

## УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ «ХОЛОДНОЙ» ПЛАЗМЫ

Е. В. Зыков<sup>1</sup>, В. М. Чайковский<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является устройство для получения «холодной» плазмы. Предметом предлагаемого исследования является разработка с последующим макетированием устройства получения и управления «холодной» плазмой. Непосредственной целью работы является разработка достаточно простого устройства из отечественных комплектующих, имеющихся в свободном доступе. *Материалы и методы.* Описан подход к разработке предлагаемого устройства управления с приведением его принципиальной схемы, дано описание и назначение ее элементов. *Результаты.* На основе предложенного подхода осуществлено макетирование устройства формирования «холодной» плазмы, с реальным наблюдением ее наличия, подтвержденного фотоснимком. *Выводы.* Практическая реализация предложенного устройства подтвердила обеспечение им стабильной работоспособности при достаточной простоте его схемотехнического построения с использованием общедоступных комплектующих. В результате получения стабильной во времени «холодной» плазмы предложены различные варианты ее практического применения.

**Ключевые слова:** «холодная» плазма, управление, объемные пульсации, воспроизведение, строчный трансформатор, электродуговой разряд, косметология

**Для цитирования:** Зыков Е. В., Чайковский В. М. Устройство формирования «холодной» плазмы // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 60–66. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-7

## DEVICE FOR FORMING «COLD» PLASMA

E.V. Zykov<sup>1</sup>, V.M. Chaykovskiy<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is a device for producing «cold» plasma. The subject of the proposed research is the development, with subsequent modeling, of a device for obtaining and controlling «cold» plasma. The immediate goal of the work is to develop a fairly simple device from domestic components that are freely available. *Materials and methods.* The approach to the development of the proposed control device with its schematic diagram is described, the description and purpose of its elements are given. *Results.* On the basis of the proposed approach, a mock-up of the device for forming «cold» plasma was carried out, with real observation of its presence, confirmed by a photograph. *Conclusions.* The practical implementation of the proposed device confirmed that it provides stable performance with sufficient simplicity of its circuit design using publicly available components. As a result of obtaining a time-stable «cold» plasma, various variants of its practical application are proposed.

**Keywords:** «cold» plasma, control, volume pulsations, playback, string transformer, electric arc discharge, cosmetology

**For citation:** Zykov E.V., Chaykovskiy V.M. Device for forming «cold» plasma. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):60–66. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-7

Новое направление исследований, появившееся в XX в., основанное на использовании сильно ионизированного газа – плазмы, благодаря обладанию ею рядом заметных достоинств обещает ее широкое применение в различных областях человеческой деятельности. Согласно теории исследования плазмы [1, 2], полученной в электродуговом разряде, она может быть

«холодной», низкоэнергетической, нетепловой, т.е. комнатной температуры, и «горячей», высокотемпературной, высокоэнергетической.

Однако практика использования «горячей» плазмы в клинической медицине из-за ее слишком чрезмерного воздействия на живую биологическую ткань человеческого организма, разрушения необратимо измененных, пораженных участков тканей, окружающих и близлежащих, еще вполне здоровых получила довольно ограниченное применение. Следует отметить, что метод радиочастотной хирургии «холодной» плазмы, предложенный в конце XX в. [3], благодаря своей безболезненности и отсутствию каких-либо побочных эффектов получает все более широкое применение, особенно в области косметологии, эстетической и ЛОР-хирургии, а также онкологии. «Холодная» плазма представляет собой облако сильно ионизированного газа с очень высокой концентрацией заряженных частиц в виде электронов и ионов при относительно низкой, комнатной температуре порядка +45 ... +55 °С. При этом, кроме того, «холодная» плазма широко используется при разработке генератора плазменных шаров [4, 5], предназначенного для использования в сочетании с различными светодинамическими и цветомузыкальными инсталляциями [6], при организации различных световых шоу, а также при озвучивании музыкальных произведений различной жанровой направленности [7], путем замены акустических динамиков, характеризующихся значительными колебательными, вибрационными движениями (дрожанием) диафрагмы диффузора, которая перемещает значительные воздушные массы и в то же время обладает значительной инерцией, что приводит к воспроизведению высокочастотных электрических сигналов с большими искажениями. Тогда как последние сигналы лучше воспроизводятся «холодной» плазмой, которая производит звук за счет объемных пульсаций, возникающих в теле высокочастотного электродугового разряда, модулированного исходным электрическим звуковым сигналом, т.е. источник звука находится непосредственно в пламени разряда. Благодаря быстрой, без какой-либо инерции, передаче дуговым разрядом высокочастотных колебаний в воздух достигается более лучшее воспроизведение высоких составляющих оригинального, исходного аудиосигнала.

Отличительная особенность предлагаемой работы заключается в ее подходе, ориентированном на разработку простого устройства из отечественных комплектующих, способного сформировать управляемую «холодную» плазму, которая будет возникать внутри высокочастотного разряда с изменяющимся значением его тока под действием модулирующего сигнала, являющегося управляющим, под действием которого внутри объема разряда появляются пульсации, вызывающие акустические колебания в окружающем пространстве.

Как показывают дальнейшие исследования, данный прием получения «холодной» плазмы обладает достаточной универсальностью, так как он может найти различные варианты своего практического применения, а именно: его можно использовать как для реализации плазменного громкоговорителя [7], так и для изготовления плазменной ручки, которая найдет самое широкое применение в медицинских учреждениях и особенно в различных салонах красоты [8].

Получение дугового разряда основано на использовании усилителя, нагрузкой которого является строчный высоковольтный трансформатор, формирующий высокочастотное напряжение с амплитудой в несколько киловольт, которое в свою очередь создает высокочастотную электрическую дугу на выходных контактах вторичной обмотки данного трансформатора, в качестве которого используется распространенный тип строчного трансформатора, а именно, трансформатор диодно-каскадной строчной развертки (ТДКС) [9].

С целью получения от используемого усилителя повышенного значения выходной мощности его режим работы выбирается соответствующим классу D, опыт получения которого к текущему времени накоплен огромный [10,11], структура построения разработанного устройства формирования «холодной» плазмы приведена на рис. 1, из которого видно, что электродуговой разряд в виде «холодной» плазмы формируется между контактными электродами выходной обмотки строчного трансформатора. Следует отметить, что предлагаемое в данной работе устройство формирования «холодной» плазмы может быть использовано для создания устройства, удаляющего различные доброкачественные новообразования кожного покрова [3, 8]. Однако доведение этого предложения до практической реализации требует проведения серьезных клинических исследований на базе медицинского учреждения на различных образцах биологических тканей. Для того, чтобы выяснить следующие моменты: ка-

кое требуется значение частоты гармонического модулирующего сигнала и как долго «холодной» плазмой следует воздействовать на пораженный участок кожи, чтобы получить наиболее положительный эффект, другими словами, необходимо изучить процесс воздействия «холодной» плазмы применительно к данной ситуации, т.е. разработать методические указания по ее практическому применению. При этом также потребуется доработать конструкцию контактного электрода с возможностью придания ему ряда сменных насадок, позволяющих в зависимости от назначения и характера процедуры формировать плазму в виде дугового разряда, имеющего необходимый диаметр и мощность, которые могут быть подобраны индивидуально для каждого человека с учетом его пожеланий и потребностей. В будущем возможно использование контакта-сопла, способного образовывать плазменную струю, что, несомненно, расширит спектр предоставляемых медицинских процедур, особенно косметического характера.

Суть работы предлагаемого устройства формирования сводится к следующему.

Формируемый аналоговым компаратором сигнал типа ШИМ, осуществляющий управление работой усилителя мощности, получается на выходе компаратора в результате сравнения последним амплитуды опорного сигнала пилообразной формы, имеющего постоянное значение частоты повторения, с амплитудой напряжения сигнала гармонической формы, являющегося модулируемым по отношению к напряжению пилообразной формы. Каждое из указанных напряжений подается на соответствующий вход компаратора.

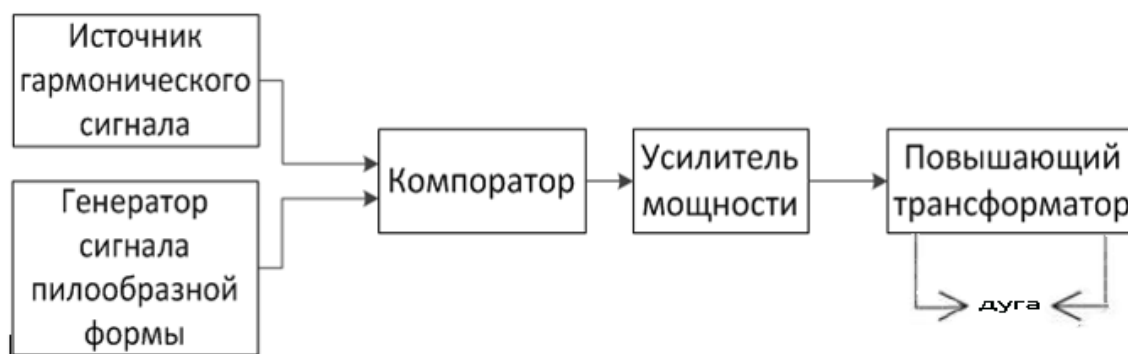


Рис. 1. Структура построения устройства формирования плазмы

Иными словами, пилообразный сигнал будет выполнять роль модулирующего, а гармонический, однотональный – модулируемого. Требуется заметить, что от характера дальнейшего практического использования сформированной «холодной» плазмы будет определяться вид модулируемого сигнала. Если сформированная плазма будет использоваться в медицинских целях, то от характера проведения предполагаемой медицинской процедуры модулируемый сигнал должен иметь однотональный сигнал гармонической формы с тем или иным значением частоты. А если плазма будет использоваться для проведения высококачественного воспроизведения сигнала музыкального фрагмента различного жанра, то тогда последний также будет выполнять роль модулируемого сигнала и также с подачей его на соответствующий вход компаратора.

Длительность периода повторения напряжения, вырабатываемого встроенным, внутренним генератором и имеющего пилообразную форму изменения, будет однозначно определять значение длительности периода повторения выходного напряжения компаратора, которое в свою очередь будет являться импульсным напряжением с широтно-импульсной модуляцией.

Как только произойдет превышение уровня входного напряжения, выполняющего роль модулируемого, уровня пилообразного напряжения, являющегося соответственно модулирующим, на выходе компаратора будет сформирован импульс напряжения с отрицательным уровнем и произойдет наоборот, как только амплитуда модулирующего сигнала станет ниже уровня пилообразного напряжения, на выходе компаратора будет сформирован импульс напряжения с положительной амплитудой.

Здесь микросхема 114EУ4В выполняет функцию ШИМ-контроллера, за счет наличия у нее целого ряда необходимых блоков, позволяющих считать ее ШИМ-контроллером, пред-

назначенным для работы в составе импульсного источника питания. При этом значение длительности периода повторения формируемого напряжения пилообразной формы регулируется изменением номинальных значений элементов R2, R3 и C3 (рис. 2). Переменным резистором R2 производится регулировка значения длительности периода повторения пилообразного напряжения, причем данный резистор обладает зависимостью типа А с линейным характером. При этом длительность периода повторения напряжения пилообразной формы, вырабатываемого встроенным генератором, изменяется в соответствии с равенством  $T = RC/K$ , где согласно с РТМ (руководящим технологическим материалом) на микросхему 114ЕУ4,  $K$  – коэффициент пропорциональности берется равным 1,1.

Изменение значения длительности периода повторения выходной импульсной последовательности происходит в результате операции сравнения амплитуды пилообразного напряжения, имеющего положительную полярность и выделяющегося на конденсаторе C3, с амплитудой напряжения управляющего сигнала. Периодическая смена логического состояния, осуществляющаяся на выходе элемента ИЛИ-НЕ, будет менять состояние выходного транзистора микросхемы, представляющего собой управляемый аналоговый ключ, тем самым периодически осуществляя смену его состояния на противоположное, причем это будет происходить только при нахождении тактового выхода триггера, имеющегося в составе ШИМ-контроллера, в логическом нуле. Последнее будет происходить только в то время, когда значение амплитуды пилообразного напряжения превышает уровень амплитуды управляющих сигналов. С учетом сказанного рост значения уровня модулирующего сигнала будет вызывать соответствующее линейное увеличение скважности импульсного напряжения формируемого на выходе компаратора. Компаратор изменяет скважность ШИМ – импульсного напряжения на своем выходе от максимального значения, задаваемого уровнем напряжения на выводе 04 микросхемы 114ЕУ4, до так называемого «мертвого» значения интервала времени, который регулировкой значения резистора R1, имеющего передаточную характеристику аналогичную резистору R2 (рис. 2) можно изменять длительность данного интервала и довести ее до нулевого значения.

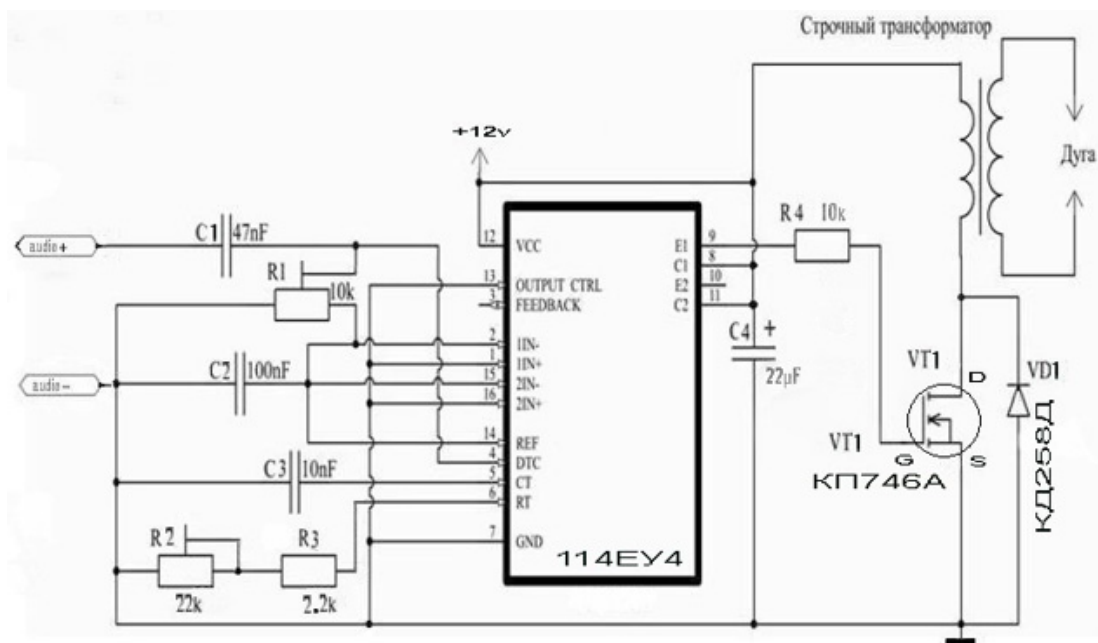


Рис. 2. Схема реализации устройства формирования

В дальнейшем выходное напряжение компаратора, формируемое на выходе E1 (контакт 09 микросхемы 114ЕУ4) и являющееся импульсной последовательностью с широтно-импульсной модуляцией, поступает строго через резистор R4, выполняющего роль токоограничительного, на затвор  $n$ -канального МДП-транзистора VT1 типа КП746А, являющегося аналоговым ключом, коммутирующим токовую цепь первичной обмотки строчного транс-

форматора. Учитывая то, что VT1 коммутирует достаточно сильноточную цепь, то требуется предусмотреть его охлаждение посредством радиатора [12] из-за выделяющегося значительного тепла на его внутреннем сопротивлении.

Для снижения эффекта проявления ЭДС самоиндукции, образующейся на индуктивности первичной обмотки строчного трансформатора в момент разрыва ее токовой цепи транзистором VT1, между его истоком и стоком помещен диод VD1 типа КД258Д, выполняющий роль быстродействующей демпфирующей цепи, замыкающей на корпус появляющуюся ЭДС самоиндукции.

Выходной электрод VT1 соединен с началом первичной обмотки строчного трансформатора, конец которой подключен к источнику питания 12 В, сама первичная обмотка состоит из 10 витков, намотанных виток к витку проводом диаметром 1,2 мм. За счет действия «повышающего» эффекта трансформатора на выходных зажимах вторичной обмотки строчного трансформатора формируется разность потенциалов до 15 тысяч вольт, в результате чего между выходными электродами будем наблюдать явление электрического пробоя воздушного промежутка. При этом последний вызовет образование электрического разряда, сопровождающегося акустическим звучанием, причиной появления которого будут объемные пульсации, которые в свою очередь вызывают колебания окружающей воздушной массы. Тональность данного звучания будет соответствовать тональности сигнала, играющего роль управляющего и поступающего через разделительный конденсатор С1 на один из входов компаратора, а именно, на контакт 04 микросхемы 114ЕУ4.

Натурные испытания макета предлагаемого устройства формирования «холодной» плазмы (рис. 3) показали стабильность мощности последней и возможность изменения тональности создаваемого объемными пульсациями плазмы акустического звучания при изменении частоты модулирующего сигнала, роль которого выполнял выходной сигнал низкочастотного генератора ГЗ-18, представляющий собой гармонический сигнал с амплитудой в 1 В.

Дополнительно испытания показали, что сменой наконечников (заточенных остроконечно или округло) выходных электродов можно менять мощность, конфигурацию дуги и даже ее объем, что, соответственно, увеличивает размер объемных пульсаций, а это, соответственно, повышает вызываемый пульсациями уровень акустического звучания.

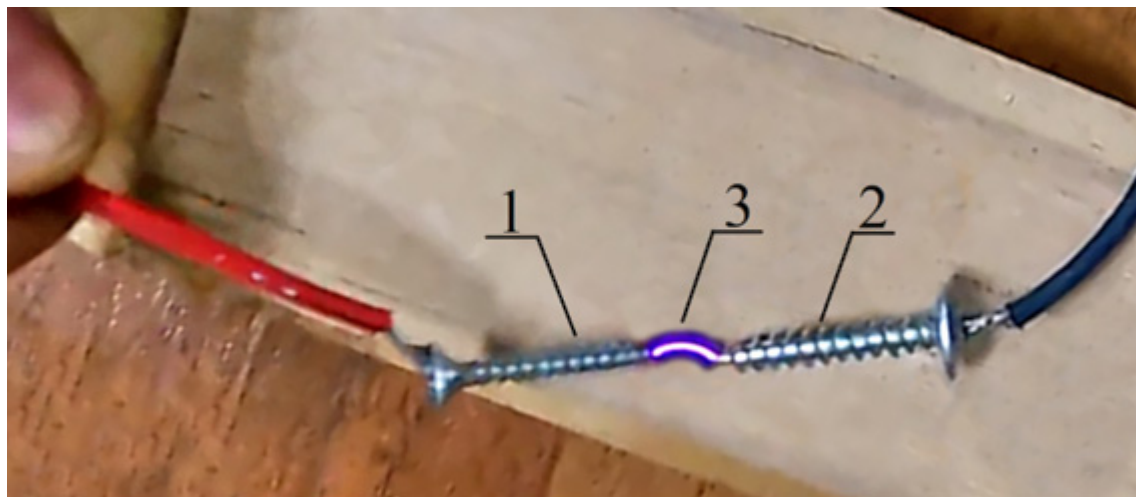


Рис. 3. Фото сформированной плазмы:  
1, 2 – наконечники выходных электродов; 3 – плазма

Поэтому в зависимости от предназначения использования «холодной» плазмы, получаемой с помощью данного устройства формирования, необходимо проведение дополнительных исследований по разработке различных видов конструкций контактирующего устройства, что, несомненно, расширит спектр практического применения «холодной» плазмы, а именно, сможет использовать ее в качестве звуковоспроизводящего устройства, обладающего достаточно качественным воспроизведением высокочастотных составляющих модулирующего сигнала [13], а также в качестве медицинского инструмента при проведении различных медицинских про-

цедур [14, 15], особенно в области оказания косметологических услуг и даже для обеззараживания воды [16].

### Список литературы

1. Котельников И. А., Ступаков Г. В. Лекции по физике плазмы : учеб. пособие. Новосибирск : Новосибир. ун-т, 1996.
2. Kong P. Atmospheric-Pressure Plasma Process and Applications // SOHN International Symposium On Advanced Processing of Metals and Materials; Principles, Technologies and Industrial Practice. 2006.
3. Алейник Н. А. Плазменная медицина : учеб. пособие. Томск, 2011.
4. Metelmann H.-R., Woedtke von T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine: Cold Physical Plasma for Medical Application. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
5. Bernhardt P. A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications // IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2017, Atlantic City, NJ, USA. doi: 10.1109/PLASMA.2017.8496289. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
6. Цветомузыкальные устройства. Любительские схемы / сост. А. А. Халоян. М. : ИП РадиоСофт, 2001.
7. Чайковский В. М., Аксенов И. В. [и др.]. Звуковоспроизводящее устройство на основе объемных пульсаций в теле высокочастотного электродугового разряда // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2017. Т. 2.
8. Федотов В. П., Корецкая Е. Ю. [и др.]. Аппаратная косметология : учеб. пособие. Запорожье : Прогресс, 2013.
9. Родин А. В. Строчные трансформаторы современных телевизоров. Аналоги и характеристики. М. : СОЛОН-Пресс, 2010.
10. Вайсбурд Ф. И. [и др.]. Электронные приборы и усилители. Изд. 4-е, стереотип. М. : КомКнига, 2007.
11. Лившиц И. И. Транзисторные усилители в режиме D. Л. : Энергия, 1973.
12. Панфилов С. А. Эффективное охлаждение новых высокоомощных силовых полупроводниковых приборов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 4.
13. Galechyan G. A. Acoustic waves in plasma // Phys.-Usp. 1995. Vol. 38. P. 1309. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1995v038n12ABEH000123/pdf>
14. Motaln H., Recek N., Rogelj B. Intracellular responses triggered by cold atmospheric plasma and plasma-activated media in cancer cells // Molecules. 2021. Vol. 26 (5). Art. 1336. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103919874&doi=10.3390%2fmolecules26051336&partnerID=40&md5=840ad09280fe7f3423f2fe9fde7c172c>
15. Bernhardt P. A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications // IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (October 2018). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
16. Десятков А. В., Кручинина Н. Е., Колесников А. В. [и др.] Исследование возможности обеззараживания воды воздействием холодной плазмы при кавитации в высокоскоростных потоках воды // Вода: химия и экология. 2015. № 9. С. 76–80. URL: <https://rucont.ru/efd/421311>

### References

1. Kotel'nikov I.A., Stupakov G.V. *Leksii po fizike plazmy: ucheb. posobie = Lectures on plasma physics : textbook*. Novosibirsk: Novosib. un-t, 1996. (In Russ.)
2. Kong P. Atmospheric-Pressure Plasma Process and Applications. *SOHN International Symposium On Advanced Processing of Metals and Materials; Principles, Technologies and Industrial Practice*. 2006.
3. Aleynik N.A. *Plazmennaya meditsina: ucheb. posobie = Plasma medicine : textbook*. Tomsk, 2011. (In Russ.)
4. Metelmann H.-R., Woedtke von T., Weltmann K.-D. *Comprehensive Clinical Plasma Medicine: Cold Physical Plasma for Medical Application*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
5. Bernhardt P.A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 2017*, Atlantic City, NJ, USA. doi: 10.1109/PLASMA.2017.8496289. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
6. Khaloyan A.A. (comp.). *Tsvetomuzikal'nye ustroystva. Lyubitel'skie skhemy = Color music devices. Amateur schemes*. Moscow: IP RadioSoft, 2001. (In Russ.)

7. Chaykovskiy V.M., Aksenov I.V. [et al.]. A sound reproducing device based on volumetric pulsations in the body of a high-frequency electric arc discharge. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2. (In Russ.)
8. Fedotov V.P., Koretskaya E.Yu. [et al.]. *Apparatnaya kosmetologiya: ucheb. posobie = Hardware cosmetology : textbook*. Zaporozhe: Pro-svita, 2013. (In Russ.)
9. Rodin A.V. *Strochnye transformatory sovremennykh televizorov. Analogi i kharakteristiki = Lowercase transformers of modern televisions. Analogues and characteristics*. Moscow: SOLON-Press, 2010. (In Russ.)
10. Vaysburd F.I. [et al.]. *Elektronnye pribory i usiliteli. Izd. 4-e, stereotip = Electronic devices and amplifiers. Ed. 4th, stereotipe*. Moscow: KomKniga, 2007. (In Russ.)
11. Livshits I.I. *Tranzistornye usiliteli v rezhime D = Transistor amplifiers in the mode of D*. Leningrad: Energiya, 1973. (In Russ.)
12. Panfilov S.A. Effective cooling of new high-power power semiconductor devices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy Region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga Region. Technical sciences*. 2012;(4). (In Russ.)
13. Galechyan G.A. Acoustic waves in plasma. *Phys.-Usp.* 1995;38:1309. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1995v038n12ABEH000123/pdf>
14. Motaln H., Recek N., Rogelj B. Intracellular responses triggered by cold atmospheric plasma and plasma-activated media in cancer cells. *Molecules*. 2021;26(5):1336. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103919874&doi=10.3390%2fmolecules26051336&partnerID=40&md5=840ad09280fe7f3423f2fe9fde7c172c>
15. Bernhardt P.A., Rock B., Pereira N. Microwave Driven Plasma Ball Generator For Illumination And Rf Applications. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) (October 2018)*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8496289>
16. Desyatov A.V., Kruchinina N.E., Kolesnikov A.V. [et al.] Investigation of the possibility of disinfection of water by exposure to cold plasma during cavitation in high-speed water flows. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*. 2015;(9):76–80. (In Russ.). Available at: <https://rucont.ru/efd/421311>

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

##### **Ефим Витальевич Зыков**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

##### **Efim V. Zykov**

Student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

##### **Виктор Михайлович Чайковский**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

##### **Victor M. Chaykovskiy**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radioengineering and radioelectronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 16.06.2021**

**Поступила после рецензирования / Revised 24.06.2021**

**Принята к публикации / Accepted 29.09.2021**