

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОДПОРОГОВОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ СНИЖЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. К. В. Артемьев^a, Г. М. Батанов^a, Н. К. Бережецкая^a, В. Д. Борзосеков^a*, А. М. Давыдов^a, Л. В. Колик^a, Е. М. Кончечков^a, И. А. Косый^a, Д. В. Малахов^a, И. В. Моряков^a, А. Е. Петров^a, К. А. Сарксян^a, В. Д. Степахин^a, Н. К. Харчев^a

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: borzosekov@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

После доработки 05.10.2021 г.

Принята к публикации 05.10.2021 г.

Зарегистрировано изменение характеристик подпорогового микроволнового (СНС) разряда в воздухе атмосферного давления при интенсивностях волнового пучка в интервале 3.3–4.8 кВт · см⁻². Установлено качественное изменение структуры свечения разряда при переходе от более высоких к более низким интенсивностям: исчезновение структуры в виде системы контрагированных каналов головной части разряда и возникновение неоднородного диффузного свечения по всей длине разряда. Изменение структуры разряда при падении интенсивности от 4.8 до 3.3 кВт · см⁻² сопровождается падением скорости распространения фронта разряда от 1.7×10^3 до 2.8×10^2 см/с, т.е. отступлением от квадратичного закона зависимости скорости фронта от интенсивности. При этом также зарегистрировано понижение уровня колебаний интенсивности УФ-излучения за фронтом разряда.

Ключевые слова: гиротрон, микроволновый разряд, СНС-разряд, распространение разряда

DOI: 10.31857/S0367292122020020

1. ВВЕДЕНИЕ

В микроволновом подпороговом разряде при давлениях газов, близких к атмосферному, когда частота электрон-нейтральных столкновений ν_{en} больше частоты поля, существует ультрафиолетовый (УФ) ореол на фронте разряда. УФ-ореол обеспечивает развитие несамостоятельного микроволнового разряда. Возникновение волны ионизации, распространяющейся навстречу волновому пучку, т.е. движение фронта разряда по газу, происходит в результате последовательных переходов от несамостоятельного разряда к самостоятельному посредством механизма ионизационно-перегревной неустойчивости. При этом возникает скачкообразное перемещение фронта разряда со скоростями как ниже скорости звука в газе, так и существенно выше звуковой скорости [1–13].

Для сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн при развитии ионизационно-перегревной неустойчивости характерно образование на фронте разряда структуры в виде системы контрагированных каналов с высокой плотностью энерговыделения (~1 эВ на молекулу). Такая

структура представляет собой результат развития конгломерата линейчатых разрядов, преимущественно ориентированных вдоль вектора электрического поля электромагнитной волны. Из-за высокой плотности энерговыделения, такого рода разряды являются источниками ионизационного УФ-излучения. Под действием этого излучения вокруг них возникает область фотоплазмы, в которой в свою очередь под действием внешнего СВЧ-поля развивается несамостоятельный разряд, переходящий вследствие механизма ионизационно-перегревной неустойчивости в самостоятельную форму [4, 5]. Такой разряд был назван самодерживающимся несамостоятельным (СНС) разрядом.

Характерной особенностью для СНС-разрядов в воздухе является почти квадратичная зависимость скорости фронта разряда от интенсивности микроволнового излучения [6–8, 11]. Однако еще в [6] было установлено отступление от квадратичного закона при интенсивностях ниже 3 кВт · см⁻². Аналогичный результат был получен в разрядах для углекислого газа [8]. В разряде для аргона было показано, что ячеистая структура

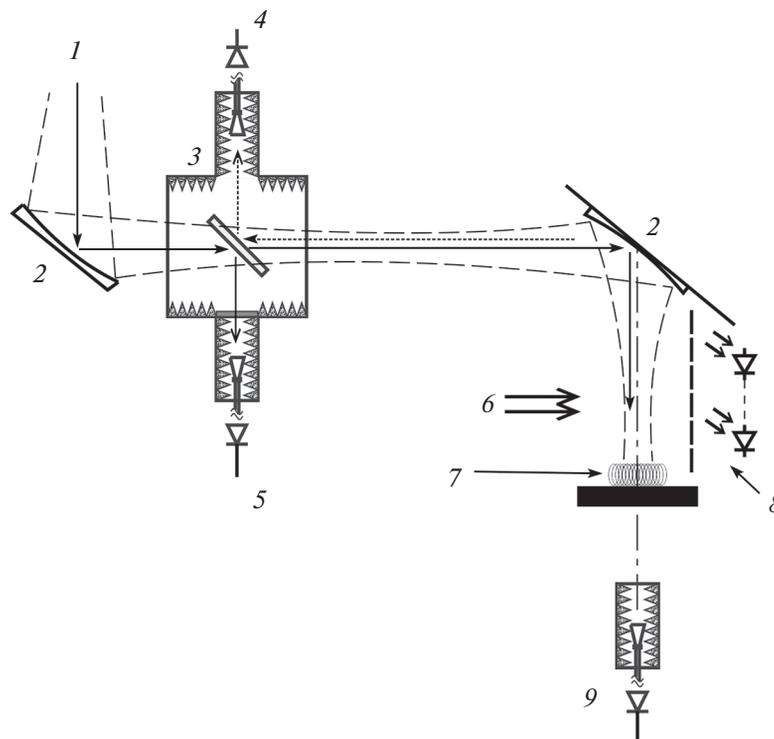


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – микроволновый пучок; 2 – фокусирующие зеркала; 3 – квазиоптический ответвитель; 4 – детекторная секция регистрации отраженного излучения; 5 – детекторная секция регистрации мощности излучения гиротрона; 6 – линия регистрации спектра излучения разряда; 7 – инициатор разряда; 8 – линейка УФ-детекторов; 9 – детекторная секция регистрации прошедшего излучения.

свечения и квадратичная зависимость скорости от интенсивности существует при интенсивностях выше $3 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ [14]. При меньших интенсивностях в аргоне структура контрагированных каналов становится более мелкой и наблюдается неоднородное диффузное свечение разряда. При этом оказалось, что скорости фронта при одинаковых интенсивностях в углекислом газе в ~ 2 раза ниже, чем в воздухе, а в аргоне выше почти на два порядка величины.

Интерес к изучению изменения характеристик СНС-разряда в воздухе при уменьшении интенсивности излучения также вызван и возможными плазмохимическими приложениями. Компанией ГИКОМ (Нижний Новгород, Россия) освоен выпуск технологических комплексов на основе гиротронов с непрерывной генерацией. Мощность излучения используемых в комплексах гиротронов несколько десятков киловатт. Именно такие гиротроны мы и рассматриваем в настоящее время как экономически доступную основу возможной промышленной установки для деструкции экологически вредных газовых примесей в воздухе атмосферного давления с помощью СНС-разряда.

2. УСЛОВИЯ И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент был выполнен по схеме, представленной на рис. 1 (стенд “Факел”) [15]. Сигнал отраженного излучения гиротрона БОРЕЦ-75/0.8 (длина волны $\lambda = 4 \text{ мм}$) регистрировался с помощью квазиоптического ответвителя и смешивался с опорным сигналом. УФ-излучение разряда в диапазоне 240–360 нм регистрировалось с помощью пяти УФ-фотодиодов GUYA-S12SD, расположенных вдоль трассы волнового пучка. Фотодиоды располагались на расстоянии 15 мм за пластиной фольгированного медью текстолита, в котором напротив фотодиодов сделаны щели в виде прямоугольников $15 \times 1 \text{ мм}$. Расстояние между щелями фотодиодов составляло 5 см и щель первого фотодиода располагалась напротив центра каустики волнового пучка. Инициатор разряда располагался в 7 см от центра каустики по трассе пучка, т.е. в области практически с максимальной интенсивностью микроволнового излучения на трассе пучка. Это обеспечивало наибольшую скорость отрыва фронта разряда от инициатора, поскольку скорость распространения подпорогового микроволнового разряда пропорциональна квадрату интенсивности излучения. Сигнал микроволнового излучения, прошедшего за инициатор, регистрировался детекторной го-

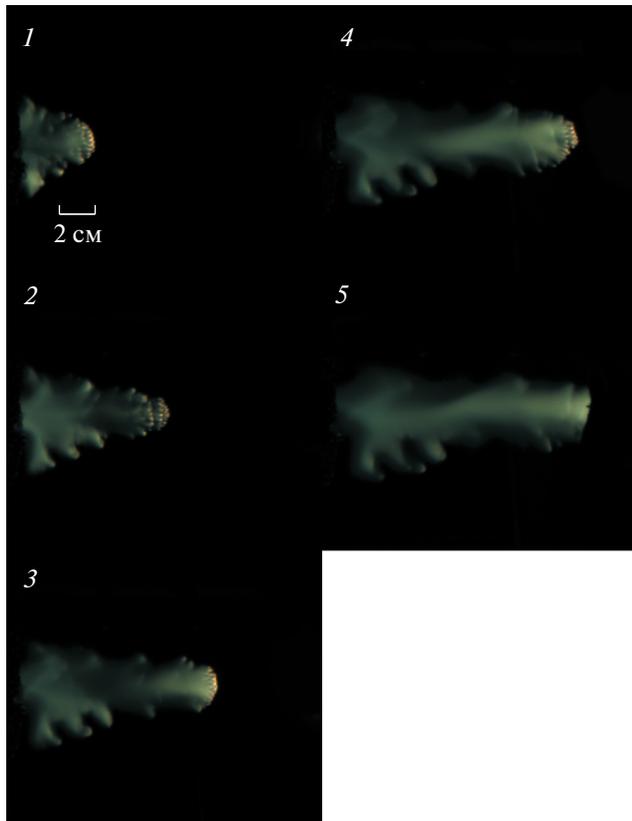


Рис. 2. Последовательные кадры разряда (#59285) при мощности микроволнового излучения 50 кВт и длительности импульса 10 мс. Экспозиция кадра 5 мкс. Интервал между кадрами 2 мс. Номера кадров указаны цифрами 1–5.

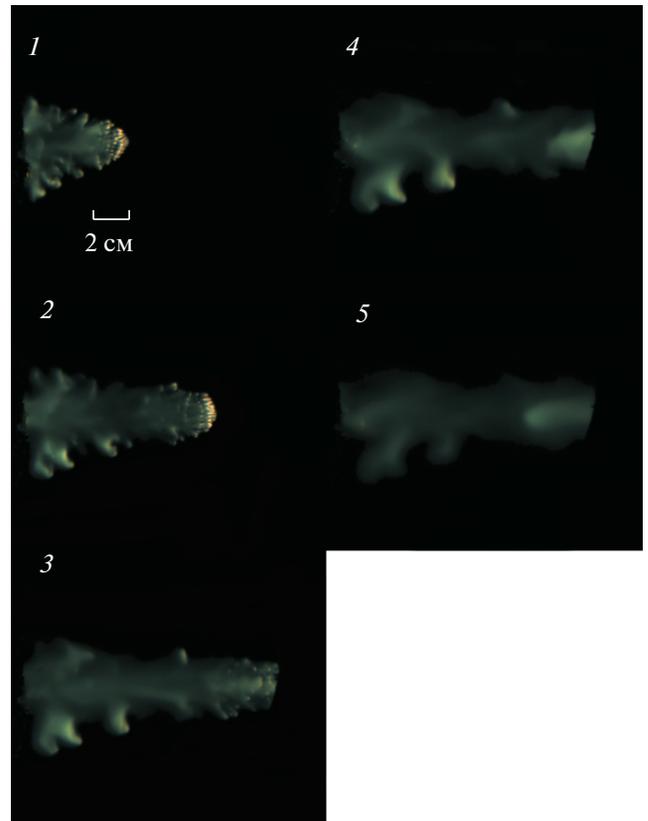


Рис. 3. Последовательные кадры разряда (#59287) при мощности микроволнового излучения 50 кВт и длительности импульса 8 мс. Экспозиция кадра 5 мкс. Интервал между кадрами 2 мс. Номера кадров указаны цифрами 1–5.

ловкой, расположенной на оси волнового пучка в 70 см от центра каустики. Для защиты детектора от перегрузки были приняты меры по уменьшению потока падающего на него излучения. Разряд в области перетяжки фотографировался с помощью камеры MARS640-815UC. Длительность экспозиции 5 мкс, частота кадров 500 Гц. Такая экспозиция позволила зарегистрировать структуру разряда и ее изменение при уменьшении интенсивности микроволнового излучения.

Эксперименты были выполнены при понижении мощности гиротрона до 50 кВт и 35 кВт. При каждом значении мощности выполнялась серия из 5–10 разрядов. Величина мощности предварительно измерялась с помощью калориметра, располагавшегося на время измерения мощности на трассе возбуждения разряда [16].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены пять кадров, следующих друг за другом через 2 мс, одного из разрядов (#59285) при мощности СВЧ-излучения 50 кВт.

Вектор электрического поля ортогонален плоскости рисунка. Отчетливо видна структура головной части разряда, представляющая собой систему контрагированных нитевидных каналов. За головной частью разряда регистрируется диффузное свечение, распределение яркости которого меняется вдоль оси разряда по мере его перемещения навстречу волновому пучку. При этом сохраняется высокий уровень яркости вблизи поверхности инициатора у его периферии, в то время как вдоль длины разряда, на большинстве представленных кадров, регистрируется довольно протяженный провал яркости. На фоне этого однородного диффузного свечения можно выделить отдельные локальные участки повышенной яркости на периферии, например, как на кадрах еще одного разряда (#59287) при мощности СВЧ-излучения 50 кВт (рис. 3).

Последовательность фотографий с интервалом между кадрами 2 мс позволяют определить скорость фронта разряда. Для разряда при мощности СВЧ-излучения 50 кВт, приведенного на рис. 2, скорость фронта падает по мере перемещения разряда по оси пучка от 1.7×10^3 до

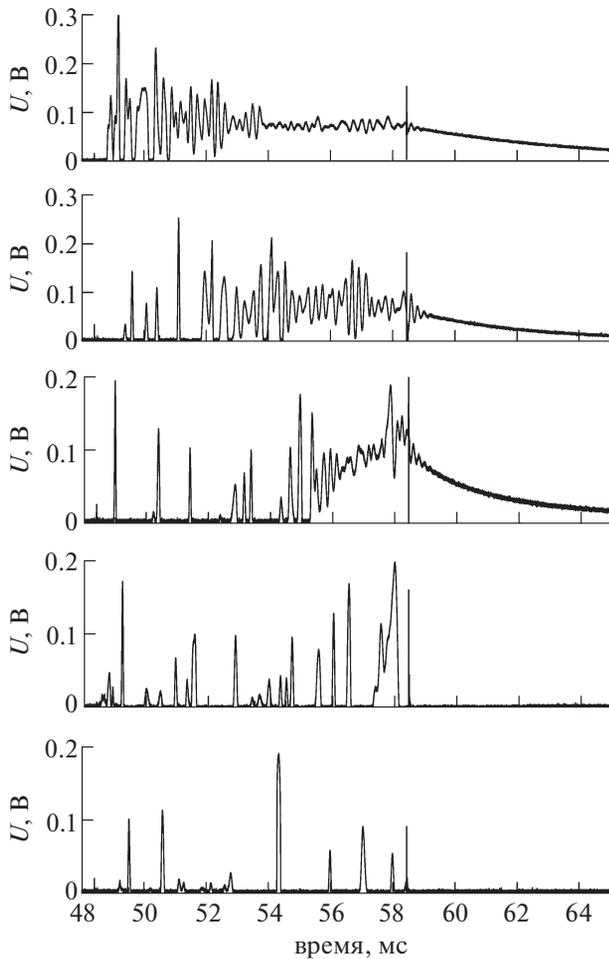


Рис. 4. Сигналы УФ-излучения фотодиодов при мощности микроволнового излучения 50 кВт для разряда, представленного на кадрах рис. 2. Верхняя кривая соответствует нижнему (ближайшему к инициатору разряда) фотодиоду, а следующие соответствуют фотодиодам, расположенным выше.

1.0×10^3 см/с. Это соответствует движению фронта от перетяжки пучка в сторону эллиптического зеркала квазиоптического тракта в более широкое сечение пучка, чем в перетяжке.

Второй способ определения скорости фронта разряда – по фронтам импульсов УФ-излучения фотодиодов (рис. 4). Определенная так скорость дает значение 1.7×10^3 см/с между 1-м и 2-м фотодиодами, 1.8×10^3 см/с между 2-м и 3-м диодами, и 1.6×10^3 см/с между 3-м и 4-м диодами.

Наконец, третий метод – определение по граничной частоте низкочастотного спектра колебаний измеренного сигнала смещения, отраженного и опорного излучений (локационный метод) дает величину скорости фронта $\sim 2 \times 10^3$ см/с в начале импульса и 1.5×10^3 см/с после 53-й мс.

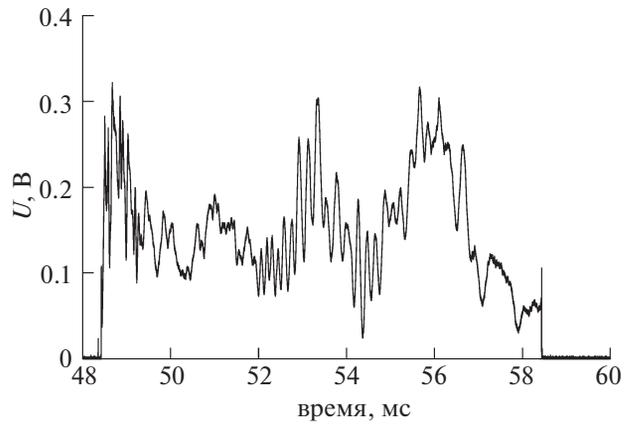


Рис. 5. Протектированные сигналы микроволнового излучения, прошедшего за инициатор разряда при мощности микроволнового излучения 50 кВт для разряда, представленного на кадрах рис. 2. Инициатор на расстоянии 7 см от перетяжки.

Новым явлением при мощностях излучения около 50 кВт, по сравнению с результатами при мощностях свыше 100 кВт, является сохранение существенного уровня УФ-излучения, регистрируемого 1-м, 2-м и 3-м фотодиодами, даже после прохождения фронта разряда (рис. 4). Это продолжительное УФ-свечение соответствует диффузному свечению на кадрах видеокамеры.

На рис. 5 приведены сигналы микроволнового излучения, регистрируемые СВЧ-детектором, который расположен на оси пучка за инициатором разряда. Как видно, средний уровень сигнала колеблется в 2–3 раза. На фоне этих медленных колебаний (500 Гц) регистрируются быстрые колебания с частотой 3–5 кГц, которая близка к частоте колебаний интенсивности УФ-излучения (рис. 4, фотодиоды 1–3). Поскольку сечение головной части разряда занимает только часть сечения волнового пучка, то за фронтом разряда, в случае значительного поглощения микроволн в головном плазмоиде, мог бы возникать кольцевой пучок. Минимальный характерный размер (радиус) гауссова пучка в перетяжке в этой конфигурации составляет ~ 1.4 см, а радиус яркосветящейся ячеистой структуры на фронте составляет ~ 1.1 см. Исходя из гауссова распределения поля в пучке, это означает, что в головном плазмоиде поглотилось бы не более 80% мощности пучка, а не менее 20% мощности оставалось бы в кольцевом пучке. Кольцевая конфигурация микроволнового поля за фронтом разряда в плазме, релаксирующей за фронтом, может приводить к самовоздействию пучка [17] аналогично процессу “банановой” самофокусировки в лазерных пучках [18, 19].

При понижении мощности излучения до 35 кВт (интенсивность на оси перетяжки $3.3 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$)

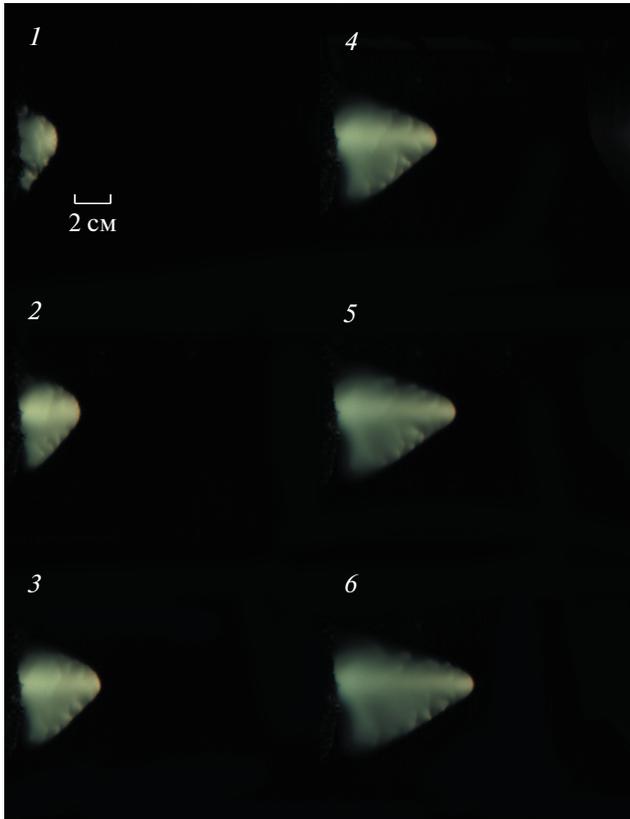


Рис. 6. Последовательные кадры разряда (#59282) при мощности микроволнового излучения 35 кВт и длительности импульса 20 мс. Экспозиция кадра 5 мкс. Интервал между кадрами 2 мс. Номера кадров указаны цифрами 1–6.

обнаруживается качественное изменение характеристик разряда. Картина свечения разряда (#59282), приведенная на кадрах рис. 6 при мощности СВЧ-излучения 35 кВт резко отличается от картины свечения при мощности 50 кВт. Бросается в глаза отсутствие ячеистой структуры свечения на фронте разряда. За головной частью разряда по всей ширине волнового пучка развивается диффузное свечение, ширина которого растет от фронта к инициатору. При этом наибольшая яркость оказывается на оси пучка. Временной ход сигнала микроволнового излучения (рис. 7), принимаемого СВЧ-детектором за инициатором разряда во многом повторяет сигнал при большей мощности (рис. 5), в том числе присутствуют быстрые колебания (~ 2 кГц). Однако, медленные (временной масштаб 4–6 мс) колебания не достигают уровня, сравнимого с уровнем на фронте микроволнового импульса. Сопоставление скоростей перемещения фронта разряда при уменьшении мощности СВЧ-излучения от 50 до 35 кВт демонстрирует падение скорости от 1.7×10^3 до 2.8×10^2 см/с, т.е. в 6 раз, тогда как квадрат мощности падает в 2 раза. Столь сильное падение ско-

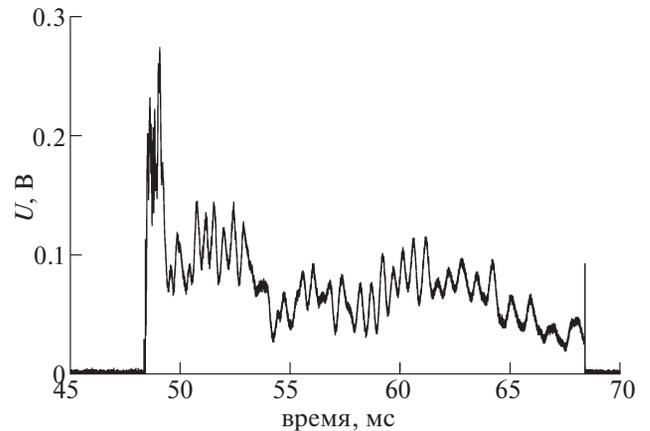


Рис. 7. Протектированные сигналы прошедшего за инициатор излучения при мощности микроволнового излучения 35 кВт для разряда, представленного на кадрах рис. 6.

рости находится в противоречии с результатом работы [6]. Возможно, это связано с тем, что в [6] изучалось распространение разряда в многомодовом волноводе, когда возможно усиление поля из-за отражения от стенок. Таким образом, происходит нарушение квадратичной зависимости скорости фронта от мощности, характерной для интервала мощностей выше 100 кВт. При длительности импульса 20 мс длина разряда оказывается порядка 7 см, т.е. меньше характерной длины каустики волнового пучка (20 см). Еще одно из наблюдаемых отличий – падение уровня колебаний (всплесков) на фоне квазипостоянной интенсивности УФ-излучения (рис. 4 и 8). Наличие одиночных коротких всплесков интенсивности УФ-излучения на фотодиодах 2–5 при мощности микроволнового излучения 35 кВт (рис. 8), видимо, является паразитным сигналом, так как длина разряда на кадрах рис. 6 не превышает 10 см (фронт разряда не достигает 4 и 5 фотодиода).

За передним фронтом микроволнового импульса происходит уменьшение прошедшего сигнала в три раза для обеих мощностей СВЧ-излучения. Но это сильно отличается от практически полного перекрытия пучка длительностью до 0.8 мс, наблюдавшегося для больших мощностей микроволнового излучения [17].

Кадры разряда при мощности микроволнового пучка 35 кВт (рис. 6) имеют экспозицию 5 мкс, а интервалы между кадрами составляют 2 мс. При этом на кадрах столб разряда по оси пучка тянется от фронта разряда до самого инициатора. Это может говорить о том, что либо газ вблизи инициатора за 12 мс несколько не остыл, либо СВЧ-пучок проникает в плазму разряда до инициатора, что составляет ~ 7 см. В первом случае такая же картина была бы для любых мощностей микро-

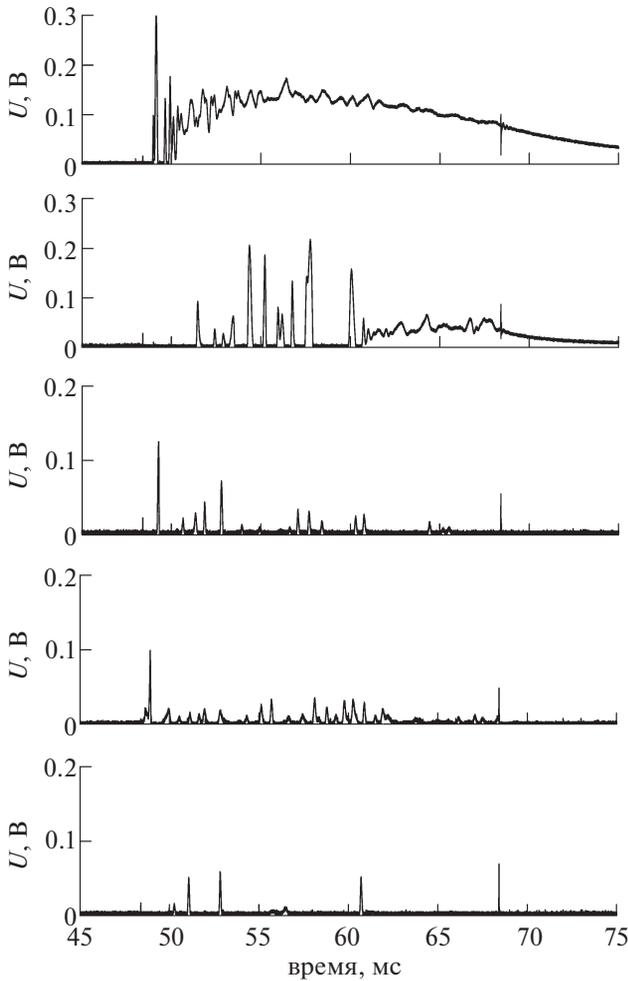


Рис. 8. Сигналы УФ-излучения фотодиодов при мощности микроволнового излучения 35 кВт для разряда, представленного на кадрах рис. 6. Верхняя кривая соответствует нижнему (ближайшему к инициатору разряда) фотодиоду, а следующие соответствуют фотодиодам, расположенным выше.

волнового пучка и газов, что не наблюдается. Во втором случае концентрация электронов в разряде должна быть меньше критической, которая для длины волны 4 мм будет составлять $\approx 7 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Пусть концентрация электронов $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а температура электронов $T_e = 0.5 \text{ эВ}$. Тогда для газовой температуры 6000 К вблизи оси СВЧ-пучка частота электрон-нейтральных столкновений будет составлять $\nu_{en} \approx 5.9 \times 10^{10} \text{ с}^{-1}$ (сечения брались по азоту), частота электрон-ионных столкновений $\nu_{ei} \approx 1.2 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, а коэффициент затухания поля $\alpha \approx 0.15 \text{ см}^{-1}$. То есть характерный размер, на котором будет поглощаться СВЧ-пучок $1/\alpha \approx 6.6 \text{ см}$, что соответствует рис. 6. При более высоких значениях энергии электронов будет больше сечение их упругих столкновений с молекулами азота, более высокая частота электрон-

нейтральных столкновений и, соответственно, меньше характерный размер поглощения СВЧ-пучка. Для концентрации электронов $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при энергиях электронов 0.5–2 эВ характерный размер поглощения СВЧ-пучка будет варьироваться в пределах 20–70 см. Вероятно, разряд при мощности СВЧ-пучка 35 кВт является несамостоятельным. Его параметры будут исследоваться в будущих экспериментах.

Регистрация эмиссионного спектра разряда, имеющего континуум, и построение его в координатах Вина (рис. 9) позволяет определить температуру газа [20, 21]. Температура разряда, определенная по континууму (на рис. 9), для мощности СВЧ-пучка 50 кВт составляет $\sim 5500 \text{ К}$ а 35 кВт – $\sim 5100 \text{ К}$. Интенсивность теплового излучения зависит от температуры в четвертой степени. Температура в разряде должна падать от оси к периферии. Тогда определяемая температура относится к области разряда вблизи оси СВЧ-пучка, т.е. она близка к максимальной температуре в разряде. Такие же высокие значения температуры регистрировались при мощностях выше 100–150 кВт в разрядах с ячеистой структурой фронта. Эти температуры были приписаны локальным областям разряда с объемом порядка 0.1 объема волнового пучка. В ином случае средний удельный энерговклад $q = S_0/u$ (S_0 – интенсивность микроволнового излучения, u – скорость фронта разряда) был бы недостаточен для того, чтобы нагреть весь объем газа в волновом пучке выше 1 кК. Однако падение скорости перемещения разряда при мощностях 35–40 кВт ниже $1 \times 10^3 \text{ см/с}$ приводит к эффективному нагреву всей массы газа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При мощности микроволнового излучения ниже 50 кВт (интенсивность в перетяжке $4.8 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$) происходит качественное (меняется вид и динамика распространения разряда) изменение характеристик подпорогового разряда в воздухе: исчезает мелкочаеистая структура фронта разряда, возникающая как следствие развития ионизационно-перегревной неустойчивости в несамостоятельном микроволновом разряде УФ-ореола головной части разряда; происходит резкое падение скорости распространения фронта разряда. При этом максимальная температура разряда, определяемая по континууму, сильно не изменяется.

Таким образом, при понижении интенсивности микроволнового излучения до $3.3 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$ происходит изменение механизма распространения и поддержания подпорогового микроволнового разряда, а также изменение структуры разряда. Можно предположить, что разряд переходит в

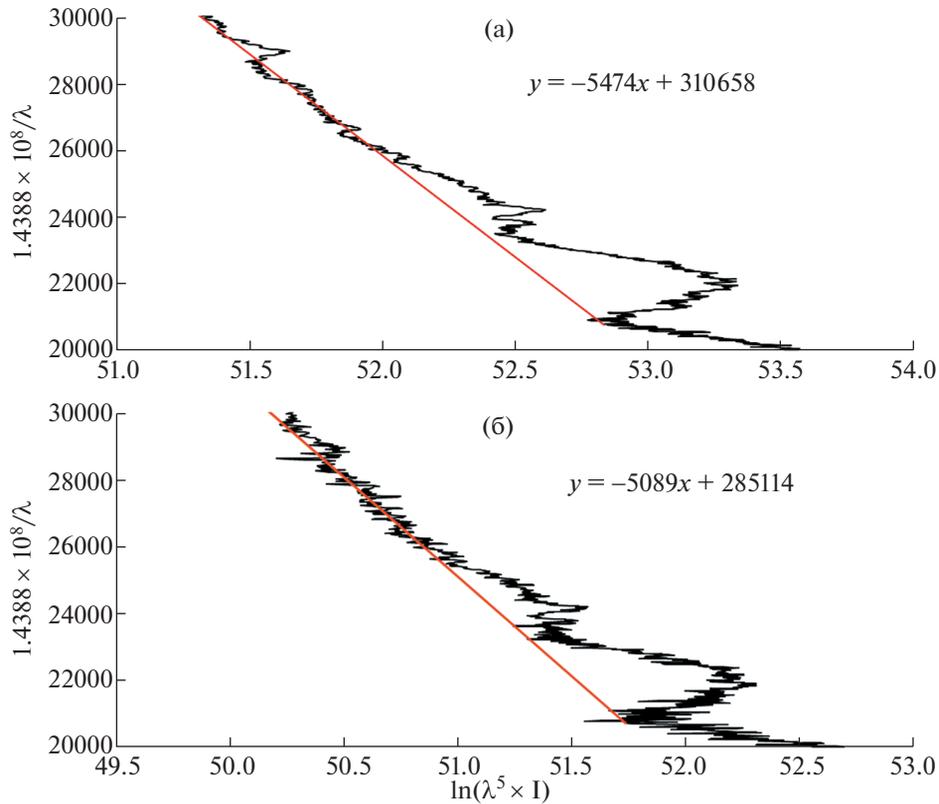


Рис. 9. Усредненные по нескольким разрядам спектры излучения в координатах Вина: а) мощность микроволн 50 кВт (разряды #59675–59677); б) мощность микроволн 35 кВт (разряды #59679–59686).

режим теплопроводностного распространения, характерного для разрядов в лазерных пучках [22]. Это ведет к повышению удельного энергозатрата в газ и замедлению процессов охлаждения, что может вызвать изменение течения плазмохимических реакций. Поэтому в дальнейших исследованиях необходимо изучить эффективность деструкции CO_2 , SO_2 , H_2S , CH_4 , меркаптанов (а также примесей этих экологически вредных газов к воздуху) в микроволновом подпороговом разряде при интенсивностях излучения до $3.3 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Это необходимо для сравнения с уже исследованной эффективностью деструкции примесей в разрядах, характерных для интенсивностей излучения $6\text{--}10 \text{ кВт} \cdot \text{см}^{-2}$, и определения наиболее эффективной формы микроволнового подпорогового разряда для плазмохимических и экологических прикладных задач. В то же время необходимо сравнить и наработку окислов азота при разрядах в воздухе. С одной стороны, окислы азота являются опасной для жизни и здоровья человека примесью в воздухе, и их образование при очистке от воздуха от экотоксикантов разрядом необходимо строго контролировать. А с другой стороны, энергоэффективная генерация значительного количества окислов азота в разрядах в

воздухе атмосферного давления может быть интересна химической промышленности.

Работа выполнена за счет средств РФФ проект № 17-12-01352-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А., Магуннов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. // Вопросы физики плазмы и плазменной электроники. Тр. ФИАН. 1989. Т. 160. С. 174.
2. Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г., Косый И.А., Семенов В.Е. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР. 1988. С. 136.
3. 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.
4. Бородачева Т.В., Голубев С.В., Зорин В.Г., Еремеев А.Г., Семенов В.Е. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. С. 107.
5. Бродский Ю.Я., Голубев С.В., Зорин В.Г., Лучинин А.Г., Семенов В.Е. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. С. 1695.
6. Бродский Ю.Я., Венедиктов И.П., Голубев С.В., Зорин В.Г., Косый И.А. // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. С. 187.
7. Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., Davydov A.M., Kolik L.V., Konche-

- kov E.M., Kossyi I.A., Petrov A.E., Sarksyun K.A., Ste-pakhin V.D., Kharchev N.K.* // Plasma Phys. Reps. 2018. V. 44. P. 1146.
8. *Артемов К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончев Е.М., Коссий И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 838.
9. *Cook A.M., Hammelt J.S., Shapiro M.A., Temkin R.J.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. P. 100704.
10. *Nakamura Y., Komurasaki K., Fukunari M., Koizumi H.* // J. Appl. Phys. 2018. V. 124. P. 033303.
11. *Tabata K., Harada Y., Nakamura Y., Komurasaki K., Koizumi H., Kariya T., Minami R.* // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. P. 063301.
12. *Sidorov A., Razin S., Veselov A., Viktorov M., Vodopyanov A., Luchinin A., Glyavin M.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. 093509.
13. *Shimamura K., Yamasaki J., Miyawaki K., Minami R., Kariya T., Yang J., Yokota S.* // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 033505.
14. *Артемов К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончев Е.М., Коссий И.А., Моряков И.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. С. 1235.
15. *Артемов К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Борзосеков В.Д., Давыдов А.М., Колик Л.В., Кончев Е.М., Коссий И.А., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 952.
16. *Kharchev N.K., Batanov G.M., Kolik L.V., Malakhov D.V., Petrov A.Y., Sarksyun K.A., Skvortsova N.N., Ste-pakhin V.D., Belousov V.I., Malygin S.A., Tai Y.M.* // Rev. Scientific Instruments. 2013. V. 84. P. 013507.
17. *Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Колик Л.В., Кончев Е.М., Малахов Д.В., Петров А.Е., Сарксян К.А., Степахин В.Д., Харчев Н.К.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 572.
18. *Аскарьян Г.А., Студенов В.В.* // Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 10. С. 113.
19. *Аскарьян Г.А., Чистый И.Я.* // ЖЭТФ. 1970. Т. 58. С. 133.
20. *Батанов Г.М., Бережецкая Н.К., Копьев А.В., Коссий И.А., Магунов А.Н.* // ТВТ. 2008. Т. 46. С. 135.
21. *Магунов А.Н.* Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.
22. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992. 536 с.