

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ,
ФОРМИРУЕМЫХ В МУЛЬТИРАЗРЯДНОЙ ПАНЕЛИ
НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

П. Н. Солдатенко, ст. преподаватель кафедры физики¹,

Д. А. Антонович, канд. техн. наук, доц.²

¹ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь

² ООО «СПАРКИТ», Витебск, Беларусь

Использование мультиразрядных панелей на основе плазменного источника заряженных частиц представляется уникальным инструментом для реализации ряда электронно-лучевых технологий обработки материалов, что открывает новые перспективы в области машиностроения, приборостроения, медицины и т. д.

Ключевые слова: пучок заряженных частиц, ток пучка, ускоряющее напряжение.

Использование мультиразрядных панелей в процессе реализации электронно-лучевых технологий представляется перспективным в первую очередь за счёт возможности формирования пучков заряженных частиц в едином объёме, а также способности формировать совмещенные ионно-электронные пучки. Ранее для реализации подобного рода технологии необходимо было применять несколько плазменных источников одновременно [1].

Исследования характеристик пучков заряженных частиц проводились для экспериментального образца мультиразрядной панели представленной на рисунке 1.

1 – штуцер для напуска плазмообразующего газа;

2 – внутренний катод;

3 – главный анод;

4 – внешний катод;

5 – эмиттерный электрод;

6 – вспомогательный анод;

7 – ускоряющий электрод;

8, 10, 12 – катоды;

9, 11 – аноды;

13 – фланец для установки структуры на рабочую камеру;

14 – согласующий электрод;

15 – изоляторы;

16 – постоянные магниты

I, II, III – области разрядных камер

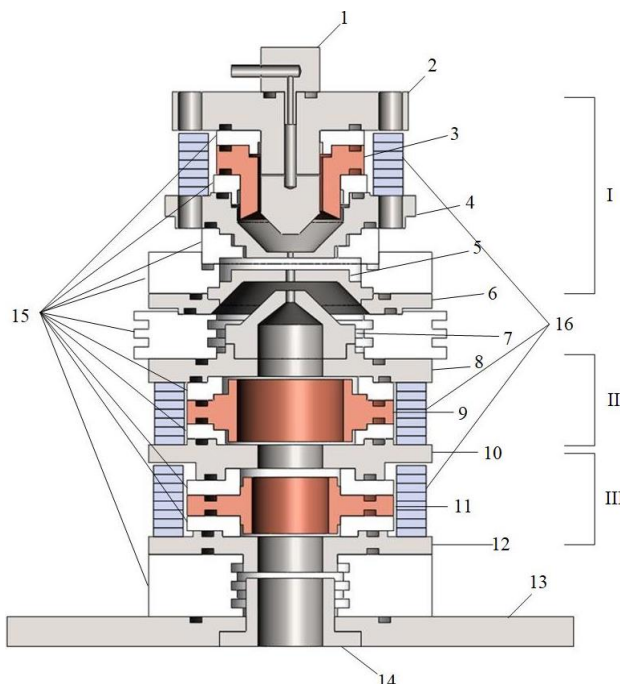


Рисунок 1. – Электродная структура источника заряженных частиц со скрещенными $E \times H$ полями

Генерация электронного пучка. Инициирование разряда осуществлялось в двух разрядных камерах. Вольтамперные характеристики разряда в указанных камерах приведены на рисунке 2 и имеют типичный вид для данного вида разряда.

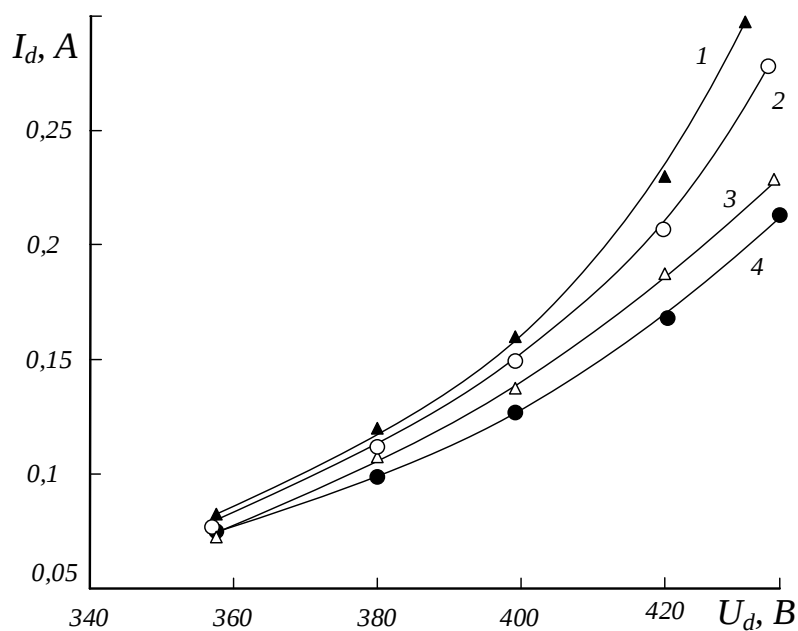


Рисунок 2 - Вольтамперные характеристики разряда для I (1, 2) и II (3, 4) разрядных камер при одновременном формировании разрядов
Напуск газа Q: 1, 3 – 3,5 мПа·м³/с; 2, 4 – 2,2 мПа·м³/с

На рисунках 3 и 4 показаны результаты формирования электронного тока из источника на основе разряда в скрещенных E×H полях для различных условий формирования.

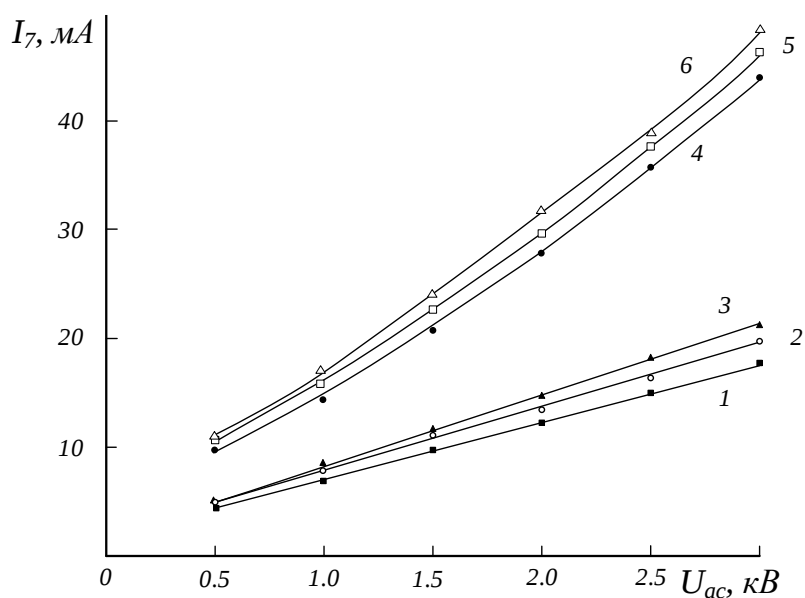


Рисунок 3. – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–3) и наличии (4–6) инициации разряда в нижней разрядной камере (электроды 8–10, рисунок 1) для различных напусков газа Q: I_d в верхней камере (электроды 2–5, рисунок 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В I_d в нижней камере (электроды 8–10, рисунок 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В
Напуск газа Q: 1, 4 – 2 мПа·м³/с; 2, 5 – 3 мПа·м³/с; 3, 6 – 3,5 мПа·м³/с

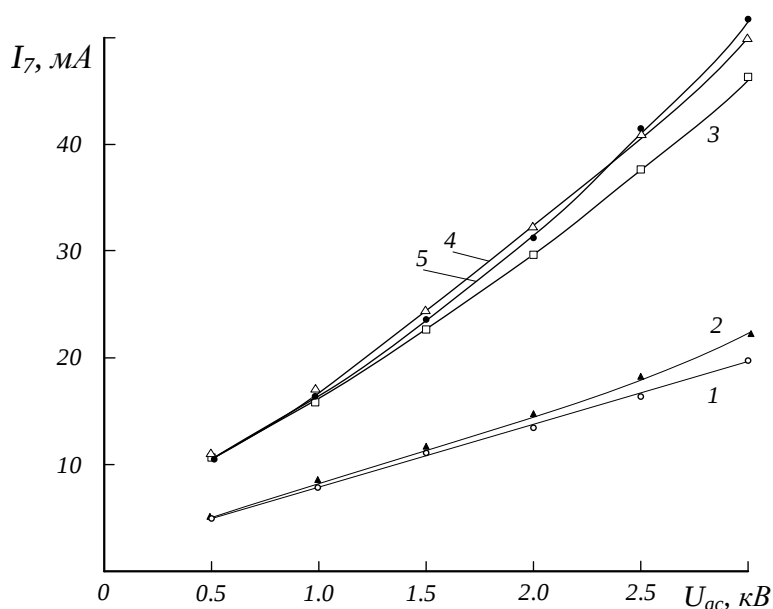


Рисунок 4. – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея) при отсутствии (1–2) и наличии (3–5) инициации разряда в нижней разрядной камере (электроды 8–10 рисунок 1) для различных токов разряда в верхней и нижней камерах: 1–5 – напуск газа $Q = 2 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3/\text{с}$
 I_d в верхней камере (электроды 2–5, рисунок 1): 1, 3, 5 – 200 мА, напряжение горения разряда 420 В;
 2, 4 – 240 мА, напряжение горения разряда 450 В
 3, 4 – I_d в нижней камере (электроды 8–10, рисунок 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В;
 5 – I_d в верхней камере (электроды 2–5, рисунок 1) 210 мА, напряжение горения разряда 430 В

В представленной конструкции электроды 8, 10 и 12 образуют магнитную фокусирующую систему для ускоренного электронного пучка, а промежуток 8–10 является регулятором энергии электронов в пучке. Электронный пучок, формируемый в I камере (рисунок 1) попадает после ускорения в структуру, образованную электродами камеры II (рисунок 1), где в разряде низкого давления формируется эмитирующая ионы плазма, и распространяется вдоль оси в этой структуре. Ионы движутся в верхнюю структуру, повышают ионизацию газа в области отбора электронов и плотность эмиссионного тока, и частично компенсируют электронный объемный заряд в ускоряющем промежутке, что в целом приводит к увеличению первеанса источника. Об этом свидетельствует изменение наклона вольтамперных характеристик извлечения при наличии (рисунок 3, кривые 4–6 и рисунок 4, кривые 3–5) инициации разряда в разрядной камере II (рисунок 1) в сравнении с его отсутствием (рисунок 3, кривые 1–3 и рисунок 4, кривые 1, 2). Из представленных характеристик видно, что в рабочем диапазоне устойчивого существования разряда определяющее влияние на первеанс источника оказывает наличие дополнительного разряда в камере II (рисунок 1), а не ток разряда и величина напуска газа (давления в разрядной камере) [2].

Генерация ионного пучка. В этом случае формируются разряды в камерах II и III (рисунок 1). Ускоряющее ионы напряжение прикладывается между электродами 12 и 14 (рисунок 1). Эксперименты показали, что величина ионного тока не превышает 10 мА при ускоряющем напряжении до 3 кВ, что свидетельствует о низкой перспективности такого режима работы для данного источника.

3. Генерация совмещенного электронно-ионного пучка. Низковольтный разряд формируется во всех трех камерах (I, II и III – рисунок 1). Электронный пучок, сформированный из разрядной камеры I (рисунок 1) и ускоренный между электродами 6 и 7 (рисунок 1), попадает в разрядные ячейки II и III (рисунок 1), повышая плотность эмитирующей ионы плазмы в них. Ускоряющее ионы напряжение прикладывается между электродами 12 и 14 (рисунок 1). В результате на выходе источника генерируется ионно-электронный пучок с возможностью регулирования в нем плотности и энергии электронов и ионов по отдельности.

На рисунке 5 показаны эмиссионные характеристики (зависимости тока в цилиндре Фарадея) в условиях, когда в источнике в определенной степени реализуются все возможные электродинамические процессы. Необходимо отметить, что каждая из характеристик (1 и 2 – рисунок 5) получена в двух различных экспериментах и различными способами.

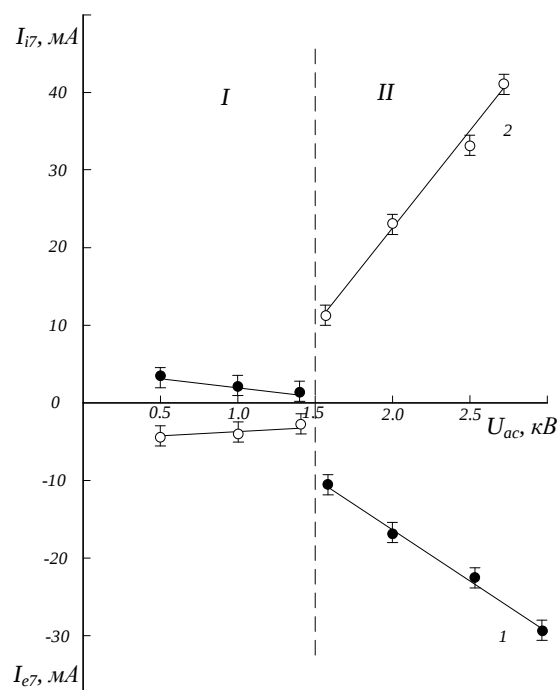


Рисунок 5. – Ток I_7 (в цилиндр Фарадея):
 I_{e7} – электронный ток в цилиндр Фарадея;
 I_{i7} – ионный ток в цилиндр Фарадея;
1 – фиксированное напряжение ускорения ионов 1,5 кВ;
2 – фиксированное напряжение ускорения электронов 1,5 кВ; ток разряда в камере I (рисунок 1) 200 мА, напряжение горения разряда 420 В; ток разряда в камере II (рисунок 1) 180 мА, напряжение горения разряда 410 В

Эмиссионная характеристика 1 (рисунок 5) получена при фиксированном напряжении ускорения ионов на уровне 1,5 кВ и изменении ускоряющего электроны напряжения от 0 до 3 кВ. Физическая интерпретация вида полученной характеристики может быть следующей. На участке характеристики, соответствующем области I (рисунок 5), электроны плазмы, формируемой в камере I (рисунок 1), ускоряются в электрическом прианодном слое камеры I (рисунок 1) и в прикатодном слое разрядной камеры II (рисунок 1). В результате во всей газоразрядной структуре устанавливается такое распределение электронов по энергиям, при котором небольшая часть высокоэнергетичных электронов может преодолеть разность потенциалов в промежутке ускорения ионов. При этом большая часть электронов испытывает полное торможение и возвращается в газоразрядную структуру. В результате определяющий вклад в ток цилиндра Фарадея вносит ионная компонента тока пучка. Снижение величины тока в цилиндр Фарадея при увеличении напряжения ускорения электронов из разрядной камеры I (рисунок 1)

является следствием повышения доли электронов, способных преодолеть тормозящую разность потенциалов в промежутке ускорения ионов и увеличения компоненты электронного тока в цилиндр Фарадея.

Когда напряжение ускорения электронов из разрядной камеры I (рисунок 1) достигает напряжения ускорения ионов (1,5 кВ), торможение электронов, инжектируемых в область разрядных камер II и III (рисунок 1) прекращается, электронная компонента тока в цилиндр Фарадея скачком возрастает и становится определяющей. При этом величина электронного пучка в цилиндр Фарадея (кривая 1, область II на рисунке 5) превышает значение тока без инициации разряда в камере II (рисунок 2, кривые 1–3), однако он меньше, чем при формировании разряда в камере II (рисунок 3, кривые 4–6), что обусловлено, по-видимому, частичной компенсацией электронного тока током ионов из разрядной камеры II (рисунок 1).

Эмиссионная характеристика 2 (рисунок 5) получена при фиксированном напряжении ускорения электронов 1,5 кВ и изменении ускоряющего ионы напряжения от 0 до 3 кВ. Физическая интерпретация вида этой характеристики представляется следующей. На участке характеристики, соответствующей области I (кривая 2, рисунок 5), ток в цилиндр Фарадея близок к нулевому значению, что говорит о практически полной взаимной компенсации электронного и ионного пучков до этого значения ускоряющего напряжения. Скачкообразное изменение полярности тока в цилиндр Фарадея (область II, рисунок 5) свидетельствует о преобладающей эмиссии из источника ионов при напряжениях свыше 1,5 кВ, а существенный рост тока ионной эмиссии – до 45 мА, при ускоряющем ионы напряжении 3 кВ, по сравнению с режимом генерации ионного пучка, объясняется почти полным возвратом электронов в область разрядных камер II и III и повышением плотности плазмы, эмитирующей ионы. Полученная плотность тока эмиссии ионов порядка 10 мА/см², свидетельствует о перспективности разработки на базе данной конструкции электронно-ионного источника для промышленной реализации различных технологий обработки и модификации поверхностей материалов.

Необходимо отметить, что эксперименты проводились в широком диапазоне значений напусков газа (1,1–3,5) мПа·м³/с и токов разряда (0,18–0,24 А). Характеристики оказались подобны представленным и на рисунках не приводятся. Линейный вид вольт-амперных характеристик обеспечивает высокую управляемость технологическими характеристиками источника. Наличие дополнительных разрядных структур и соответствующих систем электропитания, конечно, усложняет конструкцию источника, однако однозначность влияния напряжения в дополнительных блоках питания на характеристики извлечения источника в целом позволяют создать общую согласованную автоматизированную систему управления. Приведенные характеристики свидетельствуют о возможности разработки технологического источника заряженных частиц для реализации технологий, требующих комбинированного воздействия электронными и ионными пучками [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.] – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.

2. Антонович Д.А. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 / Д. А. Антонович, В. А. Груздев, В. Г. Залесский, П. Н. Солдатенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2017. – №4 – С. 45–51.
3. Груздев В.А. Плазменный ионно-электронный источник / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, П.Н. Солдатенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 63–68.