

Fotobaterías para almacenamiento y conversión de energía solar

Luis Antonio Solís-Balderas, Alfredo Romero-Contreras,
Eduardo Maximiano Sánchez-Cervantes

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas,
San Nicolás de los Garza, NL, México

luis.solisbld@uanl.edu.mx, alfredo.romeroc@uanl.edu.mx

Autor de correspondencia: eduardo.sanchezcv@uanl.edu.mx

RESUMEN

Las fotobaterías permiten convertir y almacenar energía solar en un mismo dispositivo. En este trabajo se evaluó una fotobatería de ion-litio con un electrodo $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (1:1) preparado por mezcla mecánica. Mediante técnicas como DRX, SEM, UV-Vis y Mott-Schottky se confirmó la formación de una heterounión que mejora la separación de cargas y la absorción de luz visible. Bajo iluminación (1 sol), la capacidad aumentó de 160 a 220 mAh g⁻¹. Este efecto se asocia a la generación de cargas fotoinducidas que favorecen las reacciones electroquímicas, mostrando el potencial del material para aplicaciones energéticas.

PALABRAS CLAVE

Fotobaterías, fotoelectrodo, heterounión, $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, almacenamiento de energía.

ABSTRACT

Photobatteries enable simultaneous solar energy conversion and storage in a single device. In this work, a lithium-ion photobattery using a $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (1:1) electrode prepared by mechanical mixing was evaluated. XRD, SEM, UV-Vis, and Mott-Schottky analyses confirmed the formation of a heterojunction that improves charge separation and visible-light absorption. Under illumination (1 sun), the specific capacity increased from 160 to 220 mAh g⁻¹. This behavior is attributed to photogenerated charges that enhance electrochemical reactions, demonstrating the potential of this material for energy storage applications.

KEYWORDS

Photobatteries, photoelectrode, heterojunction, $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, energy storage

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de dispositivos de almacenamiento de energía ha impulsado al desarrollo de sistemas integrados que generen energía a partir de fuentes renovables y la almacenen de forma eficiente y sostenible. En este contexto, las fotobaterías han emergido como dispositivos híbridos que combinan los principios de las celdas solares y las baterías recargables, permitiendo aprovechar la absorción de energía lumínica para asistir los procesos electroquímicos de almacenamiento y conversión de energía.¹

El rendimiento de estos sistemas depende principalmente de los materiales fotoactivos como algunos óxidos metálicos y colorantes sensibilizados con perovskita que aumentan el almacenamiento electroquímico con una eficiencia de conversión que oscila entre 0.03 % – 4.6 %. Entre los materiales más utilizados para fotobaterías el TiO_2 destaca por su gran estabilidad estructural con una eficiencia de hasta 4.4 % y un aumento en la capacidad de 46.4 % bajo iluminación. Sin embargo, su limitada absorción en el espectro visible reduce la eficiencia de aprovechamiento de la radiación solar. Por otro lado, el Fe_2O_3 tiene una banda prohibida más estrecha de $E_g = 1.8 \text{ eV} - 2.2 \text{ eV}$ y una mayor absorción en el visible reportando una capacidad de

550 mAh g⁻¹ bajo iluminación de 470 nm, pero su baja movilidad de portadores de carga y rápida recombinación de pares electrón-hueco limitan su rendimiento electroquímico.^{2,3}

Se han diversificado estrategias para aumentar la recolección y almacenamiento de energía y evaluando métodos de interacción entre compuestos fotoactivos como deposiciones por spin-coating donde el grosor de la película es fundamental para una sinergia óptica, ya que este método de deposición genera interfaces que optimizan la transferencia de carga y extienden la respuesta fotoactiva hacia el visible. Además, otra estrategia para aumentar el rendimiento de fotobaterías son las heteroestructuras como SnO₂/TiO₂, LiFePO₄/TiO₂, Cu₂O-TiO₂ donde han demostrado combinar las ventajas de los compuestos individuales al promover una mayor separación de cargas fotogeneradas y aumentar la cantidad de iones de litio insertados con la asistencia de luz.⁴⁻⁶

En este trabajo se evaluó el rendimiento del compuesto TiO₂-Fe₂O₃ como electrodo fotoactivo en fotobaterías de ion-litio utilizando las técnicas de Impedancia electroquímica (EIS), Voltamperometría cíclica (CV), y mediciones galvanostáticas de carga/descarga (GCD) en presencia y ausencia de luz. Se emplearon técnicas de caracterización por difracción de rayos-X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía ultravioleta visible (UV-VIS) para confirmar la formación de una heteroestructura. Además, se utilizaron mediciones electroquímicas como espectroscopía Mott-Schottky, cronoamperometría y fotoluminiscencia para determinar los efectos de iluminación en la separación de cargas, cinética interfacial y respuesta fotoelectroquímica del sistema.

JUSTIFICACIÓN

Ante la creciente demanda de soluciones energéticas eficientes y sustentables, es necesario desarrollar dispositivos que integren la generación y el almacenamiento de energía en un solo sistema. Las fotobaterías representan una alternativa innovadora; sin embargo, su desempeño está limitado por las propiedades de los materiales fotoactivos. Por ello, este trabajo propone el uso de un compuesto TiO₂-Fe₂O₃ que mejora la absorción de luz y la separación de cargas, incrementando el rendimiento electroquímico bajo irradiación. La relevancia de esta investigación radica en su contribución al diseño de materiales más eficientes para sistemas de almacenamiento energético sustentable, con potencial aplicación en dispositivos de próxima generación.

METODOLOGÍA

Síntesis

Los materiales de partida empleados en este estudio fueron TiO₂ P-25 (99.8 %, DEGUSSA), Fe(NO₃)₃·9H₂O (98.9 %, ASC-Reagent), C₆H₈O₆·H₂O (99 %, JT-Baker) y C₂H₆O₂ (99.9 %, CTR). El óxido de hierro (Fe₂O₃) se sintetizó por el método sol-gel Pechini con una relación molar 1:1:4 entre el precursor de hierro (III), el ácido cítrico y el etilenglicol, respectivamente. Para ello, se disolvió Fe(NO₃)₃·9H₂O en 20 mililitros de agua destilada y se adicionó el ácido cítrico a temperatura ambiente manteniendo la mezcla en agitación durante 30 minutos. Posteriormente, se incorporó el etilenglicol y la solución resultante se calentó a 75 °C por 2 horas hasta la formación de una resina. Esta resina se secó en una estufa a 140 °C durante 12 horas, se molió manualmente en un mortero y se calcinó a 500 °C por 5 horas para obtener el Fe₂O₃.

Preparación de electrodos

El compuesto TiO₂-Fe₂O₃ se preparó mediante una mezcla mecánica simple en proporción 1:1 de ambos óxidos. La mezcla se molió en un mortero durante 20 minutos y posteriormente se sometió a un tratamiento térmico en horno a 200 °C por 12 horas. En la figura 1 se representa la preparación de los electrodos.

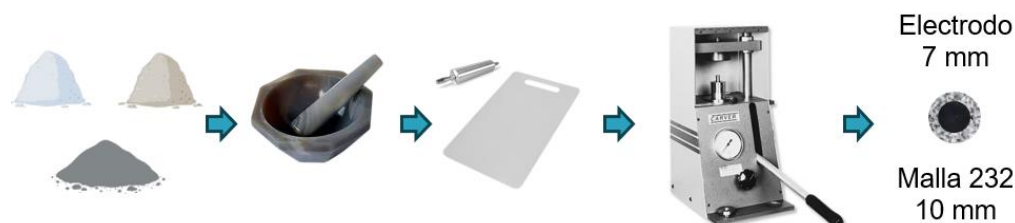


Fig. 1. Preparación de electrodos para fotobaterías de ion-litio.

Construcción de fotobaterías

Para la construcción de las fotobaterías de ion-litio se emplearon celdas tipo CR2032, las cuales fueron modificadas en la carcasa positiva mediante una apertura de 5 mm de diámetro, realizada por corte láser. Esta apertura se selló posteriormente con láminas de vidrio de 10 mm, utilizando un adhesivo UV (W-183 Loolifl), el cual fue curado mediante irradiación con luz UV de 365 nm durante 10 minutos. Posteriormente, el ensamblaje de las fotobaterías se llevó a cabo en una caja seca bajo atmósfera de argón. Se utilizó el compuesto como material fotoactivo, fibra de vidrio de 18 mm de diámetro como separador, 140 μL de LiPF_6 como electrolito y litio metálico como ánodo, representado en la figura 2.

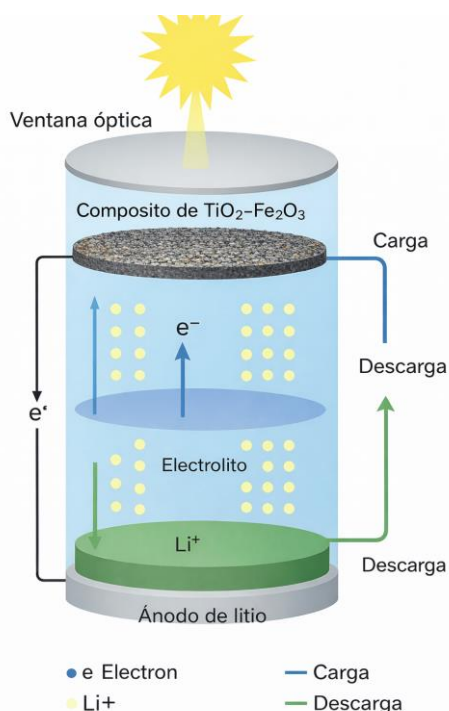


Fig. 2. Configuración de fotobaterías de ion-litio.

Caracterización

Los materiales fueron caracterizados mediante difracción de rayos X utilizando un difractómetro D2 Phaser Bruker, (radiación $\text{Cu-K}\alpha$), empleando un tamaño de paso de 0.05° cada 0.5 s^{-1} en un rango de 2θ de 10° a 65° . La morfología superficial y el tamaño de partícula se evaluaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio JEOL JSM-6701F, operado con un voltaje de aceleración de 10 kV – 20 kV. La energía de banda prohibida se determinó mediante espectroscopía UV-VIS de reflectancia difusa utilizando un espectrómetro Thermo-Scientific Evolution 300 PC, en el intervalo de 200 nm – 1100 nm. Para determinar experimentalmente las posiciones de las bandas de valencia y conducción de los materiales, así

como la densidad de portadores de carga, se realizaron mediciones de impedancia tipo Mott-Schottky (MS-EIS) utilizando un potenciostato Biologic VMP3. Los experimentos se llevaron a cabo en un intervalo de potencial de -0.8 V a 0.8 V y a una frecuencia de 1 Hz. Para estas mediciones, se prepararon películas delgadas de TiO_2 , Fe_2O_3 y del compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ depositando $60\ \mu\text{L}$ de cada dispersión sobre un área activa de $1\ \text{cm}^2$. La deposición se realizó mediante la técnica de *spin-coating* empleando un equipo Laurel TECH (WS-650MZ-23NPPB), operado a $4000\ \text{rpm}$ durante 30 segundos. Posteriormente, las películas se secaron a 100°C durante 12 horas. El análisis electroquímico se llevó a cabo en una celda de tres electrodos, donde las películas actuaron como electrodo de trabajo, un electrodo de Ag/AgCl ($3\ \text{M}$) como referencia y un electrodo de platino como contraelectrodo. Como electrolito se utilizó una solución acuosa de Na_2SO_4 0.5 molar tal como se ilustra en la figura 3.

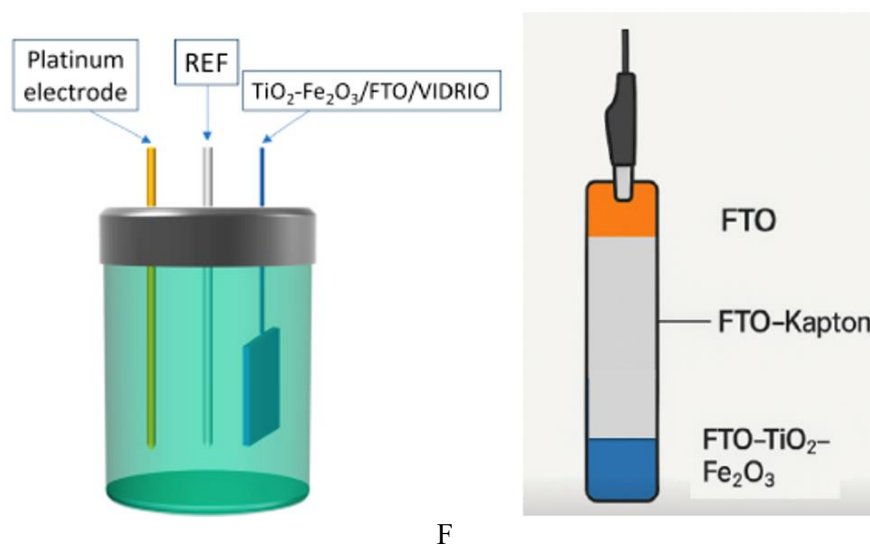


Fig. 3. Celda electroquímica de 3 electrodos.

Adicionalmente, se realizaron mediciones de cronoamperometría para evaluar la respuesta fotoelectroquímica de los materiales. Para ello, se registró la corriente generada bajo irradiación intermitente (ciclos ON/OFF cada 30 segundos) utilizando un simulador solar Sciencetech 55150, operado bajo condiciones estándar AM 1.5G . Estas mediciones se llevaron a cabo empleando la misma configuración electroquímica descrita para los experimentos de Mott-Schottky.

Evaluación y desempeño fotoelectroquímico

La caracterización electroquímica del compuesto $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ se realizó mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), empleando un potenciostato VMP3 (Biologic). Las mediciones se llevaron a cabo en una celda electroquímica configurada para evaluar su desempeño como fotoelectrodo en una batería de ion-litio, utilizando una frecuencia de $1\ \text{kHz}$ bajo condiciones controladas. Este método permitió evaluar el comportamiento electroquímico del material activo y su potencial aplicación en sistemas de almacenamiento y conversión de energía asistidos por luz.

Se llevó a cabo una voltamperometría cíclica en una ventana de potencial de $1 - 3\ \text{V}$ y una velocidad de exploración de $0.5\ \text{mV/s}$ en condiciones de oscuridad e iluminación de 1 sol con el simulador solar marca Sciencetech modelo 55150, y potenciostato VMP3 con el objetivo de evaluar los procesos redox asociados al material activo como se muestra en la figura 4 a). Este método proporcionó información sobre la reversibilidad de las reacciones electroquímicas y el comportamiento del sistema bajo condiciones dinámicas de operación. Además, se realizaron mediciones galvanostáticas de carga/descarga un potenciostato Neware modelo ST1702 como se

ilustra en la figura 4 b). Para esta medición se utilizó una ventana de potencial de 1 – 3 V aplicando una densidad de corriente constante de 20 mA g⁻¹. Las pruebas se efectuaron tanto en condiciones de iluminación como en oscuridad, con el fin de analizar la influencia de la radiación sobre el comportamiento electroquímico del sistema. Este procedimiento permitió evaluar la capacidad específica, la estabilidad durante el ciclado y la respuesta del material bajo condiciones operativas relevantes para aplicaciones en foto baterías de ion-litio.

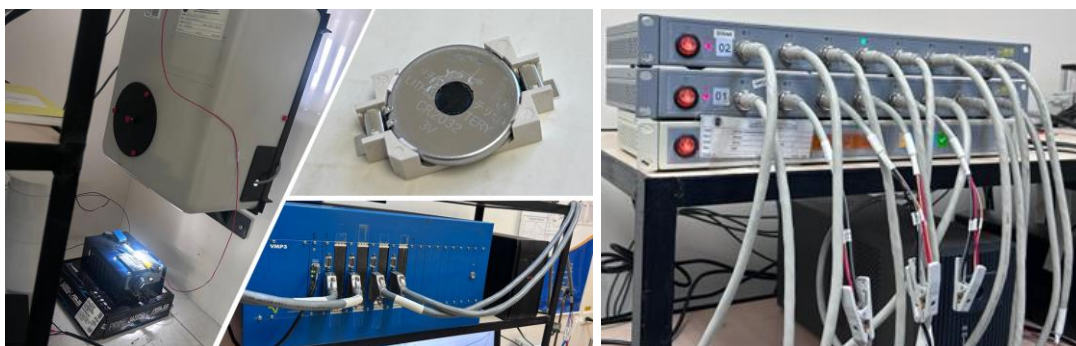


Fig. 4. a) Simulador Solar Sciencetech y potencióstato VMP3 b) Potenciostato Galvanostato Neware ST1702.

RESULTADOS

Los patrones de difracción confirman la presencia de fases cristalinas bien definidas en los materiales sintetizados representados en la figura 5. El TiO₂ (P-25)⁷ presenta las reflexiones características de la fase anatasa, mientras que el Fe₂O₃⁸ muestra los picos distintivos de la hematita, en concordancia con las cartas de referencia correspondientes. En el material compuesto TiO₂-Fe₂O₃^{9,10} se observan simultáneamente las señales de ambas fases, sin la aparición de picos adicionales ni desplazamientos apreciables en la posición de las reflexiones. Esto indica que no ocurre la formación de nuevas fases ni dopaje entre los óxidos, sino la generación de una heteroestructura donde cada componente conserva su identidad cristalina. Esta coexistencia de fases es relevante, ya que favorece la formación de una interfaz TiO₂-Fe₂O₃¹¹ que puede mejorar la separación de cargas, un aspecto clave para optimizar el desempeño en aplicaciones fotoelectroquímicas.

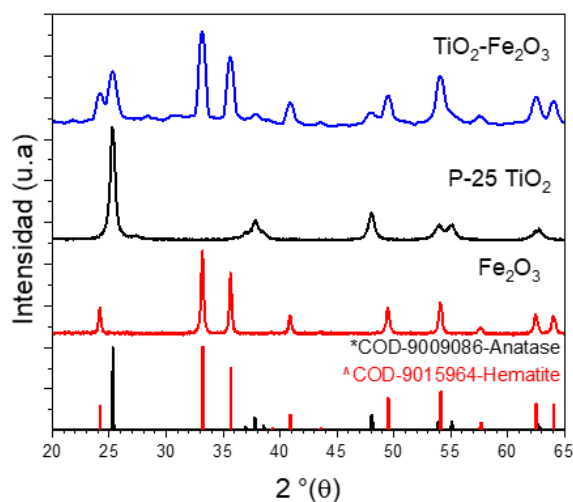


Fig. 5. Patrones de difracción de rayos-X de muestras de TiO₂, Fe₂O₃ y TiO₂-Fe₂O₃.

Las micrografías SEM representados en la figura 6 muestran diferencias claras en la morfología y el tamaño de partícula entre los materiales estudiados. El TiO_2 ¹² presenta partículas de forma predominantemente esférica con un tamaño promedio cercano a 37 nm, mientras que el Fe_2O_3 también exhibe una morfología esférica, aunque con un tamaño ligeramente mayor, alrededor de 46 nm. En el caso del material compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, se observa una morfología más compleja, donde coexisten partículas esféricas y estructuras tipo varilla, con un tamaño promedio cercano a 50 nm.¹³ Esta combinación sugiere una interacción entre ambos óxidos que favorece la formación de una estructura heterogénea. Estas características son relevantes, ya que una mayor heterogeneidad estructural puede favorecer la formación de interfaces activas, lo que contribuye a mejorar los procesos de transferencia y separación de carga en aplicaciones fotoelectroquímicas.

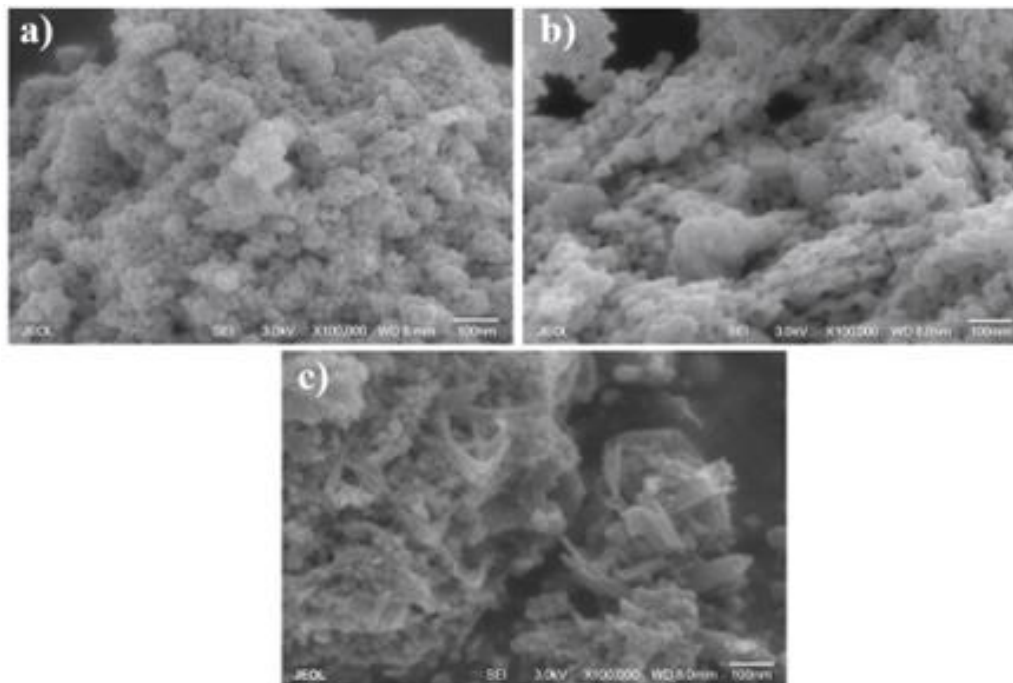


Fig. 6. Micrografías SEM de muestras a) TiO_2 , b) Fe_2O_3 y c) $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ con amplificación de 100,000x.

Los espectros de reflectancia difusa, analizados mediante el método de Tauc, permiten estimar la energía de banda prohibida (E_g) de los materiales y se muestran en la figura 7. El TiO_2 ¹⁴ presenta un valor de E_g cercano a 3.1 eV, característico de la fase anatasa, lo que limita su absorción principalmente a la región ultravioleta. Por su parte, el Fe_2O_3 ¹⁵ muestra un E_g de aproximadamente 2.06 eV, lo que le permite absorber en la región visible del espectro. En el material compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se identifican dos contribuciones energéticas, con valores cercanos a 3.09 eV y 2.09 eV, asociadas a cada uno de los óxidos.¹⁶ Esto confirma que ambos materiales conservan sus propiedades electrónicas individuales dentro del compuesto, en concordancia con los resultados de DRX. La coexistencia de estos dos niveles energéticos es particularmente relevante, ya que amplía el rango de absorción hacia la región visible y favorece la formación de una heterounión. Esto puede facilitar la separación de pares electrón-hueco, contribuyendo a una mejor respuesta fotoelectroquímica del sistema.

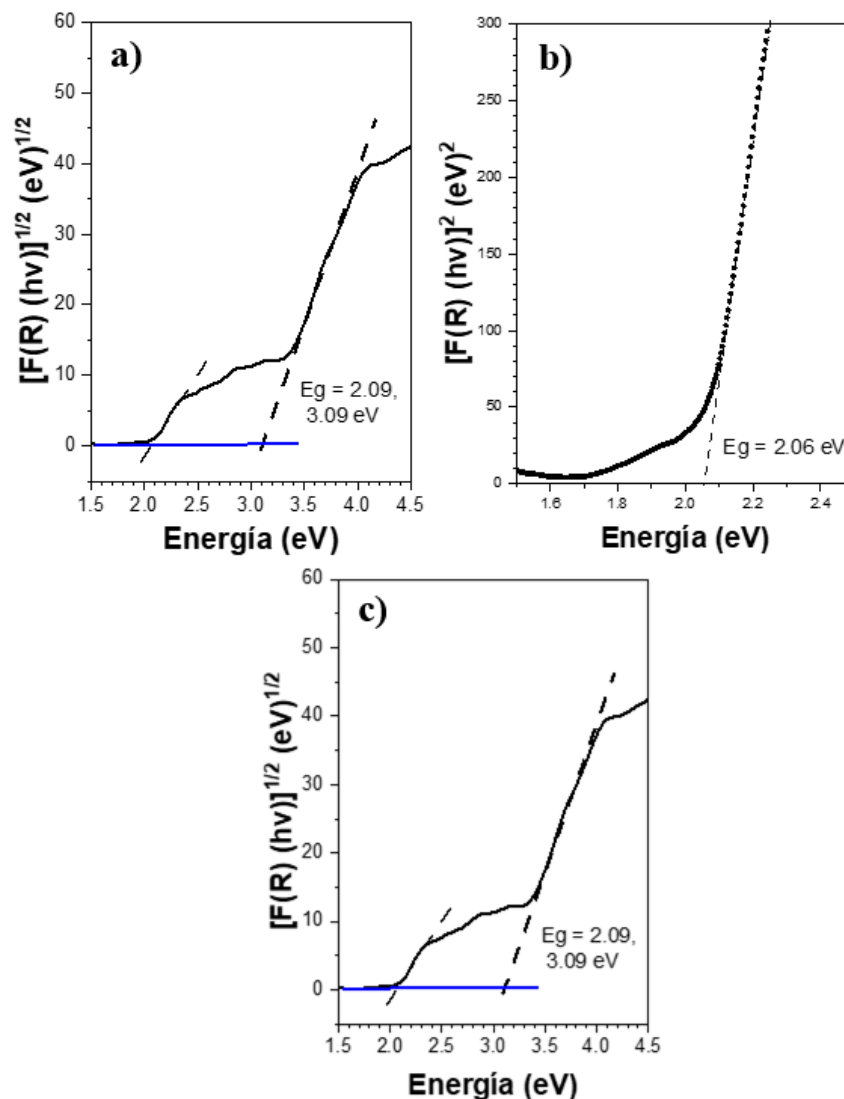


Fig. 7. Gráficas de Tauc obtenidas de reflectancia difusa de las muestras a) TiO_2 , b) Fe_2O_3 y c) $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Las mediciones de foto amperometría representada en la figura 8 muestran la respuesta de corriente bajo irradiación intermitente, evidenciando la generación de carga en los materiales analizados. El Fe_2O_3 presenta una señal de fotocorriente con respuesta a los ciclos ON/OFF, aunque con una rápida disminución de la corriente, lo que sugiere una recombinación significativa de los pares electrón-hueco. Por otro lado, el material compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ exhibe una respuesta más estable y reproducible a lo largo de los ciclos de iluminación. Aunque la intensidad de corriente puede ser menor en algunos intervalos, se observa una mejor retención de la señal y una disminución menos pronunciada durante el tiempo de irradiación.^{17,18} Esto indica que la formación de la heterounión $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ favorece la separación y el transporte de cargas, reduciendo los procesos de recombinación. En conjunto con los resultados estructurales y ópticos, estos hallazgos sugieren que la interfaz entre ambos óxidos juega un papel clave en la mejora del desempeño fotoelectroquímico del sistema.

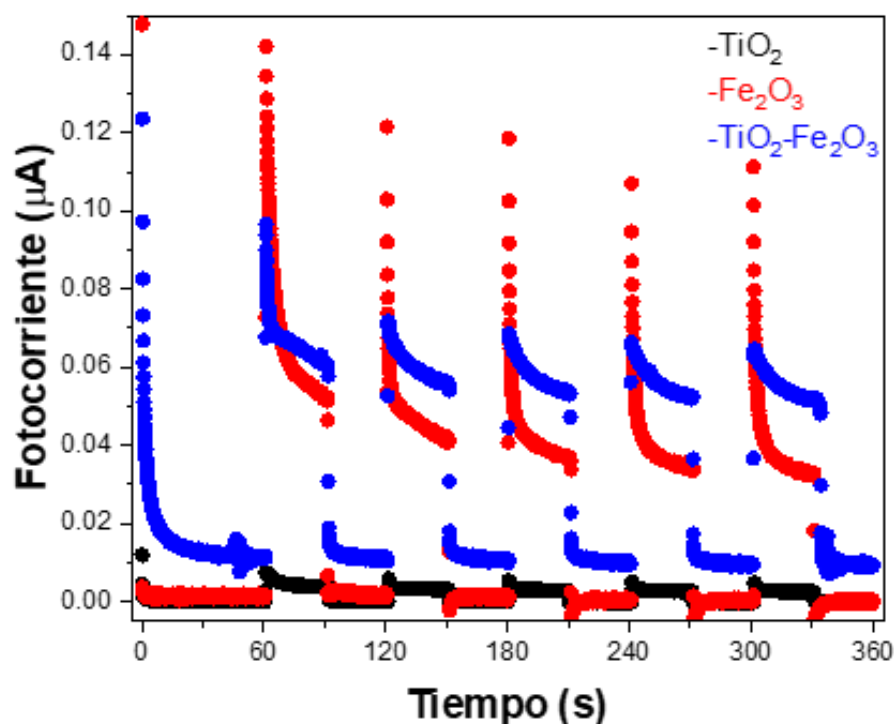


Fig. 8. Cronoamperometría de películas delgadas de TiO_2 , Fe_2O_3 y Fe_2O_3 - TiO_2 con irradiación de 100 mW/cm^2 ON/OFF.

Las curvas de Mott–Schottky se muestran en la figura 9 y sus valores en la tabla 1. Estas graficas presentan pendientes positivas en todos los casos, lo que confirma el carácter semiconductor tipo n de los materiales TiO_2 , Fe_2O_3 y del compuesto TiO_2 – Fe_2O_3 . A partir de la extrapolación lineal se determinaron los potenciales de banda plana (V_{fb}), los cuales muestran un desplazamiento hacia valores más negativos en el material compuesto en comparación con los óxidos individuales. En particular, el TiO_2 presenta un V_{fb} de -0.25 V vs RHE, mientras que el Fe_2O_3 muestra un valor de -0.35 V vs RHE. En el caso del compuesto TiO_2 – Fe_2O_3 , el V_{fb} se desplaza hasta aproximadamente -0.47 V vs RHE, indicando una modificación en la estructura electrónica del sistema debido a la interacción entre ambos materiales.^{19,20}

Asimismo, la densidad de portadores de carga (ND) se mantiene en el orden de 10^{19} – 10^{20} cm^{-3} , lo que sugiere una adecuada conductividad electrónica en todos los sistemas. Bajo irradiación (luz UV y solar), se observa un cambio en la pendiente de las curvas, lo que indica un aumento en la densidad de portadores fotoinducidos. Estos resultados, en conjunto con los valores de energía de banda prohibida obtenidos por Tauc, permiten proponer un alineamiento de bandas tipo II en el compuesto TiO_2 – Fe_2O_3 . Este tipo de heterounión favorece la separación espacial de cargas, donde los electrones migran hacia el TiO_2 y los huecos hacia el Fe_2O_3 , reduciendo la recombinación y mejorando el desempeño fotoelectroquímico.²¹

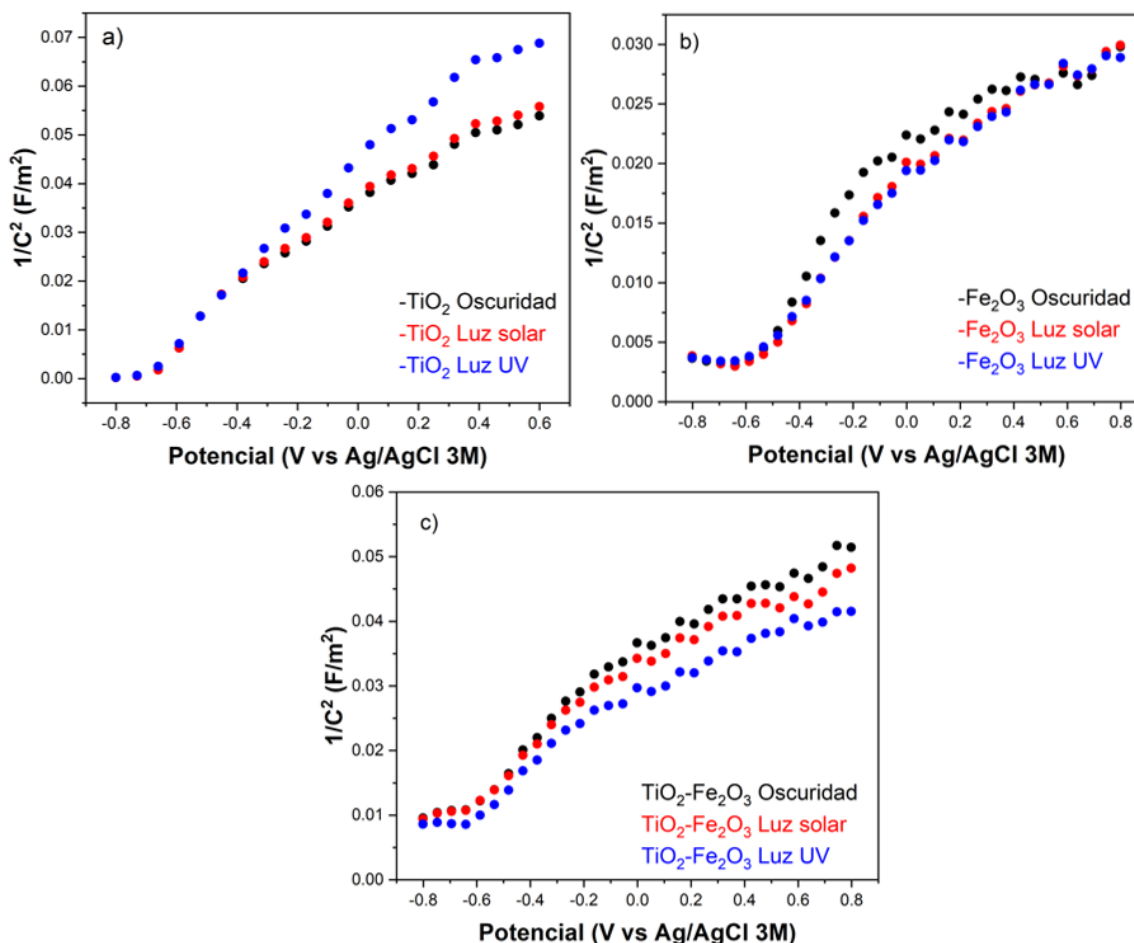


Fig. 9. Curvas de impedancia Mott-Schottky de películas de a) TiO_2 , b) Fe_2O_3 y c) $TiO_2-Fe_2O_3$ con asistencia de luz solar y UV-365nm.

Tabla I. Estimación de las bandas de valencia y conducción mediante el potencial de banda plana y densidad de portadores de carga por Mott-Schottky.

	V_{fb} (V)	N_D (cm^{-3})	E_C E_B (V)	E_{VB} (V)
TiO_2	-0.682	8.6×10^{19}	- 0.25	2.85
Fe_2O_3	-0.751	1.4×10^{20}	- 0.35	1.75
$TiO_2-Fe_2O_3$	-0.879	1.1×10^{20}	- 0.47	1.63 y 2.63

Evaluación y desempeño fotoelectroquímico

El análisis de impedancia electroquímica del compuesto $TiO_2-Fe_2O_3$ presentado en la figura 10 a) revela un comportamiento característico de transferencia de carga en la interfaz electrodo/electrolito. La curva muestra una región inicial asociada a procesos capacitivos, seguida de una transición hacia un régimen dominado por la difusión de especies, evidenciado por el cambio en la pendiente a potenciales más positivos. La ausencia de un semicírculo bien definido sugiere una resistencia de transferencia de carga relativamente baja en 450 Ohm, lo que indica una interacción eficiente entre los portadores de carga y la superficie del material. Esto puede atribuirse

a la formación de la heterounión $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, la cual favorece la separación y el transporte de cargas. Asimismo, la respuesta observada es consistente con una mejora en la conductividad electrónica del sistema, en concordancia con los resultados de Mott–Schottky y cronoamperometría. En la figura 10 b) se presenta la voltametría cíclica del material $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y muestra procesos redox reversibles asociados a la intercalación y desintercalación de iones litio en la estructura del TiO_2 . Se identifican picos bien definidos de oxidación y reducción, correspondientes a la transición $\text{Ti}^{4+}/\text{Ti}^{3+}$, lo que confirma la actividad electroquímica del sistema. En condiciones de oscuridad, los picos de oxidación y reducción se observan alrededor de 2.37 V y 1.47 V, respectivamente. Bajo irradiación de 1 sol ($100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) se presenta un ligero desplazamiento de los potenciales (2.42 V para oxidación y 1.53 V para reducción), junto con una disminución en la polarización, lo que sugiere una mejora en la cinética de transferencia de carga. Asimismo, se observa un incremento en la intensidad de corriente bajo iluminación, indicando una contribución fotoinducida que favorece los procesos electroquímicos. Siendo consistente con la formación de la heterounión $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, la cual promueve una mejor separación de cargas y facilita la inserción/extracción de Li^+ . En conjunto, estos resultados sugieren que el material compuesto presenta una menor limitación por recombinación y una cinética de transferencia de carga más favorable, lo que contribuye a su mejor desempeño fotoelectroquímico.

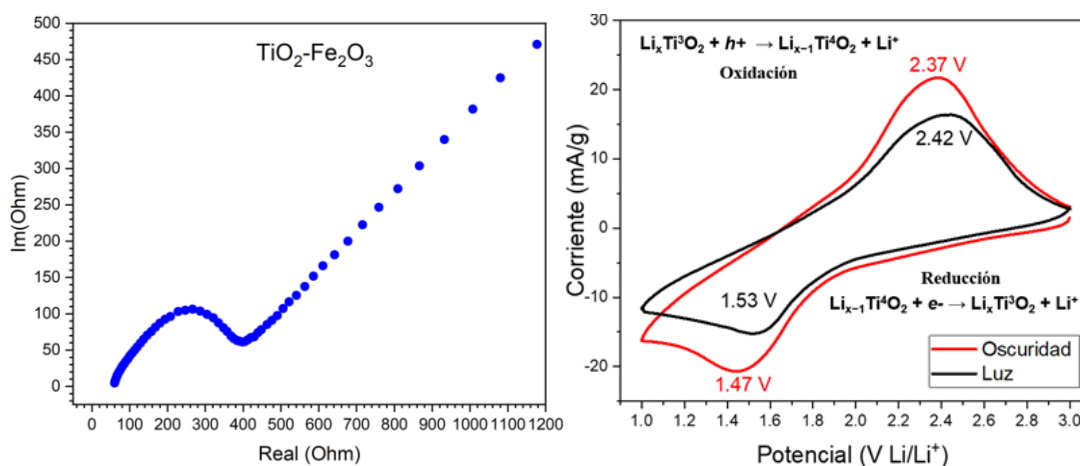


Fig.10. a) Curva de impedancia electroquímica (EIS) del compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y b) Voltamperometría cíclica de $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ con asistencia de $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ a $0.1 \text{ mV}/\text{s}$.

Las curvas de carga y descarga galvanostática del material $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ representados en la figura 11 muestran un comportamiento típico de intercalación de iones litio, con perfiles inclinados que indican un proceso dominado por difusión en fase sólida. Lo cual es consistente con materiales tipo inserción como el TiO_2 . Es importante destacar que, bajo irradiación (1 sol), el material alcanza una capacidad específica de aproximadamente 220 mAh g^{-1} , mientras que en condiciones de oscuridad presenta un valor cercano a 160 mAh g^{-1} . Este incremento significativo confirma la contribución fotoinducida al almacenamiento de energía. Además, bajo iluminación se observa una menor polarización entre los procesos de carga y descarga, lo que sugiere una mejora en la cinética electroquímica. Este efecto puede atribuirse a la generación de pares electrón–hueco que favorecen la separación de carga en la heterounión $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, facilitando la inserción y extracción de Li^+ .

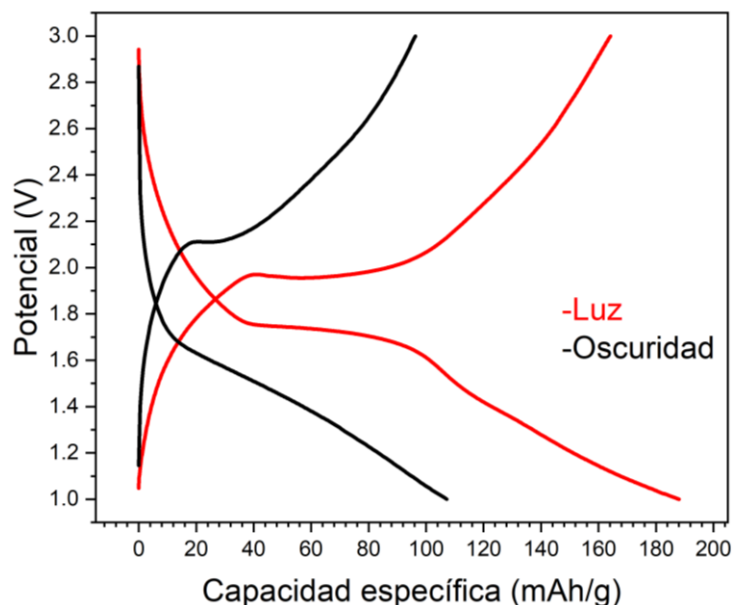


Fig. 11. Curvas de carga-descarga galvanostática del compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ a una densidad de corriente 20 mA g^{-1} con asistencia de 100 mW/cm^2 .

CONCLUSIONES

El compuesto $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mostró un mejor desempeño como electrodo fotoactivo en fotobaterías de ion-litio debido a la formación de una heterounión tipo II. Los análisis estructurales confirmaron la coexistencia de anatasa y hematita sin formación de nuevas fases, mientras que los estudios ópticos y electroquímicos evidenciaron una adecuada alineación de bandas que favorece la separación de cargas. Electroquímicamente, el material presentó procesos reversibles de intercalación de Li^+ y una mejora en la cinética bajo irradiación. Destaca el incremento en la capacidad específica de 160 mAh g^{-1} en oscuridad a 220 mAh g^{-1} bajo iluminación (1 sol), confirmando una contribución fotoinducida al almacenamiento de energía. En conjunto, los resultados demuestran que la mejora del sistema $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ se debe a una separación y transporte de carga más eficientes en la interfaz, posicionándolo como un material prometedor para fotobaterías de próxima generación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nasajpour-Esfahani N, Garmestani H, Bagheritabar M, Jasim DJ, Toghraie D, Dadkhah S, et al. Comprehensive review of lithium-ion battery materials and development challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;203:114783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114783>
2. Yan W, Wang J, Hu Q, Fu J, Albolikany MK, Zhang T, et al. Approaching the theoretical capacity of TiO_2 anode in a photo-rechargeable lithium-ion battery. *Nano Res*. 2024;17:2655–62. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-6062-7>.
3. Chamola S, Ahmad S. High Performance Photorechargeable Li-Ion Batteries Based on Nanoporous Fe_2O_3 Photocathodes. *Adv Sustain Syst*. 2023;7. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300043>.
4. Mustafa HAM, Jameel DA. Modeling and the main stages of spin coating process: A review. *Journal of Applied Science and Technology Trends*. 2021;2:119–23. <https://doi.org/10.38094/jastt203109>.
5. Sulka GD. Electrochemistry of Thin Films and Nanostructured Materials. *Molecules*. 2023;28:4040. <https://doi.org/10.3390/molecules28104040>.

6. Hu C, Chen L, Hu Y, Chen A, Chen L, Jiang H, et al. Light-Motivated SnO₂/TiO₂ Heterojunctions Enabling the Breakthrough in Energy Density for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials*. 2021;33. <https://doi.org/10.1002/adma.202103558>.
7. Ramanavicius S, Jagminas A. Synthesis, Characterisation, and Applications of TiO and Other Black Titania Nanostructures Species (Review). *Crystals (Basel)*. 2024;14:647. <https://doi.org/10.3390/cryst14070647>.
8. Bagherzadeh Enferadi SMH, Mirzaei A. Fe₂O₃-Co₃O₄ nanocomposite gas sensor for ethanol sensing studies. *Ceram Int*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.138>
9. Vargas MA, Diosa JE, Mosquera E. Data on study of hematite nanoparticles obtained from Iron(III) oxide by the Pechini method. *Data Brief*. 2019;25:104183. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104183>.
10. Akitsu T. Using XRD technique for model composite and related materials. *Nanotechnology in the Automotive Industry*. Elsevier; 2022. p. 15–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00002-5>
11. Li M, Wang X, Li F, Zheng L, Xu J, Yu J. A Bifunctional Photo-Assisted Li–O₂ Battery Based on a Hierarchical Heterostructured Cathode. *Advanced Materials*. 2020;32. <https://doi.org/10.1002/adma.201907098>.
12. Asmin LO, Isa L. Study of Microstructure, Morphology and Functional Groups of Titanium Dioxide (TiO₂) Impregnated With Copper (Cu). *KONSTAN - JURNAL FISIKA DAN PENDIDIKAN FISIKA*. 2024;9:28–37. <https://doi.org/10.20414/konstan.v9i01.413>
13. Moniz SJA, Shevlin SA, Martin DJ, Guo Z-X, Tang J. Visible-light driven heterojunction photocatalysts for water splitting – a critical review. *Energy Environ Sci*. 2015;8:731–59. <https://doi.org/10.1039/C4EE03271C>.
14. Berger T, Trunschke A. Optical Properties: UV/Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy and Photoluminescence. *Metal Oxide Nanoparticles*. Wiley; 2021. p. 435–82. <https://doi.org/10.1002/9781119436782.ch12>.
15. Hjiri M, Algessair S, Dhahri R, Mirzaei A, Neri G. Gas sensing properties of hematite nanoparticles synthesized *via* different techniques. *RSC Adv*. 2024;14:17526–34. <https://doi.org/10.1039/D4RA02338B>.
16. Balapure A, Ray Dutta J, Ganesan R. Recent advances in semiconductor heterojunctions: a detailed review of the fundamentals of photocatalysis, charge transfer mechanism and materials. *RSC Applied Interfaces*. 2024;1:43–69. <https://doi.org/10.1039/D3LF00126A>.
17. Liu K, Dai L, Liang W, Luo S, Luo G, Zhang J, et al. Pressure Effects on the Optoelectronic Property of Nanocrystalline Anatase with Different Sizes. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024;128:20297–309. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c06154>.
18. Rodriguez-Gutierrez I, Souza Junior JB, Leite ER, Vayssieres L, Souza FL. An intensity modulated photocurrent spectroscopy study of the role of titanium in thick hematite photoanodes. *Appl Phys Lett*. 2021;119. <https://doi.org/10.1063/5.0060483>.
19. Ravishankar S, Bisquert J, Kirchartz T. Interpretation of Mott–Schottky plots of photoanodes for water splitting. *Chem Sci*. 2022;13:4828–37. <https://doi.org/10.1039/D1SC06401K>.
20. Tang Y, Lu M, Yuan S, Ma Y, Ju S, Sun J. Photoassisted Lithium–Sulfur Batteries: Insights from Regulation Mechanisms to Design Strategies. *ChemistryEurope*. 2025; <https://doi.org/10.1002/ceur.202500242>.
21. Zhang D, Luo Y, Liu J, Dong Y, Xiang C, Zhao C, et al. ZnFe₂O₄–Ni₅P₄ Mott–Schottky Heterojunctions to Promote Kinetics for Advanced Li–S Batteries. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2022;14:23546–57. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04734>.