

Research Paper

Effect of Electrode Configuration on Electrical and Thermal Characteristics of Cold Atmospheric Pressure Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Devices ¹

Mohammad Mahdi Aghamolaei^{2*}, Ali Hasanbeigi³ and

Fariborz Taghizadeh Kenazeh⁴

Received: 2024.09.04

Revised: 2024.09.28

Accepted: 2024.11.07

1. Introduction

Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) plasma devices, which operate at cold atmospheric pressures, have gained considerable attention in recent years due to their wide range of applications in material processing, environmental remediation, and medical treatments. The efficiency and performance of these devices are strongly influenced by the geometry of the electrodes used in their construction. Different electrode configurations can significantly alter the discharge characteristics, including power consumption, micro-discharge uniformity, and the thermal properties of the plasma.

This study explores the impact of various electrode geometries—specifically square, hexagonal, and circular configurations—on the performance of SDBD plasma devices. This research aims to provide insights into how the design of the electrodes affects the electrical and thermal characteristics of the plasma. The findings of this study are important for optimizing plasma device performance, particularly in applications where uniform discharge and low thermal production are critical. Understanding the relationship between electrode configuration and plasma behavior makes it possible to tailor these devices for more efficient and controlled applications in industrial and research settings.

2. Methodology

To evaluate the influence of electrode configuration on SDBD plasma performance, a series of experimental tests were conducted using devices

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.48194.1423>

¹ Selected Paper of the 11th Conference of Plasma Engineering and Physics of Plasma

² Instructor, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: m.ghamolaei@khu.ac.ir

³ Associate Professor, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: hbeigi@khu.ac.ir

⁴ M. Sc. Graduated, Institute for Plasma Research and Plasma Medicine, Kharazmi University, Tehran, Iran. Email: feri68feri68ft@gmail.com



designed with three different electrode shapes: square, hexagonal and circular. The SDBD devices were fabricated and tested at the Plasma Research Institute of Kharazmi University under controlled conditions. The experiments focused on three key performance metrics: (1) power consumption (2) uniformity of micro-discharges and (3) plasma production temperature. Power consumption was evaluated using a Lissajous curve, while the consistency of the micro-discharges (MD) was examined through visual observation. Furthermore, the temperature of the plasma was monitored utilizing a thermal camera system, which is a non-invasive method that allows for the accurate assessment of the plasma's thermal characteristics without disrupting its functioning. These models enhanced the comprehension of the influence that geometric factors, including the symmetry of the electrodes, have on the electrical and thermal behavior of the plasma.

3. Results and Discussion

The results indicate that electrode shape influences both discharge power and uniformity. One of the most significant findings is that the symmetry of electrode geometry influences the overall power consumption of the devices. Regarding, discharge uniformity, the circular electrode configuration outperformed the square and hexagonal designs. The balanced configuration of the circular electrode facilitates a more stable and consistent plasma discharge, minimizing fluctuations in the Micro-discharges that possess distinct characteristics. This outcome is especially significant in applications where uniformity is essential, such as surface treatment or material processing, as irregular plasma behavior can result in unfavorable results. Another key finding relates to plasma temperature. The circular electrode configuration consistently resulted in lower plasma production temperatures compared to the square and hexagonal configurations. This thermal characteristic of the circular configuration makes it particularly well-suited for applications where heat control is a priority.

4. Conclusion

This study highlights the significant role of electrode configuration in the performance of SDBD plasma devices. Although circular electrodes tend to consume more power, they offer superior discharge uniformity and lower plasma temperatures, which are critical for certain applications. In conclusion, the optimal electrode configuration depends on the specific needs of the application. Further research should focus on exploring other factors, such as voltage and frequency variations, which may also influence plasma characteristics. Additionally, the scalability of these findings to larger, industrial-scale plasma devices should be examined in future studies. Understanding these dynamics will pave the way for the design of more efficient and versatile SDBD plasma devices for a wide range of technological applications.

Keywords: *Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD), Electrode Geometry Configuration, Power Consumption, Plasma Uniformity.*

References

- [1] Bartis, E.A., Luan, P., Knoll, A.J., Graves, D.B., Seog, J. and Oehrlein, G.S., "A comparative study of biomolecule and polymer surface modifications by a surface microdischarge", *The European Physical Journal D* 70, 1-19, 2016. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2016-70123-5>.
- [2] Lloyd, G., Friedman, G., Jafri, S., Schultz, G., Fridman, A. and Harding, K., "Gas plasma: medical uses and developments in wound care", *Plasma Processes and Polymers* 7, 3-4, 194-211, 2010. <https://doi.org/10.1002/ppap.200900087>.
- [3] Yan, H., Yang, L., Qi, X. and Ren, C., "Improving thrust by pulse-induced breakdown enhancement in AC surface dielectric barrier discharge actuators for airflow control", *Journal of Physics D: Applied Physics* 49, 29, 295203, 2016. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/29/295203>.
- [4] Brandenburg, R., Bruggeman, P.J., Starikovskaia, S.M., "Fast pulsed discharges", *Plasma Sources Sci Technol.* 26(2), 020201, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa5377>.
- [5] Jeon, J., Rosentreter, T.M., Li, Y., Isbary, G., Thomas, H.M., Zimmermann, J.L., Shimizu, T., "Bactericidal agents produced by Surface Micro-Discharge (SMD) plasma by controlling gas compositions", *Plasma Process Polym.* 11(5), 426-436, 2014. <https://doi.org/10.1002/ppap.201300123>.
- [6] Wang, B., Liu, D., Zhang, Z., Li, Q., Wang, X. and Kong, M.G., "A new surface discharge source: plasma characteristics and delivery of reactive species", *IEEE Transactions on Plasma Science* 44, 12, 3295-3301, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2613964>.
- [7] Jeon, J., Klaempfl, T.G., Zimmermann, J.L., Morfill, G.E. and Shimizu, T., "Sporicidal properties from surface micro-discharge plasma under different plasma conditions at different humidities", *New Journal of Physics* 16(10), 103007, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/10/103007>.
- [8] Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J., "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", 2nd Edition, *Wiley-Interscience*, 2005.
- [9] Paschen, F., "Ueber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei 13 verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz", *Annalen der Physik.*, 273(5-14), 69-96, 1889. <https://doi.org/10.1002/andp.18892730505>.
- [10] Langmuir, I., "Oscillations in ionized gases", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 14(8), 627-637, 1928. <https://doi.org/10.1073/pnas.14.8.627>.
- [11] Lei, P., Kun, H., Qiaogen, Z., Chunliang, L., "Study on the characteristics of barrier free surface discharge driven by repetitive nanosecond pulses at atmospheric pressure", *PhysPlasmas.*, 23(5), 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4953807>.
- [12] Li, D., Liu, D., He, T., Li, Q., Wang, X., Kong, M.G., "Three distinct modes in a surface micro-discharge in atmospheric pressure He+ N2 mixtures", *Phys Plasmas.*, 22(12), 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4938209>.



تأثیر پیکربندی الکتروود بر مشخصه‌های الکتریکی و گرمایی دستگاه‌های پلاسما‌ی تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی فشار اتمسفری سرد^۱

محمد مهدی آقاملائی^{۲*}، علی حسن بیگی^۳ و فریبرز تقی‌زاده کنازه^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال پانزدهم، پیاپی ۴۰، بهار ۱۴۰۴

صص ۷ - ۱۴

چکیده:

پیکربندی هندسی الکتروود به صورت قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تخلیه تأثیر می‌گذارد. مقاله ارائه شده پویایی ساختارهای پلاسما‌ی تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی فشار اتمسفری سرد با پیکربندی‌های مربعی، شش ضلعی و دایروی ساخته شده در پژوهشکده پلاسما دانشگاه خوارزمی را نمایان می‌سازد و تأثیرات عمیق آن بر توان مصرفی دستگاه، یکنواختی میکرو تخلیه و دمای تولیدی پلاسما روشن می‌کند. افزایش تعداد نقاط گوشه‌ای الکتروود منجر به افزایش توان تخلیه شد. آزمایش‌ها نشان داد که یکنواختی میکرو تخلیه اتمسفری سد دی‌الکتریک سطحی به شدت تحت تأثیر ساختار قرار دارد و یکنواخت‌ترین تخلیه زمانی بدست می‌آید که پیکربندی الکتروود دایره‌ای باشد. افزون بر این، تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که پیکربندی‌های مختلف الکتروود می‌تواند دمای پلاسما را تغییر دهد، که در نهایت بر کاربرد این نوع از منابع تولیدی پلاسما‌ی سرد اتمسفری تأثیر می‌گذارد. به عنوان اصلی‌ترین نتیجه آزمایشات مشخص شد که دستگاه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با پیکربندی الکتروود دایره‌ای بیشترین توان مصرفی، یکنواخت‌ترین میکرو تخلیه و کم‌ترین دمای تولیدی را دارا می‌باشند.

واژگان کلیدی: تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی، پیکربندی هندسی الکتروود، توان مصرفی، یکنواختی

پلاسما.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.48194.1423>

^۱ مقاله منتخب یازدهمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما‌ی ایران

^۲ مربی، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: m.aghamolaei@khu.ac.ir

^۳ دانشیار، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. Email: hbeigi@khu.ac.ir

^۴ دانش آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. Email: fer168fer168ft@gmail.com



۱. مقدمه

تخلیه مانع دی الکتریک سطحی (SDBD^۱) می تواند برای تولید پلاسما در مقیاس بزرگ، دمای اتاق و در فشار اتمسفر استفاده شود که این دستگاهها دارای پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای مختلف چون پلاسما پزشکی، اصلاح مواد و آیرودینامیک هستند [۱-۳]. بیشتر راکتورهای SDBD از سه لایه تشکیل شده اند: یک الکتروود صفحه ای ولتاژ بالا (HV^۲)، یک صفحه دی الکتریک و یک الکتروود زمین [۴]. الکتروودهای متصل به زمین اغلب به شکل مربع، شش ضلعی یا دایره قرار می گیرند [۵-۷]. وقتی ولتاژ بالا روی الکتروود HV اعمال می شود، پلاسما روی سطح دی الکتریک سمت الکتروود زمین شده تولید می شود. در دستگاههای پلاسما تخلیه سد دی الکتریک سطحی هیچ شکافی بین هیچ یک از الکتروودها و سد دی الکتریک وجود ندارد. در نتیجه، تخلیه ها کمابیش توزیعی دوعدی را بر روی سطح مانع و در امتداد مرز الکتروودی که در معرض گاز اطراف باقی می ماند، بدست می آورند [۸]. مزایای اصلی پلاسما سطحی نسبت به سایر روش های تولید پلاسما، نیازمندی آن به مصرف انرژی کم، سفارشی سازی (طراحی و مقیاس پذیری)، عدم نیاز به جریان گاز، و از همه مهم تر توانایی تخلیه شبه کرونا برای کاربرد در بسیاری از زمینه های پلاسما است.

تولید پلاسما و گونه های واکنش پذیر آن تا حد زیادی به نوع منبع و کمیت های دستگاه پلاسما چون ساختار، جنس و هندسه الکتروود و دی الکتریک، توان ورودی (ولتاژ و بسامد)، نرخ جریان گاز در حال کار، دما، فاصله شکاف گاز و رطوبت هوا بستگی دارد [۸-۱۲].

اندازه گیری دقیق دمای پلاسما به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر واکنش های شیمیایی ناشی از تخلیه، یک کار بسیار مهم است. شواهد قانع کننده ای وجود دارد که نشان می دهد گرمای تولیدی در دی الکتریک می تواند سبب تغییر و ایجاد میکروورشته ها شود. پس اندازه گیری دقیق دما برای اطمینان از شرایط واکنش بهینه و نتایج تجربی قابل اعتماد ضروری است.

از این رو، SDBD باید بیشتر توسعه یابد تا توزیع یکنواخت پلاسما و گونه های فعال تولید شده را روی سطح هدف بدون اثرات نامطلوب ایجاد کند. تأثیر پیکربندی الکتروود بر ویژگی های پلاسما سطحی نامشخص است. این پژوهش برای روشن کردن تأثیرات مش بندی الکتروود بر توان مصرفی و توزیع یکنواخت میکروتخلیه های سطحی و همچنین دمای پلاسما تولیدی طراحی و عملی شده است. در این کار، سه دستگاه منبع پلاسما سطحی با ساختارهای مختلف مربعی، شش ضلعی و

¹ Surface Dielectric Barrier Discharge

² High Voltage



دایروی در پژوهشکده پلاسما و پلاسما پزشکی دانشگاه خوارزمی ساخته و استفاده شد (شکل (۱)). اثرات پیکربندی الکتروود بر توان تخلیه SDBD و یکنواختی میکروتخلیه‌های اتمسفری تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی (SDBAMD) آزمایش و بررسی شد و افزون بر این، دمای پلاسمای تولیدی هر دستگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



Figure 1 SDBD Plasma Devices
شکل ۱ دستگاه‌های پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی.

۲. مواد و روش‌ها

ویژگی‌های تخلیه به شدت به پیکربندی الکتروود بستگی دارد. با این حال، بینش در مورد تأثیر پیکربندی الکتروود بر پلاسمای سطحی بسیار کم است. به منظور روشن کردن تأثیر ساختار الکتروود بر توان مصرفی پلاسمای تولیدی، سه دستگاه تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با الگوهای مربعی، شش ضلعی و دایروی در آزمایشگاه پژوهشکده پلاسما دانشگاه خوارزمی طراحی و ساخته شدند. اندازه محیط داخلی به منظور برابری و قابل مقایسه بودن آزمایشات، یکسان و کاملاً برابر قرار داده شده‌اند. صفحات با ابعاد کلی ۱۲*۱۷ سانتی‌متر و اندازه الکتروود آن‌ها ۹*۱۳ سانتی‌متر در قسمت میانی دی‌الکتریک از جنس میکا ساخته شدند.

اندازه‌گیری دقیق و مطمئن ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی در اطمینان از تولید موفقیت‌آمیز پلاسما بسیار مهم است. ولتاژ ۱۰ کیلوولت قلّه به قلّه و بسامد ۵ کیلوهرتز برای تمامی آزمایشات ثابت و یکسان اعمال شد. با انجام دو بار تکرار در اندازه‌گیری و محاسبه، توان میانگین هر دستگاه بدست آمده و ثبت شد. یک روش برای محاسبه توان اتلافی یا مصرفی هر تخلیه مانع دی‌الکتریک این است که از مدار معادل (شکل (۲)) آن استفاده شود به صورتی که بار، $Q(t)$ ، در برابر ولتاژ،

$V(t)$ ، در یک سیکلوگرام شارژ-ولتاژ، یا همان نمودار Lissajous رسم شود که مساحت آن انرژی تلف شده در هر سیکل است. تمام اندازه‌گیری‌ها با استفاده از اسیلوسکوپ GPS-1072B صورت گرفت و نمودارهای لیسازو آن‌ها رسم شد (شکل ۳) تا تاثیر ساختار الکتروود بر توان مصرفی پلاسماهای سطحی با پیکربندی‌های مربعی، شش ضلعی و دایره‌ای اندازه‌گیری و مقایسه شوند.

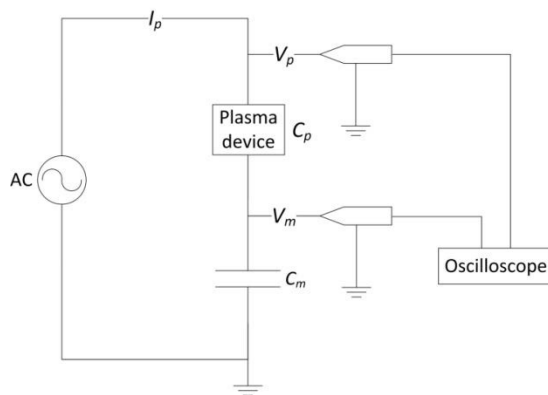


Figure 2 Equivalent circuit

شکل ۲ مدار معادل

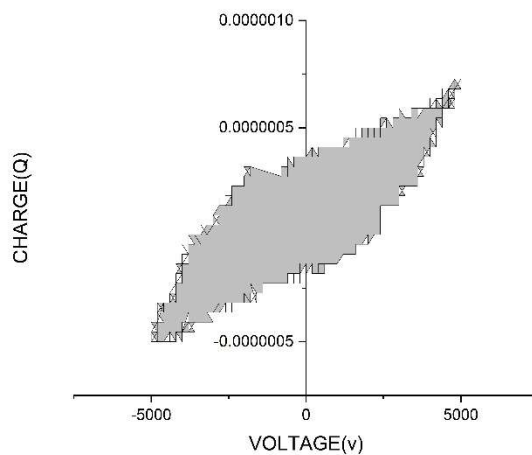


Figure 3 Lissajous figure

شکل ۳ نمودار لیسازو



همچنین در این پژوهش از دوربین حرارتی مادون قرمز TESTO 881 برای اندازه‌گیری دمای متوسط پلاسمای تولیدی با استفاده از سه ساختار متفاوت و مقایسه کمی و کیفی پلاسمای استفاده شد. دوربین‌های تصویربرداری حرارتی دستگاه‌هایی هستند که از فناوری مادون قرمز برای مشخص کردن بدون تماس، ضبط و نشان دادن توزیع دما روی سطوح یا اشیاء استفاده می‌کنند. از آنجا که گرمایش گاز در فرآیند فروکش کردن مولکول‌های برانگیخته ایجاد می‌شود، بیشینه افزایش دما در سطح در ناحیه پلاسمای رخ می‌دهد و در اطراف کاهش می‌یابد. افزایش دمای سطح در درجه اول ناشی از انتقال حرارت از گرمای باقیمانده در پلاسمای و سپس گرمای تولید شده به کمک تلفات دی‌الکتریک است.

۳. بحث

از راه تحلیل مقادیر بدست آمده با استفاده از آزمایشات، میانگین توان مصرفی برای هر شکل الکتروود محاسبه شد. توان مصرفی بدست آمده نشان دادند که الکتروودهای دایره‌ای به صورت متوسط بالاترین توان مصرفی را دارند (۳۲.۷۵ وات)، در حالی که الکتروودهای شش ضلعی و مربعی به ترتیب میانگین‌های ۱۵.۲۵ و ۱۴.۶۵ وات را نشان دادند (شکل ۴).

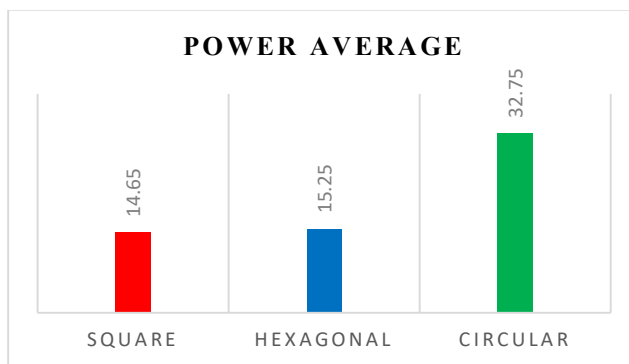


Figure 4 Power average of square, hexagonal and circular surface plasma devices

شکل ۴ نمودار میانگین توان مصرفی دستگاه‌های پلاسمای سطحی مربعی، شش ضلعی و دایره‌ای.

این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از توزیع میدان الکتریکی متفاوتی باشد که هر شکل الکتروود تولید می‌کند. در شکل‌های دایره‌ای، میدان الکتریکی ممکن است بیشتر به صورت یکنواخت توزیع شود و این امر سبب می‌شود که انرژی بیشتری به گاز وارد شود. از این رو، پلاسمای یکنواخت بیشتری

تولید کند که این نشان می‌دهد که یک رابطه مثبت قوی بین شکل الکتروود و توان مصرفی وجود دارد. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که الکتروودهای با سطح لبه الکتروود صاف‌تر (چون دایره‌ای که گوشه ندارد یا در حقیقت، می‌توان گفت که چندضلعی با بی‌نهایت گوشه است) می‌توانند به دلیل توزیع بهینه و یکنواخت‌تر میدان‌های الکتریکی، توان بیشتری تولید کنند. همچنین الگوی مربعی و شش‌ضلعی دارای گوشه‌هایی است که با تلنبار شدن بار در این نقاط، میدان الکتریکی را تشدید می‌کنند و این سبب می‌شود پلاسما ترجیحاً در اطراف آن‌ها و در قسمت میانی لبه‌های هر ضلع اشکال تشکیل شود.

در خصوص دمای تولیدی نیز جدول زیر (جدول (۱)) میانگین دمای کل هر ساختار الکتروود را نشان می‌دهد. مشخص است که الکتروود مربع دارای بالاترین دمای متوسط است و به دنبال آن الکتروود شش‌ضلعی و سپس دایره‌ای قرار می‌گیرد. این می‌تواند تفاوت‌هایی را در روش انتقال انرژی هر شکل به گاز اطراف جهت تولید پلاسما نشان دهد. همچنین می‌توان فهمید که هر چه تعداد گوشه‌ها یعنی نقاط تجمع بار کمتر باشد، دمای دستگاه بیشتر است.

جدول ۱ دمای میانگین دستگاه‌های پلاسمای سطحی مربعی، شش‌ضلعی و دایروی.

Table 1 average temperature of square, hexagonal and circular surface plasma devices

Electrode	Average temperature
square	44.83
hexagonal	42.83
circular	41.16

جدول دمایی نشان می‌دهد که پیکربندی مربعی ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به انرژی حرارتی بالا دارند، ترجیح داده شود. به صورت مقابل، ساختار شش‌ضلعی، در حالی که دماهای متوسط میانه‌ای نشان داد، عملکرد متعادلی ارائه داد که ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به حرارت متوسط با درجه‌ای از ثبات دارند، مناسب باشد.

ساختار دایروی، با ارائه پایین‌ترین دماهای متوسط می‌تواند برای فرآیندهایی که نیاز به تأثیر حرارتی کمتری دارند نظیر کاربردهای زیست‌شناختی، برتری داشته باشد، و عمیق‌ترین و کنترل‌شده‌ترین محیط حرارتی را در میان سه ساختار مورد مطالعه ارائه دهد.



۴. نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که دستگاه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی با پیکربندی الکتروود دایره‌ای بیشترین توان مصرفی، یکنواخت‌ترین میکروتخلیه و کم‌ترین دمای تولیدی را دارا می‌باشد. این امر به دلیل بهینه‌سازی طراحی دایروی و نداشتن نقاط گوشه‌ای که سبب تجمع بار و تقویت میدان الکتریکی می‌شوند، می‌باشد که سبب می‌شود انرژی به صورت موثرتری به پلاسمای تبدیل شود و در نتیجه توان بیشتری تولید کند. همچنین ساختارهای دایروی می‌توانند میکروتخلیه‌های یکنواخت و توزیع پلاسمایی همگن‌تری تولید کنند. توان مصرفی بالاتر و یکنواختی پلاسمای تولیدی در کنار دمای پایین ساختار دایروی می‌تواند آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی چون پزشکی و صنعت تبدیل کند.

۵. تقدیر و تشکر

تشکر از استاد دانشمند و پرمایه‌ام ریاست محترم پژوهشکده پلاسمای جناب آقای دکتر حسن مهدیان که از محضر پر فیض علمشان، بهره‌ها برده‌ام و شرایط را برای بهره‌مندی از امکانات و تجهیزات پژوهشکده فراهم نمودند. با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه جناب آقای دکتر کمال حاجی شریفی و مهندس مهدی بخش‌زاد محمودی که با راهنمایی‌ها و کمک‌های این بزرگواران مسیر انجام تحقیقات هموارتر گردید.

منابع

- [1] Bartis, E.A., Luan, P., Knoll, A.J., Graves, D.B., Seog, J. and Oehrlein, G.S., "A comparative study of biomolecule and polymer surface modifications by a surface microdischarge", *The European Physical Journal D* 70, 1-19, 2016. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2016-70123-5>.
- [2] Lloyd, G., Friedman, G., Jafri, S., Schultz, G., Fridman, A. and Harding, K., "Gas plasma: medical uses and developments in wound care", *Plasma Processes and Polymers* 7, 3-4, 194-211, 2010. <https://doi.org/10.1002/ppap.200900087>.
- [3] Yan, H., Yang, L., Qi, X. and Ren, C., "Improving thrust by pulse-induced breakdown enhancement in AC surface dielectric barrier discharge actuators for airflow control", *Journal of Physics D: Applied Physics* 49, 29, 295203, 2016. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/29/295203>.
- [4] Brandenburg, R., Bruggeman, P.J., Starikovskaia, S.M., "Fast pulsed discharges", *Plasma Sources Sci Technol.* 26(2), 020201, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa5377>.
- [5] Jeon, J., Rosentreter, T.M., Li, Y., Isbary, G., Thomas, H.M., Zimmermann, J.L., Shimizu, T., "Bactericidal agents produced by Surface Micro-Discharge (SMD) plasma by



- controlling gas compositions", *Plasma Process Polym.*11(5), 426-436, 2014. <https://doi.org/10.1002/ppap.201300123>.
- [6] Wang, B., Liu, D., Zhang, Z., Li, Q., Wang, X. and Kong, M.G., "A new surface discharge source: plasma characteristics and delivery of reactive species", *IEEE Transactions on Plasma Science* 44, 12, 3295-3301, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2613964>.
- [7] Jeon, J., Klaempfl, T.G., Zimmermann, J.L., Morfill, G.E. and Shimizu, T., "Sporicidal properties from surface micro-discharge plasma under different plasma conditions at different humidities", *New Journal of Physics* 16(10), 103007, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/10/103007>.
- [8] Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J., "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", 2nd Edition, Wiley-Interscience, 2005.
- [9] Paschen, F., "Ueber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei 13 verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz", *Annalen der Physik.*, 273(5-14), 69-96, 1889. <https://doi.org/10.1002/andp.18892730505>.
- [10] Langmuir, I., "Oscillations in ionized gases", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 14(8), 627-637, 1928. <https://doi.org/10.1073/pnas.14.8.627>.
- [11] Lei, P., Kun, H., Qiaogen, Z., Chunliang, L., "Study on the characteristics of barrier free surface discharge driven by repetitive nanosecond pulses at atmospheric pressure", *PhysPlasmas.*, 23(5), 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4953807>.
- [12] Li, D., Liu, D., He, T., Li, Q., Wang, X., Kong, M.G., "Three distinct modes in a surface micro-discharge in atmospheric pressure He+ N2 mixtures", *Phys Plasmas.*, 22(12), 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4938209>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

