

## Dispositivos basados en nanohilos de óxido de cinc como sensores ultravioleta

Villalonga Agüero, Cristian A.1; Simonelli, Gabriela1

*(1) Laboratorio de Física del Sólido, Dpto. de Física, INFNOA (CONICET-UNT), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.*

*cristianvillalongaaguero@gmail.com; gsimonelli@herrera.unt.edu.ar*

### RESUMEN

En este trabajo se evaluaron dispositivos basados en ZnO nanoestructurado, para utilizarlos en dosímetros UV. Se estudiaron las propiedades fotoconductoras de cinco dispositivos, de los cuales dos fueron íntegramente fabricados para este trabajo, partiendo del crecimiento de nuevas muestras de nanohilos de ZnO. Para todos ellos se utilizó ITO-Glass como sustrato y el método de crecimiento fue el de hidrólisis de sales de cinc en agua. Se realizaron mediciones de corriente en función de la tensión y de resistencia en función del tiempo, bajo diferentes condiciones de iluminación. Se determinaron los parámetros sensibilidad, tiempo de bajada y de subida y receptividad. Todos los dispositivos mostraron variaciones ante cambios en las condiciones de iluminación estudiadas. Los valores de resistencia fueron del orden de los GΩ, MΩ y kΩ, según el dispositivo. Los tiempos de bajada fueron de 5,8 a 119,3 s mientras que los de subida de 19,1 a 232,0 s. Algunos valores de los parámetros obtenidos son del orden de magnitud de los reportados en la literatura, mientras que otros resultan menores, indicando que debería mejorarse el desempeño de los sensores.

### ABSTRACT

In this work, nanostructured ZnO-based devices were evaluated for UV dosimeters applications. Photoconductive properties of five devices were studied, two of which were entirely fabricated for this work, growing new ZnO nanowires samples. For all of them, ITO-Glass was used as substrate and the growth method was the hydrolysis of zinc salts in water. Voltage-dependent current and time-dependent resistance measurements were performed under different illumination conditions. The parameters sensitivity, rise and falling time and responsivity were determined. All devices showed variations in response to changes on the illumination conditions. Their resistance values were in the order of GΩ, MΩ and kΩ, depending on the device. The falling times ranged from 5.8 to 119.3 s while the rise times ranged from 19.1 to 232.0 s. Some of the parameter's values obtained are in the order of magnitude of those reported in the literature, while others are lower, indicating that the performance of the sensors should be improved.

Palabras claves: sensores ultravioleta – nanohilos de óxido de cinc – fotoconductividad.

Key words: ultraviolet sensors – zinc oxide nanowires – photoconductivity.

## INTRODUCCIÓN

En el espectro electromagnético, la radiación ultravioleta (RUV) se ubica entre los 100 nm y 400 nm. La Comisión Internacional de Iluminación divide el espectro ultravioleta en tres bandas: UVA de 315 a 400 nm, UVB de 280 a 315 nm y UVC de 100 a 280 nm (CIE, 2011). Si bien existe una gran variedad de fuentes artificiales, una fuente natural es la principal fuente de exposición a RUV de las personas: el Sol. En proporción, del total de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre, aproximadamente el 5% es UV, de la cual el 95% es UVA y el 5% UVB (IARC, 2012). La exposición excesiva al UV puede resultar en efectos adversos en la salud de las personas, principalmente sobre los ojos y la piel. En el corto plazo, el principal efecto que sufre la piel es un eritema actínico, lo que usualmente observamos como bronceado y quemaduras de piel, mientras que a largo plazo, son el envejecimiento prematuro de la piel y diferentes tipos de cáncer de piel (ICNIRP, 2007) (IARC, 2012). El principal desafío para proteger a personas que trabajan al aire libre radica en la falta de control sobre la fuente de RUV. Por ello, el monitoreo de la RUV es necesario para la gestión segura y eficaz de las condiciones de exposición laboral (ICNIRP, 2007).

En ese sentido, tanto la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, 2004) como la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH, 2019) proponen en sus directrices la misma dosis eritemal máxima para piel desprotegida,  $30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ . Entre los diversos instrumentos de medición de la RUV se encuentran los dosímetros. Una parte elemental de estos pueden ser los sensores, dentro de los cuales existe un grupo basado en materiales semiconductores. Entre ellos se encuentra el óxido de cinc, un material semiconductor que intrínsecamente se comporta como tipo n, debido a la presencia de vacancias de oxígeno. La magnitud de su gap ( $\sim 3,3 \text{ eV}$  a 300 K) causa que sus propiedades eléctricas no se modifiquen con la exposición a la luz visible y sean muy sensibles a radiaciones electromagnéticas de longitud de onda menores o iguales 370 nm aproximadamente. Esto se debe a que los fotones con energía mayor a la energía del gap generan pares electrón-hueco que pueden contribuir a la conducción (Wang, 2006) (Morkoç, 2009) (Alaie, 2015) (Vittal, 2017) (Zou, 2020). Experimentos llevados a cabo hasta la fecha en las nanoestructuras de ZnO han demostrado que su fotosensibilidad a la radiación UV está directamente influenciada por la separación de pares electrón-hueco cerca de la superficie de la estructura, teniendo un rol preponderante las vacancias de oxígeno y

las moléculas de oxígeno que pueden adsorberse sobre la superficie (Prades, 2008) (Zhai, 2009). El ZnO nanoestructurado puede producirse en diversas morfologías dependiendo de la técnica y parámetros de producción del mismo (Wang, 2004), entre las que se encuentran los nanohilos de ZnO. Estos son preferibles frente a las demás morfologías para utilizarlos como material de un sensor UV por tener una relación superficie-volumen elevada, lo que lleva a una mayor superficie expuesta a la radiación, menor corriente de oscuridad y mayor corriente en iluminación. Además, las nanoestructuras de ZnO presentan una mejor estructura cristalina que materiales en volumen, lo que mejora la movilidad de los electrones dentro de la estructura y facilita su recolección (Shasti, 2017) (Xu, 2019). De las propiedades del ZnO, este trabajo se centró en las fotoconductoras, es decir, la variación de su conductividad eléctrica al ser iluminado. Se caracterizó la respuesta fotoconductoras de dispositivos, que consisten en nanohilos de ZnO crecidos sobre sustratos transparentes y conductores de óxido de indio y estaño sobre vidrio (ITO-Glass), formando estructuras tipo “sándwich” al enfrentarlos con otro sustrato sin crecimiento (dispositivos asimétricos) u otra muestra con nanohilos crecidos (dispositivos simétricos).

## OBJETIVOS

Caracterizar dispositivos basados en nanohilos de ZnO para ser utilizados como sensores en dosímetros UV en ambientes laborales, de tal modo que permitan evaluar el cumplimiento de valores límites de exposición recomendados y utilizarse para prevenir efectos no deseados en la salud.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Muestras utilizadas*

Para la fabricación de dispositivos, se utilizaron muestras de nanohilos de ZnO previamente crecidas por Santillán (2018) para otros fines. En ellas se varió el método de sembrado, pudiendo ser el método de depósito por láser pulsado (PLD) o el método por descomposición térmica de acetato de cinc, al que nos referimos como spin coating, y la presencia de litio como dopante del ZnO. Para el crecimiento de cuatro nuevas muestras idénticas, sin sembrado ni dopaje, se utilizó una solución de nitrato de cinc hexahidratado (99,0% Sigma-Aldrich) y hexametilentetramina (HMTA, 99,0% Sigma-Aldrich), ambos en concentraciones 25 mM en agua bidestilada, y se horneó a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  durante cuatro horas. Todas las muestras tuvieron ITO-Glass como sustrato y se crecieron por método de hidrólisis de sales de cinc en agua, por un tiempo de cuatro horas. Las características de las muestras utilizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Muestras disponibles para diseñar dispositivos y sus características.

| Muestra/s   | Tipo de Sembrado | Dopaje |
|-------------|------------------|--------|
| C1/C2/C3/C4 | -                | -      |
| V4          | Spin Coating     | -      |
| V1504       | PLD a 150 °C     | -      |
| V150L4      | PLD a 150 °C     | 2%Li   |

*Dispositivos estudiados*

Con las muestras de la Tabla 1 (con la excepción de C2), se fabricaron cinco dispositivos, los cuales se presentan en la Fig. 1. De estos, cuatro fueron asimétricos (VS 3, VS 6, VS 11 y CV 01) y uno simétrico (CV 02).

**Medición de propiedades fotoconductoras**  
 Para estudiar las propiedades fotoconductoras de los dispositivos se realizaron mediciones de corriente en función de la tensión (curvas I-V) y de resistencia en función del tiempo (curvas R-t), bajo diferentes condiciones de iluminación. Para ello se utilizó la fuente de tensión programable Agilent modelo 6634B y el voltímetro digital programable marca Keithley modelo 182 Sensitive Digital Voltmeter de 3 mV de rango y 1 nV de resolución (LAFISO, FACET-UNT). Como fuente de radiación UV se utilizó la “Caja de Iluminación UV”, que es un instrumento diseñado y fabricado para este trabajo capaz de mantener un dispositivo en oscuridad o iluminado con UV (370 nm) mientras se encuentra conectado a equipos de medición. La irradiancia emitida varía

según el valor de una resistencia eléctrica externa conectada y se determinó utilizando un radiómetro IL 1400A con un detector SEL033/UVA/W, ambos marca International Light Inc. Algunos valores equivalentes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de interés de Resistencia externa ( $R_{ext}$ ) e Irradiancia UV emitida ( $E_e$ ).

| $R_{externa}$ [ $\Omega$ ] | $E_e$ [ $\mu W.cm^{-2}$ ] |
|----------------------------|---------------------------|
| 47                         | 1679                      |
| 100                        | 631                       |
| 330                        | 135                       |

El circuito de medición implementado fue el esquematizado en la Fig. 2, en el cual DISP es el dispositivo a ensayar, RP una resistencia patrón de 9845  $\Omega$ , VCC la fuente de tensión variable y VP es la tensión en RP medida con el voltímetro.

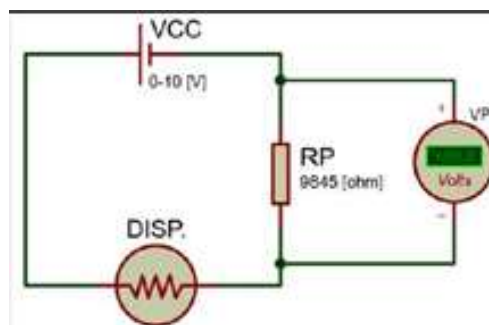


Figura 2. Circuito de medición.

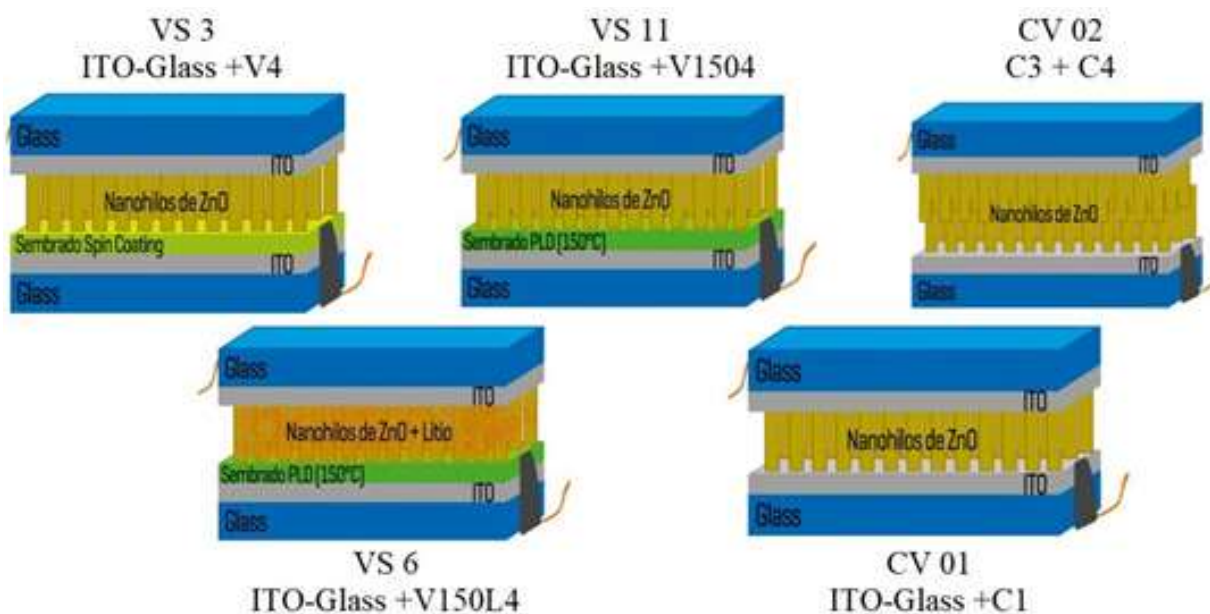


Figura 1. Dispositivos estudiados.

La resistencia eléctrica del dispositivo medida se compone de un conjunto de resistencias en serie dadas por los contactos entre los componentes del dispositivo y las resistencias intrínsecas de los mismos, tal como se esquematiza en la Fig. 3. Para el análisis de los resultados, se consideró que la única dependiente de la condición de iluminación UV fue la resistencia intrínseca del ZnO ( $R_{ZnO}$  y  $R_{ZnO'}$ ).

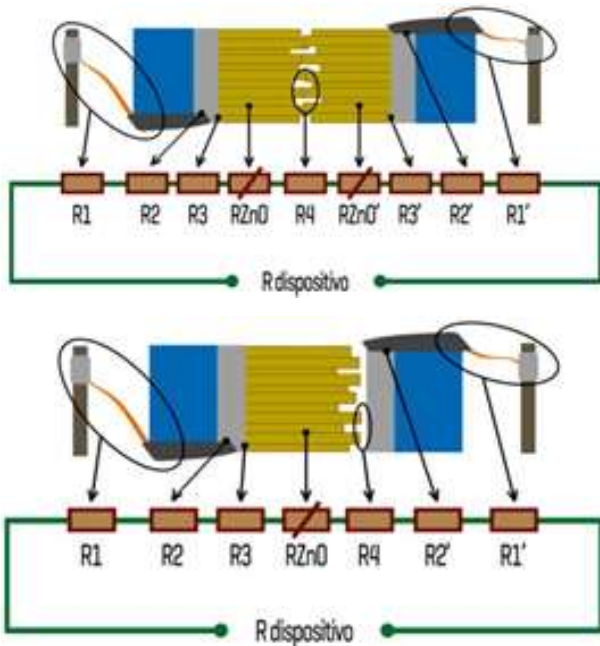


Figura 3. Conjunto de resistencias que conforman la resistencia medida de un dispositivo simétrico (arriba) y asimétrico (abajo).

#### Curvas I-V

Las curvas I-V de cada dispositivo se midieron en dos condiciones de iluminación:

- Oscuridad, superior a 20 horas.
- Iluminado con  $E_c$  de  $0,6 \text{ mW.cm}^{-2}$ .

Además de las gráficas, se calculó la resistencia eléctrica en el punto de 3 V para los registros creciente y decreciente,  $R_{3V}$ , según (1).

$$R_{3V} = \frac{3V}{I_{3V}} [\Omega] \quad (1)$$

#### Curvas R-t

Para las curvas R-t se adoptó una polarización de 3,0 V y la siguiente secuencia de variación de las condiciones de iluminación:

- Oscuridad, luego de más de 20 horas,
  - 2 ciclos ON-OFF con  $E_c$  de  $0,6 \text{ mW.cm}^{-2}$
  - 2 ciclos ON-OFF con  $E_c$  de  $0,1 \text{ mW.cm}^{-2}$
  - 2 ciclos ON-OFF con  $E_c$  de  $1,7 \text{ mW.cm}^{-2}$ .
- El preprocesamiento de los datos incluyó el

cálculo de una curva suavizada y la obtención de una función teórica aproximada. Los parámetros calculados a partir de las curvas R-t fueron:

Tiempo de bajada ( $t_{ON}$ ) y de subida ( $t_{OFF}$ ):

definidos como el tiempo transcurrido desde el instante en que se enciende o apaga la RUV y el instante en que el valor de salida alcanza el 10% o 90% de su valor final en régimen estacionario, respectivamente.

#### Sensibilidad ON u OFF

$$\%S = \frac{R_{\text{final teórica}} - R_{\text{inicial suavizada}}}{R_{\text{inicial suavizada}}} \times 100\% \quad (2)$$

#### Receptividad ON

$$R_d = \frac{I_{\text{final teórica}} - I_{\text{inicial suavizada}}}{E \cdot A} [\text{A. W}^{-1}] \quad (3)$$

donde,  $I_{\text{final teórica}} = \frac{3V}{(9845 + R_{\text{final teórica}}) [\Omega]}$  e  $I_{\text{inicial suavizada}} = \frac{3V}{(9845 + R_{\text{inicial suavizada}}) [\Omega]}$

En general, es deseable lograr que los tiempos de bajada y subida sean bajos y la sensibilidad y receptividad elevadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Curvas I-V

Las Fig. 4 y 5 muestran las curvas I-V registradas de CV 01 y VS 11, respectivamente. En la Tabla 3 se sintetizan algunos aspectos detectados en las curvas I-V de todos los dispositivos y en la Tabla 4 se presentan los valores de resistencia en el punto de 3 V, del registro creciente y decreciente. En la Tabla 4 se observó que en todos los casos existió una disminución de las resistencias al iluminar con UV, con respecto al caso en oscuridad. Estas variaciones fueron mayores en los dispositivos CV 01 y VS 6 con respecto a VS 3, VS 11 y CV 02, en sintonía con lo que se observó a simple vista en las gráficas y se sintetizó en la Tabla 3.

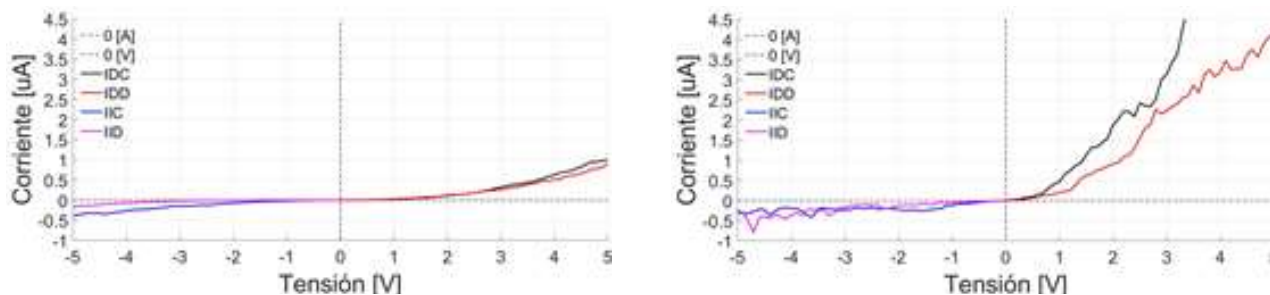


Figura 4. Curvas I-V del dispositivo CV 01 en oscuridad de 22 horas (izquierda) e iluminado con irradiancia UV de 0,6 mW.cm<sup>-2</sup> (derecha).

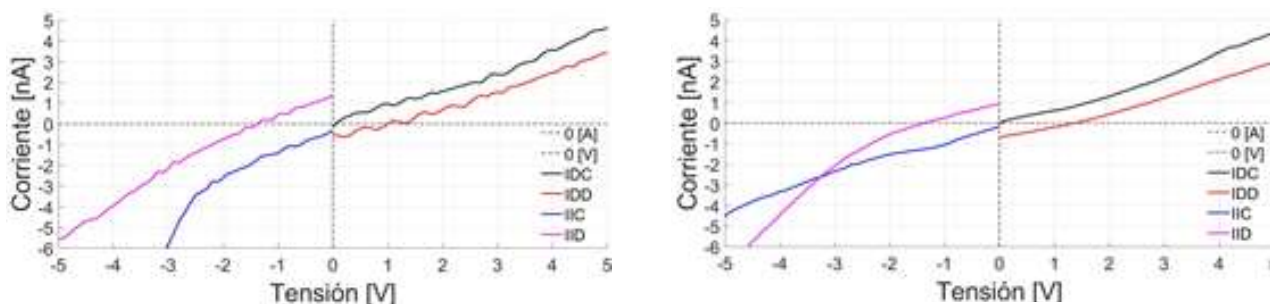


Figura 5. Curvas I-V del dispositivo VS 11 en oscuridad de 20 horas (izquierda) e iluminado con irradiancia UV de 0,6 mW.cm<sup>-2</sup> (derecha).

Tabla 3. Observaciones realizadas en las curvas I-V.

| Dispositivos                       | VS 6 y CV 01   | VS 3, VS 11 y CV 02            |
|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Orden de magnitud de corriente     | µA   | nA                             |
| Variación de corriente al iluminar | Fue evidente a simple vista en las mediciones directas | No fue evidente a simple vista |
| Comportamiento                     | No lineal  | Lineal                         |

Tabla 4. Valores de resistencia en 3 V de las curvas I-V en oscuridad (OFF) e iluminado (ON).

| Dispositivo       | VS 6 [MΩ] |      | CV 01 [MΩ] |     | VS 3 [GΩ] |     | VS 11 [GΩ] |     | CV 02 [GΩ] |     |
|-------------------|-----------|------|------------|-----|-----------|-----|------------|-----|------------|-----|
|                   | OFF       | ON   | OFF        | ON  | OFF       | ON  | OFF        | ON  | OFF        | ON  |
| R <sub>3V-C</sub> | 443       | 0,02 | 532        | 1,0 | 1,9       | 1,1 | 1,4        | 1,2 | 6,0        | 1,6 |
| R <sub>3V-D</sub> | 2748      | 1,53 | 3225       | 1,4 | 1,8       | 1,2 | 1,7        | 1,5 | 4,3        | 1,5 |

Curvas R-t

En las curvas R-t de cada dispositivos, VS 6 (Fig. 6), CV 01 (Fig. 7), VS 3 (Fig. 8), VS 11 (Fig. 9) y CV 02 (Fig. 10), se debe considerar que:

- P1: irradiancia UV de 1,7 mW.cm<sup>-2</sup>
- P2: irradiancia UV de 0,6 mW.cm<sup>-2</sup>

- P3: irradiancia UV de 0,1 mW.cm<sup>-2</sup>

En las curvas R-t se observó la secuencia de ciclos ON-OFF preestablecida (primero los dos ciclos con 0,6 mW.cm<sup>-2</sup>, luego los dos con 0,1 mW.cm<sup>-2</sup> y los dos con 1,7 mW.cm<sup>-2</sup>), al notar como la resistencia disminuyó

al encender la radiación UV y aumentó al quitarla. Respecto a la respuesta a los cambios en las condiciones de iluminación, debido a la poca sensibilidad de CV 02 al ser iluminado con  $0,6 \text{ mW.cm}^{-2}$ , no se lo estudió para irradiancias menores ( $0,1 \text{ mW.cm}^{-2}$ ). Con esa salvedad, todos los dispositivos mostraron variaciones en sus resistencias al cambiar las condiciones de iluminación para las irradiancias estudiadas. Además, VS 6 fue el dispositivo con respuesta menos resistiva de los cinco, con valores en el orden de los  $[\text{k}\Omega]$ , luego CV 01 con resistencias del orden de los  $[\text{M}\Omega]$  y el resto en los  $[\text{G}\Omega]$ . En algunos dispositivos se detectaron inestabilidades, que no fueron asociados a cambios en las condiciones de iluminación, como ser derivas o disminución/aumento no esperados en el valor de resistencia.

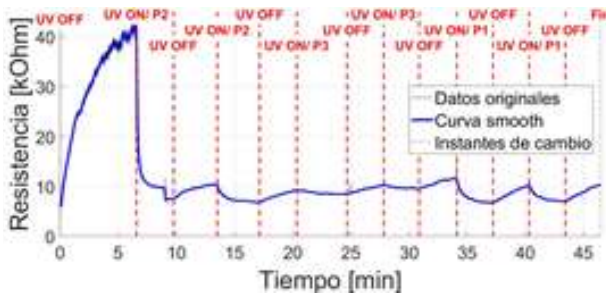


Figura 6. Curva R-t del dispositivo VS 6.

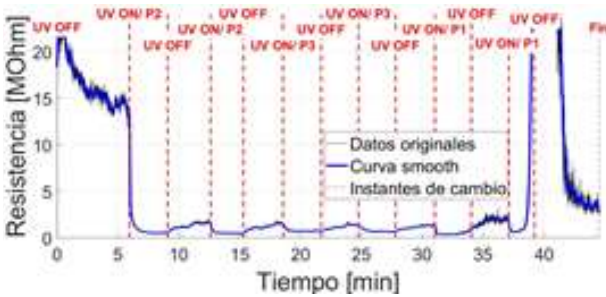


Figura 7. Curva R-t del dispositivo CV 01.

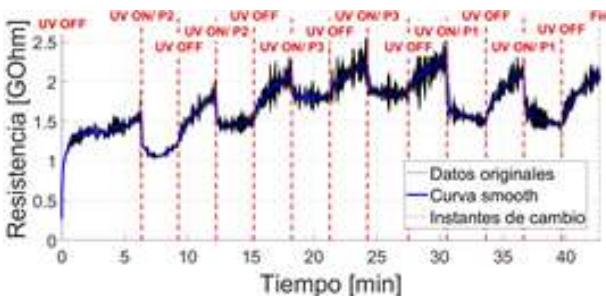


Figura 8. Curva R-t del dispositivo VS 3.

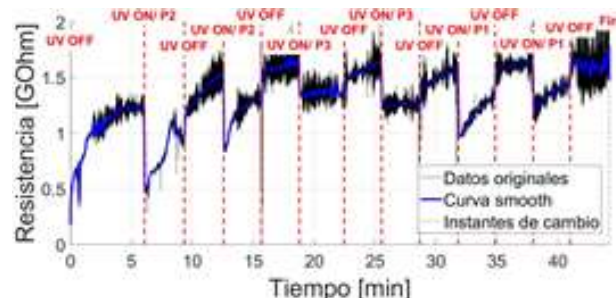


Figura 9. Curva R-t del dispositivo VS 11.

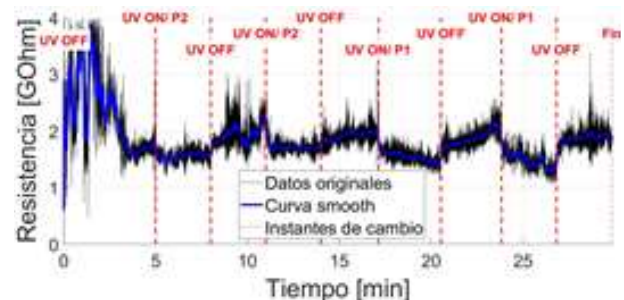


Figura 10. Curva R-t del dispositivo CV 02.

Tiempos de bajada y subida

Tabla 5. Tiempos de bajada.

| Dispositivo | $\overline{t_{ON}}$ [s]<br>Transición OFF-ON |
|-------------|--|
| VS 11       | 5,8  |
| VS 3        | 17,4   |
| CV 01       | 30,5   |
| CV 02       | 61,3   |
| VS 6        | 119,3  |

Tabla 6. Tiempos de subida.

| Dispositivo | $\overline{t_{OFF}}$ [s]<br>Transición ON-OFF |
|-------------|---|
| VS 11       | 19,1  |
| CV 02       | 89,7  |
| CV 01       | 139,6   |
| VS 3        | 149,8   |
| VS 6        | 232,0   |

En las Tablas 5 y 6 se presentan los tiempos de bajada,  $\overline{t_{ON}}$ , y subida,  $\overline{t_{OFF}}$ , promedio para cada dispositivo, ordenados de menor a mayor. A partir de ellos, se concluyó que VS 11 fue el dispositivo con respuesta más rápida a los cambios en las condiciones de iluminación. Esto posiblemente se debió a una mejor alineación de los nanohilos de la muestra que conforman este dispositivo, producto del sembrado PLD. Por otro lado, VS 6 fue el dispositivo

más lento, posiblemente debido a que el litio presente en las nanoestructuras afectó los mecanismos de generación y recombinación de los portadores, volviendo su respuesta más lenta con respecto a los demás dispositivos que no cuentan con litio.

#### Sensibilidad y Receptividad

Tabla 7. Sensibilidad de semiciclos iluminados.

| Dispositivo | $\overline{\%S_{ON}}$<br>Transición OFF-ON |
|-------------|--|
| CV 01       | -62%                                       |
| VS 11       | -36%                                       |
| VS 6        | -25%                                       |
| VS 3        | -24%                                       |
| CV 02       | -19%                                       |

Tabla 8. Sensibilidad de semiciclos en oscuridad.

| Dispositivo | $\overline{\%S_{OFF}}$<br>Transición ON-OFF |
|-------------|---|
| CV 01       | 168%  |
| VS 6        | 37%   |
| VS 3        | 34%   |
| CV 02       | 20%   |
| VS 11       | 18%   |

Tabla 9. Receptividad en semiciclos iluminados.

| Dispositivo | $\overline{R_d}$ [A.W <sup>-1</sup> ] |
|-------------|---------------------------------------|
| VS 6        | $48,6 \cdot 10^{-3}$                  |
| CV 01       | $8,4 \cdot 10^{-3}$                   |
| VS 11       | $3,8 \cdot 10^{-6}$                   |
| VS 3        | $2,0 \cdot 10^{-6}$                   |
| CV 02       | $0,2 \cdot 10^{-6}$                   |

En las Tablas 7, 8 y 9 se presentan las sensibilidades promedio de los semiciclos iluminados,  $\overline{\%S_{ON}}$ , y en oscuridad,  $\overline{\%S_{OFF}}$ , y las receptividades promedio en los semiciclos iluminados con UV,  $\overline{R_d}$  de cada dispositivo, ordenados de mayor a menor. A partir de las sensibilidades de las Tablas 7 y 8, se concluyó que en todos los

dispositivos y para todas las irradiancias de iluminación registradas en cada curva R-t:

- Debido a que las  $\overline{\%S_{ON}}$  fueron negativas, existió una disminución de los valores de resistencia al encender la radiación UV.
- Debido a que las  $\overline{\%S_{OFF}}$  fueron positivas, existió un aumento de los valores de resistencia al quitar la radiación UV. Estos resultados fueron coherentes y similares a los observados gráficamente en los semiciclos ON y OFF de las curvas R-t (Fig. 6 a 10) y analíticamente en las curvas I-V (Tabla 4). Como en las Tablas 7, 8 y 9 se observó que CV 02 fue el dispositivo con menor sensibilidad promedio y menor receptividad del conjunto de dispositivos, se concluyó que la arquitectura asimétrica es mejor en términos de sensibilidad que la simétrica. Esto posiblemente se deba a que la configuración asimétrica tiene una mejor resistencia de contacto ( $R_4$  en la Fig. 3) que la configuración simétrica. De un análisis similar, se detectó que CV 01 fue el dispositivo de mayor sensibilidad y receptividad promedio lo que, sumado al análisis de los tiempos en las Tablas 5 y 6, llevó a la conclusión que fue el dispositivo de mejor desempeño en términos generales.

#### Comparación de la respuesta de los dispositivos con la bibliografía

La Fig. 11 corresponde recortes de las tablas presentes en los trabajos de Boruah (2019) y Li (2020), en las cuales se resume la fotorrespuesta de diferentes sensores UV basados en ZnO. En ellas se observó que las longitudes de onda pertenecen al UVA, las irradiancias son del orden de las decimas o unidades de [mW.cm<sup>-2</sup>], las polarizaciones del orden de los voltios y los tiempos se encuentran en el orden de los segundos o algunas decenas de segundos. De esta comparación, se concluyó que:

- La polarización y la longitud de onda emitida son similares a los utilizados en este trabajo.
  - Las irradiancias que utilizamos fueron menores, lo que lleva a menores sensibilidades y posiblemente mayores tiempos de respuesta.
  - En la receptividad, los valores obtenidos fueron menores a los de la literatura.
- En síntesis, algunos valores de los parámetros obtenidos son del orden de magnitud de los reportados en la literatura, mientras que otros resultan menores (o mayores según corresponda), indicando que debería mejorarse el desempeño de nuestros sensores.

#### CONCLUSIONES

En general, los dispositivos fueron resistivos,

posiblemente debido a la arquitectura adoptada, en particular, debido a la resistencia de contacto entre las mitades que forman el dispositivo. A pesar de ello, todos respondieron frente a las variaciones en las condiciones de iluminación estudiadas, siendo CV 01 el de mayor sensibilidad y mejor desempeño en términos generales. Finalmente, los dispositivos asimétricos tuvieron un mejor desempeño en términos de sensibilidad que el dispositivo simétrico. Para mejorar la respuesta de los dispositivos, se propone modificar el contacto sobre los nanohilos, por ejemplo, reemplazando el ITO por un contacto de plata o un polímero conductor.

| PD                                  | Bias | UV light | Response time & recovery time | Responsih              |
|-------------------------------------|------|----------|-------------------------------|------------------------|
| ZnO NWs                             | 1 V  | 360 nm   | 2 s & 100 s                   | 0.39 A W <sup>-1</sup> |
| ZnO NWs                             | 3 V  | 352 nm   | 5 s & 100 s                   | —                      |
| ZnO NWs                             | 3 V  | 310 nm   | 229 s & 547 s                 | —                      |
| ZnO NRs                             |      | 325 nm   | 3.7 s & 63.6 s                | —                      |
| ZnO NW/graphene foam                | 5 V  | 365 nm   | 9.5 s & 38 s                  | 6 A W <sup>-1</sup>    |
| ZnO NR/graphene                     | 20 V | 370 nm   |                               | 22.7 A W <sup>-1</sup> |
| ZnS/ZnO bilayer film                | 5 V  | 350 nm   | 50 s & 50 s                   | 94 A W <sup>-1</sup>   |
| ZnO-SnO <sub>2</sub> nanofiber film | 10 V | 300 nm   | 32.2 s & 7.8 s                |                        |

| Photodetector                   | Bias  | Power density             | Rise time | Falling time |
|---------------------------------|-------|---------------------------|-----------|--------------|
| Single ZnO NMW                  | 2 V   | 0.32 mW cm <sup>-2</sup>  | 1.05 s    | 0.38 s       |
| ZnO nanofiber                   | 1 V   | 77.5 μW cm <sup>-2</sup>  | ≈100 s    | ≈50 s        |
| ZnO/CdO nanofiber               | 1 V   | 6.54 mW cm <sup>-2</sup>  | ≈4 s      | ≈3 s         |
| ZnO porous nanoparticle         | 5 V   | 20 μW cm <sup>-2</sup>    | ≈250 s    | ≈150 s       |
| ZnO-SnO <sub>2</sub> nanofibers | 10 V  | 0.45 mW cm <sup>-2</sup>  | 32.2 s    | 7.8 s        |
| ZnO nanotetrapod network        | 2.4 V | 15–20 mW cm <sup>-2</sup> | ≈67 ms    | ≈30 ms       |
| ZnO-PbS nanofibers              | 10 V  | 7.02 mW cm <sup>-2</sup>  | 9 s       | 2 s          |
| ZnO-Cu nanowire                 | 1 V   | 0.8 mW cm <sup>-2</sup>   | 10.35 s   | 2 s          |
| Sb-doped ZnO homojunction       | 3 V   | 60 mW cm <sup>-2</sup>    | 15.2 s    | 20.3 s       |
| Cu-doped ZnO homojunction       | 5 V   | 0.25 mW cm <sup>-2</sup>  | ≈50 s     | ≈200 s       |
| ZnO nanowire/graphene foam      | 5 V   | 1.3 mW cm <sup>-2</sup>   | 9.5 s     | 38 s         |

Figura 11. Resumen de las respuestas de fotodetectores UV convencionales basados en nanoestructuras de ZnO reportados en los trabajos de Boruah (2019) y Li (2020).

## AGRADECIMIENTO

Se agradece al Dr. Mario Raitelli por valiosas discusiones y colaboración con la calibración del sistema de iluminación. A la Ing. Victoria Santillán por facilitarnos muestras y dispositivos de su trabajo y al Dr. Germán Bridoux por la colaboración durante el uso y configuración del equipamiento para las mediciones. También se agradece al Consejo Interuniversitario Nacional por haber seleccionado este trabajo dentro de sus becas “Estímulo a las Vocaciones Científicas”, convocatoria 2019.

## REFERENCIAS

ACGIH, TLVs and BEIs, Signature Publications, Estados Unidos, 152-157, 2019.  
Alaie, Z., Nejad, S. M., Yousefi, M. H., Recent

advances in ultraviolet photodetectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 1-36, 2015.  
Boruah, B. D, Zinc oxide ultraviolet photodetectors: rapid progress from conventional to self-powered photodetectors, *Nanoscale Advances*, 1, 2059-2085, 2019.  
CIE, *CIE S 017/E:2011-ILV: Vocabulario Internacional de Iluminación*, Austria, 2011.  
IARC, IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans: A review of human carcinogens, *Solar and Ultraviolet Radiation*, 100D, 35-90, Francia, 2012.  
ICNIRP, Guidelines on limits exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm. *Health Physics*, 87, 171-186, 2004.  
ICNIRP, Protecting Workers from Ultraviolet Radiation. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, 2007.  
Li, H., Zhao, L., Meng, J., Pan, C., Zhang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Triboelectric-polarization-enhanced high sensitive ZnO UV sensor. *Nano Today*, 33, 100873, 2020.  
Morkoç, H., Özgür, Ü., Zinc oxide: fundamentals, materials and device technology, *Wiley-VCH*, 2009.  
Prades, J. D., Hernandez-Ramirez, F., Jimenez-Diaz, R., Manzanares, M., Andreu, T., Cirera, A., Morante, J. R., The effects of electron-hole separation on the photoconductivity of individual metal oxide nanowires. *Nanotechnology*, 19, 2008.  
Santillán, V. E., Nanoestructuras de ZnO sobre sustratos flexibles: Crecimiento y evaluación de propiedades piezoeléctricas, *Proyecto de Graduación-FACET-UNT*, 2018.  
Shasti, M., Dariani, R. S., Study of growth time and post annealing effect on the performance of ZnO nanorods ultraviolet photodetector. *Journal of Applied Physics*, 121, 064503, 2017.  
Vittal, R., Ho, K. C., Zinc oxide based dye-sensitized solar cells: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 920-935, 2017.  
Wang, Z. L., Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16, 829-858, 2004.  
Wang, Z., Song, J., Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*, 312, 242-246, 2006.  
Xu, Q., Cheng, L., Meng, L., Wang, Z., Bai, S., Tian, X., Flexible Self-Powered ZnO Film UV Sensor with a High Response. *Applied Materials & Interfaces*, 11, 20127-26133, 2019.  
Zhai, T., Fang, X., Liao, M., Xu, X., Zeng, H., Yoshio, B., Golberg, D., A Comprehensive Review of One-Dimensional Metal-Oxide Nanostructure Photodetectors. *Sensors*, 9, 6504-6529, 2009.  
Zou, W., Sastry, M., Gooding, J. J., Ramanathan, R., Bansal, V. Recent advances and a roadmap to wearable UV sensor technologies, *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1901036 (1-31), 2020.