

УДК 53.084.42

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2024 г. Е. М. Кончев<sup>1,\*</sup>, А. С. Конькова<sup>1</sup>, А. В. Князев<sup>1</sup>,  
академик РАН А. П. Глинушкин<sup>1</sup>, С. В. Гудков<sup>1,\*\*</sup>

Поступило 20.06.2024 г.

После доработки 20.06.2024 г.

Принято к публикации 07.08.2024 г.

В последние годы применение низкотемпературной плазмы в биомедицинских и сельскохозяйственных исследованиях вызывает значительный интерес благодаря способности плазмы эффективно стерилизовать, модифицировать поверхности и генерировать активные формы кислорода и азота. Точное позиционирование источников плазмы и характеристика режимов работы источников являются первоочередными задачами при внедрении в реальную практику. В работе представлено универсальное устройство для позиционирования источников плазмы и измерительной аппаратуры. Устройство изготовлено методом послойного наплавления (3D-печать), обладает относительно высокой прочностью конструкции при отсутствии металлосодержащих элементов. Разработанное устройство позволяет с высокой точностью позиционировать активные элементы источников плазмы над объектами различных размеров и состава, а также позволяет имплементировать чувствительные методы диагностики характеристик плазмы и изменения параметров обрабатываемых объектов.

*Ключевые слова:* низкотемпературная плазма, источники плазмы, измерительный стенд, 3D-печать

DOI: 10.31857/S2686740024050118, EDN: НХСРАВ

Применение плазменных технологий в последние годы вызывает большой интерес и широко освещается в научной литературе [1–3]. Это прежде всего связано с развитием технологической базы, поспособствовавшей появлению энергоэффективных компактных решений [4], и получением перспективных результатов исследований в области взаимодействия низкотемпературной плазмы с биологическими объектами. Наиболее активно развивающимися областями являются плазменная медицина и плазменное сельское хозяйство, в которых источники такой плазмы используются для угнетения или стимуляции жизнеспособности

клеток, обработки поверхности материалов с целью стерилизации или изменения адгезионных свойств, генерации в жидкостях биологически активных соединений [5–7]. В таких исследованиях низкотемпературную плазму (НТП) зачастую называют нетермальной или холодной.

Как показывают многочисленные исследования, результаты взаимодействия НТП с биологическими объектами и жидкостями могут вызывать разнообразные отклики и варьироваться в самых широких пределах, что зависит от большого числа параметров как источников НТП, так и условий проведения обработки [8, 9]. Одними из ключевых факторов, определяющих результат прямого взаимодействия НТП с клетками или биотканями и его воспроизводимость, являются энергетические характеристики НТП (вкладываемая в разряд энергия, мощность и длительность микропulses),

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: konchekov@fpl.gpi.ru

\*\*E-mail: s\_makariy@rambler.ru

дистанция между активным электродом, задающим плазменное воздействие, и обрабатываемым объектом. Таким образом, на стадии разработки методик и протоколов обработки критически важным является прецизионное позиционирование рабочего устройства источника НТП, а также регистрация характеристик плазменного образования: спектры свечения плазмы и спектры поглощения УФ-излучения в обрабатываемой среде для определения скорости наработки биологически активных соединений; распределение электрического поля; величина и длительность тока в разрядных каналах и т.п. [10–16]. Для решения данного ряда задач нами было разработано и изготовлено универсальное устройство, позволяющее как позиционировать электроды различных типов источников НТП относительно объекта обработки, так и размещать вблизи них компоненты измерительной аппаратуры.

### ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Поставленные задачи обуславливают основные требования при разработке модели и изготовлении устройства:

1) изготовление элементов из диэлектрических материалов для минимизации систематической ошибки регистрации распределения электрических полей;

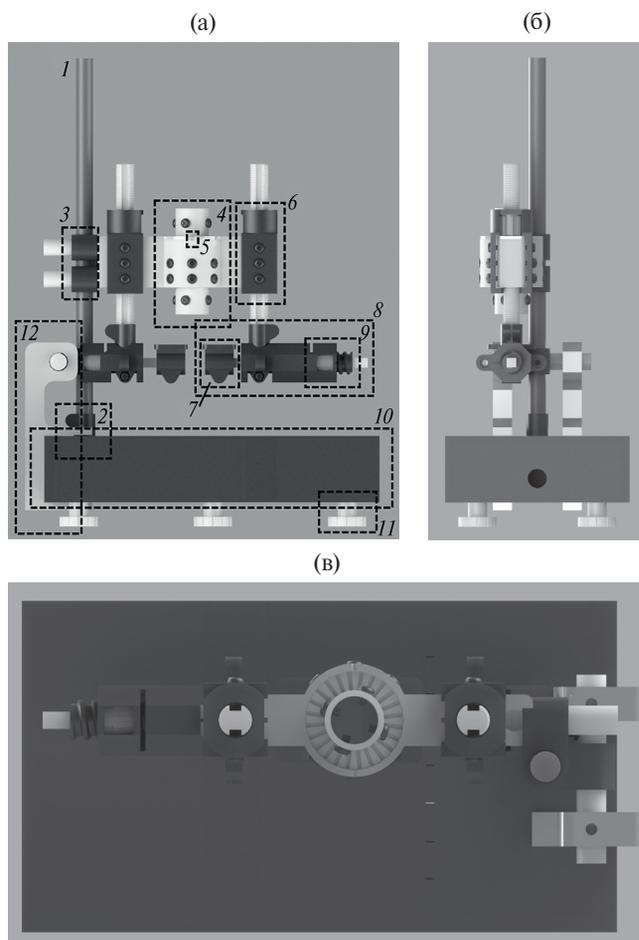
2) возможность точного позиционирования рабочего устройства источника НТП в цилиндрической системе координат (степень свободы по высоте и углу поворота);

3) возможность прецизионного и независимого перемещения в двух плоскостях предметных столиков-держателей, на которых размещаются образец и измерительные элементы;

4) возможность работы с объектами размером от 1 см<sup>3</sup> до 1 дм<sup>3</sup>;

5) жесткость конструкции и возможность юстировки в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Общий вид модели устройства представлен на рис. 1. Все элементы, за исключением штока, утяжелителя основания и ряда крепежных элементов, изготовлены методом послойного наплавления (FDM). Для изготовления использовался 3D-принтер VolgoBot A4 PRO.



**Рис. 1.** Модель устройства: вид спереди (а), вид сбоку (б), вид сверху (в); 1 – шток; 2 – крепежный элемент; 3 – фиксатор; 4 – втулка для крепления исследуемого объекта (электрода); 5 – канавка для выставления угла поворота; 6 – муфта для вертикального перемещения предметных столиков; 7 – предметный столик; 8 – механизм горизонтальной юстировки; 9 – муфта для горизонтального перемещения предметных столиков; 10 – платформа; 11 – юстировочные ножки; 12 – компенсационный элемент.

Особенностями данного принтера являются высокая точность при печати (минимальная толщина слоя – 0.03 мм), а также наличие термостатированной и конвекционной камеры, в которой производится построение моделей, что обеспечивает улучшение когезии и противодействие межслоевым деформациям.

В качестве основного материала был выбран ABS-пластик. Данный вид материала является распространенным при 3D-FDM-печати благодаря его свойствам и стоимости. Отличительной особенностью ABS-пластика является его растворимость в ацетоне, что позволяет

изготавливать крупногабаритные элементы по частям.

Основание станда состоит из: утяжелителя; штока, на который устанавливается основная часть станда; кожуха и крепежного элемента штока. В качестве утяжелителя основания используется плита из оргстекла массой 5 кг. Плита помещена в кожух. Предварительно в плите было выполнено сквозное отверстие, через которое проходит шток.

В верхней панели кожуха предусмотрено отверстие, в которое установлен шток и крепежный элемент для его фиксации. Также в боковой панели кожуха предусмотрены отверстия для установки дополнительного подиума. Подиум выполняет две функции: продление верхней плоскости для размещения крупных объектов (например, мешалки), которые необходимы в процессе исследований, и хранение сопутствующих предметов.

В качестве штока 1 используется стержень диаметром 18 мм. Выбор обусловлен применением стандартного крепежного элемента для дополнительной фиксации стержня в основании и требованием к повышенной прочности, чтобы избежать рисков, связанных с деформацией штока под нагрузкой, вызванной весом основной части станда. Крепежный элемент 2 имеет более высокую прочность, так как выполнен с применением литейных форм в промышленных условиях.

Для повышения прочности и обеспечения точности позиционирования основной части вдоль штока был изготовлен набор колец разной высоты. На каждое кольцо нанесено значение его высоты. К штоку с помощью дополнительных элементов крепится основная часть станда через два боковых стержня. Вдоль штока производится перемещение в вертикальной плоскости основной части, для этого фиксаторы 3 снабжены винтами.

В основной части предусмотрено отверстие, в котором размещается втулка для установки рабочего устройства НТП (электрода) и угла его поворота относительно предметных столиков. Корпус рабочего устройства фиксируется во втулке нейлоновыми винтами. Сама втулка также может быть зафиксирована в основной части с помощью нейлоновых винтов.

Втулка 4 имеет радиально расположенные канавки с шагом в 15 градусов. На корпусе выполнены две симметричные канавки 5. Это позволяют осуществлять поворот втулки с рабочим устройством с точностью 7.5 градусов (половина цены деления).

В основной части также располагаются отверстия, симметричные относительно отверстия для втулки, через которые проходят штоки для вертикального перемещения предметных столиков. Механизм вертикального перемещения состоит из штока, муфты и дополнительного фиксатора. Вращательное движение муфты 6 превращается в вертикальное поступательное движение штока. Величина поворота определяется шагом резьбы. На муфте сделаны выступы, чтобы облегчить вращение и определять величину поворота с точностью до 15 градусов (половина цены деления). На штоках выполнены пазы, чтобы осуществлять при необходимости дополнительную фиксацию (винты закручиваются и осуществляют прижим балки с двух сторон); кроме того, винты в пазе выступают в роли направляющих при перемещении штока. Для предотвращения прокручивания штока вдоль их цилиндрической поверхности сделаны срезы. Отверстия в корпусе, через которые проходят эти штоки, также имеют такую форму. Дополнительный фиксатор удерживает муфту, блокируя перемещения в горизонтальной плоскости. Также фиксатор в нижней части имеет выступы, которые служат в качестве направляющих в пазах штока.

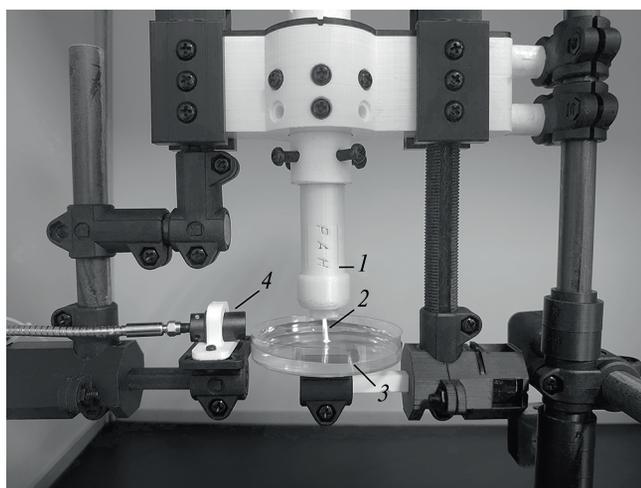
В нижней части штока отсутствует резьба, так как в этом месте устанавливается стандартный фиксатор. Через фиксатор пропускается балка квадратного сечения. Балка имеет квадратное сечение, чтобы предотвратить вращение. На конце балки размещается предметный столик 7. Перемещение предметного столика с балкой осуществляется либо через механизм горизонтального перемещения 8, либо ручную. В случае ручного перемещения зажимной винт ослабляется, балка проталкивается, после чего винт затягивается (на балке присутствует шкала, чтобы контролировать величину перемещения). Механизм горизонтального перемещения аналогичен механизму вертикального перемещения: вращение муфты 9 превращается в поступательное движение квадратной балки

и, следовательно, перемещение предметных столиков. На квадратной балке жестко фиксируется переходная деталь: внутри деталь имеет квадратное отверстие, а снаружи — резьбу. Для повышения надежности крепления системы дополнительно изготовлены полые детали, которые установлены вокруг стандартных фиксаторов.

На одном из предметных столиков 7 устанавливается измерительный элемент, на другом — объект плазменной обработки. Если объект имеет значительные размеры, он может быть расположен непосредственно на платформе 10.

В основную часть станда вмонтирован пузырьковый уровень. В ножках станда 11 установлены регулировочные винты. С помощью уровня и регулировочных винтов осуществляется выравнивание корпуса в горизонтальной плоскости. Компенсационный элемент 12 является противовесом и минимизирует влияние моментов сил, возникающих в ходе эксплуатации устройства.

На рис. 2 представлен пример использования разработанного устройства. Источник НТП в режиме генерации аргоновой плазменной струи производит обработку водосодержащего объекта в чашке Петри. Одновременно с обработкой производится регистрация спектров свечения плазмы. Объект обработки и линза



**Рис. 2.** Применение устройства позиционирования для регистрации спектров свечения плазмы при одновременной обработке водосодержащего объекта. 1 — Активный элемент источника плазмы, 2 — плазменная струя, 3 — объект обработки, 4 — линза.

световода размещаются на разных предметных столиках, каждый из которых позволяет независимо позиционировать закрепленный объект в двух плоскостях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источники холодной плазмы атмосферного давления быстро приобретают все большее значение, поскольку они удобны в использовании, технологически просты и экологически чисты в задачах генерации активных форм кислорода и азота. Применение НТП может включать: модификацию поверхности, обеззараживание, стерилизацию и заживление ран. Рабочие режимы источника плазмы, особенно в медико-биологических приложениях, должны быть установлены в согласии с нормативными требованиями. По этой причине первоочередной задачей является характеристика и контроль параметров плазмы. В последнее время были разработаны и опробованы новые методы диагностики НТП, позволяющие получить характеристики, важные с точки зрения медицинских приложений. Одна из них — измерение электрического поля с помощью электрооптических кристаллов (эффект Погкельса) [17]. Несмотря на сложность такой диагностики, полученные данные важны для безопасного биомедицинского применения с потенциальным прямым воздействием плазмы. Разработанное в настоящей работе устройство позволяет с достаточной точностью получить, в том числе, информацию об электрических полях вокруг мишени на различных расстояниях, при этом минимизация воздействия полей на измерительную аппаратуру осуществляется путем помещения станда в клетку Фарадея.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников отдела физики плазмы и теоретического отдела ИОФ РАН за консультацию в процессе выполнения работы, в частности Л.В. Колика, Д.В. Малахова, Н.Г. Гусейн-заде.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00856.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gudkov S.V., Sarimov R.M., Astashev M.E. et al.* Modern Physical Methods and Technologies in Agriculture // *Phys. Usp.* 2024. V. 67. № 2. P. 194. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.09.039577>
2. *Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E. et al.* Advancements in Plasma Agriculture: A Review of Recent Studies // *IJMS.* 2023. V. 24. P. 15093. <https://doi.org/10.3390/ijms242015093>
3. *Adamovich I., Agarwal S., Ahedo E. et al.* The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. V. 55. № 373001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac5e1c>
4. *Konchekov E.M., Gudkova V.V., Burmistrov D.E. et al.* Bacterial Decontamination of Water-Containing Objects Using Piezoelectric Direct Discharge Plasma and Plasma Jet // *Biomolecules.* 2024. V. 14. P. 181. <https://doi.org/10.3390/biom14020181>
5. *Bruggeman P.J., Bogaerts A., Pouvesle J.M. et al.* Plasma–Liquid Interactions // *J. Applied Physics.* 2021. V. 130. P. 200401. <https://doi.org/10.1063/5.0078076>
6. *Gudkova V.V., Razvolyaeva D.A., Borzosekov V.D., Konchekov E.M.* Features of the FOX and Griess Method for Assessing the Biological Activity of Plasma Treated Solutions // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2024. V. 44. P. 305. <https://doi.org/10.1007/s11090-023-10418-8>
7. *Konchekov E.M., Kolik L.V., Danilejko Y.K. et al.* Enhancement of the Plant Grafting Technique with Dielectric Barrier Discharge Cold Atmospheric Plasma and Plasma-Treated Solution // *Plants.* 2022. V. 11. P. 1373. <https://doi.org/10.3390/plants11101373>
8. *Korzec D., Hoffmann M., Nettesheim S.* Application of Plasma Bridge for Grounding of Conductive Substrates Treated by Transferred Pulsed Atmospheric Arc // *Plasma.* 2023. V. 6. P. 139. <https://doi.org/10.3390/plasma6010012>
9. *Korzec D., Hoppenthaler F., Andres T., Guentner S., Lerach S.* Application of Nitrogen Piezoelectric Direct Discharge for Increase in Surface Free Energy of Polymers // *Plasma.* 2022. V. 5. P. 111. <https://doi.org/10.3390/plasma5010009>
10. *Hofmans M., Sobota A.* Influence of a Target on the Electric Field Profile in a kHz Atmospheric Pressure Plasma Jet with the Full Calculation of the Stark Shifts // *J. Applied Physics.* 2019. V. 125. № 043303. <https://doi.org/10.1063/1.5075544>
11. *Goldberg B.M., Hoder T., Brandenburg R.* Electric Field Determination in Transient Plasmas: In Situ & Non-Invasive Methods // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2022. V. 31. № 073001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac6e03>
12. *Orr K., Tang Y., Simeni Simeni M. et al.* Measurements of Electric Field in an Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet by the E-FISH Method // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. № 035019. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6e5b>
13. *Yang J., Barnat E.V., Im S., Go D.B.* Spatiotemporally Resolved Measurements of Electric Field around a Piezoelectric Transformer Using Electric-Field Induced Second Harmonic (E-FISH) Generation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. V. 55. № 225203. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac406a>
14. *Li X., Jin S., Song K. et al.* Temporal Electric Field of a Helium Plasma Jet by Electric Field Induced Second Harmonic (E-FISH) Method. // *Plasma Sci. Technol.* 2023. V. 25. № 015402. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac8419>
15. *Robert E., Sarron V., Riès D. et al.* Characterization of Pulsed Atmospheric-Pressure Plasma Streams (PAPS) Generated by a Plasma Gun // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012. V. 21. № 034017. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/3/034017>
16. *Mat Saman N., Ahmad M.H., Buntat Z.* Experimental Analysis of Cold Plasma With Glow Discharge Mechanism Under a Variety of Input Parameters // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2022. V. 50. P. 2110. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3176455>
17. *Nishiura M., Yoshida Z., Mushiake T. et al.* Electro-Optic Probe Measurements of Electric Fields in Plasmas // *Rev. Sci. Instrum.* 2017. V. 88. № 023501. <https://doi.org/10.1063/1.4974740>

## DEVICE FOR PRECISION POSITIONING OF LOW TEMPERATURE PLASMA SOURCES

**E. M. Konchekov<sup>a,\*</sup>, A. S. Konkova<sup>a</sup>, A. V. Knyazev<sup>a</sup>,  
Academician of the RAS A. P. Glinushkin<sup>a</sup>, S. V. Gudkov<sup>a,\*\*</sup>**

*<sup>a</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

In recent years, the application of low-temperature plasma in biomedical and agricultural research has attracted significant interest due to the plasma's ability to effectively sterilize, modify surfaces, and generate reactive oxygen and nitrogen species. Accurate positioning of plasma sources and characterization of source operating modes are primary tasks when implemented in real practice. This paper presents a universal device for positioning of plasma sources and measuring equipment. The device is manufactured by FDM 3D printing and has a relatively high structural strength in the absence of metal-containing elements. The developed device allows the active elements of plasma sources to be positioned with high accuracy over objects of various sizes and compositions, and also allows the implementation of sensitive methods for diagnosing plasma characteristics and parameters of processed objects.

*Keywords:* low-temperature plasma, plasma sources, measuring stand, 3D printing