

СОГЛАСОВАННАЯ ИНЖЕКЦИЯ ГАЗА И ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМЕННУЮ РАЗРЯДНУЮ ТРУБКУ

*А. А. Дроздовский^{a, 1}, С. А. Дроздовский^a, А. В. Канцырев^a,
С. М. Савин^a, А. Л. Ситников^a*

^a Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

В исследованиях Z -пинч-разрядов при воздействии интенсивных электронных пучков одним из методов повышения плотности тока пучка в плазме является применение импульсного напуска газа в разрядный промежуток. В работе произведено исследование импульсного напуска газа в разрядную плазменную трубку при непрерывном измерении давления газа быстрым ионизационным датчиком. Разработанная методика позволяет синхронизировать процесс наполнения газом экспериментального объема с процессом инжекции пучка электронов в плазму. При этом возможно ввести пучок с высокой плотностью тока, если осуществить инжекцию электронов ранее входа газового фронта в транспортный канал, предотвращая рассеяние пучка и рост его фазового объема.

In studies of Z -pinch discharges under affection of intense electron beams, one of the methods for increasing the beam current density in plasma is a pulse gas injection into the discharge tube. In this work, we studied the pulse gas supply into the plasma discharge tube while continuously measuring the gas pressure by a fast-response ionization sensor. The technique developed makes it possible to synchronize the process of filling the experimental volume by the gas with the process of injecting the electron beam into the plasma. Moreover, it is possible to intake a beam with high current density if the electrons are injected before the gas front enters the transport channel, preventing beam scattering and phase volume increasing.

PACS: 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в физике плазмы и пучков заряженных частиц, такие как: разработка компактных лазерных ускорителей с использованием в системе фокусировки пучков плазмы Z -пинчевого типа [1]; анализ генерации и физики астрофизических джетов и их распространения в окружающей среде [2]; генерация излучения в диапазоне 0,3–0,9 ТГц в системе пучок–плазма [3]. В этих работах актуальным является решение вопросов транспортировки и фокусировки пучков в газовой и плазменной среде. При этом серьезная проблема — предотвращение расходности пучков заряженных частиц вследствие многократного рассеяния на атомах газа. Представляемая работа посвящена решению этой задачи путем синхронизации инжекции электронного пучка с напуском

¹E-mail: drozdovsky@itep.ru

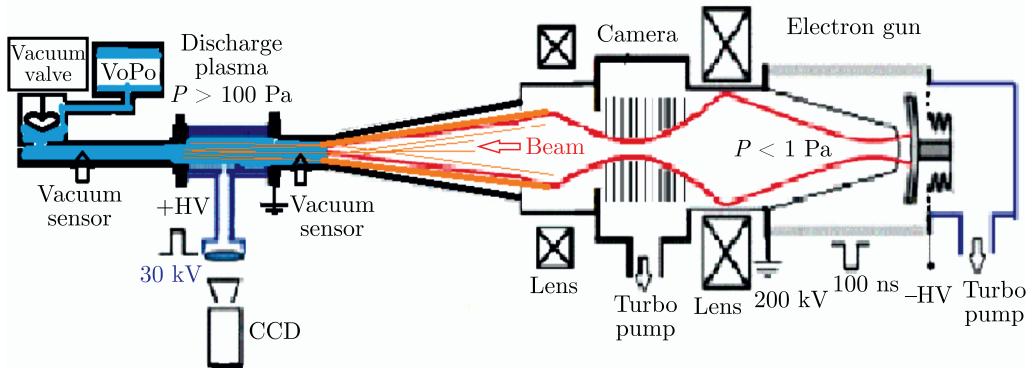


Рис. 1. Схема установки для исследования Z -пинч-разряда при воздействии интенсивного электронного пучка

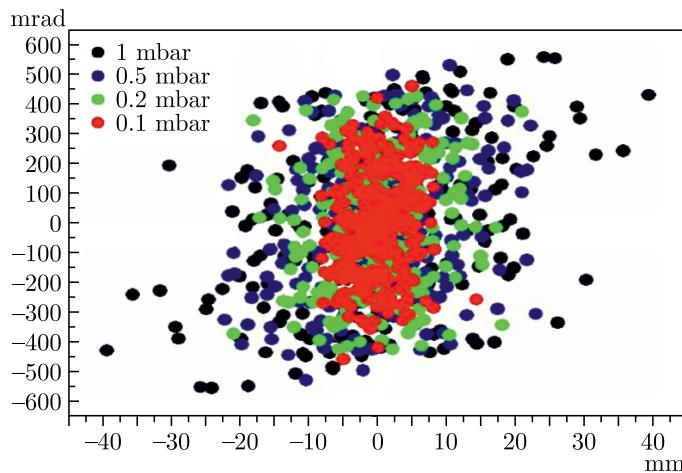


Рис. 2. Фазовые объемы пучка на входе в разрядную трубку

газа в вакуумную трубку, где происходит высоковольтный плазменный разряд и формируется Z -пинч. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки в НИЦ «Курчатовский институт» для исследования Z -пинча при воздействии интенсивного электронного пучка.

Проведенные расчеты [4] прохождения электронного пучка от пушки до разрядной трубки при различных давлениях газа Ar в канале показали (рис. 2), что для эффективной инжекции пучка в разрядную трубку давление газа должно быть меньше 0,1 мбар, тогда как исследования пинчующегося плазменного разряда проводятся при больших давлениях.

При проведении исследований при давлениях более $\sim 0,5$ мбар для обеспечения удовлетворительной проводки пучка необходимо на входе в трубку устанавливать разделительную майларовую пленку. Но даже при минимально возможной толщине пленки $\sim 0,5$ мкм фазовый объем пучка увеличивается до недопустимой величины.

Для решения данной проблемы была разработана система импульсного напуска газа с синхронизацией инжекции пучка в разрядный промежуток.

1. СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО НАПУСКА ГАЗА

Напуск газа осуществляется с помощью электромагнитного клапана КВМ-25 из небольшого сосуда объемом V_0 , заполняемого через натекатель до давления P_0 . После открытия клапана газ движется по цилиндрическому каналу через разрядную трубку и фокусирующий канал в электронную пушку.

Когда поток газа начинает выходить из разрядной трубы, производится запуск электронной пушки ускорителя. Пучок релятивистских электронов, пройдя высоковакуумный канал ускорителя, входит в разрядную трубку. Для синхронизации процедуры напуска газа и инжекции пучка электронов требуется точно определять момент выхода фронта газового потока из разрядной трубы в сторону пушки. Для измерения давления газа в реальном масштабе времени использован вакуумметр ВИТ-3 с ионизационным датчиком — преобразователем ПМИ-10-2, который может обеспечить проведение измерения с временным разрешением в десятки микросекунд [5] с возможностью вывода сигнала на осциллограф. Для получения требуемого временного разрешения необходимо обеспечить прохождение газового потока через зону ионизации. Поэтому металлический корпус датчика срезается в области расположения электродов и ионизирующего устройства. На фотографии (рис. 3) показана лампа ПМИ-10-2 с укороченным корпусом.

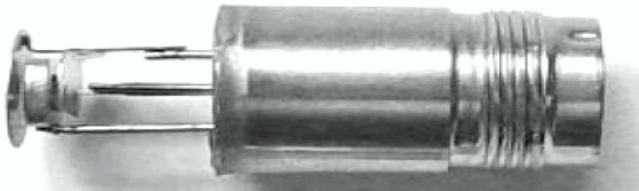


Рис. 3. Ионизационный датчик — лампа ПМИ-10-2 с укороченным корпусом

2. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ И ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Ввиду отсутствия стандартных быстрых датчиков калибровку производили путем регистрации давления газа в определенном поперечном сечении канала распространения газового потока в течение всего импульса введенного газа. На рис. 4 представлены осциллограммы напряжений с двух датчиков давления, расположенных до и после разрядной трубы Z -пинча (см. рис. 1).

Калибровочный коэффициент $k = P/U$ связывает давление P (мбар) газа и напряжение U (В) на выходе датчика (показание прибора). Он определяется из уравнения, выражающего равенство количества атомов, прошедших через клапан, количеству атомов, прошедших через сечения канала:

$$P_0 V_0 = k \pi R^2 v \int_0^{\infty} U(t) dt,$$

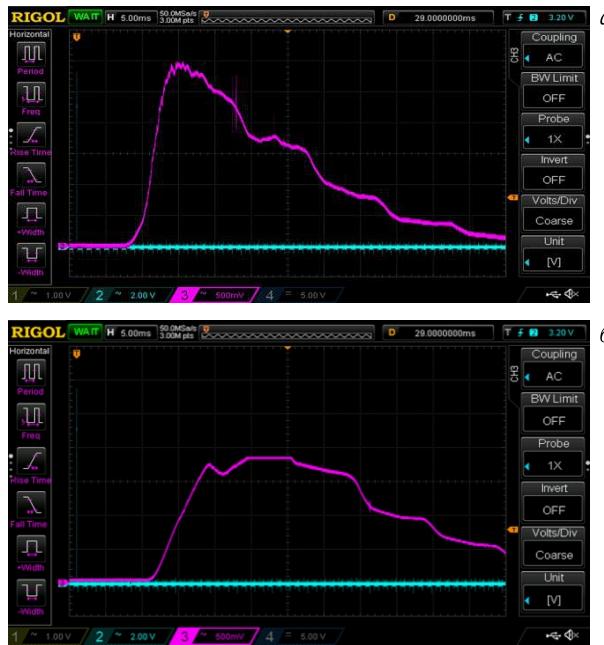


Рис. 4. Осциллограмма напряжения с датчика давления на выходе газового клапана (а) и разрядной трубы (б)

где P_0 и V_0 — давление и объем газа в резервуаре накопления газа в момент начала напуска в канал; R — радиус канала; v — скорость распространения газа; U — регистрируемое напряжение с датчика; t — время. $U(t)$ регистрируется на осциллографе.

Скорость распространения фронта в интервале между датчиками под номерами i и j равна $v_{ij} = d_{ij}/t_{ij}$, где d_{ij} — расстояние между датчиками, а t_{ij} — временной интервал между моментами прохождения фронта барической волны через датчики. В нашем случае $v = v_{12} = 275$ м/с, $P_0 = 10$ мбар, $V_0 = 360$ см³, $R = 2$ см, $k = 0,127$ мбар/В.

Процесс изменения во времени давления газа по всей длине канала приближенно вычисляется методом волновой интерполяции следующим образом. Располагая данными $P_i(t)$ одного датчика при известной средней скорости распространения v , можно экстраполировать процесс на все пространство как простой перенос: $P(x, t) = P_i(t - (x - x_i)/v)$, где x — координата, t — время. Соответственно между двумя соседними датчиками для $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ линейная интерполяция двух таких волн дает

$$P(x, t) = (x_{i+1} - x)/(x_{i+1} - x_i)P_i(t - (x - x_i)/v_{i(i+1)}) + \\ + (x - x_i)/(x_{i+1} - x_i)P_{i+1}(t + (x_{i+1} - x)/v_{i(i+1)}).$$

На рис. 5 показаны распределения давления газа по каналу в различные фиксированные моменты времени. Ось абсцисс — координата, ось ординат — давление,

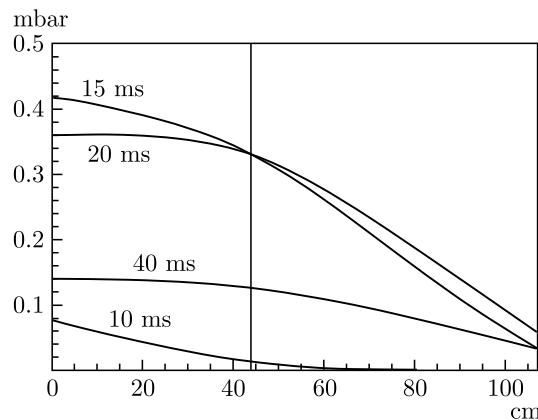


Рис. 5. Распределения давления в канале в разные моменты времени

вертикальные линии — положение датчиков, которых всего 3. Весь процесс занимает < 120 мс.

Длина заполняемой газом области $\sim 0,5$ м, что существенно меньше пробега пучка от электронной пушки до разрядной трубки. Таким образом, электроны пучка большую часть пути могут проходить в условиях более низкого давления газа.

3. ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАПУСКЕ ГАЗА

Были проведены первые эксперименты по проверке эффективности согласованной инжекции электронного пучка, при которой пучок «встречается» с потоком газа Ar в области входа в разрядную трубку. Запуск систем электронного ускорителя производился от импульса вакуумного датчика. Это позволяет уменьшить влияние нестабильности работы газового клапана. На рис. 6 приведена осциллограмма сигнала с датчика, расположенного рядом с разрядной трубкой. Там же показан сигнал с пояса Роговского, измеряющего ток пучка. Поскольку длительность пучка равна 100 нс, что на 5 порядков меньше длительности сигнала с вакуумного датчика, сигнал пучка выглядит как тонкий «столбик» высотой, равной амплитуде тока пучка. Регистрация свечения газа под воздействием электронного пучка производилась с помощью стриккамеры BIFO K-008 [6]. На рис. 7, а и б показано изображение свечения газа Ar под

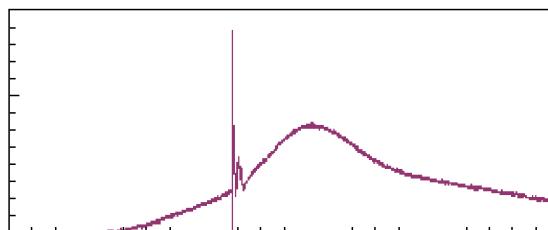


Рис. 6. Осциллограмма сигнала с датчика, расположенного рядом с разрядной трубкой. Вертикальная линия — сигнал тока пучка



Рис. 7. Свечения газа Ar при «согласованной» (а) и «несогласованной» (б) инжекции

воздействием пучка в прозрачной разрядной трубке при давлении 0,5 мбар для двух случаев:

- случай «согласованной» инжекции, когда пучок пересекает газовый фронт при входе в разрядную трубку;
- случай «несогласованной» инжекции, когда газовый поток проходит значительную часть ускорительного тракта при давлении, большем 0,1 мбар.

На рис. 8 приведены соответствующие усредненные поперечные профили светимости электронного пучка в газе Ar.

Таким образом, как можно видеть, при «согласованной» инжекции пучка с применением системы импульсного напуска газа удается уменьшить рассеяние пучка в газе.

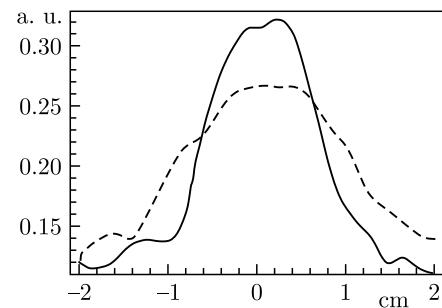


Рис. 8. Профили светимости треков электронных пучков. Сплошная линия — согласованная инжекция, штриховая — несогласованная

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и испытана система импульсного напуска газа в разрядную трубку экспериментальной установки по исследованию Z-пинча. Освоена методика измерения изменяющегося во времени давления газа при уровне вакуума до 10 мбар с временным разрешением до ~ 10 мкс. Методика позволяет контролировать процесс импульсного напуска газа в экспериментальный объем. Измерена скорость движения фронта напускаемого газа. Совместное использование методик импульсного напуска газа и быстрого измерения давления позволяет синхронизировать процесс наполнения газом экспериментального объема с процессом инжекции пучка электронов в плазму. Методика позволяет осуществить ввод пучка с высокой плотностью тока, так как транспорт пучка будет происходить при относительно низком давлении до прихода газового фронта, что исключит его рассеяние и рост фазового объема.

Одновременно с эффективной инжекцией достигается хорошая чистота состава газа в плазменных экспериментах, поскольку газ с относительно высоким требуемым давлением напускается в объем, составляющий лишь небольшую часть общего объема ускорительной установки, что обеспечивает высокую скорость откачки вакуумной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Tilborg J., Steinke S., Geddes C. G. R., Matlis N. H., . . . , Sasorov P. V. et al. Active Plasma Lensing for Relativistic Laser-Plasma-Accelerated Electron Beams // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 184802.

2. Войтенко Д.А., Ананьев С.С. и др. Исследование плазменных потоков, генерируемых в плазмофокусном разряде, при различных режимах напуска рабочего газа // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 12. С. 967–982.
3. Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Popov S. S. et al. // IEEE Trans. Plasma Science. 2022. V. 50, No. 8. P. 2348–2363.
4. Drozdovsky A. A., Sasorov V. et al. Z-Pinch Study with Discharge Initiation by an Electron Beam // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 4. P. 488–493.
5. Батурина В. А., Карпенко А. Ю., Колинько С. В. // Вестн. Сумского гос. ун-та. Сер. «Физика, математика, механика». 2004. Т. 67, № 8. С. 138.
6. www.bifocompany.com

Получено 28 октября 2024 г.