

УДК 537.523

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

ENERGY EFFICIENT DEVICE FOR LOW-TEMPERATURE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PLASMA AT ATMOSPHERIC PRESSURE GENERATING

А. Н. Осипов,

начальник Центра междисциплинарных исследований «Центр плазменного и биомедицинского инжиниринга» УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

Е. Н. Каленкович,

старший преподаватель кафедры информационных радиотехнологий УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь

Д. А. Котов,

заместитель начальника Центра междисциплинарных исследований «Центр плазменного и биомедицинского инжиниринга», УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», заведующий НИЛ «Плазменные технологии и оборудование», канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

В. А. Рокач,

магистрант УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь

П. И. Балтрукович,

директор ГУ «БелИСА», канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

И. О. Хазановский,

заместитель начальника научно-исследовательского центра УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь

A. Osipov,

Head of the Center for Interdisciplinary Research "Center for Plasma and Biomedical Engineering" of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

E. Kalenkovich,

Senior Lecturer of the Chair of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

D. Kotov,

Deputy Head of the Center for Interdisciplinary Research "Center for Plasma and Biomedical Engineering" of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Head of Research Laboratory "Plasma Technology and Equipment", Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

V. Rokach,

Graduate Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

P. Baltrukovich,

Director of the SO "Belarusian Institute of System Analysis and Information Support for Scientific and Technical Sphere", Candidate of Technical Sciences, Minsk, Republic of Belarus

I. Khazanovsky,

Deputy Head of the Research Center of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 20.05.2022.

В работе рассмотрен вопрос применения периодических синусоидально-затухающих сигналов, подаваемых на электроды разрядного блока, для создания энергоэффективных устройств генерации низкотемпературной атмосферной плазмы. Предложены и обоснованы соотношения для расчета длительности и скважности задающих импульсов, вызывающих синусоидально-затухающие сигналы.

The paper considers the issue of using periodic sinusoidally damped signals applied to the electrodes of the discharge unit to create energy-efficient devices for generating low-temperature atmospheric plasma. Relationships for calculating the duration and duty cycle of driving pulses that cause sinusoidally damped signals are proposed and substantiated.

Ключевые слова: холодная плазма атмосферного давления, параметры питающих сигналов, энергосбережение.

Key words: cold plasma at atmospheric pressure, parameters of supply signals, energy saving.

Введение.

Инновационный этап развития общества характеризуется быстрым внедрением в реальную экономику новых перспективных технологий, одной из которых является технология, основанная на применении низкотемпературной атмосферной плазмы. Постоянно расширяется спектр применений холодной плазмы, в том числе в здравоохранении [1, 2, 3, 4]. Наиболее важными областями являются: химическая индустрия и новые материалы (неразрушающее изменение свойств поверхности различных материалов и т. д.), охрана окружающей среды (очистка от загрязнений воды, воздуха и т. д.), здравоохранение (аппаратура и технологии стерилизации и терапии), микроэлектроника (производство плоских дисплеев и др.), оптика, электроника, энергоэффективные источники света и др. Технология обработки в плазме атмосферного разряда характеризуется рядом преимуществ: отсутствием громоздких и энергоемких систем создания и поддержания вакуума; возможностью обработки различных материалов, в том числе низкотемпературных полимеров и биологических объектов; оперативностью и универсальностью применения; невысокой ценой в сравнении с вакуумно-плазменным оборудованием [5, 6]. При проектировании оборудования для генерации плазмы разработчики сталкиваются с рядом задач, требующих проведения дополнительных исследований. Так, не исследован важный вопрос о выборе оптимальной формы электрического сигнала, подаваемого на разрядный блок. Форма и параметры питающего сигнала в значительной степени определяют энергопотребление устройства и свойства самой генерируемой плазмы. В данной работе приведена методика синтеза и применения синусоидально затухающих сигналов для создания энергоэффективных устройств генерации низкотемпературной атмосферной плазмы.

Материалы и методы исследования.

В проведенном исследовании генерация плазмы диэлектрического барьерного разряда (ДБР) при атмосферном давлении осуществлялась с помощью экспериментального комплекса, структурная схема которого представлена на рис. 1. В состав комплекса входит баллон с газом аргоном, регулятор расхода газа, осциллограф, устройство генерации плазмы, состоящее из генератора импульсов, транзисторного ключа, блока питания, повышающего трансформатора и разрядного блока. В качестве генератора импульсов использован генератор стандартных сигналов, работающий в режиме формирования широтно-импульсных сигналов с частотой до 100 кГц. Транзисторный ключ, включенный по схеме с общим истоком, совместно с высоковольтным трансформатором образует одноконтурный преобразователь напряжения. Блок питания представляет собой лабораторный блок питания с регулировкой напряжения и тока в пределах 0–30 В и 0–10 А, который содержит встроенные измерители напряжения и тока, используемые для определения потребляемой мощности устройства генерации при проведении исследования. Контроль формы и параметров задающих импульсов и сигналов, подаваемых на разрядный блок, осуществлялся цифровым осциллографом. Измерение параметров сигнала напряжением до 4 кВ на выходе повышающего трансформатора выполнено при помощи высоковольтного щупа. Использован разрядный блок коаксиального типа с ДБР для создания плазмы диффузного типа при атмосферном давлении. Данный разрядный блок позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см с зоной обработки диаметром порядка 1 см. В качестве плазмообразующего газа используется аргон. Генерация плазмы проводилась при расходе аргона 125 л/ч.

Для оценки эффективности снижения энергозатрат измерялась минимальная мощность устройства генерации, при которой происходило зажигание плазмы. Исследования проводились без внесения объектов в факел плазмы.

На первом этапе выполнялись измерения потребляемой мощности для стандартного режима работы генератора. Для этого на транзисторный ключ подавались задающие импульсные сигналы прямоугольной формы фиксированной амплитуды напряжения на резонансной частоте 51 кГц со скважностью $Q = 2$. Во вторичной обмотке повышающего трансформатора при этом появлялись синусоидальные незатухающие колебания. При пропускании с фиксированной скоростью аргона через разрядный блок на его выходе возникал факел плазмы. Потребляемая мощность генератора плазмы определялась на основании измерения действующих значений потребляемых напряжения и тока от источника питания.

На втором этапе проводилось исследование влияния изменения скважности задающих импульсов на энергопотребление устройства на резонансной частоте. Для этого длительность задающего импульса уменьшалась от значения $t = 19,6$ мкс, что соответствовало скважности $Q = 2$. Уменьшение длительности выполнялось с шагом 0,392 мкс с соответствующей регистрацией потребляемой мощности до момента прекращения горения (зажигания) плазмы. Отсутствие горения плазмы фиксировалось визуально.

На третьем этапе исследовалось влияние скважности импульсов задающего генератора на энергопотребление на частоте 12,5 кГц. При подаче сигнала на данной частоте с длительностью импульса $t = 19,6$ (соответствует скважности $Q = 8$) во вторичной обмотке возникает 3 периода затухающих колебаний. Длительность задающих импульсов уменьшалась с шагом 0,392 мкс до момента прекращения горения (зажигания) плазмы. Соответственно, регистрировалась потребляемая мощность генератором плазмы.

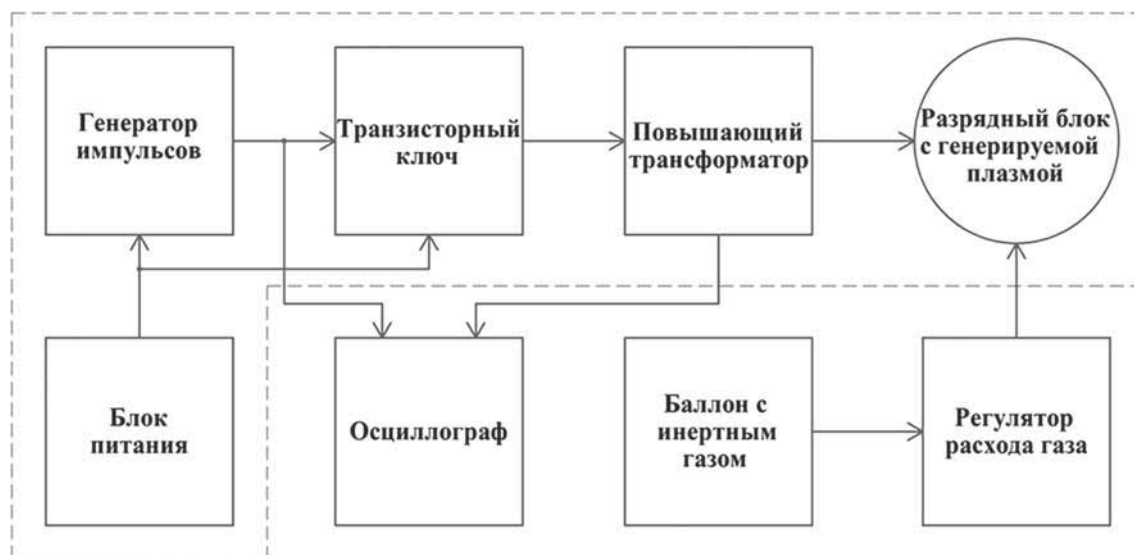


Рис. 1. Структурная схема экспериментального комплекса

Применение периодических синусоидально-затухающих сигналов для генерации атмосферной холодной плазмы.

Как следует из рис. 1, задающие прямоугольные импульсы с выхода генератора импульсов поступают на транзисторный ключ, управляющий протеканием тока в первичной и, соответственно, во вторичной обмотках повышающего трансформатора. На электроды разрядного блока поступает переменный высоковольтный сигнал, генерирующий атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда. Частота высоковольтного сигнала соответствует резонансной частоте f_p выходного контура, создаваемого вторичной обмоткой повышающего трансформатора, электродами разрядного блока и генерируемой плазмой.

Поскольку выходной каскад устройства представляет собой колебательный контур, то при подаче на него одиночного импульса в нем возникают затухающие колебания с резонансной частотой f_p . Длительность затуханий определяется декрементом затухания λ . При подаче последовательности

задающих импульсов со скважностью $Q \geq 4$ в разрядном блоке возникают периодические затухающие колебания, обеспечивающие в течение некоторого периода $T_{пл}$ устойчивое зажигание и горение плазмы (рис. 2). Длительность периода $T_{пл}$ зависит от особенностей конструкции разрядного блока и параметров выходного контура и лежит в пределах:

$$\frac{1}{f_p} \leq T_{пл} \leq \frac{1}{\lambda \cdot f_p}.$$

Наличие затухающих колебаний позволяет увеличить период следования задающих импульсов (увеличить скважность Q) и, соответственно, уменьшить энергозатраты на генерацию плазмы. В связи с этим в данной статье рассматриваются вопросы генерации плазмы при подаче на электроды разрядного блока периодических синусоидальных затухающих колебаний. Сокращение энергозатрат зависит

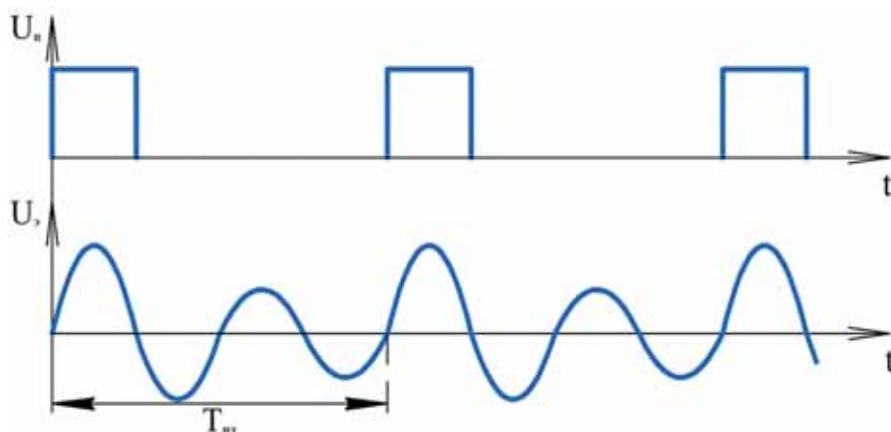


Рис. 2. Диаграмма напряжений: а) U_n — задающие импульсы; б) U_s — колебания на электродах разрядного блока

от длительности импульса, его периода (момента поступления, задающего импульс в контур при наличии затухающих колебаний) и декремента затухания, определяющего степень уменьшения амплитуды затухающих колебаний. Рассмотрим влияние данных параметров на условия генерации плазмы.

При длительности задающего импульса $t = 1/2 f_p$ первая полуволна колебаний на электродах соответствует длительности t . Изменение формы задающего импульса происходит за счет реактивных свойств первичной обмотки повышающего трансформатора и выходного контура. Длительность полуволны затухающих колебаний также равна длительности задающего импульса. Следует отметить, что длительность задающего импульса может быть уменьшена до значения $t = 1/4 f_p$. В этом случае обеспечивается его согласование с резонансными характеристиками контура: в момент t_0 окончания времени импульса амплитуда напряжения на плазме достигает максимального значения $U_{об}^{макс}$ (рис. 3).

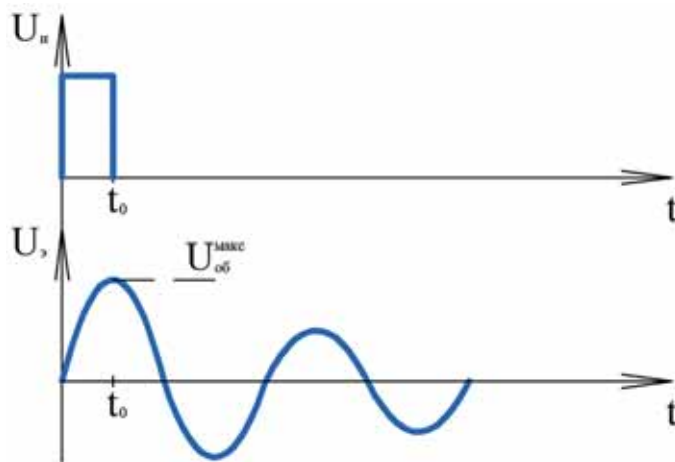


Рис. 3. Диаграмма напряжений: а) U_n — задающие импульсы; б) U_s — колебания на электродах разрядного блока

Следовательно, уменьшение потребляемой мощности в выходном каскаде обеспечивается уменьшением длительности импульса, которая определяется из условия:

$$\frac{1}{4f_p} \leq t \leq \frac{1}{2f_p}.$$

Длительность периода задающих импульсов $T_{пл}$ (скважностью Q) и, соответственно, момент поступления в контур энергии задающего импульса на фоне затухающих колебаний в значительной степени влияет на энергопотребление устройства. На диаграмме (рис. 4) представлены сигналы питания с различной скважностью. Так, на рис. 4, а поступление задающего импульса совпадает по фазе с свободно затухающими колебаниями контура. Это обеспечивает максимальную амплитуду напряжения первой волны возбужденных затухающих колебаний и снижение мощности, затрачиваемой на генерацию плазмы. На рис. 4, б задающий импульс не совпадает по фазе с затухающим колебанием в контуре. Возбужденные колебания будут иметь меньшую амплитуду и худшие показатели энергопотребления.

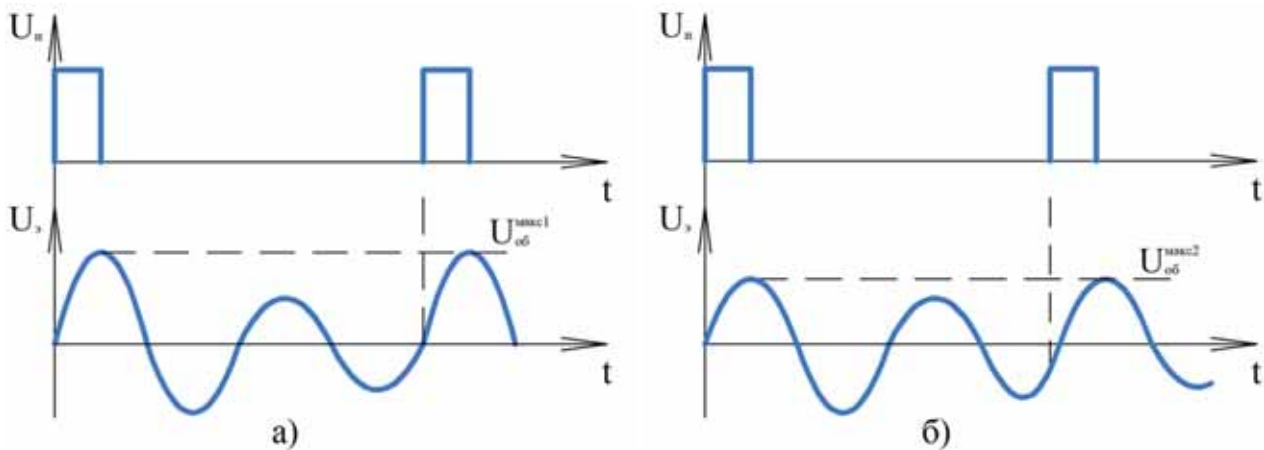


Рис. 4. Диаграммы: а) при совпадении; б) при несовпадении по фазе напряжений задающих импульсов и затухающих колебаний на электродах разрядного блока

Таким образом, период следования задающего импульса определяется из:

$$\begin{cases} \frac{1}{f_p} \leq T_{пл} \leq \frac{1}{\lambda \cdot f_p} \\ T = k \cdot \frac{1}{2f_p}, \end{cases}$$

где k — целое число не меньше 1.

Очевидно, что для выходных каскадов с низким декрементом затухания значение $T_{пл}$ будет больше, чем для каскадов с большим λ . Следует учесть при этом, что декремент затухания изменяется (увеличивается) при внесении в факел плазмы обрабатываемых объектов. Это, соответственно, вызывает необходимость корректировки измеренного декремента затухания применительно к исследуемому технологическому процессу.

Проведена апробация применения исследуемых сигналов на экспериментальном комплексе. На рис. 5 приведена зависимость потребляемой мощности генератором ДБР от скважности задающих импульсов на частоте резонанса 51 кГц. Скважность импульсов изменялась от 2 и выше. При скважности $Q \geq 3,33$ зажигание плазмы не происходило. Увеличение скважности с 2 до 3,3 обеспечило уменьшение потребляемой мощности генератором на 18 %.

На рис. 6 приведена зависимость потребляемой мощности генератора ДБР при работе на частоте 12,75 кГц. На данной частоте возникают три периода свободно затухающих колебаний в резонансной системе генератора ДБР. Как следует из анализа графика на рис. 6, увеличение скважности на частоте 12,75 кГц позволяет уменьшить потребляемую мощность генератора при скважности $Q = 12,5$ на 50 % по сравнению с сигналом со скважностью $Q = 8$. Как и при работе на резонансной частоте, при скважности более 12,5 зажигание плазмы также не происходило.

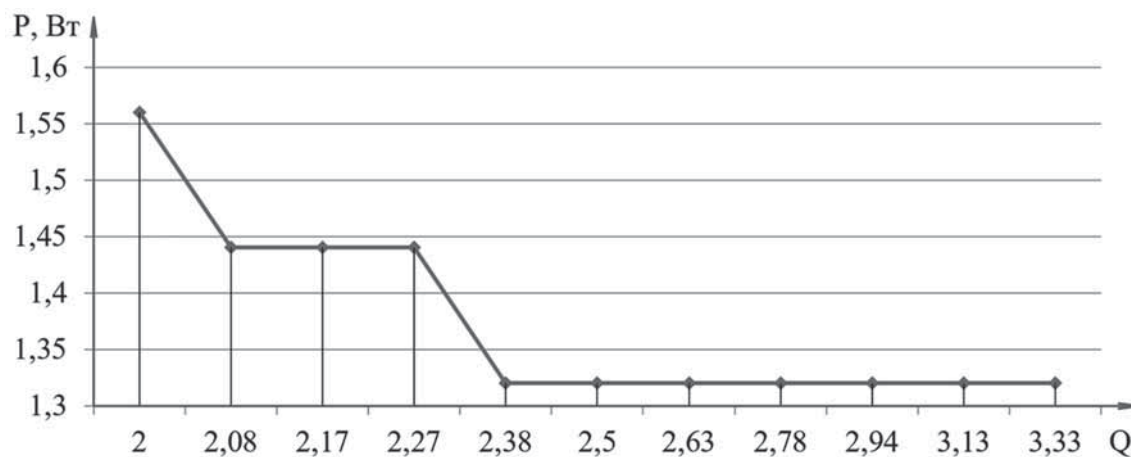


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности генератором ДБР от скважности импульсов на частоте резонанса 51 кГц

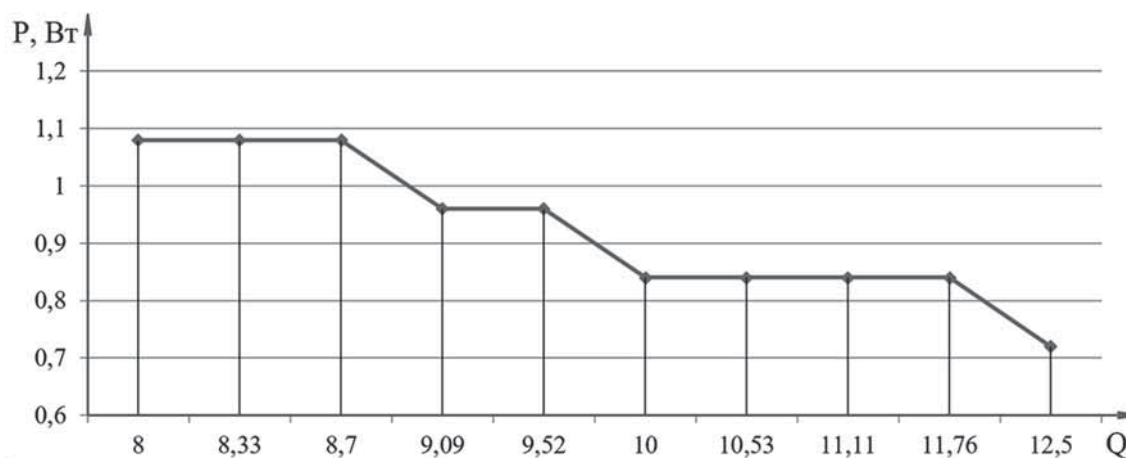


Рис. 6. Зависимость потребляемой мощности генератором ДБР от скважности импульсов на частоте 12,75 кГц

Следовательно, изменение частотно-временных параметров задающих импульсов позволяет снизить потребляемую мощность и тем самым повысить энергоэффективность устройств генерации плазмы ДБР.

Заключение.

Таким образом, в данной работе показана эффективность применения периодических синусоидально-затухающих сигналов, подаваемых на электроды разрядного блока, для создания энергоэффективных устройств генерации низкотемпературной атмосферной плазмы. Предложены и обоснованы соотношения для расчета длительности и скважности задающих импульсов, вызывающих синусоидально-затухающие сигналы. Увеличение скважности задающих импульсов с 2 до 3,3 на резонансной частоте позволило уменьшить потребляемую мощность генератором на 18 %, а на частоте 12,75 кГц, обеспечивающей синусоидально-затухающие колебания, — на 50 %. Применение такого рода сигналов позволит проектировать энергоэффективные устройства генерации холодной атмосферной плазмы.

Литература:

1. Adhikari B. R., Khanal R. Introduction to the plasma state of matter / B. R. Adhikari, R. Khanal // Himalayan Physics. — 2013. — Vol. 4. — P. 60–64.

2. Sakudo A., Yagyu Y., Onodera T. Disinfection and sterilization using plasma technology: Fundamentals and future perspectives for biological applications / A. Sakudo, Y. Yagyu, T. Onodera // International journal of molecular sciences. — 2019. — Vol. 20. — No. 20. — P. 5216.
 3. Chaudhary K. et al. Plasma Kinetic Theory // Kinetic Theory; InTech: Rijeka, Croatia. — 2018. — P. 107–127.
 4. Laroussi M. Plasma medicine: a brief introduction / M. Laroussi // Plasma. — 2018. — Vol. 1. — No. 1. — P. 47–60.
 5. Tanaka H. et al. Non-thermal atmospheric pressure plasma activates lactate in Ringer's solution for anti-tumor effects / H. Tanaka // Scientific reports. — 2016. — Vol. 6. — No. 1. — P. 1–11.
 6. Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments / R. Brandenburg // Plasma Sources Science and Technology. — 2017. — Vol. 26. — No. 5. — P. 053001.
-