

Empleo de palma-ftalocianinas como sustrato y electrodos en dispositivos semiconductores

Use of palm-phthalocyanines as substrate and electrodes in semiconductor devices

Héctor Iván Sánchez Moore ^{a,*}, María Elena Sánchez Vergara ^{a, b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac México Norte, Avenida Universidad Anáhuac 46, Col. Lomas Anáhuac, Huixquilucan 52786, Estado de México, México.

^b Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Emiliano Zapata S/N, Col. El Trafico, Nicolás Romero, 54400, Estado de Mexico, Mexico

Resumen

En este trabajo se presenta la fabricación de dispositivos semiconductores orgánicos, depositados sobre sustratos de hoja de palma reciclada, y ftalocianinas halogenadas de cobre e indio, $F_{16}CuFt$ e $InFtCl$ como electrodos. Para la fabricación de los dispositivos, los sustratos de palma se prepararon en sus dimensiones y superficie, con la finalidad de ser recubiertos con carbón conductor. Los electrodos $F_{16}CuFt$ y $InFtCl$ se depositaron como películas delgadas por evaporación al alto vacío, y los dispositivos fabricados se caracterizaron mediante espectrofotometría Ultravioleta-visible y Fluorescencia. A partir de la Reflectancia, se determinó la función Kubelka-Munk, con la finalidad de obtener el band gap óptico, parámetro fundamental en la determinación de la capacidad semiconductora de las ftalocianinas. Posteriormente, se evaluó el comportamiento eléctrico por el método de cuatro puntas colineal. La evaluación eléctrica se realizó en condiciones de iluminación natural, de oscuridad y de radiación a diferentes longitudes de onda, presentándose diferente comportamiento para cada electrodo.

Palabras Clave: Semiconductor Orgánico, Palma Reciclada, Ftalocianina, Dispositivo Optoelectrónico.

Abstract

This work presents the fabrication of semiconductor organic devices on substrates of recycled palm leaf, and halogenated copper and indium phthalocyanines, $F_{16}CuPc$ and $InPcCl$ as electrodes. For the fabrication of the devices, the palm substrates were prepared in their dimensions and surface, with the purpose of being coated with conductive carbon. $F_{16}CuPc$ and $InPcCl$ electrodes were deposited as thin films by high vacuum evaporation and the manufactured devices were characterized using Ultraviolet-visible spectroscopy and Fluorescence. From the Reflectance, the Kubelka-Munk function, was determined to obtain the optical band gap, a fundamental parameter in determining the semiconductor capacity of the phthalocyanines. Subsequently, the electrical behavior was evaluated using the four-point collinear method. The electrical evaluation was conducted under natural lighting, darkness and radiation at different wavelengths, and different behavior was presented for each electrode.

Keywords: Organic Semiconductor, Recycled Palm, Phthalocyanine, Optoelectronic Device.

1. Introducción

Actualmente, se vive en una sociedad que depende en gran medida de la asistencia de dispositivos electrónicos, como herramientas indispensables en la rutina diaria. Sin embargo; su uso ha aumentado drásticamente en las últimas décadas, provocando una mayor generación de residuos electrónicos, mismos que hoy en día, representan una amenaza para el medio ambiente, y requieren ser reemplazados por materiales degradables, biodegradables y/o biocompatibles (Irimia-Vladu, 2014), (Divyasri, 2025). Bajo esta problemática, la

Electrónica Verde está tomando cada vez más relevancia, ya que no sólo contempla la reducción de residuos electrónicos, los cuales, según datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), varían de 20 a 50 millones de toneladas métricas por año (Esopere et al., 2024), sino que, busca sustituir el uso de semiconductores inorgánicos como el silicio o el arseniuro de galio, por semiconductores orgánicos como las ftalocianinas. Las ventajas de estas van desde sus buenas propiedades eléctricas y ópticas, que pueden ser moduladas por medio de cambios en su estructura molecular, hasta su bajo costo, y su bajo impacto ambiental (Alimnazarov et al., 2024).

*Autor para la correspondencia: Héctor Iván Sánchez Moore

Correo electrónico: hector.sanchez@anahuac.mx (Héctor Iván Sánchez Moore), elena.sanchez@anahuac.mx (María Elena Sánchez Vergara).

Las ftalocianinas son semiconductores orgánicos que deben su conductividad eléctrica, a la presencia de iones metálicos en el centro de su molécula, y a la presencia de sustituyentes o radicales en la periferia de su macrociclo o coordinados al átomo metálico. Halógenos altamente electronegativos como el fluoruro o el cloruro, permiten desplazar la densidad de electrones del anillo de ftalocianina, estabilizando los estados de oxidación del metal central, y ayudando al transporte de cargas (Cantera-Cantera et al., 2025). En este trabajo, se propone el desarrollo de dispositivos orgánicos de estado sólido, integrados por películas semiconductoras de ftalocianinas halogenadas de cobre e indio, $F_{16}CuFt$ e $InFtCl$. Dichas ftalocianinas fueron seleccionadas por sus propiedades únicas, las cuales contribuyen significativamente al desempeño de los dispositivos. En el caso de la ftalocianina de cobre, el fluoruro mejora la conductividad electrónica, la estabilidad térmica e incrementa la afinidad del material por los electrones. Por su parte, el cloruro en la ftalocianina de indio posee una estructura que permite una buena movilidad de electrones y estabilidad química. Estas propiedades evidencian la gran versatilidad de las ftalocianinas, como candidatas prometedoras en aplicaciones optoelectrónicas y electroquímicas (Cantera-Cantera et al., 2025).

Regresando al tema de la Electrónica Verde, los dispositivos semiconductores orgánicos, surgen como elementos determinantes para abordar los dilemas relacionados con la energía, y fomentar la sostenibilidad ambiental. El interés principal en dichos dispositivos radica en integrar materiales biodegradables, como por ejemplo las hojas de palma, con el fin de reducir los desechos no biodegradables, sin comprometer la eficiencia de conversión de energía de los dispositivos (Chen et al., 2020). Es por lo anterior, que en este trabajo se plantea el uso novedoso de hojas de palma recicladas, como sustratos en dispositivos semiconductores orgánicos, fabricados a base de las ftalocianinas $F_{16}CuFt$ e $InFtCl$. La hoja de palma se compone principalmente de lignina, celulosa y hemicelulosa, estos biopolímeros naturales pueden brindar propiedades esenciales a los dispositivos, tales como excelente durabilidad estructural, una buena tolerancia al impacto y una adecuada resistencia a la flexión, lo que a su vez contribuye a aumentar el ciclo de vida útil que estos dispositivos de estado sólido pueden llegar a tener (Rotich and Atalie, 2022).

2. Metodología Experimental

La $InFtCl$ (ftalocianina de indio(III) clorada: $C_{32}H_{16}ClInN_8$), la $F_{16}CuFt$ (hexadecafluorofthalocianina de cobre(II): $C_{32}CuF_{16}N_8$), el Nylon 11 (poliundecanolactama: $[-NH(CH_2)_{10}CO-]_n$), y el $TBA \cdot PF_6$ (tetrabutilamonio hexafluorofosfato: $(CH_3CH_2CH_2CH_2)_4N(PF_6)$) se adquirieron directamente de fuentes comerciales. Se realizó voltamperometría cíclica utilizando un bipotenciostato-galvanostato Metrohm $\mu Stat$ 400, y software en un rango de -1.5 a 1.5 V, con una velocidad de barrido de 50 mV/s y un paso de potencial de 2 mV, utilizando soluciones de acetonitrilo (C_2H_3N) 10^{-5} M con TPAB (bromuro de tetrapropilamonio: $(C_{12}H_{28}NBr)$) como electrolito de soporte y 110 electrodos serigrafiados de carbono Metrohm.

El dispositivo verde fue fabricado de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 1. Se utilizó hoja de palma

como sustrato, electrodos de $InClFt$ y $F_{16}CuFt$, una membrana separadora de nylon 11 y $TBA \cdot PF_6$ como electrolito de soporte. Para la fabricación del dispositivo, cuyo proceso esquemático se presenta en la Figura 2, los sustratos de hoja de palma reciclada se cortaron en trozos de 10 x 4.3 cm (Figura 2a). Posteriormente, se lijaron para eliminar su rugosidad superficial, y se recubrieron con pintura de carbón conductor. Esta pintura fue seleccionada, debido a su conductividad y bajo impacto ambiental, además de ser una opción efectiva para mejorar el rendimiento, retención y transferencia de cargas en los dispositivos. Durante la fabricación del dispositivo, la $InFtCl$ y la membrana separadora de Nylon 11, se depositaron como películas delgadas por la técnica de evaporación al alto vacío (Figura 2b), a una temperatura de 250°C y un vacío de 8.6×10^{-5} torr. Así mismo, el electrolito $TBA \cdot PF_6$ y la $F_{16}CuFt$ también se depositaron con la técnica de evaporación al alto vacío, a una temperatura de 250°C y un vacío de 8.6×10^{-6} torr. Esta técnica proporcionó un alto grado de control durante el depósito, incluyendo tiempo, temperatura de sublimación, temperatura del sustrato y el vacío base (Figura 2c). La optimización de estas variables permitió el depósito de las películas con espesor y orientación molecular precisos. Los espesores se midieron con un monitor de micro balanza de cristal de cuarzo, conectada a un sensor de espesor. Los espesores medidos son $InFtCl = 904 \text{ Å}$, Nylon 11 = 186 Å, $TBA \cdot PF_6 = 116 \text{ Å}$ y $F_{16}CuFt = 470 \text{ Å}$.

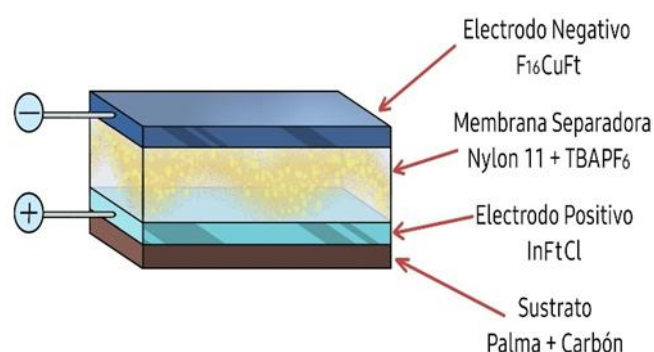


Figura 1: Representación esquemática del dispositivo semiconductor verde

El dispositivo fue tratado por relajación térmica en un horno Briteg SC-92898 a 140 °C durante 12 minutos (Figura 2d). La relajación térmica se realizó con la finalidad de introducir el electrolito de soporte en la membrana de nylon y promover el transporte de carga en el dispositivo. Este se caracterizó mediante espectrofotometría Ultravioleta-visible, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific Evolution 220 (Figura 2e) en un rango de longitud de onda de 190 a 1100 nm, para la determinación de la Absorbancia y Reflectancia. A partir de estos parámetros ópticos, se determinó la función Kubelka-Munk, $F(K-M)$, con la finalidad de obtener el band gap óptico, parámetro fundamental en la determinación de la capacidad semiconductora de las ftalocianinas. La Fluorescencia fue evaluada en un espectrofluorómetro FP-8550 Jasco (Figura 2f). Finalmente, las propiedades eléctricas de los electrodos del dispositivo se evaluaron mediante el método de cuatro puntas colineal, utilizando una estación de sensores con un circuito controlador de iluminación Next Robotix y un picoamperímetro automático Keithley 4200-SCS-PK1 (Figura 2g). Esta es una técnica comúnmente

utilizada que se realiza a lo largo de una línea sobre el dispositivo, con espacios iguales entre los puntos de prueba.

La evaluación eléctrica se realizó bajo iluminación natural, oscuridad y radiación a diferentes longitudes de onda comprendidas entre el rojo y el ultravioleta del espectro electromagnético, esto con la finalidad de determinar la capacidad de los electrodos del dispositivo, de actuar como fotodiodos.

registró en 363 nm, mientras que la $F_{16}CuFt$ presentó su mayor Absorbancia en 359 nm. Estos valores nos muestran la

diferencia significativa de ambos semiconductores orgánicos, y el cómo interactúan con la luz, en esta región del espectro.

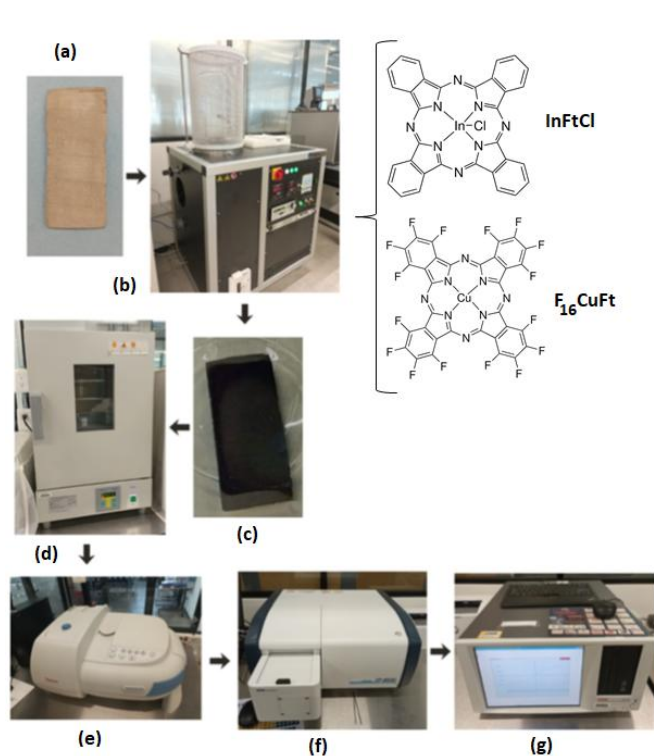


Figura 2: Proceso esquemático de la fabricación del dispositivo (a) sustrato de palma, (b) equipo de evaporación al alto vacío, (c) sustrato con arquitectura tipo sándwich de las películas depositadas, (d) estufa de recocido, (e) espectrofotómetro UV-vis, (f) espectrofluorómetro y (g) fuente para caracterización eléctrica

3. Resultados y Discusión

Inicialmente se caracterizaron tanto por Voltametría Cíclica como por Absorbancia, las ftalocianinas $InClFt$ y $F_{16}CuFt$ en solución de acetonitrilo, empleando el TPAB como electrolito de soporte. En la Figura 3a se observa el voltagrama para la $InClFt$ en la que se observa tanto la sección correspondiente a la oxidación como a la reducción. Resultados similares se obtuvieron para la solución de $F_{16}CuFt$. Por otro lado; en las Figuras 3b y 3c se observan los espectros de absorción para las soluciones de $InClFt$ y $F_{16}CuFt$, y en ambos casos se observan bandas alrededor de 380 nm y entre 600-800nm. La primera corresponde a la banda-Q, y la segunda a la Soret-banda y son indicio de la capacidad semiconductora de las ftalocianinas, así como de su alta capacidad óptica de absorber energía, lo cual puede ser aprovechado en aplicaciones optoelectrónicas y fotovoltaicas. Las bandas Q y Soret implican una alta capacidad de absorción de luz por parte de las ftalocianinas, lo que podría traducirse en una mejora en la eficiencia de la captura de la luz por parte de dispositivos que emplearan estos materiales. En el caso de la $InPcCl$, la mayor Absorbancia se

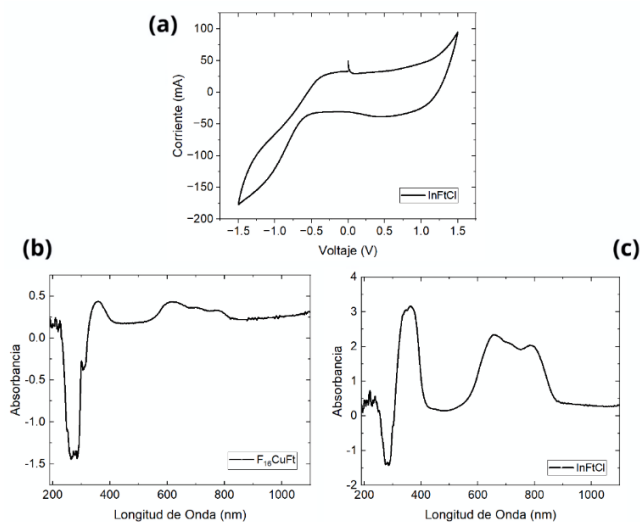


Figura 3: (a) Voltagrama de solución de $InFtCl$. Absorbancia en solución de (b) $F_{16}CuFt$ y (c) $InFtCl$

Tal y como se mencionó anteriormente, el dispositivo orgánico fabricado, posee como electrodos películas semiconductoras de $F_{16}CuFt$ e $InFtCl$, las cuales presentan una buena absorción de luz visible y una alta estabilidad óptica. Es por esto, que el dispositivo fue analizado en términos de su Reflectancia R. Una R baja es requerida para garantizar una mayor eficiencia energética, así como un mejor aprovechamiento del potencial fotoelectroquímico del dispositivo. En la Figura 4 se muestra el espectro para el dispositivo orgánico, y es evidente que presenta una R baja, la cual es inferior a 6%, lo que es referencia de una muy buena absorción de luz por parte del dispositivo. El valor de R mínimo registrado es de 4.1% para una longitud de onda de 592 nm, mientras que el valor máximo de R es de 5.7% para una longitud de onda de 390 nm. Además, es importante considerar que, en el espectro mostrado, las bandas Q y Soret correspondientes a las ftalocianinas empleadas como electrodos, se distinguen en una longitud de onda λ , alrededor de 350 y alrededor 600 nm respectivamente. Estas bandas están asociadas a las transiciones electrónicas $\pi \rightarrow \pi^*$, de los 18 electrones π conjugados de la estructura de las ftalocianinas. Las bandas proporcionan información respecto al transporte de cargas desde el HOMO (Orbital Molecular más Alto Ocupado) hasta el LUMO (Orbital Molecular Desocupado más Bajo). Esta información es muy útil, puesto que las transiciones electrónicas HOMO-LUMO, son las responsables del transporte de cargas entre los electrodos del dispositivo orgánico. Además, la banda Q del dispositivo, es referencia de su buena absorción de la radiación y de su efectividad para interactuar con la luz de manera funcional y eficiente. Es

importante considerar que la desventaja del dispositivo es la poca transparencia de la palma, lo que limita la evaluación de Absorbancia del dispositivo completo.

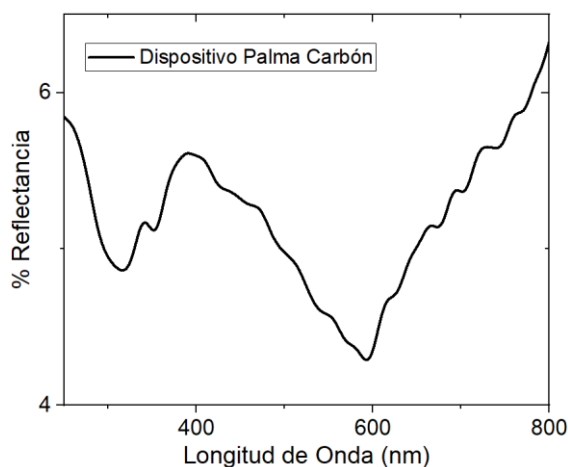


Figura 4: Reflectancia del dispositivo orgánico sobre sustrato de hoja de palma.

Donde $h\nu$ es la energía del fotón (h = constante de Planck y ν = inverso de la longitud de onda $= 1/\lambda$), A es la constante de proporcionalidad, el exponente P es dependiente de la estructura de bandas del semiconductor (Jain et al., 2015) y E_g es el band gap óptico. Finalmente, el coeficiente de absorción α , es directamente proporcional a $F(K-M)$, y en la ecuación (2) de Tauc (Tauc, et al., 1966), α puede ser reemplazado por esta función $F(K-M)$:

$$(h\nu \times F(K-M)) = A (h\nu - E_g)^P \quad (2)$$

Es importante considerar que P tiene un valor de $1/2$, y se refiere a las transiciones electrónicas indirectas que se llevan a cabo entre las cargas que saltan del HOMO al LUMO, como resultado del carácter amorfo de los electrodos. Las películas InFtCl y F_{16}CuFt que integran los electrodos se depositaron por evaporación al alto vacío, que es una técnica que cambia inicialmente a las ftalocianinas de estado sólido a gaseoso y posteriormente, al entrar en contacto con el sustrato del dispositivo que se encuentra a temperatura ambiente, vuelven a cambiar de fase a estado sólido formando la película delgada. Estos drásticos cambios térmicos y de fase en las ftalocianinas, sumados a pequeñas irregularidades que pueden existir en la superficie de los sustratos de palma donde se depositaron, genera procesos de nucleación y crecimiento heterogéneos, que dan como resultado películas amorfas. En este tipo de películas semiconductoras, se favorecen las transiciones electrónicas indirectas (Tauc, et al., 1966). A diferencia de las transiciones electrónicas directas donde solo se involucran fotones, en las transiciones indirectas, los electrones saltan del HOMO al LUMO con la participación de fonones además de los fotones, para conservar el momento total.

La evaluación final de E_g , consiste en graficar $(F(K-M))^{1/2}$ en función de $h\nu$, ajustando la porción lineal de esta curva con una línea recta. La intersección y el uso de la ecuación (3), proporcionan el valor del band gap óptico en unidades de eV. Adicional a los parámetros mencionados anteriormente, c corresponde a la velocidad de la luz.

$$E_g = hc/\lambda \quad (3)$$

El valor de E_g óptico del dispositivo orgánico es de 3.28 eV, lo que lo sitúa en el marco de los dispositivos semiconductores, que para este tipo de materiales pueden llegar hasta 3.5 eV. Este valor de E_g es útil para dispositivos como los diodos orgánicos emisores de luz (OLEDs), los sensores ópticos y los transistores orgánicos de efecto de campo (OFETs).

Los espectros de Fluorescencia del dispositivo orgánico mostrados en la Figura 5, se evaluaron con la finalidad de identificar los picos de excitación específicos en los que ocurren las transiciones electrónicas del dispositivo. Al conocer dichas señales de excitación, es posible parametrizar de una manera adecuada, las fuentes de luz en las cuales el dispositivo presenta una mayor eficiencia, y de este modo, determinar aplicaciones reales que garanticen el mejor desempeño por parte del dispositivo, así como también, un mayor ciclo de vida útil. Para los picos de excitación registrados, las emisiones máximas de longitudes de onda se presentaron en 451 nm, de acuerdo con el espectro de la Figura 5a, y 467 nm en el espectro de la Figura 5b; ambas correspondientes a longitudes de onda en el rango del azul del espectro electromagnético. La alta Fluorescencia presentada por el dispositivo orgánico, genera ventajas en su uso como OLED de emisión azul, o en sensores ópticos fluorescentes de pH, en dispositivos para la detección de gases o biomoléculas, en láseres orgánicos de estado sólido o en marcadores fluorescentes azules, para la visualización de estructuras biológicas. Estos dispositivos pueden emitir luz de manera eficiente cuando se les aplica una corriente eléctrica, o cuando la luz los excita. Así mismo, cabe destacar que la alta Fluorescencia presentada por el dispositivo, indica la excelente calidad de las películas de las ftalocianinas que integran los electrodos. Es importante mencionar que la ftalocianina de cobre, normalmente emite en el rojo mientras que la de indio en el azul-verde, la presencia de los componentes biológicos del sustrato de palma, seguramente son los causantes del desplazamiento en la emisión de las ftalocianinas.

Adicionalmente, el desplazamiento de Stokes (Δ_{Stokes}), que se refiere a la diferencia de longitud de onda o energía entre el máximo de absorción y el máximo de emisión de las ftalocianinas en los electrodos después de ser excitadas, es de 6.7 eV (185 nm) para el primer pico y 18.5 eV (67 nm) para el segundo pico de los espectros.

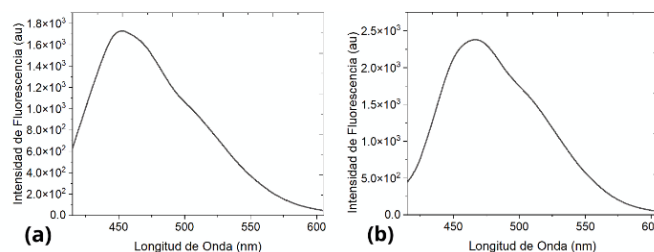


Figura 5: Intensidad máxima de Fluorescencia del dispositivo orgánico en (a) 451 nm y (b) 467 nm.

Se evaluó el comportamiento eléctrico de cada electrodo InFtCl y F_{16}CuFt , con la finalidad de determinar su capacidad de transporte de cargas frente a diferentes condiciones de iluminación. En la Figura 6 se presentan las gráficas corriente-

voltaje (I-V) obtenidas para cada uno de los electrodos. Esto debido a que las ftalocianinas, influyen directamente en el rendimiento, eficiencia y estabilidad del dispositivo. Los electrodos son los responsables de inyectar tanto huecos como electrones al interior del dispositivo, y gracias a la evaluación de su comportamiento es posible detectar barreras de inyección, rectificación indeseada y pérdidas óhmicas. Para el caso del electrodo InFtCl, se observa un comportamiento óhmico en el que la intensidad de luz irradiada ejerce influencia en el transporte de cargas, sobre todo en condiciones de iluminación natural, para la que se genera la mayor corriente eléctrica transportada en el dispositivo. Caso muy diferente el que ocurre para el electrodo F₁₆CuFt, en donde, por un lado, no se observa cambio en la corriente eléctrica al cambiar las condiciones de iluminación del electrodo y, por otro lado, el comportamiento cambia de óhmico a $V < 0.18$ V a un comportamiento de corriente limitada por carga espacial (SCLC), a $V > 0.18$ V. Este cambio en comportamiento se debe a que probablemente, las cargas eléctricas se acumularon en diferentes regiones del dispositivo. La corriente eléctrica está limitada por la acumulación de cargas, más que por la disponibilidad de portadores de carga, sin embargo; este electrodo es el que transporta la mayor corriente eléctrica. El cambio en el comportamiento eléctrico entre los dos electrodos es esperado, debido a que cada uno de ellos debería cumplir una función diferente en el dispositivo, y, por otro lado, dependen de la capa activa que tenga dicho dispositivo, de sus orbitales HOMO y LUMO y también, de la alineación de estos valores con los propios HOMO y/o LUMO de InFtCl y F₁₆CuFt.

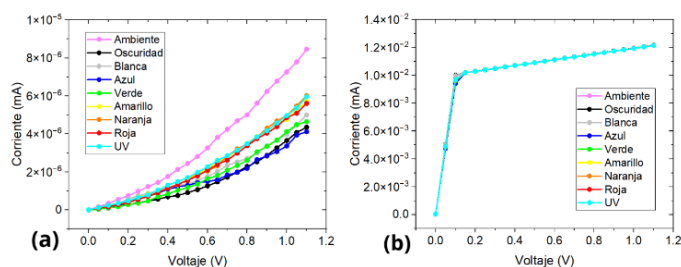


Figura 6: Gráficas Corriente-Voltaje para los electrodos de (a) InFtCl y (b) F₁₆CuFt.

Adicionalmente, al comparar el comportamiento eléctrico del electrodo de InFtCl, con estudios realizados previamente en dispositivos de esta ftalocianina (Zeyada, et al., 2015), se observa que la corriente transportada es del mismo orden de magnitud (10^{-5} A) que en nuestro electrodo. Además, también se presenta el mismo tipo de comportamiento óhmico, lo que indica que el sustrato de palma, no ejerce influencia negativa sobre la película de InFtCl. Es de remarcar que el silicio tipo-p, utilizado como sustrato en el dispositivo reportado previamente (Zeyada, et al., 2015), presenta menor rugosidad que la palma y, sin embargo, el comportamiento eléctrico no cambia en las películas. Con respecto al comportamiento eléctrico del electrodo F₁₆CuFt, se obtuvieron resultados similares a los reportados en la literatura para CuFt (Ahmad, et al., 2010); la película de ftalocianina presenta comportamiento óhmico a bajos voltajes y SCLC a altos voltajes. Referente a la corriente transportada, los resultados previos reportan valores inferiores del orden de 10^{-4} A para CuFt (Ahmad, et al., 2010), de 10^{-5} A para F₈CuFt (Matumoto, et al., 2017) y de 10^{-8} A para cristales de F₁₆CuFt (Jiang, et al., 2011), con respecto a 10^{-2} A

obtenidos en nuestro trabajo. También en este caso, no hay efecto negativo con el uso de sustrato de palma, ya que en trabajos previamente reportados (Ahmad, et al., 2010) (Matumoto, et al., 2017), emplean silicio de muy baja rugosidad. Esto hace viable el uso de la hoja de palma degradable y sustentable, en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos verdes.

4. Conclusiones

Se fabricó un innovador dispositivo verde y de estado sólido, empleando hoja de palma recubierta con pintura de carbón conductor como sustrato. El diseño del dispositivo incluyó electrodos de las ftalocianinas halogenadas InClFt y F₁₆CuFt, membrana separadora de nylon 11 y TBA·PF₆ como electrolito de soporte. Estos componentes se fabricaron como películas delgadas, mediante la técnica de evaporación al alto vacío, lo que generó gradientes térmicos elevados que propiciaron la nucleación y crecimiento heterogéneos de los electrodos. Estos electrodos mostraron actividad óptica importante, reflejada en las bandas Q y B obtenidas en el espectro de Reflectancia. El band gap óptico de 3.28 eV, se calculó de acuerdo a la función Kubelka–Munk y al modelo de Tauc, considerando transiciones electrónicas indirectas, consistentes con la naturaleza amorfa de los electrodos. Por otro lado, también se observó una alta Fluorescencia en el dispositivo, con emisiones máximas en 451 nm y 467 nm. Estos resultados dan indicio del comportamiento adecuado de estos electrodos, como componentes de dispositivos semiconductores orgánicos. Finalmente, el comportamiento eléctrico de cada electrodo fue evaluado por el método de cuatro puntas, considerando diferentes condiciones de iluminación del dispositivo. El comportamiento eléctrico cambia, dependiendo del tipo de ftalocianina. El electrodo de InFtCl muestra un comportamiento óhmico, mientras que el de F₁₆CuFt, presenta comportamiento óhmico a bajos voltajes, y comportamiento de corriente limitada por carga espacial a voltajes superiores a 0.18 V. Estos comportamientos, en conjunto con la corriente eléctrica transportada por los electrodos, dan indicio de su adecuado funcionamiento en el dispositivo. El sustrato reciclable y de bajo impacto ambiental como es la palma, es adecuado para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos.

Referencias

- Irimia-Vladu, M., (2014). "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices for sustainable future. *Chemical Society Reviews* 43, 588-610. DOI: 10.1039/C3CS60235D
- Divyasri, D. M., Kumar, D. V., Raja Babu, D., Vedik, B., (2025). Recycling of E-waste and Green Electronic Manufacturing. *E3S Web of Conferences* 619, 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202561901013
- Esopere, Y., Mizunoya, T., Richards, D., Yabar, H., (2024). Leveraging Life Cycle Assessment and System Dynamics Model Analysis for an Integrated Household E-Waste Management System in Yaoundé, Cameroon. *Urban Science* 8, 77. DOI: 10.3390/urbansci8030077
- Alimnazarov, B. Kh., Ismatov, S. Sh., Jumaeva, Z. E., Kasimov, Sh. A., Muqumova, G. J., Shukurov, D. Kh., Turaev, Kh. Kh., (2024). The Current State of Research in the Field of Obtaining Semiconductor Materials and Prospects for Development. *E3S Web of Conferences* 529, 01044. DOI: 10.1051/e3sconf/202452901044

- Cantera-Cantera, L. A., Sánchez Moore, H. I., Sánchez Vergara, M. E., (2025). Investigation of Halogenated Metallic Phthalocyanine (InPcCl and F₁₆CuPc)-Based Electrodes and Palm Substrate for Organic Solid-State Supercapacitor Fabrication. *Micromachines* 16, 455. DOI: 10.3390/mi16040455
- Chen, W. C., Chueh, C. C., Huang, K. T., (2020). Recent advance in renewable materials and green processes for optoelectronic applications. *Materials Today Sustainability* 11-12, 100057. DOI: 10.1016/j.mtsust.2020.100057
- Rotich, G., Atalie, D., (2022). Mechanical and Water Absorption Properties of Jute/Palm Leaf Fiber-Reinforced Recycled Polypropylene Hybrid Composites. *International Journal of Polymer Science* 2022, 4408455. DOI: 10.1155/2022/4408455
- Ajayi, D. I., Chahrour, K. M., Chahul, H. F., Danladi, E., Igbawua, T., Jubu, P. R., Landi Jr., S., Muhammad, A., Obaseki, O. S., Yam, F. K., (2024). Considerations about the determination of optical bandgap from diffuse reflectance spectroscopy using the Tauc plot. *Journal of Optics* 53, 5054–5064. DOI: 10.1007/s12596-024-01741-0
- Tauc, J., Grigorovici, R., Vancu, A., (1966). Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. *Phys. Status Solidi B*. 15, 627-637. DOI: 10.1002/pssb.19660150224
- Zeyada, H.M., El-Nahass, M.M., El-Menyawy, E.M., El-Sawah, A.S., (2015). Electrical and photovoltaic characteristics of indium phthalocyanine chloride/p-solar cell. *Synthetic Metals* 207, 46-53. DOI: 10.1016/j.synthmet.2015.06.008
- Matumoto, A., Hoshino, N., Akutagawa, T., Matsuda, M., (2017). N-Type Semiconducting Behavior of Copper Octafluorophthalocyanine in an Organic Field-Effect Transistor. *Appl. Sci.* 7, 1111. DOI: 10.3390/app7111111
- Jiang, H., Tan, K.J., Akutagawa, T., Zhang, K.K., Chen, X., Kloc, C., (2011). Ultrathin organic single crystals: fabrication, field-effect transistors and thickness dependence of charge carrier mobility. *J. Mater. Chem.*, 21, 4771. DOI: 10.1039/c0jm04383d