

Research of the streamer microwave discharge in a quasi-optical beam of electromagnetic wave with application of the K011 image converter camera

Igor I. Esakov*^a, Grigory G. Feldman^b, Lev P. Grachev^a,
Kirill V. Khodataev^a, Vitaly B. Lebedev^b

^aMoscow Radiotechnical Institute (MRTI) RAS, Warshavskoe shosse 132, 117519 Moscow, Russia ^bBIFO Company, Ozernaya st. 46, 119361 Moscow, Russia¹

ABSTRACT

В настоящее время интенсивно исследуются возможности использования микроволновых (MW) газовых разрядов в различных областях науки и технологии. Наибольший оптимизм в прикладных применениях связан со стримерными формами разряда.

Возможности применения разрядов стримерной формы определяются их специфическими свойствами. Эффективность поглощения энергии в таком разряде близка к 100%. Разряд развивается в виде пространственной структуры, состоящей из чередующейся последовательности связанных между собой стримерных элементов. При достижении электродинамического резонанса они взрываются. Структура разряда представляет собой сеть тонких плазменных каналов, температура в которых достигает нескольких тысяч Кельвин. Характерное время поглощения энергии отдельными плазменными каналами составляет единицы микросекунд. Скорость прорастания стримеров имеет порядок - 10^6 см/с.

В настоящее время основные физические механизмы, определяющие свойства MW разрядов, качественно выяснены. Но для эффективного использования разрядов в прикладных задачах требуются количественные исследования процессов их образования. Для этого необходимо оборудование, которое имеет характеристики, позволяющие фиксировать процессы с временным разрешением в микросекундном и субмикросекундном диапазонах. В работе приведены результаты исследований: начальной стадии развития стримерного MW разряда в воздухе; развитой стадии объемного стримерного MW разряда в воздухе; развития стримерного MW разряда в воздухе на поверхности радиопрозрачного диэлектрика. Исследования были проведены с использованием электронно-оптической камеры K011.

Keywords: streamer microwave discharge, surface streamer microwave discharge, electromagnetic wave, image converter camera

1. INTRODUCTION

В последнее десятилетие нарастает интерес к исследованию возможностей использования микроволновых газовых разрядов в различных областях науки, техники и технологии. Спектр возможных применений плазмы микроволновых разрядов очень широк. Эти проблемы активно обсуждается, например, на специализированных международных [1] и Российских конференциях [2]. Они посвящены, в частности, зажиганию горючих смесей и оптимизация процесса горения в высокоскоростных потоках и изменению поля течения вокруг летательных аппаратов (ЛА) с целью снижения силы сопротивления и управления полетом. Наибольший оптимизм в этих направлениях связан с применением стримерных форм MW разряда объемного и поверхностного типов.

*^a E-mail esakov@dataforce.net, Phone No +7495 315 24 97,
Fax No. +7 495 314 10 53,

Исследования MW разряда показали, что разряд реализуется в двух основных формах. При низких давлениях p – это диффузная форма разряда, а при высоких – стримерная. Физические механизмы ответственные за возникновение разрядов в этих формах принципиально отличны. Различаются и их свойства. Диффузный разряд, как правило, практически не поглощает энергию возбуждающего его MW поля. Напротив, разряд в стримерной форме характеризуется высокой энергетической эффективностью взаимодействия с возбуждающей его ЭМ волной.

MW стримерный разряд развивается в виде чередующейся последовательности связанных между собой стримерных элементов, взрывающихся при достижении электродинамического резонанса. Пространственная структура разряда представляет собой сеть тонких стримерных плазменных каналов. Температура в каналах достигает величины в несколько тысяч градусов Кельвина. Характерное время поглощения ЭМ энергии отдельными стримерными каналами резонансной длины составляет единицы микросекунд. Характерная скорость прорастания стримеров - 10^6 см/сек, а скорость распространения навстречу ЭМ излучению фронта разряда - 10^5 – 10^6 см/сек [3]. Интегральная по времени фотография подобного разряда с развитой объемной структурой приведена на рис.1. Аналогичная фотография MW разряда, созданного на поверхности радиопрозрачного диэлектрика, показана на рис.2.

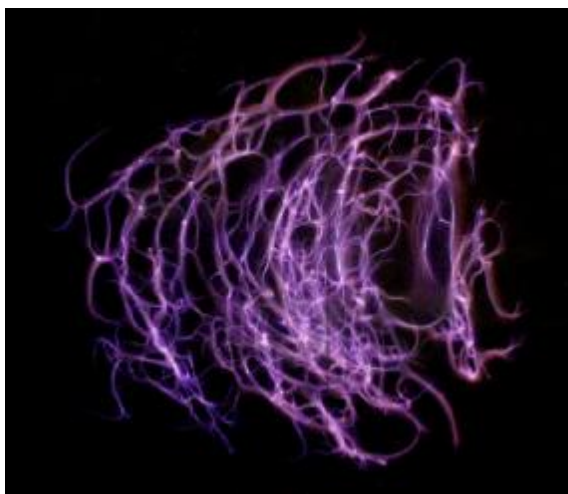


Рис.1 Типичный внешний вид стримерного микроволнового разряда с объемной структурой в воздухе

Важно, что стримерная природа разряда позволяет ему развиваться не только в фокусе, где поле максимально, но и в сходящемся ЭМ пучке, в объеме которого уровень поля меньше пробойного (критического) уровня. Такой разряд, подкритический, можно инициировать путем создания пробойных условий локально с помощью инициатора. На практике при давлении в сотни Торр с использованием традиционных микроволновых приборов, таких как клистроны и магнетроны, реализовать можно только подкритические инициированные MW разряды.

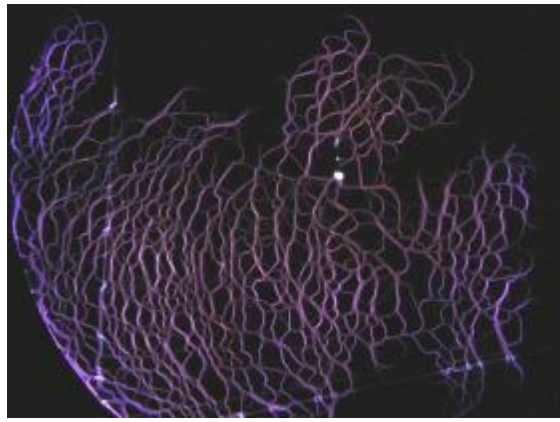


Рис.2 Типичный внешний вид стримерного микроволнового разряда на поверхности диэлектрика в воздухе

В качестве инициаторов можно использовать вибратор [4], плазменный канал, созданный излучением малоомощного лазера и др.

При очень низких, так называемых, глубоко подкритических значениях электрического поля ($E_0 \ll E_{cr}$) стримерные каналы разряда остаются «привязанными» к инициатору в течение всей длительности импульса t_{pul} . Такой разряд по-прежнему сохраняет свойство эффективно поглощать микроволновую энергию. Перечисленные свойства подкритического и глубоко подкритического разрядов определяют интерес к ним с точки зрения практических приложений.

MW разряд в каждой из перечисленных форм реализуется в конкретном диапазоне (E_0, p). Области существования их иллюстрирует рис.3. На нем также приведены характерные фотографии разряда в каждой из его форм. На рисунке линия **II** – это зависимость $E_{cr}(p)$. Ее условно можно назвать «кривой Пашена» в MW диапазоне длин волн. Выше этой линии возможна реализация неиницированных разрядов, а ниже разряд должен быть обязательно инициирован. Линия **I** есть линия граничного давления p_{th} , отделяющая диффузные разряды «низкого» p от стримерных разрядов «высокого» p . И, наконец, линия **III** отделяет подкритические и глубоко подкритические формы инициированных MW разрядов – $E_{th}(p)$.

Вместе с тем, несмотря на то, что в настоящее время основные физические механизмы, определяющие свойства MW разрядов высокого давления в волновых пучках, качественно, определены, для эффективного использования разрядов в прикладных задачах требуются подробные количественные исследования процессов образования разрядов. Для проведения таких исследований необходимо оборудование, которое имеет характеристики, позволяющие фиксировать процессы с временным разрешением в микросекундном и субмикросекундном диапазонах. Кроме того, опыты показали, что исследовать свойства MW разряда в ЭМ пучке «контактными» методами, как правило, не удается.

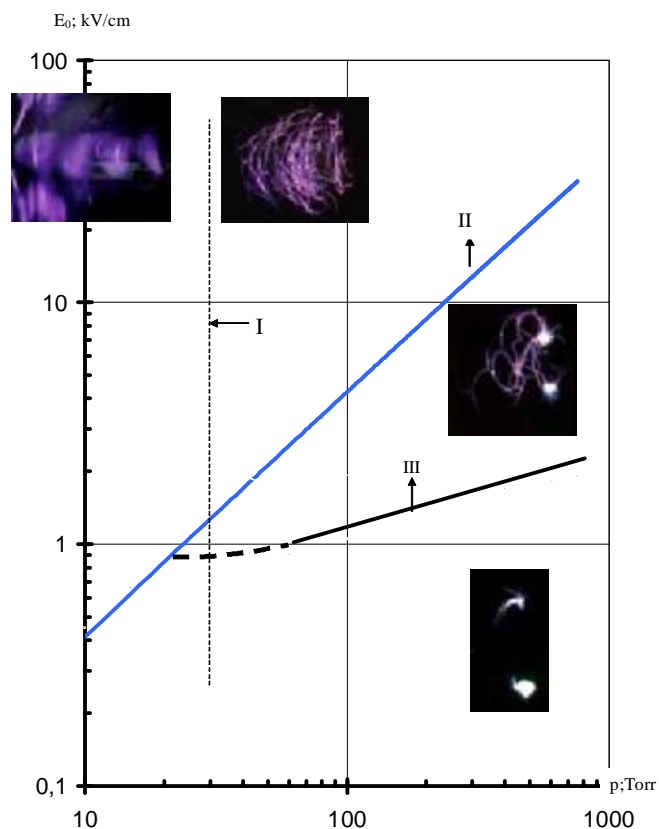


Рис.3. Области существования различных типов MW разряда

Одним из наиболее удобных и информативных «бесконтактных» способов изучения таких разрядов является исследование их структуры с использованием электронно-оптической камеры K011.

2. Экспериментальная установка для исследования MW разряда

Исследования MW разряда проводились на экспериментальной установке, в которой использовался микроволновый генератор с длиной волны $\lambda = 8,9$ см, импульсной мощностью до $P_{\text{pul}} = 2\text{MW}$ обеспечивающий импульс излучения с прямоугольной огибающей длительностью до $40 \mu\text{s}$. Линзовая система формирует электромагнитный пучок с требуемым амплитудным и фазовым поперечным распределением, который поступает в вакуумную камеру через диэлектрическую линзу. ЭМ излучение, поступающее в камеру, собирается в фокусе зеркала. В фокусе помещается иницирующий элемент. Давление воздуха в камере может регулироваться. На рис.4 представлена схема расположения основных элементов экспериментальной схемы по исследованию MW стримерного разряда с объемной структурой.

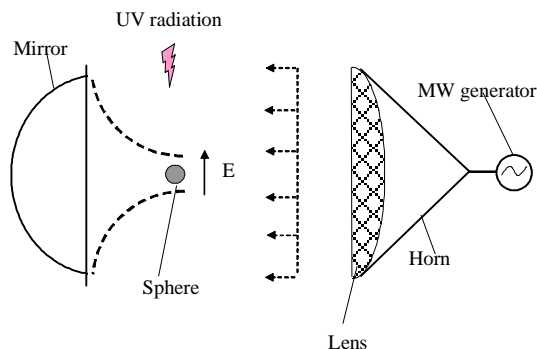


Рис.4 Схема эксперимента при исследовании MW стримерного разряда в объемной форме

Как уже отмечалось выше в прикладных целях реально использование в основном инициированных форм стримерного MW разряда. Поэтому в фокус металлического зеркала помещается инициатор. В экспериментах в качестве инициатора могут использоваться электромагнитные вибраторы или металлический шарик. Область вблизи инициатора, в которой поле превышает критическую величину, очень мала. При ограниченной длительности MW импульса вероятность появления свободного электрона в ней также очень мала. Поэтому для того, чтобы стабилизировать разряд во времени и пространстве, как правило, один из полюсов инициатора освещался импульсным источником ультрафиолетового (УФ) излучения малой интенсивности. Длительность вспышки около 3 мкс. Ультрафиолетовое излучение приводит к образованию на поверхности инициатора фотоэлектронов.

При установленном давлении воздуха p и определенном уровне мощности MW пучка P_{pul} в фокусе зеркала при наличии фотоэлектронов на инициаторе происходит инициированный электрический пробой воздуха, и развивается MW разряд. Светящаяся структура разряда, образующаяся в ходе его развития, является важным источником информации о физических процессах, происходящих в нем. Она и является объектом исследования.

На рис.5 показана схема реализации эксперимента по созданию поверхностного MW разряда стримерного типа. Листовой радиопрозрачный диэлектрик (стеклотекстолит), форма которого понятна из рисунка, установлен по оси ЭМ пучка в области фокуса в плоскости $k \times E$ бегущей электромагнитной волны. Его толщина - 1мм, а характерные размеры 300x300мм. На поверхности диэлектрика со стороны наблюдения в районе фокуса закреплен инициирующий вибратор из меди. Он имеет диаметр 1 мм и длину 10мм. Как и во всех предыдущих исследованиях, вибратор освещается импульсным УФ источником для создания начальных электронов и управления моментом начала процесса развития разряда.

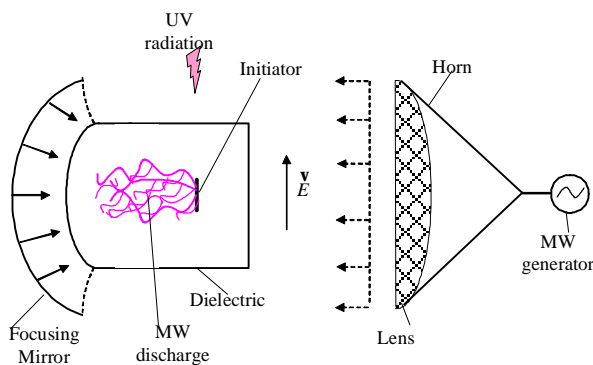


Рис.5 Схема реализации стримерного разряда на поверхности радиопрозрачного диэлектрика.

3. Электронно-оптическая камера K011

Для регистрации процесса развития светящейся структуры MW стримерного разряда в спектральном диапазоне 400–800 нм нами использовалась миниатюрная программируемая 9-ти кадровая электронно-оптическая камера K011, разработанная российской компанией БИФО [5]. Эта камера обеспечивала независимую длительность каждого кадра и каждой межкадровой паузы в диапазоне от 0,1 до 102,4 мкс с шагом 0,1 мкс.

Диапазон характеристик камеры K011 позволяет наблюдать и фиксировать развитие исследуемых процессов во времени и пространстве с требуемым по условиям эксперимента временным и пространственным разрешением.

Электронно-оптическая камера K011 установлена на трехкоординатном оптическом столе перед иллюминатором вакуумной камеры оснащенный водяной защитой от MW излучения. Она ориентирована и сфокусирована на область пространства, в которой реализуется MW разряд. В исследованиях применялись объективы с фокусным расстоянием 50мм, 200мм и 300мм с различным сочетанием удлинительных колец для получения требуемого масштаба изображения. Момент включения электронно-оптической камеры синхронизировался с моментов включения MW и УФ импульсов. Общий вид камеры K011 в составе установки в рабочем положении показан на рис.6.

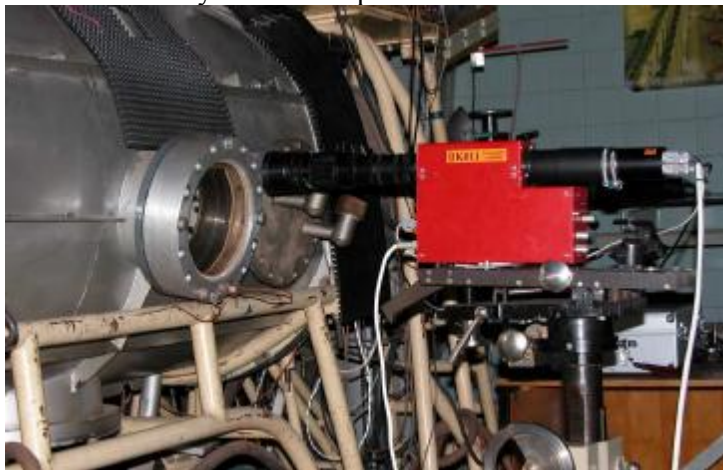


Рис.6 Общий вид камеры K011 в рабочем положении

4. Экспериментальные исследования начальной стадии развития объемного стримерного MW разряда в воздухе

Исследования стримерного MW разряда в воздухе на самой начальной стадии его развития имеют принципиальное значение, как для понимания физических процессов протекающих в разряде, так и для решения прикладных задач. Так, от правильности понимания закономерностей развития разряда на этой стадии и знания основных временных масштабов различных процессов в зависимости от давления воздуха, амплитуды MW поля, зависят, в конечном счете, и энергетические требования к генератору MW.

Эксперимент проводился с использованием различных инициаторов, в диапазоне давлений, при различных уровнях MW поля.

Методика проведения измерений была следующая. В области фокуса размещался требуемый тип инициатора. Устанавливался заданный уровень давления в вакуумной камере. Экспериментально подбирался уровень поля равный критической величине E_{cr} при данном давлении. Передний и задний фронт MW импульса имеют временной масштаб около 2 μ s. Кроме того, вблизи фронтов амплитуда MW излучения испытывает небольшие колебания относительно стационарного уровня. Поэтому, для повышения

стабильности условий эксперимента по уровню поля желательно, чтобы разряд начинался, например на $5 \mu\text{s}$ позже переднего фронта огибающей.

Как уже отмечалось выше, при ограниченной длительности MW импульса для возникновения пробоя необходимо принудительное создание свободных фотоэлектронов с помощью УФ излучения. Это явление можно использовать для управления положением момента начала пробоя относительно начала MW импульса. Для этого УФ импульс подавался на $5 \mu\text{s}$ позже начала импульса MW. С моментом подачи УФ импульс синхронизировался запуск электронно-оптической камеры. (С учетом паспортной величины задержки синхронизации).

В данном эксперименте использовался в качестве инициатора металлический шар из алюминия диаметром 11мм. На рис.7 представлены фотографии начальной стадии развития стримерного импульсного MW разряда в воздухе. Давление воздуха $p = 60\text{Torr}$, напряженность электрической составляющей MW волны $E_0 = 800 \text{ В/см}$, что соответствует пробойному уровню напряженности E_{br} вблизи полюса шара с данным диаметром при данном давлении [6]. Время экспозиции $t_{exp} = 0,1 \mu\text{s}$, длительность паузы между кадрами $t_p = 0,2 \mu\text{s}$. Кадры в строке располагаются последовательно слева направо, строки следуют сверху вниз. Фотографии раскрашены в условные цвета, к которым в программе обработки регистрации и обработки изображений «Клен 4» [5], привязаны определенные уровни яркости.

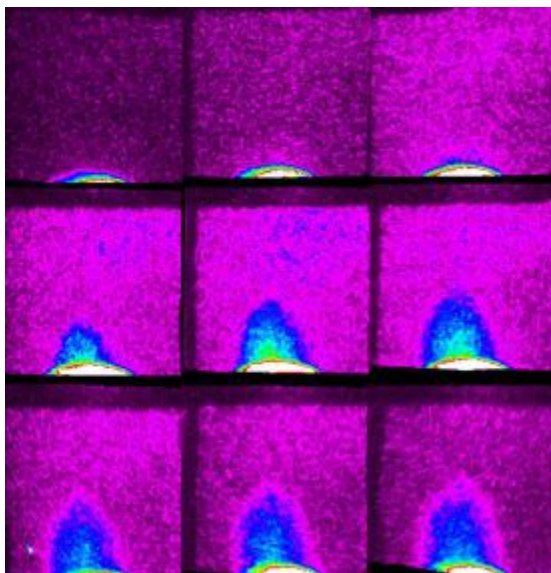


Рис.7 Начальная стадия развития стримерного MW разряда. $p = 60\text{Torr}$, $E_0 = 800 \text{ В/см}$, $t_{exp} = 0,2 \mu\text{s}$, $t_p = 0,1 \mu\text{s}$.

В нижней части всех кадров видна полярная часть иницирующего шара. Белое пятно на полюсе, видимое уже на первом кадре, это рефлекс видимой части спектра излучения УФ вспышки на поверхности. Видно, что, начиная с первого кадра, размеры этого пятна увеличиваются. Это является следствием изменения яркости свечения разряда в УФ лампе в процессе его формирования. На третьем кадре видно, что над полярной поверхностью шара возник светящийся слой. Его образование означает, что произошло размножение первичных фотоэлектронов в области приполярного поля и началось вытягивание плазменной области вдоль направления собственного поля шара. На кадрах с 4-го по 6-й наблюдается рост вдоль поля этой плазменной области с одновременным образованием яркосветящегося ядра в её центральной части. На заключительных трех кадрах видно, что рост плазменной области вдоль поля практически прекращается, происходит деградация яркого ядра, сопровождаемая достаточно плавным изменением продольного и поперечного его размеров. Весь наблюдаемый процесс происходит в течение $2,6 \mu\text{s}$.

В следующей серии измерений длительность паузы была увеличена до $0,3 \mu\text{s}$. Кроме того, момент включения электронно-оптической камеры в данном эксперименте был сознательно сдвинут в сторону переднего фронта MW импульса на величину около $1,5 \mu\text{s}$. Типичный вид процесса при такой временной шкале представлен на рис.8

На первом кадре наблюдается еще только рефлекс УФ вспышки на поверхности шара. На кадрах 2, 3, 4 также не видно никаких особенностей, по сравнению с тем, что наблюдалось на фотографиях рис.7. Но уже на пятом кадре видно, что плазменная область, на своем дальнем по отношению к поверхности шара конце, заметно модулирована по яркости вдоль направления параллельного поверхности шара. Другими словами в однородно светящейся плазменной области начинают образовываться более яркие каналы. В соответствии с [7] можно предположить, что причиной образования этих каналов является ионизационно-перегревная неустойчивость. На следующих кадрах видно дальнейшее развитие разряда. Из зародившихся сначала двух каналов развитие одного было подавлено уже на начальном этапе. Яркость оставшегося плазменного канала начинает нарастать и на восьмом кадре уже только один канал.

Яркость свечения плазмы обычно связывают с величиной концентрации электронов n_e . Т.е. с большой долей достоверности можно говорить о том, что в этом канале нарастает n_e , а, следовательно, и его проводимость. Это предположение подтверждает эволюция плазменного канала, наблюдаемая на кадрах 8 и 9. Видно, что плазменный канал начинает прорастать за границу начальной области плазмы. Это возможно только при высоком уровне собственного поля на его конце и достаточно высокой проводимости в канале. Т.е. фактически здесь наблюдается образование MW стримера. И, наконец, на девятом кадре наблюдается образование сферической светящейся области на конце канала. Это свидетельствует о том, что произошло резкое увеличение величины поля на его конце.

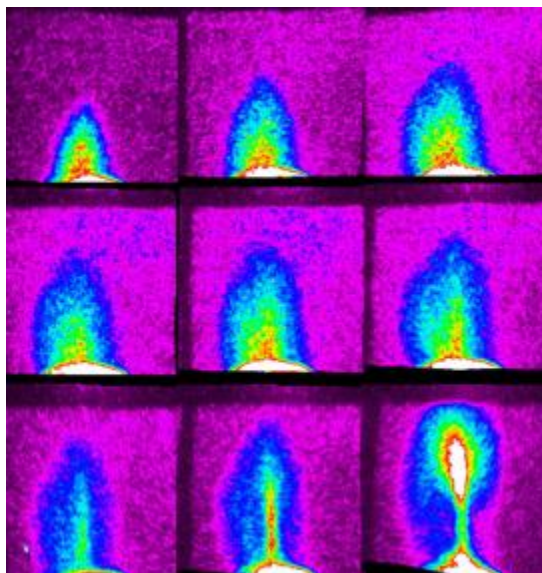


Рис.8. Начальная стадия развития стримерного MW разряда. $p = 60\text{Торр}$, $E_0 = 800 \text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,2 \mu\text{s}$, $t_p = 0,3 \mu\text{s}$.

Поле в довольно большой области превысило критическое значение (отсюда и сферическая светящаяся область). Наблюдаемые явления свидетельствуют о том, что имеет место явление резонанса. Т.е. объект, образованный иницирующим шаром и стримерным каналом достигает такой длины и величины проводимости, что в её структуре происходит компенсация реактивного сопротивления, сопровождающаяся соответствующим ростом тока и возрастанием напряжения на конце стримера, вблизи иницирующего шара.

Все рассмотренные фотографии были получены при уровне поля вблизи поверхности шара примерно равной пробойному значению. Ниже представлены две реализации процессов начала разряда при уровне поля равном $1,3E_{br}$. Естественно ожидать, что качественно все процессы, которые мы наблюдали при уровне поля E_{br} будут происходить и при данном уровне поля, но сократятся постоянные времени их развития. На рис.9 представлена одна из возможных реализаций начальной стадии разряда при $p = 60\text{Torr}$, $E_0 \approx 1100\text{ В/см}$, $t_{exp} = 0,2\ \mu\text{s}$, $t_p = 0,1\ \mu\text{s}$. Она подтверждает наше предположение.

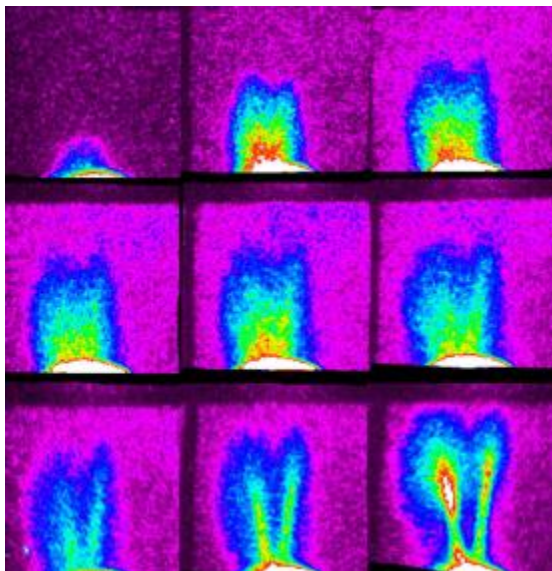


Рис.9. Начальная стадия развития стримерного MW разряда. Реализация 2. $p = 60\text{Torr}$, $E_0 = 1100\text{ В/см}$, $t_{exp} = 0,2\ \mu\text{s}$, $t_p = 0,1\ \mu\text{s}$.

Здесь сформировался не один, а два вполне полноценных стримерных канала. Это связано с тем, что при повышенном уровне поля все процессы протекают с большой скоростью. И вследствие этого формирование плазменного стримерного канала происходит за очень малые времена, за которые начальные параметры модуляции плазменной области заметно измениться не успевают. По фотографиям видно, что они сформировались за время менее $0,3\ \mu\text{s}$.

Кроме того, фотографии наталкивают на мысль о том, что в формировании условий для образования стримерных каналов заметную роль играет неустойчивость фронта ионизации при развитии первоначальной плазменной области. Такая неустойчивость вполне может иметь место при экспериментальных условиях [8]. Действительно, на первых трех кадрах видно, что по мере движения границы плазмы от поверхности шара практически сразу (уже второй кадр) наблюдается неоднородность фронта, которая, как видно из последующих кадров, пространственно привязана к местам локализации стримеров.

С ростом давления все процессы, наблюдаемые на начальной стадии развития разряда, ускоряются. Это вполне понятно, т.к. разряд развивается при более высокой напряженности электромагнитного поля и поэтому поток энергии, который могут воспринимать плазменные структуры, значительно возрастает.

5. Экспериментальные исследования объемного стримерного MW разряда в воздухе на развитой стадии

Выше были приведены примеры развития начальной стадии MW разряда при различных условиях. В этих экспериментах временной масштаб исследования и его пространственный масштаб были сознательно выбраны таким образом, чтобы по существу исследовать только процессы, предшествующие образованию стримерного

канала в инициированном разряде и процесс образования и развития первого стримерного канала. Все, что происходит в развитии MW стримерного разряда позже этого момента, оставалось, в буквальном смысле слова, за кадром.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований развитой стадии MW стримерного разряда. Пространственный масштаб исследования выбран таким образом, чтобы весь процесс развития разряда в пространстве попадал в границы кадра электронно-оптической камеры.

Методика проведения фоторегистрации была аналогичной предыдущим экспериментам. На рис.10 приведены фотографии MW разряда полученные при давлении $p = 60$ Торр, $E_0 = 1100$ В/см, $t_{exp} = 0,5 \mu s$, $t_p = 3 \mu s$.

На кадрах с первого по третий видна начальная стадия развития разряда, которая подробно исследовалась выше. Но уже на четвертом кадре можно наблюдать дальнейшее развитие событий в разряде. Видно, что из областей разряда с высоким уровнем поля, с которыми коррелируют, сферическая светящаяся область на конце стримерного канала, стартуют новые стримерные каналы. Эти каналы распространяются по направлению максимума вторичного поля. И через некоторое время формируют дугообразный канал, обращенный выпуклой стороной к фокусирующему зеркалу. Как можно заметить по кадрам 6-9 разряд постепенно перемещается в сторону направления излучения.

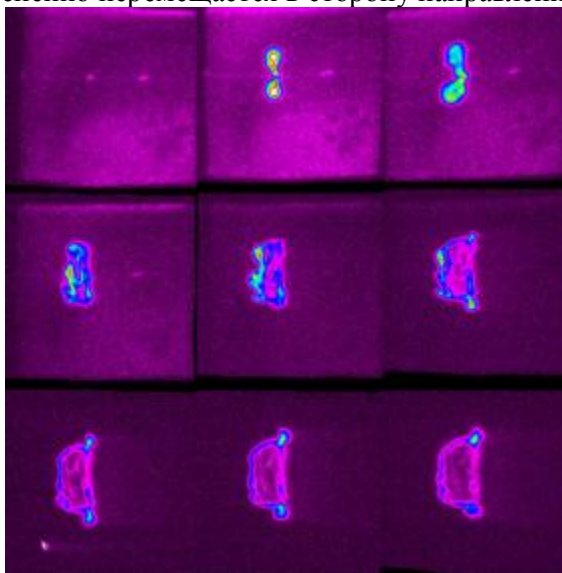


Рис.10. Развитый стримерный MW разряд. $p = 60$ Торр, $E_0 = 1100$ В/см, $t_{exp} = 0,5 \mu s$, $t_p = 3 \mu s$.

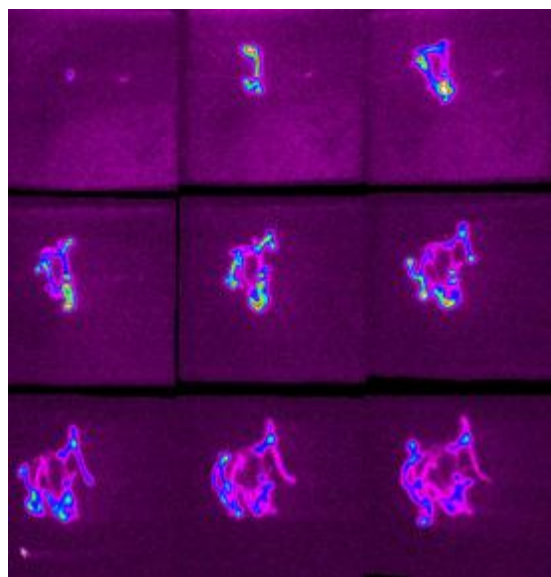


Рис.11. Развитый стримерный MW разряд. $p = 150 \text{ Torr}$, $E_0 = 2800 \text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,5 \mu\text{s}$, $t_p = 2 \mu\text{s}$.

На рис.11 приведена фотография разряда при еще более высоком давлении $p = 150 \text{ Torr}$, $E_0 = 1700 \text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,5 \mu\text{s}$, $t_p = 2 \mu\text{s}$.

Как видно с ростом давления и соответствующим ростом уровня напряженности поля, при которой происходит разряд, стримерные каналы начинают образовывать все более сложную структуру. В ней можно уже уверенно выделить по внешнему виду два типа каналов. Первые, более яркие - синий и зеленый условные цвета и вторые менее яркие - розовый условный цвет.

Первые, по-видимому, соответствуют каналам, которые в данный момент все еще интенсивно потребляют энергию электромагнитного поля. Вторые – каналы, которые к данному моменту времени практически не потребляют энергию поля и находятся в стадии распада. На данной серии фотографий уже можно констатировать, что развитие структуры плазменных каналов явно происходит в направлении падающего поля. Скорость распространения фронта разряда в сторону фокусирующего зеркала можно оценить по фотографиям. Она составляет величину около $4 \cdot 10^5 \text{ см/с}$.

6. Экспериментальные исследования стримерного MW разряда воздухе на поверхности радиопрозрачного диэлектрика

Методика исследований была в целом аналогична исследованиям MW разрядов с объемной структурой. Схема эксперимента приведена на рис.2. Как и ранее УФ импульс подавался в момент времени, отстоящий на $5 \mu\text{s}$ от переднего фронта MW импульса. Развитие разряда начинается с полюса иницирующего вибратора. Разряд распространяется в сторону фокусирующей антенны по поверхности диэлектрического листа в виде сложной плоской системы каналов.

На рис.12 приведена, в качестве примера, серия фотографий, на которых представлено развитие начальной стадии поверхностного стримерного MW разряда в крупном масштабе соизмеримом с размерами полюса вибратора. Фотографии получены при $p = 760 \text{ Torr}$, $E_0 = 2 \text{ кВ/см}$. Время экспозиции кадра $t_{\text{exp}} = 0,1 \mu\text{s}$, пауза между кадрами составляла $t_p = 0,2 \mu\text{s}$. В целом, картины развития стримерного разряда на начальной стадии поверхностного и объемного разрядов близки. Но заметны и существенные различия. Так, в частности, рост стримера сопровождается более интенсивным ветвлением стримерного канала по его длине, что не наблюдалось в объемном разряде. По-видимому, это следствие того, что стримерные каналы развиваются вблизи диэлектрической поверхности.

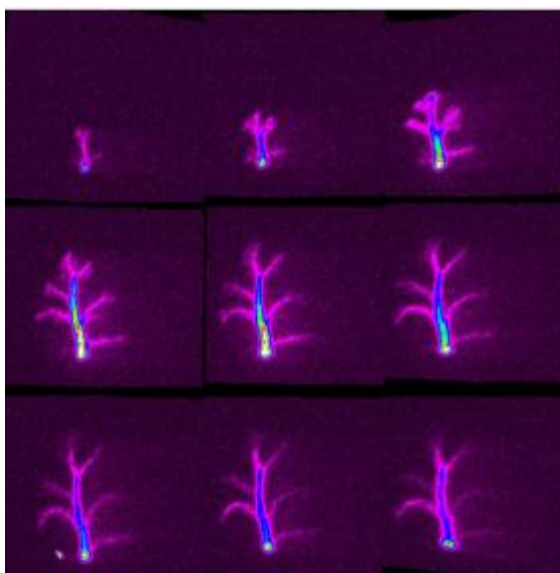


Рис.12. Начальная стадия развития поверхностного стримерного СВЧ разряда.

Реализация 2. $p = 760 \text{ Torr}$, $E_0 = 2000 \text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,1 \mu\text{s}$, $t_p = 0,2 \mu\text{s}$.

На рис.13 и 14 представлены фотографии развития стримерного поверхностного MW разряда в более мелком пространственном масштабе, который позволяет отслеживать развитие всей структуры разряда. Фотографии имеют различный временной масштаб междукадровой паузы от 0,2 до 3 μs .

Фотографии позволяют условно выделить три основных этапа в развитии разряда. Первый этап - начальный этап развития разряда, во время которого происходит формирование первого стримера. Второй этап – во время, которого формируется развитая стримерная структура. Её фронт распространяется в сторону излучателя. При этом видно, что яркие горячие каналы локализируются в основном в тонком фронте разрядной структуры, обращенном в сторону излучателя.

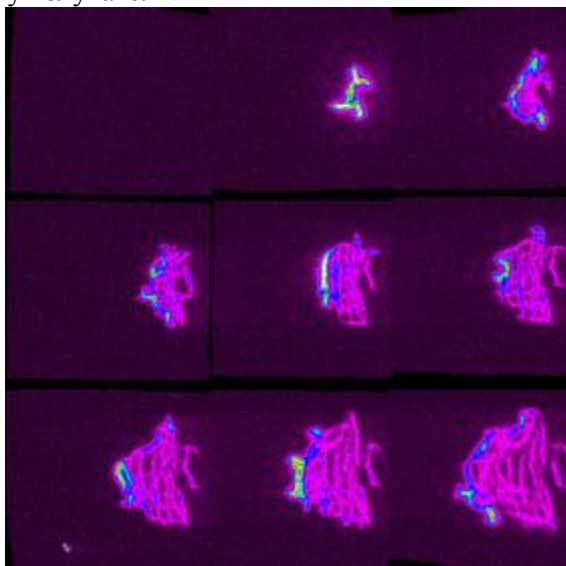


Рис.13. Поверхностный стримерный СВЧ разряд. $p = 760\text{Торр}$, $E_0 = 6500\text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,1\ \mu\text{s}$, $t_p = 1\ \mu\text{s}$.

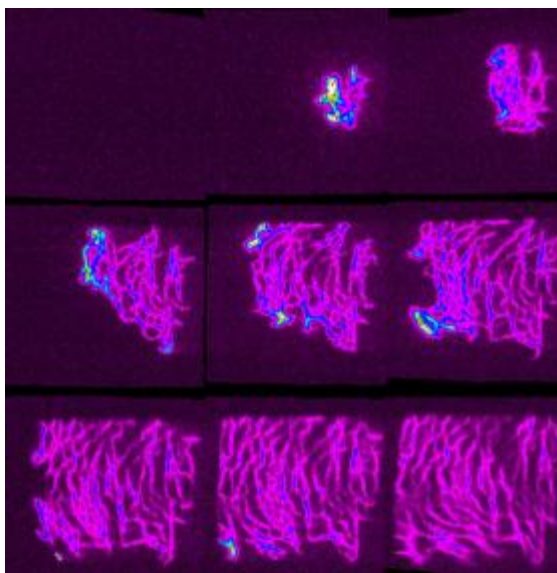


Рис.14. Поверхностный стримерный СВЧ разряд. $p = 760\text{Торр}$, $E_0 = 6500\text{ В/см}$, $t_{\text{exp}} = 0,1\ \mu\text{s}$, $t_p = 3\ \mu\text{s}$.

За фронтом видны уже только «тусклые» их следы. Скорость распространения фронта, определенная по фотографиям имеет величину около $5 \cdot 10^5\text{ см/с}$. Третий этап – здесь движение фронта в сторону излучателя приостанавливается. При этом яркие каналы начинают возникать по всей глубине уже «погасшей» к этому моменту структуры.

7. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования MW стримерного разряда в воздухе в диапазоне давлений при различном уровне MW поля с использованием электронно-оптической камеры K011.

Результаты исследования начальной стадии развития стримерного MW разряда позволили выделить основные этапы формирования первоначального стримерного канала и выявить зависимости постоянных времени развития основных этапов от внешних параметров эксперимента. В частности, установлено, что увеличение исходного уровня поля приводит к резкому сокращению времен развития стримерного канала. Одновременное увеличение давления воздуха и уровня MW поля может приводить к совместному образованию двух и более первоначальных стримеров.

Результаты экспериментального исследования стримерного MW разряда в воздухе с развитой объемной структурой в развитой стадии позволили зафиксировать, что формирующаяся после начальной стадии развития разряда структура стримерных каналов распространяется в сторону излучателя ЭМ энергии. При этом плазменные каналы расположенные на фронте структуры имеют большую яркость свечения по сравнению с каналами расположенными в глубине. Скорость распространения фронта разрядной структуры имеет величину около $4 \cdot 10^5$ см/с при давлении $p = 150$ Торр.

В ходе экспериментальных исследований стримерного MW разряда в воздухе на поверхности радиопрозрачного диэлектрика установлено, что качественно этот разряд имеет такие же основные стадии развития, как и объемный MW разряд. В том числе на определенном этапе своего развития он распространяется в направлении источника излучения, и скорость фронта разрядной структуры имеет величину около $5 \cdot 10^5$ см/с. В тоже время имеются и отличия, в частности в формировании стримера на начальной стадии развития.

References

1. Proceedings of the 1-st – 4-th “Weakly Ionized Gases Workshop” (1997 -Colorado USA, 1998, 1999 –Norfolk VA, USA, 2001-Anaheim CA, USA, 2002-2005 Reno Nevada USA).
2. Труды 1-го – 5-го «Совещания по магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях» , (1999, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, Москва, Россия)
3. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. «Скорость фронта стимулированного MW разряда в волновом пучке». ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.5. с.21-30
4. Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. «Высокочастотный пробой воздуха в присутствии вибратора». ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.7. с.60 –67.
5. www.bifocompany.com
6. Л.П.Грачев, И.И.Есаков, К.В.Ходатаев, В.В.Цыпленков Высокочастотный пробой воздуха в присутствии металлического шара, Физики плазмы. Вып.3. Том.18. 1992 . с.411-415.
7. В.Б.Гильденбург, А.В.Ким, Ионизационно-перегревная неустойчивость высокочастотного разряда в поле электромагнитной волны. Физика плазмы. Т.6. 1980. Вып.6, с. 904-909.
8. Лозаннский Э.Д., Фирсов О.Б. «Теория искры». М. Атомиздат. 1975, с. 272.