

УДК 533.9

А.Б. Тажен¹, А.У. Утегенов¹, М.К. Досболаев¹, Т.С. Рамазанов¹,
М.И. Кайканов², А.В. Тихонов³

¹ *Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
050040, г. Алматы, Казахстан*

² *Национальная лаборатория Астана, 010000, г. Астана, Казахстан*

³ *Школа Наук и Технологий, Назарбаев Университет, 010000, г. Астана, Казахстан
aigerim_tzh@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ

Аннотация. В данной работе был описан принцип работы импульсно-плазменного ускорителя ИПУ-30 и получены результаты энергетических характеристик заряженных частиц, образовавшихся в импульсной плазме с использованием диагностического устройства Цилиндра Фарадея. На основе полученных данных в виде осциллограмм (осциллограммы электронных и ионных токов плазмы) были рассчитаны концентрация, скорость и энергия ионов плазменного потока. А также были построены графики зависимости этих величин от разрядного напряжения и давления газа в камере.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, энергетические характеристики, цилиндр Фарадея.

Введение

В настоящее время изучение импульсной плазмы направлено на исследование процесса интенсивного взаимодействия ускоренных мощных импульсных потоков плазмы на диверторную область и внутрикамерные компоненты термоядерных установок, вследствие которых, происходит эрозия материалов и уменьшение их рабочих ресурсов. Но, самое главное – это влияние пылевой компоненты (продукт эрозии) на состояние плазменного шнура (срыв плазменного шнура, резкое уменьшение температуры плазмы) [1]. В связи с этим, в данной работе много внимания уделялось определению энергетических характеристик заряженных частиц, образовавшихся во время зажигания плазмы. Для этого в качестве модельной установки, имитирующий поток интенсивной плазмы за пределы плазменного шнура, использовался импульсно – плазменный ускоритель (ИПУ).

ИПУ – это установка с помощью которой получают плазменные потоки со скоростью $10 - 10^3$ км/с [2]. Сейчас такие плазменные потоки используются в улучшении структурных свойств материалов при их обработке плазмой и, как выше было упомяну-

то, играют важную роль в термоядерных исследованиях. В отличие от других ускорителей заряженных частиц, в ИПУ ускоряются частицы двух сортов одновременно (электроны и ионы). Ускорение происходит за счет силы, появляющейся во время взаимодействия магнитного поля с током плазмы. Образованные в плазме ионы являются основными носителями плазменной энергии, а электроны компенсируют объемный заряд [3].

Воздействие плазмы на структуру защитных материалов, в основном связано, с его энергетическими характеристиками. Поэтому для исследования и получения данных о концентрации и энергии заряженных частиц плазмы в работе было разработано диагностическое устройство - цилиндр Фарадея, принципиальная схема которого показана на рисунке 1.

Цилиндр Фарадея (ЦФ) – состоит из двух коаксиально расположенных электродов, коллектор и экран [4]. Внутренний электрод цилиндра Фарадея сделан из углерода и смещен под отрицательным потенциалом, то есть работает для собирания ионов, в то время как внешний медный электрод заземлен и на торце обращенного к потоку

плазмы сделано отверстие, для регулировки потока ионов.

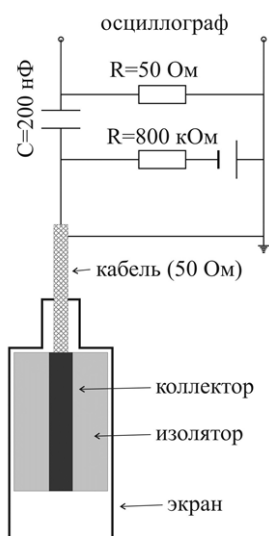


Рисунок 1. - Схематическое изображение цилиндра Фарадея с RC цепью

Когда входящий пучок ионов или электронов падает на внутренний электрод ЦФ, который смещен отрицательно или положительно по отношению к внешнему электроду, в дифференцирующей цепи генерируется ток. При прохождении этого тока через нагрузочный резистор, появляется соответствующее напряжение $U_{осц}$ в виде импульса на экране осциллографа.

Таким образом, концентрация и энергия ионов рассчитываются по следующим формулам:

$$n_i = \frac{U_{осц}}{RqSv_i} \quad (1)$$

Здесь q – электрический заряд, n_i – концентрация ионов, v_i – скорость ионов $U_{осц}$ – напряжение на резисторе дифференцирующей цепочки, R –сопротивление резистора, S – площадь отверстия на внешнем электроде (экране).

$$E_i = \frac{1}{2} M_i v_i^2, \quad (2)$$

M_i – атомная масса иона водорода.

Скорость ионов определялась временем полета ионов вдоль расстояния от системы электродов до цилиндра Фарадея (d):

$$v_i = \frac{d}{t} \quad (3)$$

Время полета ионов (t) определялось как разность времени между рентгеновским

и основным ионным импульсом. Рентгеновские излучения испускаются во время зажигания плазмы в ИПУ, где ускоренные в электрическом поле электроны тормозятся при сближении к отрицательно заряженному электроду [4]. Интерпретация амплитуд сигналов на осциллографе производилась с помощью программного обеспечения Origin.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка ИПУ-30 состоит из трех основных частей: системы электродов, вакуумные насосы и батарея конденсаторов. Принципиальная схема установки показана на рисунке 2.

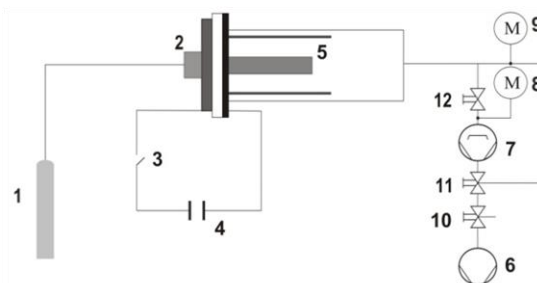


Рисунок 2 - Принципиальная схема ИПУ-30

В эксперименте в качестве плазмообразующего газа использовался водород. ЦФ был установлен на расстоянии 16 см от системы электродов. Чтобы автоматически передвигать ЦФ на разные расстояния от системы электродов (например, для нахождения плазменного фокуса) был использован однокоординатный линейный модуль с шариковинтовой передачей и шаговым двигателем.

Результаты эксперимента.

Условия экспериментов были таковы: давление в камере варьировалось в пределах 0.02 - 10 торр, напряжение передаваемое на электроды 3 - 6 кВ. При таких условиях эксперимента появляющиеся сигналы на ЦФ регистрировались с помощью осциллографа LeCroy 354A. На рисунке 3 показаны полученные осциллограммы пояса Роговского (кривой №1) и ионного тока потока (кривой №2).

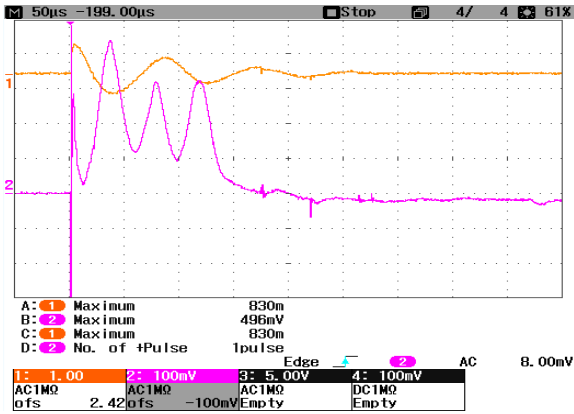


Рисунок 3 - Осциллограмма ионного тока

Таким образом, были получены осциллограммы электронных токов, но уже при положительном смещении напряжения внутреннего электрода (рисунок 4 кривой №2).

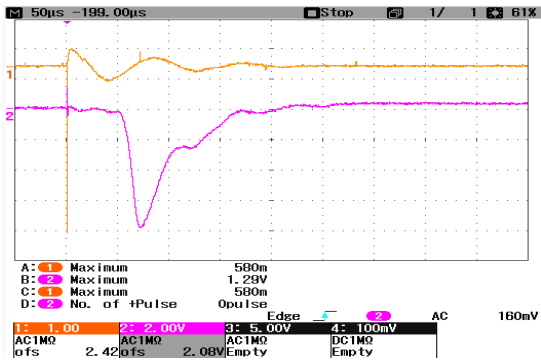


Рисунок 4 – Осциллограмма электронного тока

Для дальнейшей обработки результатов использовались кривые, которые были получены с помощью текстовых данных вышеуказанных осциллограмм, где один из примеров показан на рисунке 5.

Анализируя график на рисунке 5, было установлено, что первый положительный импульс (пик) соответствует току рентгеновского излучения. Этот сигнал принимается как время возникновения газового разряда, то есть началом отсчета времени. Второй, третий и четвертый положительные импульсы соответствуют ионным токам плазмы, поэтому при определении характеристик плазмы нами были использованы именно эти сигналы. Отрицательный интенсивный импульс соответствует электронному току. Во всех осциллограммах ионных токов можно

увидеть несколько положительных импульсов, что свидетельствует о срыве плазменного потока.

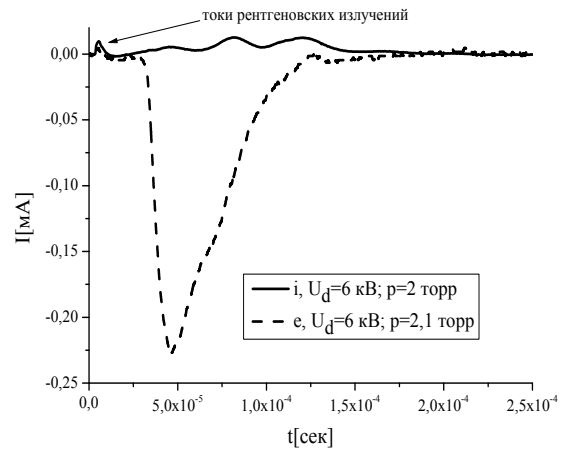


Рисунок 5 – Осциллограммы ионного и электронного токов

Используя данные, полученные от осциллограммы ионного тока, были рассчитаны скорость, энергия и концентрация ионов импульсной плазмы, а также построены их зависимости от давления газа и напряжения разряда.

Как показано на рисунке 6, рост давления газа приводит к уменьшению ионного тока. Это связано с потерей энергии частиц в плазме при их многократном столкновении.

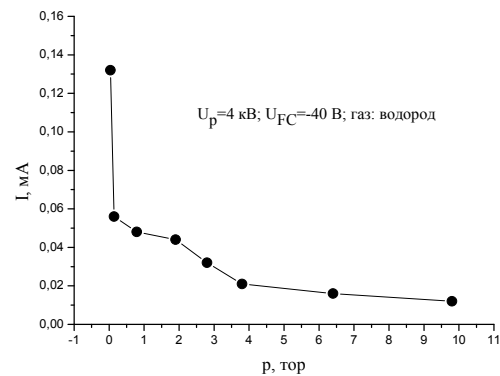


Рисунок 6 - Зависимость ионных токов от давления газа

С ростом разрядного напряжения увеличивается концентрация ионов, так как доля атомов перетерпевших процессы ионизации увеличивается (рисунок 7).

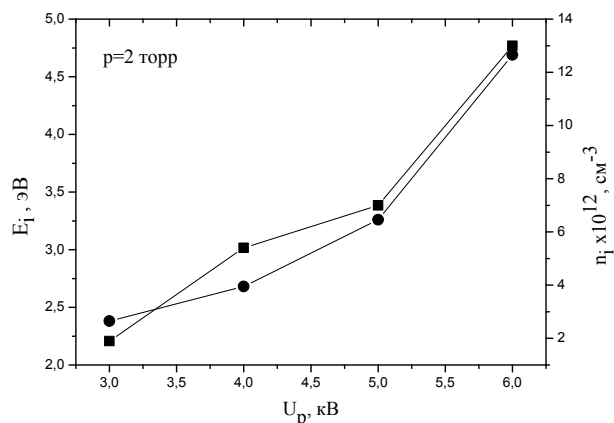


Рисунок 7 – Зависимость концентрации и энергии ионов плазменного потока от напряжения разряда

Также в ходе данной работы была построена вольтамперная характеристика ЦФ и с помощью нижеуказанных формул были рассчитаны температура электронов, скорость, энергия и концентрация ионов (рисунок 8).

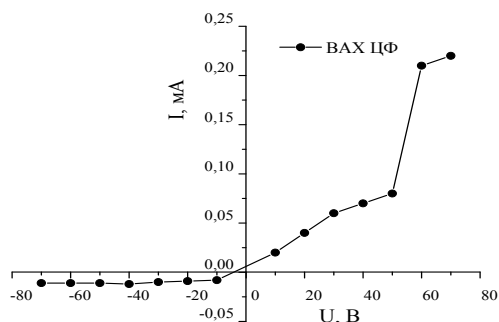


Рисунок 8. - Вольтамперная характеристика цилиндра Фарадея

$$\frac{d \ln I_e}{d U_{\text{ЦФ}}} = \frac{e}{k T_e} \quad (4)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{k T_e}{M_i}} \quad (5)$$

А.Б. Тажен¹, А.У. Утегенов¹, М.Қ. Досболаев¹, Т.С. Рамазанов¹,
М.И. Кайканов², А.В. Тихонов³

¹ Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
050040, г. Алматы, Казахстан

² Национальная лаборатория Астана, 010000, г. Астана, Казахстан

³ Школа Наук и Технологий, Назарбаев Университет, 010000, г. Астана, Казахстан
aigerim_tzh@mail.ru

Здесь $U_{\text{ЦФ}}$ – напряжение на ЦФ, M_i – атомная масса водорода.

В среднем температура электронов плазмы составила $T_e = 10$ эВ, скорость ионов $v_i = 3,1 \cdot 10^6$ см/с, энергия ионов $E_i = 8,02$ эВ, концентрация ионов $n_i = 3,55 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

Заключение

В данной работе было показано, что с помощью диагностического устройства ЦФ можно с некоторой точностью определять энергетические характеристики плазмы. Полученные данные помогут нам в дальнейших экспериментах, предназначенных для моделирования процессов взаимодействия импульсной плазмы с кандидатными материалами.

Выполненные исследования проведены в рамках НТП №0115РК03029 "НУ-Беркли: стратегическая программа исследования критического состояния вещества, перспективных материалов и источников энергии (2014-2018 г.г.)" МОН РК.

Литература

- J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al. // Plasma physics and controlled fusion. - 2015. - 57. - 014037.
- Baimbetov F. B, Zhukeshov A. M., Amrenova. A. U. // Tech. Phys. Lett. - 2007. - №33. - P. 77-79.
- Морозов А.И. Физика и применение плазменных ускорителей. Минск. Наука и Техника. 1974.
- Smruti R.M., Heman B., Nirod K.N., Rabinda K.R., Eiki H. // Japanese Journal of Applied Physics. -2005. - Vol. 44. No.7A. - P. 5199-5205.

Принято в печать 18.03.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ

Аннотация. В данной работе был описан принцип работы импульсно-плазменного ускорителя ИПУ-30 и получены результаты энергетических характеристик заряженных частиц, образовавшихся в импульсной плазме с использованием диагностического устройства Цилиндра Фарадея. На основе полученных данных в виде осциллограмм (осциллограммы электронных и ионных токов плазмы) были рассчитаны концентрация, скорость и энергия ионов плазменного потока. А также были построены графики зависимости этих величин от разрядного напряжения и давления газа в камере.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, энергетические характеристики, цилиндр Фарадея.

**Ә.Б. Тәжен, А.У. Утегенов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов,
М.И. Кайканов, А.В. Тихонов**

¹ *әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Эксперименталды және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты, 050040, Алматы, Қазақстан*

² *Ұлттық лаборатория Астана, 010000, Қазақстан*

³ *Ғылым және технологиялар мектебі, Назарбаев Университеті, 010000, Астана, Қазақстан
aigerim_tzh@mail.ru.*

ИМПУЛЬСТІ ПЛАЗМА ПАРАМЕТРЛЕРІН ФАРАДЕЙ ЦИЛИНДРІ КӨМЕГІМЕН ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Бұл жұмыста ИПУ-30 импульсті-плазмалық үдеткішінің жұмыс істеу принципі сипатталды, импульсті плазмада пайда болған зарядталған бөлшектердің энергиялық қасиеттері Фарадей цилиндрімен анықталды. Алынған осциллограммалардың негізінде (электрондық және иондық токтардың осциллограммалары) иондардың концентрациялары, энергиялары, жылдамдықтары есептелді. Сонымен қатар осы шамалардың камерадағы газ қысымынан, разряд кернеуінен тәуелділіктері тұрғызылды.

Кілт сөздер: импульсті плазмалық үдеткіш, энергетикалық сипаттамалар, Фарадей цилиндрі.

**A.B. Tazhen, A.U. Utegenov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov,
M.I. Kaikanov, A.V. Tikhonov**

¹ *al-Farabi Kazakh National University Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics (IETP), 050040, Almaty, Kazakhstan*

² *National laboratory Astana, 010000, Kazakhstan*

³ *School of science and technologies, Nazarbayev University, 010000, Astana, Kazakhstan
aigerim_tzh@mail.ru.*

INVESTIGATION OF PULSED PLASMA PARAMETERS BY FARADAY CUP

Аннотация. In this work the principle operation of pulsed plasma accelerator was described and energy properties' results of charged particles in pulsed plasma were obtained from diagnostic device of Faraday cup. The density, energy, velocity of ions was calculated based on the oscillograms achieved by Faraday cup. Also the dependence of these values on the gas pressure as well as discharge voltage was determined.

Key words: pulsed plasma accelerator, energy characteristics, Faraday cup.