

CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS SENSIBLES A PARÁMETROS SANGUÍNEOS A BASE DE GRAFENO OXIDADO

Vanessa Yanza López, Miguel Darío Orozco Ordoñez, Johan Manuel Zúñiga

Programa de Ingeniería Física, Universidad del Cauca, Colombia

RESUMEN

Se construyeron dispositivos electrónicos que presentaban la propiedad de efecto de campo, utilizando como material semiconductor el grafeno oxidado obtenido mediante la técnica de pirólisis y usando como precursor el bambú *Angustifolia Kunth*. Lo anterior fue logrado en colaboración con el Instituto Interdisciplinario de las Ciencias de la Universidad del Quindío – Colombia. El material fue depositado en sustratos flexibles y aislantes por medio de exfoliación y se le fabricaron tres electrodos de indio (In – 99,99%) a través del método de evaporación al vacío. Posteriormente, los dispositivos fueron caracterizados eléctricamente mediante la configuración típica de transistores de efecto de campo, obteniéndose como resultado curvas de corriente-voltaje que muestran variaciones significativas cuando el material semiconductor entra en contacto con pequeñas muestras de sangre. .

Palabras clave: Curva corriente-voltaje, efecto de campo, grafeno oxidado, sangre, semiconductor.

1. INTRODUCCIÓN

El grafeno es uno de los materiales más prometedores para el avance de la tecnología en los últimos años. Sus propiedades eléctricas, ópticas, mecánicas y termodinámicas, lo hacen un material excepcional en varios campos de la industria, especialmente en la electrónica [1,2,3]. Muchas investigaciones alrededor del mundo se han concentrado en su obtención debido a que, si bien es un material constituido a partir de carbono el cual es muy abundante, es difícil/costoso de sintetizar a escala industrial y aún no existe un método estándar eficiente.

El grafeno es un compuesto de carbono que, al contrario del diamante que forma una estructura tridimensional, se organiza bidimensionalmente en láminas de un átomo de espesor. Este material se obtuvo por primera vez al aislar una de las láminas del grafito, otra forma del carbono, sin embargo, este procedimiento no es nada sencillo, por lo que sus descubridores obtuvieron el Premio Nobel en 2010.

Una de las vías alternativas para la obtención del grafeno es el ataque químico al grafito para oxidar y desestabilizar sus capas, lo que logra una separación entre ellas y facilita aislarlas [4], [5]. No obstante, estos métodos

permiten obtener láminas más gruesas que un átomo de espesor y sus propiedades dependen fuertemente del método químico usado para este fin.

Este tipo de materiales se conocen como materiales grafénicos y uno de los que más acerca sus propiedades físicas a las del grafeno es el grafeno oxidado. Este último, se obtiene al reducir el grafito oxidado, quedando en su estructura algunos grupos con presencia de oxígeno y defectos en la red que le atribuyen propiedades semiconductoras tipo p (huecos como portadores mayoritarios).

En el Instituto Interdisciplinario de las Ciencias de la Universidad del Quindío, los investigadores han desarrollado uno de los métodos más innovadores para la obtención del óxido de grafito y han caracterizado sus propiedades físicas y químicas, resultados que se pueden verificar en revistas científicas de alta importancia mundial, posicionándolo como uno de los mejores materiales de su tipo [6], [7], [8]. Trabajos posteriores como este realizado en la Universidad del Cauca, fueron desarrollados en conjunto para evaluar las aplicaciones de este material, especialmente en la fabricación de dispositivos semiconductores con aplicaciones biomédicas.

2. METODOLOGÍA

El grafeno oxidado, al que llamaremos de ahora en adelante GO, fue obtenido mediante el método de pirólisis a una temperatura de 700K utilizando como precursor fragmentos del bambú *Angustifolia Kunth*, y depositado sobre cuarzo. La caracterización del material fue llevada a cabo por difracción de rayos X (DRX) confirmando su estructura [6]. Posteriormente se desprendieron del cuarzo pequeñas láminas de este material mediante el proceso de exfoliación con cinta adhesiva. Se eligieron las regiones con mayor homogeneidad para garantizar una conductividad no interrumpida por fracturas en el material. Luego, se recortaron cuidadosamente fragmentos de 5x3mm que corresponden a material depositado sobre un sustrato flexible y sobre los cuales se construyeron los electrodos para su posterior caracterización eléctrica.

La fabricación de los electrodos se realizó mediante máscaras con ranuras rectangulares de 2x3mm que se pusieron encima de los trozos de 5x3mm de GO exfoliado sobre cinta; se introdujeron en una cámara de sputtering BAE 250 conectada a una bomba mecánica de vacío (0.15 mbar), haciendo uso de evaporadores de wolframio de alta pureza y ubicando el target a una distancia de 5cm del evaporador. Así, se evaporó indio al 99.99% de pureza depositándose en contacto superficial con el GO. Un tercer electrodo se evaporó usando este mismo método, pero esta vez sobre el sustrato, es decir en la parte posterior de los trozos de 5x3mm. La figura 1 muestra el esquema final de los dispositivos y el nombre que se le asignó a cada uno de los electrodos.

Sobre cada uno de los electrodos se soldó un hilo de cobre con pintura de plata y se midió la resistencia RDS entre los electrodos D y S. Haciendo uso de procesos similares fueron contruidos varios de estos dispositivos semiconductores de canal p, a los que llamaremos DCP, y que lucen tal y como se muestran en la figura 2.

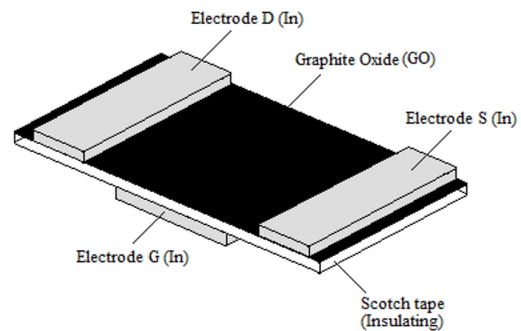


Figura 1. Esquema de los dispositivos fabricados.

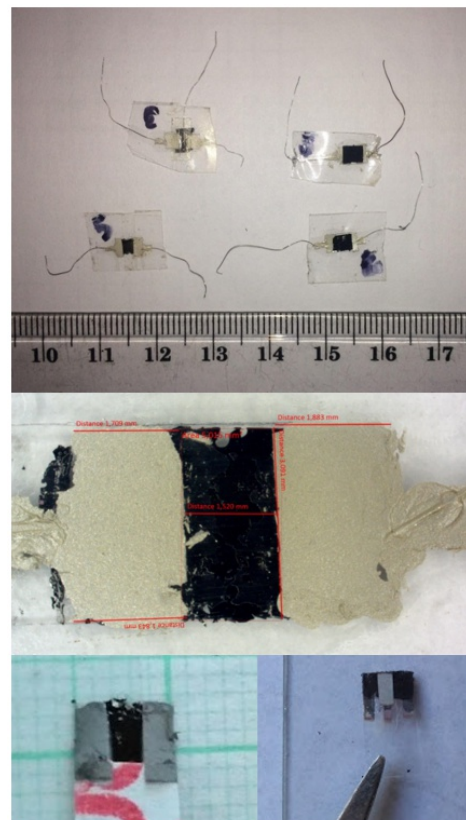


Figura 2. Fotografías de los dispositivos semiconductores.

La caracterización eléctrica de los DCP fue realizada en un montaje como el que se muestra en la siguiente figura:

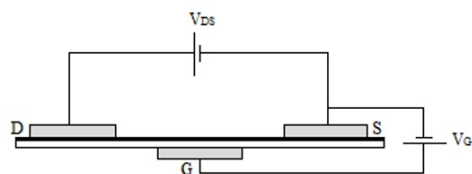


Figura 3. Circuito de caracterización eléctrica..

El proceso de caracterización consistió en fijar un voltaje V_G en el electrodo G y producir variaciones en la corriente I_{DS} , a través de los electrodos D y S, mientras se medía el voltaje entre estos dos terminales en cada variación de corriente. Este procedimiento se repite para diferentes valores de V_G , obteniendo de esta forma familias de curvas corriente-voltaje (V_{DS} , I_{DS}), una para cada valor de V_G . La instrumentación utilizada para el muestreo fue un nanovoltímetro Keithley 2400.

Los dispositivos fueron caracterizados eléctricamente para determinados rangos de corriente (Ver, Resultados y análisis). Posteriormente se realizó una caracterización eléctrica adicional impregnando uno de los dispositivos, con una muestra de sangre. Otro de los dispositivos, permaneció inalterado para ser tomado como referencia verificando así que no sufrió cambios por efectos ambientales (humedad, contacto con el aire, iluminación, etc.).

Una vez culminada la caracterización eléctrica inicial del dispositivo impregnado con sangre, se procedió a repetir cuatro veces más la serie de mediciones, pero dejando pasar determinado tiempo entre las mismas. Lo anterior con el objetivo de evaluar el efecto de la coagulación de la sangre en su comportamiento eléctrico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se encuentra la familia de curvas obtenidas al tabular los datos de I_{DS} contra V_{DS} para cada V_G de uno de los dispositivos DCP libre de sangre. Las gráficas para los otros dispositivos fueron similares salvo su diferencia en cuanto a resistencia eléctrica. La serie de mediciones fue realizada en un intervalo de corrientes de -0.4 a 0.4 mA con variaciones en V_G de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 volts.

En esta familia de curvas es posible percibir el efecto de campo producido por la variación del voltaje en el electrodo G, de modo que efectivamente es posible alterar la conductividad eléctrica de los dispositivos mediante la tensión, es decir, se comportan como transistores tipo FET. Se presenta una ampliación en cierta región de la gráfica para

apreciar mejor este efecto (Ver, Figura 4b).

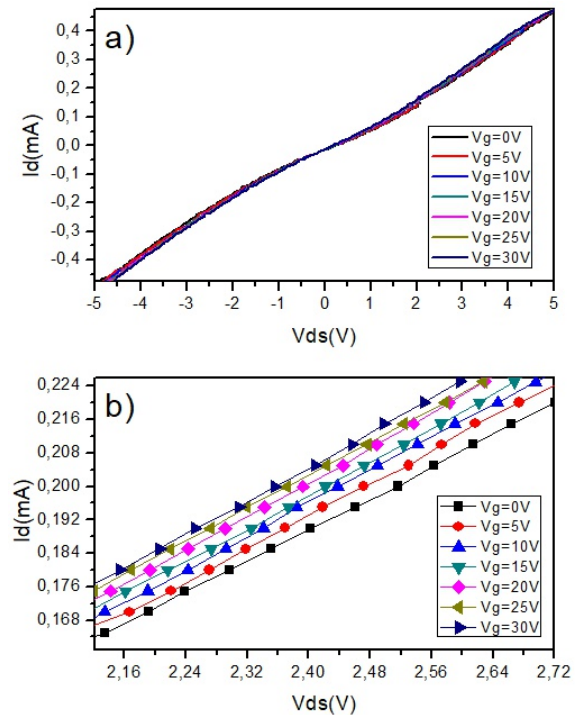


Figura 4. Familia de curvas características del dispositivo semiconductor DCP: (a) Curvas I_{DS} v/s V_{DS} para distintos valores de V_G (b)

Ampliación (13x) sobre la familia de curvas anterior donde se percibe presencia de efecto de campo producido por la variación de voltaje en G.

Es de notar, a partir de la gráfica anterior que los dispositivos DCP tienen un comportamiento eléctrico lineal. Este resultado no es nada nuevo ya que el GO ha sido caracterizado como un semiconductor tipo p y por tanto, en ausencia de otro material tipo n que cree una zona de depleción, los dispositivos básicamente consisten en resistencias variables controladas por tensión. A la resistencia eléctrica presente en los dispositivos, libres de sangre y con $V_G = 0$, le denominamos resistencia estática, y los valores que obtuvimos para nuestros dispositivos varían entre 1.9 y 12.6k Ω .

Las siguientes graficas muestran el comportamiento eléctrico de uno de los DCP en presencia de sangre. En la figura 5 se encuentran las curvas I_{DS} v/s V_{DS} medidas cada cinco minutos para algunos valores de V_G . Dichas mediciones fueron realizadas en un intervalo de corriente de 0 a 3mA para valores de V_G de 0, 1, 2 y 4 volts respectivamente.

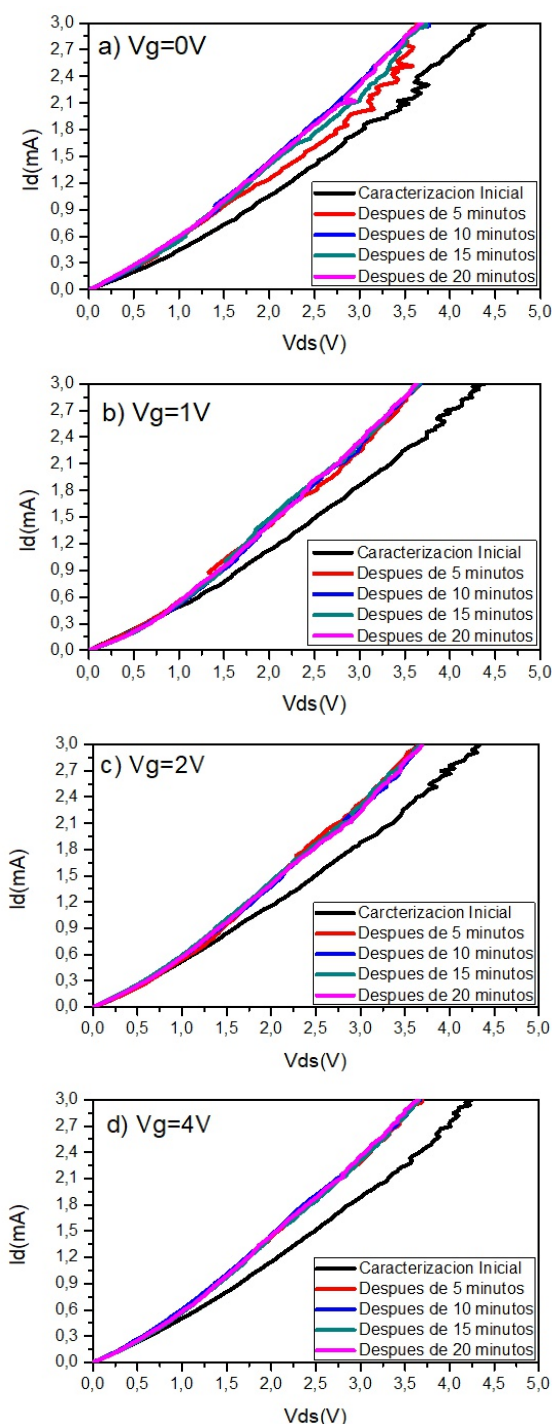


Figura 5. Caracterización eléctrica de uno de los DCP impregnado con sangre a distintos tiempos para diferentes voltajes de G (a) Curvas IDS v/s VDS con $V_G = 0V$ (b) Curvas Id v/s VDS con $V_G = 1V$ (c) Curvas IDS v/s VDS con $V_G = 2V$ (d) Curvas ID v/s VDS con $V_G = 4V$

Nótese, a partir de las gráficas anteriores, que el DCP en cuestión dejó de responder de manera lineal al entrar en contacto con la muestra de sangre y esta tendencia ocurrió para cada valor de V_G . Esto implica que

efectivamente el comportamiento eléctrico del dispositivo se vio afectado por la adición de sangre, de modo que aumentó su conductividad eléctrica. A la resistencia eléctrica presente en el dispositivo con sangre y a cualquier valor de V_G , le denominamos resistencia dinámica.

De las gráficas anteriores también es posible apreciar que la resistencia dinámica del dispositivo a $V_G = 0V$ presenta variaciones durante los primeros cinco minutos teniendo un valor inicial de $1.77k\Omega$ y uno de $1.57k\Omega$ después de cinco minutos. Este fue el cambio más significativo ya que a tiempos posteriores las variaciones en la resistencia dinámica son casi despreciables. La misma tendencia se presenta para los diferentes valores de voltaje en G establecidos.

La variación de la resistencia dinámica entre los primeros cinco minutos es de alrededor de 200Ω . Estos cambios muestran la susceptibilidad del dispositivo a la calidad de la sangre que varía por el proceso de coagulación. Nótese que después de 5 minutos las curvas empiezan a converger a una sola, deteniéndose este proceso en los 20 minutos. Se realizaron caracterizaciones posteriores de modo que no se registró una curva con corrimiento superior después de dicho tiempo, lo que implica que las variaciones en el comportamiento eléctrico cesaron debido a que se completó el proceso de coagulación.

Lo anterior prueba que los dispositivos DCP son sensibles a las variaciones en la calidad de la sangre que evidentemente se presentan por su proceso de coagulación. Aún no sabemos cuáles de los parámetros sanguíneos que varían en este proceso son los que afectan de manera directa el comportamiento del dispositivo por contacto superficial con la sangre. Sin embargo, es importante reportar estos resultados para que en futuras investigaciones se tenga en cuenta la sensibilidad del material ante los componentes sanguíneos, se detecten los más influyentes y posiblemente puedan construirse biosensores de parámetros sanguíneos.

4. CONCLUSIONES

Posterior al desarrollo de la investigación, se concluye que la creación del Centro de Excelencia de Inteligencia de Negocios especializado en mercadeo logró el fortalecimiento de las competencias laborales de los semilleros de investigación que están conformados por los programas de formación en animación digital, gestión empresarial, gestión financiera, análisis de sistemas de información, y finalmente, generar intenciones para propios emprendimientos en futuro próximo.

El CEIM del Centro de Tecnologías Agroindustriales de Cartago, al apropiarse la metodología de Business Intelligence, impactó a catorce (14) empresas PYMES del Norte del Valle del Cauca, en las cuales se desarrollaron herramientas que faciliten la recolección de datos en el área comercial para su posterior análisis y generación de conocimiento; lo anterior vinculado como insumo para finalmente ser incorporado en nuevos diseños de imagen corporativa con renovaciones estratégicas de servicio al cliente, convirtiendo el problema evidenciado en una oportunidad latente de negocio.

A cada empresa PYME consultante se le diseñó la imagen corporativa y se brindó apoyo para la estructuración organizacional, en la cual se incorporó el cuadro de mando integral como herramienta que enlaza las estrategias con los objetivos misionales, sin perder de vista los resultados a través de las áreas de desempeño financiero, conocimiento del cliente, procesos internos de negocio, aprendizaje y crecimiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los investigadores Jhon Jairo Prías, Hernando Ariza y Narly Echeverry del Instituto Interdisciplinario de las Ciencias de la Universidad del Quindío por permitirnos trabajar junto a ustedes en la búsqueda de aplicaciones al material grafénico que sintetizan en sus laboratorios. Agradecemos al profesor Gilberto Bolaños Pantoja del Departamento de Física de la Universidad del Cauca por el aval y el apoyo brindado durante la etapa de construcción y caracterización de los dispositivos en las instalaciones del Laboratorio de Física de

Bajas Temperaturas.

6. REFERENCIAS

- [1] Zhang, S., Shao, Y., Liao, H., Engelhard, M. H., Yin, G., & Lin, Y. (2011). Polyelectrolyte-induced reduction of exfoliated graphite oxide: a facile route to synthesis of soluble graphene nanosheets. *Acs Nano*, 5(3), 1785-1791.
- [2] Zhu, Y., Murali, S., Stoller, M. D., Velamakanni, A., Piner, R. D., & Ruoff, R. S. (2010). Microwave assisted exfoliation and reduction of graphite oxide for ultracapacitors. *Carbon*, 48(7), 2118-2122.
- [3] Jung, I., Dikin, D. A., Piner, R. D., & Ruoff, R. S. (2008). Tunable electrical conductivity of individual graphene oxide sheets reduced at "low" temperatures. *Nano Letters*, 8(12), 4283-4287.
- [4] Stankovich, S., Dikin, D. A., Piner, R. D., Kohlhaas, K. A., Kleinhammes, A., Jia, Y., ... & Ruoff, R. S. (2007). Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *carbon*, 45(7), 1558-1565.
- [5] Fan, Z. J., Kai, W., Yan, J., Wei, T., Zhi, L. J., Feng, J., ... & Wei, F. (2010). Facile synthesis of graphene nanosheets via Fe reduction of exfoliated graphite oxide. *ACS nano*, 5(1), 191-198.
- [6] Prías Barragán J.J., Echeverry Montoya N.A., Ariza Calderón H. (2015). Fabricación y caracterización de carbón activado y de nanoplaquetas de carbón a partir de guadua *Angustifolia Kunth* para aplicaciones en electrónica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas y de la Tierra*. 39 (153): 444-449.
- [7] Gross, K., Prías Barragán, J., Sangiao, S., De Teresa, J., Lajaunie, L., Arenal, R., Ariza, H., Prieto, P., Electrical conductivity of oxidized-graphenic nanoplatelets obtained from bamboo: effect of the oxygen content, *Nanotechnology*, 2016, 27, 36, 365708
- [8] Prías-Barragán, J. J., Gross, K., Ariza-Calderón, H. and Prieto, P. (2016), Synthesis and vibrational response of graphite oxide platelets from bamboo for electronic applications. *Phys. Status Solidi A*, 213: 85-90. doi:10.1002/pssa.201532433