

04

Динамика разряда низкого давления, поддерживаемого мощным излучением терагерцевого диапазона частот в аргоне

© А.В. Сидоров, А.П. Веселов, А.В. Водопьянов, А.А. Ананичев, М.Ю. Глявин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: alexsv@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2026 г.

В окончательной редакции 4 августа 2026 г.

Принято к публикации 5 августа 2026 г.

Представлены результаты исследований пространственной динамики разряда в аргоне в области низких давлений газа (0.3–3 Torr). Разряд поддерживался мощным импульсным излучением гиротрона (до 250 kW) с частотой 250 GHz. В этих условиях частота столкновений электронов с нейтральными атомами существенно меньше круговой частоты греющего плазму электромагнитного поля, и определяющее влияние на динамику разряда, по-видимому, оказывают эффекты, обусловленные усилением поля в области плазменного резонанса. Проведено исследование скорости распространения разряда в различных условиях. Обсуждаются механизмы распространения данного разряда.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, газовый разряд, распространение разряда.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63879.20845

Терагерцевый (THz) диапазон занимает промежуточное положение между ИК- и СВЧ-диапазонами, которые в настоящее время достаточно хорошо освоены как в плане создания источников излучения в этих диапазонах, так и в плане их использования. В то же время этот диапазон обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии, медицины и техники [1–4].

С помощью мощного THz-излучения возможно создание плотной плазмы и управление ее параметрами, что может быть использовано в исследованиях реализации управляемой реакции термоядерного синтеза, а также применено для создания точечных плазменных источников ультрафиолетового излучения [5]. В XXI веке исследования в THz-диапазоне относятся к наиболее перспективным направлениям междисциплинарных исследований [4].

Если говорить о применении данного излучения для создания и поддержания плотной плазмы или даже скорее о физике газового разряда, поддерживаемого излучением электромагнитных волн THz-диапазона частот, то в указанной области определенный прогресс наблюдался только в последние 15 лет, что связано с существенным прогрессом в создании мощных источников THz-излучения киловаттных уровней мощностей: гиротронов и лазеров на свободных электронах [6,7]. В то время как в соседних областях спектра взаимодействие электромагнитных волн с плазмой изучается уже более полувека [8,9].

Настоящая работа посвящена исследованию пространственной динамики разряда, поддерживаемого в инертных газах в сфокусированных пучках волн THz-диапа-

зона частот. Уже в первых экспериментах по созданию лазерной искры [9] было обнаружено интересное явление, связанное с распространением разряда навстречу или по греющему излучению. Впоследствии было показано, что распространение разряда имеет много общего с процессами горения [9]. Также данное явление было подробно исследовано в СВЧ-диапазоне [10–15], в первую очередь в воздухе атмосферного давления [12], хотя было и несколько работ и по распространению СВЧ-разряда в инертных газах [10,13,14]. Следует отметить, что интерес к распространению СВЧ-разряда в инертных газах не ослабевает до сих пор [15].

В настоящей работе в отличие от более ранних исследований, посвященных THz-разряду в инертных газах [16,17], распространение разряда изучается при значительно более низких давлениях (0.3–3 Torr). В этих условиях, когда частота столкновений электронов с нейтральными атомами (ν) существенно меньше круговой частоты (ω) греющего плазму электромагнитного поля ($\nu/\omega \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ для указанного диапазона давлений и частоты поля 250 GHz), определяющее влияние на динамику разряда, по-видимому, оказывают эффекты, обусловленные усилением поля в области плазменного резонанса. Получены первые данные о скорости распространения разряда низкого давления в различных условиях (давление газа, мощность греющего излучения).

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1), в котором плазма создавалась с использованием электромагнитного излучения импульсного THz-гиротрона 1 (частота излучения 250 GHz, выходная мощность в импульсе до 250 kW, длительность импульса 40 μ s). Пучок электромагнитного излучения 2, вышедший из гиротрона, проходил через входное окно (выполненное из полиэтилена низкого давления ПНД 273-83,

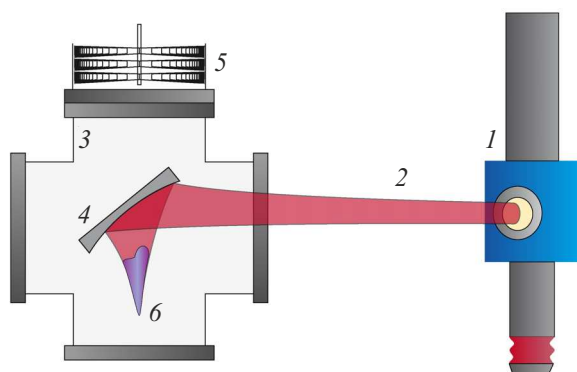


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — гиротрон, 2 — THz-пучок, 3 — вакуумная разрядная камера, 4 — фокусирующее зеркало, 5 — турбомолекулярный насос, 6 — фокус пучка/разряд.

показатель преломления $n = 1.5$, тангенс потерь на частоте 250 GHz — $2 \cdot 10^{-4}$) в вакуумную камеру 3, где фокусировался параболическим зеркалом 4 в пятно диаметром около 2λ . Максимальная плотность мощности составляла 3.5 MW/cm^2 , что соответствует среднеквадратичной напряженности электрического поля в 35 kV/cm .

Система напуска газа в разрядную камеру и система откачки, состоящая из форвакуумного и турбомолекулярного насосов 5, обеспечивали возможность работы в диапазоне давлений от 10^{-6} до 1500 Torr . Вакуумная разрядная камера предварительно откачивалась до давлений на уровне 10^{-5} – 10^{-6} Torr , после чего заполнялась рабочим газом. В качестве рабочего газа использовался аргон.

Для указанной выше максимальной напряженности поля (35 kV/cm) самостоятельный пробой в аргоне возможен при величинах давления не менее 3 Torr [18]. Поэтому для инициирования разряда использовался скачок уплотнения газа, который создавался следующим образом. В разрядный объем навстречу излучению гиротрона напускался рабочий газ через отверстие небольшого диаметра ($150 \mu\text{m}$) под высоким давлением (на уровне 2 bar). Балансом скорости откачки и скорости напуска газа удавалось поддерживать сильно неоднородный профиль плотности газа вдоль направления пучка излучения гиротрона (так называемая газовая мишень). Максимальная плотность газа была сосредоточена около отверстия напуска, спадая на расстоянии порядка нескольких диаметров отверстия до фоновых значений, соответствующих фоновому давлению газа в камере (0.3 – 3 Torr). При этом сама газовая мишень располагалась около фокуса пучка гиротрона.

В результате разряд 6 (рис. 1), возникая в области максимальной плотности газа, отрывался от инициатора (области повышенной концентрации газа) и распространялся навстречу греющему излучению в ту область, где плотность рабочего газа была на уровне фоновой.

Наблюдение разряда было возможно через стеклянный фланец разрядной камеры. Измерения проводились с помощью высокоскоростной камеры „Nanogate-24“ (спектральный диапазон чувствительности фотокатода 350 – 850 nm , количество пикселей CCD-матрицы 1380×1024). Эта камера имеет высокоскоростной затвор, и, как следствие, минимально возможное время экспозиции кадра составляет 20 ns . За это время плазма (см. далее характерные скорости распространения) могла распространиться всего на доли миллиметра, поэтому можно предположить, что плазма оставалась неподвижной в течение одного кадра.

Момент возникновения разряда фиксировался с помощью фотодетектора DET36A (Thorlabs). Было сделано множество фотографий с различной задержкой между моментом запуска гиротрона (подачей высокого напряжения на катод гиротрона) и срабатыванием затвора камеры для расчета скорости перемещения разряда в различных точках на пути его распространения. Эта скорость восстанавливалась следующим образом (подробнее см. работу [16]). Для каждой фотографии разряда, сделанной быстрой камерой, определялся интервал времени, прошедший с момента возникновения разряда (который фиксировался фотодетектором). По фотографии определялось расстояние, на которое он успел за этот интервал времени распространиться. Таким образом получался массив данных о положении фронта разряда в различные моменты времени относительно момента его зажигания (в одних и тех же условиях по давлению газа и мощности греющего излучения). По наклону этой зависимости можно определить скорость распространения разряда на различных расстояниях от фокальной перетяжки пучка гиротрона (идентичная процедура приведена в работах [16,17]). Основное внимание было уделено участку пространства, расположенному ближе к фокусу, где скорость была максимальной.

На рис. 2 представлена серия фотографий разряда в аргоне при фоновом давлении газа 3 Torr , сделанных высокоскоростной камерой с различными задержками между моментом зажигания разряда и началом съемки. Разница в задержках между кадрами составляет около $1 \mu\text{s}$. За начальный отсчет времени взят момент возникновения разряда. Небольшой разброс в интервалах между кадрами связан с некоторой нестабильностью во времени зажигания разряда по отношению к моменту начала генерации электромагнитного излучения, относительно которого синхронизовалась быстрая камера.

На рис. 3 представлена зависимость скорости перемещения разряда на начальном участке его распространения (ближе к фокусу, в пределах 7 cm от него) от мощности излучения гиротрона, восстановленная по серии мгновенных фотографий разряда в различные моменты времени. При этом зависимость координаты фронта разряда в пространстве от времени его распространения, полученная по фотографиям, могла быть аппроксимирована прямой (на начальном участке распространения). Наклон данной прямой (т.е. скорость) определялся с

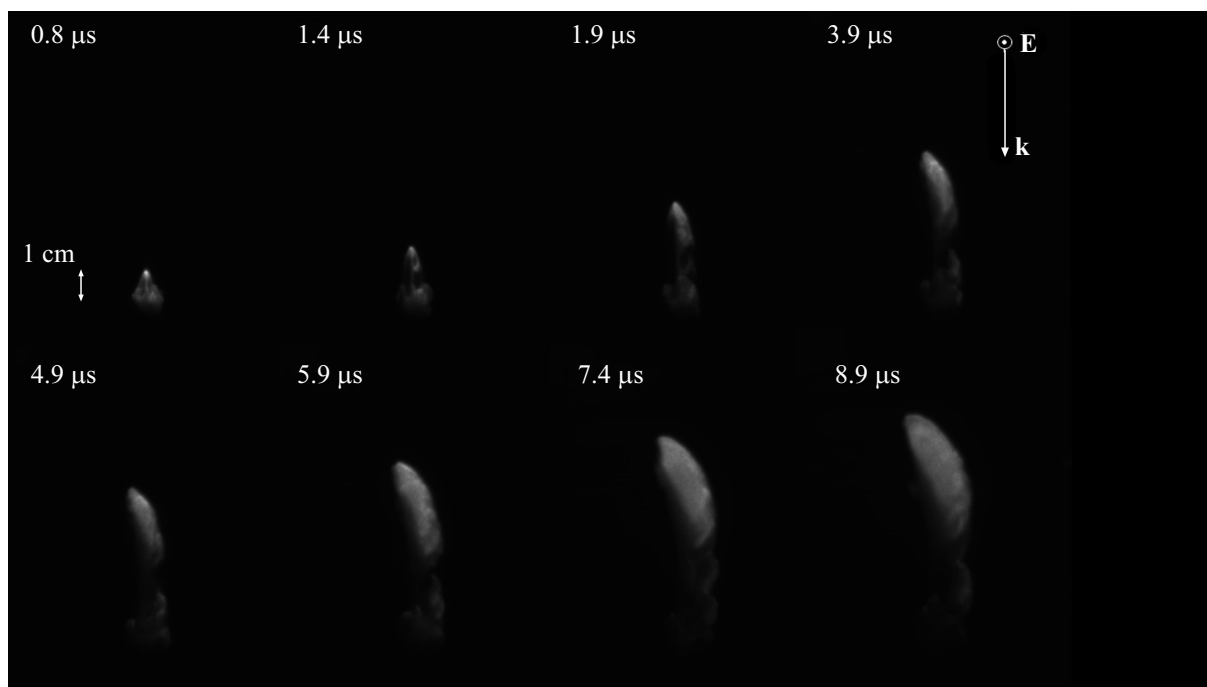


Рис. 2. Серия фотографий разряда в аргоне при фоновом давлении газа 3 Torr, сделанных высокоскоростной камерой с различными задержками между моментом зажигания разряда и началом съемки. Направление распространения THz-излучения и ориентация вектора напряженности электрического поля указаны вверху справа. Пространственный масштаб приведен на первой фотографии.

относительной погрешностью в 10 %. Фоновое давление газа, как и на предыдущем рисунке, составляло 3 Torr. Мощность в импульсе излучения 250 kW. Как видно из рисунка, скорость распространения увеличивалась с ростом мощности электромагнитного излучения, но при этом зависела от данного параметра довольно слабо (при изменении мощности практически на порядок скорость увеличилась всего в 2 раза). Такая же картина наблюдалась и при других давлениях в указанном интервале. Слабой была и зависимость от давления. По порядку величины скорость во всех случаях достигала 10^6 cm/s. Схожая картина наблюдалась при исследовании плазменно-резонансного разряда в СВЧ-диапазоне [19].

Максимальное расстояние, которое разряд проходил от области фокуса навстречу греющему излучению за время импульса, составляло порядка 14 cm (для максимальной мощности в 250 kW), что соответствует уменьшению среднеквадратичной величины напряженности электрического поля более чем на порядок. При этом данное расстояние практически не зависело от давления (при 0.3 и 3 Torr оно составляло практически одну и ту же величину в 14 cm для максимальной мощности).

Это явление на качественном уровне можно объяснить тем, что разряд распространяется до тех пор, пока поле с учетом усиления на резонансе не станет меньше пробойного для данного давления газа. Так как пробойное поле для данного диапазона ν/ω растет обратно пропорционально ν , а усиление поля на резонансе тоже растет обратно пропорционально ν , разряд при

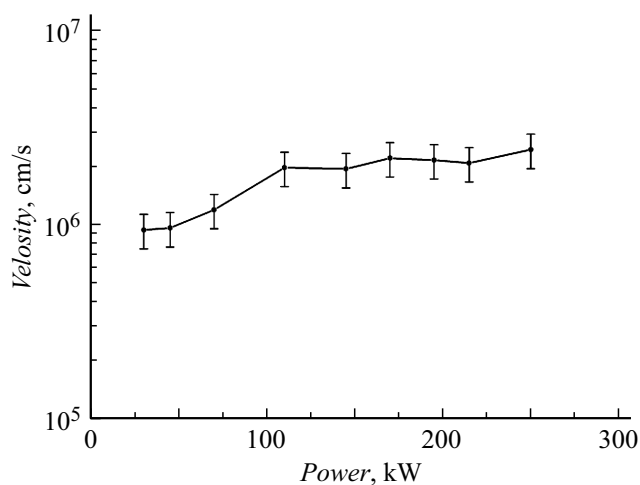


Рис. 3. Зависимость скорости распространения разряда от мощности излучения в импульсе. Фоновое давление газа (аргон) 3 Torr.

разных фоновых давлений газа добегают до точек, где исходное вакуумное поле в пучке было одинаковым. При одной и той же мощности в пучке гиротрона одинаковое вакуумное поле соответствует одному и тому же расстоянию от фокальной перетяжки пучка, что и наблюдается в эксперименте. При уменьшении мощности эта точка смещается ближе к фокальной перетяжке, что также наблюдается в эксперименте: при существенном снижении мощности вплоть до 30 kW

данное расстояние уменьшалось с 14 до 9 см. Таким образом, можно утверждать, что на пространственно-временную динамику данного разряда существенное влияние оказывают эффекты, обусловленные усилением поля в области плазменного резонанса.

Безусловно, открытым остается вопрос: достигает ли концентрация электронов в плазме критической величины для данной частоты греющего излучения ($6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и может ли превышать ее? Ориентировано ли усиленное поле вдоль градиента плотности плазмы? Все это является предметом дальнейших исследований. В заключение можно отметить, что в газовых разрядах, поддерживаемых мощным излучением ТГц-гиротронов, как при давлениях порядка атмосферного [20], так и при существенно меньших давлениях концентрация электронов в плазме (по крайней мере в некоторых областях разряда), как правило, достигает и даже может превышать критическую величину.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FFUF-2026-0003).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Tonouchi, Nat. Photon, **1**, 97 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.3
- [2] K. Reimann, Rep. Prog. Phys, **70**, 1597 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2013.184
- [3] H. Roskos, M. Thomson, M. Kref, T. Löffler, Laser Photon. Rev., **1** (4), 349 (2007). DOI: 10.1002/lpor.200710025
- [4] X.-C. Zhang, J. Xu, *Introduction to THz wave photonics* (Springer, 2010).
- [5] A. Shalashov, A. Vodopyanov, I. Abramov, A. Sidorov, E. Gospodchikov, S. Razin, N. Chkhalo, N. Salashchenko, M. Glyavin, S. Golubev, Appl. Phys. Lett., **113**, 153502 (2018). DOI: 10.1063/1.5049126
- [6] G. Denisov, A. Kuftin, V. Manuilov, A. Chirkov, L. Popov, V. Zapevalov, A. Zuev, A. Sedov, I. Zheleznov, M. Glyavin, Nucl. Fusion, **62**, 036020 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac4946
- [7] P. Tan, J. Huang, K. Liu, Y. Xiong, M. Fan, Sci. China Inf. Sci., **55**, 1 (2012). DOI: 10.1007/s11432-011-4515-1
- [8] A. Мак-Доналд, *Сверхвысокочастотный пробой в газах* (Мир, М., 1969). [A.D. MacDonald, *Microwave breakdown in gases* (Wiley, N.Y., 1966).].
- [9] Ю.П. Райзер, *Лазерная искра и распространение разрядов* (Наука, М., 1974). [Yu.P. Raizer, *Laser-induced discharge phenomena* (Consultants Bureau, N.Y., 1977).].
- [10] А.Л. Вихарев, В.Б. Гильденбург, С.В. Голубев, Б.Г. Еремин, О.А. Иванов, А.Г. Литвак, А.Н. Степанов, А.Д. Юнаковский, ЖЭТФ, **94** (4), 136 (1988). [A.L. Vikharev, V.B. Gil'denburg, S.V. Golubev, B.G. Eremin, O.A. Ivanov, A.G. Litvak, A.N. Stepanov, A.D. Yunakovskii, Sov. Phys. JETP, **67** (4), 724 (1988).].
- [11] Y. Hidaka, E.M. Choi, I. Mastovsky, M.A. Shapiro, J.R. Sirigiri, R.J. Temkin, Phys. Rev. Lett., **100**, 035003 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.035003
- [12] С.В. Голубев, С.И. Грицинин, В.Г. Зорин, И.А. Косый, В.Е. Семенов, в сб. *Высокочастотный разряд в волновых полях* (ИПФ АН СССР, Горький, 1988), с. 136–197.
- [13] N.A. Bogatov, Yu.Ya. Brodsky, S.V. Golubev, V.G. Zorin, in *Proc. of XVIII Int. Conf. on phenomena in ionized gases* (Swansea, U.K., 1987), p. 864–865.
- [14] А.Х. Мнацаканян, Г.В. Найдис, Физика плазмы, **16** (4), 481 (1990).
- [15] К.В. Артемьев, Г.М. Батанов, Н.К. Бережечкая, В.Д. Борзосексов, А.М. Давыдов, Л.В. Колик, Е.М. Кончечков, И.А. Косый, И.В. Моряков, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, В.Д. Степахин, Н.К. Харчев, Физика плазмы, **46** (12), 1135 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20120016 [K.V. Artem'ev, G.M. Batanov, N.K. Berezhetskaya, V.D. Borzosekov, A.M. Davydov, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, I.A. Kossyi, I.V. Moryakov, A.E. Petrov, K.A. Sarksyian, V.D. Stepakhin, N.K. Kharchev, Plasma Phys. Rep., **46**, 1220 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20120016].
- [16] A. Sidorov, S. Razin, A. Veselov, M. Viktorov, A. Vodopyanov, A. Luchinin, M. Glyavin, Phys. Plasmas, **27**, 093509 (2020). DOI: 10.1063/5.0012583
- [17] A. Manabe, M. Fukunari, T. Kinoshita, K. Komurasaki, Plasma Sources Sci. Technol., **35**, 02LT01 (2026). DOI: 10.1088/1361-6595/ae3f54
- [18] A. Sidorov, S. Razin, A. Veselov, A. Vodopyanov, M. Morozkin, M. Glyavin, Phys. Plasmas, **26**, 083510 (2019). DOI: 10.1063/1.5109526
- [19] Ю.Я. Бродский, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, Г.М. Фрайман, ЖЭТФ, **88** (3), 771 (1985). [Yu.Ya. Brodskii, S.V. Golubev, V.G. Zorin, G.M. Fraiman, Sov. Phys. JETP, **61** (3), 453 (1985).].
- [20] S. Sintsov, A. Veselov, A. Sidorov, A. Vodopyanov, E. Preobrazhensky, D. Sergeev, I. Kraev, A. Murzanov, A. Ananichev, A. Fokin, M. Glyavin, Phys. Plasmas, **32**, 063504 (2025). DOI: 10.1063/5.0270538