

Вынесенный поджиг разряда магнитоплазменного компрессора изолированной свечой в вакууме

© А.В. Павлов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Рассмотрены коаксиальные ускорительные системы, использующиеся для получения мощных излучающих потоков плазмы. Изучение этих разрядов проводится в газовых средах и вакууме. Поскольку в ускорителях эрозионного типа разрядный промежуток превышает необходимое расстояние для самостоятельного пробоя в вакууме при допустимых конструкцией перенапряжениях, для решения проблемы пробоя коаксиального разрядного промежутка в магнитоплазменном компрессоре в вакууме предложено использовать вынесенную за пределы разрядного канала изолированную от него «свечу зажигания», а также синхронизацию подачи основного разрядного напряжения по сигналу с пояса Роговского, установленного на свече. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность такой системы. Показано, что применение предложенной схемы позволяет существенно снизить напряжение пробоя в магнитоплазменном компрессоре.

Ключевые слова: *плазодинамический разряд, вакуум, магнитоплазменный компрессор, зажигание разряда, пробой*

Введение. Цель данного экспериментального исследования — адаптация поджига магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа, функционирующего в газовой среде, для работы в вакууме. Сильноточные плазодинамические разряды (разряды МПК эрозионного типа [1–3], коаксиальные сильноточные плазменные ускорители [4], плазмафокусные разряды [5]) давно нашли применение в технике и научных исследованиях. Это и вторичные стандарты яркости в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазоне спектра [6], и источники излучения для накачки эксимерных лазеров [7], и абляционные импульсные плазменные двигатели [8], и источники компрессионных плазменных потоков [9, 10], и др.

Аблирующий диэлектрик — рабочее тело для ускорителей эрозионного типа. Для обеспечения массового расхода нужна соответствующая площадь торца диэлектрической вставки, и, следовательно, большой зазор между электродами. Так, в исследованиях, изложенных в [11–13], используется коаксиальный магнитоплазменный компрессор торцевой геометрии (рис. 1, 2) с внешним электродом диаметром $D = 28$ мм, внутренним электродом — $d = 6$ мм и межэлектродным зазором $z = 11$ мм. Для разряда по поверхности в вакууме между тренированными электродами пробойное напряжение можно определить по справочным данным. Пробойному напряжению в вакууме для такой геометрии соответствует 40...60 кВ в зависимости от материала изолятора [14].

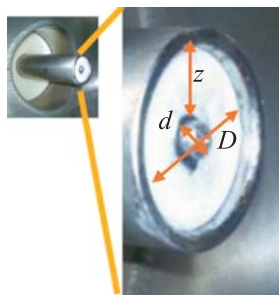


Рис. 1. Фотография магнито-плазменного компрессора в вакуумной камере

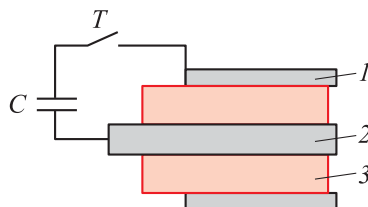


Рис. 2. Схема подключения МПК:

C — конденсатор емкостью 18 мкф и напряжением заряда 20 кВ; T — тиратрон; 1 — внешний электрод; 2 — внутренний электрод; 3 — изолятор

Таким образом, для перехода в установку, где разряд был реализован в газовой среде [11], к разряду в вакууме необходимо было либо повышать рабочее напряжение (что на имеющейся элементной базе невозможно), либо организовать систему поджига разряда (формирования затравочной плазмы в разрядном промежутке) без переделки основного разрядного контура.

Для этого были рассмотрены варианты поджига разряда в МПК (рис. 3). Первоначальный вариант МПК (рис. 3, а), используемый для работы в газах, не имел электрода поджига (ЭП). Пробой разрядного промежутка происходил при замыкании разрядной цепи за счет подачи на электроды напряжения выше пробойного. Как отмечено выше, при таком варианте для поджига разряда в вакууме требуется повысить разрядное напряжение до 40...60 кВ.

Варианты создания затравочной плазмы с помощью электрода поджига 1 изображены на рис. 3, б–г. Ввод ЭП через внешний 2 и внутренний 3 электроды показан на рис. 3, б; а ввод ЭП через изолятор — на рис. 3, в, г. «Дистанционный» поджиг разряда МПК изображен на рис. 3, д, на котором показан случай, когда затравочная плазма создается сторонним источником 4 (такая схема была описана в [15] — так называемые пушки Бостика пуговичного типа) и проиллюстрирован лазерный поджиг 5.

Схема поджига разряда сторонним источником имеет следующие преимущества: отсутствие встроенных в МПК дополнительных электродов и соответствующих им гальванически связанных цепей поджига. Это обеспечивает общую электросовместимость компонентов системы.

Следует отметить, что импульсный лазерный поджиг (см. рис. 3, д) представляется наиболее оптимальным для лабораторных условий, но его применение требует монтажа элементов оптической системы и разработки мер по предотвращению воздействия на них плазмы разряда, что в том числе затруднено и в космических приложениях.

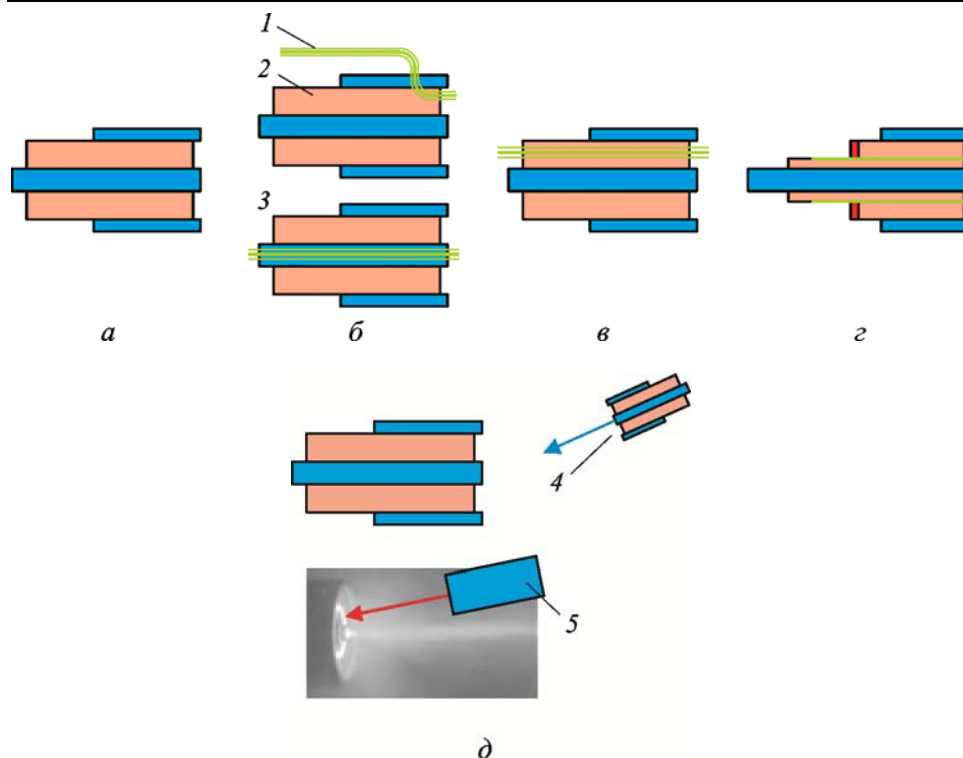


Рис. 3. Варианты модернизации магнитоплазменного компрессора для работы в вакууме:

а — без электрода поджига; *б* — ввод электрода поджига *1* через внешний *2* или внутренний *3* электрод и изолятор; *в* — ввод электрода поджига через изолятор; *г* — коаксиальный электрод поджига; *д* — дистанционный поджиг свечой *4* и лазером *5*

Выбор варианта для поджига и параметры установки. Из рассмотренных выше решений только вариант с поджигом свечой *4* (см. рис. 3, *д*) позволяет решить задачу поджига разряда без внесения изменений в основной газоразрядный канал. Кроме того, стояла задача реализации системы поджига с помощью, если возможно, доступных решений.

Для стабильного и надежного получения затравочной плазмы была использована система электрического поджига газовой плиты с выходными импульсами напряжения 5...10 кВ длительностью 10...20 мкс. Свечу с вольфрамовым катодом и изолятором из электрокорунда устанавливали на расстоянии 50 мм от среза МПК (рис. 4 *а, б*). Для работы в вакууме изолятор свечи был помещен в медный стакан — внешний электрод (рис. 4, *в*) с завальцовкой на торец, что требуется для обеспечения зазора размером около 0,5 мм с центральным электродом свечи, достаточного для пробоя по поверхности в вакууме.

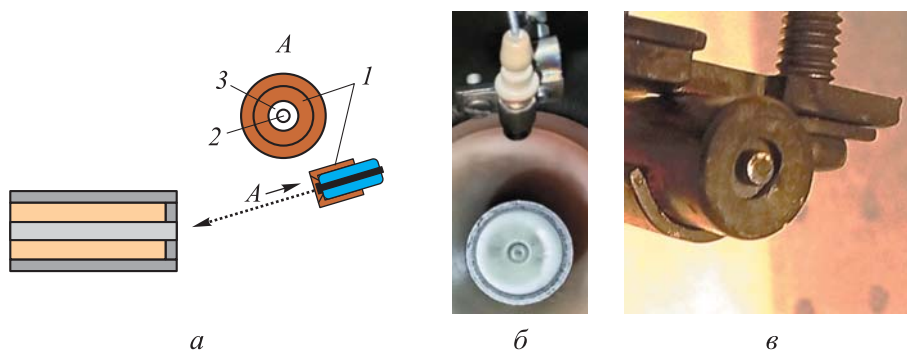


Рис. 4. Система дистанционного поджига магнитоплазменного компрессора: *а* — схема взаимного расположения свечи и МПК; *б* — свеча вне области воздействия основного потока плазмы разряда МПК; *в* — свеча поджига

Схема установки для исследования вынесенного поджига разряда МПК изолированной свечой в вакууме представлен на рис. 5. Она включает в себя установку свечи в вакуумной камере и настройку системы синхронизации и контроля. Для контроля момента разряда свечи был использован датчик тока А110 Pearson ($K = 0,1 \text{ A/V}$), инструментальный усилитель (Elecdemo AD623) для согласования уровней сигнала с синхровходом генератора импульсов (RIGOL DG4162) и осциллограф (Tektronix 2024B) для более тонкой настройки оптической диагностики. Генератор импульсов позволяет точно настроить момент включения тиратрона ТДИ1-200к/25П (ООО «Импульсные технологии») МПК относительно возникновения тока свечи. Датчик тока, установленный на проводе к внешнему электроду свечи, обеспечивал гальваническую развязку при измерении тока свечи.

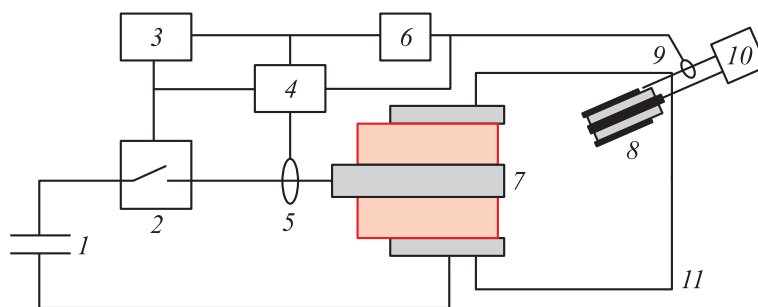


Рис. 5. Схема модернизации установки:

1 — основной конденсатор; *2* — тиратрон; *3* — генератор импульсов; *4* — осциллограф; *5* — датчик тока разряда МПК; *6* — инструментальный усилитель; *7* — МПК; *8* — свеча поджига; *9* — датчик тока свечи; *10* — блок поджига свечи; *11* — вакуумная камера

Эксперименты по поджигу в различных условиях. Настройка вынесенного поджига МПК происходила в следующей последовательности. Первоначально, при заряде конденсатора до напряжения

10, 15 и 20 кВ и остаточном давлении в вакуумной камере, равном 0,01 Па, выяснилось, что пробоя без внешнего поджига при срабатывании тиратрона не происходит (рис. 6, а).

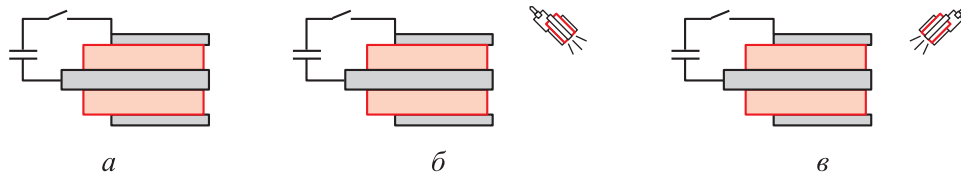


Рис. 6. Исследуемые схемы дистанционного поджига:

а — попытка получения разряда без свечи; б — свеча повернута от МПК; в — свеча повернута к МПК

Далее, при повернутой к наблюдателю свече (рис. 6, б) подбирался зазор между ее электродами, обеспечивающий визуально стабильный разряд при остаточном давлении 1,8 мТорр. Неполное заполнение свечи разрядом (наблюдались отдельные пробои со случайной привязкой к центральному электроду) указывало на то, что время ввода энергии при разряде было гораздо меньше времени разряда, и при неполном заполнении площади диэлектрика получается аналог пушки Бостика с некоаксиальными электродами [15].

Третьим этапом была проверка пробоя МПК с поджигом от свечи в вакууме (рис. 6, в). При этом реализовалось четыре сценария с разной комбинацией включения тиратрона и свечи поджига.

1. При рассогласованной фазе одиночного включения тиратрона во время работы свечи поджига с частотой около 10 Гц либо пробоя не происходило, либо разряд МПК возникал в случайные моменты времени (напряжение заряда основного конденсатора U_c задавалось равным 10, 15, 20 кВ) и при этом на осциллограмме отмечалось совпадение начала тока МПК и начало тока свечи (рис. 7, а).

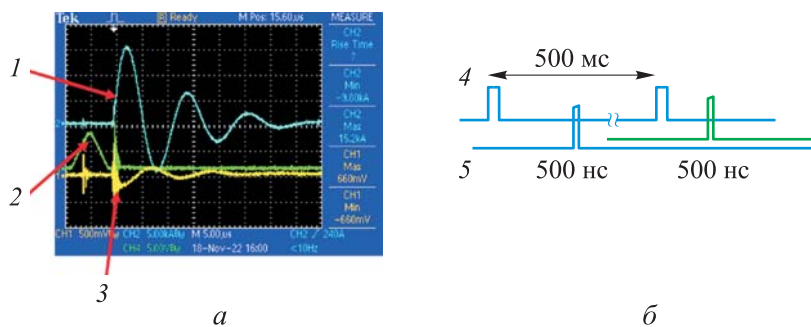


Рис. 7. Синхронизация запусков поджига и разряда магнитоплазменного компрессора: а — осциллограмма при случайном инициировании разряда МПК вынесенным поджигом (1 — ток разряда МПК; 2 — сигнал с датчика тока через усилитель 322 мВ и примерно 4,1 мВ напрямую; 3 — ток разряда свечи); б — синхрограмма (4 — импульсы поджига свечи; 5 — импульсы команды на запуск тиратрона)

2. При одновременной подаче синхроимпульса на поджиг свечи и запуск тиратрона джиттер срабатывания свечи составлял 100...500 мс при времени коммутации тиратрона с джиттером около 500 нс (рис. 7, б). Следовательно, пробой возникал случайно, если тиратрон включался во время разряда свечи и в промежутке времени до 500 мс при достаточно большом числе разрядов поджига.

3. Из п. 2 следует, что требуется синхронизация сигнала на запуск тиратрона с моментом срабатывания свечи поджига в диапазоне десятков микросекунд. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 5, момент срабатывания свечи поджига регистрировался как по появлению тока в ее разрядной цепи, так и монитором тока (около 20 мВ). Затем этот сигнал усиливался инструментальным усилителем до значения, достаточного для срабатывания синхровхода генератора (1...5 В) и синхронизации как запуска основного разряда МПК, так и компонентов диагностики разряда (рис. 8). Сигнал монитора тока обрабатывался ВЧ-фильтром (Thorlabs) для предотвращения нежелательных ВЧ-помех, возникающих при высоковольтном (20...40 кВ) пробое свечи в вакууме. В результате момент поджига тиратрона приходился на время разряда свечи, и поджиг инициировался.

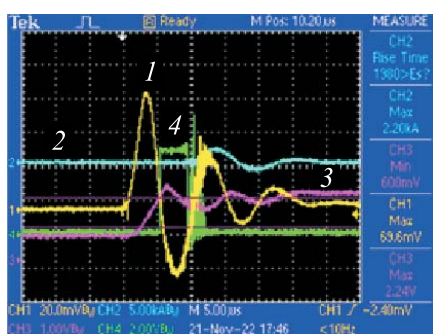


Рис. 8. Осциллограмма сигналов при синхронизации поджига и включения тиратрона:

1 — сигнал с монитора тока свечи; 2 — сигнал с монитора тока магнитоплазменного компрессора; 3 — усиленный сигнал поджига; 4 — импульс запуска тиратрона

4. После настройки системы синхронизации срабатывания свечи и запуска тиратрона был исследован поджиг МПК при разных напряжениях. В предложенной схеме зажигание МПК разряда стабильно происходило при напряжении на емкостном накопителе вплоть до значения 2,5 кВ (рис. 9). Во всех вариантах момент времени разряда свечи совпадает с началом основного разряда МПК.

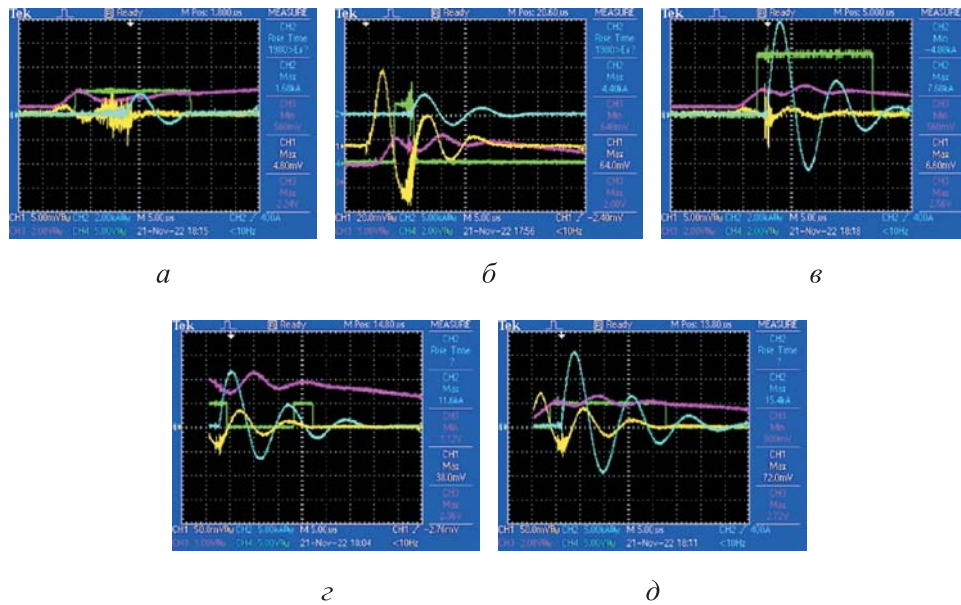


Рис. 9. Осциллограммы синхронизированных сигналов мониторов тока магнитоплазменного компрессора и тока свечи поджига при различных напряжениях заряда основного конденсатора U_c , равного 2,5 кВ (а), 5 кВ МПК (б), 10 кВ (в), 15 кВ (г), 20 кВ (д)

Закключение. В результате работы проведена модернизация установки МПК для работы в вакууме и показано, что вынесенная свеча зажигания МПК-разряда при синхронизации ее разряда с моментом поджига тиратрона позволяет снизить пробойное напряжение МПК до 2,5 кВ и обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционными системами поджига:

- благодаря инициации основного разряда МПК малым количеством затравочной плазмы, появляющимся при разряде напряжением 5...10 кВ в разрядном промежутке около 1 мм по поверхности диэлектрика, можно минимально влиять на МПК при его характеристике, благодаря чему удастся оптимизировать конструкцию, особенно малых размеров (АИПУ, лабораторные источники излучения) и при малых зарядных напряжениях;
- не требуется встроенных в МПК дополнительных электродов и соответствующих цепей поджига;
- не происходит взаимовлияния цепей поджига и основных разрядных цепей МПК (электросовместимость, гальваническая развязка);
- применяются стандартные компоненты в системе поджига;
- обеспечивается тонкая регулировка моментов разряда МПК и поджига;
- возможен прецизионный поджиг.

Синхронизация вакуумных разрядов по току поджига повышает эксплуатационные характеристики установок с вакуумными разрядами, увеличивает межсервисный интервал, дает возможность упростить конструкцию, что позволяет рекомендовать эту систему и для лабораторных установок, и для бортовых двигательных систем.

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSN-2024-0007.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Протасов Ю.С., ред. *Радиационная плазмотермодинамика. Т. 1. Мат. I Всесоюз. симп. по радиационной плазмотермодинамике АН СССР.* Москва, Энергоатомиздат, 1991, 572 с.
- [2] Протасов Ю.С. Плазменные источники излучения высокой спектральной яркости. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 4: Вводный том.* Фортов В.Е., ред. Москва, Наука, 2000, с. 232–262.
- [3] Kozlov N.P., Protasov Yu.S. On the mechanism of plasma focus formation in an ablation type magnetoplasma compressor. *Phys. Lett.*, 1978, A. 67, pp. 191–193.
- [4] Морозов А.И. Квазистационарный плазменный ускоритель с ионным токопереносом (КСПУ). *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 3. Вводный том.* Фортов В.Е., ред. Москва, Наука, 2000, с. 482–489.
- [5] Грибков В.А. и др. Установка «Вихрь» типа «Плазменный фокус» для диагностики радиационно-термической стойкости материалов, перспективных для термоядерной энергетики и аэрокосмической техники. *Приборы и техника эксперимента*, 2020, № 1, с. 75–83.
- [6] Anevsky S.I., Vernyi A.E., Kozlov N.P., Konev Lv., Malaschenko V.A., Morozov O.Yu., Tsygankov P.A. Use of synchrotron radiation for calibration of a working measuring instrument based on plasma focus. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1989, A. 282, pp. 714–715.
- [7] Камруков А.С., Козлов Н.П., Опекан А.Г., Протасов Ю.С., Рудой И.Г., Сорока А.М. Рекомбинационный лазер на атомарном ксеноне с возбуждением тепловым ионизирующим излучением МПК-разряда. *Квантовая электроника*, 1989, т. 16, № 7, с. 1333–1345.
- [8] Popov G.A., Antropov N.N. Ablative PPT. New quality, new perspectives. *Acta Astronautica*, 2006, vol. 59, p. 175.
- [9] Astashynski V.M., Dzahnidze H.M., Kostyukevich E., Kuzmitski A., Shorinov P.N., Shymanski V.I., Uglov V.V. Generation of erosion compression plasma flows in a miniature plasma accelerator and their capability for formation of thin nanostructured coating. *High Temperature Material Processes*, 2020, vol. 24 (2), pp. 99–107.
- [10] Сивков А.А., Вымпина Ю.Н., Рахматуллин И.А., Ивашутенко А.С., Шаненкова Ю.Л., Шаненков И.И., Никитин Д.С. Синтез диоксида титана плазмотермодинамическим методом с возможностью регулирования гранулометрического состава. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2022, № 1, с. 51–57.
- [11] Pavlov A., Shchepanyuk T., Skriabin A., Telekh V. Gas dynamics processes above the polymers surface under irradiation with broadband high-brightness ra-

- diation in the vacuum ultraviolet spectrum region. *Polymers*, 2022, vol. 14, p. 3940.
- [12] Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D., Shchepanuk T.S. Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 111–125. DOI: 10.26583/sv.11.3.10
- [13] Protasov Y.Y., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. Features of surface ablation under exposure to high-brightness VUV radiation from pulsed high-current discharges. *High Energy Chemistry*, 2023, vol. 57, Suppl. 1. DOI: 10.1134/S0018143923070317
- [14] Авдиенко А.А., Лысенко А.П. Поверхностный пробой изоляторов в вакууме на наносекундных импульсах. ИЯФ СО АН СССР. *Препринт № 81–70*. Новосибирск, ИЯФ, 1970, 24 с.
- [15] Bostick W.H. Experimental study of ionized matter projected across a magnetic field. *Phys. Rev.*, 1956, vol. 104, pp. 292–299.

Статья поступила в редакцию 14.10.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Павлов А.В. Вынесенный поджиг разряда магнитоплазменного компрессора изолированной свечой в вакууме. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 12. EDN APOIBM

Павлов Алексей Вячеславович — ведущий инженер учебно-научного центра «Фотонная энергетика» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 40 работ в области расчетно-теоретических исследований термодинамических, оптических и транспортных характеристик низкотемпературной плазмы сложного химического состава.
e-mail: alekseipavlov@bmstu.ru

Remote ignition of the magnetoplasma compressor discharge by the insulated spark plug in vacuum

© A.V. Pavlov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Coaxial accelerator systems are used to obtain the powerful radiating plasma flows. These discharges are being studied in the gaseous media and vacuum. Discharge gap in the erosion-type accelerators exceeds the distance required for independent breakdown in vacuum at the designed permissible overvoltage. To solve the problem of the coaxial discharge gap breakdown in the magnetoplasma compressor in vacuum, the paper proposes to introduce a “spark plug” positioned outside the discharge channel and isolated from it, and to synchronize the main discharge voltage supply using a signal from the Rogowski coil installed on the spark plug. The paper presents results of experimental research confirming operability of such a system. It shows that introduction of the proposed scheme makes it possible to reduce the breakdown voltage in a magnetoplasma compressor approximately from 40 kV to 2.5 kV.

Keywords: vacuum plasmodynamic discharge, magnetoplasma compressor, discharge ignition, breakdown

Support. The work was carried out on the unique scientific facility (USF) “Puchok-M” of the Bauman Moscow State Technical University and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Assignment FSFN-2024-0007.

REFERENCES

- [1] Protasov Yu.S. *Radiatsionnaya plazmodinamika. T. 1. Mat. I Vsesoyuz. simp. po radiatsionnoy plazmodinamike AN SSSR* [Radiation plasmodynamics. Vol. 1. Mat. 1st All-Union symposium on radiation plasmodynamics USSR AS]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 572 p.
- [2] Protasov Yu.S. Plazmennye istochniki izlucheniya vysokoy spektralnoy yarkosti [Plasma sources of radiation of the high spectral brightness]. *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. T. 4: Vodnyi tom* [Encyclopedia of the Low-Temperature Plasma. Vol. 4: Introductory volume]. Fortov V.E., ed. Moscow, Nauka Publ., 2000, pp. 232–262.
- [3] Kozlov N.P., Protasov Yu.S. On the mechanism of plasma focus formation in an ablation type magnetoplasma compressor. *Phys. Lett.*, 1978, A. 67, pp. 191–193.
- [4] Morozov A.I. Kvazistatsionarnyi plazmenniy uskoritel s ionnym tokoperenosom (KSPU) [Quasistationary plasma accelerator with the ion current transfer (KSPU)]. *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. T. 3: Vodnyi tom* [Encyclopedia of the Low-Temperature Plasma. Vol. 3: Introductory volume]. Fortov V.E., ed. Moscow, Nauka Publ., 2000, pp. 482–489.
- [5] Gribkov V.A. et al. Ustanovka “Vikhr” tipa “Plazmenniy focus” dlya diagnostiki radiatsionno-termicheskoy stoykosti materialov, perspektivnykh dlya termoyadernoy energetiki i aerokosmicheskoy tekhniki [The Vikhr Plasma Focus device for diagnosing the radiation-thermal resistance of materials intended for thermonuclear energy and aerospace engineering]. *Pribory i tekhnika eksperimenta — Instruments and Experimental Techniques*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 75–83.

- [6] Anevsky S.I., Vernyi A.E., Kozlov N.P., Konev Lv., Malaschenko V.A., Morozov O.Yu., Tsygankov P.A. Use of synchrotron radiation for calibration of a working measuring instrument based on plasma focus. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1989, A. 282, pp. 714–715.
- [7] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Opekan A.G., Protasov Yu.S., Rudoy I.G., Soroka A.M. Rekombinatsionnyi lazer na atomarnom ksenone s vzbuzhdeniem teplovym ioniziruyushchem izlucheniem MPK-razryada [Recombination laser on the atomic Xenon with excitation by thermal ionizing radiation of the MPC discharge]. *Kvantovaya elektronika — Quantum Electronics*, 1989, no. 7, pp. 1333–1345.
- [8] Popov G.A., Antropov N.N. Ablative PPT. New quality, new perspectives. *Acta Astronautica*, 2006, vol. 59, p. 175.
- [9] Astashynski V.M., Dzhnidze H.M., Kostyukevich E., Kuzmitski A., Shorinov P.N., Shymanski V.I., Uglov V.V. Generation of erosion compression plasma flows in a miniature plasma accelerator and their capability for formation of thin nanostructured coating. *High Temperature Material Processes*, 2020, vol. 24 (2), pp. 99–107.
- [10] Sivkov A.A., Vympina Yu.N., Rakhmatullin I.A., Ivashutenko A.S., Shanenkova Yu.L., Shanenkov I.I., Nikitin D.S. Sintez dioksida titana plazmodinamicheskim metodom s vozmozhnostyuy regulirovaniya granulometricheskogo sostava [Synthesis of the titanium dioxide by a plasmodynamic method with the possibility of regulating the granulometric composition]. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya — Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2022, no. 1, pp. 51–57.
- [11] Pavlov A., Shchepanyuk T., Skriabin, A., Telekh V. Gas dynamics processes above the polymers surface under irradiation with broadband high-brightness radiation in the vacuum ultraviolet spectrum region. *Polymers*, 2022, vol. 14, p. 3940.
- [12] Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D., Shchepanuk T.S. Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 111–125. <https://doi.org/10.26583/sv.11.3.10>
- [13] Protasov Y.Y., Shchepanyuk T.S., Skriabin A.S., Telekh V.D. Features of surface ablation under exposure to high-brightness VUV radiation from pulsed high-current discharges. *High Energy Chemistry*, 2023, vol. 57, suppl. 1. <https://doi.org/10.1134/S0018143923070317>
- [14] Avdienko A.A., Lysenko A.P. Poverkhnostnyi probay izolytorov v vakuume na nanosekundnykh impulsakh [Surface insulator breakdown in vacuum on the nanosecond pulses]. *IYaF SO AN SSSR. Preprint no. 81–70*. Novosibirsk, IYaF Publ., 1970, p. 24.
- [15] Bostick W.H. Experimental Study of Ionized Matter Projected across a Magnetic Field. *Phys. Rev.*, 1956, vol. 104, pp. 292–299.

Pavlov A.V., Leading Engineer, Photon Energy Educational and Scientific Center, Bauman Moscow State Technical University; author of 40 papers in computational and theoretical studies of the thermodynamic, optical and transport characteristics of low-temperature plasma of the complex chemical composition.
e-mail: alekseipavlov@bmstu.ru