

Разряд в атмосфере в гауссовом пучке подпороговых миллиметровых волн

К. В. Артемьев⁺, Г. М. Батанов⁺, Н. К. Бережецкая⁺, В. Д. Борзосексов^{+*}, Л. В. Колик⁺, Е. М. Кончечков^{+*1)},
И. А. Косый⁺, Д. В. Малахов^{+*#}, А. Е. Петров^{+*}, К. А. Сарксян⁺, В. Д. Степахин^{+*}, Н. К. Харчев⁺

⁺ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

^{*} Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Минздрава России, 117997, Москва, Россия

[#] Московский технологический университет (МИРЭА), 119454 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 декабря 2017 г.

После переработки 12 декабря 2017 г.

С помощью оптической и микроволновой диагностики измерены скорости распространения подпорогового разряда, возбуждаемого в воздухе при атмосферном давлении импульсным микроволновым пучком с гауссовским распределением поля и длиной волны 4 мм при интенсивности до 30 кВт/см². Показано, что при движении фронта разряда по трассе пучка в область усиливающегося микроволнового поля происходит рост скорости от дозвуковых ($\sim 10^4$ см/с) до сверхзвуковых ($\sim (6-8) \cdot 10^4$ см/с), а при движении в область ослабления поля – падение скорости от сверхзвуковых к дозвуковым. Установлено, что максимальная температура газа в разряде при скоростях $\sim 10^4$ см/с достигает ~ 5.3 кК.

DOI: 10.7868/S0370274X18040033

В 80-х годах прошлого века при изучении подпороговых микроволновых разрядов, инициированных в газах, либо в сфокусированных волновых пучках, либо в сверхразмерных волноводах [1–4], была обнаружена новая форма разряда, скорость распространения которого не могла быть объяснена известными для лазерных разрядов теплопроводным, диффузионным или радиационным механизмами распространения [5, 6].

Тогда же было установлено, что такой подпороговый разряд характеризуется одновременным существованием области самостоятельного разряда, в котором напряженность поля выше пробойного, и области несамостоятельного разряда, в котором ионизация обеспечивается УФ-излучением из области самостоятельного разряда [1, 2].

Было предложено рассматривать движение такого разряда по трассе микроволнового пучка как результат развития в области несамостоятельного разряда ионизационно-перегревной неустойчивости [7] в виде нитевидных разрядов вдоль вектора микроволнового поля, перехвата мощности микроволн этими нитевидными разрядами и, вследствие этого, развития самостоятельного разряда в области несамостоятельного.

Линейная и нелинейная теория ионизационно-перегревной неустойчивости в микроволновых полях была развита в [8, 9]. Ионизационно-перегревная неустойчивость в микроволновом поле несамостоятельного разряда, ионизация газа в котором создавалась УФ-излучением специального кольцевого разряда была изучена экспериментально в [10]. В последние годы данный тип разрядов был использован в некоторых плазмохимических приложениях [11–14] и было предложено называть его самоподдерживающимся несамостоятельным разрядом (СНС) [11].

В миллиметровом диапазоне длин волн с помощью мощных микросекундных импульсов излучения в последние годы была изучена динамика плотности плазмы и газа в волнах пробоя [15–18]. Вопросы газодинамических явлений при распространении СНС, т.е. глубоко подпороговых, неравновесных разрядов, остаются сейчас важнейшими при их описании. В частности, вопрос о дозвуковых и сверхзвуковых скоростях движения²⁾. Между тем, в миллиметровом диапазоне длин волн до сих пор, в основном, регистрировались лишь дозвуковые скорости их распространения [3, 11–14, 19, 20].

Поскольку электромагнитное поле неоднородно вдоль пучка в фокальной области, естественно ожи-

¹⁾e-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

²⁾Далее всюду имеются в виду скорости в невозмущенном разрядом газе.

дать изменение скорости распространения разряда по трассе микроволнового пучка при достаточной протяженности каустики и длительности импульса излучения.

В экспериментах был использован гауссов пучок 4 мм гиротрона мощностью 0.1–0.4 МВт при длительности импульсов 1–6 мс. Постановка эксперимента была аналогична [10]. Только в качестве источника УФ-излучения служили искровые разряды, возбуждаемые краевым полем микроволнового пучка в контактах металлической спирали со стенкой диэлектрического цилиндра, соосного с микроволновым пучком³⁾. Фотографии разряда с экспозицией 0.4 мс и 0.2 мс были получены с помощью фоторегистратора FastecImagingIn250M312. Ультрафиолетовое свечение регистрировалось с помощью пяти коллимированных фотодиодов C-UVAS12SD с полосой чувствительности 240–360 нм. Диоды располагались вдоль оси микроволнового пучка в 10 см от нее с интервалом друг от друга 5 см.

Излучение, отраженное от разряда, регистрировалось с помощью квазиоптического ответвителя [21] и смешивалось с опорным сигналом. Таким образом, низкочастотные биения протектированного сигнала смещения отраженного и опорного сигналов регистрировали изменение фазы отраженного излучения на 2π при смещении отражающего фронта разряда на $\lambda_0/2 = 2$ мм.

Измерения были выполнены при двух положениях инициатора на оси микроволнового пучка: одно положение – за фокусом на удалении ~ 10 см, второе – ~ 60 см. В первом положении измерения были выполнены при варьировании мощности от 0.15 до 0.35 МВт, во втором при мощности 0.38 МВт. Максимальная интенсивность в фокусе ~ 30 кВт/см².

При расположении инициатора в слабом поле (второе положение) фото регистрирует яркосветящуюся головную часть, протяженность которой менее двух поперечников (рис. 1). Нетрудно видеть, что протяженность яркого свечения определяется длительностью экспозиции, что говорит об узости области яркого свечения. Узость импульса УФ-свечения (0.1–0.2 мс) и его сокращение по мере удаления разряда от области инициации свидетельствуют о том, что энерговыделение происходит в узкой головной части разряда протяженностью 1–2 см. При этом скорость перемещения головной части возрастает по мере смещения в область сильного поля от $\sim 1.8 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^4$ см/с (рис. 2). Наиболее полно об изменении ско-

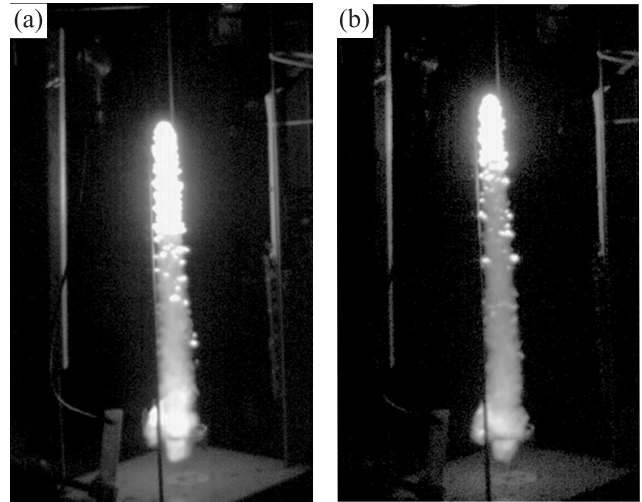


Рис. 1. Покадровые фотографии двух разрядов с задержкой относительно начала разряда 1.5 мс с экспозицией: (а) – 0.4 мс, (б) – 0.2 мс. Разряды 50096, 50098. Мощность 0.38 МВт

рости движения разряда удается проследить по изменению частоты модуляции сигнала смещения отраженного и опорного излучений. На рис. 2б отчетливо регистрируется увеличение частоты модуляции к концу микроволнового импульса. Количественный результат удается получить при построении фурье-спектров сигнала модуляции смещения отраженного и опорного излучений. На рис. 2с представлены фурье-спектры для двух моментов времени со скользящим окном длительностью 0.1 мс (10^3 отсчетов)⁴⁾. Отдельные компоненты спектра, по-видимому, отражают сложную пространственную структуру отражающей поверхности головной части разряда и динамику ее деформации. При этом, однако, четко регистрируется верхняя граница спектра, что позволяет построить зависимость граничной частоты от времени, выбрав соответствующий масштаб уровня спектральной составляющей для граничной частоты (рис. 2д). После отрыва разряда от инициатора с задержкой 0.5 мс от переднего фронта микроволнового импульса граничная частота возрастает от ~ 20 до ~ 60 кГц, что соответствует росту скорости от $4 \cdot 10^3$ до $1.2 \cdot 10^4$ см/с. Далее скорость слабо меняется в течение ~ 1 мс. После 2-ой миллисекунды происходит рост граничной частоты, что соответствует росту скорости до $6\text{--}7 \cdot 10^4$ см/с. Причем имеет место совпадение момента ускорения разряда по отраженному сигналу и сигналу УФ-излучения.

³⁾ В экспериментах были использованы и другие конструкции для создания начальной ионизации воздуха.

⁴⁾ Таким образом, погрешность в определении скорости зависит от разрешения по частоте, т.е. длительности выборки (0.1 мс), и составляет $\sim 2 \cdot 10^3$ см/с.

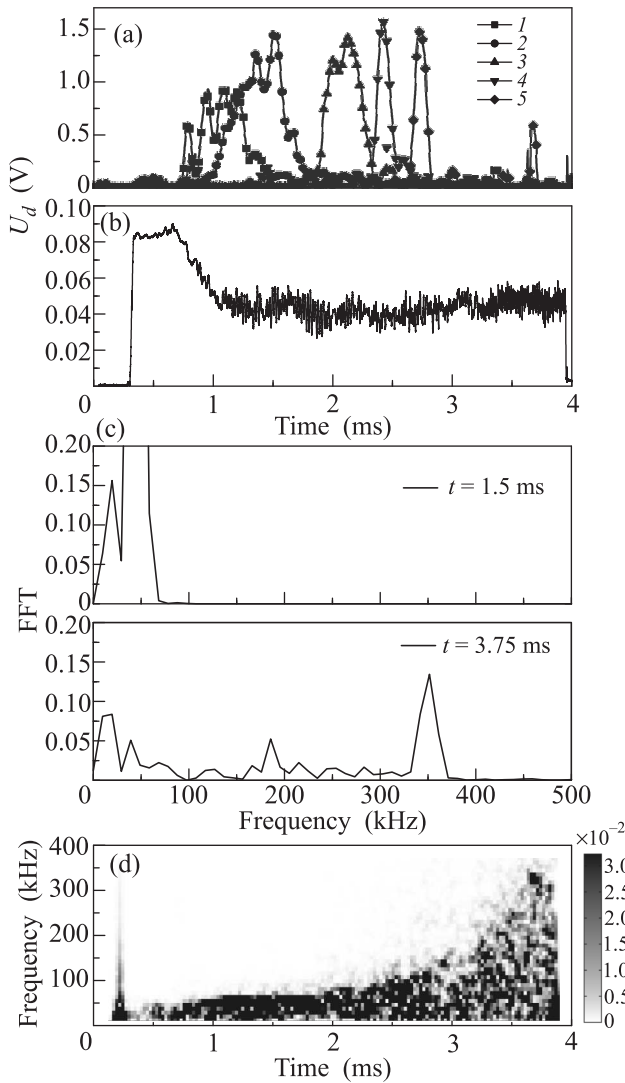


Рис. 2. Сигналы УФ-диодов (а), протектированного сигнала сложения опорного и отраженного излучений (б), и фурье-спектры последнего (с) для моментов времени от начала разряда: 1.5 и 3.75 мс и эволюция спектров Фурье (д). Разряд 50094. Мощность 0.38 МВт

При положении инициатора близко к фокусу при мощности 0.15 МВт (рис. 3) после отрыва разряда от инициатора сначала в течение 1-ой миллисекунды наблюдается ускорение разряда, а затем торможение вплоть до окончания микроволнового импульса. Увеличение микроволновой мощности до 0.3 МВт приводит к быстрому нарастанию скорости разряда уже на переднем фронте микроволнового импульса. Далее происходит спад скорости и замедление разряда к концу импульса до $1 \cdot 10^4$ см/с.

Таким образом, скорость движения разряда определяется напряженностью микроволнового поля на трассе пучка и меняется в широких пределах от

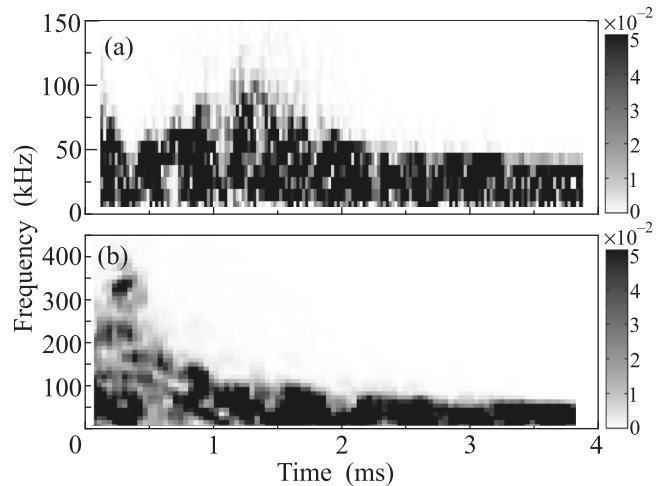


Рис. 3. Эволюция фурье-спектров смещения опорного и отраженного излучений: (а) – мощность 0.15 МВт, разряд 50151; (б) – мощность 0.35 МВт, разряд 50162

дозвуковых до сверхзвуковых. Максимальная скорость в фокальной плоскости растет в 3.5–4 раза при росте мощности от 0.15 до 0.35 МВт (см. рис. 3), т.е. скорость растет пропорционально примерно третьей степени напряженности микроволнового поля, что соответствует результатам работы [2] для сантиметрового диапазона длин волн, в которой экспериментально была померена зависимость скорости от мощности и на основе модели ионизационно-перегревной неустойчивости была рассчитана данная зависимость. В дальнейшем мы надеемся построить зависимость скорости от напряженности микроволнового поля и ее распределение вдоль трассы пучка.

Как следствие изменения скорости разряда вдоль трассы пучка является изменение локальной плотности энерговыделения в газе, а, следовательно, и распределения вдоль трассы параметров плотности плазмы, температуры газа и плотности радикалов и возбужденных частиц. В настоящей работе методом построения спектра свечения разряда в планковских переменных [22] с помощью спектрометра Avaspec 2048 при мощности излучения 0.38 МВт были измерены максимальные температуры газа на выходе из инициатора и в 18 см от него по трассе пучка. Значение температуры оказалось равным 5.3 кК, что и соответствует близости скоростей головной части разряда на этих участках трассы.

Представленные результаты расширяют возможности использования разрядов данного типа при высоких скоростях течения газов.

Работа поддержана Российским Научным фондом, проект # 17-12-01352.

1. Н. А. Богатов, Ю. Я. Бродский, С. В. Голубев, С. И. Грицинин, В. Г. Зорин, И. А. Косский, Н. Н. Тарасова, Кр. сообщения по физике ФИАН **9**, 32 (1984).
2. G. M. Batanov, S. I. Gritsinin, I. A. Kossyi, A. N. Magunov, V. P. Silakov, and N. M. Tarasova, *Plasma Physics and Plasma Electronics*, ed. by L. M. Kovrizhnykh, Nova Science Publishers, Commack (1985), p. 241.
3. Ю. Я. Бродский, С. В. Голубев, В. Г. Зорин, Н. Г. Лучинин, В. Е. Семенов, ЖЭТФ **84**(5), 1695 (1983).
4. С. В. Голубев, С. И. Грицинин, В. Г. Зорин, И. А. Косский, В. Е. Семенов, *Высокочастотный разряд в волновых полях*, ИПФ АН СССР, Горький (1988), с. 136.
5. Ю. П. Райзер, *Лазерная искра и распространение разрядов*, Наука, М. (1974).
6. В. И. Фишер, *Высокочастотный разряд в волновых полях*, ИПФ АН СССР, Горький (1988), с. 230.
7. Е. П. Велихов, В. Д. Письменный, А. Т. Рахимов, УФН **122**(3), 419 (1977).
8. В. Б. Гильденбург, А. В. Ким, *Физика плазмы* **6**(4), 904 (1980).
9. А. В. Ким, Г. М. Фрайман, *Физика плазмы* **9**(5), 613 (1983).
10. В. Г. Аветисов, С. И. Грицинин, А. В. Ким, И. А. Косский, А. Ю. Костинский, М. А. Мисанян, А. И. Надеждинский, Н. А. Тарасова, А. Н. Хуснутдинов, Письма в ЖЭТФ **51**(5), 306 (1990).
11. I. A. Kossyi, *Intern. Zvenigorod Conf. on Plasma and Contr. Fusion.* (2016), p. 51.
12. I. A. Kossyi, G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, A. M. Davidov, K. A. Sarksyian, and N. K. Kharchev, *43rd Conf. on Plasma Physics EPS*, Proc. Leuven, Belgium (2016), p. 1.
13. N. K. Kharchev, G. M. Batanov, N. K. Berezhetskaya, V. D. Borzosekov, L. V. Kolik, E. M. Konchekov, I. A. Kossyi, D. V. Malakhov, A. E. Petrov, K. A. Sarksyian, and V. D. Stepakhin, *Strong Microwaves and Terahertz waves: Sources and Applications*, 10th Intern. Workshop. (2017), pp. 99–100.
14. К. В. Артемьев, Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, А. М. Давыдов, Е. М. Кончечков, И. А. Косский, К. А. Сарксян, В. Д. Степахин, Н. К. Харчев, *Intern. Zvenigorod Conf. on Plasma and Contr. Fusion.* (2016), p. 240.
15. A. Cook, M. Shapiro, and R. Temkin, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 011504 (2010).
16. S. C. Schaub, J. S. Hummelt, W. C. Guss, M. A. Shapiro, and R. J. Temkin, *Phys. Plasmas* **23**, 023512 (2016).
17. V. E. Semenov, E. I. Rakova, M. Yu. Glyavin, and G. S. Nusinovich, *Phys. Plasmas* **23**, 073109 (2016).
18. V. E. Semenov, E. I. Rakova, V. P. Tarakanov, M. Yu. Glyavin, and G. S. Nusinovich, *Phys. Plasmas* **22**, 092308 (2015).
19. Н. А. Богатов, С. В. Голубев, В. Г. Зорин, *Физика плазмы* **12**(11), 1369 (1986).
20. К. В. Артемьев, Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, А. М. Давыдов, Е. М. Кончечков, И. А. Косский, К. А. Сарксян, В. Д. Степахин, К. К. Харчев, *XLII Междунар. Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС*, Москва (2015).
21. Г. М. Батанов, В. Д. Борзосеков, Д. В. Малахов, К. А. Сарксян, В. Д. Степахин, Н. К. Харчев, *Инженерная физика* **10**, 56 (2013).
22. Г. М. Батанов, Н. К. Бережецкая, В. А. Копьев, И. А. Косский, А. Н. Магунов, ТВТ **46**(1), 135 (2008).