

03;04;09;12

Импульсный СВЧ разряд в атмосферном воздухе в фокусе двухзеркального резонатора

© К.В. Александров, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, С.М. Покрас, К.В. Ходатаев

Федеральное государственное унитарное предприятие „Московский радиотехнический институт РАН“,
117519 Москва, Россия
e-mail: esakov@dataforce.net

(Поступило в Редакцию 22 мая 2002 г.)

Описывается импульсный свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе атмосферного давления в фокусе открытого двухзеркального высокодобротного резонатора, возбуждаемого линейно поляризованным электромагнитным излучением с длиной волны 4.3 см. Описываемый разряд аналогичен ранее исследованному в сходных условиях стримерному резонансному СВЧ разряду при длине волны электромагнитного поля, равной 8.9 см. Его плазменный канал, начиная с определенной надкритичности поля, также имеет высокотемпературное ядро.

Введение

В 1967 г. группа исследователей, в которую входил один из авторов настоящей работы, под руководством Р.Ф. Авраменко и Г.М. Батанова, в процессе настройки создаваемой ими установки наблюдала импульсный СВЧ разряд в воздухе атмосферного давления p в стоячей волне линейно поляризованного поля [1]. Разряд возник в центральной, фокальной области высокодобротного открытого резонатора, работающего на длине волны $\lambda \approx 10$ см, образованного двумя соосными круглыми сферически вогнутыми зеркалами. Разряд отстоял на десятки сантиметров от ближайших элементов конструкции. Он имел вид вытянутого вдоль вектора электрической компоненты электромагнитного (ЭМ) поля \mathbf{E} плазменного канала диаметром $2a \approx 0.1$ см и длиной $2l \approx \lambda/2$. В центре канала имелось ядро, яркость свечения которого существенно превышала яркость свечения основного разрядного канала. В плазме ядра и поглощалась значительная часть энергии, накопленной в резонаторе к моменту пробоя.

В 1975 г. авторами [2] был описан свободно локализованный СВЧ разряд, полученный в аналогичной экспериментальной постановке, но с $\lambda = 0.81$ см. Ими был осуществлен безэлектродный пробой воздуха в фокусе двухзеркального высокодобротного резонатора при $p \leq 400$ Торг. Реализующийся в их эксперименте при максимальном p разряд также имел вид вытянутого вдоль \mathbf{E} плазменного канала, но без центрального ядра.

Начиная с 1990 г. дальнейшие детальные исследования этого вида разряда проводились авторами работ [3–5] на установке с $\lambda = 8.9$ см. Было показано, что разряд начинается с единичного „свободного“ электрона. В ходе его развития первоначально формируется малый сферически симметричный плазмид, который затем удлиняется в обе стороны от места зарождения вдоль \mathbf{E} в виде СВЧ стримерного канала. При достижении длины этого канала величины, примерно равной $\lambda/2$, начинают проявляться его резонансные свойства. В резуль-

тате амплитуда тока в центральной области стримера существенно возрастает, и авторами было высказано предположение о реализации на заключительной стадии развития разряда пинч-эффекта, приводящего к образованию высокотемпературного ядра. В опытах эта стадия имеет порог по давлению газа. Например, в воздухе она реализуется лишь при $p \geq 540$ Торг.

Наличие у разряда малой области, в которой с высокими эффективностью и темпом кумулируется ЭМ энергия, открывает определенные возможности практического применения такого вида разрядов (см., например, [6]) и стимулирует их дальнейшее изучение. В то же время экспериментальная установка, используемая авторами работ [3–5], является по существу единственной, на которой проводятся такие исследования, что сужает их круг. На ней можно варьировать конфигурацию резонатора, сорт и давление газа, но лишь на конкретной длине волны ЭМ поля.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, в которых в качестве СВЧ источника использована описанная в [7] установка с $\lambda = 4.3$ см. Ее мощностные характеристики и возможность контролируемого управления генерируемой частотой позволили авторам осуществить безэлектродный СВЧ пробой атмосферного воздуха в фокусе двухзеркального открытого резонатора при указанной λ и получить свободно локализованный стримерный резонансный СВЧ разряд с кумулятивным ядром.

Описание установки

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В ее состав входит вертикальная излучающая антенная решетка с размером прямоугольной апертуры 2.7×2.7 м. Решетка состоит из прямоугольных рупоров, расположенных по шесть рупоров в шести рядах по сферической поверхности с радиусом кривизны, равным 2.7 м. Каждый рупор запитывается от усилитель-

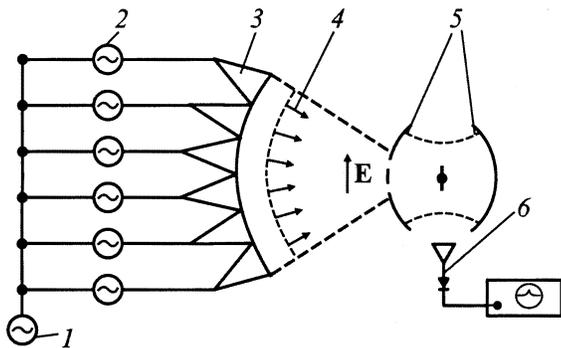


Рис. 1. Схема установки: 1 — задающий генератор, 2 — усилительные клистроны, 3 — излучающие рупора, 4 — СВЧ пучок, 5 — открытый резонатор, 6 — измерительная цепь.

ного СВЧ генератора клистронного типа. На их входы подается сигнал от единого задающего СВЧ генератора. Фазовращатели во входных цепях клистронов и металлопластинчатые линзы на выходе рупоров формируют по сферической излучающей апертуре решетки равномерный фазовый фронт. В результате излучается сфокусированный в ближней зоне линейно поляризованный пучок ЭМ излучения с *TEM*-структурой поля. Ось пучка горизонтальна и перпендикулярна плоскости раскрыва антенны. В области фокуса вектор $\mathbf{E}_{\text{фоc}}$ поля вертикален. Для такого пучка с углом фокусировки $\alpha \approx 60^\circ$ диаметр его поперечного сечения в фокальной плоскости по уровню половинной мощности $2r_{\text{фоc}} \approx \lambda$; диаметр главного центрального лепестка по нулям поля примерно в два раза больше, и через этот лепесток проходит около 88% общей излучаемой антенной энергии [8].

Центральная частота излучаемого поля $f_0 = 7005 \text{ MHz}$ ($\lambda = 4.283 \text{ cm}$). На этой частоте каждый элемент решетки может излучать в импульсе с длительностью до $t_{\text{pul}} = 800 \mu\text{s}$ в среднем $P_1 = 30 \text{ kW}$, т.е. общая максимальная импульсная мощность пучка $P_{\text{ген}} \approx 1 \text{ MW}$. Излучаемую мощность можно уменьшать примерно на порядок. При перемещении частоты поля от центральной f_0 на $\pm 2.5 \text{ MHz}$ амплитуда излучаемой волны падает в два раза. Задающий генератор позволяет установке работать в течение СВЧ импульса в режиме частотной модуляции с постоянной скоростью свипирования v_{sw} . Частота посылок импульсов может задаваться от единичных импульсов до 1 Hz.

Входящий в установку квазиоптический открытый резонатор образован двумя одинаковыми, расположенными соосно друг другу сферически вогнутыми круглыми зеркалами с радиусом кривизны $R_{\text{mir}} = 17.5 \text{ cm}$ и диаметром $2r_{\text{mir}} = 34 \text{ cm}$. Максимальное расстояние между поверхностью зеркал по их оси $2h = 29.6 \text{ cm}$. Оно может плавно регулироваться в пределах $\pm 0.5 \text{ cm}$. Зеркала выполнены из медного листа толщиной 0.2 cm. Резонатор установлен горизонтально соосно оси ЭМ пучка, излучаемого антенной решеткой. Его расстояние от решетки обеспечивает примерное совпадение кри-

визны фазового фронта поля пучка с кривизной наружной сферически выпуклой поверхности ближнего к ней зеркала. Это зеркало в своей центральной области на диаметре $2r_{\text{con}} \approx 15 \text{ cm}$ перфорировано круглыми отверстиями диаметром 0.63 cm. Они расположены по сетке с примерным размером ячеек $2 \times 2 \text{ cm}$. Причем одна сторона этих ячеек параллельна вектору \mathbf{E} падающего на зеркало ЭМ излучения, а другая — перпендикулярна. Через эту систему отверстий осуществляется возбуждение резонатора ЭМ излучением, т.е. его связь с генератором. Размер $2r_{\text{con}}$ примерно совпадает с характерным поперечным размером возбуждающего резонатор ЭМ пучка в месте расположения этого зеркала.

В соответствии с [9] при указанных размерах резонатора и $\lambda = 4.3 \text{ cm}$ он возбуждается на простейшей азимутально-симметричной моде с гауссовым поперечным распределением поля и его структурой вдоль оси резонатора в виде стоячей волны. Размер спада поля в e раз при удалении от оси резонатора в его центральной фокальной плоскости $r = 3 \text{ cm}$, а вдоль поверхности зеркала $r_{\text{car}} = 7.3 \text{ cm}$, поле имеет $q = 13$ вариаций вдоль оси резонатора, т.е. максимально в его центре.

Обычно в оценках проводимость σ меди принимают равной $5.8 \cdot 10^7 \text{ 1}/(\Omega \cdot \text{m})$. Следовательно, для $f_0 = 7 \text{ GHz}$ при падении СВЧ волны на медную поверхность отношение ЭМ энергии, поглощаемой в единицу времени этой поверхностью, к мощности падающей на нее волны [10] $\alpha_\sigma = \sqrt{2\varepsilon_0\omega/\sigma} = 2.3 \cdot 10^{-4}$, где $\varepsilon_0 = 10^{-8}/(36\pi), \text{ F/m}$; $\omega = 2\pi f$. Это значение α_σ дает собственную добротность резонатора установки $Q_0 = \pi q/\alpha_\sigma = 1.8 \cdot 10^5$. Здесь подразумевается, что дифракционными потерями ЭМ энергии из резонатора можно пренебречь. Действительно, коэффициент дифракционных потерь $\alpha_{\text{dif}} = \exp[-2(r_{\text{mir}}/r_{\text{car}})^2] = 2.6 \cdot 10^{-5} \ll \alpha_\sigma$. Нагруженная добротность резонатора Q зависит также от коэффициента связи α_{con} резонатора с генератором. В рассматриваемом случае α_{con} есть отношение мощности ЭМ волны, прошедшей через систему отверстий перфорированного зеркала, к мощности падающей на него со стороны резонатора ЭМ волны. При оптимальной связи, когда $\alpha_{\text{con}} = 2\alpha_\sigma$, в установившемся режиме вся энергия возбуждающей резонатор волны входит в него и поглощается зеркалами и $Q = Q_0/2 = 9 \cdot 10^4$. При таком значении Q полная ширина резонансной кривой резонатора по уровню $1/\sqrt{2}$ от максимума относительно механической расстройки его длины $2\Delta h = 2h/Q$ и составляет всего 3 микрона, а по частоте $2\Delta f = f_0/Q = 70 \text{ kHz}$.

В резонансе максимальное значение поля в фокусе резонатора можно оценить по формуле [11]

$$E_{\text{max}} = [4/(\pi r)] \sqrt{Q\eta P_{\text{ген}} Z_0/q}, \quad (1)$$

где $Z_0 = 120\pi, \Omega$; η — коэффициент, учитывающий, какая часть $P_{\text{ген}}$ реально возбуждает генератор.

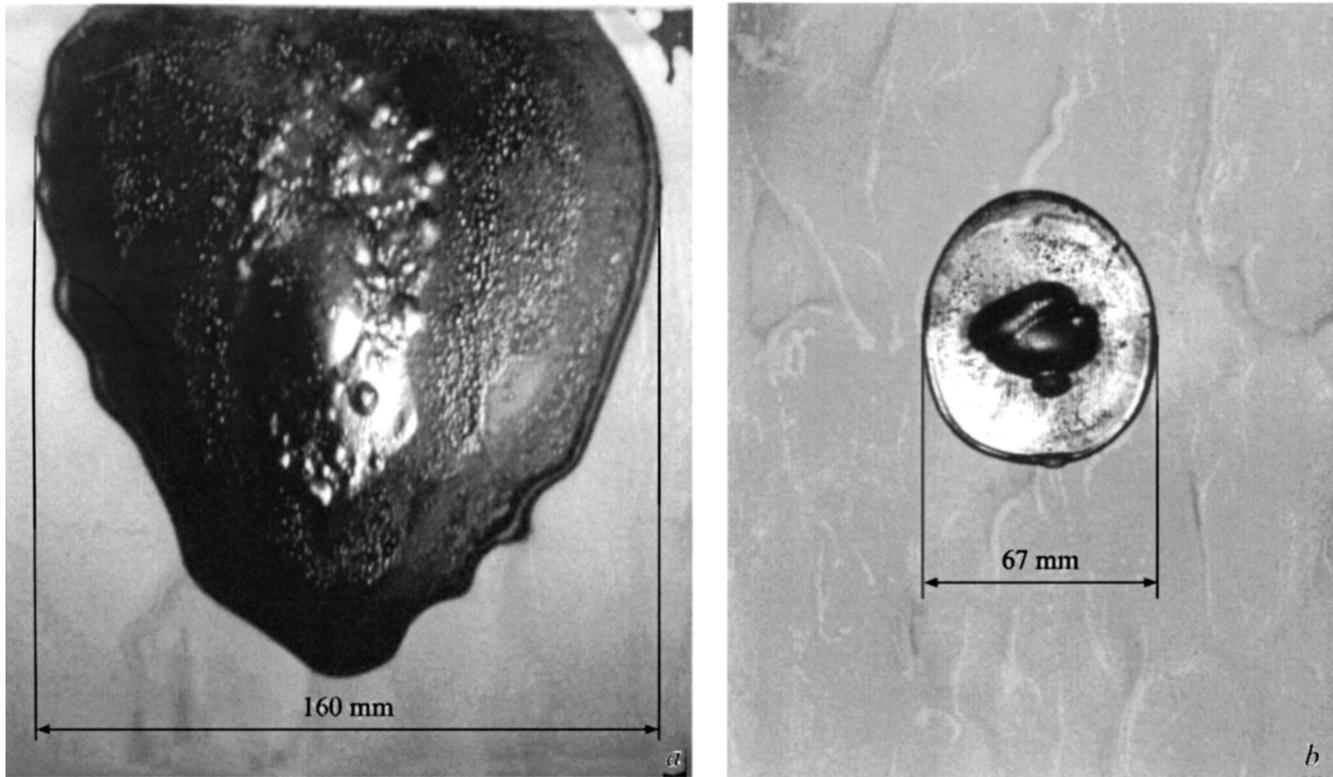


Рис. 2. *a, b* — иллюстрация геометрии возбуждающего резонатор ЭМ пучка в области его фокуса.

В экспериментах величина поля в фокусе резонатора E_0 контролируется волноводным рупором, принимающим сигнал, излучаемый из него за счет дифракции поля за края зеркал. СВЧ сигнал с этого рупора поступает на линейный детектор и на вход запоминающего осциллографа. Об абсолютной привязке показаний этой измерительной цепи к полю в фокусе резонатора будет сказано ниже.

Эксперимент

В описываемых опытах установка работала не при максимальной мощности P_{gen} , преимущественно в режиме разовых СВЧ импульсов с $t_{\text{pul}} = 350 \mu\text{s}$ и $v_{\text{sw}} = 2 \text{ kHz}/\mu\text{s}$.

В предварительных экспериментах была уточнена геометрия возбуждающего резонатор ЭМ пучка в области его фокуса и оценена величина P_{gen} . При их проведении резонатор удалялся.

Для уточнения геометрии пучка в область фокуса помещалась текстолитовая пластина толщиной 0.3 см и размером 40×40 см. Одна сторона ее поверхности покрывалась краской, цвет которой менялся с повышением температуры. При некотором числе СВЧ импульсов пластина, поглощая ЭМ энергию, существенно нагревалась и измененный цвет краски начинал визуализировать геометрию пучка. На рис. 2, *a* показано расположение

пластины по оси ЭМ пучка перпендикулярно вектору E поля. Излучение поступает сверху вниз. Измеренный по фотографии угол фокусировки пучка $\alpha \approx 60^\circ$. Рис. 2, *b* соответствует расположению пластины в фокальной плоскости пучка, перпендикулярной направлению распространения излучения. Измеренный по фотографии диаметр фокального пятна, как и положено, лежит между λ и 2λ .

Для оценки P_{gen} в фокус пучка параллельно вектору поля в нем последовательно помещались металлические цилиндрические со сферически закругленными концами СВЧ вибраторы резонансной длины $2l_{\text{vib}} = 2.15$ см и различного диаметра $2a_{\text{vib}}$. В опытах невозмущенная, исходная амплитуда в фокусе пучка E_{foc} была существенно меньше критической пробойной амплитуды для атмосферного воздуха: $E_{\text{cr}} = 32 \text{ kV}/\text{cm}$ [12]. На концах же вибратора поле усиливалось, и для экспериментальной λ его величина [13]

$$E_{\text{pol}} = 3.6E_{\text{foc}}/(2a_{\text{vib}}), \quad (2)$$

где размер $2a_{\text{vib}}$ выражен в см, могла быть больше E_{cr} . Измеренный в опытах максимальный диаметр вибратора, при котором еще наблюдался пробой воздуха, т.е. $E_{\text{pol}} \approx E_{\text{cr}}$, $2a_{\text{vib}} = 0.17$ см. Это соответствует $E_{\text{foc}} \approx 1.5 \text{ kV}/\text{cm}$, или плотности потока ЭМ энергии $\Pi_{\text{foc}} = E_{\text{foc}}^2/(2Z_0) = 3 \cdot 10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$ и $P_{\text{gen}} \approx \Pi_{\text{foc}} \cdot 2\lambda^2 = 120 \text{ kW}$.

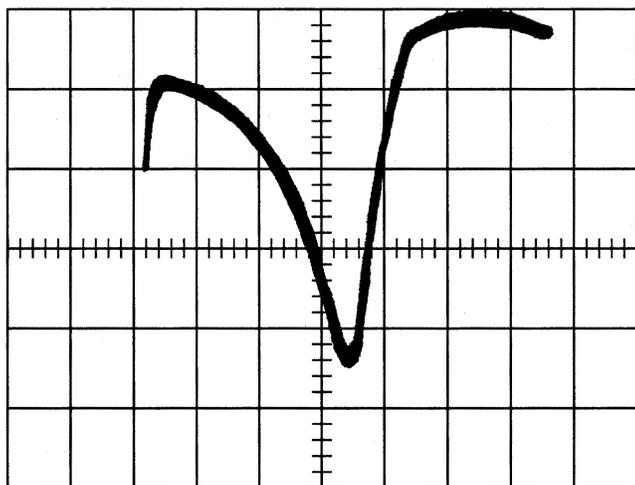


Рис. 3. Оциллограмма контрольного сигнала при временной развертке в $50 \mu\text{s}/\text{div}$.

При такой мощности пучка по (1) при $Q = 9 \cdot 10^4$ и $\eta = 1$ ожидаемое максимальное значение поля в фокусе настроенного резонатора $E_{\text{max}} = 240 \text{ kW}/\text{cm} > E_{\text{cr}}$ и воздух в резонаторе может пробиться. В основной серии экспериментов с резонатором воздух в его фокусе действительно пробивался почти при каждом СВЧ импульсе.

На рис. 3 помещена оциллограмма, соответствующая отсутствию разряда. На ней временной масштаб $50 \mu\text{s}/\text{div}$. Измерительная цепь по существу фиксирует сигнал „наводки“ от поля, запитывающего резонатор ЭМ пучка, и сигнал, рассеиваемый из резонатора и отслеживающий зависимость $E_0(t)$. На входе измерительной цепи они складываются с определенными фазами. В результате на оциллограмме сигнал „наводки“ длительностью $t_{\text{pul}} = 350 \mu\text{s}$ рисуется вверх от нулевой линии, а наложенная на него резонансная кривая — вниз. На оциллограмме ширина резонансной кривой $2\Delta f$ по уровню $1/\sqrt{2}$ равна примерно $70 \mu\text{s}$. При этом амплитуда резонансной кривой и уровень, соответствующий $1/\sqrt{2}$ от нее, отсчитываются от верхнего правого уровня оциллограммы. Измеренная величина $2\Delta f$ соответствует $Q = 10^5$ и $\alpha_{\text{con}} = 2\alpha_{\sigma}$.

При пробое в полном соответствии с результатом описанных в [3] опытов временной ход зависимости поля в резонаторе существенно меняется. При наличии пробоя оциллограмма воспроизводит только начальный участок резонансной кривой до пробойного уровня E_{br} , а затем за время, меньшее $1 \mu\text{s}$, резко поднимается вверх до уровня СВЧ наводки от запитывающего резонатор поля. Этот правый верхний горизонтальный участок оциллограммы на рис. 3 и примем за нулевой уровень поля в резонаторе, а величину поля в его фокусе E_0 по резонансной кривой будем отсчитывать от него вниз.

В опытах поле $E_0 = E_{\text{br}}$ в последовательных импульсах различалось в разы в последовательных импульсах. В большинстве импульсов поле E_{br} было значительно

больше E_{cr} . Причем пробой происходил как на ниспадающей, так и на нарастающей ветви резонансной кривой. Этот статистический разброс связан со случайным характером появления в воздухе при естественных условиях свободных электронов, могущих положить



Рис. 4. Свободно локализованный стримерный СВЧ разряд в воздухе атмосферного давления.



Рис. 5. Свободно локализованный стримерный СВЧ разряд в воздухе атмосферного давления с высокотемпературным ядром.

начало развитию электронной лавины [4]. Более того, в отдельных импульсах за время, в течение которого в фокальной области резонатора $E > E_{cr}$, такой электрон может и не появиться. В этом случае в данном импульсе разряд вообще отсутствует, а на осциллограмме рисуется полная резонансная кривая.

Минимальную величину роста сигнала на осциллограмме до момента пробоя, измеренную по большой серии импульсов, естественно соотнести с $E_0 = E_{cr}$ [4]. Это дает абсолютную привязку вертикального масштаба осциллограмм к полю в фокусе резонатора. В опытах на осциллограммах этот минимальный уровень был в пять–шесть раз меньше максимального уровня резонансной кривой, что дает $E_{max} = (5-6)E_{cr} = 150-190 \text{ kV/cm}$, следовательно, в установке коэффициент использования мощности η лежит в диапазоне 0.4–0.6.

В экспериментах разному значению E_{br} соответствовал разряд разного вида. Например, на рис. 4 дана его интегральная фотография с временем экспозиции, существенно превышающим время свечения разряда, при E_{br} , лишь незначительно превышающем E_{cr} . Видно, что это вытянутый вдоль E плазменный канал. Его длина $2l$ в различных импульсах колебалась от 1.3 до 1.6 см, а диаметр $2a \approx 0.1 \text{ см}$. Кумулятивное ядро в этом разряде отсутствует. На рис. 5 показан разряд при E_{br} , близкой к E_{max} . Видно, что разряд, сохраняя длину и диаметр, уже имеет центральное ядро.

В опытах высокотемпературное ядро начинало наблюдаться лишь при $E_0 \geq 2E_{br}$.

Обсуждение

Полученный результат лежит в рамках развитых в [5] представлений для стримерного резонансного кумулятивного СВЧ разряда. Возможность реализации пинч-эффекта, с наличием которого, по мнению авторов, связывается появление кумулятивного ядра в центральной области стримера, существенно зависит от отношения тока этого участка стримера к его радиусу I_0/a . Эксперимент показал, что при переходе от $\lambda = 8.9$ к 4.3 см размер a стримера практически не изменился. Ток же $I_0 = E_{br}h_{eff}/R_{\Sigma}$ зависит от его действующей длины h_{eff} , которая пропорциональна λ . Здесь R_{Σ} — сопротивление излучения стримера, рассматриваемого как СВЧ вибратор. Величина R_{Σ} зависит от отношения $2l/(\lambda/2)$, которое в опытах при уменьшении λ практически не изменилось. И наоборот, при переходе к $\lambda = 4.3 \text{ см}$ размер h_{eff} падает в два раза и при $E_{br} = E_{cr}$ ток I_0 падает вдвое. В результате при $E_{br} \approx E_{cr}$ условие реализации пинч-эффекта может не соблюдаться. В то же время в эксперименте в отдельных импульсах это уменьшение h_{eff} может компенсироваться ростом поля E_{br} . Именно поэтому при значениях $E_{br} \geq 2E_{cr}$ разряд реализуется уже с кумулятивным ядром.

Заключение

Таким образом, экспериментально осуществлен безэлектродный пробой воздуха атмосферного давления в стоячей волне линейно поляризованного поля с длиной волны $\lambda = 4.3 \text{ см}$. В опытах использовался квазиоптический лучевой способ запитки высокодобротного открытого двухзеркального резонатора и динамический режим его настройки в резонанс путем свипирования частоты возбуждающего его электромагнитного поля.

Опыты показали, что развитие стримерного СВЧ разряда на длине волны $\lambda = 4.3 \text{ см}$ качественно происходит по тем же законам, что и при $\lambda = 8.9 \text{ см}$, с естественным количественным различием на резонансном этапе его развития. Так, при пробойном уровне поля E_{br} , примерно равном критическому пробойному уровню E_{cr} , соответствующем атмосферному давлению воздуха, разрядный стример не имеет кумулятивного ядра. Лишь при $E_{br} \geq 2E_{cr}$ на $\lambda = 4.3 \text{ см}$ реализуется свободно локализованный стримерный резонансный СВЧ разряд с высокотемпературным ядром, аналогичный исследованному ранее разряду такого вида в атмосферном воздухе на $\lambda = 8.9 \text{ см}$ при $E_{br} = E_{cr}$.

Список литературы

- [1] Авраменко Р.Ф., Грачев Л.П., Николаева В.И. // Сб. ст. / Под ред. В.Г. Никифорова, В.Н. Пушкина. Электропунктуры и проблемы информационно-энергетической регуляции деятельности человека. М.: Центральный научно-исследовательский институт экономики и научно-технической информации угольной промышленности Министерства угольной промышленности СССР, 1976. С. 197–198.
- [2] Вихарев А.П., Еремин Б.Г. // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. Вып. 2. С. 452–455.
- [3] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 2. С. 26–37.
- [4] Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф., Ходатаев К.В., Юрьев М.З. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 34–39.
- [5] Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф., Ходатаев К.В., Юрьев М.З. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 11. С. 31–35.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. С.-Пб, 1992. № 1577. 59 с.
- [7] Бацких Г.И., Хворостяной Ю.И. // РИЭ. 1992. № 2. С. 311–315.
- [8] Sherman J.W. // IRE Trans. 1962. VII. Vol. AP-10. N 4. P. 399–408.
- [9] Ванштейн Л.А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 476 с.
- [10] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970. 439 с.
- [11] Грачев Л.П., Есаков И.И., Малык С.Г., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 66–74.
- [12] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 205 с.
- [13] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.