

Научная статья

УДК 537.523.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14406>

РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Е. Г. Феклистов ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ efrem.feklistov@mail.ru

Аннотация. Предлагается разработанный источник холодной плазмы, принцип работы которого основан на использовании импульсного положительного коронного разряда атмосферного давления. Устройство обладает компактностью и автономностью, вес ручного плазменного источника составляет 80 г при массе выносного блока питания, не превышающей 100 г. Исследованы электрические характеристики электродных систем, предназначенных для прямой и косвенной обработки биомедицинских объектов холодной плазмой. Показано, что в исследуемых электродных промежутках разряд существует в стримерной форме, характеризующейся наносекундными периодическими импульсами тока в диапазоне 10 – 80 мА при напряжениях до 10 кВ. Установлено, что для электродной системы с косвенной генерацией холодной плазмы диапазон напряжений, соответствующий стабильному горению разряда, шире, чем для системы с прямой генерацией.

Ключевые слова: источник холодной плазмы, коронный разряд, стримерный разряд, электродные системы, биомедицина

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90161.

Для цитирования: Феклистов Е. Г. Разработка портативного источника холодной плазмы для биомедицинских приложений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 4. С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14406>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14406>

DEVELOPMENT OF THE PORTABLE COLD PLASMA SOURCE FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

E. G. Feklistov ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ efrem.feklistov@mail.ru

Abstract: A cold plasma source (CPS) developed by us has been put forward. The operating principle of the device is based on the use of a pulsed positive corona discharge at atmospheric pressure. The CPS exhibits compactness and autonomy. Particularly, the weight of the hand-held plasma source is 80 g with the mass of the portable battery pack not exceeding 100 g.

The electrical characteristics of electrode systems designed for direct and indirect treatment of biomedical objects with cold plasma were investigated. It was shown that in the studied electrode gaps the discharge exists in a streamer mode characterized by repetitive nanosecond current pulses in the range of 10 – 80 mA at operating voltages up to 10 kV. It was found that for the electrode system developed for indirect generation of cold plasma, the voltage range corresponding to stable discharge is wider than that for the system designed for the direct one.

Keywords: cold plasma source, corona discharge, streamer discharge, electrode systems, biomedicine

Funding: the work was done with financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of a science project, grant No. 20-38-90161.

For citation: Feklistov E. G., Development of the portable cold plasma source for biomedical applications, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (4) (2021) 84–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

На сегодняшний день физика газового разряда является динамически развивающимся разделом науки и техники. Небывалый интерес к данной области в последние десятилетия обусловлен появлением новых направлений, связанных с применением газового разряда в плазменной медицине [1]. Газовый разряд в данном случае служит источником холодной плазмы, температура ионов и нейтральных частиц которой не превышает нескольких десятков градусов Цельсия [2]. К основным факторам воздействия холодной плазмы принято относить ультрафиолетовое излучение, электрическое поле, действие химически активных соединений, а также электрический ток [3]. Фактически динамика развития газоразрядных процессов приводит к образованию радикалов, возбужденных частиц и ионов, которые создаются, в первую очередь, электронно-молекулярными, а также ионно-молекулярными столкновениями. Указанные частицы генерируются в течение первых сотен наносекунд, что соответствует времени, необходимому для развития стримерного разряда [4].

Среди наиболее специфичных химических соединений, обуславливающих биологическое действие, можно выделить следующие: супероксидный радикал кислорода $\cdot\text{O}_2^-$, озон O_3 , гидроксильный радикал $\cdot\text{OH}$, перекись водорода H_2O_2 , пероксильный радикал $\text{HO}_2\cdot$, монооксид азота NO и пероксоазотную кислоту HNO_4 [5].

Неравновесность холодной плазмы, сочетающая высокий уровень энергии электронов и высокую концентрацию активных соединений при низкой температуре газа, позволяет применять ее в биологии и медицине. К актуальным приложениям холодной плазмы можно отнести стерилизацию поверхностей, инактивацию патогенных микроорганизмов, обеззараживание газовых и жидких сред, обработку продуктов питания, клеточную стимуляцию и заживление ран [6].

Таким образом, разработка и создание электрофизических устройств генерации холодной плазмы, или источников холодной плазмы, представляет собой актуальную задачу, решение которой обеспечит научно-технологический задел в сфере инженерных наук и биомедицины.

В качестве источников холодной плазмы могут выступать тлеющие, барьерные, коронные и высокочастотные разряды [1, 2]. В настоящем проекте принцип генерации холодной плазмы основан на использовании коронного разряда (КР) атмосферного давления. Коронная форма газового разряда выбрана не случайно, поскольку обеспечивает генерацию химически активных соединений, а также их перенос на обрабатываемый объект за счет электрогидродинамических течений [7]. Также использование этой формы разряда позволяет снизить риск поражения электрическим током, по сравнению, например, с барьерным разрядом. В КР межэлектродное пространство можно разделить

на две зоны: ионизации (чехол короны) и дрейфа [8]. Первая простирается на очень короткое расстояние от коронирующего электрода и характеризуется высокой напряженностью электрического поля. Вторая, зона дрейфа, составляет остальную часть межэлектродного пространства.

Хорошо известно, что КР – это крайне нежелательный эффект в электроэнергетике из-за возникающих в связи с ним потерь мощности и радиочастотных помех. В то же время КР широко применяют при обработке поверхностей материалов [9], в электростатических фильтрах и производстве озона [10]. Вместе с тем КР сравнительно недавно начали использовать в биомедицинских приложениях в связи с выявленным бактерицидным эффектом [11, 12]. Известно, что полярность коронирующего электрода оказывает сильное влияние на газоразрядные процессы. Так например, отрицательный КР характеризуется импульсами Тричела с амплитудами порядка 2 – 10 мА и частотами около 10^5 Гц [8, 13]. Положительный КР при увеличении напряжения последовательно переходит из диффузной формы в стримерную, а затем и в искру. В случае отрицательного КР озон доминирует среди активных форм кислорода [14], а супероксидные анионы O_2^- становятся основными носителями заряда, достигающими анода. Положительные КР обычно генерируют меньше озона в воздухе, по сравнению с отрицательными, при том же уровне напряжения. Также известно, что в случае генерации КР в замкнутом пространстве накопленные химические соединения влияют на электрические характеристики разряда [15]. Различают две основные системы КР, которые обычно используют в биологических экспериментах: прямая и косвенная схемы генерации плазмы. В прямой схеме биологические образцы располагаются между коронирующим и заземленным электродами; в косвенной же схеме образец может располагаться за заземленным электродом, который в данном случае выполняют в виде сетки. Косвенная обработка обладает тем преимуществом перед прямой, что при минимальном уровне разрядного тока образцы подвергаются сильному воздействию химически активных соединений, генерируемых КР.

Целью настоящего исследования являлась разработка источника холодной плазмы, использующего положительный коронный разряд атмосферного давления.

Задача данной работы заключается в исследовании разрядных характеристик различных электродных систем источника холодной плазмы атмосферного давления для биомедицинских приложений.

Методы экспериментального исследования

В настоящей работе исследовались газоразрядные характеристики для прямой и косвенной схем генерации холодной плазмы. В качестве коронирующего электрода использовали иглы из нержавеющей стали с радиусом закругления примерно 40 мкм. Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. На иглу через токоограничивающее сопротивление $R_{lim} = 10 - 30$ МОм подавался высокий положительный потенциал от источника постоянного напряжения MANTIGORA HT 20000 P. Для схемы прямой генерации плазмы в качестве катода использовался плоский дисковый катод (рис. 1, *a*). В наших экспериментах схема косвенной генерации КР отличается от той, что описана во введении: катод выполнен в виде цилиндрического электрода (рис. 1, *b*). В данной системе высокий потенциал отделялся от нулевого с помощью цилиндрической втулки из политетрафторэтилена. Для регистрации быстроизменяющихся характеристик разряда применялся двухканальный осциллограф LeCroy WaveJet 2Gs/s. Измерение разрядного тока производилось посредством малоиндуктивного резистора R_{sh} с сопротивлением 43 Ом, в то время как напряжение на газоразрядном промежутке измерялось с помощью высоковольтного емкостного делителя (коэффициент деления 1:1000). Емкость верхнего плеча C_1 составляла примерно 0,1 пФ, что позволяло снизить влияние измерительной цепи на газоразрядный процесс.

Схемы генерации коронного разряда

Электрическая схема проектируемого источника холодной плазмы должна обеспечить устойчивую работу генератора как для прямой, так и для косвенной генерации КР. Схеме на рис. 1, *a* соответствует режим прямой генерации холодной плазмы, поскольку

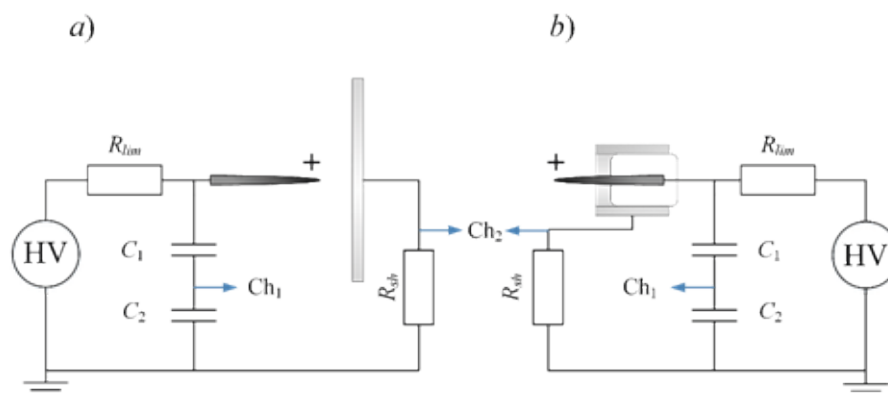
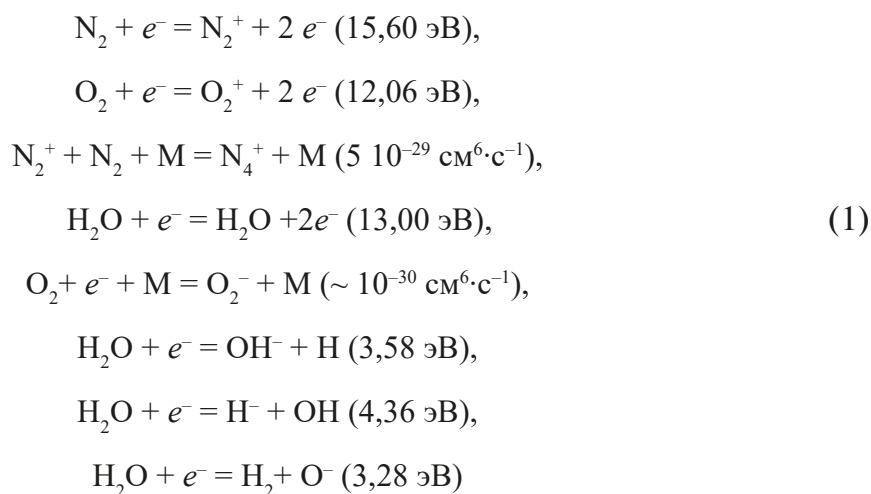


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для прямой (a) и косвенной (b) генераций КР: Ch₁, Ch₂ – каналы цифрового осциллографа для регистрации напряжения и тока, соответственно; HV – источники высокого напряжения; C₁, C₂ – емкости делителей напряжения; R_{lim} – токоограничивающие сопротивления; R_{sh} – измерительные шунты

в данном случае обрабатываемый объект гальванически (напрямую) связан с электродной системой генератора через заземляющий электрод. Очевидно, что в таком случае большая часть линий тока замыкается на обрабатываемый объект. Для случая косвенной генерации КР (рис. 1, b) большая часть линий тока замыкается на электрод с нулевым потенциалом, при этом обрабатываемый объект гальванически развязан с электродной системой генератора. У обеих схем есть свои преимущества и недостатки. Прямая генерация плазмы позволяет обрабатывать поверхность не только с помощью ионов и активных химических соединений, но и через непосредственное воздействие стримеров разряда, что бывает полезно для стерилизации поверхностей. Однако такое воздействие может быть губительным для клеточных культур и некоторых видов тканей (например, эпителий слизистых оболочек). Косвенная генерация плазмы позволяет минимизировать действие разрядного тока. Несмотря на то, что большая часть линий тока не замыкается на обрабатываемый объект, активные химические соединения и ионы выносятся на его поверхность за счет ионного ветра.

Результаты и их обсуждение

Параметры холодной плазмы. В исследуемых системах генерации холодной плазмы коронный разряд существует в стримерной форме. Концентрация электронов и ионов достигает значений порядка $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ у кончика коронирующей иглы и в головке стримера [16]. При этом степень ионизации составляет примерно $10^{-6} - 10^{-5}$. В состав плазмы положительного КР преимущественно входят ионы N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , H_2O^+ , O_2^- , OH^- , H^- , которые образуются в ходе следующих реакций [17, 18]:



(в скобках указаны значения энергии ионизации (эВ) либо константы скорости реакции ($\text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$)).

Стоит отметить, что концентрация отрицательных ионов и ионов H_2O^+ будет сильно зависеть от давления водяного пара в воздухе [8].

Помимо ионизированных соединений, в составе генерируемой плазмы присутствуют возбужденные частицы. Наши исследования показали, что в диапазоне длин волн 300 – 400 нм отчетливо детектируются полосы второй положительной системы азота с доминирующим максимумом на длине волны 337,1 нм. Даная система связана с колебательными уровнями молекулы азота [19]. Усредненная по времени проводимость газоразрядного промежутка составляет порядка 0,001 – 0,1 См/м.

Импульсы токов и напряжений КР. При больших значениях произведения pd (p – давление, d – расстояние между электродами) и потенциалах, превышающих напряжение начала КР, положительный коронный разряд существует в стримерной форме. В этом случае стример начинается вблизи точки, соответствующей области более высокого электрического поля, способствующего интенсивному размножению электронов. Несмотря на то, что к газоразрядному промежутку через ограничительное сопротивление приложено постоянное напряжение, потенциал на игле имеет импульсно-периодический характер (рис. 2).

Напряжение на воздушном промежутке в микросекундном масштабе времени периодически изменяется между величиной зажигания и погасания разряда по закону

$$u(t) = U_0 + (U_{ex} - U_0) \exp(-t / \tau), \quad (2)$$

при этом в конце периода зарядки воздушного промежутка напряжение

$$u(T) = U_{ig}, \quad (3)$$

где U_{ig} , U_{ex} , В, – уровни зажигания и погасания, соответственно; U_0 , В, – напряжение источника; t , с, – время; T , с, – период следования импульсов; τ , с, – постоянная времени процесса зарядки, величина определяется суммарной емкостью разрядной системы и величиной ограничивающего сопротивления.

Исследованный режим горения разряда можно охарактеризовать двумя масштабами времени: нано- и микросекундным. Малому масштабу соответствует развитие стример-

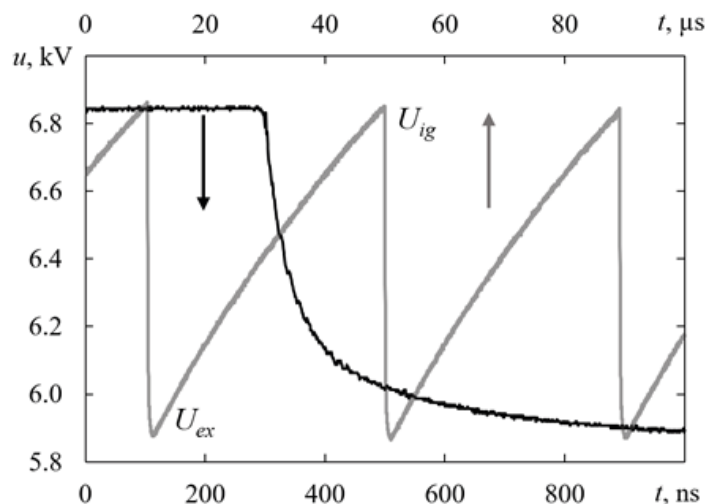


Рис. 2. Осциллограммы потенциала на игле.

На импульсах напряжения показаны потенциалы зажигания U_{ig} и погасания U_{ex} ; стрелки указывают на отсчеты по временным шкалам

ных процессов, а большому – процессы релаксации объемного заряда и восстановление напряжения до уровня зажигания U_{ig} . Частота следования импульсов определяется потенциалом источника, эквивалентной емкостью и параметрами межэлектродного промежутка. Кроме этого, указанные выше процессы имеют стохастический характер развития, что обуславливает некоторый разброс частоты.

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов тока и напряжения в наносекундном масштабе времени для системы игла-плоскость. Видно, что при увеличении газоразрядного промежутка амплитуда импульсов тока падает. При этом перепад между напряжением зажигания U_{ig} и погасания U_{ex} растет. Переднему фронту импульсов тока соответствуют стадии формирования и распространения катодонаправленного стримера (10 – 30 нс). Резкое увеличение тока короны до первого пика соответствует касанию головки стримера катода. После прихода стримера на катод от анода развивается вторичный стример, что может выражаться вторым пиком импульса в осциллограммах тока ($d = 8$ и 10 мм). Затем наблюдается релаксация разрядного тока в течение интервала времени около 300 нс. После этого процесс возобновляется, как только напряжение на воздушном промежутке достигает уровня зажигания. Для системы игла-цилиндр динамика процесса такая же, как описано выше, однако амплитуды импульсов тока ниже примерно на 20 – 30 %.

Вольтамперные характеристики КР. Проведенные эксперименты показали, что величина среднего тока нарастает квадратично с увеличением приложенного напряжения (рис. 4), что типично для КР. Такой рост обусловлен влиянием объемного заряда. Существуют две хорошо известные формулировки закона, описывающего вольтамперные характеристики КР: формула Таунсенда и упрощенный вариант формулы Хенсона [20, 21].

В настоящей работе целесообразнее было использовать формулу Таунсенда для аппроксимации экспериментальных данных:

$$I = AU(U - U_{in}), \quad (4)$$

где A – постоянный коэффициент, учитывающий роль геометрии электродной системы, эффективную подвижность носителей заряда и диэлектрическую проницаемость среды; U_{in} – начальное напряжение КР.

При значительном увеличении напряжения закон нарастания среднего тока уже отличается от квадратичного, что обусловлено более сильным влиянием стримерных процессов в данном интервале напряжений. Соответствующие точки не попадали в выборку

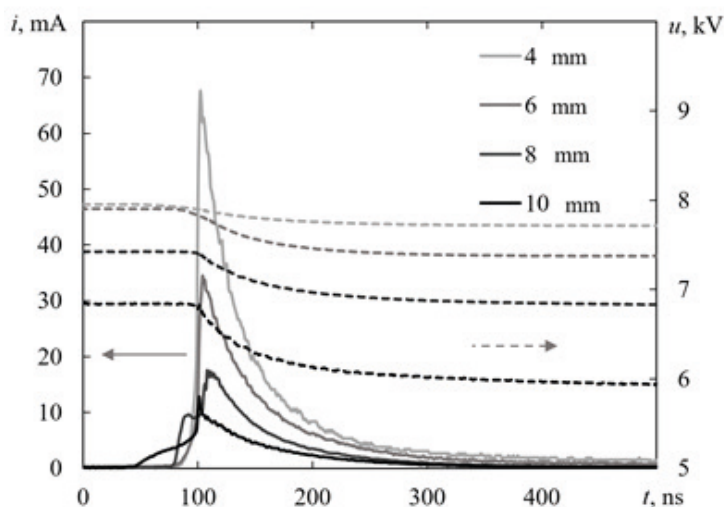


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока (сплошные линии) и напряжения (пунктиры) в наносекундном масштабе времени для разных расстояний d в системе игла-плоскость

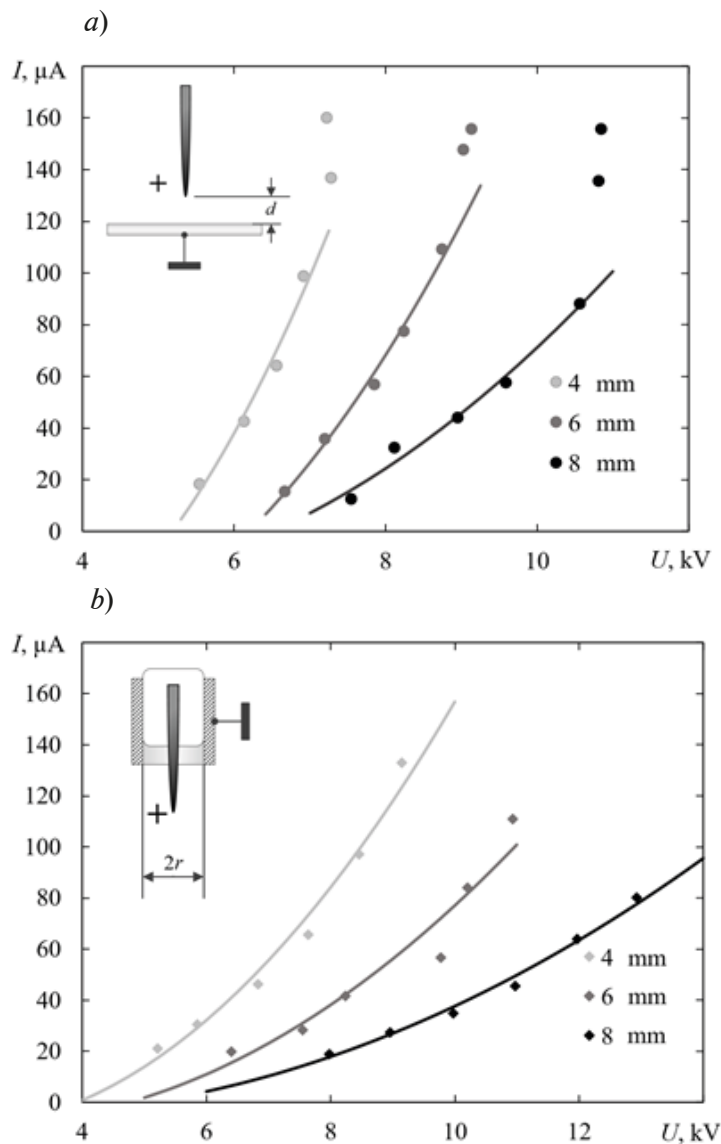


Рис. 4. Вольтамперные характеристики систем игла-плоскость (a) и игла-цилиндр (b) для различных величин межэлектродных зазоров d (a) и r (b)

аппроксимируемых данных. Качество выполненной аппроксимации характеризовалось высоким значением коэффициента детерминации, $R^2 \geq 0,95$. На рис. 4,а приведены вольтамперные характеристики для системы игла-плоскость. Видно, что с увеличением межэлектродного зазора, скорость нарастания тока падает. При этом напряжение начала КР увеличивается с 5,2 до 6,5 кВ при изменении значения d от 4 до 8 мм.

На рис. 4,б приведены экспериментальные вольтамперные характеристики для системы игла-цилиндр. Видно, что средние токи для соответствующих напряжений и расстояний здесь меньше, чем в системе игла-плоскость. Однако диапазон стабильной генерации КР в данном случае шире. При этом напряжение начала КР увеличивается с 3,9 до 5,1 кВ при изменении межэлектродного зазора (радиуса полого электрода) r от 4 до 8 мм.

Источник холодной плазмы. На рис. 5 представлен внешний вид разработанного нами источника холодной плазмы и различные варианты электродных систем. В зависимости от того, какая электродная система используется, данный генератор допускает как прямой, так и косвенный режимы генерации плазмы.

Созданный генератор включает несколько основных блоков: автономный источник питания (поз. 2 на рис. 5,а); ключевой транзисторный каскад, повышающий трансфор-

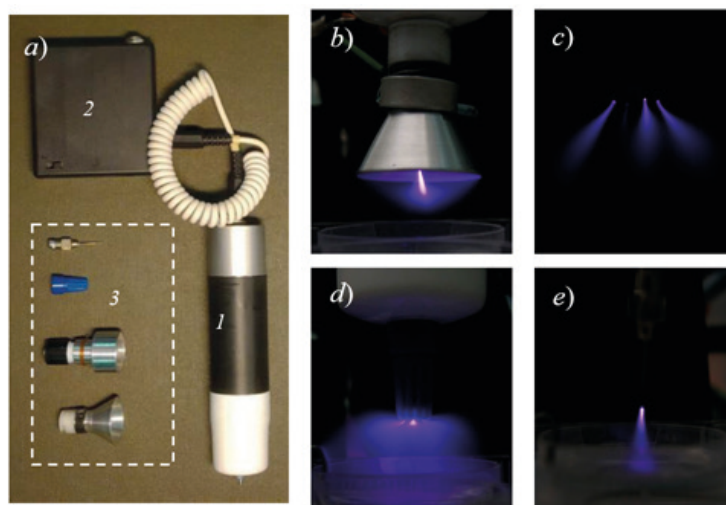


Рис. 5. Фотография портативного источника холодной плазмы *1* с автономным источником питания *2* и различными электродными системами (ЭС) *3* (*a*).

Представлены следующие ЭС: конусообразная для косвенной генерации коронного разряда (*b*), четырехгольчатая с диэлектрическим корпусом (*d*) и без него (*c*), а также моноигольчатая для прямой генерации коронного разряда (*e*)

матор особой конструкции и высоковольтный умножитель, заключенные в корпус источника холодной плазмы (поз. *1*). В процессе работы генератора с автономного источника напряжение питания подается на ключевой транзисторный каскад, обеспечивающий резонансную генерацию импульсов напряжения с амплитудой 120 – 150 В и частотой 3 – 5 кГц.

После этого напряжение повышается трансформатором до 1,3 – 1,5 кВ. Далее оно повторно повышается до требуемого уровня (10 – 12 кВ) посредством высоковольтного умножителя напряжения. Несмотря на то, что в спроектированной конструкции генератора отсутствует система принудительной прокачки воздуха, активные соединения достигают поверхности обрабатываемой мишени за счет ионного ветра. Также по сравнению с барьерным разрядом, где необходима большая мощность для зажигания и поддержания разряда, в случае КР снижается поражающее действие электрического тока.

Электрическая схема сконструированного генератора позволяет обеспечить устойчивый режим поддержания газового разряда. Предлагаемый источник холодной плазмы *1* (см. рис. 5, *a*) имеет следующие массу и габариты: внешний диаметр цилиндрического корпуса составляет 28 мм, длина около 150 мм при общей массе 80 г. Автономный источник питания *2* имеет размеры 5 × 5 × 1 см и вес около 90 г. В качестве сменных электродов используются моно- и многоигольчатые системы (см. рис. 5). Ниже приведены параметры выходного «сигнала» для системы игла-плоскость ($d = 6 - 9$ мм). Амплитуды тока разряда находятся в диапазоне от 10 до 80 мА с частотой повторения импульсов 10 – 50 кГц. Кроме того, средний ток разряда составляет около 100 мкА, поэтому разработанный источник холодной плазмы безопасен с точки зрения поражения электрическим током.

Заключение

Представлена разработка источника холодной плазмы, которой предшествовало многостороннее исследование последних достижений физики газового разряда. Принцип работы устройства основан на использовании импульсного положительного коронного разряда атмосферного давления. Разработанный источник является компактным и портативным, суммарная масса источника и автономного блока питания не превышает 170 г. В работе получены электрические характеристики электродных систем, предназначенных для прямой и косвенной обработки холодной плазмой. Показано, что в исследуемых электродных промежутках генерируется стримерная форма коронного

разряда. При напряжениях до 10 кВ, приложенных к промежутку, амплитуды импульсов тока не превышают 100 мА. В диапазоне напряжений 5 – 15 кВ средний ток коронного разряда нарастает квадратично. При больших напряжениях стримерный коронный разряд переходит в искровой. Показано, что для электродной системы с косвенной генерацией диапазон напряжений, соответствующий стабильному горению разряда, шире, чем для системы с прямой генерацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fridman A., Friedman G.** Plasma medicine. Chichester, UK: John Wiley & Sons Limited, 2013. 560 p.
2. **Kong M. G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J., Zimmermann J. L.** Plasma medicine: an introductory review // *New Journal of Physics*. 2009. Vol. 11. No. 11. P. 115012.
3. **Dobrynin D., Fridman G., Friedman G., Fridman A.** Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue // *New Journal of Physics*. 2009. Vol. 11. No. 11. P. 115020.
4. **Dubois D., Merbahi N., Eichwald O., Yousfi M., Benhenni M.** Electrical analysis of positive corona discharge in air and N₂, O₂, and CO₂ mixtures // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 101. No. 5. P. 053304.
5. **Sekimoto K., Gonda R., Takayama M.** Effects of H₃O⁺, OH⁻, O₂⁻, NO_x⁻ and NO_x for Escherichia coli inactivation in atmospheric pressure DC corona discharges // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2015. Vol. 48. No. 30. P. 305401.
6. **Weltmann K. D., von Woedtke T.** Plasma medicine – current state of research and medical application // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2016. Vol. 59. No. 1. P. 014031.
7. **Moreau E., Audier P., Benard N.** Ionic wind produced by positive and negative corona discharges in air // *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 93. June. Pp. 85–96.
8. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.
9. **Castle G. P., Inculet I. I., Burgess K. I.** Ozone generation in positive corona electrostatic precipitators // *IEEE Transactions on Industry and General Applications*. 1969. Vol. IGA-5. No. 4. Pp. 489–496.
10. **Giacometti J. A., Oliveira O. N.** Corona charging of polymers // *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1992. Vol. 27. No. 5. Pp. 924–943.
11. **Sysolyatina E., Mukhachev A., Yurova M., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N., Ermolaeva S., Akishev Y.** Role of the charged particles in bacteria inactivation by plasma of a positive and negative corona in ambient air // *Plasma Processes and Polymers*. 2014. Vol. 11. No. 4. Pp. 315–334.
12. **Koval'ová Z., Tarabová K., Hensel K., Machala Z.** Decontamination of Streptococci biofilms and Bacillus cereus spores on plastic surfaces with DC and pulsed corona discharges // *The European Physical Journal – Applied Physics*. 2013. Vol. 61. No. 2. P. 24306.
13. **Akishev Y. S., Dem'yanov A. V., Karal'nik V. B., Monich A. E., Trushkin N. I.** Comparison of the AC barrier corona with DC positive and negative coronas and barrier discharge // *Plasma Physics Reports*. 2003. Vol. 29. No. 1. Pp. 82–91.
14. **Timoshkin I. V., Maclean M., Wilson M. P., Given M. J., MacGregor S. J., Wang T., Anderson J. G.** Bactericidal effect of corona discharges in atmospheric air // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2012. Vol. 40. No. 10. Pp. 2322–2333.
15. **Koutsoubi J. M., MacGregor J.** Electrode erosion and lifetime performance of a high repetition rate, triggered, corona-stabilized switch in air // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2000. Vol. 33. No. 9. Pp. 1093–1103.
16. **Eichwald O., Ducasse O., Dubois D., Abahazem A., Merbahi N., Benhenni M., Yousfi M.** Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of O and N radical production // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. No. 23. P. 234002.
17. **Komuro A., Ono R.** Two-dimensional simulation of fast gas heating in an atmospheric pressure streamer discharge and humidity effects // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47. No. 15. P. 155202.

18. **Luque A., Ratushnaya V., Ebert U.** Positive and negative streamers in ambient air: modelling evolution and velocities // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. No. 23. P. 234005.
19. **Šimek M.** Optical diagnostics of streamer discharges in atmospheric gases // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47. No. 46. P. 463001.
20. **Townsend J. S., Edmunds P. J.** The discharge of electricity from cylinders and points // *Philosophical Magazine*. 1914. Ser. 6. Vol. 27. No. 161. Pp. 789–801.
21. **Henson B. L.** A space-charge region model for microscopic steady coronas from points // *Journal of Applied Physics*. 1981. Vol. 52. No. 2. Pp. 709–715.

REFERENCES

1. **Fridman A., Friedman G.**, Plasma medicine, John Wiley & Sons Limited, Chichester, UK, 2013.
2. **Kong M. G., Kroesen G., Morfill G., et al.**, Plasma medicine: an introductory review, *New J. Phys.* 11 (11) (2009) 115012.
3. **Dobrynin D., Fridman G., Friedman G., Fridman A.**, Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue, *New J. Phys.* 11 (11) (2009) 115020.
4. **Dubois D., Merbahi N., Eichwald O., et al.**, Electrical analysis of positive corona discharge in air and N₂, O₂, and CO₂ mixtures, *J. Appl. Phys.* 101 (5) (2007) 053304.
5. **Sekimoto K., Gonda R., Takayama M.**, Effects of H₃O⁺, OH⁻, O₂⁻, NO_x⁻ and NO_x for Escherichia coli inactivation in atmospheric pressure DC corona discharges, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 48 (30) (2015) 305401.
6. **Weltmann K. D., von Woedtke T.**, Plasma medicine – current state of research and medical application, *Plasma Phys. Control. Fusion*. 59 (1) (2016) 014031.
7. **Moreau E., Audier P., Benard N.**, Ionic wind produced by positive and negative corona discharges in air, *J. Electrostat.* 93 (June) (2018) 85–96.
8. **Raizer Yu. P.**, Gas discharge physics., Springer, Berlin, New York, 1997.
9. **Castle G. P., Inculet I. I., Burgess K. I.**, Ozone generation in positive corona electrostatic precipitators, *IEEE Trans. Industr. Gen. Appl.* IGA-5 (4) (1969) 489–496.
10. **Giacometti J. A., Oliveira O. N.**, Corona charging of polymers, *IEEE Trans. Electr. Insul.* 27 (5) (1992) 924–943.
11. **Sysolyatina E., Mukhachev A., Yurova M., et al.**, Role of the charged particles in bacteria inactivation by plasma of a positive and negative corona in ambient air, *Plasma Process. Polym.* 11(4) (2014) 315–334.
12. **Koval'ová Z., Tarabová K., Hensel K., Machala Z.**, Decontamination of Streptococci biofilms and Bacillus cereus spores on plastic surfaces with DC and pulsed corona discharges, *Europ. Phys. J. – Appl. Phys.* 61 (2) (2013) 24306.
13. **Akishev Y. S., Dem'yanov A. V., Karal'nik V. B., et al.**, Comparison of the AC barrier corona with DC positive and negative coronas and barrier discharge, *Plasma Phys. Rep.* 29 (1) (2003) 82–91.
14. **Timoshkin I. V., Maclean M., Wilson M. P., et al.**, Bactericidal effect of corona discharges in atmospheric air, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 40 (10) (2012) 2322–2333.
15. **Koutsoubi J. M., MacGregor J.**, Electrode erosion and lifetime performance of a high repetition rate, triggered, corona-stabilized switch in air, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 33 (9) (2000) 1093–1103.
16. **Eichwald O., Ducasse O., Dubois D., et al.**, Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of O and N radical production, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 41 (23) (2008) 234002.
17. **Komuro A., Ono R.**, Two-dimensional simulation of fast gas heating in an atmospheric pressure streamer discharge and humidity effects, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 47 (15) (2014) 155202.
18. **Luque A., Ratushnaya V., Ebert U.**, Positive and negative streamers in ambient air: modelling evolution and velocities, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 41 (23) (2008) 234005.
19. **Šimek M.**, Optical diagnostics of streamer discharges in atmospheric gases, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 47(46) (2014) 463001.
20. **Townsend J. S., Edmunds P. J.**, The discharge of electricity from cylinders and points, *Philos. Mag. Ser. 6.* 27 (161) (1914) 789–801.
21. **Henson B. L.**, A space-charge region model for microscopic steady coronas from points, *J. Appl. Phys.* 52 (2) (1981) 709–715.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ФЕКЛИСТОВ Ефрем Геннадьевич – ассистент Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7189-6567

THE AUTHOR

FEKLISTOV Efrem G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7189-6567

*Статья поступила в редакцию 15.06.2021. Одобрена после рецензирования 06.12.2021.
Принята 06.12.2021.*

Received 15.06.2021. Approved after reviewing 06.12.2021. Accepted 06.12.2021.