

Влияние скорости натекания рабочего газа на распределение концентрации плазмы внутри полого катода несамостоятельного тлеющего разряда

Д.Ю. Игнатов^{}, В.В. Денисов, С.С. Ковальский*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

^{}danilabay29@ya.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования распределений концентрации плазмы, полученных с использованием пяти двойных зондов Ленгмюра. Генерация плазмы осуществлялась внутри протяжённого полого катода в несамостоятельном тлеющем разряде, поддерживаемым дополнительной инжекцией электронов из плазмы вспомогательного разряда при давлении (0.35–0.7) Па, напряжении горения (100–250) В и значении тока около 4.5 А. Представлены результаты влияния величины скорости натекания газа на распределения концентрации плазмы внутри полого катода.

Ключевые слова: полый катод, тлеющий разряд, плазма газового разряда, концентрация плазмы.

1. Введение

Генерация однородной низкотемпературной плазмы внутри протяжённой металлической полости со значением отношения длины к диаметру более 10 является достаточно сложной задачей. В случае генерации плазмы в тлеющем разряде с полым катодом при давлениях от ~10 Па и более происходит локальный перегрев полости вблизи торца катода, где расположен анод [1]. Дальнейшее распространение разряда вглубь полости сопровождается снижением концентрации плазмы на несколько порядков, что приводит к высокой неоднородности концентрации плазмы.

В работе [2] было предложено решение проблемы генерации однородной плазмы в длинной металлической полости путём дополнительной инжекции электронов из плазмы вспомогательного разряда в плазму основного несамостоятельного тлеющего разряда с полым катодом. Основной и вспомогательный разряды в такой системе горят при давлении до 1 Па. Такое давление позволяет достичь длины свободного пробега электронов около 10 см и более, а за счёт эффекта полого катода инжектированные электроны осциллируют между стенками катода и проникают вглубь полости как прямой формы, так и изогнутой формы, эффективно ионизируя рабочий газ по всей её длине. Инжекция дополнительных электронов из плазмы вспомогательного разряда позволяет достигать относительно высокой плотности ионного тока на катод – около 10 мА/см² при напряжении горения основного разряда около 100 В и при давлении рабочего газа менее 1 Па.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию величины скорости натекания газа азота на неоднородность концентрации плазмы внутри полого катода с длиной 300 мм и диаметром 25 мм.

2. Описание экспериментальной установки

Генерация плазмы производилась в несамостоятельном тлеющем разряде внутри полого катода длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм. Анодом выступал водоохлаждаемый плоский электрод, расположенный вблизи торца катода [3]. Через торец полого катода, где располагается анод, производилась подача рабочего газа азота. На противоположном торце протяжённого катода закреплялась вольфрамовая сетка, через которую производилась инжекция дополнительных электронов из плазмы вспомогательного разряда с комбинированным накаливаемым и полым катодом. Плазма вспомогательного разряда генерировалась плазмогенератором «ПИНК» [4]. Рабочее давление, при котором стабильно зажигается и горит несамостоятельный тлеющий разряд составляет около (0.3–1) Па. При

данном давлении длина свободного пробега электронов составляет около 10 см, что позволяет потоку инжектированных электронов проникать вглубь полости и, многократно отражаясь от внутренних стенок полого катода, производить ионизацию рабочего газа по всей длине такой полости.

Данная работа является продолжением экспериментов [3] по исследованию влияния параметров горения несамостоятельного тлеющего разряда (напряжение горения разряда, ток инжектированных электронов, рабочее давление газа) на распределение параметров генерируемой плазмы вдоль внутренней полости протяжённого катода. Эта работа посвящена исследованию влияния скорости натекания рабочего газа на распределение концентрации плазмы внутри полого катода несамостоятельного тлеющего разряда. Изменение скорости натекания газа в катодной полости производилось с мощностью регулятора расхода газа РРГ-10, с верхним пределом регулирования $600 \text{ см}^3/\text{мин}$. При различных расходах вдоль полого катода несамостоятельного тлеющего разряда с мощностью пяти двойных цилиндрических зондов Ленгмюра с диаметром 0.4 мм и длиной 6 мм производилось измерение ВАХ каждого двойного зонда. Далее по полученной ВАХ двойного зонда рассчитывалась концентрация плазмы.

Более подробное описание работы данной разрядной системы, а также методики измерения параметров плазмы приведены в работе [3].

3. Результаты и обсуждение экспериментальных исследований

В экспериментах по азотированию внутренней полости трубки [2] было выявлено, что при скорости натекания газа $\sim 90 \text{ см}^3/\text{мин}$ азотирование вблизи анода, где осуществляется подача азота, не происходит, и только вблизи сетки был обнаружен азотированный слой. При снижении скорости натекания газа азота через полый катод до $\sim 10 \text{ см}^3/\text{мин}$, но сохранении общего давления в вакуумной камере, за счёт увеличения натекания аргона, напускаемого через плазмогенератор «ПИНК», азотирование поверхности реализуется по всей длине внутренней полости катода разряда. Однако это перераспределение скоростей натекания газа повлияло на параметры плазмы внутри полого катода, вследствие чего изменилось распределение температуры вдоль полого катода.

Для более подробного изучения влияния скорости натекания рабочего газа на параметры плазмы вдоль внутренней полости полого катода были проведены зондовые исследования параметров плазмы. Результаты зондовых исследований распределения концентрации плазмы представлены на Рис.1.

Измерение распределения параметров плазмы проводилось при трёх различных скоростях натекания азота $12 \text{ см}^3/\text{мин}$ – (Рис.1а, Рис.1б); $36 \text{ см}^3/\text{мин}$ – (Рис.1в, Рис.1г); $96 \text{ см}^3/\text{мин}$ – (Рис.1д, Рис.1е) и при двух разных давлениях 0.35 Па – (Рис.1а, Рис.1в, Рис.1д); 0.7 Па – (Рис.1б, Рис.1г, Рис.1е). Общее давление в вакуумной камере устанавливалось путём подачи азота в полый катод несамостоятельного тлеющего разряда до 0.04 Па при скорости натекания $12 \text{ см}^3/\text{мин}$, до 0.08 Па при скорости натекания $36 \text{ см}^3/\text{мин}$, до 0.25 Па при скорости натекания $96 \text{ см}^3/\text{мин}$, а дальнейшее увеличение давления до 0.35 и 0.7 Па происходило за счёт подачи аргона через полый катод вспомогательного разряда плазмогенератора «ПИНК». Для каждого значения скорости натекания и давления рабочего газа изменялось напряжение горения несамостоятельного тлеющего разряда от 100 до 250 В. Ток вспомогательного разряда не изменялся и во всех экспериментах составлял 2.5 А.

На графиках видно, что в зависимости от скорости натекания газа изменяется форма кривых распределения концентрации плазмы вдоль полого катода. При скорости натекания $12 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $36 \text{ см}^3/\text{мин}$ максимум концентрации находится вблизи торца трубки, где расположена сетка и доходит до значения $6.5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

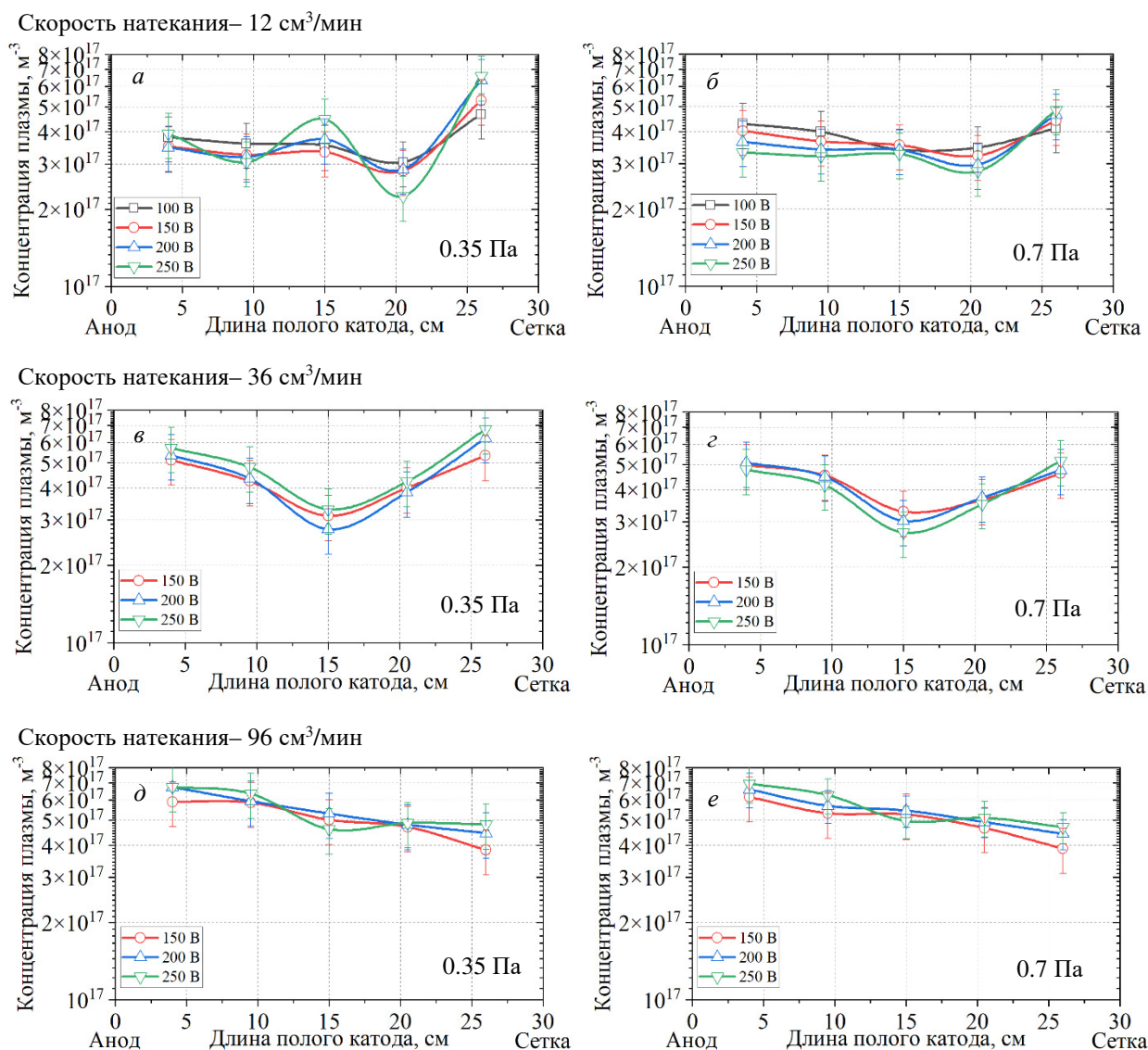


Рис.1. Распределения концентрации плазмы вдоль полого катода. (а, б) – 12 см³/мин; (в, г) – 36 см³/мин; (д, е) – 96 см³/мин. (а, в, д) – 0.35 Па; (б, г, е) – 0.7 Па;

Вероятно, это связано с тем, что с данного торца происходит инжекция электронов из плазмы вспомогательного разряда в полый катод основного разряда. Далее происходит уменьшение концентрации плазмы на длине 20 см от торца, где расположен анод до $2.2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при давлении 0.35 Па и до $3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при давлении 0.7 Па при скорости натекания 12 см³/мин. Более выраженный минимум концентрации плазмы в середине полого катода при скорости натекания 36 см³/мин, доходящий до $3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Возле анода на расстоянии 5 см концентрация плазмы вновь имеет максимум и доходит до $5.5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, особенно это хорошо видно при скорости натекания 36 см³/мин. Вероятно, максимум концентрации плазмы связан с тем, что в этой области производится подача газа азота в катодную полость, и вероятность произвести ионизацию потоком инжектированных электронов увеличивается при повышении скорости натекания азота.

При скорости натекания 96 см³/мин также наблюдается максимум концентрации плазмы до $7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ вблизи анода, потом происходит небольшой спад концентрации плазмы вплоть до торца с сеткой до $4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ где происходит инжекция электронов. В этом режиме

скорость натекания газа была максимальной, что и повлияло на максимум концентрации плазмы только вблизи анода.

В Таблице 1 представлены коэффициенты неоднородности концентрации плазмы K_n , которые рассчитывались по формуле в соответствии с методикой, приведенной в [5], при различных значениях скорости натекания газа азота через полый катод, напряжения горения несамостоятельного тлеющего разряда и давления. При уменьшении напряжения горения основного разряда ниже 150 В и скорости натекания газа от 36 см³/мин основной разряд погасал и измерение концентрации плазмы не производилось (Таблице 1, режимы № 1 и № 5).

Таблица 1. Коэффициенты неоднородности концентрации плазмы при различных параметрах горения несамостоятельного тлеющего разряда

Режимы, №	1	2	3	4	5	6	7	8
p , Па	0.35				0.7			
$U_{пл}$, В	100	150	200	250	100	150	200	250
$K_n, \pm\%$, натекание 12 см ³ /мин	25	45,5	62	62	11	17	29	39
$K_n, \pm\%$, натекание 36 см ³ /мин	-	22	38	36	-	18	20	27
$K_n, \pm\%$, натекание 96 см ³ /мин	-	16	23	23	-	22	22	24

Из таблицы видно, что при увеличении скорости натекания азота от 12 см³/мин до 96 см³/мин при давлении 0.35 Па в режимах № 2, № 3, № 4 коэффициент неоднородности концентрации плазмы снижается почти в 3 раза и достигает $\pm 16\%$.

При давлении 0.7 Па и увеличении скорости натекания газа снижение коэффициента неоднородности концентрации плазмы незначительное, а в режиме 6 и вовсе увеличивается с ± 17 до $\pm 22\%$. При данном давлении в режиме 5 наблюдается самый низкий коэффициент неоднородности, который составил $\pm 11\%$.

4. Заключение

Генерация плазмы с помощью несамостоятельного тлеющего разряда внутри протяжённого полого катода длиной 300 мм и внутренним диаметром 25 мм за счёт внешней инжекции электронов из плазмы вспомогательного разряда позволяет создавать за счет оптимизации режимов горения разряда по давлению и скорости натекания рабочего газа плазму с концентрацией до $7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при коэффициенте неоднородности концентрации плазмы не хуже $\pm 20\%$.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

5. Список литературы

- [1] Москалев Б.И., *Разряд с полым катодом*. (Москва: Энергия, 1969).
- [2] Ignatov D.Y., et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **48**, 2050, 2020;
doi: 10.1109/TPS.2020.2996739
- [3] Ignatov D.Y., et al., *Russian Physics Journal*, **64**, 2170, 2022;
doi: 10.1007/s11182-022-02573-w
- [4] Denisov V.V., et al., *Russian Physics Journal*, **62**, 541, 2019;
doi: 10.1007/s11182-019-01743-7
- [5] Ignatov D., Lopatin I., Koval N., Denisov V., *Proc. IEEE 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 576, 2020;
doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242106