

Характеристики плазменных струй сильноточного вакуумного разряда

В. Кокшениев, Н. Курмаев*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**vak@oit.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Исследованы источники плазмы на основе сильноточных вакуумных разрядов в парах материала электродов из алюминия, меди и тантала, инициированных пробоем по поверхности керамики на основе окиси алюминия. Протестировано несколько геометрий разрядных промежутков с керамической вставкой из корунда между катодом и анодом. Для двух режимов разрядного тока с амплитудами 4–19 кА и полупериодом ~2.4 мкс сформированы плазменные потоки со скоростями от 4 см/мкс до 8 см/мкс и концентрацией до 10^{15} см⁻³. Из-за высокой термостойкости диэлектрической вставки из корунда абляция керамики незначительна. Плазменный поток в основе своей состоит из ионов материала электродов. Экспериментально показано, что определяющим фактором в ускорении плазмы является не градиент давления, а объемная электродинамическая сила токнесущей плазменной струи.

Ключевые слова: вакуумно-дуговой разряд, плазменный поток, токнесущие струи.

1. Введение

Создание плазменных источников на основе сильноточного вакуумного разряда в парах материала электродов востребовано как проблемой реализации кроубарного режима в магнитоизолированной передающей линии [1], так и исследованиями z-пинч режимов с металлоплазменным лайнером [2, 3]. Для кроубарного разрядника на основе плазменного коммутатора важно иметь плазменный поток ионов большой массы. Поперечное магнитное поле магнитоизолированной передающей линии оказывает наименьшее воздействие на однозарядные тяжелые ионы. Целесообразно использовать в этом случае вакуумно-дуговой источник плазмы, который обеспечивает сверхзвуковой поток плазмы любого вида металла. В соответствии с предъявляемыми требованиями [1] плазменные потоки должны иметь плотность не менее 10^{-7} г/см³ и скорость не менее 5 см/мкс. Для электродов из алюминия, меди и тантала концентрация плазмы в потоке должна быть $\sim 10^{15}$ см⁻³. В наших экспериментах с электродами из алюминия с инициированием сильноточного разряда по поверхности корунда получены плазменные потоки с импульсным давлением $p v^2 \sim 10^6$ Па [1]. В работе [4] приведены результаты формирования плазменных потоков ионов алюминия, меди, тантала и молибдена. При амплитуде тока вакуумной дуги 25 кА и длительности полупериода тока 120 мкс источник генерировал плазму с плотностью до $3 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В работе [5] показана возможность формирования вакуумным дуговым источником с медным катодом плазменного потока со скоростью до 6 см/мкс при амплитуде тока 10 кА и длительности полупериода 1.5 мкс.

В данной работе представлены исследования источников плазмы на основе вакуумных сильноточных разрядов с электродами из алюминия, меди и тантала, инициированных высоковольтным пробоем по поверхности керамики на основе окиси алюминия.

2. Схема эксперимента

Схема эксперимента приведена на Рис.1. Вакуумная камера (пунктир) откачивалась до остаточного давления $\leq 8 \cdot 10^{-3}$ Па. Сборка из 4 плазменных пушек (ПП) крепилась на съемном патрубке, имеющем высоковольтные вакуумные вводы для подключения ПП к источнику питания. Протестированы 2 геометрии разрядных промежутков с керамической вставкой из корунда между катодом и анодом. Вариант 1 – торцевой, где катод, анод и поверхность керамической вставки в одной плоскости, вариант 2 – катод находился внутри

керамической трубки с увеличением зазора по поверхности керамики в 2–3 раза. Емкостный накопитель (конденсатор ИК 50-3, 3 мкФ с 16 отрезками кабеля РК-50-9) обеспечивал колебательный режим разрядного тока с периодом ~ 5.7 мкс. Разряд инициировался высоковольтным пробоем по поверхности керамической вставки между электродами. Амплитуда тока плазменной пушки регулировалась как зарядным напряжением (30–40 кВ), так и схемой подключения кабелей к ПП [1]. При зарядном напряжении 30 кВ минимальный ток в 1 ПП составлял ~ 7 кА, при напряжении 40 кВ с подключением двух кабелей РК-50-9 к 1 ПП амплитуда тока ~ 19 кА. Для получения аperiодического режима разряда в цепь каждого кабеля устанавливалось сопротивление $R_d = 3$ Ома. На Рис.1, справа, приведены характерные осциллограммы для обоих режимов разрядного тока в ПП (40 кВ, 2 кабеля РК-50-9).

Для измерения характеристик плазменного потока использовались оптическая и зондовая диагностики. Зонды имели коаксиальную конструкцию, наружный электрод из медной трубки был опорным электродом, относительно которого на внутренний электрод подавалось напряжение $U_{cm} = -(30-60)$ В. Зонды устанавливались на расстоянии 75 и 135 мм от торца плазменной пушки. Измерение скорости плазменного потока проводилось времяпролетной методикой по временному сдвигу максимума сигналов с двух зондов. Для оптической диагностики использована четырехкадровая камера HSFC Pro с минимальной экспозицией кадра 3 нс. В эксперименте в зависимости от режима разряда ПП время экспозиции кадров увеличивалось до 50 или 100 нс.

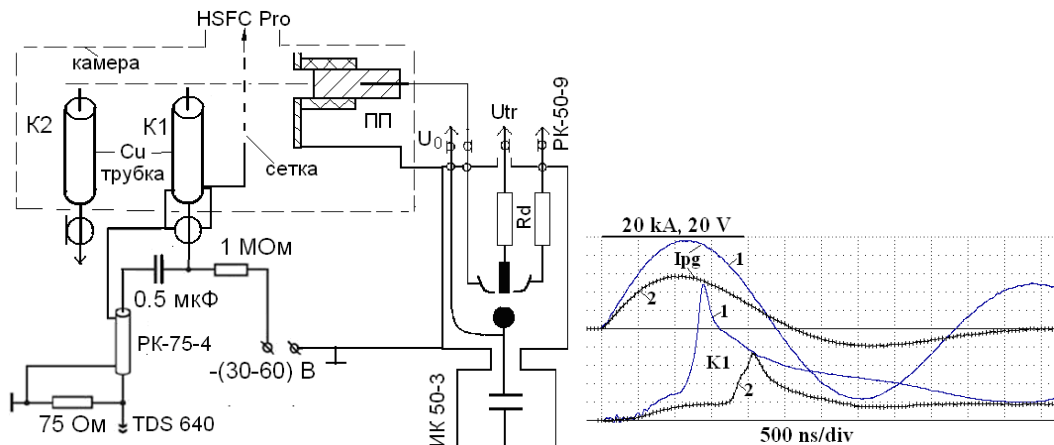


Рис.1. Схема эксперимента и характерные осциллограммы тока ПП и сигналов с зонда K1 при зарядном напряжении 40 кВ: 1 – колебательный режим тока, 2 – аperiодический.

3. Характеристики плазменных потоков вакуумного дугового разряда

В работе [1] мы использовали ПП торцевого типа с диаметром алюминиевого катода 8 мм и внешним диаметром керамики 14 мм. В данной работе исследованы характеристики этой геометрии разрядного промежутка, а также вариант источника плазмы с углублением катода в керамической трубке на 3 мм. На Рис.2а приведены фотография торцевого источника плазмы и осциллограммы тока и сигналов с зондов K1 и K2 при разрядном токе 19.2 кА и напряжении на зондах $U_{cm} = -40$ В. Цифрами 1–4 обозначены моменты регистрации камерой HSFC Pro плазменного потока с экспозицией кадра 50 нс. На Рис.2б приведены оптические снимки для тока разряда 19.2 кА, а на Рис.2с – для тока разряда 9.8 кА в одинаковые моменты времени относительно начала тока ПП. Расстояние между центрами ПП в этом эксперименте составляло 36 мм. Видно, что с увеличением тока разряда с 9.8 кА до 19.2 кА струи на границе двух соседних потоков имеют более сильное свечение, чем сами потоки. Уширение сигнала на зонде K2 относительно K1 (зонды установлены по

центру одной из ПП) связано с приходом плазмы от соседней ПП. При известных расстояниях между ПП, K1 и K2 можем принять, что угол раскрытия струи не превышает 60° . Отметим также, что максимум свечения плазменного потока существенно запаздывает относительно максимума сигнала на зонде K1, который, в свою очередь, регистрируется не позже максимума тока разряда. Это может быть связано с тем, что степень ионизации плазмы и зарядность ионов выше в начальной стадии формирования дуги на фронте сильноточного разряда.

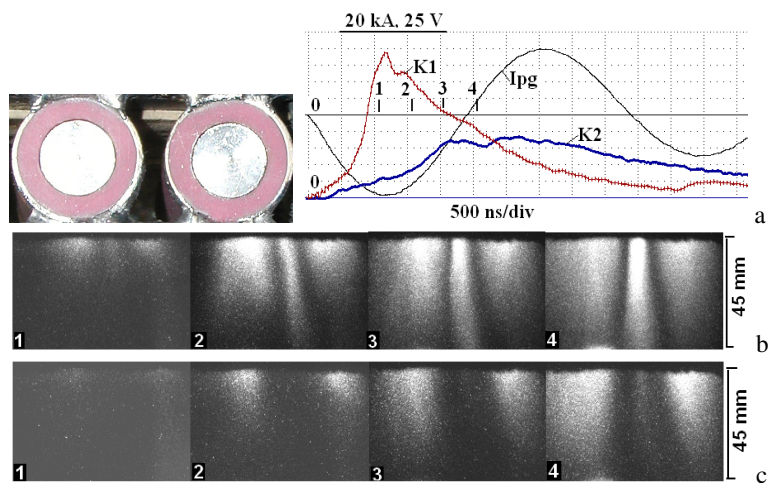


Рис.2. а – фотография торцевого источника плазмы и осциллограммы тока и сигналов с зондов K1 и K2 при разрядном токе 19.2 кА и напряжении на зондах $U_{cm} = -40$ В. Цифрами 1–4 обозначены моменты регистрации камерой HSFC Pro плазменного потока с экспозицией кадра 50 нс: б – кадры с камеры HSFC Pro для тока разряда 19.2 кА, с – для тока разряда 9.8 кА в одинаковые моменты времени (цифры 1–4) относительно начала тока ПП.

Для варианта 2 плазменного источника, в котором центральный электрод находится внутри керамической трубки на глубине 3 мм, зарегистрирована меньшая скорость плазменного потока во всем диапазоне токов разряда. На Рис.3 приведены графики зависимости скоростей плазменного потока от амплитуды разрядного тока для обоих вариантов электродной схемы. Большие величины скорости для варианта 1 могут быть связаны с более эффективным воздействием электродинамических сил на ускорение токонесущей плазмы вдоль оси системы. Если принять, что скорость плазменного сгустка на участке между разрядным промежутком и зондами меняется незначительно, то формирование направленного потока запаздывает относительно начала тока на $\sim(200-300)$ нс. Измерения показали значительный разброс скоростей плазменного потока ($\sim 10\%$) от разряда к разряду (интервал 5–10 минут), который имеет тенденцию к увеличению с ростом тока. С помощью оптической диагностики зарегистрировано циклическое изменение яркости плазменной струи с изменением полярности центрального электрода в колебательном режиме разряда. Рис.4 демонстрирует данный факт для варианта 2 с утопленным центральным электродом, который в начальный момент является катодом. Как видно, минимальная яркость (кадр 3) соответствует периоду разряда, когда ток меняет направление с переходом через ноль и изменением полярности центрального электрода.

Для получения плазменных потоков с ионами большей массы проведены эксперименты с электродами из меди и тантала. В этой серии экспериментов был уменьшен диаметр центрального электрода до 5 мм с использованием керамической трубки диаметрами 10/5 мм. Центральный электрод был утоплен на 5 мм. Результаты измерения скорости плазменного потока для алюминия, меди и тантала приведены на Рис.5. Получено, что с

увеличением разрядного тока возрастает как скорость, так и концентрация плазменной струи. Зарегистрированное уменьшение угла раскрытия плазменной струи с ростом тока очевидно связано с увеличением влияния собственного магнитного поля на сжатие токонесущей плазмы [5].

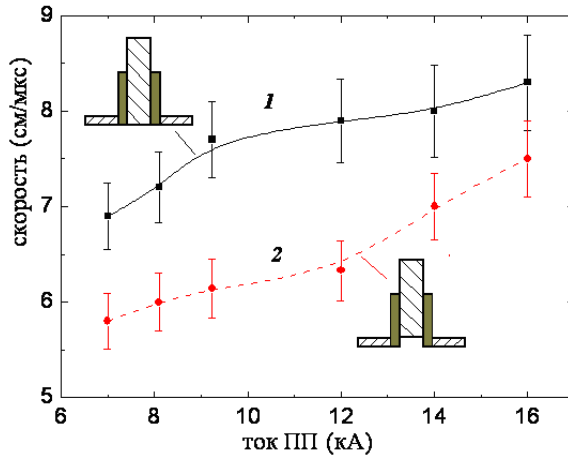


Рис.3. Зависимость скорости плазменного потока от амплитуды разрядного тока: 1 – торцевой вариант, 2 – вариант с утопленным центральным электродом.

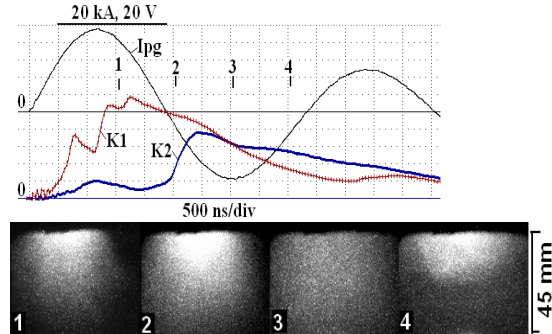


Рис.4. Осциллограммы тока разряда I_{pg} , сигналов с зондов K1 и K2 и кадры оптической съемки с экспозицией 100 нс в моменты времени, обозначенные цифрами 1–4. Торце ПП находится на 10 мм выше рамки кадра.

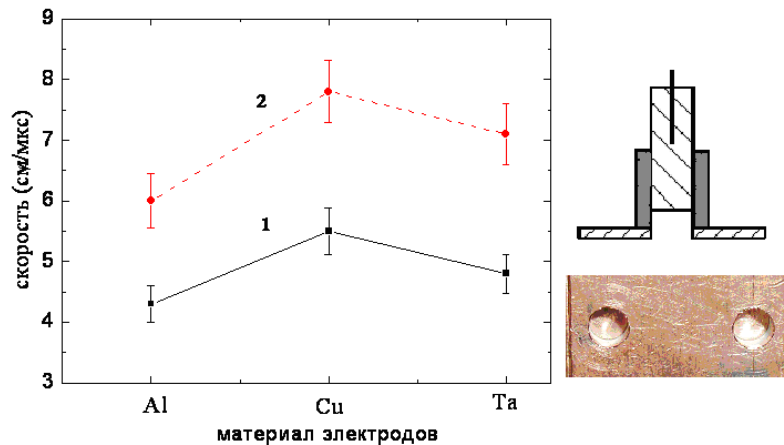


Рис.5. Графики скоростей плазменного потока для электродов из алюминия, меди и тантала: 1 – $I_{pg} = 9.8$ кА, 2 – $I_{pg} = 19.2$ кА. Справа, геометрия разряда и фотография сборки 2 ПП с медными электродами.

Для определения влияния электродинамического фактора в ускорении токонесущей плазмы вдоль оси разряда в центре промежутке между зондом K1 и ПП была установлена металлическая сетка, соединенная с заземленной вакуумной камерой (см. Рис.1). Результат эксперимента для электродов из меди представлен на Рис.6. При наличии сетки, на которую замыкается часть разрядного тока в движущейся плазменной струе, скорость плазмы падает. Очевидно, что распространение плазменной струи за сеткой происходит без дополнительного воздействия импульса силы части разрядного тока, протекающего в ускоряемой им плазме. Изменение формы разрядного тока слабо влияет на параметры формируемого плазменного потока. На Рис.7 приведен результат эксперимента при переходе от колебательного режима разряда к близкому к аperiодическому, когда активное сопротивление контура $r \sim 2(L/C)^{1/2}$. Для электродов из меди при близких амплитудах тока

скорости плазменного потока коррелируют между собой. Важно и соответствие количества ионов, пришедших на зонд K1, при равном количестве протекшего в вакуумном разряде заряда.

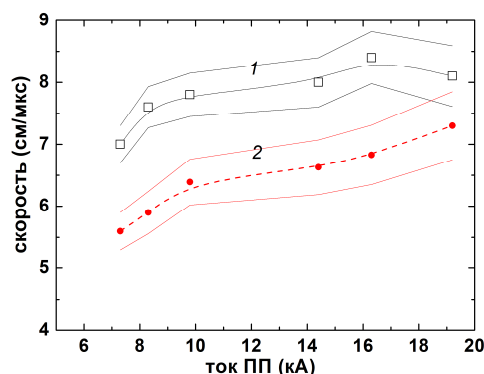


Рис.6. Графики скорости плазменного потока: 1 – без сетки и при изменении режима ускорения с установкой заземленной сетки между ПП и зондом K1 – график 2.

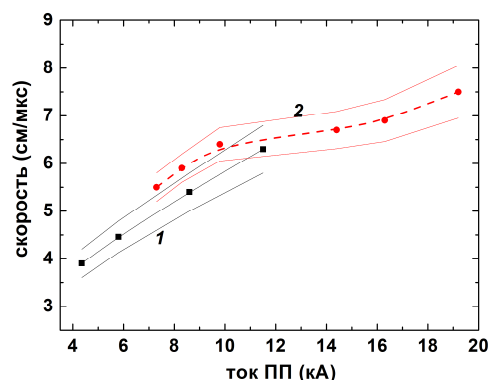


Рис.7. Характеристики плазменного потока для двух режимов разрядного тока: 1 – аperiodический, 2 – колебательный.

Ток на зонд отражает различие в концентрации плазмы n_i , электронной температуре T_e и массе иона M_i в струях плазмы для разных металлов. Имея осциллограммы сигналов с зондов для разных материалов в исследуемом диапазоне токов вакуумно-дугового разряда, можно оценить количество ионов каждого металла. График на Рис.8 демонстрирует влияние материала электродов на величину заряда, пришедшего на зонд K1 за время 5 мкс, в зависимости от протекшего за это время в дуге заряда. За единицу принят интеграл тока на зонд K1 для алюминия. Кривая 1 получена при протекшем в дуге заряде 24 мКл, 2 – 45 мКл, 3 – 63 мКл, увеличение заряда достигалось ростом тока дуги с 7 кА до 19 кА. Полученный результат может быть связан как с ростом напряжения горения дуги при переходе от алюминия к танталу, так и с увеличением средней зарядности ионов в плазме этого ряда металлов [4]. Оценка концентрации плазмы из соотношения $nM_i v^2 \sim H^2/8\pi$ и из простой гидродинамической модели токонесущей струи $n \sim I^2/(M_i v^2)$ дает большую концентрацию для плазмы вакуумного разряда с электродами из алюминия, $n \sim I_d^2/(M_i v^2) \sim (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, где $I_d \sim 0.7I_m$.

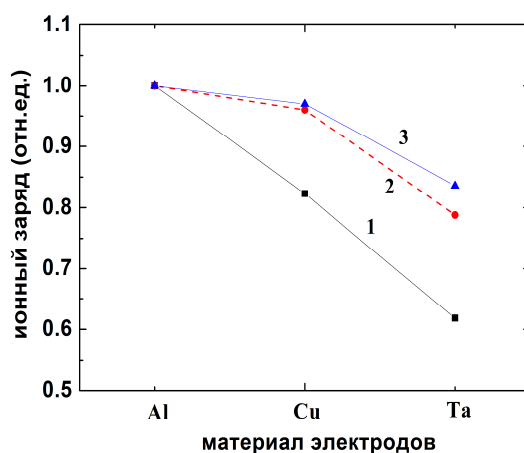


Рис.8. Влияние материала электродов на величину ионного заряда, пришедшего на зонд K1: кривая 1 получена при протекшем в дуге заряде 24 мКл, 2 – 45 мКл, 3 – 63 мКл.

4. Заключение

Источники плазмы на основе сильноточных вакуумных разрядов, инициированных пробоем по поверхности керамики, позволяют формировать сверхзвуковой поток плазмы различных металлов. Исследовано несколько модификаций разрядных промежутков с керамической вставкой из корунда между электродами из алюминия, меди и тантала, инициированных высоковольтным пробоем по поверхности керамики. Получено, что с увеличением разрядного тока возрастает как скорость, так и концентрация плазменной струи для исследованных материалов и режимов разряда. Скорость плазменного потока возрастает с 40 км/с до 80 км/с с увеличением амплитуды тока с 4 кА до 19 кА, концентрация плазмы достигает 10^{15} см^{-3} . Экспериментально показано определяющее влияние электродинамических сил как основного механизма ускорения токонесущей плазмы вдоль оси системы. Из-за высокой термостойкости диэлектрической вставки из корунда абляция керамики незначительна. Плазменный поток в основе своей состоит из ионов материала электродов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

5. Литература

- [1] Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., *J.Phys.: Conf. Ser.*, **2064**, 012033, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012033
- [2] Shishlov A.V., Kokshenev V.A., Rousskikh A.G., Cherdizov R.K., Kurmaev N.E., Zhigalin A.S., Fursov F.I., Oreshkin V.I., *Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 61, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242061
- [3] Cherdizov R.K., Kokshenev V.A., Shishlov A.V., Baksht R.B., Oreshkin V.I., Rousskikh A.G., Zhigalin A.S., *Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 55, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241935
- [4] Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Vodopyanov A.V., Yushkov A.Yu., Yushkov G.Yu., *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 023302, 2020; doi: 10.1063/1.5143503
- [5] Красов В.И., Кринберг И.А., Паперный В.Л., Коробкин Ю.В., Романов И.В., Рупасов А.А., Шиканов А.С., *Письма в ЖТФ*, **33**(22), 1, 2007; url: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/13698>