

03:04

Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот

© А.В. Водопьянов, М.Ю. Глявин, С.В. Голубев, А.Г. Лучинин,
С.В. Разин[¶], М.И. Сафронова, А.В. Сидоров, А.П. Фокин

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук (ИПФ РАН), Нижний Новгород

[¶] E-mail: sevraz@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 18 августа 2016 г.

Измерена плотность плазмы разряда, возникающего в неоднородном потоке аргона под действием мощного сфокусированного импульсного излучения гиротрона (частота 0.67 THz, мощность 40 kW, длительность импульса 20–30 μs) в диапазоне фоновых давлений газа в разрядной камере от 10⁻³ до 300 Torr. Концентрация электронов при низких давлениях (10⁻³–7 Torr) определялась по вызванному эффектом Штарка уширению атомарной линии излучения H_α (656.3 nm) водорода, который присутствовал в разряде в качестве малой остаточной примеси. При этом максимальное наблюдаемое штарковское уширение линии H_α соответствует величине концентрации плазмы порядка 2 · 10¹⁶ cm⁻³, которая превышает критическую для используемой частоты поддерживающего разряд излучения. При давлениях свыше 7 Torr плотность плазмы оценивалась на основе анализа пространственно-временных разверток и осциллограмм свечения разряда в оптическом диапазоне. Оценки дали величину электронной концентрации на уровне (1–2) · 10¹⁵ cm⁻³.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.04.44292.16464

Разряд, возникающий в сфокусированных пучках терагерцового излучения гиротронов, исследовался в ряде работ [1–4]. Изучались динамика распространения разряда, особенности свечения образующейся плазмы в различных спектральных диапазонах. В [1] наблюдалась экранировка поддерживающего разряд терагерцового излучения (частота 0.55 THz), что свидетельствует о высокой, близкой к критической 3 · 10¹⁵ cm⁻³, концентрации плазмы в разряде (рабочий газ —

аргон, давление 500 Torr). В [3,4] был реализован терагерцовый (частота 0.67 THz) разряд в сильнонеоднородном потоке аргона в диапазоне фоновых давлений в разрядной камере 10^{-3} –300 Torr. Концентрация электронов в таком разряде не измерялась. Косвенно о высокой степени ионизации и плотности плазмы при низких (менее 1 Torr) давлениях может свидетельствовать наблюдавшееся интенсивное излучение в диапазоне вакуумного ультрафиолета (112–180 nm), обусловленное высвечиванием образующихся в плазме возбужденных многозарядных ионов.

Настоящая работа посвящена измерению концентрации плазмы разряда, поддерживаемого мощным излучением гиротрона терагерцового диапазона частот в сильнонеоднородном потоке аргона в диапазоне фоновых давлений 10^{-3} –300 Torr.

Эксперименты проводились на установке, блок-схема которой показана на рис. 1. В качестве источника терагерцовых волн (частота 0.67 THz, линейная поляризация) использовался гиротрон [5] с длительностью импульсов 20–30 μ s, излучение которого с помощью квазиоптического преобразователя трансформировалось в гауссов пучок и фокусировалось в центр разрядной камеры. Мощность излучения в пучке составляла 40 kW. В фокальную область пучка помещалось дополнительное фокусирующее параболическое зеркало с апертурой 1 cm и фокусным расстоянием 0.9 mm. Рабочий газ (аргон) в разрядную камеру подавался под давлением до 5.5 atm через отверстие диаметром 0.14 mm, расположенное в вершине параболического зеркала. При этом формировался сильнонеоднородный в пространстве газовый поток, причем в области фокуса зеркала плотность нейтралов была достаточно велика, там выполнялись пробойные условия, и возникал разряд. Для удобства наблюдения разряда у параболического зеркала была вырезана часть отражающей поверхности. Описанная фокусирующая система обеспечивала плотность потока мощности 16 MW/cm^2 , при этом величина напряженности среднеквадратичного электрического поля достигала 80 kV/cm.

Динамика оптического свечения разряда наблюдалась с помощью фотоэлектронного умножителя „Фотон“ (рабочий диапазон 200–650 nm) и фотоэлектронного регистратора ФЭР-27. Для исследования спектра излучения плазмы использовался монохроматор-спектрограф MS 5204i (SOL Instruments) со сменными дифракционными решетками, способный регистрировать излучение в диапа-

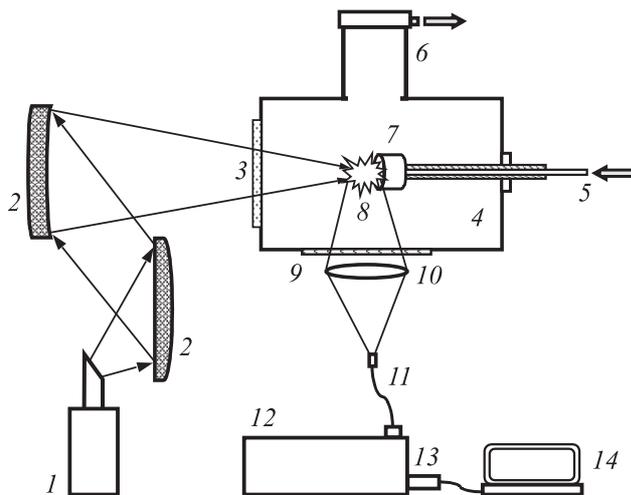


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — гиротрон, 2 — квазиоптический преобразователь, 3 — фторопластовое окно, 4 — разрядная вакуумная камера, 5 — система подачи рабочего газа, 6 — система вакуумной откачки, 7 — дополнительное фокусирующее параболическое зеркало с отверстием напуска газа, 8 — плазма разряда, 9 — оптическое окно, 10 — кварцевая линза, 11 — световод, 12 — монохроматограф-спектрограф, 13 — ПЗС-камера, 14 — компьютер.

зоне 200–900 nm. Излучение разряда выводилось через оптическое окно и фокусировалось кварцевой линзой на вход световода, выход которого сопрягался с входной щелью спектрографа. Ширина аппаратной функции спектрографа, измеренная с использованием линий излучения спектральной лампы ЛСП-2, при ширине входной щели $60 \mu\text{m}$ составляла 0.2 nm. Откачка разрядной камеры осуществлялась форвакуумным и турбомолекулярным насосами до остаточного давления 10^{-6} Torr, максимальная скорость откачки достигала 700 l/s. Фоновое давление (т.е. давление, устанавливающееся в камере при наличии газового потока) варьировалось в пределах от 10^{-3} до нескольких сотен торр путем изменения скоростей откачки и инъекции газа.

Выполненные ранее эксперименты [3,4] показали, что пространственная локализация разряда, возбуждаемого в неоднородном газовом

потоке сфокусированным пучком терагерцового излучения, существенным образом зависит от фонового давления газа в разрядной камере. При относительно высоких фоновых давлениях разряд, возникнув вблизи отверстия напуска газа, за время импульса распространяется на некоторое расстояние (порядка нескольких сантиметров) навстречу терагерцовой волне в область расходящегося пучка, где напряженность поля существенно меньше пороговой. При низких фоновых давлениях разряд существует в виде небольшого, порядка 1 мм, плазменного образования только в области инъекции газа („точечный“ разряд) [3,4].

Описываемые в настоящей работе эксперименты проводились в диапазоне фоновых давлений 10^{-3} –300 Торг. При этом размеры области, занятой плазмой, изменялись приблизительно в пределах от 1 мм (что составляет немногим более двух длин волн излучения гиротрона) до 5 см. Концентрация электронов N_e в разряде при давлениях ниже 7 Торг оценивалась по вызванному эффектом Штарка уширению атомарной линии излучения H_α (656.3 нм) водорода, который присутствовал в разряде в качестве малой остаточной примеси (напомним, что для атома водорода в случае эффекта Штарка ширина контура линии по полувысоте $\Delta\lambda_{1/2} = CN_e^{2/3}$, где C — константа, слабо зависящая от концентрации и температуры электронов (в диапазоне 10^{14} – 10^{17} см $^{-3}$ эта константа меняется в пределах 20–30% [6])). Указанная линия была выбрана из-за удобства ее наблюдения, поскольку она является наиболее интенсивной в серии Бальмера и не накладывается на другие линии, присутствующие в спектре свечения плазмы. Следует отметить, что сигнал H_α регистрировался интегрально по всему времени свечения плазмы, т.е. концентрация электронов также получалась усредненной по времени. Кроме того, в экспериментах регистрировалось свечение из всей области, занятой разрядом. Следовательно, измеренная электронная концентрация соответствует некоторой усредненной по объему величине.

При изменении фонового давления в разрядной камере, т.е. при изменении условий горения разряда, наблюдалось изменение ширины линии H_α . Поскольку измеренный и аппаратный контуры линии хорошо аппроксимируются функцией Гаусса, то истинное уширение вычислялось по формуле [7]

$$\Delta\lambda_t = (\Delta\lambda_m^2 - \Delta\lambda_{instr}^2)^{0.5}.$$

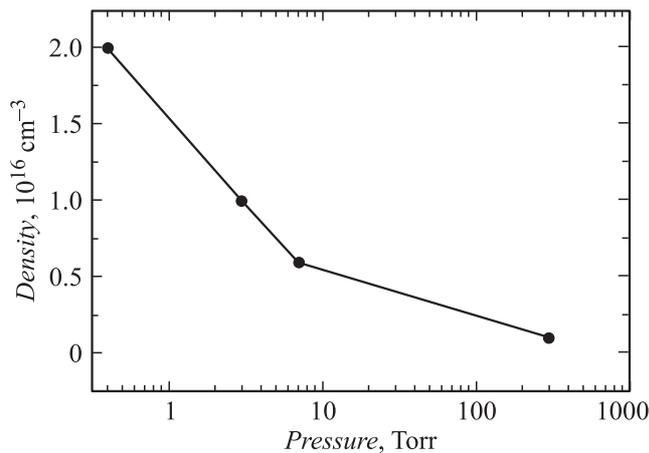


Рис. 2. Зависимость концентрации плазмы от фонового давления аргона в разрядной камере.

Здесь $\Delta\lambda_m$ — измеренная ширина линии по полувысоте, а $\Delta\lambda_{instr}$ — ширина аппаратной функции. Вычисленная таким образом ширина линии H_α в условиях проводимых экспериментов определяется именно эффектом Штарка, поскольку остальные эффекты (например, Доплера, столкновительное уширение) вызывают гораздо меньшее уширение. Действительно, доплеровское уширение $\Delta\lambda/\lambda$ линии атома водорода H_α даже при температуре газа 2000 К составляет величину на уровне 10^{-5} [6], в то время как наблюдаемое уширение имеет порядок 10^{-4} . Столкновительное уширение достигает данной величины только при давлениях в сотни торр [6].

На рис. 2 показана зависимость концентрации плазмы от фонового давления в разрядной камере, восстановленная по изменению ширины контура линии H_α . Данная процедура проводилась путем сравнения измеренной ширины профиля по полувысоте и ширины по полувысоте рассчитанного профиля линии H_α из [8] для температуры электронов 20 000 К. При этом стоит отметить, что в интересующем нас диапазоне ожидаемых концентраций электронов $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ширина профиля слабо зависит от температуры электронов (вариации

ширины профиля с температурой не превышают точности измерения самой ширины профиля).

При давлениях менее 0.5 Torr ширина контура H_{α} практически не менялась и соответствовала концентрации электронов $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, что превышает величину критической концентрации $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ для частоты используемого излучения 0.67 THz. Напомним, что, как отмечалось выше, именно при низких давлениях реализуется „точечный“ разряд, эффективно излучающий в области вакуумного ультрафиолета.

При достаточно высоких фоновых давлениях (более 7 Torr) ширина измеренного контура H_{α} практически не отличалась от аппаратной. Поэтому достоверно указать, какая в этом случае была концентрация плазмы, используя данный метод, нельзя, можно лишь указать, что она была меньше чем $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Концентрация плазмы в разряде высокого давления оценивалась другим способом. На рис. 3, *a* представлена осциллограмма сигнала фотоэлектронного умножителя, который соответствует свечению разряда в оптическом диапазоне при фоновом давлении газа 100 Torr. Хорошо видно, что сигнал, после того как разряд разгорелся, достаточно быстро спадает, что связывается авторами с тем, что к этому моменту концентрация плазмы достигает величины, достаточной для экранирования области разряда от греющего электромагнитного излучения. После этого высвечивание происходит из распадающейся плазмы. Это же хорошо видно из пространственно-временных разверток свечения разряда (рис. 3, *b*). Наклонная светящаяся линия соответствует фронту разряда с характерной толщиной слоя порядка 2 mm, распространяющемуся навстречу THz-излучению, а светящиеся вертикальные полосы — „послесвечению“ распадающейся плазмы в различных точках пространства за фронтом разряда. При увеличении фонового давления длительность послесвечения уменьшается, и при давлениях в несколько сотен торр послесвечение практически отсутствует. Пространственно-временная развертка свечения разряда в таких условиях представляет собой просто наклонную линию (заметим, что такой же эффект наблюдался нами и ранее в экспериментах с другой частотой нагрева плазмы 0.55 THz [1,2]). Это связано с тем, что при высоком давлении нейтрального газа в аргоне эффективно образуются комплексы Ar_2^+ , время диссоциативной рекомбинации которых для концентраций плазмы $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ составляет менее одной микросекунды. Расчеты, аналогичные выполненным в [1], показывают, что для того, чтобы слой плазмы с наблюдаемой

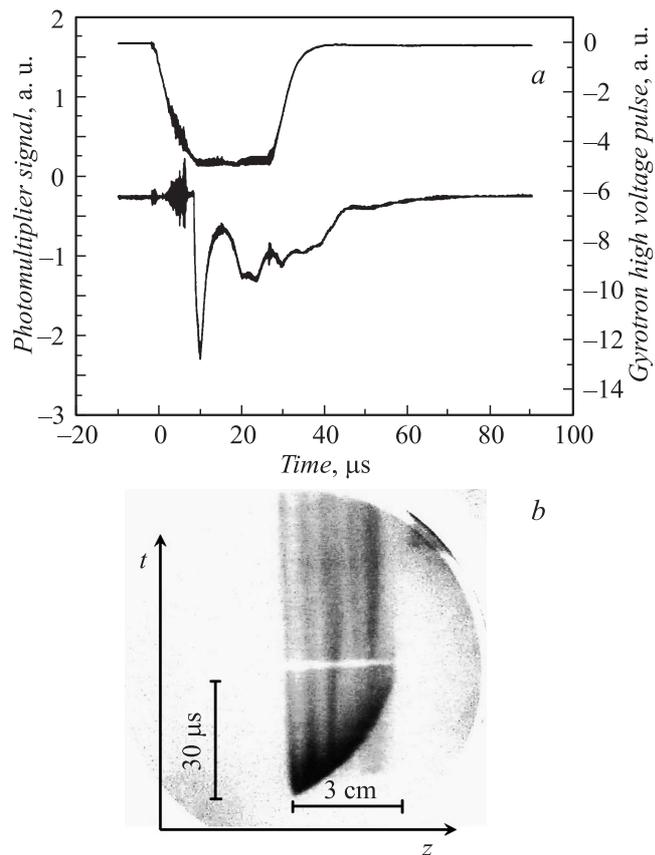


Рис. 3. *a* — осциллограммы свечения плазмы в оптическом диапазоне (сигнал фотоэлектронного умножителя (нижний луч)) и импульса высокого напряжения гиротрона (верхний луч). Фоновое давление газа 100 Торг. *b* — пространственно-временная развертка свечения разряда при фоновом давлении газа 50 Торг. По вертикали отложено время, по горизонтали — координата, направленная навстречу терагерцовому излучению.

в эксперименте характерной толщиной порядка 2 mm практически полностью экранировал излучение гиротрона, максимум концентрации в нем должен быть на уровне 0.2–0.4 от критической, что для

частоты 0.67 THz дает оценку $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Стоит отметить, что такая величина N_e обеспечивает наблюдаемое время распада плазмы по механизму диссоциативной рекомбинации.

Проведенные эксперименты показали, что в разряде, поддерживаемом мощным сфокусированным излучением терагерцового диапазона частот в неоднородном потоке газа, при определенных условиях возможно создание плазмы с величиной концентрации не только близкой к критической, но даже существенно ее превышающей. Последний случай соответствует условиям, в которых реализуется „точечный“ разряд, эффективно излучающий в области вакуумного ультрафиолета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00609).

Список литературы

- [1] *Bratman V.L., Zorin V.G., Kalynov Yu.K. et al.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. Art. N 083507.
- [2] *Bratman V.L., Izotov I.V., Kalynov Yu.K. et al.* // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. Art. N 123512.
- [3] *Глявин М.Ю., Голубев С.В., Зорин В.Г. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8–9. С. 622–627.
- [4] *Glyavin M.Yu., Golubev S.V., Izotov I.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. Art. N 174101.
- [5] *Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Nusinovich G.S. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. Art. N 153503.
- [6] *Очкин В.Н.* Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2010. 337 с.
- [7] *Тарасов К.И.* Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1977. 367 с.
- [8] *Грим Г.* Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978. 491 с.