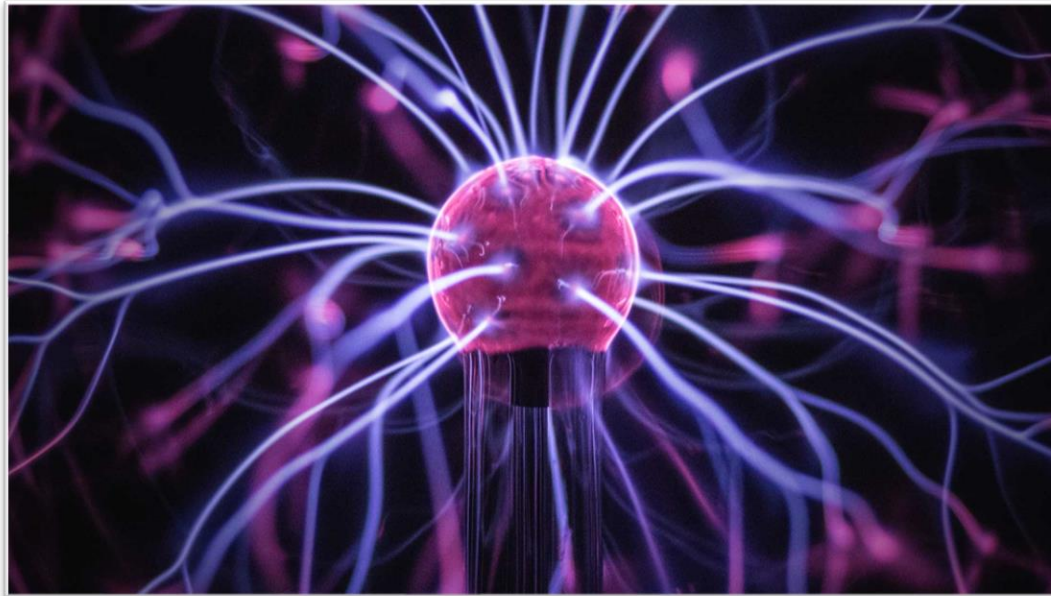


Avances en la utilización del plasma frío para la obtención de materiales conductores

Advances in the use of cold plasma for obtaining conductive materials



Recuperado de:

https://www.researchgate.net/post/How_can_chemical_equations_be_coupled_with_fluent_to_simulate_ionization_of_airflow

Pablo Alexis Flores-Soto¹, Francisco José González-González¹, Gustavo Soria-Arguello², Felipe de Jesús Elizalde-Herrera¹, Rosa Idalia Narro-Cespedes^{1*}

¹Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas Blvd. Venustiano Carranza y José Cárdenas Valdés. C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

²Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. No. 140, San José de los Cerritos, 25294 Saltillo, Coahuila, México.

Correo electrónico: rinarro@uadec.edu.mx

Resumen

Se analizó la literatura especializada sobre la modificación superficial de nanocompuestos y materiales híbridos sintetizados mediante tecnología de plasma frío donde se modificaron propiedades específicas. La tecnología de plasma es una herramienta muy versátil, eficiente y amigable con el medio ambiente, por lo cual su estudio se ha incrementado en esta década ya que permite modificar una gran cantidad de materiales para distintas aplicaciones. Esta tecnología puede ser utilizada con diferentes gases inertes, reactivos y monómeros, en una amplia gama de matrices poliméricas. Para el desarrollo de nanocompuestos con conductividad eléctrica, el polipirrol está entre los polímeros más utilizados como refuerzo debido a sus propiedades conductoras, así mismo, el yodo es el dopante que más se emplea gracias a que refleja excelentes resultados en la conducción eléctrica en la matriz en donde se añade.

Palabras clave: *Polimerización por plasma, Modificación superficial por plasma, Plasma frío, Nanocompuestos con conductividad eléctrica, Materiales poliméricos conductores.*

Abstract

The specialized literature on the surface modification of nanocomposites and hybrid materials synthesized by means of cold plasma technology where specific properties were modified was analyzed. Plasma technology is a very versatile, efficient and environmentally friendly tool, which is why its study has increased in this decade since it allows modifying a wide range of materials for different applications. This technology can be used with different inert, reactive and monomer gases, in a wide range of polymeric matrices. For the development of nanocomposites with electrical conductivity, polypyrrole is among the polymers most used as reinforcement due to its conductive properties, likewise, iodine is the most widely used dopant because it reflects excellent results in electrical conduction in the matrix in where it is added.

Keywords: *Plasma polymerization, Plasma surface modification, Cold plasma, Nanocomposites with electrical conductivity, Conductive polymeric materials.*

Introducción

La tecnología de plasma frío ha sido objeto de muchos estudios en los últimos años, esto gracias a su enorme potencial en múltiples áreas y aplicaciones en el sector industrial y científico (Kashfi y col., 2020; Nguyen y col., 2020; Zhao y col., 2020). Actualmente su campo de aplicación también se ha extendido a otras áreas como la automotriz, médica, textil, y polímeros (Reyna-Martínez y col., 2018). Este crecimiento se debe principalmente a su versatilidad como herramienta emergente (Tyczkowski y col., 2019).

Esta tecnología es capaz de modificar las propiedades superficiales de los materiales, de acuerdo con las necesidades que requiera el usuario para su uso en áreas específicas (industrial, la automoción, la aeronáutica y la microelectrónica) ajustando los parámetros de operación (Hemberg y col., 2011; Saikia y col., 2013; Sarakinos y col., 2010; Michelmores y col., 2013).

Además, se puede crear nuevos materiales (materiales compuestos) con diferentes matrices y refuerzos, para usos innovadores y mejorar el desempeño de aquellos que ya se están utilizando actualmente en diversos sectores. Por consecuencia, los estudios sobre la tecnología de plasma frío para modificación de superficies para creación de nuevos materiales y mejora de propiedades específicas, se han incrementado en recientes años. (Bewilogua y col., 2009; Chabert y Braithwaite, 2011; Grill y col., 1994).

Otra ventaja de esta tecnología es que no requiere el uso de productos tóxicos, lo que la convierte en una práctica segura para el usuario y amigable con el medio ambiente, ya que cumple con varios postulados de la química verde (de Marco y col., 2019).

El objetivo del siguiente estudio es documentar algunos tipos de modificación por plasma frío que existen, así como los equipos utilizados para realizar esta modificación en los materiales y evaluar simultáneamente las investigaciones/hallazgos que se han llevado a cabo en los últimos años para mejorar las propiedades físico-químicas de los materiales, centrándose en la conductividad eléctrica.

Plasma

El plasma se define como un gas ionizado, compuesto principalmente por fotones, iones y electrones libres, así como átomos en sus estados fundamentales o excitados con una carga neta neutra (Pankaj y col., 2014).

Con base a su temperatura, el plasma se divide principalmente en dos categorías:

Plasma térmico o con equilibrio termodinámico, se forma a altas temperaturas (desde 4000 hasta 20 000 K) en donde existe un equilibrio entre electrones, iones, protones y especies excitadas, además de contar con una temperatura homogénea (Misra y col., 2016), y el plasma frío (fuera de equilibrio termodinámico y de bajas temperaturas), en esta categoría la temperatura de los electrones es mucho más alta que la temperatura de las especies pesadas (iones y especies neutras). Debido a estas características, en el campo de los materiales poliméricos quedan fuera las aplicaciones del plasma térmico.

Plasma frío

En este tipo de plasma los electrones ionizados adquieren altas temperaturas (10^5 - 10^6 K), por otro lado, los iones intercambian su energía por medio de colisiones con el gas neutro que se ioniza, por lo cual permanecen fríos (~ 300 K), debido a esto, la tecnología de plasma frío se puede utilizar en materiales sensibles al calor, porque la descarga es estable y las reacciones que ocurren en el proceso pueden ser controladas (Hung y col., 2018; Kulawik y col., 2018; Zille y col., 2015).

Las herramientas de ionización más comunes son campos eléctricos y magnéticos. (Bárdos y Baránková, 2010). Las especies reactivas del plasma pueden generarse a través de un electrodo por medio de fuentes de energía de radiofrecuencia (RF), microondas (MO), corriente continua (CC) y corriente alterna (CA) (Pankaj y col., 2014).

Este tipo de plasmas dan como resultado una enorme variedad de especies reactivas, que activan fenómenos físicos y químicos que en condiciones ambientales serían muy difíciles de conseguir. Por lo cual procesos industriales podrían verse beneficiados al aumentar su eficiencia y reducir la contaminación ambiental (Vázquez, 2008).

Tecnología de plasma frío

Es bien sabido que el entorno en el cual un material se encuentre, así como el tipo de interacciones que tenga con él, definen las propiedades fisicoquímicas de su superficie, por lo cual, desde hace décadas, la comunidad científica ha favorecido el desarrollo de tecnologías para modificación superficial conservando la integridad a través del volumen del material.

Para ello existen diferentes tecnologías de plasma disponibles tales como: activación, polimerización, ablación/erosión e injerto de grupos funcionales (Bewilogua y col., 2009; Dimitrakopoulos y Mascaro, 2001; Ohring, 2001; Biederman y Osada, 1992)

Este tipo de procesos han despertado gran interés, debido a que tienen ciertas ventajas con respecto a otras tecnologías, como:

- Baja temperatura del proceso
- Permite el tratamiento de una amplia gama de materiales, modificando su superficie sin modificar las propiedades de masa del material

- Ausencia de disolventes (lo que se traduce en una tecnología amigable con el medio ambiente).

Mecanismos de modificación de superficie mediante plasma frío

Existen diferentes mecanismos por medio de los cuales la tecnología de plasma frío modifica superficialmente los materiales, estos procesos se describen brevemente a continuación.

Activación por plasma

La activación (Figura 1) es un proceso químico que inserta grupos funcionales, que facilitan la incorporación de otras moléculas que pueden ser usadas para muchas aplicaciones, este proceso se caracteriza por utilizar gases inertes o reactivos ionizados con el fin de formar radicales libres sobre la superficie (Figura 1(a)). Los gases más utilizados son Ar, He, O₂, N₂, NH₃ y CF₄. Estos radicales libres posteriormente se emplean para adherir o injertar grupos funcionales o polímeros en el sustrato (Figura 1(b)), para la generación de nuevos materiales o el mejoramiento de distintas propiedades superficiales (Centre y Sarmadi, 2013; Cools y col., 2014; Mariotti y col., 2016).

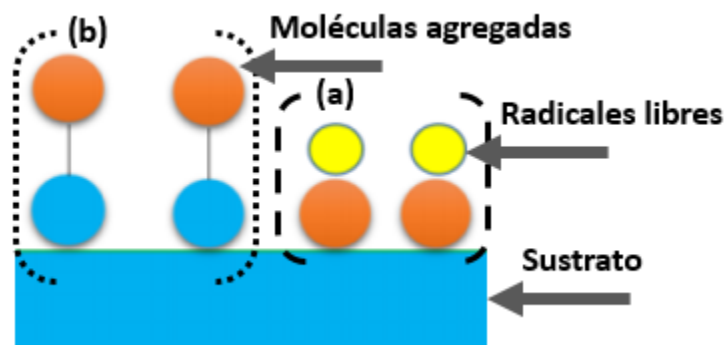


Figura 1. Activación por plasma (a): Funcionalización, (b): Radicalización).

(<http://www.biochemtech.uadec.mx/2018/06/25/recubrimiento-por-plasma-frio-aplicaciones-e-investigacion-experimental/>)

Polimerización por plasma

La polimerización (Figura 2) es un mecanismo de revestimiento, que consiste en introducir en el plasma un monómero en fase vapor para convertirlo en fragmentos reactivos, los cuales se combinan para formar polímeros. Los polímeros se depositan sobre un sustrato, creando así un recubrimiento de la superficie depositado mediante plasma. Los polímeros injertados tendrán una composición similar a los polímeros logrados por polimerización convencional, sin embargo se encontrarán entrecruzados a diferencia de estos, por lo que presentarán mejores propiedades (Centre y Sarmadi, 2013; Vázquez, 2008; Hung y col., 2018; Kulawik y col., 2018; Minati y col., 2017; Zille y col., 2015). Los revestimientos también se utilizan para modificar propiedades de diferente naturaleza (mecánicas, químicas, ópticas y eléctricas) (Bewilogua y col., 2009).

Utilizando este mecanismo se pueden sintetizar películas delgadas orgánicas sólidas, denominadas películas de polímero de plasma (PPF) (Biederman, 2004). Por ejemplo, se han sintetizado películas delgadas de pirrol mediante polimerización por plasma, reportando muy buenos resultados (Dhillon y col., 2010; Gómez y col., 2014; Hosono y col., 2004; Qin y col., 2011; Rudge y col., 1994; Wang y col., 2004).

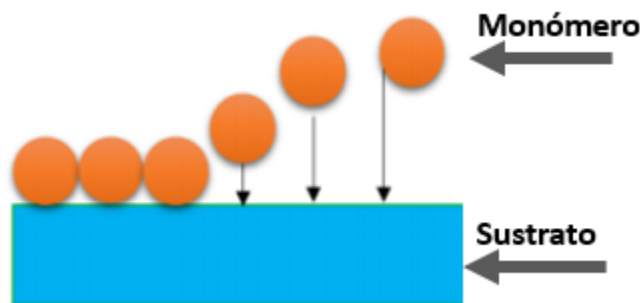


Figura 2. Polimerización por plasma.

(<http://www.biochemtech.uadec.mx/2018/06/25/recubrimiento-por-plasma-frio-aplicaciones-e-investigación-experimental/>)

Erosión por plasma

La erosión (Figura 3) es la extracción de material de las superficies a través de procesos con plasma, gran cantidad de efectos de la erosión requieren una duración del tratamiento mayor y casi todos los gases para procesos de erosión son comúnmente empleados en sistemas de baja presión. En la erosión por plasma se utiliza un gas reactivo para el desgaste superficial de un material con el fin de lograr la eliminación de la última capa mediante el bombardeo simultáneo de iones (Centre y Sarmadi, 2013). Este tratamiento en polímeros y otros materiales provoca la ruptura consecutiva de las cadenas superficiales para la progresiva formación de productos de cadena corta con bajo peso molecular, los cuales son removidos de la superficie (Reséndiz, 2005).

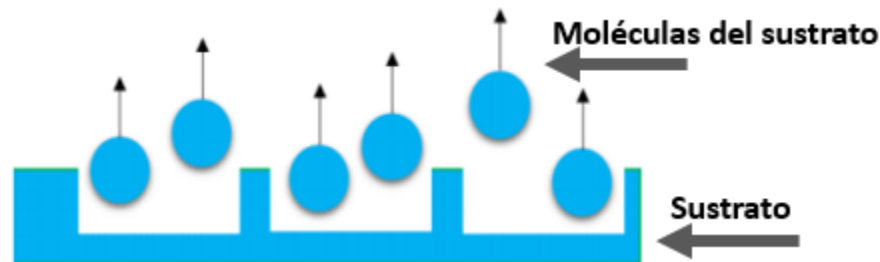


Figura 3. Erosión por plasma.

(<http://www.biochemtech.uadec.mx/2018/06/25/recubrimiento-por-plasma-frio-aplicaciones-e-investigación-experimental/>)

Estudios realizados para la obtención de materiales con conductividad eléctrica

Radiofrecuencia

Entre los trabajos de investigación que utilizaron este tipo de reactor, se encuentran el de Li y col. (2017). Ellos fabricaron películas de polipirrol (PPy) mediante polimerización por plasma utilizando diferentes potencias de radiofrecuencia (10, 12

y 14 W) que luego fueron depositadas sobre un sustrato de silicio (Si) mediante polimerización con plasma de yodo (I) en atmósfera de Ar durante aproximadamente 30 min. La resistencia promedio obtenida fue de $4.4 \times 10^8 \Omega$.

Por su parte Gómez y col. (2018) sintetizaron compuestos de polímero-metal de PPy y polialilamina (PAI) con una potencia de 20 W, utilizando plasma de nitrógeno (N_2) durante 15 s, 30 s, 45 s, 60 s, 90 s, 120 s, y 180 s, dopándolos también con I además de plata (Ag) (PPy/I/Ag)–(PAI/I/Ag). La conductividad en ambos compuestos fue de 10^{-10} y 10^{-6} S/cm, respectivamente y así mismo se obtuvo una reducción de más del 34 % en la resistencia del nanocompuesto.

También, Villanueva-Castañeda y col. (2019) sinterizaron PPy electroquímicamente. Posteriormente, se dopó en una solución líquida de I, estas muestras se identificaron como PPy/I Sub por los autores, a continuación, se aplicaron descargas luminosas de plasma, las muestras sometidas a este proceso se denominaron como PPy/I Plasma, ambos procesos tuvieron una duración de 1 hora, 2.8 mA y 2.6 kV, respectivamente. La conductividad de PPy varió de 0.0004 a 0.021 S/cm, la conductividad de PPy/I Plasma se registró en el rango de 0.009 – 0.059 S/cm. PPy/I Sub tuvo conductividad sin grandes cambios entre 0.004 y 0.006 S/cm. Este incremento en la conductividad del PPy/I Plasma es debido al dopaje con I

Por otro lado González-Salgado y col. (2016), sintetizaron compuestos organometálicos de TiOx-PPy combinando tetrapropóxido de titanio (TTP) con pirrol en fase líquida con una relación de masa de 1:1, y se aplicaron descargas luminosas mediante plasma de vapor de agua, con una potencia de 100 W, 0,7 mbar y 13.56 MHz, el proceso tuvo una duración de 60 a 240 min. La conductividad eléctrica del compuesto aumentó entre 10^{-11} y 10^{-8} S/cm, siendo estos valores similares a PPy plasmático, en cuanto a TiOx plasmático su conductividad fue de 10^{-14} y 10^{-12} S/cm.

Por otro lado, Mejía-Cuero y col. (2018) sintetizaron nanopartículas bimetálicas de CoOy–CuOx por sol-gel y formaron compuestos híbridos con polifurano (Pfu), (Pfu/CoOy–CuOx) El Pfu fue obtenido mediante plasma de furano utilizando descargas eléctricas a 13,56 MHz, 0,65 mbar y 100 W durante 4 h. Para combinar ambos materiales, Pfu y CoPy – CuOx, se utilizó crioliofilización. La conductividad de las partículas bimetálicas aumentó de 10^{-4} a 10^{-3} S/cm. En Pfu, la conductividad aumentó a 10^{-9} S/cm y finalmente en Pfu/CoOy–CuOx la conductividad aumentó a 10^{-8} S/cm.

Por su parte, Zúñiga y col. (2015) sintetizaron películas delgadas de polifurano (PPfu) mediante plasma con 13,56 MHz, 10^{-1} mbar, 20 y 100 W y con un tiempo de reacción de 180 min, utilizando solo furano en el proceso, sin gases o dopantes. La conductividad volumétrica eléctrica del PPfu fue de entre 8×10^{-13} y 3.4×10^{-11} S/cm aumentando un orden de magnitud en función de la temperatura en cada potencia de síntesis.

Además, Mansuroglu y Uzun-Kaymak (2017) trabajaron con películas de floureno polimerizadas con plasma a 13.56 MHz, 40 Pa, 150 a 250 W y con un tiempo de deposición de 5 a 20 min y con un dopaje in situ de I y cloro (Cl), el proceso se llevó a cabo por separado, para evaluar los resultados de ambos dopajes. Los resultados demuestran que, las películas dopadas con I tienen una conductividad de 2.69×10^{-5} a 1.63×10^{-4} S/cm, mientras que la conductividad de las películas dopadas con Cl está en el rango de 6.57×10^{-6} a 1.76×10^{-5} S/cm.

En la Tabla 1 se resumen los resultados mencionados anteriormente.

Tabla 1. Modificación superficial de distintos materiales mediante tecnología de plasma frío.

Partícula empleada	Plasma utilizado	Matriz	Compuesto	Propiedad analizada	Referencia
PPy dopado con I	I	Si	(PPy/I)	Resistencia: $4.4 \times 10^8 \Omega$.	Li y col. (2017)
Dopaje con I y Ag	N ₂	PPy–PAI	(PPy/I/Ag)–(PAI/I/Ag)	Conductividad: 10^{-10} y 10^{-6} S/cm, respectivamente.	Gómez y col. (2018)
Dopaje con I	I	PPy	(PPy/I)	Conductividad: 0.009 – 0.059 S/cm	Villanueva-Castañeda y col. (2019)
Agua	Agua	TiOx–PPy	(TiOx-PPy)	Conductividad: 10^{-11} y 10^{-8} S/cm	González-Salgado y col. (2016),
Polifurano (Pfu)	Furano	Pfu	PPFu	Conductividad: 8×10^{-13} y 3.4×10^{-11} S/cm	Zúñiga y col. (2015)
CoOy–CuOx	Solución líquida de I	Pfu	(PFu/CoOy–CuOx)	Conductividad: 10^{-8} – 10^{-11} S/cm	Mejía-Cuero y col. (2019)
Dopaje in situ de I y Cl	Floureno	Floureno	(Floureno/I)–(Floureno/Cl)	Conductividad: 2.69×10^{-5} a 1.63×10^{-4} S/cm (I) y 6.57×10^{-6} a 1.76×10^{-5} S/cm (Cl)	Mansuroglu y Uzun-Kaymak (2017)

Microondas

La alta energía utilizada en este procedimiento reduce los tiempos de reacción al orden de minutos, en comparación con los procesos convencionales de funcionalización. El calentamiento por microondas se ha convertido en una herramienta importante, debido a la ejecución eficiente de las reacciones orgánicas, es por esto que, excelentes rendimientos suelen ser obtenidos dentro de tiempos de reacción considerablemente bajos, en comparación con los obtenidos mediante tratamiento convencional (Alvarado y col., 2012; Bethune y col., 1993).

Algunos estudios como el de Basuli y col., llevaron a cabo modificación de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT), utilizando plasma de N_2 y O_2 para la obtención de nanocompuestos de polietileno-co acrilato de metilo (EMA24)/MWNT. Se observó un incremento importante en la conductividad de los nanocompuestos obtenidos de polietileno-co acrilato de metilo con 2 % en peso de MWNT. Los resultados demostraron que los nanocompuestos tratados con plasma de O_2 exhiben una mejor conductividad eléctrica que los tratados con plasma de N_2 . Por lo que se concluye que ambos plasmas aumentan la conductividad eléctrica, sin embargo, el plasma de O_2 , proporciona una mayor conductividad eléctrica Basuli y col., (2018).

La Tabla 2, resume las investigaciones que se han llevado a cabo para la obtención de materiales conductores utilizando nanoestructuras de carbono.

Tabla 2. Experimentación con nanoestructuras de carbono con tecnología de plasma.

Partícula	Porcentaje	Matriz	Propiedad analizada	Compuesto	Referencia
*GnPs	3 – 8 % en peso	polietileno de alta densidad (HDPE)	Resistividad eléctrica: $10^{12} \Omega \cdot m$	GnPs/HDPE	(Zendejos y col., 2018)
GO y *MWCNT	1.3 % en peso ambos compuestos	poli-dimetilsiloxano (PDMS)	Conductividad eléctrica: 2.8 S/cm	t-MWCNT-graphene-CA (Carbon aerogel) /PDMS	(Chen y col., 2013)
PPy y polianilina (PANI)	0.08 – 5.6 % en peso (I ₂ -PPy/GR, I ₂ -PANI/GR, PPy/GR, PANI/GR, I ₂ -PANI, PANI) PPy/GR PANI/GR I ₂ -PANI PANI)	grafeno (GR)	Eficiencia de la celda de conversión: Muestras dopadas con I: 0.086 %, 5.41 % y 5.60 %, para I ₂ -PANI, I ₂ -PANI-GR e I ₂ -PPy-GR, respectivamente	PPy/GR-PANI/GR	(Cogal y col., 2018)

****CNTs	No hay información disponible	PANI	Conductividad eléctrica: 2.946 S/cm	CNTs/PANI	(Yang y col., 2010)
MWCNTs y SWCNTs	1.5 % en peso de ambos refuerzos	PANI	Conductividad eléctrica: PANI/MWCNT: 7.8 S/cm PANI/SWCNT: 25 S/cm	PANI/SWCNT	(Ibrahim y Wasfi, 2019)
Láminas de grafito flexibles y *****rGO	Pastas de rGO/PANI = 0.05 g de partículas de PANI, 0.05 g de escamas de rGO	PANI	Capacitancia específica: 227.32 F/gy Capacitancia de área: 28.37 mF/cm ² Tasa de retención de capacitancia: 86,9 %	rGO/PANI	(Hao y col., 2020)

Nota: *GnPs: Nanoplaquetas de grafito, **GO: Óxido de grafito, ***MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiples, ****CNTs: Nanotubos de carbono, *****rGO: Óxido de grafito reducido.

Conclusiones

El análisis de las recientes investigaciones sobre modificación superficial de híbridos y nanocompuestos con tecnología de plasma frío arrojó los siguientes hallazgos y correlaciones:

- El polipirrol es el polímero más estudiado y utilizado como refuerzo en matrices de diferente naturaleza ya que exhibe excelentes propiedades eléctricas. Esto dio como resultado el aumento de la conductividad eléctrica en los materiales en los que se adicionó.
- El yodo es el dopante que da mejores resultados para aumentar la conductividad en nanocompuestos e híbridos, por lo que es el elemento más utilizado en el dopaje con tecnología de plasma frío.
- Las nanoestructuras de carbono como los nanotubos de carbón de pared múltiple y el grafeno son una buena opción como refuerzo en una matriz polimérica debido a su naturaleza conductora.
- La tecnología por plasma más utilizadas para sintetizar, modificar o formular compuestos con el fin de mejorar la conductividad son la polimerización por plasma y la activación por plasma.
- El equipo más utilizado para modificar por plasma materiales para la obtención de compuestos conductores es el equipo de plasma utilizando radiofrecuencia.
- Existe poca investigación del uso del plasma frío en la obtención de materiales semiconductores por lo que representa una buena área de oportunidad para nuevas investigaciones.

Referencias

- Alvarado, C. J. C., Galindo, A. S., López, L. L., Berúmen, C. P., Orta, C. Á., & Valdez Garza, L. C. Q. J. A. (2012). Alternativas para la Funcionalización de NTC's. Aplicación en nanomateriales poliméricos. *Afinidad*, 69(558), 106–112.
- Bárdos, L., & Baránková, H. (2010). Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. *Thin Solid Films*, 518(23), 6705–6713.
- Basuli, U., Palaninathan, E., Chaki, T. K., & Chattopadhyay, S. (2018). Effect of Plasma, Gamma and Chemically Surface Modified MWNTs on the Rheological and Electrical Properties of Ethylene Methyl Acrylate (EMA) Nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(7), 4621–4633.
- Bethune, D. S., Klang, C. H., De Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., & Beyers, R. (1993). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*, 363(6430), 605–607.
- Bewilogua, K., Bräuer, G., Dietz, A., Gäbler, J., Goch, G., Karpuschewski, B., & Szyszka, B. (2009). Surface technology for automotive engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2), 608–627.
- Centre, C. C., & Sarmadi, M. (2013). Advantages and Disadvantages of Plasma Treatment of Textile Materials. *International Symposium on Plasma Chemistry, August*, 7–10.
- Chen, M., Tao, T., Zhang, L., Gao, W., & Li, C. (2013). Highly conductive and stretchable polymer composites based on graphene/MWCNT network. *Chemical Communications*, 49(16), 1612–1614.
- Cogal, S., Ali, A. K., Erten-Ela, S., Celik Cogal, G., Kulicek, J., Micusik, M., Omastova, M., & Oksuz, A. U. (2018). Plasma-based preparation of polyaniline/graphene and polypyrrole/graphene composites for dye-sensitized solar cells as counter electrodes. *Journal of Macromolecular Science, Part A:*

Pure and Applied Chemistry, 55(4), 317–323.

Cools, P., Van Vrekhem, S., De Geyter, N., & Morent, R. (2014). The use of DBD plasma treatment and polymerization for the enhancement of biomedical UHMWPE. *Thin Solid Films*, 572, 251–259.

de Marco, B. A., Rechelo, B. S., Tótolí, E. G., Kogawa, A. C., & Salgado, H. R. N. (2019). Evolution of green chemistry and its multidimensional impacts: A review. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(1), 1–8.

Dhillon, A., Kaur, A., Srivastava, A. K., & Avasthi, D. K. (2010). Experimental investigations of semi-crystalline plasma polymerized polypyrrole for surface coating. *Progress in Organic Coatings*, 69(4), 396–401.

Dimitrakopoulos, C. D., & Mascaro, D. J. (2001). Organic thin-film transistors: A review of recent advances. *IBM Journal of Research and Development*, 45(1), 11–27.

Gomez, L. M., Cruz, G. J., Olayo, M. G., Gonzalez-Torres, M., Gonzalez-Salgado, F., & Lopez-Gracia, O. G. (2014). Analysis of crosslinking in polypyrrole particles synthesized by plasma. *Polymer Bulletin*, 71(12), 3275–3287.

Gómez, L. M., Olayo, M. G., González-Torres, M., Morales, J., Olayo, R., Mejía-Cuero, M. R., & Cruz, G. J. (2018). Synthesis of Hybrid Aminated Polymers with Ag Sensitive to Electromagnetic Pulses, as Potential Inhibitors or Stimulators of Cell Growth in the Central Nervous System. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 28(6), 2742–2748.

González-Salgado, F., Olayo, M. G., García-Rosales, G., Gómez, L. M., González-Torres, M., & Cruz, G. J. (2016). Electromagnetic absorption and conductivity of organometallic TiO_x-Py plasma compounds. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 122(5), 1–8.

Gordillo Vázquez, F. (2008). Plasmas fríos. *Investigación y ciencia*, 38(1), 70–79.

- H. Biederman. (2004). Plasma Polymer Films. *Imperial College Press*, 1(0), 15–16.
- Hao, Y. C., Nurzal, N., Chien, H. H., Liao, C. Y., Kuok, F. H., Yang, C. C., Chen, J. Z., & Yu, I. S. (2020). Application of atmospheric-pressure-plasma-jet modified flexible graphite sheets in reduced-graphene-oxide/polyaniline supercapacitors. *Polymers*, 12(6), 1–12.
- Hemberg, A., Konstantinidis, S., Renaux, F., Dauchot, J. P., & Snyders, R. (2011). Ion flux-film structure relationship during magnetron sputtering of WO₃. *EPJ Applied Physics*, 56(2), 1–5.
- Hosono, K., Matsubara, I., Murayama, N., Shin, W., & Izu, N. (2004). Effects of discharge power on the structure and electrical properties of plasma polymerized polypyrrole films. *Materials Letters*, 58(7–8), 1371–1374.
- Hung, Y. W., Chen, H. L., Lee, L. T., Tung, K. C., Bau, D. T., & Wong, Y. K. (2018). Effects of non-thermal plasma on sandblasted titanium dental implants in beagle dogs. *Journal of the Chinese Medical Association*, 81(10), 920–925.
- Ibrahim, N. I., & Wasfi, A. S. (2019). A comparative study of polyaniline/MWCNT with polyaniline/SWCNT nanocomposite films synthesized by microwave plasma polymerization. *Synthetic Metals*, 250(February), 49–54.
- Kashfi, A. S., Ramezan, Y., & Khani, M. R. (2020). Simultaneous study of the antioxidant activity, microbial decontamination and color of dried peppermint (*Mentha piperita* L.) using low pressure cold plasma. *Lwt*, 123(January).
- Kulawik, P., Alvarez, C., Cullen, P. J., Aznar-Roca, R., Mullen, A. M., & Tiwari, B. (2018). The effect of non-thermal plasma on the lipid oxidation and microbiological quality of sushi. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45(September 2017), 412–417.
- Li, C., Hsieh, J. H., & Lee, Y. T. (2017). Fabrication and structural characterization of plasma polymerized polypyrrole thin film. *Surface and Coatings Technology*,

320(0), 206–212.

- Mansuroglu, D., & Uzun-Kaymak, I. U. (2017). Enhancement of electrical conductivity of plasma polymerized fluorene-type thin film under iodine and chlorine dopants. *Thin Solid Films*, 636, 773–778.
- Mariotti, D., Belmonte, T., Benedikt, J., Velusamy, T., Jain, G., & Švrček, V. (2016). Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Processes for “Green” Third Generation Photovoltaics. *Plasma Processes and Polymers*, 13(1), 70–90.
- Mejía-Cuero, M. R., Colín-Orozco, E., Cruz, G. J., Gómez, L. M., González-Torres, M., Palacios, J. C., & Olayo, M. G. (2019). Bimetallic CoO y –CuO x Particles in Polyfuran Films, Electromagnetic Absorption and Electric Conductivity. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 29(3), 676–683.
- Minati, L., Migliaresi, C., Lunelli, L., Viero, G., Dalla Serra, M., & Speranza, G. (2017). Plasma assisted surface treatments of biomaterials. *Biophysical Chemistry*, 229, 151–164.
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, 55(0), 39–47.
- Nguyen, D. Van, Ho, N. M., Hoang, K. D., Le, T. V., & Le, V. H. (2020). An investigation on treatment of groundwater with cold plasma for domestic water supply. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100309.
- Ohring, M. (2001). *Materials Science of Thin Films*.
- P. Chabert, & Braithwaite, N. (2011). (2011) *Physics of Radio-Frequency Plasmas*.
- Pankaj, S. K., Bueno-Ferrer, C., Misra, N. N., O’Neill, L., Tiwari, B. K., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2014). Physicochemical characterization of plasma-treated sodium caseinate film. *Food Research International*, 66(0), 438–444.

- Qin, H., Kulkarni, A., Zhang, H., Kim, H., Jiang, D., & Kim, T. (2011). Polypyrrole thin film fiber optic chemical sensor for detection of VOCs. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 158(1), 223–228.
- Reséndiz, Y. M. (2005). *Modificación superficial de materiales por plasma para aplicaciones medicas*. 1–70.
- Reyna-Martínez, R., Céspedes, R. I. N., Alonso, M. C. I., & Acosta, Y. K. R. (2018). *Use of Cold Plasma Technology in Biomaterials and Their Potential Utilization in Controlled Administration of Active Substances*. 4(5), 0–9.
- Rudge, A., Davey, J., Raistrick, I., Gottesfeld, S., & Ferraris, J. P. (1994). Conducting polymers as active materials in electrochemical capacitors. *Journal of Power Sources*, 47(1–2), 89–107.
- Saikia, N. J., Ewels, C., Colomer, J. F., Aleman, B., Amati, M., Gregoratti, L., Hemberg, A., Thiry, D., Snyders, R., & Bittencourt, C. (2013). Plasma fluorination of vertically aligned carbon nanotubes. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(28), 14635–14641.
- Sarakinos, K., Alami, J., & Konstantinidis, S. (2010). High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art. *Surface and Coatings Technology*, 204(11), 1661–1684.
- Tyczkowski, J., Kierzkowska-Pawlak, H., Kapica, R., Balcerzak, J., & Sielski, J. (2019). Cold plasma – A promising tool for the production of thin-film nanocatalysts. *Catalysis Today*, 337(March), 44–54.
- Villanueva-Castañeda, M., Hernández-Tenorio, C., Moreno-Saavedra, H., Olayo, M. G., & Cruz, G. J. (2019). Liquid Plasma Iodine Doping of Electrochemically Synthesized Polypyrrole to Enhance the Electromagnetic Absorption. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 30(6), 2098–2104.
- Wang, J., Neoh, K. G., & Kang, E. T. (2004). Comparative study of chemically

- synthesized and plasma polymerized pyrrole and thiophene thin films. *Thin Solid Films*, 446(2), 205–217.
- Yang, J., Wang, X., Wang, X., Jia, R., & Huang, J. (2010). Preparation of highly conductive CNTs/polyaniline composites through plasma pretreating and in-situ polymerization. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(4), 448–452.
- Zendejo-Covarrubias, R., Narro-Cespedes, R. I., Neira-Velazquez, G., Cruz-Delgado, V. J., Ku-Herrera, J. J., Borjas-Ramos, J., Arias-Garcia, G., & Soria-Arguello, G. (2018). Surface Modification of Graphene Nanoparticles with Ethylene Plasma in Rotary Plasma Reactor for the Preparation of GnP/HDPE Nanocomposites. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(7), 2402–2406.
- Zhao, N., Ge, L., Huang, Y., Wang, Y., Wang, Y., Lai, H., Wang, Y., Zhu, Y., & Zhang, J. (2020). Impact of cold plasma processing on quality parameters of packaged fermented vegetable (radish paocai) in comparison with pasteurization processing: Insight into safety and storage stability of products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 60(January), 102300.
- Zille, A., Oliveira, F. R., & Souto, P. A. P. (2015). Plasma treatment in textile industry. *Plasma Processes and Polymers*, 12(2), 98–131.
- Zúñiga, R., Cruz, G. J., Olayo, M. G., Sánchez-Mendieta, V., Gómez, L. M., González-Torres, M., González-Salgado, F., & Morales, J. (2015). Synthesis and superficial characterization of plasma polyfuran thin films. *Polymer Bulletin*, 72(4), 839–850.