменьшения давления  $p_c$  инициировал пробой воздуха при максимальном граничном значении  $p_c = p_{br} = 15$  Torr. Величины  $\chi$  и  $p_{br}$  позволяют рассчитать поле  $E_0$ :

$$E_0 = \frac{42 p_{br}}{chi} \xi; \text{ V/cm.} \quad (3)$$

В этой формуле коэффициент  $\xi$  учитывает влияние диффузионного ухода электронов из пробойной области с  $E > E_{cr}$  на поверхность инициатора и за границу области с  $E = E_{cr}$ . На рис. 2 приведен заимствованный из работы [13] график зависимости коэффициента  $\xi$  от радиуса сферического закругления торцевого конца вибратора  $a$  и определенного в эксперименте давления  $p_{br}$ . При расчете значения абсциссы в приведенной на рис. 2 формуле величину  $a$  надо подставлять в см, а  $p$  — в Torr. По графику в рассматриваемом случае при  $a = 0.28$  cm и  $p_{br} = 15$  Torr коэффициент  $\xi = 2.2$ . В результате формула (3) дает  $E_0 = 140$  V/cm.

Очевидно, что при помещении в ЭМ-пучок поглотителей давление  $p_{br}$  будет падать. В то же время, как указывалось, на используемой установке проводить эксперименты можно было только при  $p \geq 10$  Torr. Учитывая это, в следующих измерениях первоначальный вибратор с  $\vartheta = 4$  заменялся вибратором с  $2a = 1.8$  mm и  $2L = 51.5$  mm, т.е. с  $\vartheta \approx 28.6$ . Он инициировал пробой воздуха уже при граничном  $p_{br0} = 630$  Torr.

При помещении керамического поглотителя данный вибратор инициировал пробой уже при  $p_{br1} = 30$  Torr, а при наличии обоих поглотителей —  $p_{br2} = 20$  Torr. Эти значения  $p_{br}$  позволяют рассчитать соответствующие им уровни поля в пучности ЭМ-пучка. Так при помещении в ЭМ-пучок только керамического поглотителя поле  $E_{01} = E_0(p_{br1}/p_{br0}) \cdot (\xi_1/\xi_0) = 14$  V/cm, где коэффициенты  $\xi_0 = 1.1$  и  $\xi_1 = 2.3$  определены по приведенному на рис. 2 графику. Соответственно при наличии в ЭМ-пучке обоих поглотителей  $E_{02} = E_0(p_{br2}/p_{br0})(\xi_2/\xi_0) = 11$  V/cm при  $\xi_0 = 1.1$  и  $\xi_2 = 2.7$ . Величина  $(E_{02}/E_0)^2 = 6.2 \cdot 10^{-3}$  показывает, что помещение в ЭМ-пучок обоих поглотителей снижает его мощность до 10 W.

### 3. Результаты основных экспериментов

Основные эксперименты с ЭМ-вибратором — инициатором СВЧ-пробоя воздуха в глубоко подкритическом поле проводились при размере  $h = 5 \text{ mm}$ . При этом вибратор представлял собой алюминиевый прутко со сферически закругленными концами диаметром  $2a = 1.8 \text{ mm}$ . В опытах его длина  $2L$  последовательно уменьшалась от максимального значения  $2L_{\text{max}} \approx 65 \text{ mm}$  с шагом, не превышающим  $0.5 \text{ mm}$ , и при каждом размере  $2L$  определялось максимальное давление  $p_c = p_{\text{br}}$ , при котором вибратор инициировал СВЧ-пробой воздуха. Размер  $h$  задавался или установленной на экран пенопластовой прямоугольной пластиной с размером вдоль вибратора, равным  $20 \text{ mm}$ , на которую вибратор и помещался, или, как показано на рис. 1, перпендикулярной вибратору алюминиевой пластиной с размером вдоль вибратора  $\delta = 10 \text{ mm}$  и толщиной  $1.5 \text{ mm}$ . Она припаивалась к вибратору в его центральной области. При этом „плечи“ вибратора выдерживались равными с точностью  $0.1\text{--}0.2 \text{ mm}$ . Экран по оси ЭМ-пучка имеет отверстие с размерами  $10 \times 1.5 \text{ mm}$ . В него плотно вставлялась припаянная к вибратору пластина. При этом при каждой установке вибратора с точностью до  $0.1 \text{ mm}$  выдерживалось расстояние от концевой поверхности плеч вибратора до поверхности экрана.

На рис. 3 кривые 1 и 2 показывают экспериментальные зависимости  $p_{\text{br}}(2L)$  при помещении вибратора на пенопластовую опору. При этом кривая 1 снята в ЭМ-пучке без поглотителей, а кривая 2 — при помещении в него обоих поглотителей.

Кривая 1 показывает, что при поле  $E_0 = 140 \text{ V/cm}$  используемый ЭМ-вибратор в диапазоне его длины  $2L = 56.5\text{--}55 \text{ mm}$  инициирует пробой воздуха и при атмосферном давлении. Она позволяет оценить добротность  $Q$  ЭМ-вибратора как эквивалентного колебательного контура, используя известную аппроксимацию резонансной кривой в районе ее максимума [10]:

$$\frac{p_{\text{br}}}{p_{\text{br max}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(\Delta 2L_{\text{res}})^2}}. \quad (4)$$

В этом выражении  $\Delta$  — полная ширина резонансной кривой при конкретном значении  $p_{\text{br}}$ . Приняв по кривой 1 при  $p_{\text{br}} = 760 \text{ Torr}$  размер  $\Delta = 1.5 \text{ mm}$ , при  $p_{\text{br}} = 500 \text{ Torr}$  —  $\Delta \approx 2.6 \text{ mm}$  и  $2L_{\text{res}} = 55.75 \text{ mm}$ , по (4) получим  $Q \approx 50$ .

При таком значении  $Q$  формула (4) констатирует, что при отклонении длины вибратора от  $2L_{\text{res}}$  всего на  $\Delta/2 \approx 0.15 \text{ mm}$  величина  $p_{\text{br}}$  уменьшится по отношению к  $p_{\text{br max}}$  уже на  $10\%$ . В связи с этим в экспериментах по „снятию“ кривой 2 при уровне поля  $E_{02} = 11 \text{ V/cm}$  размер  $2L$  в районе резонансной длины вибратора уменьшался с шагом, не превышающим  $0.2 \text{ mm}$ . Из кривой 2 следует, что этот вибратор при сохранении резонансной длины  $2L_{\text{res}} \approx 55.75 \text{ mm}$  инициирует пробой воздуха

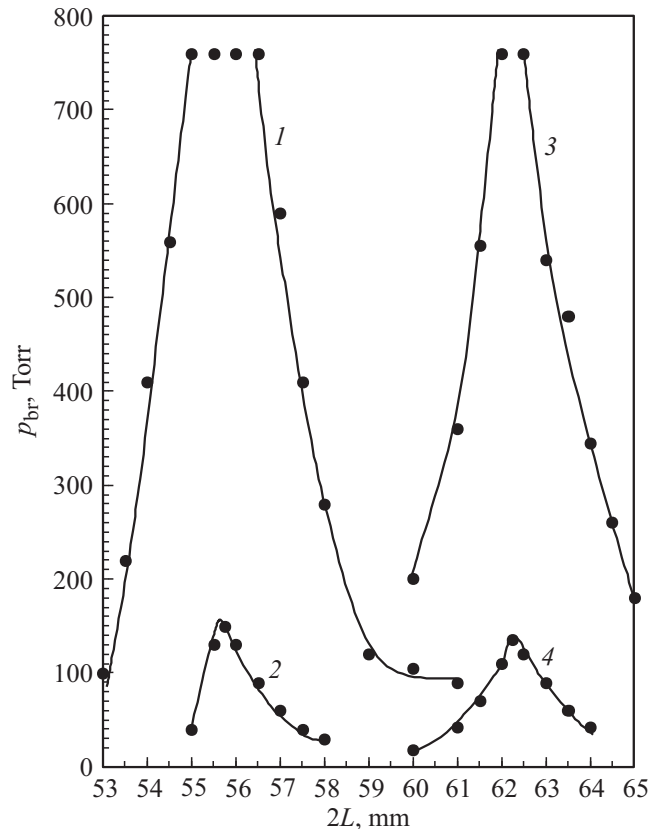


Рис. 3. Зависимость пробойного давления воздуха от длины инициирующего пробой ЭМ-вибратора.

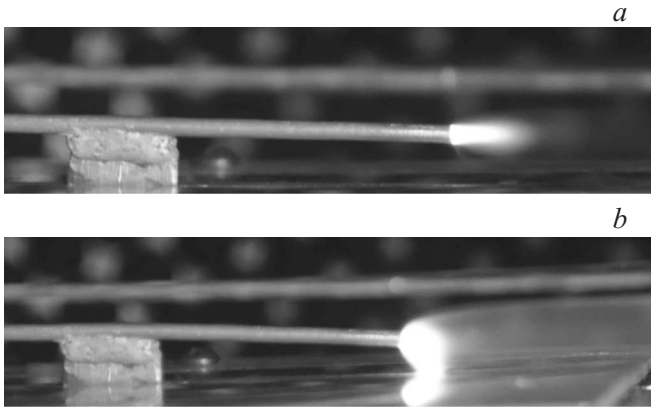
при  $p_{\text{br max}} \approx 150 \text{ Torr}$ . Следовательно, индуцированное поле на полюсах такого вибратора  $E_{\text{pol}} \approx E_{\text{cr}}(p_{\text{br max}})$  не менее чем в  $5.7 \cdot 10^2$  раз превышает поле  $E_{02}$ . Эта кривая уточняет и величину его добротности —  $Q = 2L_{\text{res}}/\Delta \approx 70$ , где  $\Delta \approx 0.8 \text{ mm}$  — полная ширина резонансной кривой по уровню  $p_{\text{br}} = p_{\text{br max}}/\sqrt{2}$ .

Кривые 3 и 4 на рис. 3 показывают экспериментальные зависимости  $p_{\text{br}}(2L)$  для вибратора, закрепленного над экраном. При этом кривая 3 снята в ЭМ-пучке без поглотителей, а кривая 4 — при помещении в него обоих поглотителей. Из них следует, что резонансная длина такого вибратора  $2L_{\text{res}} = 62.25 \text{ mm}$  сместилась по оси  $2L$  в большую сторону на размер  $6.5 \text{ mm}$ , что несколько меньше ширины крепящей вибратор стойки  $\delta = 10 \text{ mm}$ .

Кривая 3 показывает, что при поле  $E_0 = 140 \text{ V/cm}$  закрепленный на экране вибратор инициирует пробой воздуха при атмосферном давлении в диапазоне  $2L = 62.5\text{--}62 \text{ mm}$ . Оцененная по ней с использованием формулы (4) его добротность  $Q \approx 50$ .

Это значение  $Q$  также вынуждало при „снятии“ кривой 4 в районе  $2L_{\text{res}}$  варьировать размер  $2L$  с шагом, не превышающим  $0.2 \text{ mm}$ . Из кривой 4 следует, что такой вибратор при резонансной длине и уровне поля  $E_{02} = 11 \text{ V/cm}$  инициирует пробой воздуха при  $p_{\text{br max}} = 135 \text{ Torr}$ . Этому давлению соответствует





**Рис. 4.** Внешний вид инициированного ЭМ-вибратором электрического разряда в СВЧ-пучке с глубоко подкритическим уровнем поля в потоке воздуха (а) и в потоке горючей смеси воздуха с пропаном (b).

$E_{cr} = 5.67 \cdot 10^3 \text{ V/cm}$ , что примерно в  $5.1 \cdot 10^2$  раза превышает поле  $E_{02}$ . Оцененная по кривой 4 добротность такого вида инициатора  $Q \approx 60$ .

Сравнение параметров кривой 1 с кривой 3 и кривых 2 и 4 ставит конкретный вопрос. Почему при практически равных значениях  $Q$  и совпадающих величинах возбуждающих вибраторы исходных полей значение  $p_{br \max}$  у кривой 4 меньше, чем значение  $p_{br \max}$  у кривой 2. Очевидно, что и у кривой 3 оно будет меньше, чем у кривой 1. Можно предположить, что ответ на этот вопрос заключается в следующем.

Для незакрепленного вибратора как колебательного контура включенное в контур эквивалентное возбуждающее его напряжение  $U = Eh_{ac}$ , где  $E$  — величина возбуждающего вибратор исходного поля, а действующая длина вибратора  $h_{ac} \approx 2L/2$  [10]. Закрепленный же на экране вибратор представляет собой два индуктивно связанных несимметричных Г-образных антенно-вибратора. Для каждого из них величина поля  $E$  сохраняется, а  $h_{ac}$  уменьшается. Аналитический расчет такой системы достаточно сложен. Современные численные методы позволяют его выполнить, и в этом случае представленные на рис. 3 данные могут явиться опорными.

В опытах закрепленный вибратор обдувался газовым потоком. На рис. 4, а приведена фотография инициированного СВЧ-разряда, обдуваемого потоком воздуха, а на рис. 4, б — потоком смеси воздуха с пропаном примерно в стехиометрическом соотношении [9]. На них направление потока — слева направо. С левой стороны изображений находится вертикальная крепящая вибратор стойка с  $\delta = 10 \text{ mm}$ , а за ней — дальше по потоку плечо вибратора. Общая длина вибратора  $2L = 2L_{res} = 62.25 \text{ mm}$ , а его диаметр  $2a = 1.8 \text{ mm}$ . Фотографии выполнены при давлении воздуха в камере  $p_c = 135 \text{ Torr}$  и скорости потока  $v_{fl} = 1.5 \text{ m/s}$ . В обоих случаях область разряда находилась около кормового конца вибратора.

Из рис. 4, а следует, что разрядная область вытянута вдоль потока воздуха, а рис. 4, б констатирует, что разряд поджигает поток горючей смеси. На этой фотографии угол верхнего конуса распространения пламени дает при известном  $v_{fl}$  и размере от оси вибратора до пластины, ограничивающей сверху область потока, равном  $5 \text{ mm}$ , дает оценку для скорости распространения пламени, лежащей в диапазоне  $v_{\text{flame}} = 0.5 - 1 \text{ m/s}$ . Это значение соответствует справочным данным для пропан-воздушной смеси, а факт ее поджигает констатирует, что температура отдельных участков разряда больше температуры поджига этой смеси, примерно равной  $1000^\circ\text{C}$  [9].

В следующей опытной серии закрепленный вибратор резонансной длины продолжал обдуваться пропан-воздушной смесью с неизменной  $v_{fl}$ , но газовое давление в рабочей камере  $p_c$  постепенно уменьшалось. Эксперименты проводились при всех возможных опытных величинах полей в СВЧ-пучке. Они показали, что при каждом из них есть минимальное пороговое давление  $p_{\text{thres}}$ , ниже которого продолжающий гореть инициированный глубоко подкритический СВЧ-разряд перестает поджигать горючую смесь, т.е. разрядная плазма становится низкотемпературной. С уменьшением поля фиксируемое граничное  $p_{\text{thres}}$  смещается в большую сторону. Так, при  $E_0 = 140 \text{ V/cm}$  давление  $p_{\text{thres}} = 50 \text{ Torr}$ , при  $E_{01} = 14 \text{ V/cm}$  —  $p_{\text{thres}} = 80 \text{ Torr}$  и при  $E_{02} = 11 \text{ V/cm}$  —  $p_{\text{thres}} = 90 \text{ Torr}$ .

## Заключение

Таким образом, выполненные эксперименты продемонстрировали возможный способ зажигания газового электрического разряда в квазиоптическом СВЧ-пучке с глубоко подкритическим уровнем поля. При этом мощность СВЧ-пучка может быть порядка  $1 \text{ W}$ . Для формирования пучка с такой  $P_{\text{beam}}$  необязательно применение магнетронных и клистронных СВЧ-генераторов, а возможно использование так называемых твердотельных генераторов. Исследованная схема зажигания СВЧ-разряда может быть применена для поджига потоков горючих смесей в реальных установках. При этом в описанных опытах выявлены граничные уровни газового давления  $p_{\text{thres}}$  в зависимости от уровней возбуждающих инициатор полей  $E_0$ , меньше которых разрядная СВЧ-плазма становится низкотемпературной и в этих целях не может быть использована. В то же время глубоко подкритические разряды, зажженные в СВЧ-пучке при  $p < p_{\text{thres}}$ , могут быть использованы, например, в плазмохимических реакторах.

В заключение на рис. 5 в координатах  $E_0 - p$  приведены определенные в экспериментах области реализации различных видов электрического разряда в воздухе в квазиоптическом СВЧ-пучке.

На рис. 5 области I и II — это области надкритических СВЧ-разрядов соответственно диффузного и объемно-развитого стримерно-шнурового видов. Область III —

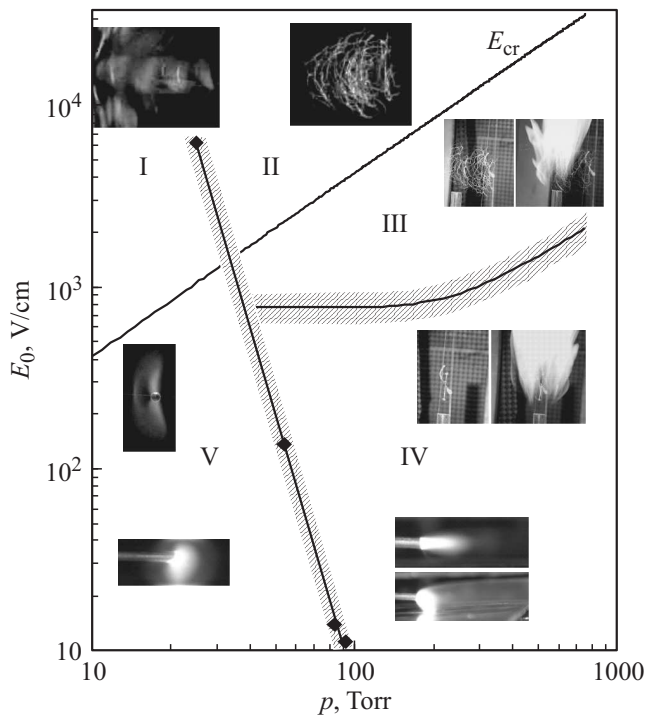


Рис. 5. Виды электрического разряда в воздухе в поле квазиоптического СВЧ-пучка.

область подкритических инициированных СВЧ-разрядов с объемно-развитой стримерно-шнуровой структурой. Область IV — область глубоко подкритических высокотемпературных привязанных к инициатору СВЧ-разрядов. При этом на ней верхние фотографии демонстрируют разряд, инициированный свободно подвешенным в СВЧ-пучок ЭМ-инициатором, а нижние — обдуваемый газовой струей разряд, инициированный закрепленным над экраном ЭМ-вибратором. В областях III и IV приведены фотографии разрядов в чистом воздухе и в потоке его горючей смеси с пропаном. При этом фотографии в областях I–III и верхняя серия фотографий в области IV заимствованы из работ [7,8]. И наконец, область V — это область низкотемпературных подкритических СВЧ-разрядов диффузного вида. Отметим также, что разряды в областях I, II и III могут быть реализованы только в импульсных режимах при  $\tau_{\text{pul}}$  порядка нескольких десятков  $\mu\text{s}$  и мощности пучка  $P_{\text{beam}} \approx 10^5 - 10^6 \text{ W}$ . Разряды в областях IV и V при уровне поля  $E_0$  порядка  $100 \text{ V/cm}$  на практике можно реализовать и в непрерывном режиме горения при  $P_{\text{beam}} \approx 10^3 \text{ W}$ . И наконец, разряды в этих областях при  $E_0$  в десятки  $\text{V/cm}$  также могут быть реализованы в непрерывном режиме горения и при  $P_{\text{beam}}$  порядка  $10 \text{ W}$ .

Рис. 5 соответствует  $\lambda \approx 10 \text{ cm}$ . При других значениях  $\lambda$  виды разрядов сохраняются, но зависимости  $p_{\text{thres}}(E_0)$  и  $E_{\text{thres}}(p)$ , разделяющие  $E_0-p$  области их реализации, смещаются. Так, при меньших  $\lambda$  зависимость  $p_{\text{thres}}(E_0)$  смещается в сторону больших  $p$ , а зависимость  $E_{\text{thres}}(p)$  — в сторону больших  $E_0$  [7].

## 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] Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР, 1986. 184 с.
- [3] Сборник научных трудов „Высокочастотный разряд в волновых полях“. Горький: Институт прикладной физики АН СССР, 1988. 298 с.
- [4] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 202 с.
- [5] Гуревич А.В. // УФН. 1980. Т. 132. Вып. 4. С. 685–690.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 32–45.
- [7] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 52–60.
- [8] Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V., Van Wie D.M. // Proc. of the 32<sup>nd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and the 4<sup>th</sup> Weakly Ionized Gases Workshop Anaheim, CA, USA, 2001. AIAA-2001-2939.
- [9] Сэйитиро Кумагаи. Горение. М.: Химия, 1979. 256 с.
- [10] Грачев Л.П., Есаков И.И., Лавров П.Б., Раваев А.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 73–78.
- [11] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Северинов Л.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 6. С. 89–94.
- [12] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 26–30.
- [13] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.