

04;15

Простейшая эрозионная плазменная пушка из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией

© С.В. Коробков, М.Е. Гуцин, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, А.С. Николенко

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: korobkov@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 3 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 3 декабря 2018 г.

Принято к публикации 11 декабря 2018 г.

Описан малогабаритный импульсный генератор плазмы простой конструкции, изготовленный из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией. Плазменная пушка формирует облако углеродно-водородной плазмы с концентрацией электронов более 10^{13} cm^{-3} , в том числе в постоянном магнитном поле индукцией до 500 G, а также при наличии фоновой плазмы плотностью порядка 10^{12} cm^{-3} , создаваемой независимым источником. Высокий ресурс и стабильность параметров плазмы от одного импульса к другому позволяют использовать такую пушку в лабораторных экспериментах, моделирующих динамические процессы в космосе.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47398.17619

Коаксиальные генераторы плазмы были предложены на заре экспериментальных исследований в области управляемого термоядерного синтеза [1], и их принципы работы сегодня можно считать известными. Устройства эрозионного типа, в которых рабочее вещество поступает в область ионизации и ускорения в результате испарения материала электродов [2–4] или изолятора [5], довольно широко распространены, поскольку не требуют использования импульсных газовых линий и позволяют получать плазму с высоким энергосодержанием. Описаны различные варианты исполнения эрозионных плазменных пушек (в частности, на плексигласе [6] или полиэтилене [5,7]), которые определяются их назначением.

Наше собственное исследование в данном направлении обусловлено спецификой задачи, а именно лабораторным моделированием эффектов расширения плотных плазменных облаков в фоновую космическую плазму [8]. Коаксиальный генератор оказывается доступной альтернативой высокоэнергетическим лазерно-плазменным системам, используемым для постановки подобных экспериментов [9], однако должен удовлетворять ряду требований. Во-первых, для сведения к минимуму возмущений фоновой плазмы деталями генератора необходима его миниатюризация. Во-вторых, для адекватного воспроизведения космических условий требуется исключить эффекты проникновения в фоновую плазму электромагнитных полей, обеспечивающих формирование плазменного облака. В-третьих, для снижения уровня помех желательно отказаться от цепей высоковольтной инициации пробоя на диэлектрике. Наконец, для реализации такого преимущества модельного лабораторного эксперимента, как получение больших массивов экспериментальных данных со сканированием по параметрам, плазменная пушка должна иметь высокий ресурс (не менее нескольких сотен рабочих циклов — „выстрелов“)

и обеспечивать высокую воспроизводимость параметров плазмы от одного „выстрела“ к другому.

Отвечающие перечисленным требованиям генераторы могут быть изготовлены на основе коаксиальных кабелей с изолятором из полиэтилена низкой плотности, которые одновременно служат линиями высоковольтного питания пушек. В наших экспериментах рабочие части источников плотной плазмы размещались на срезах стандартных кабелей марки РК (рис. 1). Зона ускорения длиной 8–12 mm от торцевого среза изолятора формировалась тонкостенной медной трубкой, установленной по внешнему диаметру оплетки (5.5 mm для кабеля РК-75-4-11 или 8 mm для кабеля РК-50-7-12). У более тонкого кабеля РК-75-4-11 центральная жила, имеющая диаметр 0.7 mm, с помощью медной вставки утолщалась до 2 mm для предупреждения перегрева и быстрой выработки. Источниками импульсного питания пушек служили конденсаторные батареи емкостью 50 или 5 μF , разряжаемые через последовательные сборки из тиристоров марки Т500 со снабберными цепями. Управляющие импульсы подавались на тиристоры с заданной задержкой относительно импульса создания фоновой плазмы. Параллельно нагрузке включался резистор номиналом $R \sim 1 \text{ k}\Omega$ для обеспечения стабильного открывания тиристоров и шунтирования тока, утекающего на пушку через снабберные цепи при закрытом ключе. Цепей предварительного инициирования разряда не использовалось, пробой развивался непосредственно при подаче на пушку рабочего напряжения (1–7 kV). Для облегчения пробоя в поверхность полиэтилена между центральной жилой и оплеткой кабеля втиралась графитовая пыль, после чего производилась высоковольтная тренировка пушки при атмосферном давлении.

Экспериментальные исследования выполнялись на стенде „Крот“ [8], плазменные пушки вводились в цилиндрическую камеру диаметром 3.2 m по радиусу.

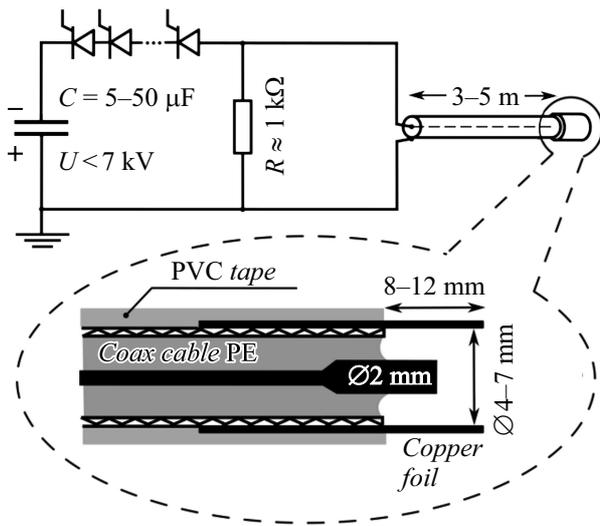


Рис. 1. Электрическая схема и конструкция рабочей части плазменной пушки.

Коаксиальные кабели прокладывались в металлической штанге и соединялись с источником питания внешней коаксиальной линией через вакуумно-плотный разъем. Эксперименты проводились как в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Торр, так и в фоновой плазме, замагниченной полем индукцией до 500 G. Столб фоновой плазмы длиной около 5 m и диаметром более 1 m создавался импульсным высокочастотным индукционным разрядом в аргоне или гелии при давлениях от $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ Торр. Концентрация фоновой плазмы достигала величин порядка $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, характерное время ее распада ($\sim 2.5 \text{ ms}$) значительно превышало длительность импульса тока пушки (20–70 μs). Измерения тока производились с помощью пояса Роговского, напряжение на пушке фиксировалось высоковольтным резистивным делителем. Параметры плазмы измерялись двойным электрическим зондом. Для регистрации импульсных возмущений магнитного поля, создаваемых инжектируемым облаком плазмы, использовался шестивитковый индуктивный зонд диаметром 20 mm в электростатическом экране. Фотосъемка плазменного облака осуществлялась быстрыми цифровыми камерами.

В предварительных экспериментах было установлено, что при включении пушки в фоновой плазме принципиальную роль играет выбор полярности ее питания, соответствующий отрицательному потенциалу центрального электрода. Внешний электрод находился под потенциалом стенки камеры, поэтому ток, собираемый центральным электродом из фоновой плазмы, в данном случае был ограничен ионным током насыщения. В результате возмущения фоновой плазмы не успевали развиваться прежде, чем происходил поверхностный пробой диэлектрика. Напротив, при положительном потенциале центрального электрода импульсный ток, собираемый из фоновой плазмы, значительно превышал электронный

ток насыщения [10], и на практике достигал нескольких сотен ампер. В этом случае подача высокого напряжения на пушку давала результат, противоположный ожидаемому: вместо генерации расширяющегося облака ионизированного вещества наблюдалась “эрозия” фоновой плазмы с образованием вытянутого вдоль магнитного поля канала с пониженной электронной концентрацией.

Результаты, полученные с пушкой из кабеля РК-75-4-11 (диаметр изолятора 4 mm), представлены на рис. 2. Такая пушка с ускоряющим напряжением до 3.5 kV применялась в экспериментах по моделированию разлета плазменного облака в космосе, результаты которых представлены в работе [8]. При использовании батареи с емкостью 50 μF длительность импульса тока по основанию составляла 70 μs , фронт нарастания тока по уровню (0.1–0.9) — 14 μs .

В каждом цикле работы пушки можно выделить три характерные стадии. На первой стадии происходил поверхностный пробой полиэтилена. Поскольку цепи инициирования пробоя не использовались, без фоновой плазмы между подачей импульсного напряжения и развитием разряда фиксировались задержки до 50 μs . Наличие фоновой плазмы облегчало пробой, и разрядный ток появлялся с задержкой, не превышавшей 2–3 μs (рис. 2, а). С точки зрения проводимых исследований параметры фоновой плазмы изменялись за это время незначительно, и запаздывание пробоя не создавало сложностей, если синхронизация импульсного эксперимента производилась по фронту тока пушки.

На второй стадии формировалось плазменное облако, параметры которого определялись индукцией внешнего магнитного поля, направлением инжекции и величиной напряжения. Сразу после поверхностного пробоя напряжение на плазменной перемычке падало до нескольких сотен вольт (рис. 2, а), после чего пушка функционировала в режиме „фонтанирования“, в котором через плазму в рабочем зазоре протекал установившийся ток силой до нескольких кА. Плазма ускорялась до скоростей $V = 10\text{--}30 \text{ km/s}$, типичных для эрозионных источников на полиэтилене [7]. В случае продольной инжекции длина веретенообразного плазменного облака достигала 30–50 cm, диаметр составлял от 5 до 20 cm. На расстоянии 30 cm от точки инжекции значения концентрации плазмы и температуры электронов составляли для этой пушки не менее $n_e = (1\text{--}3) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и $T_e \approx 4 \text{ eV}$ (рис. 2, b).

Энергосодержание плазменных облаков достаточно для генерации сильных магнитных возмущений. Глубина диамагнитной каверны вблизи пушки из кабеля РК-75-4-11 достигала 75% от величины невозмущенного поля; типичные значения лежали в диапазоне 20–50%. Необходимо отметить высокую стабильность параметров плазменного облака от одного „выстрела“ к другому. На рис. 2, с приводятся осциллограммы диамагнитных возмущений в фиксированной точке пространства, полученные в десяти последовательных „выстрелах“; разброс составлял менее 12% по уровню 3σ . Для постановки

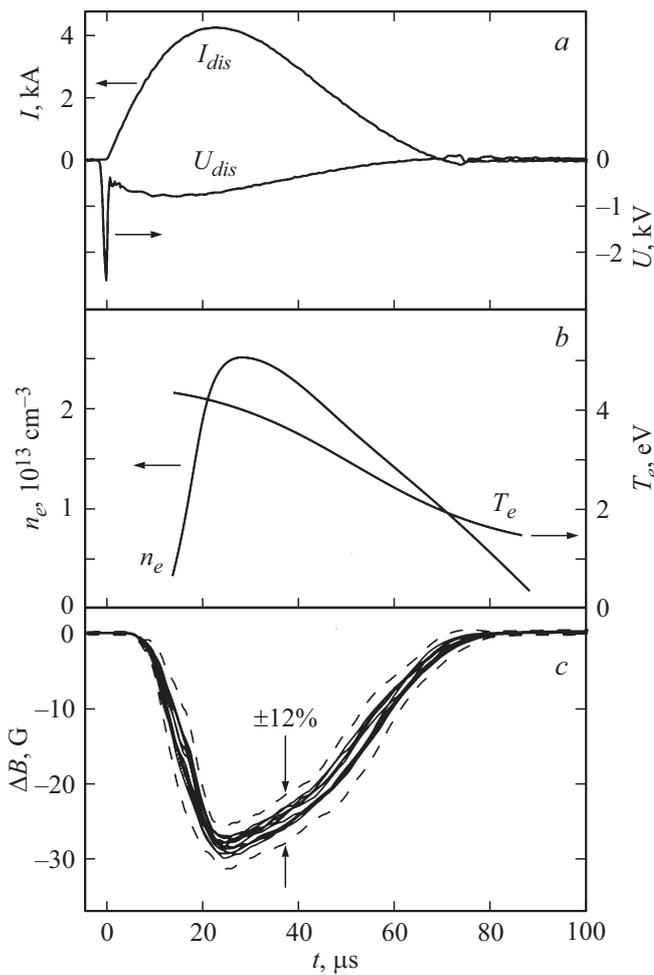


Рис. 2. Результаты для пушки из кабеля РК-75-4-11 при продольной инжекции в магнитное поле 180 G. *a* — осциллограммы тока и напряжения, *b* — концентрация плазмы и температура электронов на расстоянии 30 см от пушки, *c* — осциллограммы диамагнитных возмущений, создаваемых инжектируемой плазмой в десяти последовательных „выстрелах“ пушки.

модельных экспериментов, производимых посредством набора значительных массивов экспериментальных данных со сканированием по параметрам за большое число „выстрелов“ установки, такая воспроизводимость приемлема.

На третьей стадии, после окончания импульса тока, наблюдался разлет разогретых нейтральных продуктов эрозии изолятора и электродов. Длительность этого процесса достигала 500 μs. Нагретые до высокой температуры частицы испускали свет, что позволило определить их скорость по длине треков на кадрах съемки как 700–800 м/с. Полный ресурс пушек из тонкого кабеля РК-75-4-11 достигал 350–400 импульсов. По данным взвешивания средний выход полиэтилена за один „выстрел“ такой пушки в режиме длинного импульса (с батареей емкостью 50 μF) составлял около 150 μg.

Ресурс и эффективность работы пушки увеличиваются за счет уменьшения разогрева рабочей части, а именно за счет укорочения импульса тока и увеличения сечения диэлектрика. С пушкой, изготовленной из более толстого кабеля РК-50-7-12 (диаметр полиэтиленового изолятора 7 mm), уменьшение емкости конденсаторной батареи до 5 μF позволило сократить длительность импульса тока по основанию до 20 μs, а длительность фронта — до 5 μs. В экспериментах с такой пушкой, выполненных при ускоряющих напряжениях до 7 kV, было получено плотное плазменное облако (рис. 3, *a*), полностью вытесняющее внешнее магнитное поле индукцией до 200 G из области с характерной длиной не менее 10 см (рис. 3, *b*). Разлет нейтрального вещества после окончания импульса тока не фиксировался. За 1000 „выстрелов“ выработка полиэтилена была минимальной, следы эрозии на электродах практически отсутствовали.

В первых экспериментах с коммутатором, собранным из импульсных тиристоров ТИ143-320-50, был получен фронт тока 1.5 μs при длительности импульса по основанию 5 μs. Дальнейшее сокращение длительности им-

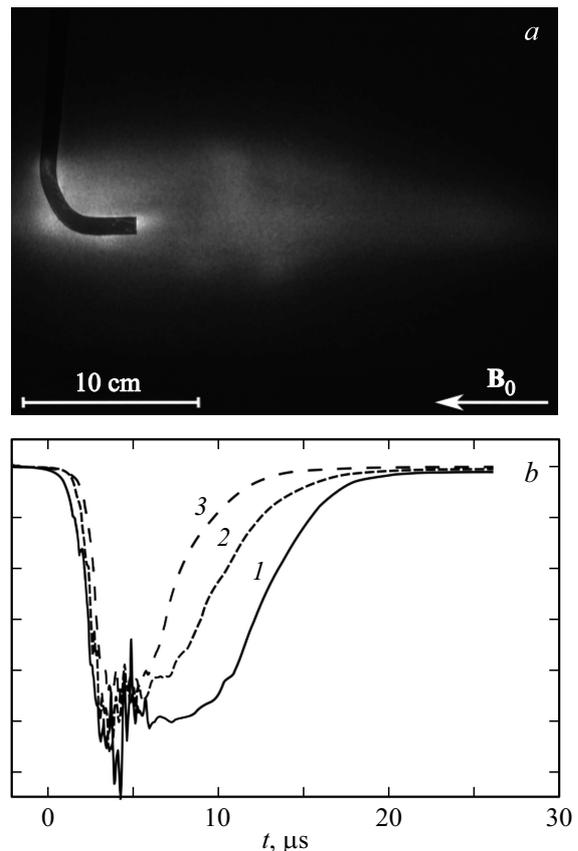


Рис. 3. Результаты для пушки из кабеля РК-50-7-12 при продольной инжекции. *a* — фотография плазменного облака с экспозицией 150 ns в поле 112 G, *b* — диамагнитные возмущения на расстоянии $z = 10$ см от пушки при ускоряющем напряжении 5 kV для магнитных полей 56 (1), 112 (2) и 225 G (3).

пульса тока в такой схеме едва ли возможно: пушки используются для инъекции плазмы в центральную часть камеры радиусом 1.6 м, и длина коаксиальной линии от коммутатора до рабочей части составляет не менее 3 м, что соответствует индуктивности, не меньшей $L \approx 1 \mu\text{H}$. Соответственно фронт нарастания тока через плазменную перемычку не может быть короче $\tau \approx L/R_{pl} \sim 1 \mu\text{s}$, где $R_{pl} \sim 1 \Omega$ — сопротивление плазменной перемычки на начальной стадии формирования облака.

Предложенный в работе вариант исполнения эрозионного источника плазмы кажется очевидным решением, однако ранее не был описан в литературе. Пушки из коаксиальных кабелей, позволяющие при умеренных напряжениях (менее 10 kV) получать облака плотной углеродно-водородной плазмы с высокой воспроизводимостью от одного „выстрела“ к другому, могут использоваться при лабораторном моделировании импульсных процессов в космосе, а также в перспективе в плазменных устройствах, таких как сильноточные коммутаторы [7].

Работа выполнена на УНУ „Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН“ в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2018-0021) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00850-а).

Список литературы

- [1] Marshall J. // Phys. Fluids. 1960. V. 3. N 1. P. 134–135. DOI: 10.1063/1.1705989
- [2] Блинов П.И., Черемных П.А. // ТВТ. 1967. Т. 5. № 2. С. 388–389.
- [3] De la Fuente H., Forsen H.K. // Rev. Sci. Instrum. 1971. V. 42. N 10. P. 1453–1455. DOI: 10.1063/1.1684905
- [4] Mendel C.W., Jr., Zagar D.M., Mills G.S., Humphries S., Jr., Goldstein S.A. // Rev. Sci. Instrum. 1980. V. 51. N 12. P. 1641–1644. DOI: 10.1063/1.1136139
- [5] Witherspoon F.D., Case A., Messer S.J., Bomgardner II R., Phillips M.W., Brockington S., Elton R. // Rev. Sci. Instrum. 2009. V. 80. N 8. P. 083506. DOI: 10.1063/1.3202136
- [6] Гаврилов Б.Г., Кожухов С.А., Собянин Д.Б. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 6. С. 46–49.
- [7] Жерлицын А.А., Ковальчук Б.М., Педин Н.Н. // ПТЭ. 2014. № 4. С. 83–88. DOI: 10.7868/S0032816214040120
- [8] Гуцин М.Е., Коробков С.В., Терехин В.А., Стриковский А.В., Гундорин В.И., Айдакина Н.А., Зудин И.Ю., Николенко А.С. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. В. 6. С. 416–421. DOI: 10.1134/S0370274X18180091
- [9] Bondarenko A.S., Schaeffer D.B., Everson E.T., Clark S.E., Lee B.R., Constantin C.G., Vincena S., Van Compernelle B., Tripathi S.K.P., Winske D., Niemann C. // Phys. Plasmas. 2017. V. 24. N 8. P. 082110. DOI: 10.1063/1.4995480
- [10] Urrutia J.M., Stenzel R.L. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. N 1. P. 36–52. DOI: 10.1063/1.872492