

04

Плазменный микродвигатель на основе искрового разряда с жидкометаллическим катодом

© В.Л. Паперный, С.П. Горбунов, К.Н. Пухилас

Иркутский государственный университет

E-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2012 г.

Исследованы параметры низкоиндуктивного импульсного вакуумного разряда с катодом из жидкометаллической In–Ga-эвтектики. Показано, что наложение на разряд поля постоянного магнита приводит к существенному изменению характера течения плазмы в разряде, что обеспечивает заметный (в 1.5–2 раза) рост импульса катодной струи. Тяговая характеристика разряда: импульс на единицу энергии накопителя составляет около $10 \mu\text{N} \cdot \text{s}/\text{J}$, что близко к лучшим известным значениям для аналогичных плазменных источников с твердым металлическим катодом.

Плазменные двигатели с тягой в диапазоне μN широко исследуются в последние годы в связи с возможностью использования для коррекции орбит микроспутников [1]. Весьма перспективным является использование для этих задач вакуумных разрядов с металлическими катодами различных типов в связи с простотой конструкции, низким рабочим напряжением, возможностью использования практически любого металла в качестве рабочего тела. Дополнительными достоинствами таких систем являются почти 100%-я степень ионизации плазменной струи, высокая скорость истечения плазмы и ее квазинейтральность. Однако использование в качестве рабочего тела твердого металла требует введения в конструкцию двигателя специальной механической системы для его подачи в область разряда. Этот недостаток можно избежать, изготовив катод из жидкого металла, помещенного в капиллярный канал, где подача рабочего тела обеспечивается силами поверхностного натяжения. При этом вакуумные разряды с катодами из металлов с низкой температурой плавления обладают относительно низкой скоростью истечения катодной плазменной струи (например, около $6 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ для In-катада [2]), что существенно ухудшает тяговые

параметры двигателя на их основе. В данной работе исследована возможность улучшения характеристик вакуумно-искрового разряда с жидкометаллическим катодом с целью его применения в качестве плазменного микродвигателя.

Эксперименты проводились в низкоиндуктивном искровом разряде. Электродная система состояла из катода, представляющего собой никелевый капилляр диаметром 0.8 mm, заполненный эвтектикой (70% Ga + 30% In), находящейся в жидком состоянии при комнатной температуре. Капилляр помещался в керамическую трубку с надетым вблизи рабочего торца металлическим кольцом — поджигающим электродом. На расстоянии 3 mm от торца трубки располагался сетчатый анод, находящийся под потенциалом заземленной вакуумной камеры, где поддерживалось остаточное давление $(4-6) \cdot 10^{-4}$ Pa. Соединенный с катодом накопитель, состоящий из 6 параллельно соединенных конденсаторов суммарной емкостью $C = 2 \mu\text{F}$, заряжался до отрицательного напряжения U_0 , после чего на торце катода инициировался разряд с помощью высоковольтного пробоя по поверхности керамической трубки. Ток измерялся поясом Роговского непосредственно в цепи катода. Временное разрешение регистрирующей системы составляло около 20 ns. Коаксиальная конструкция, а также малые габариты электродной системы и накопителя обеспечили низкую индуктивность разрядного контура. Она определялась из осциллограммы разрядного тока (см. врезку на рис. 1) и составила около 10 nH.

Для повышения скорости истечения катодной струи в конструкцию вводился также постоянный кольцевой магнит из неодимового сплава. Магнитное поле в центре кольца B_0 составляло около 0.15 T. Магнит располагался между катодом и анодом, карта силовых линий поля строилась с помощью стандартного пакета MATLABTM. Полная масса плазменного источника составила около 50 g.

Следует отметить, что данные о влиянии магнитного поля на движение катодной струи носят противоречивый характер. Так, в ряде работ (см., например, [2]) наблюдалось значительное увеличение скорости истечения струи при наложении на разряд магнитного поля, в то время как в [3] регистрировалось уменьшение скорости. Отметим также, что ранее изучалось влияние магнитного поля на катодную струю разрядов с током, не превышающим 300 A.

Эксперимент проводился в двух вариантах. Для измерения скорости ионного потока времяпролетным способом использовалась конструкция

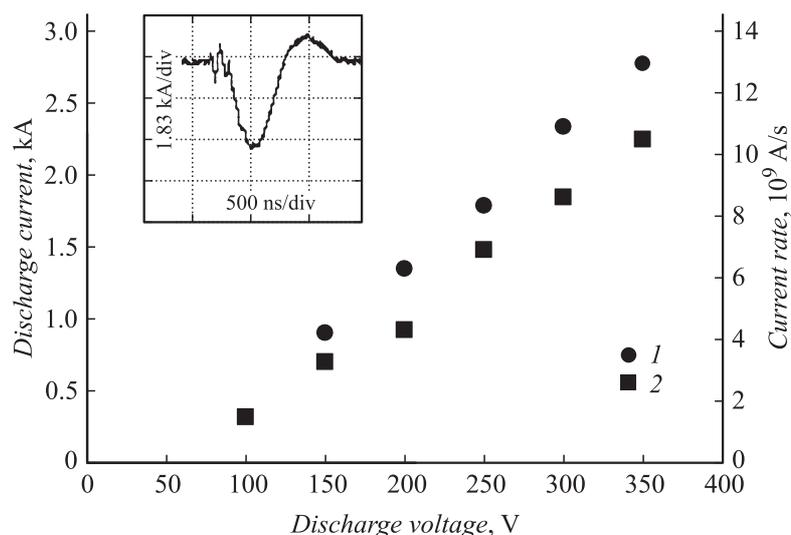


Рис. 1. Зависимость от напряжения накопителя амплитуды и скорости нарастания тока разряда без магнитного поля (1) и с полем (2). Во врезке изображена осциллограмма тока разряда без магнитного поля при напряжении 350 V.

с сетчатым анодом, через который плазма, генерируемая катодом, расширялась в дрейфовую трубку длиной 36 см. После прохождения трубки ионы регистрировались коллектором, находящимся под отрицательным относительно анода потенциалом, равным -200 V, при котором регистрируется ионный ток насыщения. Во втором варианте для измерения механического импульса катодной струи использовался кольцевой анод с центральным отверстием диаметром 10 мм, в которое из межэлектродного промежутка вытекала плазменная струя. За анодом на расстоянии 2 мм располагался баллистический маятник в виде металлического диска массой 0.072 g, подвешенного на кварцевых нитях. Под действием плазмы катодной струи диск отклонялся, и по углу отклонения оценивался механический импульс, сообщенный диску струей. При этом предполагалось, что плазменная струя полностью передает свой импульс маятнику, и пренебрегалось возможным отражением ионов от поверхности маятника. Для получения статистически значимого результата все данные измерений усреднялись по 10 разрядным импульсам.

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики разряда при наличии и в отсутствие магнита. Из рисунка видно, что при данном разрядном напряжении ток разряда с магнитом несколько ниже, чем в его отсутствие. Этот результат согласуется с ранее выполненными измерениями в дуговом разряде с относительно малыми токами [2] и объясняется уменьшением диаметра токового канала и соответственно возрастанием сопротивления плазменной струи при наложении магнитного поля.

Кроме того, рис. 1 показывает, что низкая индуктивность разрядного контура позволила при небольших напряжениях накопителя U_0 получить относительно высокие значения разрядного тока и скорости его нарастания dI/dt , превышающие 2.5 кА и 10^{10} А/с соответственно, при напряжении менее 400 В. Заметим, что, по мнению авторов работы [4], именно высокая скорость нарастания разрядного тока позволила получить в высоковольтном (8–30 кВ) разряде с жидкометаллическим Ga-катодом при $dI/dt \approx 2 \cdot 10^9$ А/с значения скорости плазменной струи V_0 вплоть до $2 \cdot 10^4$ м/с.

Времяпролетные измерения в данном эксперименте показали, что плазменная струя, генерируемая жидкометаллическим катодом, в отсутствие магнитного поля имеет одну ионную компоненту (рис. 2, *a*). Ее скорость, определяемая по времени задержки максимума сигнала относительно максимума разрядного тока, слабо растет в диапазоне $(1.7\text{--}2.3) \cdot 10^4$ м/с при возрастании напряжения разряда. Подобные измерения с магнитным полем показали, что в ионном сигнале проявляется дополнительная быстрая компонента (рис. 2, *b*). При увеличении U_0 от 100 до 350 В скорость медленной компоненты остается практически постоянной и равной $2 \cdot 10^4$ м/с, а скорость быстрой компоненты падает от $7 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$ м/с. Важно отметить, что амплитуда коллекторного тока основной, медленной, компоненты в этом случае уменьшается более чем на порядок величины по сравнению с амплитудой в разряде без поля (рис. 2, *a* и *b*).

Для выяснения причины этого эффекта была проведена съемка плазменной струи цифровой камерой в интегральном по времени режиме. Изображения струи на рис. 2 показывают, что ее структура при расширении в область за анодом существенно меняется при наложении магнитного поля, а именно: струя приобретает характер „фонтана“, при этом в ее центральной части виден ярко выраженный направленный поток. Оценки, проведенные для характерных параметров плазменной струи (плотность плазмы $(1\text{--}3) \cdot 10^{14}$ см⁻³ для

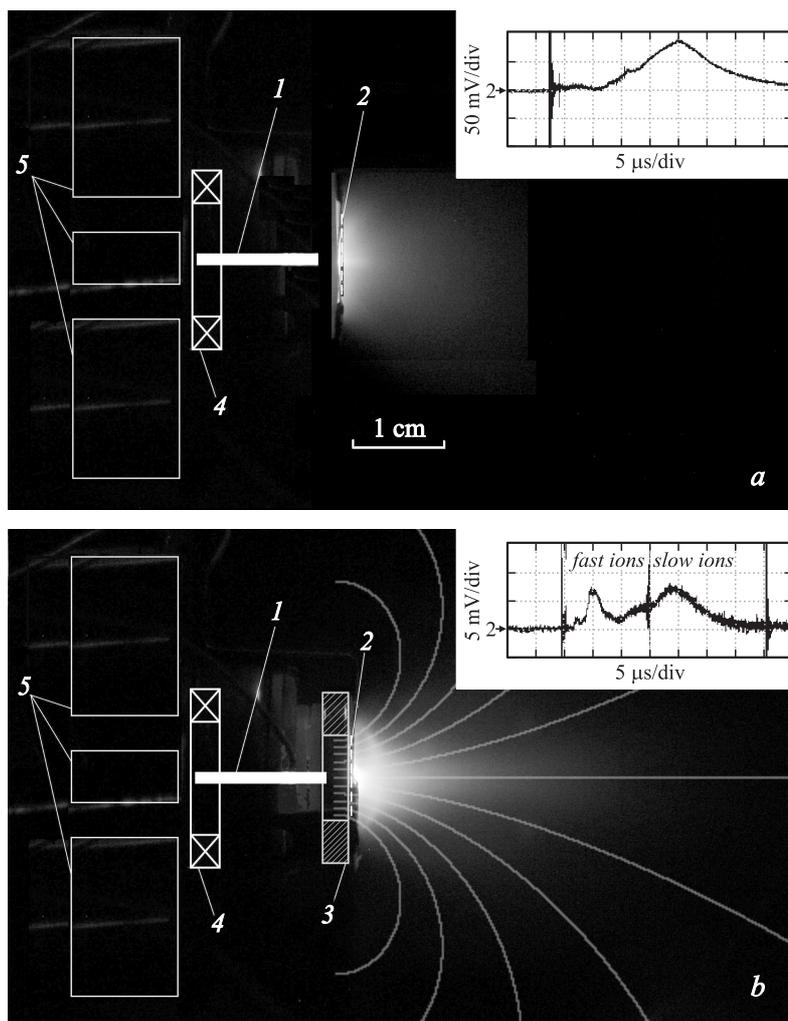


Рис. 2. Изображения катодной струи в области за анодом в отсутствие магнитного поля (*a*) и с полем (*b*). Соответствующие осциллограммы тока коллектора приведены во врезках в правом верхнем углу. Светлыми линиями изображена рассчитанная структура магнитных силовых линий, а также контуры основных элементов плазменного источника. 1 — катод, 2 — анод, 3 — магнит, 4 — пояс Роговского, 5 — конденсаторы.

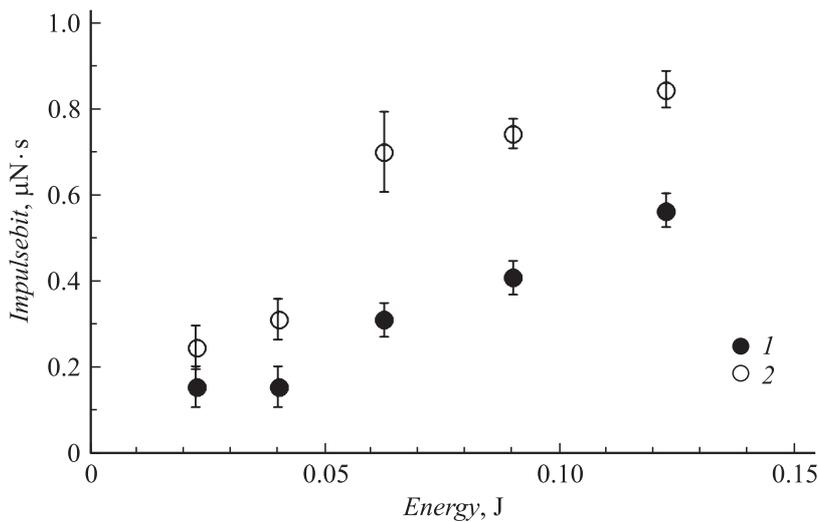


Рис. 3. Зависимость импульса катодной струи от энергии накопителя для разряда без магнитного поля (1) и с полем (2).

тока разряда 0.5–1.5 kA [5], температура электронов порядка 10 eV, среднее магнитное поле около 0.1 T), показывают, что электроны в плазме оказываются замагниченными, в то время как ионы остаются незамагниченными. В этом случае магнитное поле ограничивает расширение катодной струи, движущейся в межэлектродном промежутке, так что радиус струи остается близким к радиусу катода $R_0 \approx 1$ mm [5]. Замагниченные электроны, двигаясь вдоль магнитных силовых линий, увлекают ионы амбиполярным электрическим полем, вследствие чего плазменный поток за анодом резко расширяется вместе с магнитной силовой трубкой, т. е. поле играет роль „магнитного сопла“.

Как показано в работе [5], увеличение радиуса катодной струи R вследствие действия сил Ампера приводит к возрастанию скорости плазмы на величину $\Delta V \approx V_0 \gamma \ln(R/R_0)$, где коэффициент γ определяется параметрами плазменного потока и для условий данного эксперимента $\gamma \sim 1$. Предполагая, что поперечный размер светящейся области за анодом на рис. 2, b близок к размеру плазменной струи, оценим отношение $R/R_0 \sim 10$, следовательно, скорость ионов возрастает

приблизительно в 2–3 раза. Заметим, что приведенные рассуждения относятся к основной части ионного потока, движущегося вдоль силовых линий магнитного поля, направленных под углом к оси разряда. В то же время небольшая часть ионов, движущихся вдоль приосевых силовых линий по практически прямолинейным траекториям, не участвует в описанном процессе ускорения и сохраняет исходную скорость. Этот вывод качественно согласуется с данными рис. 2, *b*.

Вышеизложенное позволяет предположить, что импульс катодной струи P в разряде с магнитным полем должен заметно превышать эту величину в отсутствие поля. Для проверки этого предположения импульс был измерен с помощью баллистического маятника. Рис. 3 показывает, что, действительно, импульс струи при использовании магнита повышается в 1.5–2 раза. Также видно, что P быстро растет с увеличением энергии накопителя $W = CU_0^2/2$, так что при $W \approx 0.1$ J импульс составляет приблизительно $1\mu\text{Ns}$, а импульс на единицу энергии близок к $10\mu\text{N} \cdot \text{s}/\text{J}$. Эта величина почти в 5 раз превышает данные, полученные в аналогичных измерениях для плазменного источника с твердыми (Ti и W) катодами [3] и близка к результатам работы [6], где использовался импульсный разряд с оптимизированной электродной системой.

Таким образом, показано, что, используя низкоиндуктивную разрядную цепь и внешнее магнитное поле с описанными характеристиками, удастся существенно повысить параметры вакуумного разряда с жидкометаллическим катодом, что делает его перспективным для использования в качестве двигателя для микроспутников.

Список литературы

- [1] Zhuang T., Shashurin A., Chiu D. et al. // Proc. 32nd International Electric Propulsion Conference. Wiesbaden, Germany, 2011, September 11–15. IEPC–2011–266.
- [2] Anders A., Yushkov G.Yu. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. P. 4824–4829.
- [3] Keidar M., Schein J., Wilson K. et al. // Plasma Source Sci. & Techn. 2005. V. 14. P. 661–669.
- [4] Popov S.A., Proskurovsky D.I., Batrakov A.V. // Proc. XIX Int. Symp. Discharge Electr. Insulation Vacuum. Xi'an, China, 2000. V. 1. P. 81–84.
- [5] Крипберг И.А., Матафонов Г.К. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 4. С. 114–119.
- [6] Neumann P.R.C., Bilek M.M.M., Tarrant R.N. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 045005.