

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ  
ПЛАЗМА**

УДК 533.9,537.521.7

**ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМОИДОВ ЗА ФРОНТОМ ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА  
В ВОЗДУХЕ ПРИ САМОВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВОГО ПУЧКА**

© 2021 г. Г. М. Батанов<sup>а</sup>, В. Д. Борзосекон<sup>а,\*</sup>, Л. В. Колик<sup>а</sup>, Е. М. Кончечков<sup>а</sup>,  
Д. В. Малахов<sup>а</sup>, А. Е. Петров<sup>а</sup>, К. А. Сарксян<sup>а</sup>, В. Д. Степахин<sup>а</sup>, Н. К. Харчев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

<sup>\*</sup>*e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru*

Поступила в редакцию 28.03.2021 г.

После доработки 20.05.2021 г.

Принята к публикации 23.05.2021 г.

В экспериментах получены кадры подпорогового микроволнового (СНС) разряда. Они показали, что за фронтом головного плазмоида с мелкоячеистой структурой свечения существует протяженная область диффузного свечения. В этой области также обнаруживаются отдельные локализованные яркосветящиеся образования. Фотодетекторы ультрафиолетового диапазона (240–360 нм) зарегистрировали импульсы свечения, возникающие на траектории микроволнового пучка за головным плазмоидом разряда. Наблюдаемый эффект может быть качественно объяснен локальным возбуждением свечения в микроволновом поле при самофокусировке кольцевого волнового пучка за головным плазмоидом разряда. Установлено понижение интенсивности прошедшего за разряд излучения на оси микроволнового пучка с увеличением протяженности области за фронтом головного плазмоида разряда.

*Ключевые слова:* микроволновый разряд, гиротрон, гауссов пучок, самовоздействие пучка

**DOI:** 10.31857/S0367292121100012

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Распространение электромагнитных волн высокой интенсивности в газах, как известно [1], сопровождается возникновением разрядов, изменяющих распределение электрических полей в волновых пучках. Одним из процессов, протекающих при возникновении разряда на траектории волнового пучка, является образование кольцевого волнового пучка. Это происходит из-за поглощения волн центральной частью разряда в отсутствие или при слабом поглощении на периферии волнового пучка. Такой процесс в случае лазерного излучения вызывает явление “банановой” самофокусировки волнового пучка [2]. Оказалось, что и в случае подпороговых микроволновых пучков миллиметрового диапазона при разряде в воздухе возможно наблюдать аналогичное явление [3, 4]. В этом случае, фронт разряда представляет собой конгломерат линейных разрядов, вытянутых вдоль электрического вектора волны, с концентрацией плазмы в нитях  $\sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, температурой электронов до 10 эВ, и температурой нейтралов до 10 кК [5–7], а также газа, ионизированного и нагретого перед фронтом разряда в плазме, создаваемой ультрафиолетовым (УФ) излучением нитевидных разрядов [8, 9]. Распространение этой головной части разряда (головно-

го плазмоида) навстречу волновому пучку вызвано протеканием в УФ-ореоле головного плазмоида несамостоятельного микроволнового разряда и возникновением ионизационно-перегревной неустойчивости, создающей новую серию нитевидных разрядов перед головной частью. Поглощение микроволн в плазме головного плазмоида создает за фронтом разряда кольцевой пучок волн, испытывающих самофокусировку в плазме, релаксирующей за фронтом разряда. Как показывают теневые фотографии головной части разряда [10], область мелкоячеистой структуры, занимаемой нитевидными каналами достигает около половины диаметра волнового пучка. Таким образом, в кольцевом пучке за фронтом разряда может содержаться до 40% мощности исходного волнового пучка. Самофокусировка такого кольцевого пучка, несмотря на поглощение в плазме УФ-ореола головной части подпорогового разряда, может вызвать образование новых плазмоидов за фронтом разряда. Тем более, что воздух за фронтом разряда после смещения его навстречу пучку возмущен процессами нагрева, возбуждения и ионизации, произошедшими как перед фронтом, так и на самом фронте. При этом, перемещение фронта разряда по оси волнового пучка вызывает перемещение всей картины рас-

пределения электрических полей в кольцевом пучке вдоль оси, включая область самофокусировки. Таким образом, представляет интерес изучить эволюцию конкретных процессов, протекающих за фронтом головного плазмоида, в том числе и с точки зрения энергетического баланса в подпороговых разрядах.

## 2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В экспериментах использовалась стандартная схема выполнения экспериментов в воздухе при атмосферном давлении на стенде “Факел” (рис. 1). Гауссов пучок гиротрона “Борец 75/0,8” (длина волны 4 мм) после квазиоптического ответвителя, регистрирующего огибающую сигналов прямого и отраженного микроволнового излучения, с помощью поворотного эллиптического зеркала направляется на инициатор разряда. Инициатор представляет собой кольцо из переплетающихся проволок нержавеющей стали. Диаметр инициатора около 5 см, его сечение около 2 см. Инициатор располагался в трех позициях относительно перетяжки (центра каустики) гауссового пучка на расстоянии 0, 10 и 60 см за перетяжкой. Длина каустики волнового пучка около 20 см, а его размер в перетяжке 20 мм на 39 мм, по уровню интенсивности 0.14 от максимальной. Мощность гиротрона варьировалась от 80 кВт до 400 кВт. Измерение скорости перемещения фронта разряда выполнялось микроволновым локационным методом [11] по расчетам низкочастотного спектра биений между сигналами опорного и отраженного микроволнового излучения.

С помощью линейки пяти коллимированных УФ-фотодиодов GUVА-S12SD с полосой чувствительности 240–360 нм, расположенных на расстоянии 50 мм друг от друга, регистрировалось УФ-излучение разряда. Щели коллиматора выполнены в виде прямоугольников 15 × 1 мм в пластине фольгированного медью текстолита. Пластина расположена на расстоянии 15 мм от линейки светодиодов. Щель коллиматора первого фотодиода располагалась напротив перетяжки микроволнового пучка на расстоянии 10 см от оси волнового пучка. Такое расположение щелей коллиматора позволяет регистрировать УФ-излучение из объема плазменного столба протяженностью 5 см по длине вдоль оси пучка для каждого фотодиода. Обработка временных рядов сигналов УФ-фотодиодов позволяет проверить результаты измерения скорости распространения разряда, полученной микроволновым методом, в области каустики гауссового пучка гиротрона.

Для фотографирования свечения разряда использовалась видеокамера с частотой кадров до 1000 Гц и длительностью экспозиции 5 мкс. Это позволяло регистрировать структуру свечения

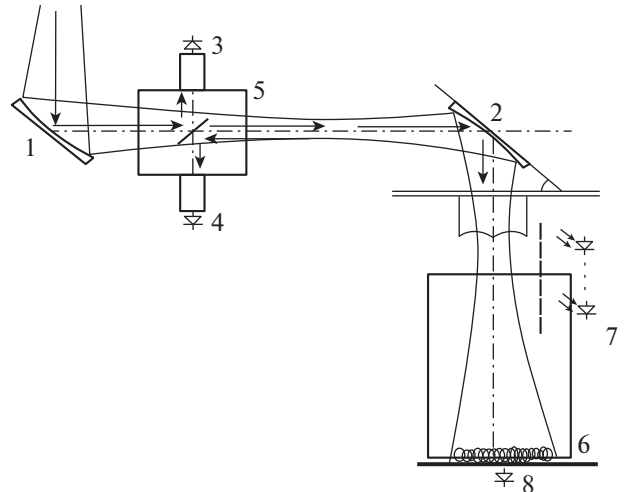


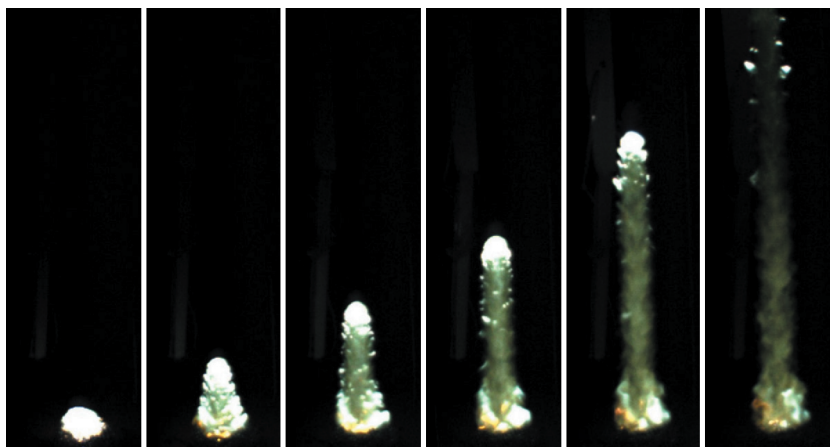
Рис. 1. а) Схема эксперимента. 1, 2 – фокусирующие зеркала; 3 – детекторная секция регистрации мощности излучения гиротрона; 4 – детекторная секция регистрации отраженного излучения; 5 – квазиоптический ответвитель; 6 – кольцевой инициатор разряда; 7 – линейка УФ-детекторов; 8 – детекторная секция регистрации прошедшего излучения.

фронта разряда с большим временным разрешением. Ось видеокамеры составляла малый угол с направлением вектора электрического поля микроволн.

Для регистрации огибающей прошедшего за инициатор разряда микроволнового излучения использовалась коллимированная детекторная головка на основе диода Д-407. Входная щель головки располагалась на расстоянии 70 см от центра каустики гауссова пучка.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Картина свечения разряда (мощность микроволнового излучения 200 кВт, разряд 59428) при его распространении от инициатора из области с низкой напряженностью электрического поля, в область каустики гауссового пучка гиротрона, с максимальной напряженностью электрического поля, представлена на рис. 2. На кадрах этого разряда яркое свечение отдельных линейных разрядов сливается в сплошное яркое свечение фронта разряда. За фронтом разряда, по оси волнового пучка наблюдается диффузное свечение, интенсивность которого меняется вдоль оси. На краях разряда видны яркие точки и более широкие области локализованного свечения. Отдельные яркие точки наблюдаются и на оси волнового пучка. Фото разряда является проекцией на плоскость нормальную к вектору электрического поля микроволнового излучения. Поэтому яркие точки

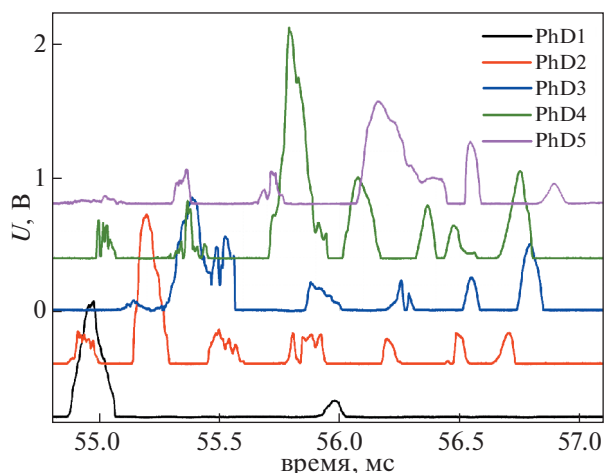


**Рис. 2.** Кадры разряда 59428. Мощность микроволнового излучения 200 кВт. Инициатор разряда на расстоянии около 60 см от центра каустики пучка.

свечения на оси могут являться точками, расположенными по радиусу на удалении от оси пучка.

Через 6 мс после начала разряда фронт разряда оказывается вне области видимости видеокамеры. При этом диффузное свечение сохраняется только вблизи инициатора разряда (рис. 2). Первый фотодиод регистрирует появление фронта разряда через  $\sim 6$  мс (рис. 3), т.е. в момент времени 54.9 мс, когда фронт разряда находится в центре каустики волнового пучка. Об этом свидетельствует также регистрация в этот момент времени максимальной частоты биений отраженного излучения (рис. 4б).

При дальнейшем перемещении фронта разряда на 20 см, о чем свидетельствует регистрация УФ-излучения пятым фотодиодом на 56.05 мс, регистрируются интенсивные импульсы УФ-из-



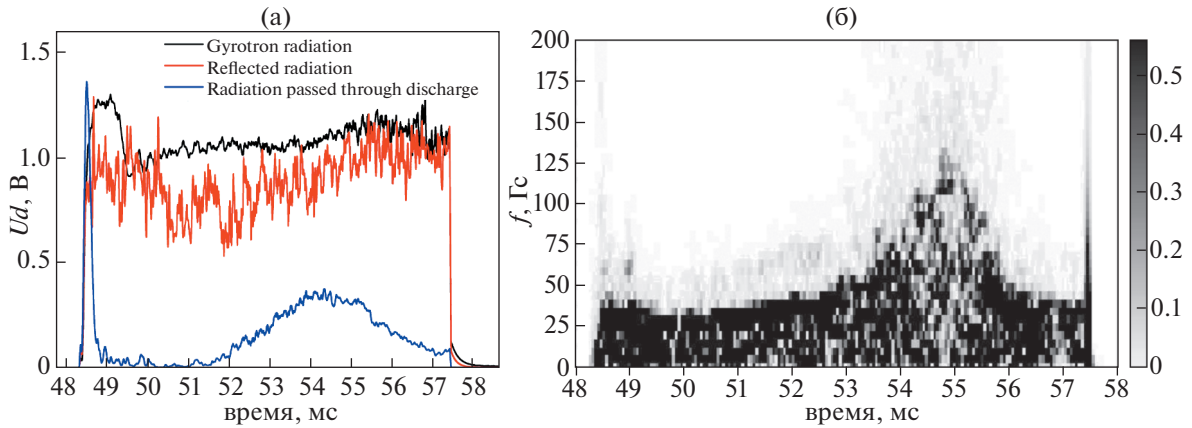
**Рис. 3.** Сигналы фотодиодов УФ-излучения разряда 59428. Время переднего фронта микроволнового импульса 48.25 мс.

лучения четвертым фотодиодом на 56.1 мс, 56.35 мс и 56.75 мс, а также первым фотодиодом на 56.0 мс. Таким образом, мы имеем регистрацию плазмоидов за фронтом основного, первого плазмоида, регистрируемого пятым фотодиодом линейки на 56.05 мс. Судя по последнему кадру рис. 2, эти плазмоиды могут быть смещены по радиусу пучка относительно центра пучка. Это естественно ожидать, имея в виду кольцевую структуру пучка, возникающую в результате поглощения микроволн головной частью разряда.

Смещение фронта разряда вдоль каустики волнового пучка вызывает изменение процесса самофокусировки волнового пучка, что отчетливо регистрируется по сигналу огибающей прошедшего микроволнового излучения (рис. 4а). За передним фронтом микроволнового импульса происходит резкое повышение интенсивности прошедшего излучения. Затем следует провал и перекрытие микроволнового пучка разрядом примерно 3 мс.

Далее, при смещении фронта разряда, происходит постепенное увеличение интенсивности прошедшего излучения, которое достигает 20% начального значения. Это свидетельствует о наличии процесса самофокусировки микроволнового излучения. При дальнейшем движении головного плазмоида, интенсивность прошедшего излучения падает. Это может свидетельствовать о смещении перетяжки самософокусированного волнового пучка за область детекторной головки излучения огибающей прошедшего излучения. Приняв это предположение можно рассчитать параметры самософокусированного микроволнового пучка.

При увеличении мощности микроволнового излучения до 300 кВт (разряд 53433) время перекрытия пучка сокращается, а величина сигнала огибающей прошедшего излучения возрастает до

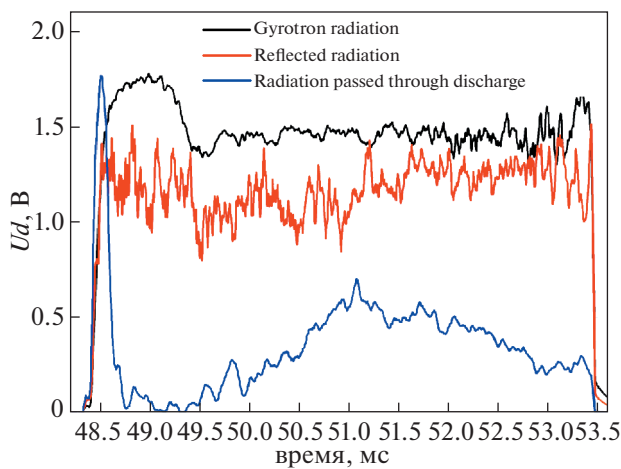


**Рис. 4.** а) Сигналы огибающих прямого микроволнового излучения, прошедшего через разряд излучения и отраженного излучения, смешанного с прямым, разряд 59428. б) Трехмерный Фурье-спектр огибающей сигнала отраженного излучения, смешанного с прямым, разряд 59428.

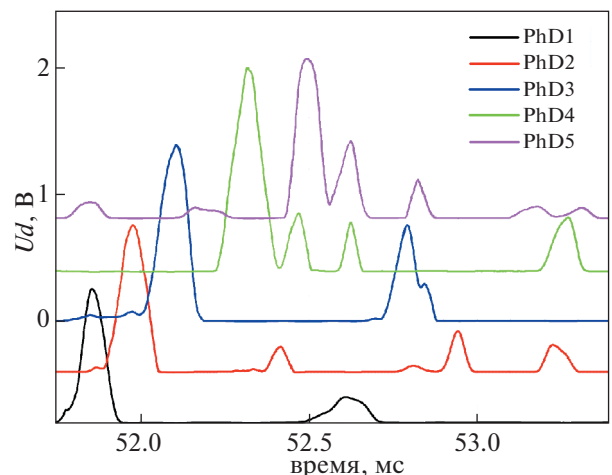
значения около 35% от всплеска на переднем фронте импульса микроволнового излучения (рис. 5). При этом момент достижения фронтом разряда центра каустики сокращается с 6.2 мс для 200 кВт до 3 мс, как это видно по сигналу первого фотодиода на рис. 6. На том же рисунке видно регистрацию вторичных плазмоидов на 52.63 мс (первый фотодиод), на 52.75 мс (третий фотодиод), на 53.25 мс (четвертый фотодиод), после того как фронт разряда прошел пятый фотодиод в момент времени 52.5 мс.

Кадры с периодом 1 мс и временем экспозиции 5 мкс (рис. 7) дают представление о картине свечения разряда. Если в первом кадре регистрируется свечение около инициатора разряда, то на втором кадре свечение разряда находится на рас-

стоянии около пятнадцати сантиметров от инициатора разряда. На фоне слабого диффузного свечения видны яркие пятна. При этом сохраняется широкая область яркого свечения, привязанная к инициатору разряда. На третьем кадре за головным плазмоидом сохраняется область диффузного свечения с отдельными яркими пятнами. Расстояние от фронта разряда до инициатора разряда составляет около 30 см. При этом сохраняется область яркого свечения у поверхности инициатора. На четвертом и пятом кадрах на темном фоне видны лишь отдельные яркие области на траектории волнового пучка и яркая область, отстоящая примерно на 3 см от поверхности инициатора. Такая сложная картина свечения может быть объяснена протеканием двух процессов в релаксирующей плазме волнового пучка за фрон-



**Рис. 5.** Сигналы огибающих прямого микроволнового излучения, прошедшего через разряд излучения и отраженного излучения, смешанного с прямым, разряд 59433. Мощность микроволнового излучения 300 кВт.



**Рис. 6.** Сигналы фотодиодов УФ-излучения разряда 59433. Время переднего фронта микроволнового импульса 48.25 мс.

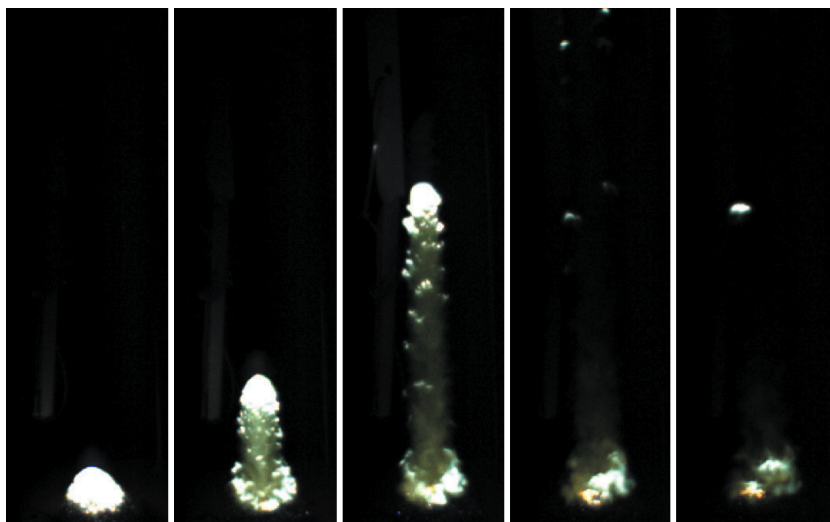


Рис. 7. Кадры разряда 59433.

том разряда. Кольцевое распределение поля за счет совместного действия ионизации и рекомбинации [4] и создает кольцевое распределение плотности плазмы. Такое распределение концентрации плазмы может вызвать самофокусировку внутренней части волнового пучка [2] и расширение его наружных частей. Это и регистрирует сигнал огибающей прошедшего излучения (рис. 5), а также подтверждает яркое свечение на поверхности инициатора.

Уменьшение на 10 см расстояния от инициатора до центра каустики приводит к перекрытию прошедшего излучения на переднем фронте импульса излучения (рис. 8). По мере смещения

фронта разряда к центру каустики первичного волнового пучка наблюдаются колебания интенсивности прошедшего излучения большой амплитуды. После достижения фронтом разряда перетяжки помимо колебаний интенсивности наблюдается и непрерывное увеличение среднего значения сигнала. Факт прохождения фронтом разряда перетяжки фиксируется первым фотодиодом линейки (рис. 9). Далее, при смещении на 15–20 см фронта разряда, регистрируется генерация УФ-излучения вторичных плазмоидов в виде импульсов (рис. 9). Так задний фронт третьего импульса на четвертом фотодиоде линейки перекрывает передний фронт импульса на пятом фо-

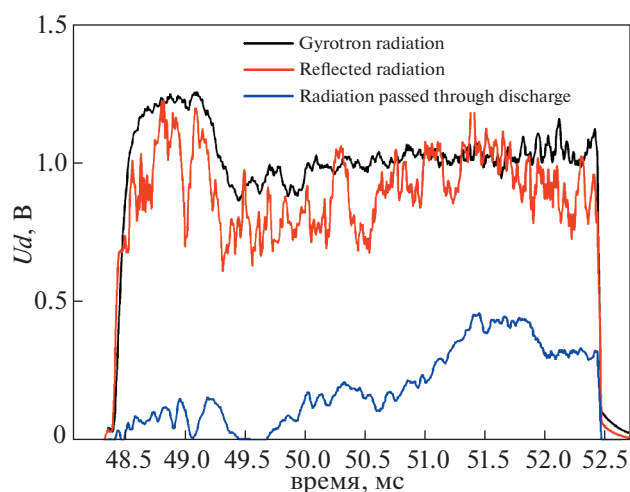


Рис. 8. Сигналы огибающих прямого микроволнового излучения, прошедшего через разряд излучения и отраженного излучения, смешанного с прямым, разряд 59620. Инициатор разряда на расстоянии около 10 см от центра каустики пучка.

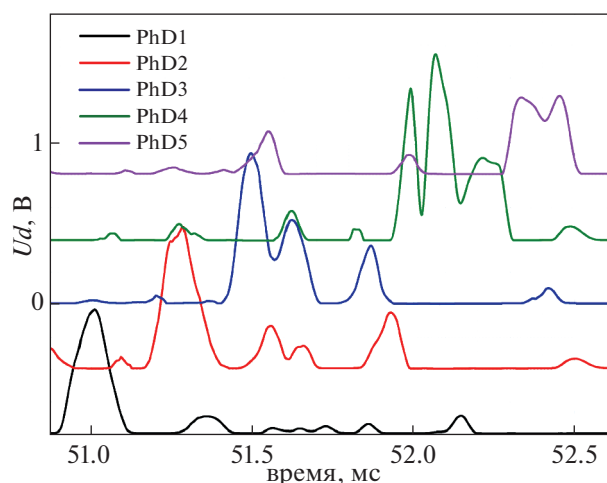


Рис. 9. Сигналы фотодиодов УФ-излучения разряда 59620. Время переднего фронта микроволнового импульса 48.25 мс.



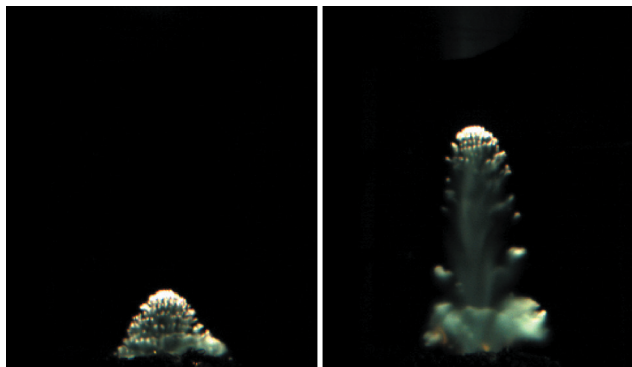


Рис. 10. Кадры разряда 56290. Мощность микроволнового излучения 200 кВт. Инициатор разряда в центре каустики пучка.

тодиоды линейки. Это означает, что в момент достижения фронтом разряда пятого фотодиода наблюдается свечение в области, смещенной на 5 см за фронт. Передний фронт импульса четвертого фотодиода (59.1 мс) перекрывается задним фронтом третьего (51.95 мс) и второго (52.0 мс) фотодиодов. Передний фронт импульса третьего фотодиода (51.4 мс) перекрывается импульсами второго фотодиода (51.65 мс, 51.85 мс, 52.0 мс).

Картина свечения разряда в области перетяжки пучка была получена и при смещении инициатора почти до центра перетяжки пучка (рис. 10, разряд 56290). Свечение головной части разряда представляет собой пять—шесть рядов яркосветящихся слегка размытых точек. На самом фронте яркость свечения точек такова, что они сливаются друг с другом. Поскольку, как упоминалось, фото является проекцией на плоскость боковой поверхности разряда, то ряды светящихся точек в глубине головной части разряда являются фото линейных разрядов. Эти линейные разряды пронизывают боковую поверхность головного плазмоида, охватываемую волновым пучком. По мере смещения разряда вдаль от перетяжки пучка за разрядом остается диффузное свечение. На фоне этого свечения регистрируются широкие области повышенной яркости относительно яркости фона. Локализованные яркие области диффузного свечения регистрируются по краям разряда и в первой четверти от поверхности инициатора. Это является свидетельством возбуждения этих локальных областей полем волны, испытывающей самофокусировку в плазме УФ-ореола головной части разряда.

Сопоставление сигналов огибающей прошедшего излучения (рис. 4 и 8) показывает, что смещение инициатора, увеличивающее длину траектории волнового пучка на 48 см, вызывает уменьшение в два раза интенсивности прошедшего излучения. Такое понижение интенсивности прошедшего излучения естественно приписать

увеличению поглощения микроволнового излучения вторичными плазмоидами за счет увеличения размера и числа плазмоидов. И это несмотря на то, что при расположении инициатора в области перетяжки волновой пучок полностью перекрывается инициатором на фронте микроволнового импульса. Таким образом, можно ожидать значительных величин (десятки процентов) энерговклада в этих областях после прохождения фронта разряда.

Данный эффект может быть использован в схемах реактора с многомодовым волноводом [12], для повышения коэффициента поглощения микроволнового излучения. Для этого необходимо использовать два отражения пучка от стенок волновода.

Эффект образования плазмоидов за фронтом разряда может иметь место в случае волны пробоя при достаточно высокой длительности микроволнового импульса в области ниже порога пробоя, где будет распространяться волна ионизации в форме самоподдерживающегося несамостоятельного (СНС) разряда. Такого эффекта можно ожидать в условиях, рассмотренных, например, в работах [13–19].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация свечения волны ионизации в подпороговом разряде в воздухе видеокамерой со временем экспозиции кадра 5 мкс показывает, что фронт разряда представляет собой плазмоид, состоящий из нитевидных разрядов, вытянутых вдоль вектора электрического поля. За головным плазмоидом существует область диффузного свечения с отдельными, локальными ярко светящимися областями. При этом фотодиоды регистрируют всплески УФ-излучения (240–360 нм) на расстоянии 5–20 см от головного плазмоида. Это свидетельствует о генерации вторичных плазмоидов в электрическом поле прошедшего через головной плазмоид микроволнового излучения.

Наблюдаемый эффект генерации вторичных плазмоидов за фронтом головного разряда качественно может быть объяснен локальным возбуждением свечения в микроволновом поле в плазме при самофокусировке кольцевого волнового пучка. Кольцевой пучок возникает за головным плазмоидом из-за поглощения центральной части Гауссова волнового пучка гиротрона.

Увеличение длины траектории волны ионизации за перетяжкой волнового пучка ведет к уменьшению интенсивности волнового пучка на его оси, прошедшего за область возбуждения разряда. Это может происходить за счет увеличения поглощения микроволн при удлинении траектории волнового пучка.

Генерация вторичных плазмоидов за головным плазмоидом повышает энергоэффективность процесса ионизации в целом.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 17-12-01352-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992. 536 с.
2. Аскарьян Г.А., Студёнов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. № 3. С. 113.
3. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 2–6 апреля 2018. Тезисы докладов. С. 223.
4. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 6. С. 572.
5. Грицинин С.И., Дорофеев А.А., Косый И.А., Магунов А.Н. // ТВТ. 1987. Т. 25. № 6. С. 1068.
6. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Давыдов А.М., Косый И.А., Нефедов В.И., Сарксян К.А., Харчев Н.К. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 5. С. 429.
7. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 9. С. 838.
8. Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Зорин В.Г., Лучинин А.Г., Семенов В.Е. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. В. 5. С. 1695.
9. Богатов Н.А., Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Тарасова Н.М. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1984. № 9. С. 32.
10. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Моряков И.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 1. С. 88.
11. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 10. С. 952.
12. Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончиков Е.М., Косый И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 5. С. 476.
13. Вихарев А.Л., Гильденбург В.Б., Ким А.В., Литвак А.Г., Семенов В.Е. Электродинамика неравновесного разряда в волновых полях // В сб.: Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР. 1988. С. 41.
14. Борисов Н.Д., Гуревич А.В., Милих Г.М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М.: ИЗМИРАН, 1986. 184 с.
15. Matveyev A.A., Silakov V.P. // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. № 4. P. 4121.
16. Cook A.M., Hammelt J.S., Shapiro M.A., Temkin R.J. // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. 100704.
17. Nakamura Y., Komurasaki K., Fukunari M., Koizumi H. // J. Appl. Phys. 2018. V. 124. P. 033303.
18. Sidorov A., Razin S., Veselov A., Viktorov M., Vodopyanov A., Luchinin A., Glyavin M. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. 093509.
19. Shimamura K., Yamasaki J., Miyawaki K., Minami R., Kariya T., Yang J., Yokota S. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. 033505.