

Инжекция плазмы тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона в форвакуумную область давлений

К.П. Савкин, Д.А. Сорокин

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634050, Томск, Россия, пр. Академический, 2/3, savkin@opee.hcei.tsc.ru*

Представлены результаты исследования оптического излучения плазменной струи, генерируемой в результате инъекции плазмы тлеющего разряда атмосферного давления с потоком рабочего газа в область пониженного давления 0,5–133 Па ($\approx 3 \cdot 10^{-3}$ –1 Торр). Для генерации плазмы в таких условиях применялась двухэлектродная разрядная система на основе тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона, анодом которого являлась диафрагма с отверстием диаметром 200–300 мкм. Таким образом обеспечивался перепад давлений между разрядной системой генератора плазмы и вакуумной камерой, куда инжестировалась плазменная струя. Показано, что в указанном диапазоне давлений температура возбуждения электронов составляет около 0,6 эВ (≈ 6900 К). Рассмотрены перспективы применения такого генератора плазмы в качестве эффективного дополнения к существующим системам, использующим для генерации плазмы мощное СВЧ и терагерцовое излучение.

Ключевые слова: тлеющий разряд, атмосферное давление, плазменная струя, форвакуум, инъекция плазмы; glow discharge, atmospheric pressure, plasma jet, forevacuum, plasma injection.

Введение

Плазма, локализованная в объёме менее 1 см^3 при давлении 1–100 Па генерируется устройствами на основе лазерного и сверхвысокочастотного (СВЧ) разрядов [1], а также на основе разрядов, поддерживаемых мощным терагерцовым излучением [2]. Основной проблемой данных устройств является потеря электронов из пространства, где происходит электрический пробой. Причиной этого являются диффузия «горячих» электронов с температурами около $T_e \approx 10$ эВ [3] из плазмы, образованной вследствие пробоя, а также потери энергии электронов при столкновениях с частицами газовой мишени. Известно, что распространение переднего фронта указанных типов разрядов могут обеспечивать различные механизмы, а именно «волна пробоя» [4], фотоионизация [5], так называемый режим медленного горения [6]. Однако, даже при достижении электрического поля, достаточного для преодоления электрической прочности, пробой происходит только в случае превышения концентрации электронов критического уровня, который зависит от частоты излучения. Для этого требуется время, длительность которого находится в обратной зависимости от мощности электромагнитного излучения. В перечисленных условиях распространения фронта плазмы возможно уменьшить задержку возникновения пробоя и увеличить эффективность генерации плазмы путем снижения потерь электронов. Очевидным и обоснованным является изменение механизма диффузии электронов со свободной на амбиполяную, когда быстрые электроны удерживаются в плазме силой электрического поля, возникающей при разделении в пространстве ионов и электронов. Создание предварительной плазмы в области газовой мишени улучшает условия для пробоя. Для этого может применяться достаточно простой подход, который заключается в исполнении газодинамического сопла, которое формирует газовую мишень, в виде электрода с малым радиусом кривизны на его вершине [7]. Подача напряжения несколько десятков киловольт на данный электрод относительно заземленной вакуумной камеры, приводит к зажиганию коронного разряда, который генерирует предпробойную плазму и, тем самым, создает условия, облегчающие СВЧ пробой и обеспечивающие режим амбиполярной диффузии в разрядной плазме. Однако, присутствие электрического поля в области газовой мишени делает сопло-электрод коллектором заряженных частиц, ионов или электронов в зависимости от полярности приложенного напряжения. В случае положительного напряжения на сопло будет замыкаться электронный ток, увеличивая тепловую нагрузку за счет джоулева нагрева. При подаче отрицательного напряжения, в присутствии СВЧ плазмы, на поверхности сопла неизбежно будут возникать центры взрывной электронной эмиссии из-за усиления электрического поля в электрическом слое между соплом, находящимся под отрицательным потенциалом и разрядной плазмой, приводя к электрической эрозии материала сопла. Данные процессы будут приводить к снижению ресурса этого элемента разрядной системы.

В настоящей работе исследованы особенности генерации плазмы при давлениях характерных для устройств, использующих излучение СВЧ и оптического диапазонов, в качестве предьонизатора, который может оптимизировать процессы пробоя и распространения разряда, поддерживаемого электромагнитным излучением. В качестве источника плазмы применялась система на основе тлеющего разряда атмосферного давления [8], функционирующая в совокупности с вакуумной системой, обеспечивающей давление 1–100 Па непосредственно за анодом этого разряда. Такое устройство разрядной системы приводило к увлечению

плазмы потоком рабочего через отверстие в анодной диафрагме и формированию в вакууме расширяющейся плазменной струи без применения электрического поля для извлечения и ускорения электронов.

Постановка эксперимента

Устройство разрядной системы генератора плазмы, ее соединение с вакуумной системой, а также позиция относительно наблюдательного окна 1 представлены на рис. 1. Цилиндрический медный катод 9 диаметром 6,5 мм был закреплен на токовводе 11. Анод 8 изготовлен из фольги толщиной 300 мкм, материалом которой была нержавеющая сталь. Разрядная камера была образована присоединительным патрубком 6, проходным изолятором 10 и держателем токоввода 12, которые собирались воедино с применением герметизирующих прокладок из кремнийорганической резины. Разрядная система через вакуумный тройник 4 соединялась с камерой, в которой предварительное разрежение создавалось при помощи сухого спирального насоса. После откачки до давления ≈ 30 Па вакуумирование продолжалось при помощи турбомолекулярного насоса. В центре анода 8 было проделано отверстие диаметром 200 мкм, а в проходном изоляторе имелось отверстие для напуска рабочего газа 13, через которое разрядная камера сообщалась с газовым баллоном. При отсутствии напуска аргона, давление в вакуумной камере составляло не более 0,25 Па. При напуске аргона в разрядную систему с расходом 1–5 л/мин, газ поступал в вакуумную камеру через отверстие малого диаметра в аноде, обеспечивая давление от $\approx 0,4$ до ≈ 133 Па.

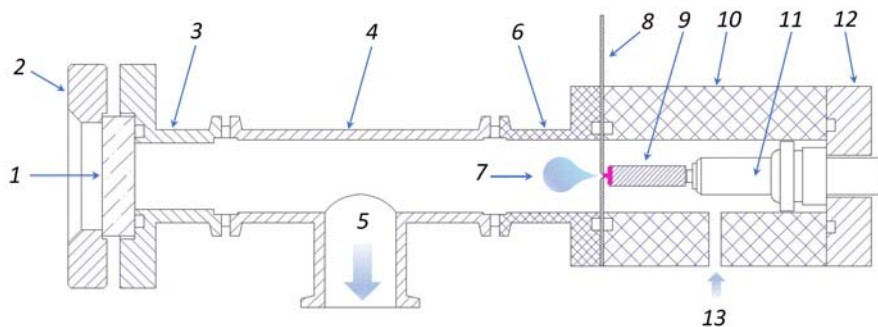


Рис. 1. Генератор плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона для инъекции в форвакуумную область давлений: 1 – кварцевое окно, 2 – прижимной фланец, 3 – держатель окна, 4 – вакуумный тройник KF 25, 5 – соединение с вакуумной системой, 6 – присоединительный патрубок, 7 – плазменная струя, 8 – анод-диафрагма, 9 – катод, 10 – проходной изолятор, 11 – токоввод катода, 12 – держатель токоввода, 13 – напуск аргона

Для электропитания разряда применялся источник импульсного напряжения серии APEL-SB-2PDC производства ООО «Прикладная электроника» (Россия, гор. Томск) с управлением амплитудой импульсов выходного отрицательного напряжения от 100 до 2000 В, частотой следования импульсов от 1 до 200 кГц, а также длительностью импульса от 10 до 80% от длительности периода. Применительно к исследованиям в рамках настоящей работы напряжение холостого хода составляло ≈ 400 В, при частоте следования импульсов 67 кГц, при длительности импульса 15 мкс. Ток разряда ограничивался резистором 1,7 кОм, который был включен последовательно с катодом в цепь питания разрядной системы.

Измерение напряжения горения разряда производилось при помощи высоковольтного делителя напряжения «Pintek» модель HVP – 28HF с коэффициентом деления 1:1000. Ток разряда определялся посредством измерения падения напряжения на шунтирующем резисторе 50 Ом. Сигналы с делителя напряжения и шунта подавались на вход осциллографа RIGOL MSO5204.

Спектральные характеристики излучения плазмы исследовались с применением компактного оптического спектрометра HR2000+ES (Ocean Optics). Спектральные распределения восстанавливались с учетом зависимостей коэффициентов пропускания и чувствительности от длины волны, которые были определены для всех элементов оптической измерительной системы.

Результаты и их обсуждение

Тлеющий разряд атмосферного давления стабильно функционировал с током ≈ 120 мА, при напряжении горения ≈ 220 В (рис. 2) между торцом цилиндрического катода и острой кромкой отверстия в аноде. Изменение расхода аргона от 1 до 5 л/мин не оказывало значительного влияния на параметры разряда. Однако изменение давления за анодной диафрагмой существенным образом влияло на диаметр плазменной струи, наблюдаемой невооруженным глазом. Например, при давлениях близких к 100 Па, плазма на выходе за анодной апертурой имела диаметр не более 5 мм, но с уменьшением давления до 0,5 Па диаметр плазменной струи увеличивался настолько, что полностью перекрывалось сечение трубопровода диаметром 25 мм, что свидетельствует о возможности формирования объемной плазмы в пределах той камеры, которую она заполняла.

Типичный спектр оптического излучения плазменной струи при давлении от 0,4 до 10 Па представлен на рис. 3. Очевидно, что вместе с группой линий, соответствующих переходам 4p–4s возбужденных атомах

аргона, наблюдается слабо выраженное непрерывное распределение в диапазоне длин волн от 500 до 700 нм, что может быть признаком рекомбинационных процессов с захватом ионами свободных электронов, которые имеют непрерывный энергетический спектр.

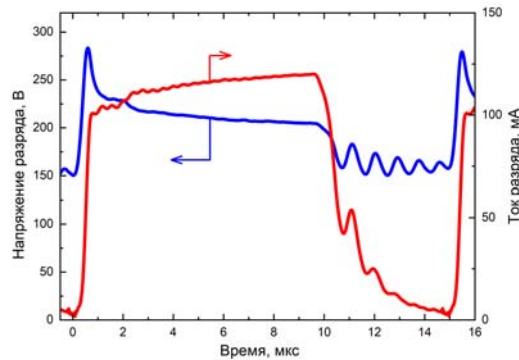


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона с расходом аргона 1 л/мин, при инъекции плазмы в форвакуумную область давлений

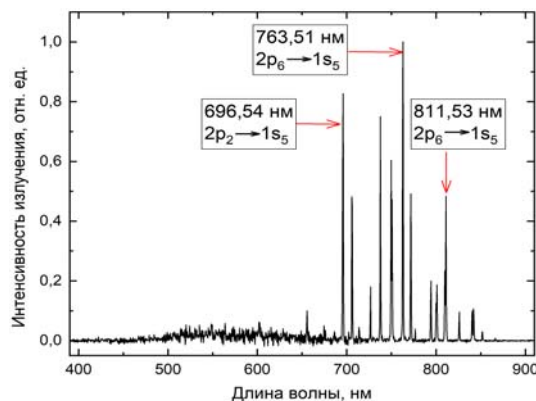


Рис. 3. Спектральное распределение интенсивности оптического излучения плазмы тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона, инжестированной через отверстие в анодной диафрагме в вакуум при давлении 10 Па

Температура возбуждения электронов T_{exc} близка к значению температуры плазменных электронов – значимого фундаментального параметра, который позволяет оценить неравновесность плазмы. Для оценки T_{exc} в плазме расширяющейся струи применялся метод, представленный в работе [9]. Использовались три перехода с близкими энергиями возбужденного состояния, отмеченные на рис. 3, а именно: $2p_2 \rightarrow 1s_5$, $2p_6 \rightarrow 1s_5$, $2p_9 \rightarrow 1s_5$, соответствующих линиям с длинами волн 696,54, 763,51 и 811,53 нм. В результате была получена зависимость искомого параметра T_{exc} от давления в пространстве распространения плазменной струи (рис. 4). С одной стороны, значения функции отличаются столь незначительно, что эту зависимость можно аппроксимировать прямой $T_{\text{exc}} = 0,6 \pm 0,2$ эВ, которая не зависит от давления. Тем не менее, при детальном анализе, зависимость T_{exc} , скорее всего, не является монотонной и имеет минимум в достаточно узком диапазоне давлений от 0,5 до 1 Па.

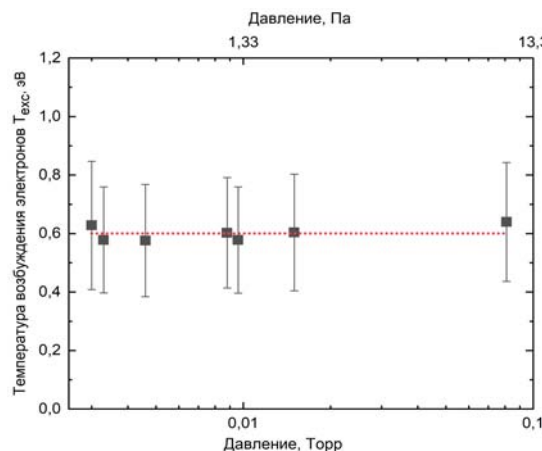


Рис. 4. Зависимость температуры возбуждения электронов в инжеструемой плазме от давления в области расширения плазменной струи применительно к условиям настоящего исследования

Заключение

Характерной особенностью тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона является вынос части положительного столба за пределы разрядной камеры через отверстие в аноде в результате увлечения плазмы потоком рабочего газа. Создание резкого перепада давления вблизи анодной диафрагмы приводит к тому, что в разрядной камере все процессы при давлении близком к атмосферному, отвечающие за ионно-электронную эмиссию на катоде, самоподдержание разряда в пространстве положительного столба не подвергаются возмущениям. Признаком этого является стабильность основных параметров разряда — напряжения горения и тока разряда. За анодной диафрагмой, плазменные частицы из положительного столба и анодной области разряда не испытывали влияния атмосферного давления и под действием собственной температуры распространялись в пространстве импровизированной камеры, в качестве которой выступал вакуумный тройник, формируя протяженную плазменную струю.

В результате исследования особенностей оптического излучения в созданных условиях определена зависимость температуры возбуждения плазменных электронов от давления в пространстве, где распространялась инжектированная плазменная струя. Значение $T_{\text{exc}} = 0,6 \pm 0,2$ эВ, весьма близко к температуре возбуждения электронов в плазме тлеющего разряда при атмосферном давлении [8]. Для сравнения, характерные значения температуры электронов в тлеющих разрядах при пониженном давлении составляют несколько единиц электронвольт.

Следует сделать заключение, о реализации нового подхода к решению проблемы генерации газоразрядной плазмы при давлении 0,5–133 Па с низкой температурой электронов, не требующего создания электрического поля для инициирования эмиссионных и ионизационных процессов и ускорения плазменных частиц, поскольку транспортировка и расширение плазменной струи происходит вследствие воздействия потока рабочего газа.

Результаты настоящей работы могут быть использованы для создания источника предварительной плазмы в системах на основе разрядов иницируемых и поддерживаемых мощным электромагнитным излучением для снижения электрического поля, необходимого для пробоя, и обеспечения условий удержания электронов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006.

Список литературы

1. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов. М.: Наука, 1974. 308 с.
2. Kubarev V.V., Gorbachev Ya.I., Shevchenko O.A., Vodopyanov A.V., Sidorov A.V. and Veselov A.P. Point-like plasma-limited high-temperature terahertz laser discharge // Plasma Sources Science and Technology. 2023. V. 32, iss. 5. Art. no. 055004. DOI 10.1088/1361-6595/accca9.
3. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. Механизмы распространения поверхностного сверхвысокочастотного разряда // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, № 4. С. 74.
4. Райзер Ю.П. Нагревание газа под действием мощного светового импульса // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1965. Т. 48. С. 1508.
5. Sidorov A.V., Veselov A.P., Rakova E.I., Barmashova T.V., Vodopyanov A.V., Ananichev A.A., Glyavin M.Yu. Ionization wave in air under the action of powerful radiation of the terahertz frequency range // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. V. 16, Iss. 1.2. P. 544–549. DOI: 10.18721/JPM.161.283.
6. Бункин Ф.В., Конов В.И., Прохоров А.М., Федоров В.Б. Лазерная искра в режиме "медленного горения" // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1969. Т. 9, № 11. С. 609.
7. Генератор экстремального ультрафиолетового излучения на основе разряда, поддерживаемого высоким постоянным напряжением в резконеоднородном потоке газа: Патент № 2835671 С1 Российская Федерация, МПК H05G 2/00.: / А.П. Веселов, А.В. Сидоров, А.В. Водопьянов, Е.И. Преображенский; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапона-Грехова Российской академии наук; заявл. 17.10.2024; опубл. 03.03.2025.
8. Savkin K.P., Oks E.M., Sorokin D.A., Yushkov G.Yu., Yushkov A.Yu., Sintsov S.V., Vodopyanov A.V. Positive column dynamics of a low-current atmospheric pressure discharge in flowing argon // Plasma Sources Science and Technology. 2022. V. 31, Iss. 1. Art. N 015009. DOI: 10.1088/1361-6595/ac309a.
9. Sarani A., Nikiforov A.Yu., Leys C. Atmospheric pressure plasma jet in Ar and Ar/H₂O mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements. Physics of Plasmas. 2010. V. 17, N 063504. DOI: 10.1063/1.3439685.

K.P. Savkin, D.A. Sorokin. Injection of atmospheric pressure glow discharge plasma in an argon flow into a forevacuum pressure region.

The results of the study of optical radiation of a plasma jet generated due to injection of atmospheric pressure glow discharge plasma with a working gas flow into a region of reduced pressure of 0.5–133 Pa ($\approx 3 \cdot 10^{-3}$ –1 Torr) are presented. To generate plasma under such conditions, a two-electrode discharge system was used based on a glow discharge at atmospheric pressure in an argon flow, where the anode was a diaphragm with an opening with a diameter of 200–300 μm . In this way, a pressure difference was ensured between the discharge system of the plasma generator and the vacuum chamber into which the plasma jet was injected. It is shown that in the specified pressure range the excitation temperature of electrons is about 0.6 eV (≈ 6900 K). The prospects for using such a plasma generator as an effective addition to existing systems using powerful microwave and terahertz radiation for plasma generation are considered.