

Равновесный и неравновесный разряды, поддерживаемые мощным излучением терагерцевого диапазона частот в инертных газах

© А.В. Сидоров, А.П. Веселов, А.В. Водопьянов, М.Ю. Глявин, Ю.К. Калынов, А.Г. Лучинин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: alexsv@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Представлены результаты исследования пространственной динамики разряда в чистых инертных газах и их смесях (гелий с добавлением аргона) в широком диапазоне давлений газа (0.2–1.5 bar). Исследования проводились для нескольких частот греющего излучения (250, 263 GHz и 1 THz) в широком диапазоне плотностей мощности в фокальном пятне (от долей kW/cm^2 до нескольких MW/cm^2). При сравнительно низких плотностях мощности распространение разряда носило равновесный характер, в то время как при высоких — неравновесный. Обсуждаются различные механизмы распространения неравновесного и равновесного разрядов.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56863.16A

Процессы создания и динамики газового разряда в сфокусированных пучках электромагнитного излучения достаточно подробно исследованы в СВЧ- [1–5] и ИК- [6] диапазонах. Терагерцевый (THz) диапазон частот, лежащий между ними, стал доступен для исследователей физики газового разряда сравнительно недавно в связи с прогрессом в создании мощных источников указанного диапазона частот: лазеров на свободных электронах и гиротронах [7–10].

Исследование газового разряда в THz-диапазоне частот представляет интерес в том числе потому, что он может выступать в качестве интенсивного источника УФ-излучения [11].

Настоящая работа посвящена исследованию пространственной динамики разряда, поддерживаемого в инертных газах в сфокусированных пучках волн THz-диапазона частот. Уже в первых экспериментах по созданию лазерной искры [12] было обнаружено интересное явление, связанное с распространением разряда по греющему излучению или навстречу ему. Впоследствии было показано, что распространение разряда имеет много общего с процессами горения [6]. Также данное явление было подробно исследовано в СВЧ-диапазоне [1–5], в первую очередь в воздухе атмосферного давления [5], хотя было несколько работ и по распространению СВЧ-разряда в инертных газах [1,13,14]. Следует отметить, что интерес к распространению СВЧ-разряда в инертных газах не ослабевает до сих пор [15,16].

В настоящей работе исследования распространения разряда THz-диапазона частот в различных инертных газах проводились для нескольких частот греющего излучения (250, 263 GHz и 1 THz) в широком диапазоне давлений (0.2–1.5 bar). Отметим, что в этом случае

частота столкновений электронов с атомами могла быть как больше круговой частоты поля, так и меньше. Например, для аргона (который использовался в основной массе экспериментов) частота столкновений сравнивается с круговой частотой поля для 250 GHz при давлении 0.4 bar. В случае СВЧ-разрядов при таких давлениях частота столкновений, как правило, существенно больше круговой частоты поля.

В качестве источников электромагнитного излучения выступали различные гиротроны, различающиеся как максимально возможной мощностью в импульсе, так и частотой электромагнитного излучения.

Принципиальная схема экспериментальных установок была практически одинаковой во всех случаях, поэтому мы опишем ее на одном конкретном примере. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, в которой в качестве источника излучения выступал

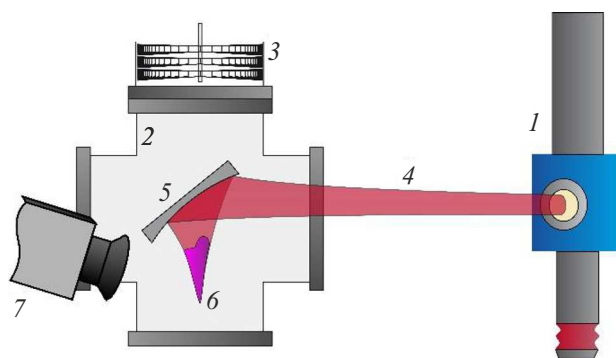


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — гиротрон, 2 — вакуумная разрядная камера, 3 — турбомолекулярный насос, 4 — THz-пучок, 5 — фокусирующее зеркало, 6 — фокус пучка/разряд, 7 — камера Nanogate-24.

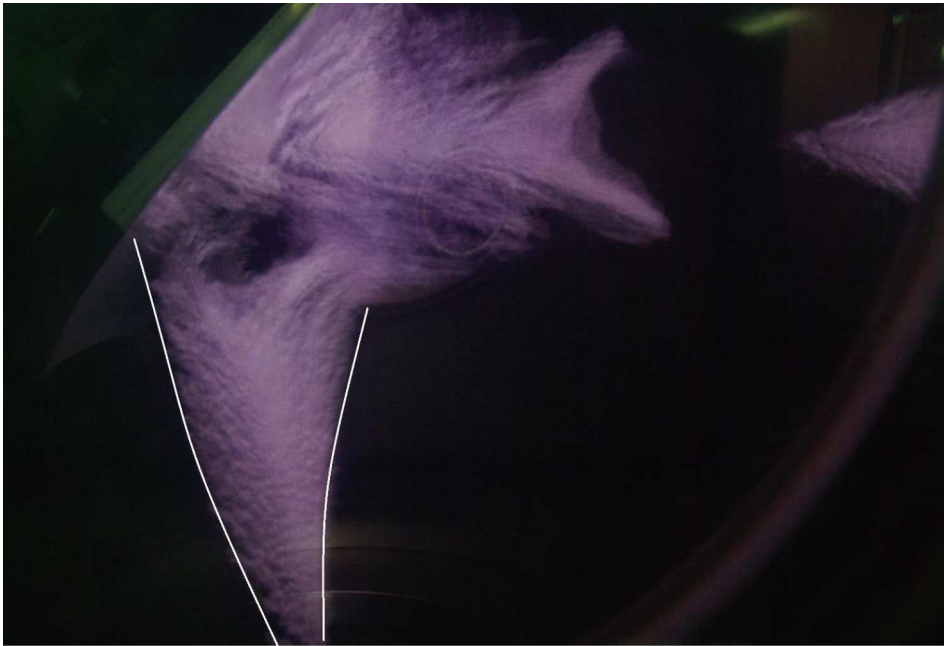


Рис. 2. Фотография разряда в аргоне. Частота греющего излучения 250 GHz, давление газа 50 Torr. Электромагнитное излучение распространяется справа налево к фокусирующему зеркалу, а затем сверху вниз. Светлыми линиями схематично показаны границы сфокусированного пучка.

импульсный 250 GHz-гиротрон (длительность импульса до $40 \mu\text{s}$, максимальная мощность 250 kW). Излучение гиротрона с помощью двух- или однозеркальной (как в данном случае) квазиоптической системы направлялось в откачиваемую вакуумную разрядную камеру. Там оно фокусировалось в пятно с диаметром на уровне двух-трех длин волн, что для гиротрона с частотой 250 GHz обеспечивало максимальную интенсивность излучения 3.5 MW/cm^2 . Для гиротронов с максимальной мощностью в импульсе киловаттного уровня (263 GHz, 1 THz) максимальная интенсивность излучения составляла 15 и 250 kW/cm^2 соответственно.

Вакуумная разрядная камера предварительно откачивалась до давлений на уровне 10^{-5} – 10^{-6} Torr, после чего заполнялась рабочим газом (аргон, криптон, смесь гелия с аргоном). Для инициации разряда в тех случаях, когда интенсивности электромагнитного излучения было недостаточно для самостоятельного пробоя (263 GHz- и 1 THz-гиротроны), использовался высоковольтный искровой разряд, зажигающийся около фокального пятна греющего электромагнитного излучения.

Свечение разряда исследовалось с помощью фотокамеры Pentax K10D (интегральные по времени фотографии), видеокамеры со скоростью съемки 60 fps (для малых скоростей распространения разряда порядка 100 cm/s) и камеры Nanogate-24 с малой выдержкой кадра (от 20 ns и выше). За 20 ns разряд практически не успевает сместиться (даже при скорости на уровне 10^6 cm/s смещение составляет менее 1 mm при характерных расстояниях, на которые распространяется

разряд, в несколько сантиметров или даже десятков сантиметров), и такое фото можно считать практически мгновенным. Делая фото с различными задержками относительно времени зажигания разряда, можно проследить временную картину распространения разряда и измерить его скорость. В тех случаях, когда условия эксперимента не позволяли применять камеру с малой выдержкой, использовались интегральные по времени фотографии разряда, создаваемого излучением гиротрона с различными длительностями импульса. При различных длительностях импульса расстояние, на которое успел распространиться разряд, меняется, что позволяет оценить среднюю скорость распространения разряда.

Во всех экспериментах разряд возникал в фокусе электромагнитного излучения и распространялся навстречу ему. При этом поведение разрядов, поддерживаемых излучением 250 GHz и 1 THz, качественно носило одинаковый характер, такой же, как и в случае с разрядом, поддерживаемым излучением с частотой 670 GHz [17]. Свечение разряда имело сильно неоднородный характер, что, как представляется, свидетельствует о том, что оно повторяло структуру напряженности электрического поля, необязательно вакуумного (см. фотографию разряда на рис. 2). Это указывает на полевую ионизацию газа и соответственно на неравновесный характер разряда. Скорость распространения разряда существенно превышала скорость звука и была на уровне 10^5 cm/s (1 THz) и 10^6 cm/s (250 GHz). При этом с уменьшением давления от 1.5 до 0.2 bar скорость распространения разряда в обоих случаях росла.

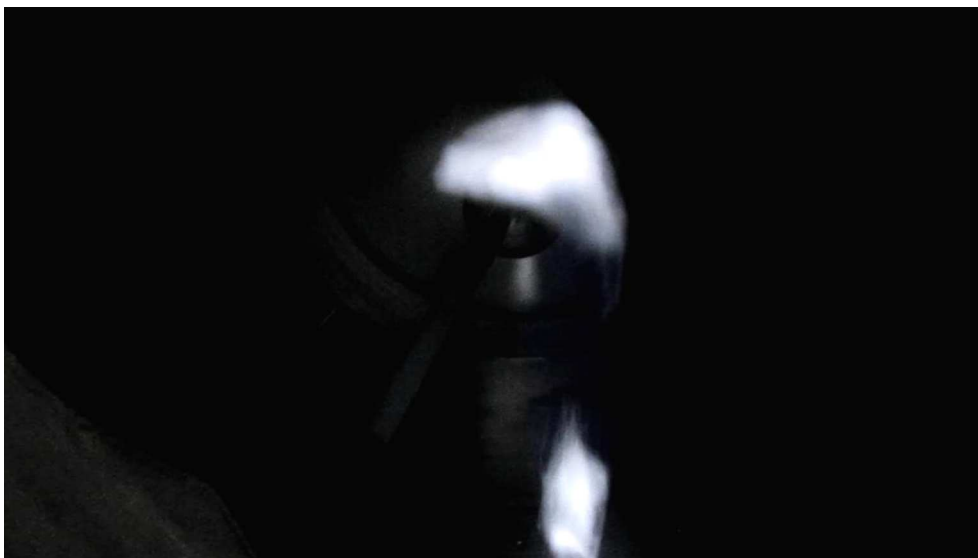


Рис. 3. Фотография разряда в криптоне. Частота греющего излучения 263 GHz, давление газа 0.3 bar. Электромагнитное излучение распространяется слева направо к фокусирующему зеркалу, а затем сверху вниз.

Единственным различием является то, что разряд, поддерживаемый излучением с частотой 250 GHz, поначалу распространяется в сверхпробойных полях (относительно самостоятельного пробоя холодного газа), а затем при движении вдоль расширяющегося пучка электромагнитного излучения попадает в область допробойных полей, в то время как разряд, поддерживаемый излучением с частотой 1 THz, будучи инициированным, изначально распространяется в допробойных полях.

Распространение неравновесного THz-разряда в допробойных полях, как и в случае СВЧ-разряда, в настоящее время связывается с УФ-излучением из-за фронта разряда [13]. Это излучение ионизует газ перед фронтом разряда, в результате чего в данном ионизованном газе поглощается существенная доля электромагнитного излучения, нагревая тем самым газ перед фронтом разряда. В результате прогрева газа увеличивается количество возбужденных атомов, что снижает порог пробоя, так как эффективная ионизация из возбужденного состояния осуществляется при существенно меньших напряженностях электрических полей, чем ионизация из основного состояния. Скорость распространения разряда при этом определяется скоростью прогрева газа, а значит, растет с ростом интенсивности электромагнитного излучения и снижением плотности газа.

В случае разряда, поддерживаемого излучением 263 GHz (с существенно меньшей интенсивностью электромагнитного излучения), картина распространения разряда носит качественно иной характер. Свечение разряда (рис. 3) уже не повторяет структуру электрического поля, а повторяет распределение температуры газа. Это означает, что ионизация носит термический характер, что соответствует равновесному характеру

распространения разряда. Скорость распространения разряда, измеренная с помощью видеокамеры с частотой повторения кадров 60 fps, при этом была существенно меньше скорости звука и не превышала 100 cm/s, спадая с ростом давления газа.

Что касается механизма распространения, то в настоящее время представляется, что прогрев газа перед фронтом разряда с последующей его термической ионизацией может осуществляться как горячим газом за фронтом разряда (медленное горение [6]) за счет теплопроводности, так и за счет поглощения электромагнитного излучения перед фронтом разряда в ореоле, создаваемом УФ-излучением из-за фронта разряда [5]. Первый вариант на данный момент видится более реальным, так как в случае с фотоионизационным [5] механизмом характерные скорости распространения равновесного разряда обычно выше (на уровне 10^3 cm/s), равно как и интенсивности греющего электромагнитного излучения. Тем не менее вопрос о конкретном механизме распространения равновесного разряда в данных экспериментах пока остается открытым.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-19-00599).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] 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**, 724 (1988). http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_067_04_0724.pdf].
- [2] Н.А. Богатов, Ю.В. Быков, Н.П. Венедиктов, С.В. Голубев, В.Г. Зорин, А.Г. Еремеев, В.Е. Семенов, *Физика плазмы*, **12** (6), 725 (1986). [N.A. Bogatov, Yu.V. Bykov, N.P. Venediktov, S.V. Golubev, V.G. Zorin, A.G. Eremeev, V.E. Semenov, *Sov. J. Plasma Phys.*, **12**, 416 (1986).].
- [3] A. Cook, M. Shapiro, R. Temkin, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 011504 (2010). DOI: 10.1063/1.3462320
- [4] 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
- [5] С.В. Голубев, С.И. Грищинин, В.Г. Зорин, И.А. Косский, В.Е. Семенов, в сб. *Высокочастотный разряд в волновых полях* (ИПФ АН СССР, Горький, 1988), с. 136–197.
- [6] Ю.П. Райзер, *Лазерная искра и распространение разрядов* (Наука, М., 1974). [Yu.P. Raizer, *Laser-induced discharge phenomena* (Consultants Bureau, N.Y., 1977).]
- [7] V.P. Bolotin, B.A. Knyazev, E.I. Kolobanov, V.V. Kotenkov, V.V. Kubarev, G.N. Kulipanov, A.N. Matveenko, L.E. Medvedev, A.D. Oreshkov, B.Z. Persov, V.M. Popik, T.V. Salikova, S.S. Serednyakov, O.A. Shevchenko, M.A. Scheglov, N.A. Vinokurov, in *2005 Joint 30th Int. Conf. on infrared and millimeter waves and 13th Int. Conf. on terahertz electronics* (IEEE, 2005), vol. 1, p. 126–127. DOI: 10.1109/ICIMW.2005.1572440
- [8] G.N. Kulipanov, E.G. Bagryanskaya, E.N. Chesnokov, Yu.Yu. Choporova, V.V. Gerasimov, Ya.V. Getmanov, S.L. Kiselev, B.A. Knyazev, V.V. Kubarev, S.E. Peltek, V.M. Popik, T.V. Salikova, M.A. Scheglov, S.S. Seredniakov, O.A. Shevchenko, A.N. Skrinsky, S.L. Veber, N.A. Vinokurov, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, **5**, 798 (2015). DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121
- [9] G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, A.P. Fokin, A.N. Kufin, A.I. Tsvetkov, A.S. Sedov, E.A. Soluyanov, M.I. Bakulin, E.V. Sokolov, E.M. Tai, M.V. Morozkin, M.D. Proyavin, V.E. Zapevalov, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 084702 (2018). DOI: 10.1063/1.5040242
- [10] M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, G.S. Nusinovich, J. Rodgers, D.G. Kashyn, C.A. Romero-Talamas, R. Pu, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 153503 (2012). DOI: 10.1063/1.4757290
- [11] I.S. Abramov, E.D. Gospodchikov, A.G. Shalashov, *Phys. Rev. Appl.*, **10**, 034065 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.034065
- [12] S.A. Ramsden, W.E. Davies, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 227 (1964). DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.227
- [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. Бережецкая, В.Д. Борзосекков, А.М. Давыдов, Л.В. Колик, Е.М. Кончекков, И.А. Косский, И.В. Моряков, А.Е. Петров, К.А. Сарксян, В.Д. Степахин, Н.К. Харчев, *Физика плазмы*, **46** (12), 1135 (2020). DOI: 10.31857/S036729212012001X [K.V. Artem'ev, G.M. Batanov, N.K. Berezhetzkaya, V.D. Borzosekov, A.M. Davydov, L.V. Kolik, E.M. Konchekov, I.A. Kosyiy, 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] K. Shimamura, J. Yamasaki, K. Miyawaki, R. Minami, T. Kariya, J. Yang, S. Yokota, *Phys. Plasmas*, **28**, 033505 (2021). DOI: 10.1063/5.0045350
- [17] A. Sidorov, S. Razin, A. Veselov, M. Viktorov, A. Vodopyanov, A. Luchinin, M. Glyavin, *Phys. Plasmas*, **27**, 093509 (2020). DOI: 10.1063/5.0012583