

04;09;12

Порог кумулятивного резонансного стримерного СВЧ разряда в газах высокого давления

© В.С. Барашенков,¹ Л.П. Грачев,² И.И. Есаков,² Б.Ф. Костенко,¹ К.В. Ходатаев,² М.З. Юрьев¹Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Московская область, Россия²Московский радиотехнический институт РАН,
113519 Москва, Россия
E-mail: esakov@dataforce.net

(Поступило в Редакцию 2 декабря 1999 г.)

Экспериментально исследовано изменение структуры СВЧ стримера (возникновение в стримерном канале ярко светящегося ядра) в зависимости от давления газа. Показано, что это явление имеет пороговый характер: при зажигании разряда в поле стоячей электромагнитной волны открытого двухзеркального резонатора в воздухе оно реализуется при давлении $p_0 \geq 540 \pm 50$ Торр, а в водороде — при $p_0 \geq 740 \pm 70$ Торр. Приведены оценки, показывающие, что изменение структуры стримера может быть обусловлено возникновением локального СВЧ пинч-эффекта.

Введение

Безэлектродный разряд в газах высокого давления p_0 при естественном уровне начальной ионизации в линейно поляризованном электромагнитном (ЭМ) поле СВЧ диапазона с *ТЕМ*-структурой зарождается на единичном фоновом электроде и быстро развивается вдоль вектора электрической компоненты ЭМ поля E_0 в обе стороны от точки зарождения в виде тонкого плазменного канала-стримера. Когда его длина $2L$ приближается к резонансной длине, эффективная площадь поглощенная разрядным каналом ЭМ энергии начинает на порядки превосходить фиксируемую в оптическом диапазоне его площадь, перпендикулярную направлению распространения ЭМ волны, и электрический ток в канале стримера резко возрастает. При сравнительно низких давлениях газа это воспринимается как световая вспышка стримера практически по всей его длине, что говорит о примерно равномерном распределении по ней поглощенной стримером ЭМ энергии. С ростом же давления поведение стримера меняется: в его центральной области образуется ярко светящееся ядро, где и кумулируется большая часть поглощенной им ЭМ энергии [1,2].

На рис. 1 показаны диапазоны давлений, в которых наблюдаются эти формы резонансного стримерного СВЧ разряда при круговой частоте поля $\omega \cong 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-1}$ в воздухе и водороде [1,2]. На нем на шкалах давлений заштрихованы диапазоны реализации разряда в поле бегущей волны при неизменной амплитуде $E_0 = 6.5 \text{ кВ/см}$ [2]. Разряд в воздухе при $p_0 = 760$ Торр получен в поле стоячей волны открытого двухзеркального резонатора при $E_0 = 30 \text{ кВ/см}$ [1]. Стрелками отмечены значения давлений, при которых в опытах зафиксирован разряд с ядром, т. е. в кумулятивно форме.

Из приведенных на рис. 1 данных видно, что изменение структуры разряда в воздухе при $130 < p_0 < 760$ Торр экспериментально не прослежено. Осталось неясным,

какой характер имеет его переход к кумулятивной форме — эволюционный или пороговый. Эволюционный характер такого перехода подразумевает, что ЭМ энергия, которая при низких давлениях относительно равномерно распределяется по длине стримера, по мере роста давления постепенно выделяется все в более ограниченном его участке, постепенно стягиваясь в "точку". При пороговом характере явления ядро в стримерном канале образуется лишь при определенном сочетании опытных условий и прежде всего амплитуды поля E_0 и давления газа p_0 . Как следует из рис. 1, именно так изменяет свою структуру разряд в водороде: в водородном стримере при фиксированной $E_0 = 6.5 \text{ кВ/см}$ кумуляция ЭМ энергии в ядре происходит лишь при $p_0 \geq 250$ Торр.

В [2] высказано предположение, что характерное для кумулятивной формы разряда яркое ядро является следствием локального СВЧ пинч-эффекта, т. е. сжатия плазменного канала в области максимума СВЧ тока под действием магнитного поля этого же тока. Пинч-эффект в безэлектродном СВЧ разряде — это, безусловно, новое физическое явление, представляющее интерес для дальнейших исследований.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов с СВЧ стримерным разрядом в воздухе и водороде в фокусе высокочастотного двухзеркального открытого резонатора при плавном изменении исходного давления p_0 этих газов.

Известно [3], что пинч-эффект реализуется при превышении магнитного давления p_m на поверхности токового канала, пропорционального квадрату отношения тока I_0 в канале к его диаметру $2a$, над газокинетическим давлением p в канале. В экспериментах с открытым резонатором независимо от сорта газа при увеличении p_0 ток I_0 в центральной области стримера будет возрастать (он пропорционален величине исходного поля E_0 , которое не может быть меньше пробойного поля E_{br} , растущего с увеличением p_0). Диаметр же стримера $2a$ с ростом p_0

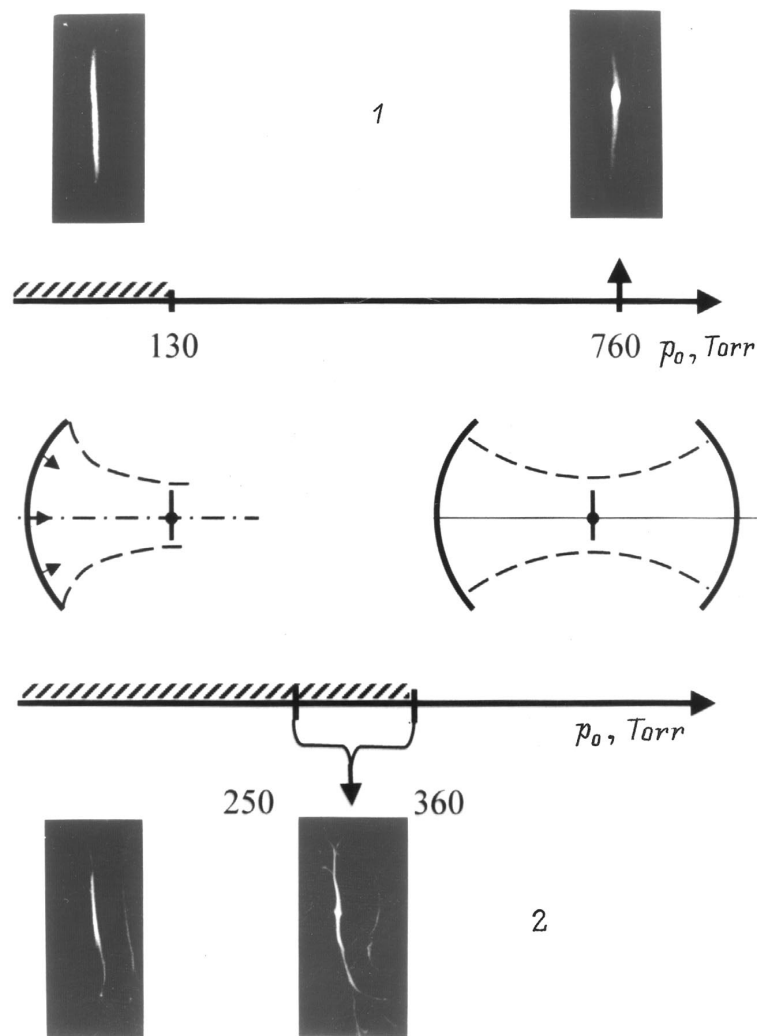


Рис. 1. Диапазоны реализации различных форм стримерного безэлектродного СВЧ разряда в зависимости от давлений воздуха и водорода по данным работ [1,2]. 1 — воздух, 2 — водород.

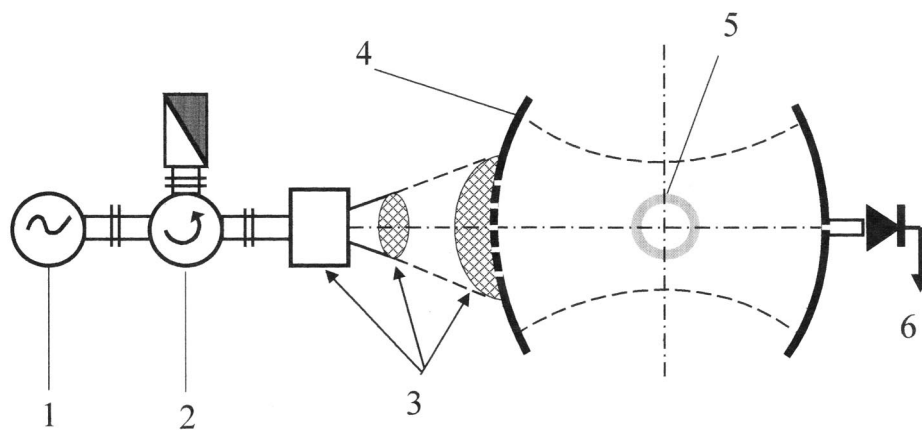


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по исследованию стримерного СВЧ разряда в открытом двухзеркальном резонаторе: 1 — СВЧ генератор, 2 — циркулятор, 3 — согласующее устройство, 4 — открытый двухзеркальный резонатор со сферическими зеркалами, 5 — кювета для исследуемых газов, 6 — к осциллографу.

может лишь уменьшаться. И наконец, газокINETическое давление p в канале стримера при быстром нарастании тока в нем к моменту образования "перетяжки" может лишь незначительно превысить исходное p_0 . Отсюда следует, что при реализации стримерного разряда в открытом резонаторе с увеличением p_0 условия для возникновения СВЧ пинч-эффекта становятся более благоприятными и, следовательно, возможно существование такого порогового давления $p_{0\text{обн}}$, выше которого стример должен иметь кумулятивную форму. Определение этих пороговых значений $p_{0\text{обн}}$ для воздуха и водорода и было целью описываемых ниже опытов.

Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Установка включает в себя СВЧ генератор, обеспечивающий в одиночных импульсах выходную мощность в несколько мегаватт при циклической частоте ЭМ поля $\omega \cong 2 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}$ и длительности импульса с прямоугольной огибающей $t_{\text{pul}} = 40 \mu\text{s}$. Энергия ЭМ поля с выхода генератора через соответствующие согласующие устройства запитывает высокочастотный двухзеркальный открытый резонатор, образованный двумя соосными сферическими вогнутыми зеркалами с радиусом кривизны 35 см и диаметром 55 см. Через одно из зеркал, укрепленное неподвижно, осуществляется связь резонатора с генератором с коэффициентом связи по мощности $\alpha_{\text{св}} \cong 10^{-3}$.

В резонаторе симметрично относительно его центра и перпендикулярно его оси расположена радиопрозрачная кювета — кварцевая труба длиной 50 см, внутренним диаметром 8 см и толщиной стенки 0.5 см. По торцам она герметизирована плоскими стеклами толщиной 2 см. Кювета предварительно откачивается до $p < 1 \text{ Torr}$, а затем заполняется исследуемым газом до требуемого p_0 (в экспериментах давление в кювете варьировалось от 300 Torr, при котором разряды уже имеют ярко выраженный стримерный характер [1], до максимального давления, пробой которого еще может обеспечить установка). Остальной объем резонатора заполнен воздухом при атмосферном давлении.

Резонатор вместе с помещенной в него кюветой настраивается в резонанс плавным механическим осевым перемещением одного из его зеркал и кюветы. В центре подвижного зеркала имеется небольшое отверстие, через которое контрольный сигнал из резонатора через линейный амплитудный детектор поступает на вход осциллографа. Резонансная настройка производится по максимуму этого сигнала. Измерительный тракт откалиброван и величине контрольного сигнала на экране осциллографа может быть поставлено в соответствие определенное значение амплитуды поля E_0 в центре кюветы.

Сквозь торцевые стекла кюветы разряд может быть сфотографирован (со временем экспозиции, бóльшим времени свечения разряда).

Результаты экспериментов

Изменение расстояния $2H$ между зеркалами вдоль оси резонатора от 45 до 61 см показало, что при фокусировке поля в его центре (и, следовательно, в центре кюветы) наибольшая величина E_0 достигается с $2H = 50.4 \text{ cm}$. При этом вдоль оси резонатора поле имеет вид стоячей линейно поляризованной TEM -волны с максимумом в его центре и расстоянием между узлами $\lambda_{\text{res}}/2 = 4.7 \text{ cm}$. Причем вектор E_0 перпендикулярен оси резонатора, а в направлениях, ей перпендикулярных, поле азимутально-симметрично и имеет примерно гауссово распределение с характерным размером спадающего его в e раз $F = 6 \text{ cm}$.

С момента начала СВЧ импульса полная закачка ЭМ энергии W_{res} в резонатор происходит с характерным временем в несколько микросекунд. В течение этого времени поле в центре кюветы дорастает до максимального значения $E_{0\text{max}} = 30 \text{ kV/cm}$. В экспериментах это поле обеспечивает пробой воздуха при максимальном давлении $p_{0\text{max}} = 1 \text{ atm}$, а водорода — при $p_{0\text{max}} = 2.1 \text{ atm}$.

Если кювета заполнена газом до $p_0 < p_{0\text{max}}$, то E_0 не дорастает до своего максимального значения: при E_0 , превышающем пробойное поле $E_{\text{бр}}$, газ в кювете пробивается и начинается процесс формирования СВЧ стримера именно в этом поле. Когда стример начинает "заметно" энергетически взаимодействовать с ЭМ полем, согласование резонатора с СВЧ генератором нарушается и, как фиксирует осциллограмма контрольного сигнала, поступление энергии в резонатор прекращается.

Наблюдения разрядов при разных p_0 подтвердили, что они имеют вид плазменных каналов-стримеров, вытянутых вдоль вектора E_0 . Независимо от формы разряда видимый в оптическом диапазоне диаметр плазменного канала $2a \cong 0.07 \text{ cm}$, а длина $2L = 2.5 \pm 0.3 \text{ cm}$. Эти значения примерно одинаковы для водорода и воздуха и слабо зависят от p_0 .

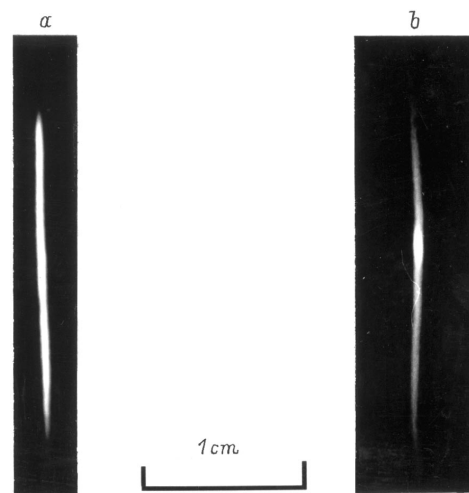


Рис. 3. Безэлектродный СВЧ разряд в воздухе. p_0 , Torr: a — 480, b — 760.

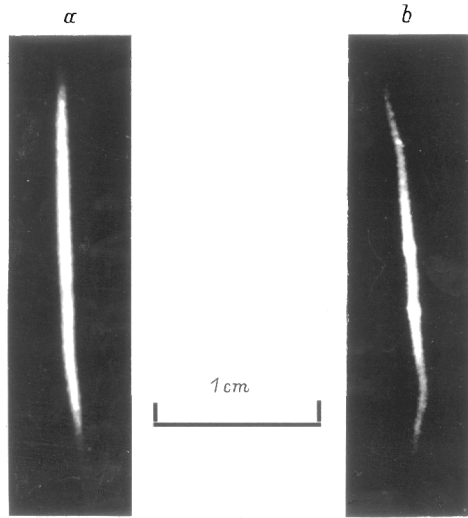


Рис. 4. Безэлектродный СВЧ разряд в водороде (*a, b* — то же, что и на рис. 3).

Эксперименты показали, что переход разрядов в кумулятивную форму имеет порог по давлению: в воздухе $p_{0\text{bon}} = 540 \pm 50 \text{ Torr}$ при $E_0 = 22 \text{ kV/cm}$, а в водороде $p_{0\text{bon}} = 740 \pm 70 \text{ Torr}$ при $E_0 = 21 \text{ kV/cm}$. Причем в воздушном стримере, как правило, наблюдается одно ядро в центральной его части, а в водородном — два (в водороде при p_0 , близких $p_{0\text{max}}$, иногда, как и в воздухе, наблюдается одно центральное ядро).

В качестве примера на рис. 3 показан разряд в воздухе при $p_0 = 480 \text{ Torr} < p_{0\text{bon}}$ и $p_0 = 760 \text{ Torr} > p_{0\text{bon}}$, а на рис. 4 — в водороде при $p_0 = 480$ и 1000 Torr . На них видно, что при $p_0 < p_{\text{bon}}$ как в воздухе, так и в водороде стримерный канал имеет сравнительно однородную яркость практически по всей своей длине, а при $p_0 > p_{\text{bon}}$ в его центральной части имеются яркие ядра.

Обсуждение

Геометрические параметры резонатора и характеристики поля в нем позволяют оценить к моменту пробоя поток энергии в единицу времени через центральное сечение резонатора P_{res} и накопленную в нем ЭМ энергию W_{res} :

$$P_{\text{res}} = \frac{E_0^2}{2Z_0} \frac{\pi \cdot F^2}{2}, \quad (1)$$

где $Z_0 = 120\pi \Omega$ — волновое сопротивление свободного пространства, и

$$W_{\text{res}} = P_{\text{res}} \cdot (2H/c), \quad (2)$$

где c — скорость света, $2H/c$ — минимальное время "снятия" энергии с резонатора.

Например, при $E_0 = E_{0\text{max}}$, величина $P_{\text{res}} \cong 7 \cdot 10^7 \text{ W}$, что в несколько десятков раз превосходит мощность

питающего резонатор СВЧ генератора, $W_{\text{res}} \cong 0.12 \text{ J}$ и $2H/c \cong 1.7 \text{ ns}$.

В пространственно однородном квазинепрерывном СВЧ поле при выполняющемся в опытах условии $\nu_c \gg \omega$, где частота столкновения плазменных электронов с молекулами воздуха $\nu_c = 4 \cdot 10^9 p [\text{Torr}], \text{ s}^{-1}$, амплитуду пробойного поля в нем можно оценить по формуле $E_{\text{br}} = 40p [\text{Torr}], \text{ V/cm}$ [4]. Например, при $p_{0\text{max}} = 1 \text{ Atm}$ она дает $E_{\text{br}} = 30 \text{ kV/cm}$, а при $p_{0\text{bon}} \sim 22 \text{ kV/cm}$. Эти величины совпадают с экспериментально определенными их значениями. Таким образом, в опытных условиях пространственная неоднородность поля и его нестационарный характер не сказываются на процессе пробоя воздуха.

В этих же предположениях для водорода (для него $\nu_c = 5 \cdot 10^9 p [\text{Torr}], \text{ s}^{-1}$) расчетное значение $E_{\text{br}} = 14p [\text{Torr}], \text{ V/cm}$ [4], следовательно, при $E_{0\text{max}}$ он должен был бы пробиться при давлении в 3 Atm . В экспериментах же $p_{0\text{max}} = 2.1 \text{ Atm}$, т.е. отношение $E_{\text{br}}/p = 19 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$, а при $p_{0\text{bon}}$ это отношение вообще равно $30 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$. Таким образом, в опытных условиях при пробое водорода необходимо учитывать неоднородность и нестационарность поля в пробойной области. Наблюдаемый в опытах рост отношения E_{br}/p с уменьшением p_0 указывает на возможное влияние на процесс пробоя именно диффузии электронов, так как аналогичная зависимость E_{br}/p от p_0 отмечена и в [5], где амплитуда поля с момента его включения практически неизменна.

Из проведенных опытов однозначно следует, что изменение структуры СВЧ стримера происходит лишь при превышении исходного давления пробиваемого газа некоторого порогового значения. Покажем, что в резонансном стримере возможна реализация условий пинч-эффекта, с которым и может быть связана эта трансформация формы стримера.

Как указывалось, пинч-эффект возникает, когда магнитное давление на поверхности токового канала превосходит газокинетическое давление: $p_m > p$. Оценим соотношение этих величин в области $p_0 \geq p_{0\text{bon}}$. При этом будем считать, что при максимальном экспериментально наблюдаемом размере $2L$ стример ведет себя подобно резонансному вибратору, т.е. его эквивалентное реактивное сопротивление равно нулю, а основной вклад в эквивалентное активное сопротивление вносит сопротивление излучения R_Σ .

Рассмотрим разряд в воздухе при $p_0 = p_{0\text{bon}}$. Для тока в центральной по длине области стримера имеем

$$I_0 = E_0 L / R_\Sigma \cong 1.4 \cdot 10^3 \text{ A}, \quad (3)$$

где $R_\Sigma \cong 20 \Omega$ для фиксируемого размера $2L$ [6].

Для магнитного же давления получим

$$p_m = \frac{\mu_0 I_0^2}{(2\pi a)^2} = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 5 \text{ Atm}, \quad (4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Как видим, p_m в 7 раз превосходит p_0 и пинч-эффект в воздушном СВЧ стримере вполне возможен. Полученное превышение p_m над p_0 на пороге возникновения кумулятивной формы разряда, очевидно, может быть обусловлено неучетом в оценках активного сопротивления плазменного канала, которое может снизить реальную величину тока I_0 , и повышением давления в плазменном канале за счет интенсивного энерговыделения в нем.

В работе [2] время роста воздушного стримера до резонансной длины оценено величиной в десятки наносекунд. При наблюдаемой максимальной длине стримера $2L \cong 2.5$ см это дает среднюю скорость его роста 10^7 см/с, а среднюю скорость нарастания СВЧ тока $\partial I_0/\partial t > 10^{10}$ А/с. Последняя величина характерна для традиционных динамических пинчей [3].

Аналогичная оценка для водородного стримера при его $p_{0\text{вон}}$ дает $I_0 = 1.3 \cdot 10^3$ А и $p_m = 4.5 \cdot 10^5$ Н/м² = 4.5 Атм. Магнитное давление в этом случае также больше исходного газокинетического давления, однако, по сравнению с воздухом их отношение $p_m/p_{0\text{вон}} = 4.5$ оказывается несколько меньшим.

В заключение обратим внимание на требующий специального анализа факт существенного различия значений $p_{0\text{вон}}$ для водородного стримера при рассмотренных условиях в поле стоячей волны и в поле бегущей волны [1] (рис. 1).

Заключение

Таким образом, эксперимент показал, что кумулятивный вид резонансного стримерного безэлектродного СВЧ разряда как в водороде, так и в воздухе имеет порог по давлению. Возможность его объяснения на основе локального СВЧ пинч-эффекта заслуживает дальнейшего экспериментального и теоретического изучения.

Авторы выражают благодарность К.В. Александрову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 32–45.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 2. С. 26–37.
- [3] Синельников К.Д., Руткевич Б.Н. Лекции по физике плазмы. Харьков: Изд-во ХГУ, 1964. 241 с.
- [4] Мак-Дональд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах М.: Мир, 1969. 205 с.
- [5] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 4. С. 33–36.
- [6] Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975.