

## Исследование разряда, создаваемого излучением терагерцевого лазера на свободных электронах в неоднородном потоке газа

© А.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.В. Кубарев<sup>2</sup>, А.П. Веселов<sup>1</sup>, А.В. Водопьянов<sup>1</sup>, О.А. Шевченко<sup>2</sup>,  
Я.И. Горбачев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: alexsv@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 14 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследования разряда в неоднородном потоке инертного газа (аргон), возникающего в сфокусированном пучке, генерируемом терагерцевым лазером на свободных электронах (частота 2.3 THz). Получены данные о диапазонах давлений фонового газа, скоростей напуска газов, при которых возможно развитие разряда. Изучена динамика свечения разряда в различных диапазонах длин волн в широком диапазоне давлений. Продемонстрировано, что плазма светит не только во время лазерных импульсов, но и в интервалах между импульсами греющего электромагнитного излучения.

**Ключевые слова:** терагерцевое излучение, газовый разряд, ультрафиолетовое излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59444.6563k

Изучение газового разряда в квазиоптических пучках мощного электромагнитного излучения терагерцевого (THz) диапазона частот привлекательно для большого количества как фундаментальных, так и прикладных исследований. Экспериментальное исследование данного разряда стало возможным лишь в последнее время благодаря появлению уникальных и надежно работающих источников мощного излучения: гиротронов и THz-лазера на свободных электронах [1–3]. Данные исследования вызывают интерес прежде всего с прикладной точки зрения, поскольку плотная плазма разряда может служить ярким источником оптического, ультрафиолетового и экстремального ультрафиолетового излучения [4]. Подробнее см. обзор [5]. В настоящей работе представлены результаты исследования разряда в неоднородном потоке инертного газа (аргон), возникающего в сфокусированном пучке, генерируемом THz-лазером на свободных электронах.

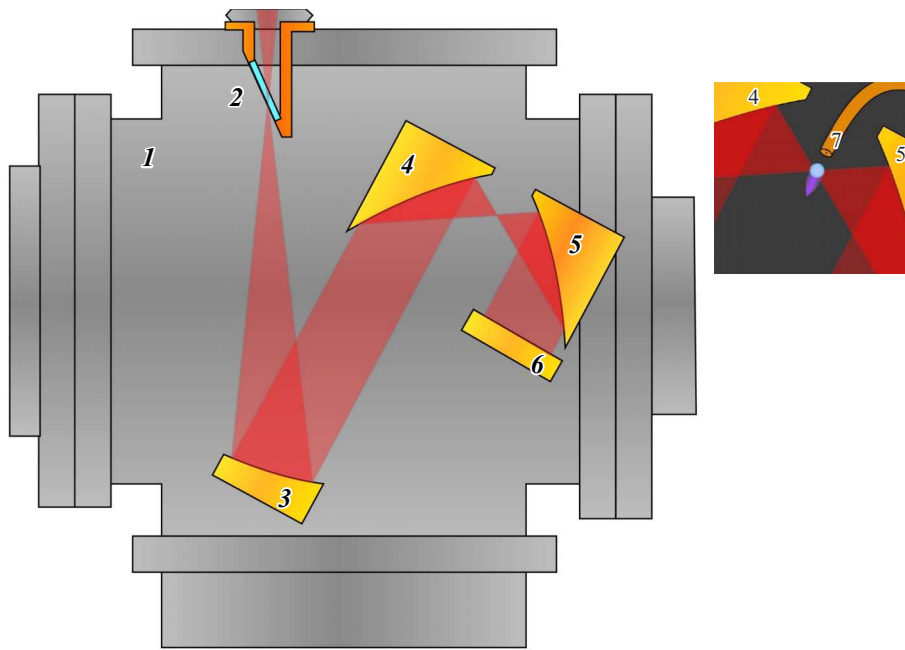
Схема ввода THz-излучения лазера на свободных электронах в разрядную камеру показана на рис. 1. Излучение Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) (длина волны 130  $\mu\text{m}$ , длительность импульса 100 ps, частота следования импульсов 5.6 MHz, максимальная средняя мощность 200 W) вводилось в разрядную камеру 1 через алмазное окно 2, расположенное под углом Брюстера в фокальной перетяжке зеркала, вводящего излучение в камеру. Далее в разрядной камере с помощью оптической системы, состоящей из трех параболических (3–5) и одного плоского (6) зеркал, излучение ЛСЭ фокусировалось в пятно между зеркалами 4 и 5 с минимальным поперечным размером (ширина по поперечной гауссову пучка для излучения с длиной волны 130  $\mu\text{m}$  была около 0.3 mm).

Диагностика светимости разряда в различных диапазонах длин волн осуществлялась с помощью монохроматора-спектрографа MS 5204i от SOL Instruments. В качестве дисперсионного элемента в нем использовалась решетка с плотностью 1800 штрихов на 1 mm (дисперсия 1 nm/mm, длина волны блеска 280 nm). Детектором служила CCD-камера HS 102H (ООО Proscan) с областью чувствительности 200–1100 nm. При ширине входной щели спектрографа в 40  $\mu\text{m}$  аппаратная ширина линии, прокалываемая по ртутной лампе, составляла 0.7 Å. Диагностика свечения разряда осуществлялась через оптический порт в разрядной камере, выполненный из кварцевого стекла.

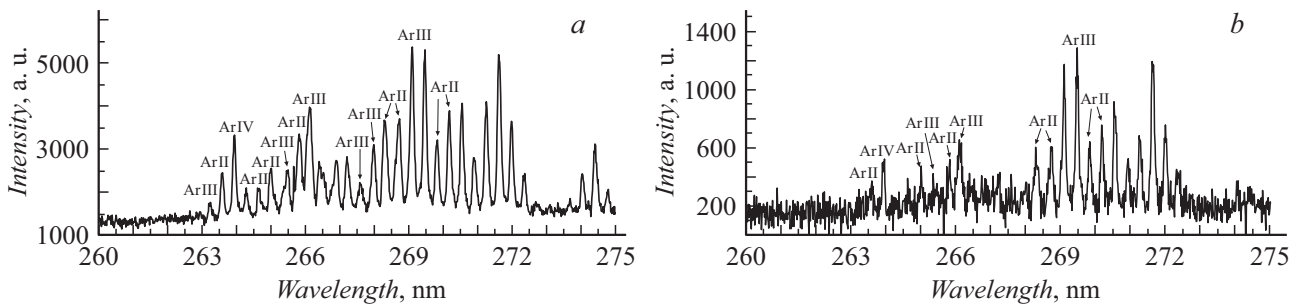
Разряд зажигался в струе инертного газа, напускаемой в объем разрядной камеры. Напуск струи газа осуществлялся поперек распространения пучка ЛСЭ между двумя фокусирующими параболическими зеркалами 4, 5 (см. вставку на рис. 1) через отверстие диаметром 300  $\mu\text{m}$  в медной трубке 7, охлаждаемой водой. Струя газа напускалась в разрядный объем под высоким давлением (1–6 bar). Регулируя скорость откачки разрядной камеры форвакуумным насосом, можно было менять давление фонового газа в камере в широких пределах (0.05–1.5 bar).

В результате проведенных исследований было установлено, что устойчивое горение разряда в струе аргона, напускаемого в буферный объем того же аргона, возможно при давлениях буферного газа не менее 0.15 bar при максимальной мощности ЛСЭ 200 W. При меньших мощностях порог по давлению буферного газа увеличивается.

На рис. 2, а для примера показан спектр разряда в струе аргона в диапазоне длин волн 260–275 nm.



**Рис. 1.** Разрядная камера (1) и схема ввода в нее излучения ЛСЭ. 2 — входное окно, выполненное из CVD-алмаза, 3 —  $30^\circ$  поворотное зеркало, 4 и 5 —  $90^\circ$  фокусирующие зеркала, 6 — плоское зеркало, 7 — трубка напуска газа.

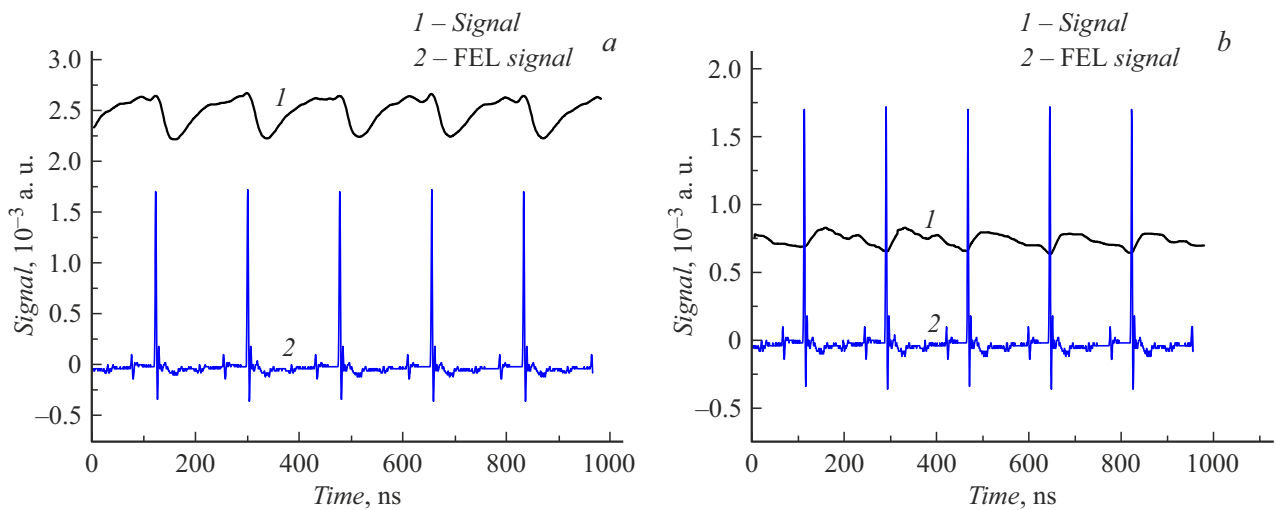


**Рис. 2.** *a* — спектр разряда в струе аргона в диапазоне длин волн 260–275 nm (давление газа в разрядной камере 0.35 bar, средняя мощность ЛСЭ 200 W); *b* — спектр разряда в смеси аргона и азота в диапазоне 260–275 nm (давление аргона в линии напуска 4 bar, фоновое давление аргона с добавкой азота 0.3 bar, расстояние от мишени до фокуса 4 mm, средняя мощность излучения ЛСЭ 200 W).

Давление фонового газа в объеме разрядной камеры 0.35 bar, давление в линии напуска газа в камеру 4 bar. Время экспозиции составляло 500 ms. В этом диапазоне наряду с линиями Ar II наблюдаются линии Ar III и Ar IV (линии идентифицировались по базе NIST [6]). Поэтому данный участок спектра был выбран для того, чтобы следить за изменениями в нем при варьировании экспериментальных условий (изменение давления фонового газа, расстояния от газовой мишени до точки фокуса излучения ЛСЭ, добавление азота и т.п.). При этом основное внимание уделялось соотношению интенсивностей линии Ar III (269.4 nm) и соседних с ней линий Ar II (269.7 и 270.17 nm). Исследования светимости разряда при различных расстояниях от газовой мишени (перемещалась с помощью шагового двигателя) до фокуса излучения ЛСЭ показали, что наибольшее

соотношение между линиями Ar III и Ar II удавалось поддерживать при расстоянии 4 mm. Оптимальное давление фонового газа (по соотношению Ar III/Ar II, равному 2.2) составляло 0.35 bar.

При этом следует отметить, что при достаточно высоких фоновых давлениях разряд преимущественно горел не в фокусе электромагнитного излучения, а перед ним (в направлении навстречу падающему электромагнитному излучению), т.е. в основном в стоячем газе, а не в струе, так как высокое давление в случае THz-диапазона частот является оптимальным для самостоятельного пробоя газа (1.5 bar для 2.3 THz). При этом размер разряда был порядка 1 cm в диаметре. Уменьшение фонового давления за счет увеличения скорости откачки одновременно с увеличением напуска газа в струе позволяло обеспечить поддержание разряда



**Рис. 3.** Зависимость от времени сигнала с фотодиода (1) и сигнала излучения ЛСЭ (2). *a* — разряд в струе аргона, *b* — разряд в струе аргона с добавкой азота в буферный объем аргона.

именно в струе газа (при фоновых давлениях газа менее 0.5 bar для максимальной мощности). В этом случае разряд горел преимущественно в районе фокуса электромагнитного излучения. Однако его размер при этом составлял несколько миллиметров в диаметре, что по-прежнему существенно превышало размер фокального пятна греющего излучения.

Для того чтобы ухудшить пробойные условия во всей области разрядной камеры, за исключением фокального пятна, и тем самым уменьшить область горения разряда, улучшив при этом энерговыход в разряд, в разрядную камеру напускалась небольшая (менее 10%) добавка азота. При этом следует отметить, что азот добавлялся непосредственно в разрядную камеру через отдельную линию напуска, а не через газовую мишень вместе с аргоном.

В отличие от разряда в чистом аргоне разряд с добавкой азота в разрядную камеру был более точечным и практически не уходил навстречу излучению ЛСЭ. Несмотря на то что добавка азота сравнительно небольшая, хорошо был виден оранжевый „хвост“, создаваемый первой положительной системой азота, высвечивающей в струе горячего газа. В центральной (более „горячей“) области разряда была видна преимущественно вторая положительная система азота.

Основное внимание, так же как и в случае с разрядом в чистом аргоне, уделялось диапазону 260–275 nm, где достаточно много линий Ar II, Ar III и Ar IV. При наблюдении за этим диапазоном спектра излучения точечного разряда проводилась точная настройка работы установки для достижения максимально возможной кратности ионизации ионов (в данном случае ионов аргона).

На рис. 2, *b* показан участок спектра разряда в смеси аргона и азота в диапазоне 260–275 nm в том случае, когда соотношение интенсивностей линии Ar III

(269.4 nm) и соседних линий Ar II было максимальным (2.8) (давление аргона в линии напуска 4 bar, фоновое давление аргона с добавкой азота 0.3 bar, расстояние от мишени до фокуса 4 mm, средняя мощность излучения ЛСЭ 200 W, время экспозиции 500 ms). Этот участок спектра удобен, в частности, тем, что на нем отсутствуют интенсивные молекулярные полосы второй положительной системы азота, которые могли бы наложиться на свечение атомарных линий аргона. Таким образом, добавление азота позволило увеличить соотношение Ar III/Ar II с 2.2 до 2.8.

Проводились исследования временной динамики разряда в струе аргона, напускаемой в буферный объем газа в разрядной камере. Диагностика свечения разряда осуществлялась с помощью быстрого детектора UPD-500-UP фирмы Alphas (170–1100 nm) со временем нарастания менее 0.5 ns. Сопротивление нагрузки при подключении детектора к осциллографу составляло 50 Ω, поэтому постоянная времени в цепи измерения была на уровне 5 ns. Поскольку при частоте следования импульсов ЛСЭ 5.6 MHz интервал между соседними импульсами составляет приблизительно 180 ns, можно заключить, что постоянная времени в цепи измерения, равно как и время срабатывания детектора, существенно меньше, что позволяет подробно проследить динамику свечения плазмы между импульсами ЛСЭ.

Как и ранее, было продемонстрировано, что плазма светит не только во время импульсов ЛСЭ, но и в интервалах между импульсами греющего электромагнитного излучения. При этом, как оказалось, разряд в струе аргона, напускаемой в буферный объем чистого аргона, и разряд в струе аргона, напускаемой в объем аргона с добавкой азота, ведут себя во времени по-разному.

На рис. 3, *a* показана зависимость от времени сигнала с детектора (верхний луч 1) и сигнала излучения ЛСЭ (нижний луч 2). Хорошо видна сильная „подставка“

в свечении разряда в течение всего времени, в том числе между импульсами ЛСЭ. Она видна и на спектрах (см., например, рис. 2). Как и ранее, она связывается нами с рекомбинационным излучением, прежде всего нейтральных атомов аргона. С приходом импульсов ЛСЭ температура электронов увеличивается, что приводит к „просаживанию“ рекомбинационного излучения, константа которого спадает с ростом температуры [7]. В случае с разрядом в струе аргона, напускаемой в объем аргона с добавкой азота, мы видим обратную динамику: с приходом импульсов ЛСЭ свечение разряда, наоборот, увеличивается (рис. 3, *b*). В настоящее время мы связываем подобную динамику свечения с тем, что в точечном разряде, наблюдаемом в струе аргона с добавками азота в объем разрядной камеры (а не в струю аргона, как ранее), в свечении превалирует линейчатое излучение, а не рекомбинационное, которое, естественно, усиливается с приходом импульсов ЛСЭ.

### Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-72-20166).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] 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
- [2] G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, A.P. Fokin, A.N. Kuftin, 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
- [3] 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
- [4] I.S. Abramov, E.D. Gospodchikov, A.G. Shalashov, *Phys. Rev. Appl.*, **10**, 034065 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.034065
- [5] A.V. Sidorov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **55**, 293001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac5556
- [6] NIST [Электронный ресурс]. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>
- [7] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, М., 1992). [Yu.P. Raizer, *Gas discharge physics* (Springer, N.Y., 1991)].