



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.7>

УДК: 537.525.5 533.9.072

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЯРАЗРЕШАЮЩЕГО СПЕКТРОМЕТРА ТОМСОНА ДЛЯ АНАЛИЗА ПОТОКА ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

И.Л. Музюкин, П.С. Михайлов, Д.Л. Шмелев

Институт Электрофизики УрО РАН
620016 Екатеринбург, Амундсена 106

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Разработана методика времяразрешающего энерго-масс анализа потока плазмы импульсных вакуумных разрядов. В данной методике используется метод парабол Томсона в комбинации с разрывом и дополнительным ускорением плазмы. Временное разрешение достигается применением открывающего импульса напряжения, подаваемого с задержкой относительно начала разряда. Преимуществом данного метода является возможность каждый момент времени получить полную информацию об энергетическом и масс-зарядовом составе потока плазмы. Результаты применения методики демонстрируют, что поток плазмы вакуумного дугового разряда может быть исследован гораздо более детально, чем это было возможно ранее.

Ключевые слова: вакуумная дуга, потоки плазмы, энерго-масс анализатор.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360/>.

Автор для переписки: Музюкин Илья Львович plasmon@mail.ru

Введение

Впервые необычные свойства потока дуговой плазмы были обнаружены [1]. Оказалось, что скорость потока плазмы дуги гораздо выше, чем скорость звука. В дальнейшем были получены детальные сведения о составе потока ионов. Впервые для получения полных усредненных данных о потоке плазмы были получены Дэвисом и Миллером [2]. В своих экспериментах они использовали комбинацию электростатического энерго-анализатора и магнитного масс-анализатора. Масс-анализатор настраивался на определенное соотношение массы к заряду, и выделенный поток анализировался по соотношению энергии к заряду путем сканирования по добавленной энергии. Также был предложен эмиссионный метод измерения скоростей ионов, основанный на реакции сигнала масс-анализатора на резкий всплеск тока дуги [3]. Временной анализ потоков ионов получался путем настройки энерго-анализатора на определенное соотношение энергии к заряду и получении временной зависимости потока частиц моноэнергетического пучка [4]. Наилучшего развития такая техника получила в работе [5]. В этой методике статистически накапливались временные сигналы для различных значений отношений энергии к заряду и массы к заряду. Все эти методы имеют принципиальный недостаток необходимо заранее определить соотношения энергии к заряду и массы к заряду, на которые настраивать масс-зарядовую и энерго-зарядовую части спектрометров. Кроме того, нет возможности увидеть очень малые и очень большие энергии ионов. Этого недостатка лишен метод Парабол Томсона, который позволяет в одном измерении увидеть сразу полный спектр масс зарядов и энергий потока ионов. Задачей данного исследования являлась модификация метода парабол Томсона для получения временной зависимости энергетического и масс – зарядового состава потока плазмы дугового источника.

1. Экспериментальная установка и методика

Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1. Экспериментальная камера смонтирована сверху вакуумного поста. В камере создавался безмасляный вакуум с остаточным давлением 2×10^{-5} мм.рт.ст. С одной стороны экспериментальной камеры монтировался источник плазмы. С противоположной стороны монтировался ионный спектрометр.

Источник плазмы представлял собой коаксиальную сборку, состоящую из цилиндрического катода, плотно надетого на катод керамического кольца и плотно надетого на керамическое кольцо вспомогательного поджигающего электрода. Диаметр катода 1 мм, диаметр диэлектрического кольца 2 мм. Перед катодной сборкой на расстоянии 1 мм устанавливалось анодное кольцо диаметром 2 мм. Диаметр анодной проволоки 0,5 мм. Все электроды сделаны из меди. Питание дуги осуществлялось подачей на анод импульса с LC линии длительностью 330 мкс, током 15 А и напряжением заряда 200 В. Заряд зажигался высоковольтным импульсом длительностью 200 нс и амплитудой 20 кВ, подаваемым на кольцо вспомогательного электрода (триггера). Ток разряда фиксировался в цепи катода с помощью шунта 0.69 Ом.

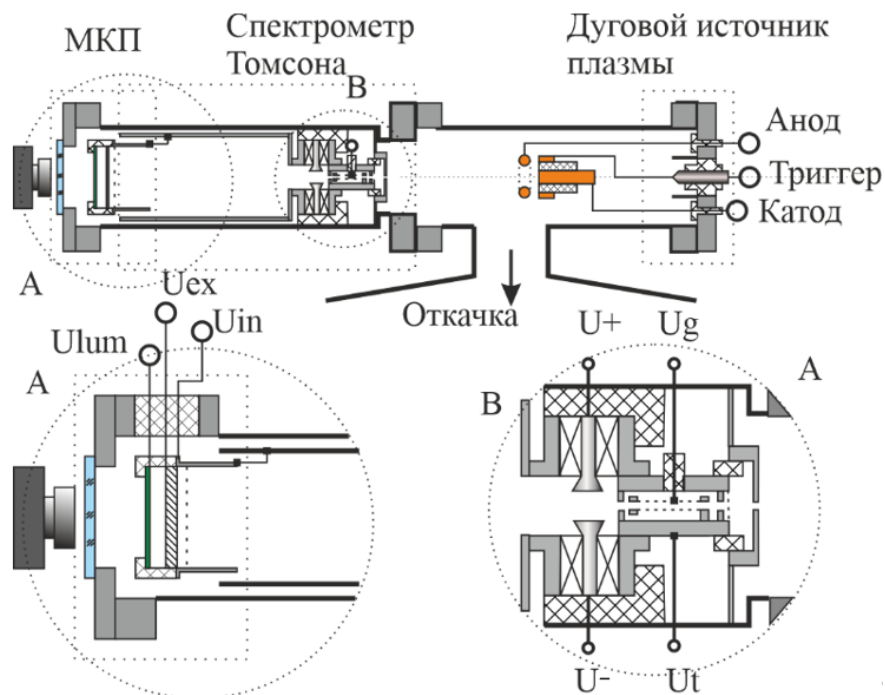


Рис. 1. Компоновка спектрометра Томсона с временным разрешением.

Компоновка спектрометра Томсона показана в деталях на Рис. 1. Данный спектрометр является модификацией устройства, описанного в [6]. На отдельном виде В показаны основные узлы спектрометра – входной узел, коллиматор с запирающим устройством, область параллельного электрического и магнитного поля, начало пролетной трубы. Основной особенностью спектрометра является то, что все основные детали анализатора находятся под высоким отрицательным потенциалом относительно стенок камеры. Эта особенность избавляет от необходимости придавать какой-либо ускоряющий потенциал источнику плазмы, как это сделано в [3]. Входной узел с апертурой находится под потенциалом камеры. Коллиматор, с встроенным отпирающим промежутком находится уже под потенциалом $U_t = -500\text{В}$. Под таким же потенциалом находится пролетная труба и вход МКП. Отпирающее устройство помещено в коллиматор между двух апертур. Одна обкладка соединена с корпусом коллиматора и находится под потенциалом U_t . На вторую обкладку подается постоянное запирающее напряжение $U_t + U_d$, и импульс отпираения $-U_d$. Импульс отпираения подавался на короткое время 0.5-2мкс и имел амплитуду 32 В. На полюсные наконечники подаются постоянные напряжения $U_t + dU$, $U_t - dU$. В данном эксперименте $dU = 6\text{В}$. Также между полюсными наконечниками создается магнитное поле с помощью катушек. После области магнитного и электрического полей заряженные частицы поступают в пролетную трубу, где расходятся по траекториям, формируя параболы на входной поверхности МКП. Детектор частиц основан на микроканальной пластине (МКП). Напряжения на обкладках пластины и на люминофорном экране формируются отдельным источником положительного напряжения. При этом вход МКП соединен с пролетной трубой и имеет потенциал $U_{in} = U_t$. Вход МКП затянут сеткой для выравнивания потенциала в пролетной трубе. Расстояние между источником плазмы и входом спектрометра составляет 40 см.

Электрическая система питания элементов спектрометра представлена на Рис. 2. В условиях дефицита высоковольтных источников питания распределение потенциалов создавалось системой делителей.

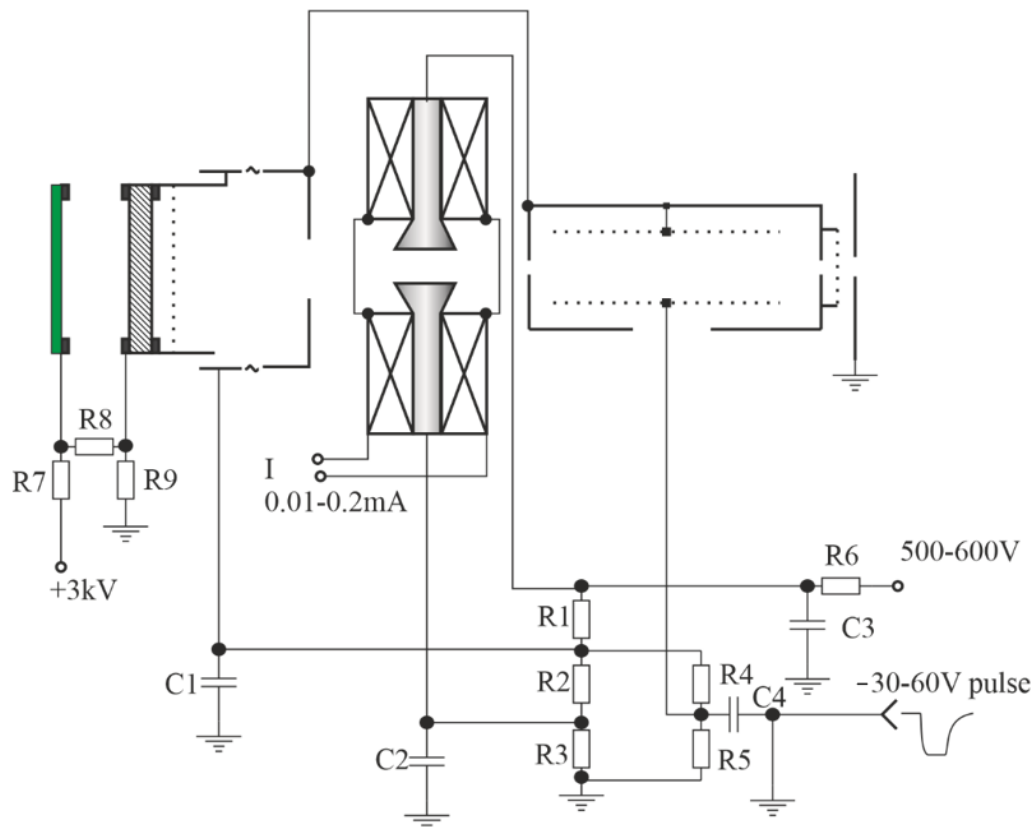


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема питания спектрометра.

Распределение потенциалов на основных элементах спектрометра осуществлялось с помощью системы делителей ($R1, R2, R3$) и ($R4, R5$). Система делителей $R1, R2, R3$ обеспечивала симметричное распределение потенциала на полюсных наконечниках относительно потенциала пролетной трубы U_t . Постоянный потенциал отпирающей обкладки формировался делителем $R4, R5$ таким образом, чтобы в нормальном состоянии все ионы, попавшие в коллиматор, отклонялись на его стенки. Дополнительный отрицательный импульс сравнивал потенциал обкладок отпирающего устройства и все ионы проходили через коллиматор. Осциллограмма отпирающего импульса представлена на Рис. 3. Дополнительный источник питания подавал потенциал на люминофорный экран и выход МКП, обеспечивая усиление потока части и образование светящихся парабол на экране.

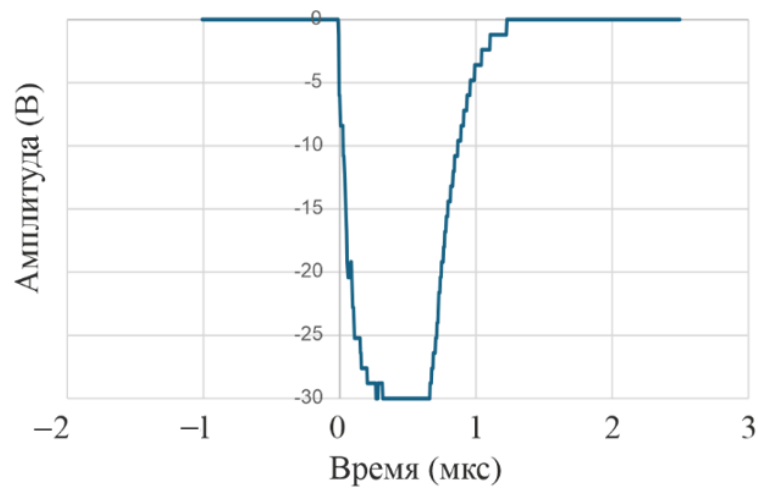


Рис. 3. Осциллограмма импульса минимальной длительности, открывающего коллиматорный затвор.

Для анализа потока плазмы был использован длительный слаботочный дуговой разряд. Выбор такого типа разряда позволил увидеть в деталях эволюцию потока ионов, попадающих на вход спектрометра от искровой стадии до стадий стационарного режима и затухания разряда. Осциллограмма тока разряда представлена на Рис.4

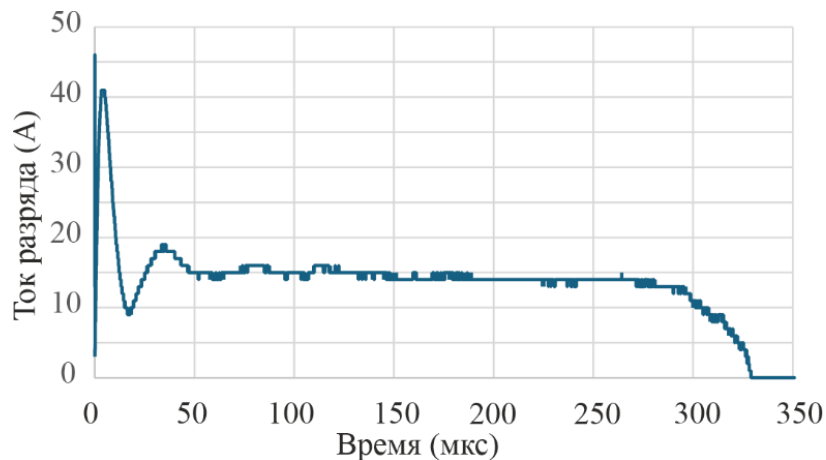


Рис. 4. Осциллограмма тока разряда.

Дуговой разряд переходил в стадию стационарного тока после 50 мкс переходных колебаний. В области установления разряда от 0 до 20 мкс использовался короткий отпирающий импульс -0.75 мкс. В области стационарного разряда (>50 мкс) использовался отпирающий импульс 2 мкс.

2. Результаты измерений

На Рис. 5 представлены энергетические спектры потока плазмы при постоянно открытом затворе. В этом режиме обкладки отпирающего устройства находятся в контакте (на рис. 2 схема не отображена). В этом режиме все ионы, попавшие на вход анализатора, в любое время оказываются на итоговой спектрограмме. В данной спектрограмме не отображены ионы водорода и углерода, так как для надежного разделения ионов меди кислорода и алюминия использовалось большое магнитное поле. Это поле вывело ионы примесей за границы детектора.

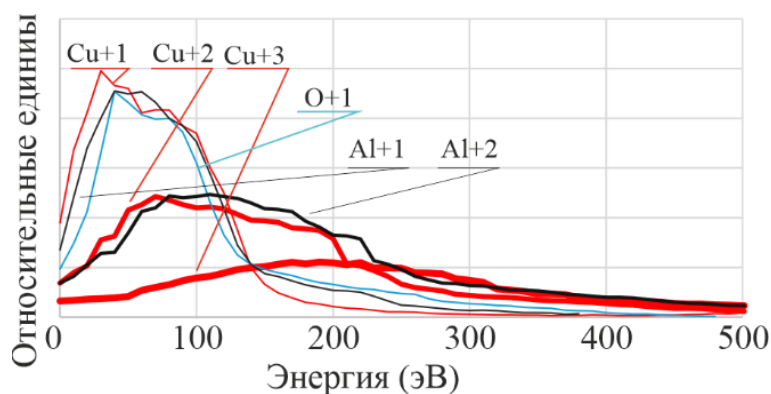


Рис.5. Общие энергетические спектры ионного потока вакуумной дуги с постоянно открытым затвором.

Результаты измерения общего спектра в целом повторяют данные, имеющиеся в литературе. Обращает на себя внимание, что присутствует явная зависимость наиболее вероятной энергии от заряда. Также видно присутствие значительного количества ионов диэлектрического кольца — O, Al.

Результаты экспериментов с использованием отпирающего устройства представлены на Рис. 6-8. Сигнал на экране спектрометра начинает появляться ко времени 1.5 мкс от начала разряда. Сигнал представляет собой исключительно поток протонов с энергиями порядка 1-2 кэВ. Со временем в сигнале начинают присутствовать другие примеси — O, Al, C. К моменту 5 мкс от начала разряда в потоке ионов появляется однозарядная медь (Рис. 6). Энергии основной части протонов и однозарядной меди составляют 400-600 эВ.

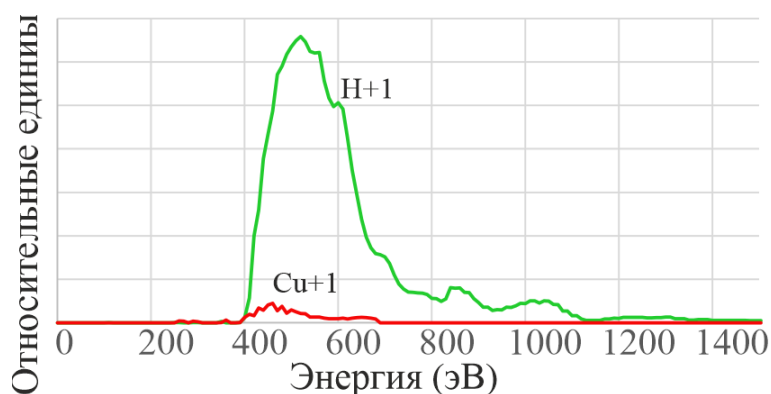


Рис. 6. Энергетические спектры потока ионов при задержке открывающего импульса 5 мкс. Длительность открывающего импульса 0.75 мкс.

В дальнейшем в разное время появляются различные примеси. Спектр становится стационарным после 50 мкс и содержит ионы меди, алюминия и иногда кислорода. Характерные спектры потока ионов при времени задержки 150 мкс с начала разряда представлены на Рис. 7. Характер спектров и соотношение общего количества ионных фракций в целом повторяет общий спектр (Рис. 5)

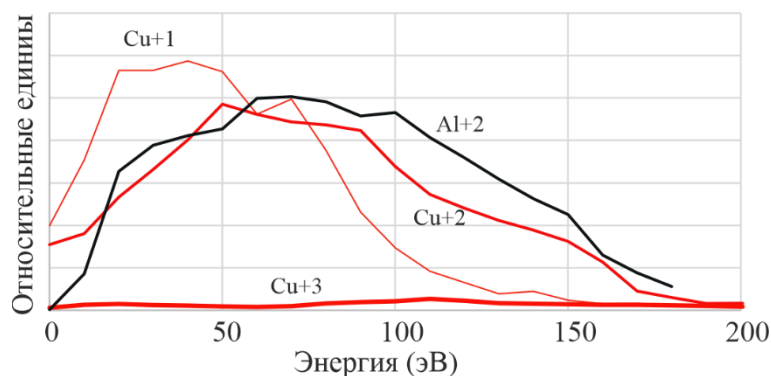


Рис. 7. Энергетические спектры потока ионов при задержке открывающего импульса 150 мкс. Длительность открывающего импульса 2 мкс

В самом конце разряда при времени задержки 330 мкс (Рис. 8.) общий характер спектров меняется слабо. При этом наиболее вероятные энергии меди незначительно уменьшаются. Общая интенсивность сигнала снижается, что ведет к менее правильной форме спектров.

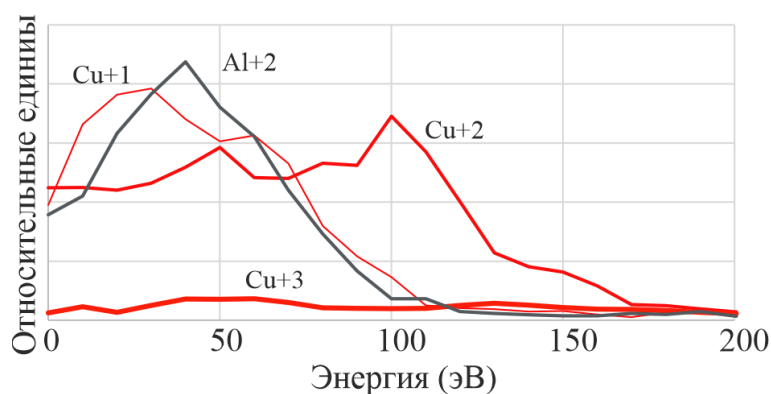


Рис. 8. Энергетические спектры потока ионов на срезе разряда при задержке открывающего импульса 150 мкс. Длительность открывающего импульса 2 мкс.

3. Обсуждение результатов

Поток ионов импульсного вакуумного разряда имеет крайне неоднородную временную структуру. Искровая стадия разряда производит большое количество ионов водорода и различных примесей, имеющих высокие энергии (до 3 КэВ). Через несколько десятков микросекунд энергетические и зарядовые параметры потока ионов становятся близкими к известным в литературе. В целом поток ионов используемого дугового разряда содержит большое количество ионов примесей имеющих широкий спектр энергий. Представленная методика позволяет легко детектировать поток любой фракции с энергией от десятков электронвольт до килоэлектронвольт. Такую возможность может дать только метод парабол Томсона. В данном случае можно сделать вывод о непригодности источника ионов меди представленной конструкции, так как поток ионов имеет постоянную значительную примесную составляющую. Это можно объяснить малой площадью чистой поверхности меди. Существенную часть поверхности медного катода составляет область контакта с диэлектриком, на которую постоянно переходят катодные пятна.

Заключение

Разработан и опробован метод временного энерго-масс зарядового состава импульсных вакуумных разрядов. Разработанный метод позволяет провести анализ потока в широком диапазоне энергий масс и зарядов ионов. Достигнутое временное разрешение составило 0.5 мкс. При анализе модели плазменного источника с медным катодом обнаружено большое количество ионов примесей, не описанных ранее в литературе. Энергетические спектры ионов плазменного потока в целом совпадают с описанными в литературе.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360/>

Литература

1. Плюitto А. А., Рыжков В. Н., Капин А. Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг // ЖЭТФ. – 1964. – Т. 47. – №. 8. – С. 494.
2. Davis W. D., Miller H. C. Analysis of the electrode products emitted by dc arcs in a vacuum ambient // Journal of Applied Physics. – 1969. – V. 40. – №. 5. – P. 2212-2221. <http://doi.org/10.1063/1.1657960>
3. Бугаев А. С. и др. Исследования направленных скоростей ионов в вакуумном дуговом разряде эмиссионными методами // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – №. 9. – С. 37-43.
4. Музюкин И. Л. Исследование временных характеристик потока ионов из катодной области вакуумной дуги // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – №. 2. – С. 128-131 <https://doi.org/10.1134/S1063784206020204>.
5. Tanaka K. et al. Adding high time resolution to charge-state-specific ion energy measurements for pulsed copper vacuum arc plasmas // Plasma Sources Science and Technology. – 2015. – V. 24. – №. 4. – P. 045010. <http://doi.org/10.1088/0963-0252/24/4/045010>

6. Muzukin I. L., Barakhvostov S. V. A nanosecond discharge over a dielectric surface as a method for generation of multicharged plasma // IEEE transactions on plasma science. – 2005. – V. 33. – №. 5. – P. 1654-1657.
<http://doi.org/10.1109/TPS.2005.856495>

Для цитирования:

Музюкин И.Л., Михайлов П.С., Шмелев Д.Л. Использование времяразрешающего спектрометра Томсона для анализа потока плазмы вакуумной дуги. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.7>