

Исследование влияния материала и геометрии внешней поверхности анода инжектора плазменной струи на пространственное распределение электрического поля в буферной плазме отражательного разряда

Н. Н. Антонов и Г. Д. Лизякин

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: antonovnickola@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2018 г.

Аннотация. Сопряжение буферного разряда с пространственным распределением потенциала и источника плазмы модельных веществ является важной задачей для развиваемого метода плазменной сепарации с потенциальной ямой. В работе представлены результаты исследования влияния материала внешней поверхности полого анода источника плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом на радиальное пространственное распределение потенциала отражательного разряда. Экспериментально показано, что использование дополнительного диэлектрического либо изолированного металлического экрана на внешней поверхности позволяет снизить влияние потенциала анода на пространственное распределение электрического потенциала в буферной плазме и существенно увеличить градиенты электрического поля вблизи инжектируемой плазменной струи. <https://doi.org/10.33849/2018103>

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач для разрабатываемого сегодня метода плазмооптической сепарации отработавшего ядерного топлива, предложенного Смирновым В.П. [1, 2], является создание распределения электрического потенциала в буферной плазме. Это необходимо для пространственного разделения и компенсации объемного заряда ионизированных потоков веществ различных масс (продуктов распада и продуктов, пригодных для повторного использования), инжектируемых вдоль силовых линий магнитного поля. В работе [3] в рамках одночастичного моделирования движения частиц двух сортов (атомные массы 240 и 160 а.е.м.) в скрещенных электрическом и магнитном полях было показано, что инжекция вдоль силовых линий магнитного поля является одним из способов ввода вещества, который обеспечивает эффект сепарации при определенных условиях: угол основного направления инжекции с магнитным полем 0° , угловой разброс скоростей 60° и начальная энергия частиц 0–20 эВ.

Задача ввода плазменного потока разделяемых материалов в буферную плазму с необходимым для обеспечения эффекта сепарации пространственным профилем электрического потенциала является нетривиальной. Это связано с тем, что инжекция струи плазмы может приводить к искажению пространственного распределения потенциала, а электроды, формирующие плазменный поток и требуемый электрический потенциал, конкурируют друг с другом в плазменном объеме. Для реализации и развития предложенной концепции в настоящее время ведутся исследования, призванные решить такие задачи как перевод конденсированного вещества в плазменное состояние [4–6], создание буферной плазмы с замагниченными электронами и заданным профилем электрического потенциала [7, 8], разделение потоков веществ [3], их осаждение [9] и др.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния материала внешней поверхности анода источника плазмы модельных веществ на радиальное распределение электростатического потенциала в

буферной плазме отражательного разряда модельной установки по плазменной сепарации.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Вакуумная камера представляет собой металлический цилиндр диаметром 80 см и длиной 200 см. Предельное давление остаточных газов до 10^{-5} Торр. Магнитное поле, формируемое катушками Гельмгольца, до 2 кГс. Буферная плазма отражательного разряда инициировалась в атмосфере аргона с помощью системы торцевых электродов (напряжение –1200 В, ток разряда 300 мА) и заземленной обечайки вакуумной камеры.

Схема источника плазмы, который размещался на расстоянии 17 см от оси установки, представлена на рисунке 1. Инициация несамостоятельного слаботокового (10–40 мА) разряда плазмотрона и буферного отражательного разряда осуществлялась в атмосфере аргона при давлении 0,4 мТорр. В качестве термокатода плазмотрона использовалась подогреваемая таблетка LaB_6 диаметром 6 мм. В ходе экспериментов катодный узел принимал потенциал –300 В. Анод представлял собой кольцо с внутренним диаметром 1 см и внешним 5,5 см (полый анод). Расстояние между катодом и анодом составляло 5 см. Ток разряда ограничивался балластным сопротивлением. На расстоянии 54 см от полого анода размещался диагностический коллектор ионов формируемой плазменной струи, на котором поддерживался потенциал –350 В.

С технологической точки зрения важным является вопрос о сопряжении источника плазмы и оптимального распределения потенциала, обеспечивающего разделение элементов. Сопряжение в данном случае означает минимизацию влияния источника плазмы на параметры буферного разряда и пространственное распределение потенциала в нем. Для экспериментального определения оптимальной для разделения элементов координаты радиуса размещения источника необходимо обеспе-

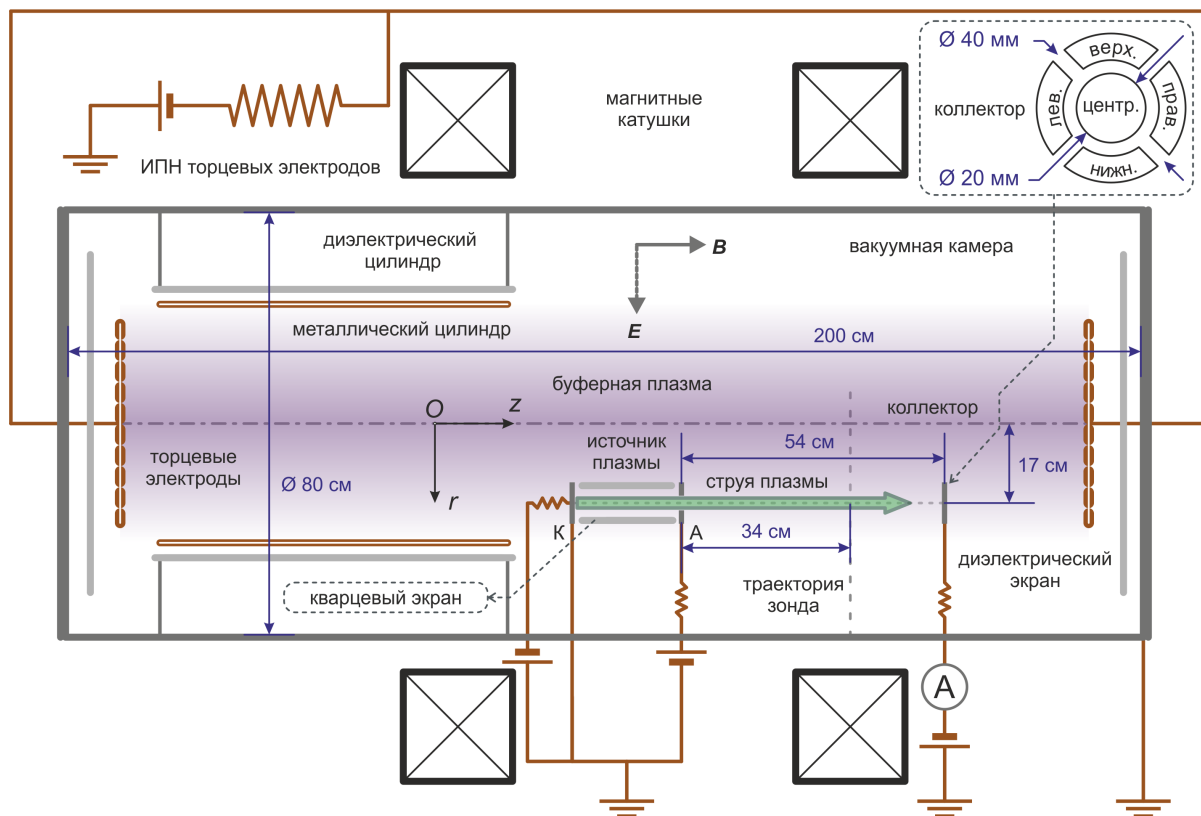


Рисунок 1. Схема экспериментального стенда.

чить гальваническую развязку всех узлов источника и возможность его перемещения вдоль радиуса. Так как в рамках концепции плазменного разделения элементов с потенциальной ямой потенциалы внутри камеры сепарации принимают значения до нескольких сотен вольт, то была реализована гальваническая развязка всех узлов источника плазмы до напряжения 1 кВ.

Обеспечение необходимого для вытягивания разделяемых элементов градиента потенциала вблизи плазменной струи является нетривиальной задачей в силу того, что потенциал анода источника плазмы выше потенциала катода. Это приводит к образованию потенциальной ямы для ионов струи плазмы вдоль магнитных силовых линий, на которые опираются электроды. Для определения конфигурации, которая позволяет минимизировать данный эффект были проведены исследования влияния материала внешней поверхности полого анода на распределение потенциала внутри камеры сепарации. В рамках исследований были проанализированы следующие конфигурации: диэлектрик, металлическая пластина (плавающий потенциал), металлическая пластина (потенциал анода), металлическая пластина (потенциал коллектора).

Измерения распределения электростатического потенциала плазмы выполнялись с помощью метода плавающего зонда, который мог перемещаться вдоль радиуса вакуумной камеры и располагался на расстоянии 34 см от анода источника плазмы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 и рисунке 3 приведены результаты исследования радиального распределения потенциала для

двух разных значений разности потенциалов в межэлектродном промежутке плазмотрона и различных вариациях материалов внешней поверхности его анода. Потенциал анода относительно катода в двух сериях экспериментов принимал значения 20 В (относительно потенциала земли –280 В) и 100 В (относительно потенциала земли –200 В) соответственно.

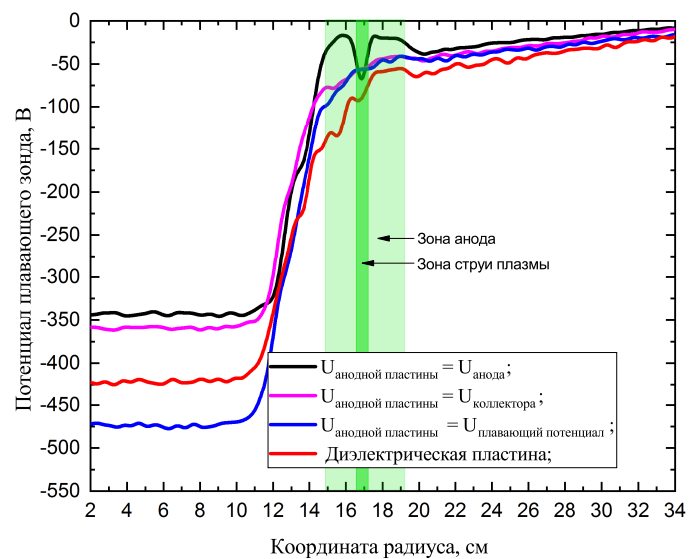


Рисунок 2. Влияние материала внешней поверхности полого анода на распределение потенциала. Потенциал катода –300 В. Потенциал коллектора –350 В. Разность потенциалов между катодом и анодом 20 В. Ток разряда плазмотрона 10 мА.

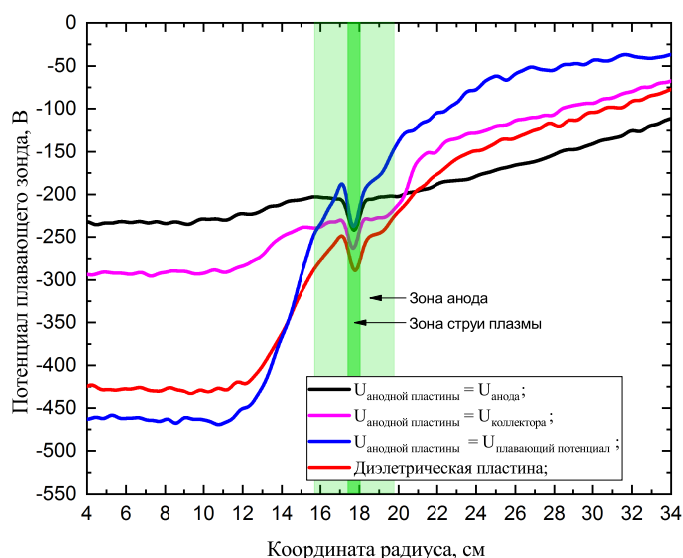


Рисунок 3. Влияние материала внешней поверхности полого анода на распределение потенциала. Потенциал катода -300 В. Потенциал коллектора -350 В. Разность потенциалов между катодом и анодом 100 В. Ток разряда плазмотрона 40 мА.

Из рисунков видно, что наименьшее экранирование ионов плазменной струи от действия радиального электрического поля отражательного разряда достигается при размещении на внешней поверхности анода диэлектрического материала и металлической пластины, принимающей плавающий потенциал. Также при их размещении обеспечивается минимизация влияния конструкции источника на распределения потенциала в отражательном разряде. Это позволяет поддерживать распределение потенциала близкое к расчетному и обеспечивающему разделению ионов по группам масс. Ключевое

различие между двумя рисунками заключается в том, что увеличение концентрации плазмы в струе (тока разряда источника) приводит к эффективному воспроизведению потенциала анода и термокатода, который в экспериментах принимал значение -300 В.

4. ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что использование дополнительного диэлектрического (либо изолированного металлического) экрана на внешней поверхности анода позволяет снизить влияние потенциала анода на пространственное распределение электрического потенциала в плазме отражательного разряда, вызываемое источником плазменной струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Smirnov V P, Samokhin A A, Vorona N A and Gavrikov A V 2013 *Plasma Phys. Rep.* **39** 456–466
- Долголенко Д А и Муромкин Ю А 2017 *УФН* **187** 1071–1096
- Gavrikov A V, Sidorov V S, Smirnov V P and Tarakanov V P 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012172
- Amirov R K, Gavrikov A V, Liziakin G D, Polistchook V P, Samoylov I S, Smirnov V P, Usmanov R A, Vorona N A and Yartsev I M 2017 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45** 140–147
- Usmanov R A, Amirov R K, Gavrikov A V, Liziakin G D, Polistchook V P, Samoylov I S, Smirnov V P, Vorona N A and Yartsev I M 2018 *Phys. Plasmas* **25** 063524
- Antonov N N, Gavrikov A, Smirnov V, Liziakin G, Usmanov R, Vorona N and Timirkhanov R 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012171
- Liziakin G D, Gavrikov A V, Murzaev Y A, Usmanov R A and Smirnov V P 2016 *Phys. Plasmas* **23** 123502
- Liziakin G, Gavrikov A, Usmanov R, Timirkhanov R and Smirnov V 2017 *AIP Adv.* **7** 125108
- Антонов Н Н, Жабин С Н, Гавриков А В, Смирнов В П и Тимирханов Р А 2016 *Прикладная Физика* **4** 70–74