

Экспериментальное исследование низкочастотной неустойчивости в асимметричной конфигурации отражательного разряда с термокатодом

М.А. Валинуров^{1,2,*}, Р.А. Усманов¹, А.П. Ойлер^{1,2}, А.В. Гавриков¹

¹Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

²Московский Физико-Технический Институт (Национальный Исследовательский Университет), Москва, Россия

*valinurov.ma@phystech.edu

Аннотация. Низкотемпературная плазма в скрещенных электромагнитных полях часто встречается в различных практических приложениях, что делает ее исследование важной задачей. В такой конфигурации возникают различные неустойчивости, оказывающие негативное влияние на стабильность разряда. Одной из наиболее часто возникающих в разряде Пеннинга является спицевая неустойчивость. В данной работе в отражательном разряде с термокатодом при помощи системы плавающих зондов экспериментально исследуется возможность подавления данной неустойчивости за счет нарушения симметрии разряда.

Ключевые слова: плазменные неустойчивости, спицевая неустойчивость, отражательный разряд, плавающий зонд

1. Введение

В наши дни одной из важных, не решенных окончательно проблем физики плазмы является создание электрического поля в плазменном объеме [1]. Примером практической задачи, нуждающейся в этих знаниях, может служить плазменная сепарация элементов. В ее основе лежит идея о пространственном разделении смеси веществ в плазменном объеме в скрещенных электрическом и магнитном полях [1–4]. Ключевую роль в реализации данного процесса играет создание заданного пространственного распределения электрического потенциала в объеме плазмы с замагниченными электронами [5–7]. В связи с тем, что траектория разделяемых частиц чувствительна к созданному распределению электрического потенциала, особую актуальность приобретает также вопрос о его флуктуациях и возмущениях.

Известно, что управляемое электрическое поле может быть создано в плазме отражательного разряда в цилиндрической геометрии [6, 8]. Предварительные эксперименты показали, что в отражательном разряде с дополнительным термокатодом можно увеличить напряженность создаваемого поля. В нем может быть реализовано распределение электрического потенциала вдоль радиуса, близкое к линейному, с характерными значениями поля E порядка 10 В/см, однако наблюдаются самопроизвольные повторяющиеся отклонения от среднего значения потенциала плазмы в точке наблюдения. Величина отклонения в ряде случаев может составлять заметную часть от средней величины потенциала [9–12]. Ранее было установлено, что наблюдаемое периодическое возмущение потенциала плазмы может быть объяснено в рамках гипотезы о возникновении в объеме разряда вращающейся спицевой структуры [3, 10]. Она представляет из себя вращающийся сектор, внутри которого потенциал плазмы заметно отличается от потенциала плазмы в соседствующих областях плазменного объема.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению возможности подавления спицевой неустойчивости за счет нарушения симметрии разряда. Основной целью являлось снижение амплитуды колебаний, так как это позволит сделать траектории сепарируемых веществ более стабильными. Асимметрия разряда достигалась за счет смещения торцевых катодов и переноса термокатада относительно оси цилиндрического анода.

2. Описание экспериментальной установки и используемых методов исследования

Схема установки, в которой проводились исследования, приведена на Рис. 1. Она имеет цилиндрическую форму, ее длина составляет 2.3 м, внутренний радиус 43 см. На торцах установлены кольцевые электроды. Электроды с каждой стороны образуют систему катодов разряда и разделены на три части – внутренние находятся под потенциалом минус 600 В, промежуточные минус 300 В, внешние электроды находятся под плавающим потенциалом. При этом электроды расположены таким образом, что центр конструкции оказывается смещен относительно оси установки на 14 см. Анодом в данной схеме выступают заземленные стенки камеры. Характерные значения тока разряда составляют от 5 до 20 А. Радиус плазменного столба порядка 30 см. В центре одного из катодов размещен цилиндрический термокатод из гексаборида лантана (LaB_6) диаметром 2 см, который при нагревании эмитирует электроны. Вдоль аксиальной оси катушками Гельмгольца создается магнитное поле до 140 мТл.

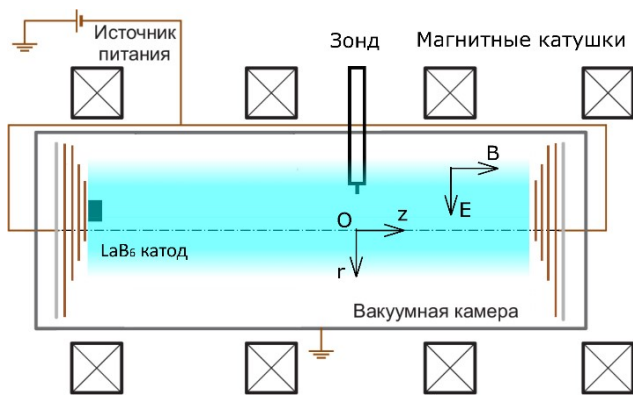


Рис. 1. Схема установки.

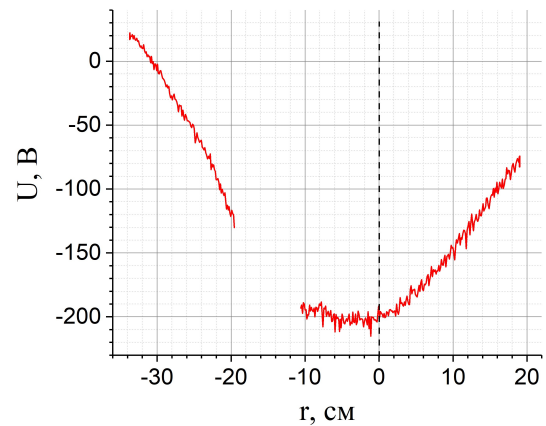


Рис. 2. Радиальный профиль потенциала плазмы.

В ходе экспериментов фиксировалось давление газа (аргона) в установке и ток возникающего отражательного разряда. Распределение потенциала плазмы измерялось при помощи термоэмиссионного зонда [13], который мог двигаться вдоль радиуса камеры. Сигнал с зонда считывался каждые 20 мс и представлял собой усредненное значение за этот временной интервал. Это позволило измерить радиальный профиль потенциала плазмы, что в свою очередь дало возможность вычислить величину электрического поля в плазменном объеме. Измерение профиля электрического потенциала осуществлялось несколько раз в ходе каждого эксперимента. На Рис. 2 приведен график профиля потенциала из одного из экспериментов. Термокатод расположен на координате минус 14 см. Вблизи термокатада измерения при помощи используемого зонда невозможны, из-за чего на графике есть разрыв.

Для измерения параметров движущегося возмущения электрического потенциала в плазме разряда использовалась система из плавающих зондов. Она представляет из себя конструкцию из четырех одинаковых зондов, расположенных параллельно друг другу в одной плоскости. Данная конструкция позволяла измерить временной сдвиг между сигналами на каждом из зондов в случае поочередного прохождения через них возмущения в плазмы.

3. Описание экспериментов и анализ полученных данных

Было проведено две серии экспериментов. Первая посвящена измерениям на «узкой» области разряда, где расстояние от термокатада до стенок вакуумной камеры было минимальным, а вторая на «широкой», где это расстояние было максимальным. Схемы

измерений приведены на Рис. 3 и 4. В обеих сериях проверялось наличие неустойчивости на различных радиальных координатах. В случае присутствия неустойчивости, по смещению пика кросскорреляционной функции сигналов с системы плавающих зондов рассчитывалась фазовая скорость неустойчивости.

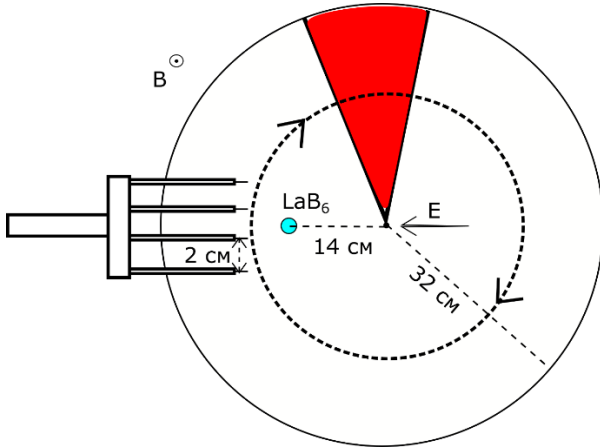


Рис. 3. Схема измерений системой плавающих зондов на «узкой» части разряда. Размеры зондов изображены не в масштабе. Красным показана исследуемая спицевая неустойчивость.

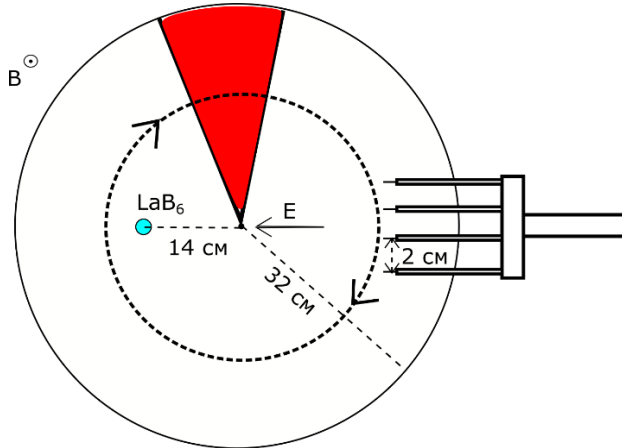


Рис. 4. Схема измерений системой плавающих зондов на «широкой» части разряда. Размеры зондов изображены не в масштабе. Красным показана исследуемая спицевая неустойчивость.

В первой серии экспериментов магнитное поле составляло 140 мТл, давление аргона в камере 35 мПа. Система плавающих зондов вводилась с «узкой» стороны разряда, где расстояние от термокатода до стенок камеры было минимально. Пример участка сигналов с двух плавающих зондов приведен на Рис. 5. Видно, что сигналы очень схожи и присутствует запаздывание. Это является явным признаком наличия спицевой неустойчивости [10]. Также была рассчитана кросскорреляция сигналов с зондов, для первой серии измерений коэффициент корреляции составил 0.8–0.95, что подтверждает высказанное предположение. По смещению максимума кросскорреляционной функции было найдено запаздывание сигнала t , откуда зная расстояние между зондами l была рассчитана фазовая скорость неустойчивости $V = l/t$. Результаты приведены на Рис. 6.

Ранее, при изучении симметричного разряда Пеннинга, было выявлено, что значение фазовой скорости близко к дрейфовой скорости [10]. Сравнение с рассчитанной дрейфовой скоростью на основе измеренного при помощи термоэмиссионного зонда электрического поля проведено на Рис. 6. Можно видеть существенную разницу в абсолютных значениях и даже в форме зависимости. Но при исследовании симметричной конфигурации, ранее нами было выявлено, что при больших радиальных координатах наблюдается резкое увеличение фазовой скорости, предположительно связанное с сохранением спицевой структурой своей формы при вращении. Возможно, в данном случае наблюдается тот же эффект, преобладающий над изменением дрейфовой скорости.

Во второй серии экспериментов магнитное поле составляло 140 мТл, давление аргона в камере 40 мПа. Система плавающих зондов вводилась с «широкой» стороны разряда, где расстояние от термокатода до стенок камеры было максимально. Пример участка сигналов с двух плавающих зондов приведен на Рис. 7. Видно, что в отличие от предыдущей серии экспериментов сигналы с различных зондов существенно различаются. Это означает, что в данном случае спицевая неустойчивость оказалась подавлена. Рассчитанный коэффициент корреляции для данной серии измерений не превышает 0.4–0.5, что подтверждает высказанное предположение.

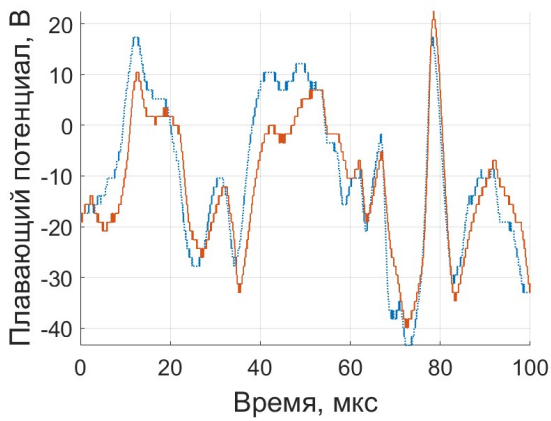


Рис. 5. Сигналы с плавающих зондов в «узкой» области разряда.

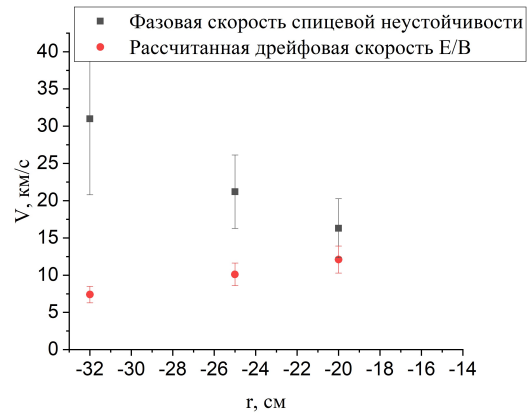


Рис. 6. Зависимости фазовой скорости спицевой неустойчивости и рассчитанной дрейфовой скорости от радиальной координаты на «узкой» части разряда. Термокатод расположен на координате минус 14 см.

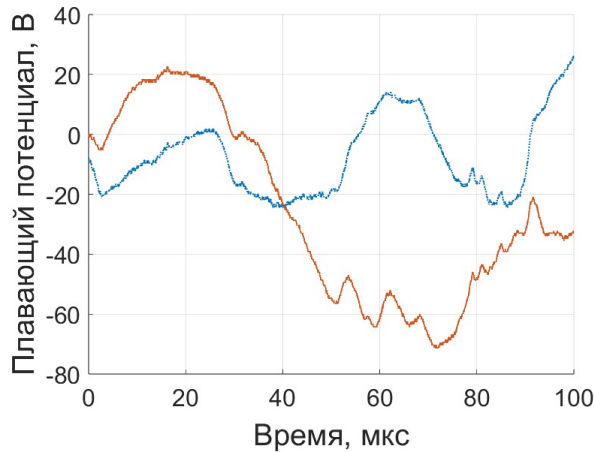


Рис. 7. Сигналы с плавающих зондов в «широкой» области разряда.

Но также на Рис. 7 видно, что амплитуда колебаний не уменьшилась, а сигналы все еще обладают некоторой периодичностью, причем частота уменьшилась по сравнению с колебаниями в «узкой» области разряда. Таким образом, возможно, на «широкой» стороне разряда начинает преобладать другая неустойчивость. Например, это могут быть волны, распространяющиеся вдоль радиальной оси.

Гипотезу о преобладании другой неустойчивости в этой области также подтверждает Фурье анализ сигналов. На Рис. 8 и 9 приведены спектры сигналов с «узкой» и «широкой» областей разряда. Рассчитаем из фазовой скорости частоту вращения спицы:

$$v = \frac{V}{2\pi r} \approx 13 \text{ кГц},$$

что близко к частоте одного из пиков, примерно равной 10 кГц. На спектрах хорошо виден еще один пик на 3 кГц. При этом на «узкой» области разряда явно преобладает пик на 10 кГц, а на «широкой» – на 3 кГц. Это хорошо согласуется с результатами, полученными ранее – на «узкой» области мы регистрируем присутствие спицевой неустойчивости, в то время как на «широкой» она оказывается подавлена, но при этом в этой области возникает другая неустойчивость.

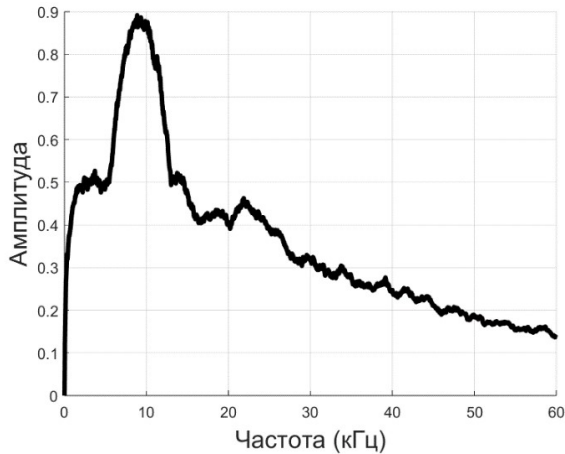


Рис. 8. Фурье-спектр сигнала в «узкой» области разряда

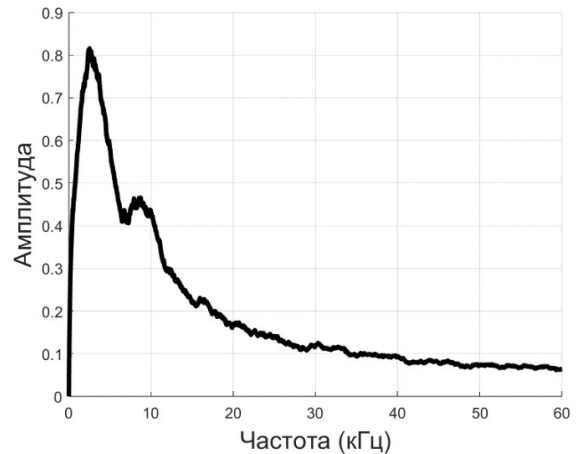


Рис. 9. Фурье-спектр сигнала в «широкой» области разряда

4. Заключение

В качестве заключения еще раз сформулируем основные выводы, сделанные в ходе представленного исследования. Были экспериментально изучены самопроизвольно возникающие возмущения электрического потенциала плазмы асимметричного отражательного разряда с дополнительной эмиссией термоэлектронов (плазменный объем имеет форму цилиндра с характерным диаметром около 50 см и длиной около 100 см). Было установлено, что в «узкой» области разряда, где расстояние от термокатода до стенок вакуумной камеры минимально, главной причиной возникающих колебаний является спицевая неустойчивость. Экспериментально найдена зависимость фазовой скорости этой неустойчивости от радиальной координаты, проведено сравнение с дрейфовой скоростью E/B . В качестве физического обоснования разницы между возникающими скоростями предложена гипотеза о необходимости сохранения формы неустойчивости при вращении, из-за чего на больших радиусах фазовая скорость оказывается значительно больше дрейфовой.

В «широкой» области разряда, с противоположной стороны камеры, где расстояние от термокатода до стенок минимально, спицевая неустойчивость оказывается подавлена. При этом зафиксировано возникновение другой плазменной неустойчивости с частотой колебаний 3 кГц. Выдвинуто предположение, что этой неустойчивостью могут являться некоторые волны, распространяющиеся вдоль радиальной оси.

Хотя нарушением симметрии удалось подавить спицевую неустойчивость в одной из областей разряда, к желаемому результату – уменьшению амплитуды колебаний, это не привело. Вместо спицевой неустойчивости возникла другая, амплитуда колебаний существенно не изменилась.

5. Список литературы

- [1] G.D. Liziakin, A.V. Gavrikov, S.D. Kuzmichev, V.P. Smirnov and R.A. Usmanov, Generation of a radial electric field in a cylindrical plasma column with an axial magnetic field, *Physics-Uspekhi*, vol. **67**(05), 495, 2023; doi: 10.3367/UFNe.2023.12.039622
- [2] D.A. Dolgolenko and Y.A. Muromkin, Separation of mixtures of chemical elements in plasma, *Physics-Uspekhi*, vol. **60**, 994, 2017; doi: 10.3367/UFNe.2016.12.038016
- [3] D. Kaganovich, A. Smolyakov, Y. Raitses, E. Ahedo, I. G. Mikellides, B. Jorns, F. Taccogna, R. Gueroult, S. Tsikata, A. Bourdon, J.-P. Boeuf, M. Keidar, A.T. Powis, M. Merino, M. Cappelli, K. Hara, J.A. Carlsson, N.J. Fisch, P. Chabert, I. Schweigert, T. Lafleur, K.

- Matyash, A.V. Khrabrov, R.W. Boswell and A. Fruchtman, Physics of E×B discharges relevant to plasma propulsion and similar technologies, *Physics of Plasmas*, vol. **27**, 120601, 2020; doi: 10.1063/5.0010135
- [4] S.J. Zweben, R. Gueroult and N.J. Fisch, Plasma mass separation, *Physics of Plasmas*, vol. **25**, 090901, 2018; doi: 10.1063/1.5042845
- [5] G. Liziakin, A. Gavrikov and V. Smirnov, Negative electric potential in a cylindrical plasma column with magnetized electrons, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. **29**, 015008, 2020; doi: 10.1088/1361-6595/ab5ad5
- [6] G. Liziakin, A. Oiler, A. Gavrikov, N. Antonov and V. Smirnov, Radial distribution of the plasma potential in a cylindrical plasma column with a longitudinal magnetic field, *Journal of Plasma Physics*, vol. **87**, 905870414, 2021; doi: 10.1017/S0022377821000829
- [7] R. Gueroult, S. J. Zweben, N. J. Fisch and J.-M. Rax, E×B configurations for high-throughput plasma mass separation: An outlook on possibilities and challenges, *Physics of Plasmas*, vol. **26**, 043511, 2019; doi: 10.1063/1.5083229
- [8] P. Oiler, G.D. Liziakin, A.V. Gavrikov and V.P. Smirnov, The Optimal Axis-Symmetrical Plasma Potential Distribution for Plasma Mass Separation, *Molecules*, vol. **27**, 6824, 2022; doi: 10.3390/molecules27206824
- [9] M.A. Valinurov, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, A.P. Oiler and R.A. Timirkhanov, Plasma Potential Fluctuations in a Reflex Discharge with Thermionic Cathode, *Plasma Physics Reports*, vol. **49**, 649, 2023; doi: 10.1134/S1063780X22601766
- [10] M.A. Valinurov, A.V. Gavrikov, G.D. Liziakin, A.P. Oiler and R.A. Timirkhanov, Propagation of the front of azimuthal plasma potential oscillations in a reflective discharge with a thermionic cathode, *Vestnik Ob"edinennogo instituta vysokikh temperatur*, vol. **8**, 4, 2022; doi: 10.33849/2022201
- [11] E.M. Oks, A. Anders, I.G. Brown, I.A. Soloshenko and A.I. Shchedrin, Instability of a low-pressure hollow-cathode discharge in a magnetic field, *Plasma Physics Reports*, vol. **31**, 978, 2005; doi: 10.1134/1.2131134
- [12] V.S. Smirnov, S.A. Kislenko, A.V. Gavrikov, A.A. Klimkov, G.D. Liziakin and V.P. Smirnov, Particle-in-cell simulation of a cylindrical plasma mass separator based on Penning discharge with thermionic cathodes, *Plasma Sources Science and Technology*, vol. **32**, 095007, 2023; doi: 10.1088/1361-6595/acf60f
- [13] R.F. Kemp and J.M. Sellen, Plasma Potential Measurements by Electron Emissive Probes, *Review of Scientific Instruments*, vol. **37**, 455, 1966; doi: 10.1063/1.1720213