

DISEÑO DE UNA FUENTE PULSADA ELEVADORA DE VOLTAJE, APLICADA AL TRATAMIENTO DE POLÍMEROS EMPLEADOS EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES EN SOLUCIONES ACUOSAS

Balderas Gutiérrez Juan Nabor

Ibañez Olvera Mario

Villanueva Castañeda Miguel

Jaramillo Sierra Bethsabet

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: El presente trabajo describe el diseño de una fuente pulsada de alto voltaje en configuración flyback, capaz de operar en un rango de frecuencia de 500 Hz – 50 kHz, y voltaje superior a 1.5 kilo voltios. La fuente se diseñó a partir del circuito de control SG3524 capaz de operar a alta frecuencia y generar el pulso de control deseado, el cual se acopla al circuito reforzador de corriente TC4422 para evitar deflexiones de voltaje y corrientes inversas. Cabe mencionar que, el incremento del voltaje se lleva a cabo mediante un transformador elevador con relación 1:20, implementado en un núcleo de ferrita para evitar corrientes parasitas y la saturación del núcleo al trabajar a altas frecuencias. La fuente fue empleada en la generación de plasma de descarga luminiscente a presión atmosférica. El sistema se utilizó en el tratamiento de material polimérico (esferas y películas) de quitosano, material empleado en la remoción de colorantes azoicos de soluciones acuosas, con altas expectativas. Pudo observarse que el material tratado bajo plasma incrementa su capacidad de adsorción en comparación al material sin modificar a pH cercanos al neutro entre 4-6. Así mismo, la fuente fue aplicada directamente a la degradación de algunos colorantes azoicos los cuales son altamente perjudiciales al organismo de los seres vivos, mostrando una gran capacidad de degradación.

Palabras clave: Fuente pulsada, plasma luminiscente, tratamiento de polímeros, degradación de colorantes.

INTRODUCCIÓN

Los convertidores estáticos de semiconductores permiten transformar una señal eléctrica de corriente directa a una señal eléctrica de corriente alterna o pulsada con magnitud y frecuencia controlable mediante la conmutación adecuada de los transistores que lo conforman. Por otra

parte, los convertidores eléctricos son ampliamente empleados en aplicaciones tales como: equipos de tratamiento térmico por autoinducción, excitadores de lámparas de gas para iluminación, sistemas para ablación, tratamientos superficiales, degradación de colorantes contaminantes, entre otros, sin embargo este tipo de sistemas presentan pérdidas por conmutación, debido a que los pulsos de conmutación durante la transición ON-OFF de los transistores no son controlados de manera apropiada, lo que provoca que los pulsos se traslapen existiendo pérdidas por conmutación en el sistema.

Las fuentes tradicionalmente más utilizadas para descargas eléctricas pulsadas de alta energía se encuentran generalmente constituidas por transformadores elevadores de gran tamaño y peso, circuitos de control, rectificadores y bancos de capacitores. Debido a esto, las fuentes resultan ser voluminosas, no portátiles y se requiere de gran cuidado y precauciones para su manejo [1, 2]. Dichos sistemas, por lo general no incluyen circuitos de retroalimentación ni amplificador de error, lo cual no permite que el sistema sea capaz de autoajustarse para corregir el voltaje de salida al nivel deseado. Cuando se presentan picos transitorios en la red de alimentación el voltaje de carga en los capacitores se eleva haciendo que se produzcan descargas espontáneas no deseables lo que se debe al sobre almacenamiento de energía en estos [2, 3].

Las fuentes conmutadas son capaces de producir voltajes de salida inferiores o superiores al voltaje suministrado, haciéndolos versátiles y mejor adaptables a voltajes de entrada variable. La eficiencia de este tipo de sistemas se debe principalmente al control adecuado del ciclo de trabajo (ancho de pulso) del pulso de disparo, con el cual puede regularse la energía requerida demandada por la carga. A partir de dicha

característica las fuentes conmutadas alcanzan eficiencias de más del 90 % y el calor disipado se debe a las características no ideales de los componentes pasivos. Algunas desventajas de este tipo de fuente son su complejidad y la generación de ruido eléctrico al trabajar a alta frecuencia el cual debe ser minimizado para evitar interferencia a equipos próximos a estos, por lo que se implementan circuitos pasivos supresores de picos [2, 3, 4]. La técnica por modulación de ancho de pulso garantiza el buen funcionamiento de este tipo de convertidores, con lo cual puede garantizarse una mayor eficiencia y mejor transferencia de potencia entregada hacia la carga a través de la variación del ancho de pulso. Por otra parte, las fuentes conmutadas empleadas en convertidores de voltaje consiguen elevado rendimiento al trabajar a altas frecuencias, mediante el estudio apropiado del transformador elevador y su comportamiento al ser implementado en núcleo de ferrita para evitar la saturación de este al trabajar a alta frecuencia.

Las fuentes pulsadas de alto voltaje generadoras plasma a presión atmosférica tipo jet (APPJ), así como las fuentes de descarga de barrera dieléctrica (DBD), son empleadas en distintas aplicaciones, tales como: investigación sobre el mecanismo de degradación de piridina en agua potable por DBD [5], el análisis estructural y funcional de la lisozima después del tratamiento con DBD y APPJ [6], en la degradación colorantes azoicos utilizando DBD [7, 8, 9], el mejoramiento de las propiedades del coque por DBD empleado en el tratamiento de aguas residuales [10], Aplicación DBD para el almacenamiento de alimentos [11], en estudio espectral de gases nobles ionizados [12], en desinfección del aire [13], en la inactivación de microorganismos en alimentos [14], entre otras aplicaciones.

Recientemente, el campo de la física de plasmas se ha expandido significativamente

a un sinnúmero de aplicaciones. La polimerización por plasma, es un procedimiento útil para producir películas poliméricas, nanopartículas, que se forman por reacciones en fase gaseosa dentro del reactor [15-22]. La modificación de superficies con plasma es una técnica de tratamiento efectiva y económica para muchos biomateriales, así como la aplicación al área de la medicina. La ventaja de la modificación por plasma es que las propiedades de la superficie y la biocompatibilidad pueden aumentar selectivamente mientras que los materiales permanecen sin cambios [24-26]. Por otra parte, los sistemas generadores de plasma de descarga luminiscente han sido aplicados a otras áreas tales como la medicina en el tratamiento de material quirúrgico, el tratamiento de lesiones y diferentes enfermedades de la piel, como cicatrización de heridas, ingeniería de tejidos o tratamiento de tumores, la regeneración tisular guiada y en una multitud de patologías, siendo un área extremadamente prometedora [27-29]. La base científica de la medicina de plasma se basa fundamentalmente en los mecanismos de interacción del plasma con células y tejidos vivos [30]. Para lograr efectos eficientes y evitar riesgos potenciales al trabajar con voltajes elevados es necesario controlar la composición y la densidad de los componentes del plasma mediante parámetros de funcionamiento externo. Sin embargo, deben realizarse pruebas preliminares para minimizar el riesgo y proporcionar un fundamento científico para las terapias médicas [31,32].

PARTE EXPERIMENTAL

La presente investigación describe el diseño y puesta en funcionamiento de una fuente pulsada elevadora de voltaje en configuración Flyback trabajando en modo discontinuo. El control apropiado del voltaje de salida se logró a través del ajuste del ciclo

de trabajo para mayor seguridad del operario. Mediante el diseño apropiado del circuito de control se generan pulsos cuadrados complementarios de frecuencia controlable, los cuales son acoplados adecuadamente proporcionando un tren de pulsos con ciclo de trabajo ajustable para el control adecuado de la fuente elevadora de voltaje. El tren de pulsos es aplicado directamente a uno de los extremos del devanado primario del transformador elevador con la ayuda de un transistor MOSFET IRFP 640, mientras que, el otro extremo se conecta directamente al suministra voltaje de corriente continua, lo que hace posible el control de voltaje en el devanado secundario del transformador, que depende del ajuste del ciclo de trabajo (ancho de pulso). La fuente generadora de plasma es utilizada en la obtención de películas delgadas de polipirrol y polipirrol dopadas con yodo, y primordialmente en el tratamiento de esferas y películas de quitosano, utilizadas en procesos de adsorción de colorantes azoicos. El sistema es capaz de trabajar con diferentes geometrías de reactor, en sistemas al vacío y descargas de plasma en medios acuosas a presión atmosférica. El siguiente diagrama figura 1, muestra un diagrama de bloques del sistema de tratamiento.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El funcionamiento adecuado de la fuente se logró mediante la técnica de modulación por ancho de pulso, logrando así el control adecuado del suministro de voltaje de la fuente hacia la carga, por lo que no se requiere de circuitos externos como la red snubber que ayuda a la conmutación del transistor evitando transitorios eléctricos indeseables, así como a la disipación de potencia debido a que esta técnica permite el control adecuado del transistor a través del ciclo de trabajo adecuado.

La implementación del circuito de control

se logró mediante el circuito integrado SG3524 capaz de generar un tren de pulsos ajustables de alta frecuencia. Por otra parte, el dispositivo primordial de la etapa de potencia de la fuente elevadora de voltaje en configuración flyback en la cual se omitió el filtro de salida, es un transformador elevador de voltaje con relación 1:20, que fue diseñado e implementado tomando en cuenta los parámetros requeridos como frecuencia de trabajo y demanda de potencia de la carga (reactor).

La fuente, es aplicada principalmente al tratamiento de materiales poliméricos (esferas y películas de quitosano) figura 2, que son utilizados en la remoción de colorantes azoicos de medios acuosos, logrando obtener mejores resultados en la remoción de este tipo de contaminantes a pH cercanos al neutro entre 4-7, con el material tratado en comparación al material sin tratamiento. Cabe mencionar que, la fuente ha sido utilizada en la generación de películas delgadas de polipirrol y polipirrol dopadas con yodo las cuales han sido probadas como celdas solares orgánicas.

Se eligió la topología en configuración flyback debido al requerimiento de potencia para realizar descargas de plasma luminiscente a presión atmosférica en medios acuosos. La técnica de control por modulación de ancho de pulso se seleccionó con el fin de controlar adecuadamente la variación de potencia suministrada hacia la carga (reactor) disminuyendo así pérdidas de disipación de potencia, con lo que se propusieron los siguientes puntos.

1. A partir del circuito integrado SG3524 se genera un tren de pulsos ajustables a partir del ciclo de trabajo al que se desea trabajar, con el fin de garantizar el control adecuado de la compuerta del transistor MOSFET IRFP640 que está acoplado al devanado primario del transformador elevador de voltaje en

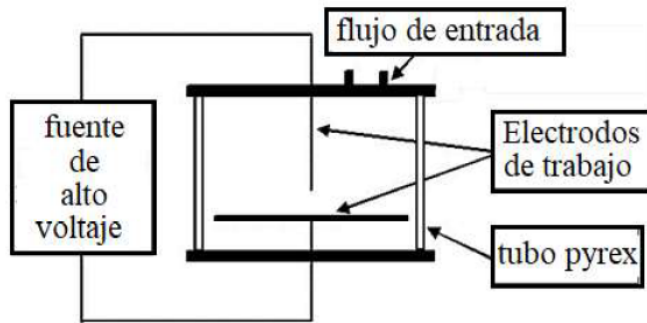


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de tratamiento.



Figura 2. Tratamiento de polímeros a) esferas y b) películas de quitosano en medio acuoso

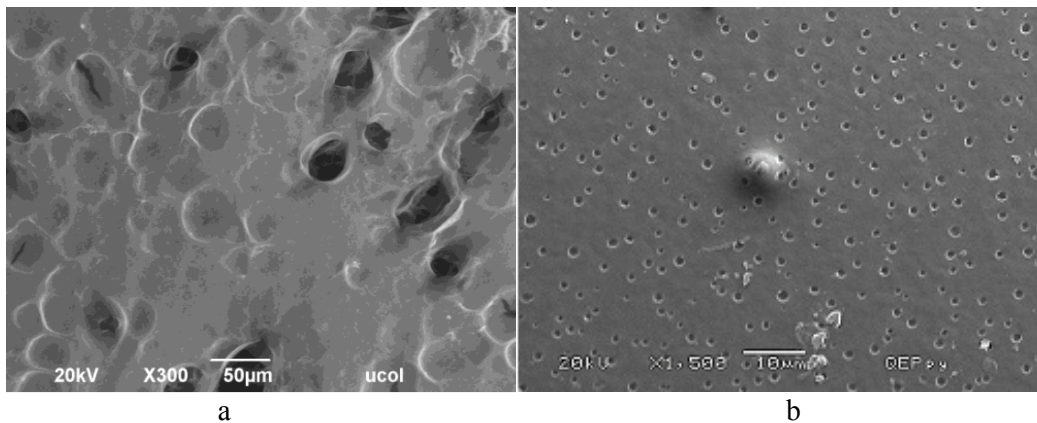


Figura 3. Incremento de la Porosidad de las esferas (a) y películas de quitosano (b).

configuración de conmutación inferior.

2. El tren de pulsos obtenido del circuito de control es acoplado de manera apropiada al circuito reforzador de corriente TC4422 que posee la capacidad de soportar un pico inverso de corriente de hasta 9 Amperios al encendido de la fuente evitando así corrientes y/o voltajes inversos hacia el circuito de control para evitando su destrucción.

Las películas y esferas de quitosano fueron expuestas a diferentes tiempos de tratamiento bajo plasma de descarga luminiscente con la finalidad de corroborar el efecto de la descarga en el material al ser utilizado en procesos de adsorción de colorantes azoicos. Para el tratamiento de las esferas de quitosano se utilizó una solución de sulfato de sodio 1 Molar como medio de conducción y los tiempos de tratamiento fueron 20, 40, 60 y 90 minutos, mientras que para las películas se utilizaron dos soluciones, una de sulfato de sodio 1 Molar y otra de sulfato de sodio-pirrol 1 Molar, sobre la cual se hizo incidir la descarga de plasma luminiscente con tres tiempos diferentes de tratamiento que fueron 20, 40 y 60 min. Las películas, así como las esferas tratadas en solución acuosa de sulfato de sodio, presentan mejor capacidad de adsorción al aumentar el tiempo de exposición al plasma. Este efecto se atribuye a que existe un proceso de ablación en la matriz polimérica del material que causa un incremento de su porosidad como se muestra en la figura 3, y al mismo tiempo se logra un incremento de los grupos amino que son los encargados principalmente del proceso de adsorción.

Con la finalidad de corroborar el funcionamiento apropiado del sistema en la generación de plasma se realizó una prueba de barrido de frecuencia a tensión de entrada fija “”, con lo que se logró mantener una descarga estable de plasma a presión atmosférica en

el intervalo de frecuencia de , manteniendo una demanda de corriente de durante la descarga. Por otra parte, para el tratamiento de los materiales se utilizó un voltaje de entrada de 25 Vcd y una corriente de 700 mA en corriente directa en la entrada del sistema, mientras que la descarga en el reactor durante el tratamiento se mantuvo a un voltaje de 1.3 kV y una corriente de 1.7 Amperios. El tratamiento del material polimérico se realiza haciendo incidir la descarga de plasma sobre la superficie de la solución acuosa en la cual se encuentran inmersas las muestras del material polimérico.

Las películas tratadas en solución acuosa de sulfato de sodio-pirrol presentan mejor capacidad de adsorción a un tiempo de tratamiento de 20 min, lo que puede atribuirse principalmente a que en un principio las moléculas de pirrol son aceleradas con mayor velocidad por el campo eléctrico e impactadas en las películas generando poros en la superficie de las mismas. Por otra parte, al aumentar el tiempo de tratamiento utilizando esta solución, la matriz polimérica aumenta ligeramente su peso molecular, lo que se atribuye a que el pirrol es polimerizado con mayor proporción dentro de la matriz polimérica de quitosano, lo que hace que el material disminuya ligeramente su capacidad de adsorción.

Por otra parte, cabe mencionar que el sistema se utilizó en la obtención de películas de polipirrol y polipirrol dopadas con yodo, lo cual se logró dentro de un reactor de geometría cilíndrica con un volumen igual a 3375 cm^3 , que se acoplo a una bomba mecánica rotatoria para la generación de vacío. En el interior del reactor se encuentran dos electrodos de acero inoxidable con diámetro de 6.5 cm, que varían la capacitancia del reactor al ser ajustados a la distancia requerida para la obtención de las películas. Cabe señalar que, cada uno de los electrodos está eléctricamente conectado a

las terminales del transformador elevador de voltaje con relación 1:20, los cuales soportan la misma diferencia de potencial suministrada por la fuente, como se muestra en la figura 4.

El sistema fue utilizado en descargas de plasma luminiscente con diferentes topologías de reactores como puede observarse en la figura 5.

CONCLUSIONES

Se diseñó una fuente de alto voltaje capaz de generar plasma de descarga luminiscente en diferentes geometrías de reactor. El sistema generador de plasma es controlado a partir del circuito integrado MC34067A generador de los pulsos de disparo que garantiza la conmutación del transistor a cero voltajes logrando así disminuir pérdidas de potencia por conmutación.

Se logro la estabilidad del pulso de disparo al ser acoplado al circuito integrado TC 4422 reforzador de corriente, que posee la capacidad de soportar un pico de corriente de hasta 9 A al encendido de los transistores y mantener

una corriente continua de 2 A en operación. El sistema opera de manera adecuada en un rango de frecuencia de 500 Hz – 50 kHz, con diferentes geometrías de reactor.

Las películas obtenidas de polipirrol y polipirrol dopadas con yodo se les realizaron estudios de biocompatibilidad con la finalidad de ser aplicados a músculos artificiales, así como pruebas preliminares para su aplicación a celdas solares. El incremento del tamaño y grosor de las películas depende de la cantidad de reactivo suministrado al reactor, la velocidad de flujo de los monómeros, el tiempo de exposición, la frecuencia de operación, así como del voltaje y la corriente de trabajo.

El modelo capacitivo del reactor conectado en paralelo al devanado secundario del transformador permitió ajustar la distancia entre los electrodos de trabajo, lo cual permite variar la capacitancia del sistema al trabajar en diversos rangos de frecuencia.



figura 4. Descarga luminiscente en el reactor (a) y películas de polipirrol y polipirrol dopadas con yodo (b).

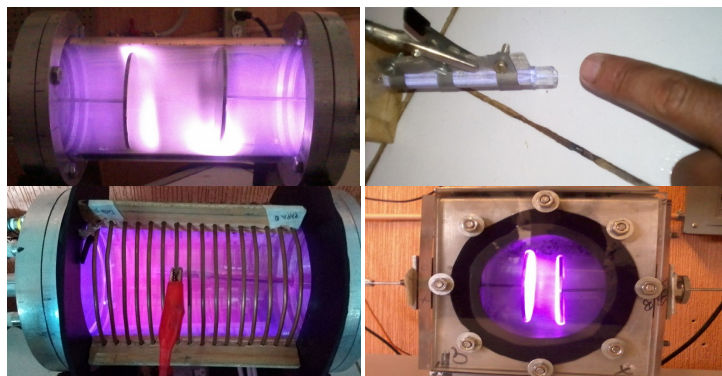


Figura 5. Descargas de plasma luminiscente en diferente topología de reactor.

REFERENCIAS

- [1] N. Mohan, T.M. Undeland y W.P. Robbins, (1995), *Power Electronics. Converters, Applications and Design*, 2da ed., John Wiley & Sons, Inc.
- [2] J.G. Kassakian, M.F. Schlecht y G.C. Verghese, "Principles of Power Electronics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1992.
- [3]. Muhammad H. Rashid. (1995). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 2da, ed, Prentice Hall.
- [4] R.W. Erikson, "Fundamentals of Power Electronics", Kluwer Academic Publishers KAP, 1997.
- [5] Y. Li, R. Yi, C. Yi, B. Zhou, and H. Wang, "Research on the degradation mechanism of pyridine in drinking water by dielectric barrier discharge," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 53, pp. 238–247, 2017.
- [6] S. Choi et al., "Structural and functional analysis of lysozyme after treatment with dielectric barrier discharge plasma and atmospheric pressure plasma jet," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 1027, 2017.
- [7] B. Wang, B. Dong, M. Xu, C. Chi, and C. Wang, "Degradation of methylene blue using double-chamber dielectric barrier discharge reactor under different carrier gases," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 168, pp. 90–100, 2017.
- [8] "03 2017 Degradation of methylene blue using double-chamber dielectric barrier.pdf".
- [9] P. Attri et al., "Mechanism and comparison of needle-type non-thermal direct and indirect atmospheric pressure plasma jets on the degradation of dyes," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. August, pp. 1–14, 2016.
- [10] L. Duan, J. Li, K. Shang, L. Na, and Y. Wu, Enhanced biodegradability of coking wastewater by gas phase dielectric barrier discharge plasma, vol. 154. 2015.
- [11] Y. Bellebna, R. Ouidir, S. Nemnich, A. Tilmatine, "Application of dielectric surface barrier discharge for food storage" *Leonardo Journal of Sciences*, p. 17-28, 2015.
- [12] J. C. Alvarez and U. Atlántico, "Diseño y construcción de una fuente de descargas pulsadas de alto voltaje para estudio espectral de gases nobles ionizados," no. July 2014, 2006.
- [13] Y. Bellebna and A. Tilmatine, "Application of Dielectric Surface Barrier Discharge for Air Disinfection," vol. 13, no. 3, pp. 22–26, 2013.
- [14] D. Butscher, H. Van Loon, A. Waskow, P. Rudolf von Rohr, and M. Schuppler, "Plasma inactivation of microorganisms on sprout seeds in a dielectric barrier discharge," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 238, pp. 222–232, 2016.
- [15] F. G. İNCE, S. ŞEN, Z. ÖZBEK, H. GÖKTAŞ, M. E. ÖZE, R. ÇAPAN. Fabrication of plasma polymerized polythiophene and polypyrrole thin films as chloroform vapor sensors. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 11, No. 9, 1182 – 1185, 2009.
- [16] G.J. Cruz, J. Morales, R. Olayo. Films obtained by plasma polymerization of pyrrole. *Thin Solid Films* 342, 119-126. 1999.
- [17] B. Paosawatyanong, K. Tapaneeyakorn, W. Bhanthumnavin, AC plasma polymerization of pyrrole, *Surface & Coatings Technology* 204, 3069–3072, 2010.
- [18] Boonchoat Paosawatyanong, KanyaTapaneeyakorn, Worawan Bhanthumnavin, "AC plasma polymerization of pyrrole", *Surface and Coatings Technology*, Volume 204, Issues 18–19, 3069-3072, 2010.
- [19] S. Yakut, K. Ulutas, and D. Deger, "Plasma discharge power dependent AC conductivity of plasma poly (ethylene oxide) thin films", *Thin Solid Films*, vol. 645, no. October 2017, pp. 269–277, 2018.

- [20] S. Yakut, H. K. Ulutas, I. Melnichuk, A. Choukourov, H. Biederman, and D. Deger, "Dielectric properties of plasma polymerized poly (ethylene oxide) thin films", *Thin Solid Films*, vol. 616, pp. 279–286, 2016.
- [21] G.J. Cruz, J. Morales, R. Olayo. "Films obtained by plasma polymerization of pyrrole", *Thin Solid Films* 342, 119-126, 1999.
- [22] B. Paosawatanyong, K. Tapaneeyakorn, W. Bhanthumnavin, "AC plasma polymerization of pyrrole", *Surface & Coatings Technology*, 204, 3069–3072, 2010.
- [23] Chu PK, Chen JY, Wang LP, et al. Plasma-surface modification of biomaterials. *Mat Sci Engng R Reports*; 36:143 e 206. 2002.
- [24] Weltmann DK, Von Woedtke T. Basic requirements for plasma sources in medicine. *Eur Phys J Appl Phys*; 55:13807. 2011.
- [25] P. K. Chu, J. Y. Chen, L. P. Wang, and N. Huang, "Plasma surface modification of biomaterials", *Mat. Sci. Eng. R*, vol. 36, no. 5, pp. 143–206, 2002.
- [26] M. Laroussi, "Low-Temperature Plasmas for Medicine", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 714–725, 2009.
- [27] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, "Applied plasma medicine", *Plasma Process. Polymer*, vol. 5, no. 6, pp. 503–533, 2008.
- [28] G. E. Morfill, M. G. Kong, and J. L. Zimmermann, "Focus on plasma medicine", *New J. Phys.*, vol. 11, 2009.
- [29] K. D. Weltmann, E. Kindel, T. von Woedtke, M. Hähnel, M. Stieber, and R. Brandenburg, "Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine", *Pure Appl. Chem.*, vol. 82, no. 6, pp. 1223–1237, 2010.
- [30] M. Kuchenbecker, N. Bibinov, A. Kaemling, D. Wandke, P. Awakowicz, and W. Viöl, "Characterization of DBD plasma source for biomedical applications", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 4, 2009.
- [31] K. Weltmann, T. Von Woedtke, K. Weltmann, and T. Von Woedtke, "Basic requirements for plasma sources in medicine", HAL Id: hal-00719809, vol. 55, no. 1, 2012.
- [32] K. D. Weltmann and T. von Woedtke, "Basic requirements for plasma sources in medicine," *Eur. Phys. J. Appl. Phys*, vol. 55, no. 1, p. 13807, 2011.