Формирование микропинчевых структур в плазме вакуумного разряда с лазерным поджигом (Эксперимент и результаты численного моделирования)

И.В. Романов1, В.Л. Паперный2, А.А. Рупасов1, И.П. Цыгвинцев3, В.А. Гасилов3, А.Ю. Круковский3, В.Г. Новиков3

1Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,  
 [laser.plasma@gmail.com](mailto:laser.plasma@gmail.com)  
2Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия  
3Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса формирования микропинчевых структур в плазме вакуумного разряда со скоростью нарастания тока до 5∙1011 А/с, инициируемого на катоде лазерным импульсом наносекундной длительности с энергией в диапазоне *J* = 0,5 – 200 мДж. Исследования пространственного распределения излучения плазмы в EUV и мягком рентгеновском диапазонах позволили установить, что динамика плазмы такого разряда имеет ряд специфических особенностей. К ним можно отнести следующее:

• Процесс пинчевания плазмы претерпевает несколько стадий. Начало процесса проявляется в формировании разогретой, сжимающейся к оси плазменной торовидной структуры вблизи поверхности катода. Затем следуют стадии образования перетяжки и ее распада со струйным истечением плазмы в направлениях анода и катода с формированием ударной волны у поверхности последнего;

• Формирование микропинча происходит преимущественно в лазерной плазме, возникающей при поджиге разряда, вблизи максимума производной тока. При больших токах заметный вклад вносит разрядная плазма. Катодная струя может состоять из нескольких спинчеванных областей, каждая из которых имеет свою структуру, при этом оптимизация характеристик разряда позволяет достигать устойчивого одиночного пинчевания плазмы;

• Характеристики микропинча (его размер, положение в разрядном промежутке, степень сжатия) в широком диапазоне величин контролируются параметрами лазерного импульса. В частности, размер излучающей области микропинча уменьшается с уменьшением *J*, а зависимость расстояния от катода до микропинча описывается степенной функцией *L = КJα*, где коэффициент *K* уменьшается, а показатель степени *α* слабо растет с увеличением тока.

• Процесс формирования микропинча, по-видимому, служит триггером формирования особенностей на сигнале тока, свидетельствующих о возникновении разрывов токового канала. Улучшение токопрохождения достигается путем увеличения массы вещества катода, испаренного лазерным излучением, в частности, при увеличении энергии лазерного импульса. В свою очередь, это приводит к полному прекращению процесса пинчевания.

Приводятся результаты численного моделирования динамики плазмы разряда. Модель описывает в R-Z геометрии формирование лазерной плазмы и МГД эффекты (пинчевание плазмы и др.), обусловленные токопрохождением в плазме. Учитывается двухтемпературность, нестационарность ионизации, вынос вещества с поверхности катода током и потери энергии на излучение. В результате вычислительного эксперимента достигнуто хорошее качественное согласие с экспериментальными данными. Обсуждаются причины расхождения результатов моделирования с экспериментальными результатами по характеристикам микропинча и пути усовершенствования модели для улучшения соответствия с экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты: №[15-02-03757](https://kias.rfbr.ru/Application.aspx?id=6714195)а, №[15-01-06195](https://kias.rfbr.ru/Application.aspx?id=6714195)а, №[14-01-00678](https://kias.rfbr.ru/Application.aspx?id=6714195)а.