

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FOTODETECTORES FLEXIBLES
DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA BASADOS EN NANOPOLVOS Y PELÍCULAS
DELGADAS DE ÓXIDO DE ZINC”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

NICOL ALEJANDRA MUNGUÍA FERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. ABRAHAM ARIAS LEÓN

CO-DIRECTOR:

DR. OSCAR MANUEL PÉREZ LANDEROS

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

ENERO DE 2026

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi director de tesis, el Dr. Abraham Arias León, por su apoyo, guía y motivación constante durante esta investigación, los cuales fueron esenciales para que siempre pudiera dar lo mejor de mí. Gracias por confiar en mis capacidades, incluso en los momentos en que yo dudaba, y por impulsarme a descubrir que puedo llegar más lejos de lo que imagino. Asimismo, agradezco al Dr. Oscar Manuel Pérez Landeros por su apoyo y orientación durante la elaboración de este proyecto. De igual manera, agradezco a los doctores Nicola Radnev Nedev y Jhonathan R. Castillo Saenz por su disposición y valiosa aportación durante el desarrollo de este trabajo.

Expreso un agradecimiento especial al Dr. Norberto Hernández Como por permitirme realizar mi larga estancia en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional. Su apoyo fue fundamental para la realización de este proyecto. Como persona, le agradezco por compartir su conocimiento conmigo, por cuestionarme y motivarme a pensar más allá de lo que sabía, así como por permitirme colaborar en sus proyectos de divulgación y por abrirme las puertas de su laboratorio.

A mis amistades, en especial a quienes estuvieron conmigo en la Ciudad de México y nunca me dejaron sola en los momentos más difíciles, tanto física como mentalmente: Brenda, Erick, Benjamin, Angel, Tenorio. También agradezco a quienes, a pesar de la distancia, siempre estuvieron al pendiente de mí: mi amiga Carolina, así como mis compañeros del laboratorio F: Zulema, Alberto, Irving y Alexis, y del Instituto de Ingeniería: Eddue y Jackeline. Así como a las amistades que tuve la fortuna de formar en el camino, entre ellas mis compañeros del CNMN, el TransisTeam: Isai, Arturo, Leonardo, Abril y Jimena. Cada uno de ustedes hizo más fácil mi estancia lejos de casa.

A mi madre Mayra, a mi padre Juan Carlos y a mis hermanos Alejandro y Juan Carlos, gracias por su apoyo incondicional y por orientarme siempre hacia las mejores decisiones.

Durante la realización de este proyecto, siempre me mantuve gratamente rodeada de personas que aportaron tanto al desarrollo del trabajo como a mi crecimiento personal. Quiero extender mis agradecimientos a cada uno de ustedes.

Finalmente, agradezco al SECIHTI por la beca de posgrado.

DEDICATORIA

A mis padres, porque cada uno de mis logros también les pertenece.

Gracias.

RESUMEN

En este trabajo se fabricaron y caracterizaron distintos dispositivos fotodetectores de radiación ultravioleta (UV) basados en óxido de zinc (ZnO). Los dispositivos fueron evaluados eléctricamente para analizar su desempeño ante la radiación UV y diferentes longitudes de onda visibles, así como la influencia del método de fabricación, la morfología del material semiconductor, el material de los contactos metálicos y su geometría. Las rutas de fabricación se orientaron al desarrollo de fotodetectores mecánicamente flexibles, para ello, se emplearon nanopulvos de ZnO encapsulados en polímeros, películas delgadas depositadas sobre un sustrato flexible y configuraciones que combinan nanopulvos con películas delgadas sobre sustratos flexibles.

Los dispositivos se fabricaron mediante la combinación de técnicas accesibles, como la síntesis de nanopulvos de ZnO por coprecipitación y el termolaminado como técnica de encapsulamiento, así como de técnicas y procesos más controlados, entre ellos la pulverización catódica para el depósito de películas delgadas y la fotolitografía de escritura directa para la definición de diferentes estructuras. Adicionalmente, se analizaron distintas configuraciones de contactos metálicos, variando tanto el material (cobre, aluminio y óxido de plata) como la geometría, con el objetivo de estudiar su impacto en la respuesta eléctrica y mejorar la eficiencia de los dispositivos.

También se exploraron diferentes técnicas de caracterización estructural, composicional y óptica para la evaluación del nanopulvo de ZnO, entre las técnicas utilizadas destacan SEM, EDS, XRD, FTIR y UV-Vis, con el objetivo de obtener información sobre la calidad y características del material semiconductor sintetizado. Asimismo, se realizaron mediciones eléctricas a los dispositivos fabricados para analizar la respuesta de la corriente ante determinadas condiciones, permitiendo la obtención de parámetros como la fotocorriente generada, respuesta temporal, selectividad espectral, relación de rechazo y relación de rectificación

Los resultados muestran que los dispositivos fabricados presentan una respuesta frente a la radiación UV y que su desempeño se ve influenciado por la morfología del material semiconductor, así como por el material y diseño de los contactos interdigitados. En general,

se observó la presencia de fotoconductividad persistente en todos los dispositivos, lo cual afecta en la estabilidad de la corriente y limita la determinación de una corriente base inicial.

Finalmente, esta investigación demuestra la viabilidad de combinar técnicas como la fotolitografía de escritura directa con la deposición de nanopulvos de ZnO mediante métodos sencillos. Los resultados definen el inicio del desarrollo de futuras técnicas y combinaciones de procesos de fabricación para el desarrollo de dispositivos semiconductores flexibles.

ABSTRACT

In this work, different (UV) radiation photodetector devices based on zinc oxide (ZnO) were fabricated and characterized. The devices were electrically evaluated to analyze their performance under UV radiation and different wavelengths, as well as the influence of the fabrication method, the morphology of the semiconductor material, and the geometry and material of the metallic contacts. The fabrication routes were oriented towards the development of mechanically flexible photodetectors. For this purpose, ZnO nanopowders encapsulated in polymers, thin films deposited on a flexible substrate, and configurations combining nanopowders with thin films on flexible substrates were employed.

The devices were fabricated through the combination of accessible techniques, such as the synthesis of ZnO nanopowders by coprecipitation and thermolamination as an encapsulation technique, as well as more controlled techniques and processes, including sputtering for thin film deposition and direct-write photolithography for the definition of different structures. Additionally, different configurations of metallic contacts were analyzed, varying both the material (copper, aluminum, and silver oxide) and geometry, with the aim of studying their impact on the electrical response and improving device efficiency.

Different structural, compositional, and optical characterization techniques were also explored to evaluate the ZnO nanopowder. Among the techniques used, SEM, EDS, XRD, FTIR, and UV-Vis stand out, with the objective of obtaining information about the quality and characteristics of the synthesized semiconductor material. Likewise, electrical measurements were carried out on the fabricated devices to analyze the current response under specific conditions, allowing the deterioration of parameters such as generated photocurrent, temporal response, spectral selectivity, rejection ratio, and rectification ratio.

The results show that fabricated devices exhibit a clear response to UV radiation and that their performance is influenced by the morphology of the semiconductor material, as well as by the material and the design of the interdigitated contacts. In general, the presence of persistent photoconductivity was observed in all devices, which affects current stability and limits the determination of an initial baseline current.

Finally, this research demonstrates the feasibility of combining techniques such as direct-write photolithography with the deposition of ZnO nanopowders using simple methods. The results define the starting point for the development of future techniques and combinations of fabrication processes for development of flexible semiconductor devices.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 2:	INTRODUCCIÓN.....	1
2.1	Introducción.....	2
2.2	Planteamiento del problema	3
2.3	Antecedentes.....	4
2.4	Hipótesis	5
2.5	Objetivos.....	5
2.5.1	Objetivo general	5
2.5.2	Objetivos específicos	5
2.6	Justificación	6
CAPÍTULO 3:	MARCO TEÓRICO.....	8
3.1	Clasificación de los materiales sólidos	9
3.2	Materiales empleados	11
3.2.1	Óxido de Zinc.....	11
3.2.2	Polidimetilsiloxano	12
3.2.3	Poliimida	13
3.3	Fundamentos físicos	14
3.3.1	Espectro electromagnético	14
3.3.2	Radiación ultravioleta	15
3.3.3	Fotoconductividad.....	16
3.4	Técnicas de fabricación	17
3.4.1	Síntesis de materiales	17
3.4.2	Tratamientos térmicos.....	21
3.4.3	Métodos de manufactura avanzada.....	23

3.5	Técnicas de caracterización estructural y espectroscópica	27
3.5.1	Difracción de rayos X	27
3.5.2	Microscopía electrónica de barrido.....	29
3.5.3	Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía.....	30
3.5.4	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	30
3.5.5	Espectroscopía ultravioleta-visible	31
3.5.6	Elipsometría	32
3.6	Caracterización eléctrica de dispositivos fotodetectores	32
3.6.1	Curvas I–V	33
3.6.2	Corriente en oscuridad	35
3.6.3	Fotocorriente	35
3.6.4	Respuesta temporal	35
CAPÍTULO 4: DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		36
4.1	Síntesis y caracterización del nanopolvo de ZnO por coprecipitación	37
4.1.1	Síntesis por coprecipitación	37
4.1.2	Caracterización estructural, composicional y óptica.....	37
4.2	Fabricación de fotodetector termolaminado	41
4.3	Fabricación de fotodetectores encapsulados en PDMS.....	43
4.3.1	Caracterización óptica del PDMS	43
4.3.2	Pruebas de adhesión del PDMS.....	44
4.3.3	Fabricación de contactos de Cu	45
4.3.4	Fabricación de moldes para PDMS.....	47
4.3.5	Ensamble de los materiales	48
4.4	Fabricación de fotodetectores de película delgada mediante fotolitografía	49

4.4.1	Diseño asistido por computadora de los dispositivos	49
4.4.2	Preparación del sustrato	52
4.4.3	Depósito y fotolitografía de Al	53
4.4.4	Depósito de ZnO y fotolitografía (<i>lift-off</i>)	55
4.4.5	Depósito de AgO/Ti/Au y fotolitografía (<i>lift-off</i>)	55
4.5	Fabricación de fotodetectores basados en nanopulvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía.....	58
4.5.1	Diseño asistido por computadora de los dispositivos	58
4.5.2	Preparación del sustrato	59
4.5.3	Depósito y fotolitografía de Al	59
4.5.4	Depósito de nanopulvos de ZnO.....	59
4.5.5	Depósito de SU-8.....	60
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		62
5.1	Caracterización eléctrica de fotodetector termolaminado	63
5.2	Caracterización eléctrica de fotodetector encapsulado con PDMS	71
5.3	Caracterización eléctrica de fotodetectores de película delgada fabricados mediante fotolitografía	72
5.3.1	Dispositivos con contactos de AgO y Al	74
5.3.2	Dispositivos con contactos de Al.....	82
5.3.3	Dispositivos con contactos de AgO	92
5.4	Caracterización eléctrica de las uniones Al/ZnO/AgO/Ti/Au	101
5.5	Caracterización eléctrica de fotodetectores basados en nanopulvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía.....	103
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		111
6.1	Conclusiones	112

6.2	Trabajo futuro	114
6.2.1	Fotodetector termolaminado	114
6.2.2	Fotodetectores encapsulados con PDMS	114
6.2.3	Fotodetectores de película delgada fabricados mediante fotolitografía.....	114
6.2.4	Fotodetectores basados en nanopulvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía.....	115
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS.....		116
CAPÍTULO 8: APÉNDICES.....		124
Apéndice I: Proceso de fotolitografía sobre PI.....		125
Apéndice II: Publicación primer autor		126
Apéndice III: Publicación coautor		127
Apéndice IV: Estancia de investigación		128
Apéndice V: Participación en congresos e impartición de talleres		129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructuras cristalinas de metales: (a) cúbica centrada en las caras, (b) cúbica centrada en el cuerpo y (c) hexagonal compacta.	10
Figura 2.2. Representación esquemática de una estructura molecular de la reticulación, donde cada círculo representa un átomo o una molécula.	11
Figura 2.3. Estructura cristalina del ZnO en fase wurtzita.	12
Figura 2.4. Imagen de PDMS antes de su reticulación.	13
Figura 2.5. Imagen de poliimida Kapton HN.	13
Figura 2.6. Vectores de campo eléctrico y magnético oscilantes de una onda electromagnética.	14
Figura 2.7. Espectro electromagnético.	15
Figura 2.8. Diagrama de bandas del proceso de fotoconducción.	17
Figura 2.9. Esquema general de un sistema de pulverización catódica por DC.	18
Figura 2.10. Esquema general de un sistema de pulverización catódica por RF.	19
Figura 2.11. Imagen esquemática de la tecnología de un equipo de evaporación por haz de electrones.	20
Figura 2.12. Imágenes esquemáticas del proceso de <i>spin coating</i>	21
Figura 2.13. Fotografía representativa de un equipo de termolaminado comercial.	22
Figura 2.14. Placa calefactora.	22
Figura 2.15. Imágenes esquemáticas del funcionamiento de un equipo de impresión 3D FDM (a) y de un equipo de impresión 3D VPP (b).	23
Figura 2.16. Equipo de maquinado CNC.	24
Figura 2.17. Imágenes esquemáticas del proceso básico de fotolitografía con máscara, omitiendo los tratamientos térmicos, para el ataque de un material A o la deposición de un material B en regiones definidas de acuerdo con el patrón de la máscara y el tipo de resina fotosensible.	27

Figura 2.18. Representación esquemática de la ley de Bragg.	28
Figura 2.19. Imágenes esquemáticas del funcionamiento de un sistema SEM.	29
Figura 2.20. Equipo de espectroscopía FTIR.	31
Figura 2.21. Equipo de espectroscopía UV-Vis.	31
Figura 2.22. Elipsómetro espectroscópico.	32
Figura 2.23. Circuito para obtener la curva I–V (suministrar corriente, medir voltaje) del dispositivo en oscuridad (a), bajo incidencia de radiación (b), y ejemplo de curva I–V.....	34
Figura 2.24. Imagen de un equipo de medición y fuente “Model 2450 SourceMeter SMU Instrument – Keithley”.	34
Figura 3.1. Imágenes SEM del nanopolvo de ZnO a magnificaciones de (a) 40× y (b) 100×.	38
Figura 3.2. Espectro EDS del nanopolvo de ZnO.	38
Figura 3.3. Patrones de difracción del nanopolvo de ZnO.	39
Figura 3.4. Espectro FTIR del nanopolvo de ZnO.	40
Figura 3.5. Espectro UV-Vis del nanopolvo de ZnO y E_g determinada por el modelo de Tauc.	41
Figura 3.6. Imagen esquemática de las dimensiones en mm de los contactos de Cu del dispositivo.....	42
Figura 3.7. (a) Vista superior del diseño del fotodetector. (b) Imagen esquemática del acomodo de los materiales empleados en la fabricación del fotodetector. (c) Imagen real de dispositivo fabricado.....	42
Figura 3.8. Espectro FTIR en modo de transmitancia de PDMS su reticulación (Sylgard 184).	43
Figura 3.9. Espectro de transmisión (UV-Vis/VASE) del PDMS.....	44
Figura 3.10. Moldes para pruebas de adhesión.....	44
Figura 3.11. Prueba de flexión con radio de 5 mm.....	45

Figura 3.12. Proceso de fabricación de contactos de Cu.	46
Figura 3.13. Contactos de Cu con dimensiones.	47
Figura 3.14. Modelos 3D de moldes con dimensiones en mm.	47
Figura 3.15. Moldes para verter PDMS fabricados mediante impresión 3D.	48
Figura 3.16. Dispositivos fabricados mediante encapsulación con PDMS.	49
Figura 3.17. Arreglo de dispositivos diseñados.	50
Figura 3.18. Diseño de los nueve potenciales fotodetectores con sección transversal.	51
Figura 3.19. Diseño de los tres dispositivos en sección transversal.	52
Figura 3.20. Rampa de calentamiento para el PI.	53
Figura 3.21. (a) Sustratos flexibles. (b) Sustratos flexibles con depósito de Al mediante pulverización catódica. (c) Resultado del proceso de fotolitografía de Al.	54
Figura 3.22. Imágenes ópticas del resultado de la primera fotolitografía (Al).	54
Figura 3.23. Imágenes ópticas de la definición del ZnO.	55
Figura 3.24. Imágenes ópticas de algunas secciones del sustrato.	57
Figura 3.25. Fotografía de los dispositivos fabricados.	57
Figura 3.26. Arreglo de contactos interdigitados diseñados, en donde $w = 20\ \mu\text{m}$ y $g = 20\ \mu\text{m}$	58
Figura 3.27. Imágenes tomadas con un microscopio óptico a una escala de $500\ \mu\text{m}$ antes de añadir SU-8.	60
Figura 3.28. Imágenes tomadas con un microscopio óptico a una escala de $500\ \mu\text{m}$ después de añadir SU-8.	61
Figura 3.29. (a) Sustrato después de la fotolitografía del Al. (b) Sustrato con contactos de Al y depósito de nanopulvos de ZnO. (c) Sustrato con contactos de Al, depósito de nanopulvos de ZnO y de SU-8 (los recuadros rojos representan los dispositivos de interés).	61

Figura 4.1. Potencia óptica de la fuente de iluminación UV en un rango de 200 a 800 nm. La región espectral de la fuente UV, posicionada a la izquierda de la línea azul, es potencialmente detectable por el dispositivo propuesto.	63
Figura 4.2. Curvas I–V del dispositivo termolaminado, obtenidas en oscuridad y bajo la incidencia de diferentes fuentes de iluminación a una distancia de 50 mm.	64
Figura 4.3. (a) Curvas I–V obtenidas alternando entre la iluminación UV y la oscuridad, iniciando con voltajes positivos y finalizando con voltajes negativos. (b) Curvas I–V obtenidas alternando tanto los voltajes como las condiciones de iluminación entre UV y oscuridad.....	66
Figura 4.4. (a) Curvas I–V obtenidas mediante un barrido de voltaje positivo bajo iluminación UV y un barrido de voltaje negativo en oscuridad. (b) Curvas I–V obtenidas con un barrido de voltaje negativo bajo iluminación UV y con un barrido de voltaje positivo en oscuridad.	68
Figura 4.5. Imagen esquemática de la posición del dispositivo en el equipo de pruebas de estrés mecánico.	68
Figura 4.6. Curvas I–V del dispositivo obtenidas después de realizar diferentes ciclos de flexión.	69
Figura 4.7. (a) Corriente bajo iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de –10 a 10 V del dispositivo termolaminado (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis del dispositivo termolaminado.	70
Figura 4.8. Relación de rectificación en un rango de 0 a ± 10 V del dispositivo termolaminado.	71
Figura 4.9. Dispositivo fabricado con PDMS en proceso de caracterización eléctrica.	71
Figura 4.10. Fotografías del proceso de caracterización eléctrica, con incidencia de radiación con diferentes longitudes de onda.....	72
Figura 4.11. Curvas I–V del dispositivo S1 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	74

Figura 4.12. Curvas I–V del dispositivo S2 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	75
Figura 4.13. Curvas I–V del dispositivo S3 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	75
Figura 4.14. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de 0 a ± 10 V de los dispositivos S1, S2 y S3. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S4, S5 y S6.	77
Figura 4.15. Relación de rectificación de los dispositivos S1, S2 y S3.	77
Figura 4.16. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.	79
Figura 4.17. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V, bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.	80
Figura 4.18. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V, bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.	81
Figura 4.19. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.	82
Figura 4.20. Curvas I–V del dispositivo S4 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	83
Figura 4.21. Curvas I–V del dispositivo S5 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a) y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	83
Figura 4.22. Curvas I–V del dispositivo S6 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a) y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	84

Figura 4.23. Gráfica comparativa de la resistencia eléctrica de los dispositivos S4, S5 y S6.	85
Figura 4.24. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V para los dispositivos S4, S5 y S6. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S4, S5 y S6.	87
Figura 4.25. Relación de rectificación de los dispositivos S4, S5 y S6.	88
Figura 4.26. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.	89
Figura 4.27. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.	90
Figura 4.28. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.	91
Figura 4.29. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.	92
Figura 4.30. Curvas I–V del dispositivo S7 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	93
Figura 4.31. Curvas I–V del dispositivo S8 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	93
Figura 4.32. Curvas I–V del dispositivo S9 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	94
Figura 4.33. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V de los dispositivos S7, S8 y S9. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S7, S8 y S9.	96
Figura 4.34 Relación de rectificación de los dispositivos S7, S8 y S9.	97

Figura 4.35. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.....	98
Figura 4.36. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.....	99
Figura 4.37. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.....	100
Figura 4.38. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.....	101
Figura 4.39. Curvas I–V de los dispositivos D1, D2 y D3.....	102
Figura 4.40. Relación de rectificación de los dispositivos D1, D2, D3.....	102
Figura 4.41. (a) Fotografía del proceso de caracterización eléctrica. (b) Dispositivo con mayor uniformidad de nanopulvos de ZnO (D1–Nps). (c) Dispositivo medianamente uniforme (D2–Nps). (d) Dispositivo con menor uniformidad (D3–Nps).....	103
Figura 4.42. Curvas I–V del dispositivo con mayor uniformidad obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).....	105
Figura 4.43. Curvas I–V del dispositivo medianamente uniforme obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).....	106
Figura 4.44. Curvas I–V del dispositivo poco uniforme obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).	107
Figura 4.45. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de –10 a 10 V para los dispositivos D1, D2 y D3. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos D1, D2 y D3.	108

Figura 4.46. Relación de rectificación de los dispositivos D1–Nps, D2–Nps y D3–Nps en un rango de 0 a 10 V.....	109
Figura 4.47. Respuesta temporal del dispositivo D1–Nps bajo radiación UV (380 nm) polarizado a 10 V.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipos de radiación UV y sus rangos de longitud de onda y energía.	16
Tabla 2.2. Tipos de fotodetectores y sus características principales.	33
Tabla 3.1. Tamaño de cristalito de ZnO obtenido mediante la ecuación de Scherrer.	39
Tabla 3.2. Tiempo en el que se añadió la segunda capa de PDMS y la cantidad de PDMS añadida en gramos.	45
Tabla 3.3. Parámetros para el depósito de Al mediante pulverización catódica de DC.	53
Tabla 3.4. Parámetros para el depósito de ZnO mediante pulverización catódica de RF. ...	55
Tabla 3.5. Parámetros para el depósito de AgO mediante pulverización catódica de RF....	56
Tabla 3.6. Parámetros de depósito de Ti/Au mediante evaporación por haz de electrones. 56	
Tabla 3.7. Parámetros de depósito de Au mediante evaporación por haz de electrones.	56
Tabla 4.1. Secuencias de barrido de voltaje: (a) Barridos iniciando con voltaje positivo y finalizando con voltaje negativo, alternando entre oscuridad y radiación UV y, (b) Barridos de voltaje alternando los voltajes, alternando entre oscuridad y radiación UV.....	65
Tabla 4.2. Secuencias de barrido de voltaje: (a) Voltaje positivo bajo iluminación UV y negativo en oscuridad. (b) Voltaje negativo bajo iluminación UV y positivo en oscuridad.	67
Tabla 4.3. Resistencia eléctrica del dispositivo termolaminado a ± 10 V.....	69
Tabla 4.4. (a) Barridos de voltaje alternando los voltajes bajo la incidencia de iluminación con diferentes longitudes de onda. (b) Barridos iniciando con voltaje positivo y finalizando con voltaje negativo, ambos bajo iluminación de longitudes de onda diferentes.....	73
Tabla 4.5. Resistencia eléctrica de los dispositivos S1, S2 y S3 a ± 10 V.	76
Tabla 4.6. Resistencia eléctrica de los dispositivos S4, S5 y S6 a ± 10 V.	84
Tabla 4.7. Comparación del porcentaje de disminución de resistencia eléctrica al incidir radiación UV y la recuperación de la resistencia eléctrica en su estado en oscuridad inicial.	86
Tabla 4.8. Resistencia eléctrica de los dispositivos S7, S8 y S9 a ± 10 V.	95

Tabla 4.9. Resistencia eléctrica de los dispositivos D1–Nps, D2–Nps y D3–Nps a ± 10 V.	109
--	-----

ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción
ZnO	Óxido de zinc
UV	Ultravioleta
SiC	Carburo de silicio
ZnSe	Seleniuro de zinc
WBG	Banda prohibida ancha (Wide Band Gap)
Al	Aluminio
Cu	Cobre
Au	Oro
Ag	Plata
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio
Si ₃ N ₄	Nitruro de silicio
Si	Silicio
Ge	Germanio
GaAs	Arseniuro de galio
SiGe	Silicio–Germanio
E _g	Banda prohibida
LED	Diodo emisor de luz (Light Emitting Diode)
CVD	Deposición química de vapor (Chemical Vapor Deposition)
ALD	Deposición por capas atómicas (Atomic Layer Deposition)
PDMS	Polidimetilsiloxano
PPC	Fotoconductividad persistente (Persistent Photoconductivity)
Ar	Argón
RF	Radiofrecuencia (Radio Frequency)
DC	Corriente Directa (Direct Current)
CAD	Diseño asistido por computadora (Computer-Aided Design)

VPP	Fotopolimerización en tanque (Vat Photopolymerization)
FDM	Modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling)
CNC	Control numérico por computadora (Computer Numerical Control)
XRD	Difracción de rayos X (X-Ray Diffraction)
SEM	Microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy)
EDS	Espectroscopía de energía dispersiva (Energy-Dispersive Spectroscopy)
TEM	Microscopía electrónica de transmisión (Transmission Electron Microscopy)
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
UV-Vis	Espectroscopía ultravioleta-visible
I-V	Corriente-voltaje
SMU	Unidad de medida de fuente (Source Measure Unit)
DI	Agua desionizada (Deionized Water)
NaOH	Hidróxido de Sodio
VASE	Elipsometría espectroscopica de ángulo variable (Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry)
IPA	Isopropanol
AgO	Óxido de plata
Ti	Titanio
PI	Poliimida
RR	Relación de rectificación

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

“El trabajo duro supera al talento natural.”

—Rock Lee

1.1 Introducción

En la industria de los dispositivos semiconductores domina principalmente el silicio (Si) debido a su abundancia, bajo costo y madurez tecnológica, lo que ha favorecido su consolidación como material base en la fabricación de dispositivos electrónicos convencionales. Sin embargo, existen aplicaciones en las que resulta indispensable el desarrollo de dispositivos específicos, como los sensores optoelectrónicos, en los que las propiedades intrínsecas del Si se ven limitadas. Por ello, se ha optado por la fabricación de dispositivos con materiales semiconductores alternativos al Si, entre los que se encuentran los semiconductores de banda prohibida ancha (WBG), que destacan por su eficiencia en aplicaciones optoelectrónicas para la detección de longitudes de onda cortas, particularmente en el rango de la radiación ultravioleta (UV).

Por otro lado, la electrónica flexible representa una línea de investigación emergente que genera nuevas oportunidades para la aplicación de la microelectrónica en distintos sectores y plantea nuevos desafíos tecnológicos. Uno de los principales desafíos radica en la selección del sustrato, el cual debe ser compatible con procesos de fabricación que incluyen etapas de limpieza con solventes, tratamientos térmicos y depósitos de diferentes materiales. Desde esta perspectiva, suelen presentarse problemas de delaminación, fractura de las capas activas o degradación de sus capacidades eléctricas cuando los dispositivos son sometidos a deformaciones mecánicas. Por ello, el desarrollo de dispositivos flexibles es un área de oportunidad, ya que existen múltiples procesos y configuraciones que pueden implementarse incluso mediante métodos de bajo costo y equipamiento accesible.

En este contexto, el ZnO se posiciona como un material de gran interés debido a su WBG, su alta sensibilidad a la radiación UV, su compatibilidad con diversos métodos de fabricación y su versatilidad en los métodos de síntesis y morfologías. Estas características lo convierten en un material atractivo para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos, ya que permite explorar diferentes configuraciones en su fabricación, lo que influye directamente en el desempeño eléctrico y óptico.

Por otro lado, el diseño de los contactos eléctricos, incluyendo su material, la geometría y el área de contacto, desempeña un papel fundamental en el comportamiento de los dispositivos, ya que influye directamente tanto en el tipo de contacto eléctrico establecido con el material

semiconductor, ya sea de carácter óhmico o rectificante, como en la eficiencia de generación de fotocorriente en aplicaciones de fotodetección.

Se han reportado diversos métodos de fabricación para el desarrollo de fotodetectores basados en ZnO; sin embargo, aún existe la necesidad de desarrollar dispositivos que exploren técnicas de fabricación compatibles con sustratos flexibles, que permitan mantener un desempeño eléctrico sin comprometer su integridad estructural ni incrementar significativamente la complejidad y el costo de los procesos.

Por ello, este trabajo se enfoca en la fabricación y caracterización de fotodetectores de radiación UV basados en ZnO, en los que se exploran diferentes métodos de fabricación, morfologías del material semiconductor, diseños y configuraciones de los contactos, con el objetivo de evaluar su desempeño optoelectrónico y analizar su potencial aplicación como fotodetectores flexibles.

1.2 Planteamiento del problema

En las últimas décadas, se han reportado numerosas investigaciones relacionadas con el desarrollo de fotodetectores de radiación UV basados en ZnO; sin embargo, la mayoría de los resultados se enfocan en dispositivos rígidos fabricados mediante procesos altamente controlados, lo que limita su repetibilidad y su transferibilidad a enfoques flexibles y de bajo costo. Al intentar trasladar estas tecnologías rígidas hacia las flexibles, surgen problemas relacionados con la integración completa de los materiales, tales como la delaminación de las capas, la fractura de los materiales y la degradación del desempeño eléctrico bajo deformaciones mecánicas.

Adicionalmente, el desempeño de los dispositivos depende de múltiples variables, entre ellas la morfología de la capa activa, el diseño y el área de los dispositivos, así como el sustrato empleado. Cada variable puede afectar el desempeño eléctrico y los parámetros clave, como la fotocorriente generada o la selectividad espectral de los dispositivos. Además, las técnicas altamente controladas permiten una mayor reproducibilidad; sin embargo, pueden implicar mayor complejidad y la necesidad de equipos especializados. En contraste, los métodos de bajo costo ofrecen ventajas en términos de accesibilidad. La integración de ambos enfoques

representa una alternativa prometedora que puede impactar en la producción a gran escala de los dispositivos.

Por lo tanto, surge la problemática de fabricar fotodetectores de radiación UV que integren lo mejor de ambas tecnologías, combinando técnicas de fabricación de alto y bajo costo, sin disminuir el desempeño de los dispositivos.

1.3 Antecedentes

El silicio (Si) es el material semiconductor más estudiado y utilizado para el desarrollo de dispositivos electrónicos; por ello, inicialmente fue ampliamente utilizado para el desarrollo y fabricación de dispositivos fotodetectores. Sin embargo, debido a que la banda prohibida (E_g) del Si es de aproximadamente 1.12 eV, el material presenta sensibilidad a la radiación visible e infrarroja, por lo que se requería del uso de filtros ópticos para bloquear las longitudes de onda no deseadas, incrementando así la complejidad de los dispositivos [1]. Como consecuencia, se impulsó la incorporación de materiales de WBG, tales como ZnO, SiC y ZnSe, los cuales presentan una respuesta intrínseca a la radiación UV [2].

Se han reportado múltiples fotodetectores UV basados en ZnO integrando distintas morfologías, entre ellas, películas delgadas, nanoestructuras unidimensionales, demostrando cómo la morfología del material influye en la eficiencia y desempeño de los dispositivos [3], [4], [5]. No obstante, muchos estudios se enfocan en una sola característica, lo que dificulta la integración y la comparación de diferentes enfoques de fabricación y diseño.

Por otro lado, la integración de la electrónica flexible ha creado nuevas alternativas en cuanto a la sustitución de sustratos rígidos por sustratos poliméricos, lo que ha motivado el desarrollo de dispositivos flexibles. Por ello, se han reportado diferentes trabajos que demuestran la viabilidad de la fabricación de dispositivos flexibles que no comprometen su respuesta eléctrica ante estímulos mecánicos [6], [7], [8], [9].

Además, diversos estudios han demostrado que el desempeño de los dispositivos no depende únicamente del material semiconductor, sino también de las características de los electrodos. Se ha reportado que el material de los contactos metálicos puede alterar significativamente la respuesta y la estabilidad de los fotodetectores basados en ZnO. Estas variaciones se resultan relevantes en dispositivos fabricados sobre sustratos flexibles, donde no solo se

evalúa la integración de los materiales semiconductores, sino también el comportamiento eléctrico del conjunto de materiales [10], [11].

Finalmente, diversos estudios han propuesto enfoques alternativos de fabricación basados en la síntesis de nanopulvos de ZnO, la deposición de películas delgadas y otros procesos controlados, con el objetivo de crear dispositivos reproducibles y estables [12], [13].

1.4 Hipótesis

La integración de nanopulvos y películas delgadas mediante rutas híbridas de fabricación que integran técnicas controladas y métodos accesibles, en conjunto con distintos diseños y materiales de contactos interdigitados, permitirá fabricar dispositivos fotodetectores de radiación UV basados en ZnO sobre sustratos flexibles, con desempeño optoelectrónico funcional.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar y fabricar dispositivos flexibles para la detección de radiación UV mediante la integración de ZnO nanoparticulado o películas delgadas, sobre un sustrato flexible definidas por fotolitografía, con el fin de evaluar su desempeño como dispositivos optoelectrónicos.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Fabricación y caracterización de dispositivos basados en nanopulvos de ZnO embebidos en polímeros flexibles:

- Sintetizar ZnO para la obtención de nanopulvos.
- Caracterizar estructuralmente los nanopulvos de ZnO.
- Realizar una prueba de concepto del dispositivo mediante termolaminado y nanopulvos de ZnO.
- Caracterizar eléctrica y ópticamente la estructura obtenida mediante termolaminado.
- Analizar los datos obtenidos para evaluar su potencial aplicación como detector de radiación UV.

- Fabricar un dispositivo con nanopulvos de ZnO embebidos en polidimetilsiloxano.
- Caracterizar eléctrica y ópticamente la estructura obtenida.
- Documentar la información obtenida a partir de las pruebas realizadas.
- Analizar los datos obtenidos para evaluar su potencial aplicación como dispositivo detector de radiación UV.

2. Fabricación de dispositivos basados en películas delgadas sobre sustrato polimérico flexible:

- Diseñar patrones fotolitográficos.
- Depositar y grabar los materiales sobre el sustrato flexible mediante fotolitografía.
- Caracterizar eléctrica y ópticamente los dispositivos obtenidos.
- Documentar la información obtenida a partir de las pruebas realizadas.
- Analizar los datos obtenidos para evaluar su potencial aplicación como dispositivo detector de radiación UV.

3. Fabricación de dispositivos implementando de nanopulvos de ZnO con contactos metálicos definidos por fotolitografía

- Diseñar patrones fotolitográficos para los contactos metálicos.
- Depositar y grabar el material sobre un sustrato flexible mediante fotolitografía.
- Depositar nanopulvos de ZnO.
- Depositar película polimérica.
- Caracterizar eléctrica y ópticamente los dispositivos obtenidos.
- Documentar la información obtenida a partir de las pruebas realizadas.
- Analizar los datos obtenidos para evaluar su potencial aplicación como dispositivo detector de radiación UV.

1.6 Justificación

El ZnO es un material de WBG con respuesta intrínseca a la radiación UV, lo que lo hace atractivo para aplicaciones optoelectrónicas. Por otro lado, la integración de la electrónica

flexible en distintas áreas, en combinación con el ZnO, material morfológicamente versátil y fácil de obtener mediante diversos métodos físicos y químicos, favorece su incorporación en este tipo de tecnologías. Por ello, resulta necesario evaluar diferentes enfoques de fabricación de dispositivos, así como analizar su desempeño al integrar distintos métodos de fabricación, morfologías del material semiconductor, electrodos y sustratos.

Por ello, este trabajo permite analizar de manera comparativa cómo la morfología del semiconductor impacta en la eficiencia de los dispositivos, abordando el estudio desde una perspectiva en la que estos se someten a estrés mecánico. El análisis de la integración y combinación de diferentes morfologías de ZnO contribuye a la exploración de nuevas alternativas de fabricación y a una mejor comprensión de la respuesta eléctrica bajo distintas condiciones.

Además, la evaluación del impacto del diseño, el material y la geometría de los contactos eléctricos en el desempeño de los dispositivos resulta fundamental, ya que permite identificar la influencia de estos parámetros en la eficiencia de los dispositivos y en la optimización de variables clave.

La exploración de diferentes técnicas de fabricación, en las que se combinan procesos controlados realizados en cuartos limpios con métodos accesibles y de fácil implementación, permite evaluar la viabilidad de integrar ambos enfoques con un mismo objetivo: crear dispositivos flexibles aprovechando las mejores cualidades de cada técnica.

Finalmente, el potencial desarrollo de dispositivos fotodetectores de radiación UV mecánicamente flexibles, con selectividad espectral, capaces de operar bajo diferentes modulaciones de frecuencia de encendido–apagado, abre la posibilidad de implementarlos en aplicaciones cotidianas donde la detección de la radiación UV es indispensable.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

“Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido.”

– Marie Curie

2.1 Clasificación de los materiales sólidos

Los materiales sólidos se pueden clasificar con base en sus propiedades estructurales, químicas y de enlace, que determinan sus características mecánicas, eléctricas, ópticas y térmicas. Generalmente, los materiales se clasifican en metales, cerámicos, polímeros y semiconductores, sin embargo, también se estudian sus características en su versión nanoestructurada con el objetivo de ampliar sus aplicaciones [14], [15].

Los metales se caracterizan por tener una excelente conductividad eléctrica y térmica debido a la abundancia de electrones deslocalizados (electrones capaces de moverse entre diferentes átomos). Mecánicamente se destacan por su rigidez, dureza, ductilidad y resistencia a la fractura [14], [16]. Algunos ejemplos de metales son el aluminio (Al), cobre (Cu), oro (Au) y plata (Ag) los cuales son empleados a escalas nanométricas en forma de nanohilos para realizar interconexiones metálicas en la fabricación de dispositivos electrónicos. En la Figura 2.1 se muestran imágenes esquemáticas de las estructuras cristalinas de distintos metales. La Figura 2.1(a) representa una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés *body-centered cubic*), donde los átomos se encuentran uno en el centro y los demás en los vértices del cubo. Por otro lado, la Figura 2.1(b) representa una estructura cúbica centrada en las caras (FCC, por sus siglas en inglés *face-centered cubic*) la cual se caracteriza por sus átomos ubicados en los vértices del cubo y en el centro de sus caras. Finalmente, la Figura 2.1(c) representa una estructura hexagonal compacta (HCP, por sus siglas en inglés *hexagonal close-packed*) caracterizada por átomos localizados en los doce vértices del prisma hexagonal, así como uno en cada centro de sus caras hexagonales y tres en el plano central [17], [18].

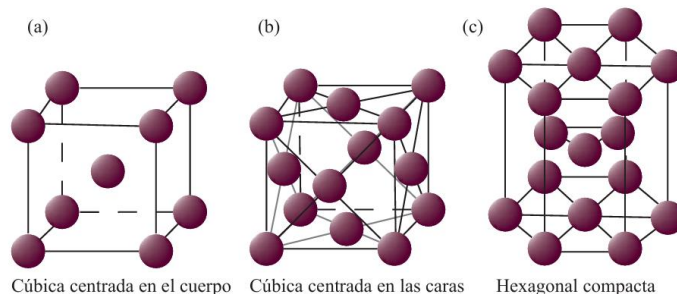


Figura 2.1. Estructuras cristalinas de metales: (a) cúbica centrada en las caras, (b) cúbica centrada en el cuerpo y (c) hexagonal compacta.

Los materiales cerámicos son compuestos inorgánicos y no metálicos, formados principalmente por la combinación de elementos metálicos y no metálicos como el oxígeno. Por ello, sus estructuras cristalinas suelen ser más complejas que las de un material metálico. Predominan los enlaces iónicos, covalentes o una combinación de ambos, dependiendo de la electronegatividad de los átomos. También se caracterizan por su baja conductividad eléctrica, estabilidad térmica y alta dureza [14]. El óxido de aluminio (Al_2O_3) y nitruro de silicio (Si_3N_4) son ejemplos de materiales cerámicos utilizados como aislantes eléctricos [19].

Los polímeros generalmente se componen de carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos; se caracterizan por sus estructuras moleculares que forman largas cadenas. Mecánicamente destacan por su alta ductilidad y flexibilidad. Además, mantienen una baja conductividad eléctrica y no son ferromagnéticos por lo que pueden ser utilizados como aislantes eléctricos [14].

La reticulación de polímeros implica la unión adyacente entre cadenas en diferentes posiciones por medio de enlaces covalentes, generalmente este proceso se realiza con la adición de átomos o moléculas que se encuentran unidas de manera covalente entre las cadenas, en la Figura 2.2 se muestra una representación gráfica de una estructura molecular de la reticulación química [14].

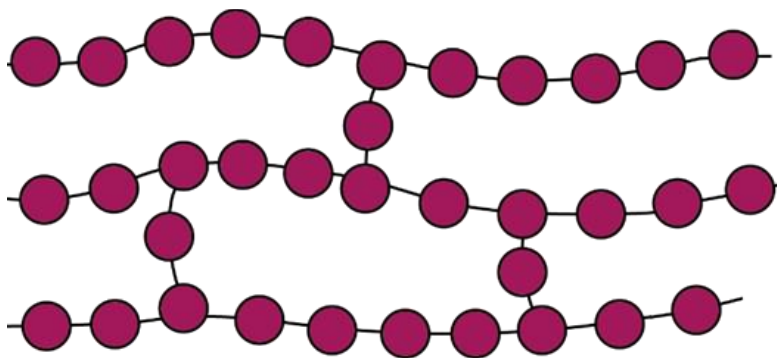


Figura 2.2. Representación esquemática de una estructura molecular de la reticulación, donde cada círculo representa un átomo o una molécula.

Los materiales semiconductores se caracterizan por la variación de su conductividad en respuesta a estímulos externos, como la excitación electromagnética, por lo que son fundamentales en la fabricación de transistores, sensores, diodos o celdas solares, donde se utilizan a escala nanométrica. Existen semiconductores elementales que se encuentran en la columna IV de la tabla periódica, como el silicio (Si) y el germanio (Ge). También existen los semiconductores compuestos que son la combinación de átomos de diferentes grupos de la tabla periódica como el arseniuro de galio (GaAs) III–V, ZnO II–V y el silicio–germanio (SiGe) IV [20].

2.2 Materiales empleados

2.2.1 Óxido de Zinc

El ZnO es un semiconductor II–VI con una WBG directa de ~ 3.37 eV y una alta energía de enlace de excitones (~ 60 meV), predominante en su estructura cristalina tipo wurtzita (Figura 2.3) a temperatura ambiente. Estas características favorecen su utilización como material semiconductor base en aplicaciones para dispositivos como fotodetectores y diodos emisores de luz (LEDs) en el rango UV [21], [22], [23], [24].

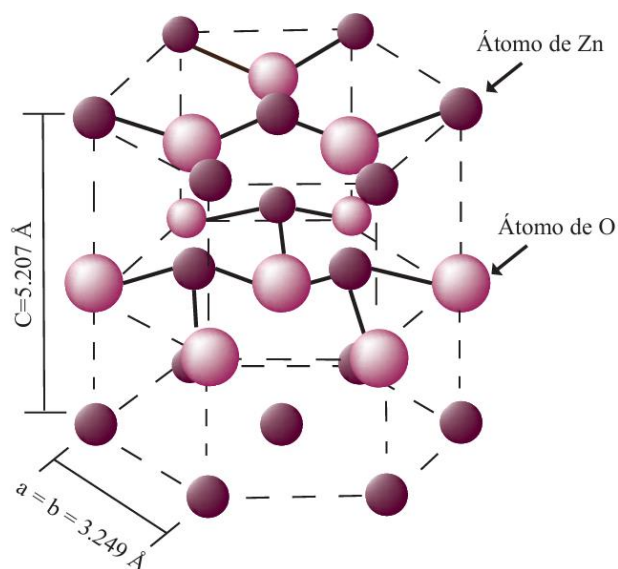


Figura 2.3. Estructura cristalina del ZnO en fase wurtzita.

En cuanto a los métodos de síntesis, destaca por la versatilidad de técnicas físicas y químicas con las que se puede obtener. Entre las técnicas utilizadas se encuentran la deposición química en fase de vapor (CVD), la deposición de capas atómicas (ALD), la pulverización catódica (*sputtering*) y métodos como la coprecipitación, el sol-gel e hidrotermales [25], [26], [27], [28]. De acuerdo con la técnica y los parámetros específicos empleados, se pueden obtener diferentes tipos de nanoestructuras, como nanopolvos, nanohilos y nanotubos, entre otras. En donde la morfología impacta directamente en propiedades como el transporte de carga y la interacción con la radiación electromagnética [29], [30].

2.2.2 Polidimetilsiloxano

El polidimetilsiloxano (PDMS) es un polímero organosiloxano con una estructura química de cadena principal Si-O-Si, con grupos metilo -CH₃ unidos al Si. Ópticamente, se caracteriza por su transparencia en el rango de 240 a 1100 nm, por lo que se utiliza en la fabricación de diversos dispositivos fotodetectores. Soporta temperaturas de -50 a 200 °C y presenta baja conductividad térmica. Además de ser un excelente aislante eléctrico, con una resistividad superior a 10¹⁴ Ω cm, en la Figura 2.4 se muestra una imagen del PDMS antes de su reticulación [31], [32].



Figura 2.4. Imagen de PDMS antes de su reticulación.

2.2.3 Poliimida

La poliimida (PI) es una película desarrollada por Dupont (Figura 2.5) que se distingue por conservar su funcionalidad manteniendo tanto su resistencia mecánica como eléctrica, incluso después de ser expuesta a un amplio rango de temperaturas que van de -269 a 400 °C [33].

Es utilizada para el desarrollo de dispositivos semiconductores flexibles o circuitos impresos flexibles [34], [35], ya que es un excelente aislante eléctrico y resiste una gran cantidad de ciclos de flexión, a su vez compatible con solventes, aceites y una amplia variedad de químicos. Además, es ideal para aplicaciones como fotodetectores de radiación UV ya que la película ha sido expuesta a la radiación UV en vacío a 2×10^{-6} mm Hg a una temperatura de 50 °C durante 1000 horas con una intensidad UV equivalente a la luz solar espacial manteniendo el 100% de su resistencia a la tracción (capacidad de resistir esfuerzos mecánicos) y reduciendo solo un 26% de su elongación (capacidad de estirarse antes de romperse) [33].



Figura 2.5. Imagen de poliimida Kapton HN.

2.3 Fundamentos físicos

2.3.1 Espectro electromagnético

La radiación electromagnética está compuesta de ondas formadas por un campo eléctrico y un campo magnético, ambos elementos oscilan de manera perpendicular entre sí en la dirección de propagación (Figura 2.6), esta puede propagarse en el vacío a la velocidad de la luz [14], [36].

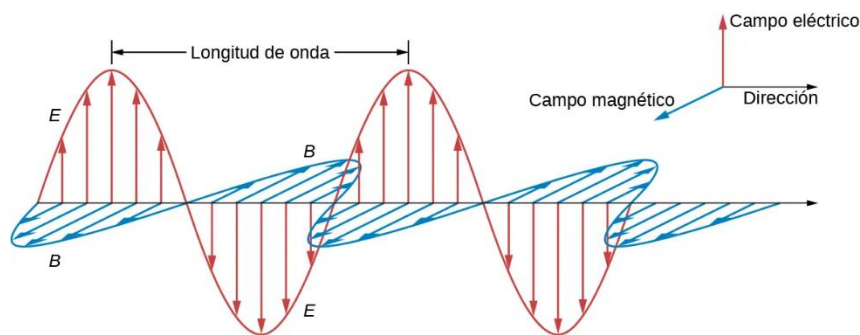


Figura 2.6. Vectores de campo eléctrico y magnético oscilantes de una onda electromagnética.

El espectro electromagnético comprende la totalidad de estas ondas, clasificables según su longitud de onda (λ), frecuencia (ν) y energía (E). Existe una relación inversa entre la longitud de onda y la frecuencia: cuanto mayor es la frecuencia, menor es la longitud de onda. En la Figura 2.7 se observa que el espectro abarca desde los rayos gamma hasta las ondas de radio [14], [36], [37].

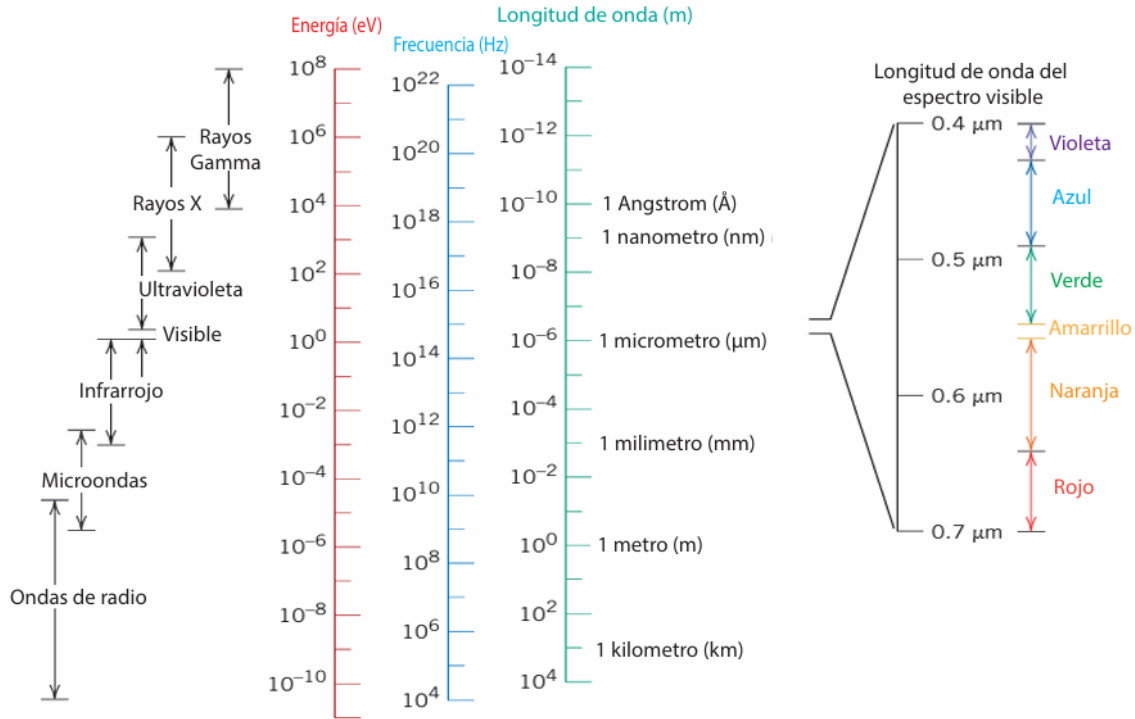


Figura 2.7. Espectro electromagnético.

Al tener la radiación electromagnética propiedades de onda y partícula, se puede tomar como paquetes de energía a los que se les conoce como fotones. La energía de los fotones se encuentra cuantizada, por lo tanto, solo puede tener valores específicos los cuales se pueden encontrar por medio de la Ecuación (1).

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

En donde h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), es más fácil tratar la radiación en términos de fotones cuando se trata de fenómenos ópticos que se relacionan con la interacción entre la radiación y la materia [14], [38].

2.3.2 Radiación ultravioleta

La radiación UV se posiciona entre la parte visible y los rayos X del espectro electromagnético, con un rango de energía de entre 3.1 a 124 eV, por lo tanto, es una radiación capaz de inducir transiciones electrónicas en materiales semiconductores [39], [40]. Se puede dividir como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de radiación UV y sus rangos de longitud de onda y energía.

Tipo de radiación	Longitud de onda (nm)	Energía (eV)
UV-A	315–400	3.1–3.9
UV-B	280–315	3.9–4.4
UV-C	100–280	4.4–12.4
EUV	10–124	10–124

En donde cerca del 95% de la radiación UV que recibe la Tierra es UV–A, el resto de la radiación se divide en UV–B y UV–C [39].

Existen diferentes aplicaciones de la radiación UV como lo es en la industria para la inhibición de microorganismos en las superficies, destrucción de microorganismos en el aire y esterilización de líquidos, para inspecciones sanitarias en la detección de contaminantes por el efecto de fluorescencia inducida por la radiación UV [41], [42], [43]. Además, es utilizada para la reticulación química de polímeros, la cual se aplica en el área dental, en impresiones 3D y tintas [44], [45].

2.3.3 Fotoconductividad

Es el fenómeno que se produce cuando la incidencia de radiación electromagnética sobre un material genera un incremento en su conductividad eléctrica. El efecto se produce por la excitación de los electrones que se encuentran en la banda de valencia con una radiación con energía igual o mayor al E_g del material, generando pares electrón–hueco. Los portadores de carga (fotogenerados) que llegan a la banda de conducción son los que contribuyen al proceso de conducción en el material (Figura 2.8) [46], [47].



Figura 2.8. Diagrama de bandas del proceso de fotoconducción.

2.3.3.1 Fotoconductividad persistente

La fotoconductividad persistente (PPC) se refiere a la conductividad que persiste incluso después de detener la incidencia de la radiación electromagnética. La fotocorriente generada disminuye lentamente tras apagar la fuente de iluminación, lo que afecta directamente la velocidad de trabajo de los dispositivos optoelectrónicos. En materiales como el ZnO se ha encontrado que las vacancias de oxígeno y trampas de portadores de carga en el material son los principales factores responsables de este fenómeno [48], [49].

2.4 Técnicas de fabricación

2.4.1 Síntesis de materiales

2.4.1.1 Coprecipitación

La coprecipitación es un método químico de síntesis de materiales en el que dos o más especies iónicas de una solución se precipitan simultáneamente al añadir un agente precipitante, permitiendo la obtención de materiales nanoparticulados [50], [51].

Es posible controlar la morfología y tamaño de las partículas modificando diferentes parámetros del proceso como el pH, temperatura y velocidad de adición del agente precipitante [51].

2.4.1.2 Pulverización catódica

La pulverización catódica es un método de deposición física de material, ampliamente utilizado para la formación de películas delgadas. El proceso consiste en introducir un gas inerte como argón (Ar) en una cámara de vacío y, por medio de un campo eléctrico, generar plasma ionizando los átomos del gas. Es necesario colocar el sustrato y un blanco o target del material a depositar dentro de la cámara. Los iones son acelerados hacia el blanco, hasta provocar la expulsión de sus átomos hacia el sustrato y recubrirlo con el material bombardeado [52].

En la **pulverización catódica por corriente directa (DC)**, el cátodo (blanco) se polariza constantemente con un voltaje negativo, lo cual atrae a los iones positivos del plasma hasta la superficie. Este método es eficiente solo para materiales metálicos, ya que en los blancos aislantes produce una acumulación de carga positiva en la superficie que desestabiliza el plasma, en la Figura 2.9 se observa una imagen esquemática de un sistema de pulverización catódica por DC [52].

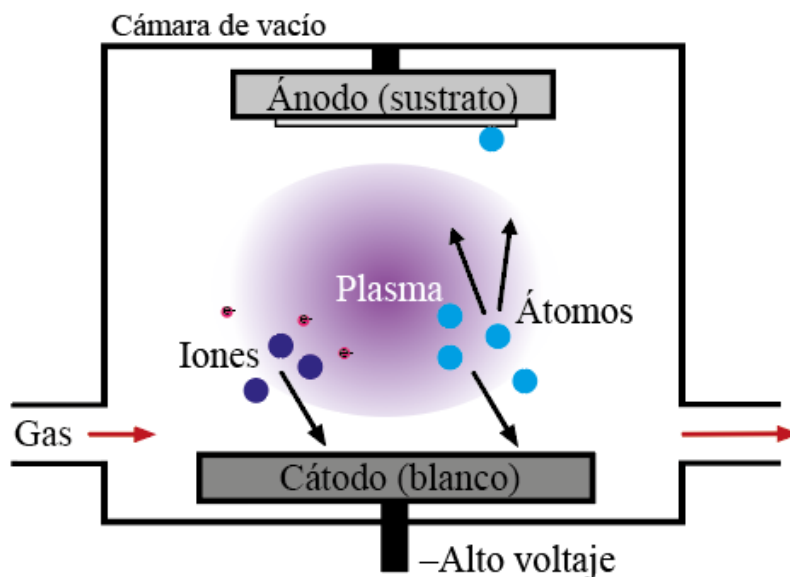


Figura 2.9. Esquema general de un sistema de pulverización catódica por DC.

Por otro lado, la **pulverización catódica por radiofrecuencia (RF)** utiliza una señal alterna de alta frecuencia aplicada al cátodo. La alternancia del campo eléctrico evita la acumulación de carga, permitiendo el depósito tanto de materiales conductores como de materiales dieléctricos. Sin embargo, la tasa de deposición es menor que la de la pulverización catódica por DC. En la Figura 2.10 se observa una imagen esquemática de un sistema de pulverización catódica por RF [52].

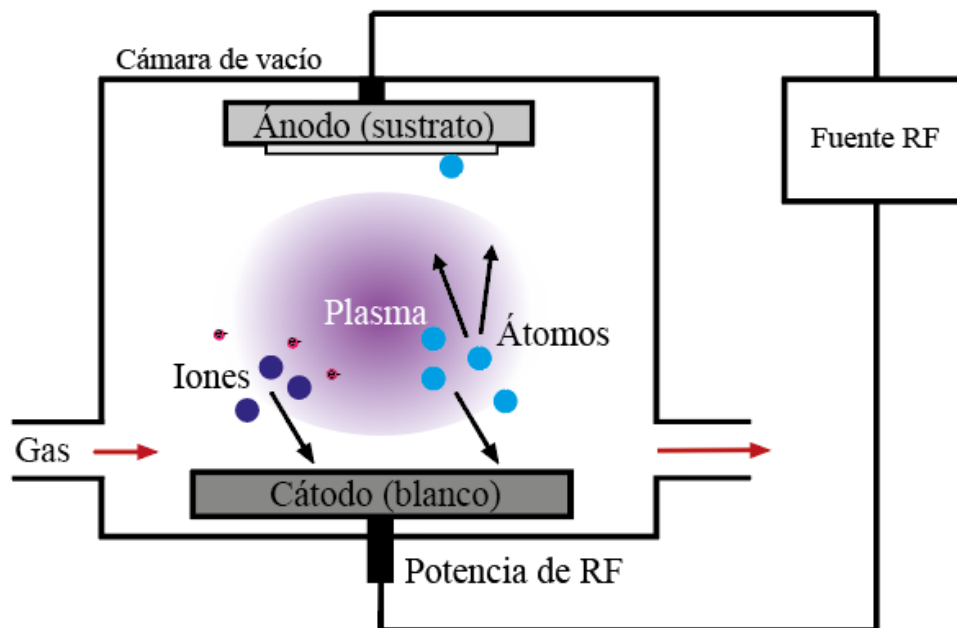


Figura 2.10. Esquema general de un sistema de pulverización catódica por RF.

2.4.1.3 Evaporación por haz de electrones

La evaporación por haz de electrones (*E-Beam evaporation*) es una técnica de deposición física en fase de vapor, cuyo funcionamiento se basa en la aceleración de un haz de electrones de alta energía dirigido hacia el material a depositar, ubicado en un crisol refrigerado. La transferencia de energía funde y evapora localizadamente el material, condensando sus átomos sobre el sustrato. El proceso se lleva a cabo en una atmósfera de alto vacío. En comparación con la evaporación térmica resistiva, esta técnica destaca por sus altas tasas de deposición y por permitir la evaporación de materiales con puntos de fusión elevados, en la Figura 2.11 se observa una imagen esquemática de un sistema de evaporación por haz de electrones [52], [53].

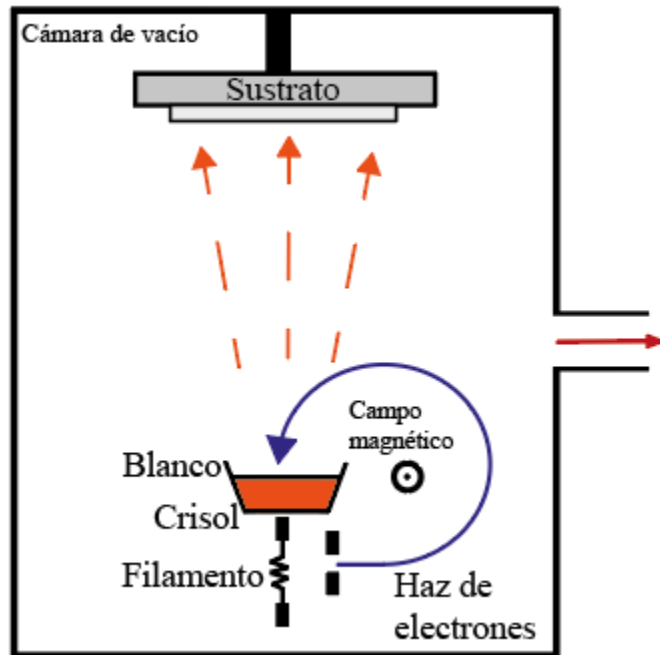


Figura 2.11. Imagen esquemática de la tecnología de un equipo de evaporación por haz de electrones.

2.4.1.4 Recubrimiento por rotación

El recubrimiento por rotación o *spin coating* es un procedimiento utilizado para la deposición de películas delgadas uniformes en sustratos planos. Destaca por su bajo costo, su simplicidad y su gran capacidad para recubrir de forma homogénea sustratos de gran área. Por ello, es una técnica utilizada en la fabricación de dispositivos semiconductores para la deposición de diferentes materiales, entre ellos la resina para los procesos de fotolitografía [54].

Su funcionamiento se basa en la dispersión de una solución líquida sobre un sustrato plano mediante la rotación del sustrato a alta velocidad. El material por depositar debe encontrarse en fase líquida; se deposita en el centro del sustrato con una micropipeta o un dispensador. Después, el sustrato es sometido a rotación a gran velocidad, generando una fuerza centrífuga que extiende el líquido hacia los bordes de manera uniforme, expulsando el exceso de material y formando una película delgada uniforme. Finalmente, la película alcanza su estado sólido por evaporación. En la Figura 2.12 se observa una imagen esquemática del proceso de *spin coating* [55], [56].

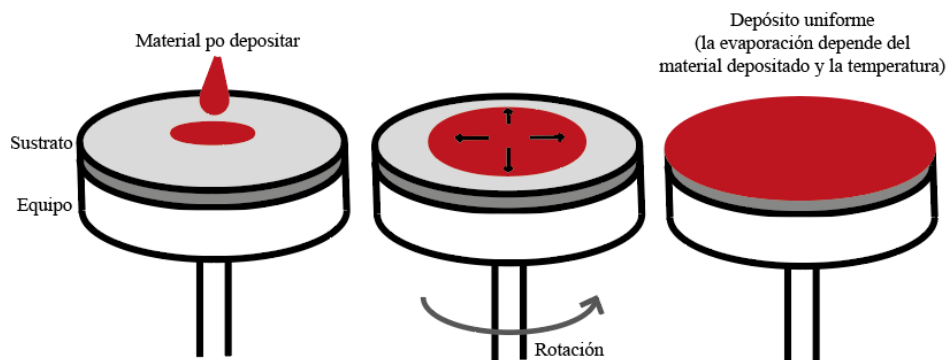


Figura 2.12. Imágenes esquemáticas del proceso de *spin coating*.

2.4.2 Tratamientos térmicos

2.4.2.1 Termolaminado

El termolaminado es una técnica utilizada para recubrir con una película polimérica como propileno, poliéster o PVC un sustrato, mediante la combinación de temperatura y rodillos de presión con el objetivo de mejorar la resistencia del sustrato o protegerlo de agentes corrosivos como la humedad, además de generar acabados brillantes u opacos dependiendo del polímero [57].

El proceso consiste en introducir el sustrato recubierto entre dos láminas poliméricas en una máquina laminadora. En la Figura 2.13 se muestra un ejemplo de una máquina termolaminadora comercial. Los rodillos calientes activan el adhesivo de las láminas uniendo uniformemente ambas capas mientras pasan entre los rodillos evitando la generación de burbujas, provocando que el sustrato se mantenga embebido [57].

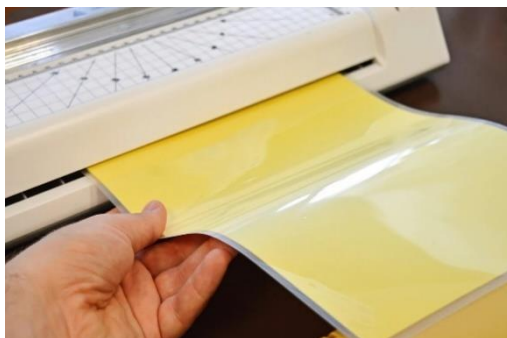


Figura 2.13. Fotografía representativa de un equipo de termolaminado comercial.

2.4.2.2 Recocido

El recocido térmico o *annealing* consiste en someter el material a un calentamiento controlado y posteriormente a enfriamiento bajo condiciones específicas como aire, oxígeno, atmosfera inerte o vacío. Este tratamiento genera una reorganización atómica, favoreciendo la cristalización de materiales amorfos y la eliminación de defectos, lo que conlleva a una mejora en la calidad del material tratado [58].

Existen diferentes técnicas para realizar el proceso, entre ellas el *hot-plate annealing*, que consiste en utilizar una placa calefactora como la que se muestra en la Figura 2.14. La muestra se coloca sobre una placa calefactora a una temperatura moderada, desde la temperatura ambiente hasta 200 °C; la temperatura máxima varía según el modelo de la placa calefactora. Algunas de las aplicaciones van desde su uso para la evaporación de solventes al utilizar métodos como *spin coating* o simplemente calentar soluciones [59].



Figura 2.14. Placa calefactora.

2.4.3 Métodos de manufactura avanzada

2.4.3.1 Impresión 3D

La impresión 3D es un proceso de fabricación aditiva que consiste en materializar un diseño realizado mediante un sistema diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés *Computer-Aided Design*) mediante la deposición controlada de un material en capas sucesivas. El tipo de material y su mecanismo de deposición varían dependiendo del equipo de impresión [60].

Existen diferentes técnicas de impresión 3D, entre ellas el modelado por deposición fundida (FDM) y la impresión por fotopolimerización en tanque (VPP). El FDM se basa en fundir filamentos poliméricos que se extruyen a través de una boquilla y se solidifican al enfriarse de forma natural. La boquilla se desplaza de manera continua a lo largo de tres ejes hasta completar la estructura, capa por capa. En la VPP se utilizan resinas que se solidifican fotoquímicamente. El proceso de impresión inicia con la solidificación de la primera capa sobre la placa de construcción; posteriormente, se solidifican las demás capas, apilándose una sobre otra hasta completar el modelo. Esta tecnología se utiliza en aplicaciones aeroespaciales, dentales, robóticas y microfluídicas. En la Figura 2.15 se muestran imágenes esquemáticas del funcionamiento de ambas tecnologías, FDM y VPP [60], [61].

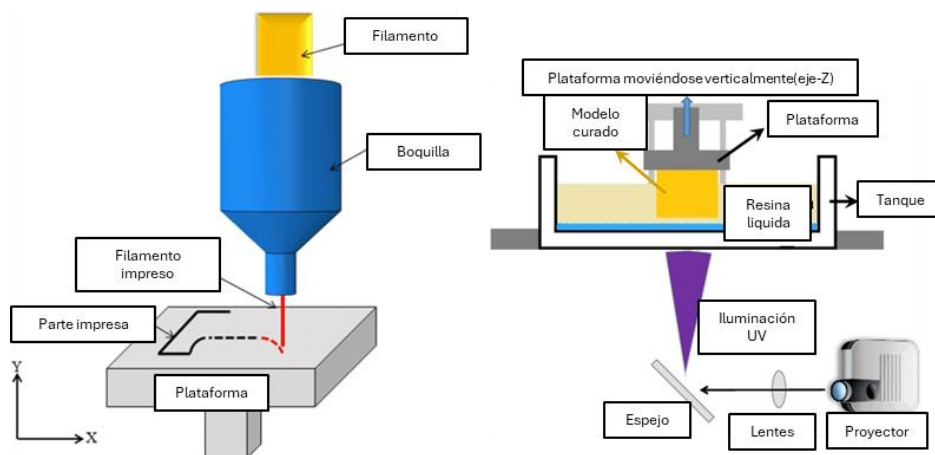


Figura 2.15. Imágenes esquemáticas del funcionamiento de un equipo de impresión 3D FDM (a) y de un equipo de impresión 3D VPP (b).

2.4.3.2 Micromaquinado

El maquinado por control numérico computarizado (CNC, por sus siglas en inglés *Computer Numerical Control*) es una técnica de manufactura sustractiva en la que el material se remueve de otra pieza sólida. Al igual que las impresiones 3D, el diseño puede realizarse a partir de un archivo CAD. Entre los materiales que pueden ser maquinados se encuentran diferentes metales y polímeros. Los pasos principales para maquinar una pieza son el diseño CAD, la conversión del diseño CAD a un programa CNC y la configuración del equipo [62].

Existen diferentes tipos de maquinado, como el de 3 ejes y el de múltiples ejes. En el maquinado de tres ejes, la pieza a maquinar se mantiene fija y el material se remueve mediante una herramienta de corte fija a un husillo, que puede moverse en tres ejes (x, y, z) o incluso girar a alta velocidad. En la Figura 2.16 se muestra una imagen de un equipo de maquinado CNC comercial. Algunos otros equipos utilizan láseres o plasma para remover el material, manteniendo el mismo mecanismo de movimiento [62].

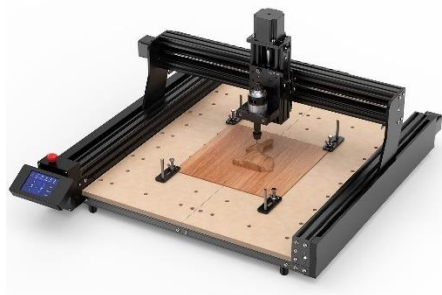


Figura 2.16. Equipo de maquinado CNC.

2.4.3.3 Fotolitografía

Es uno de los procesos fundamentales en la fabricación de dispositivos semiconductores, ya que permite transferir patrones geométricos de dimensiones nanométricas a un sustrato recubierto con una película delgada de resina fotosensible. Al exponer la resina fotosensible a radiación UV a través de una máscara con un patrón definido, su solubilidad se modifica debido a reacciones fotoquímicas. Cuando la resina fotosensible es positiva, las regiones expuestas a radiación UV se vuelven solubles en la solución reveladora y se eliminan, mientras que, con una resina fotosensible negativa, la radiación UV produce un efecto de

reticulación endureciendo la resina y generando que las zonas expuestas se vuelvan insolubles ante la solución reveladora. Finalmente, en ambos casos, la resina fotosensible genera una película protectora que permite grabar el material que se encuentra debajo de ella o depositar selectivamente otro material. El proceso puede dividirse en los pasos presentados a continuación [52], [53], [63].

1. Preparación del sustrato y depósito de resina fotosensible

Es necesario limpiar el sustrato para eliminar contaminantes y asegurar la adhesión y la uniformidad de la resina fotosensible al sustrato. La resina fotosensible se deposita mediante el método de *spin coating*. Al retirar el sustrato del equipo, se realiza un tratamiento térmico en una placa calefactora, con el propósito de eliminar los solventes residuales y mejorar la adherencia de la resina fotosensible al sustrato [52], [53], [63].

2. Exposición a la radiación UV

Este proceso puede llevarse a cabo mediante máscaras o por escritura directa, en la que el patrón se genera sobre el sustrato sin necesidad de una máscara. Los principios de ambos métodos se describen a continuación.

En la **fotolitografía con máscara**, el patrón a transferir se define previamente en una máscara compuesta por un sustrato transparente con un diseño que bloquea la luz. Al exponer la máscara a la radiación UV, esta atraviesa las regiones transparentes e incide sobre la resina fotosensible. Este proceso es ideal para la producción a gran escala de circuitos integrados ya que mantiene alta reproducibilidad, sin embargo, limita los cambios en el diseño, ya que estos requerirían de la fabricación de una nueva máscara [52].

Por otro lado, la **fotolitografía de escritura directa** elimina la necesidad del uso de máscaras ya que el patrón diseñado se transfiere directamente a la resina fotosensible mediante el enfoque de un haz de radiación UV, ofreciendo flexibilidad en cuanto a la modificación de los diseños, por lo que es útil para la fabricación de prototipos y en aplicaciones de investigación. Sin embargo, a pesar de su flexibilidad, es un proceso lento en comparación a la fotolitografía con máscaras [52], [63].

En cualquiera de los dos casos, la radiación UV reacciona con la resina fotosensible, dependiendo de su tipo (positiva o negativa) [52], [53], [63].

3. Revelado

Después de exponer la muestra a radiación UV, esta se sumerge en una solución reveladora, en donde al utilizar una resina fotosensible positiva, las regiones expuestas se disuelven, mientras que, con una resina fotosensible negativa, se disuelven las regiones no expuestas [52].

4. Definición del patrón

El patrón generado con la resina fotosensible sobre el sustrato actúa como una máscara temporal que permite eliminar selectivamente el material mediante grabado húmedo o seco, o depositar selectivamente otro material en las regiones no recubiertas.

Una vez que la resina fotosensible cumplió su función, es posible eliminar los residuos mediante métodos químicos, con soluciones específicas que disuelven la resina, o mediante métodos físicos, como el plasma.

El proceso en el que se deposita una película de material sobre la resina fotosensible previamente definida y posteriormente se elimina la resina, permitiendo definir la película sin necesidad de un atacante químico, se conoce como *lift-off*. En la Figura 2.17 se observan imágenes esquemáticas del proceso de fotolitografía con máscara [52], [53], [63].

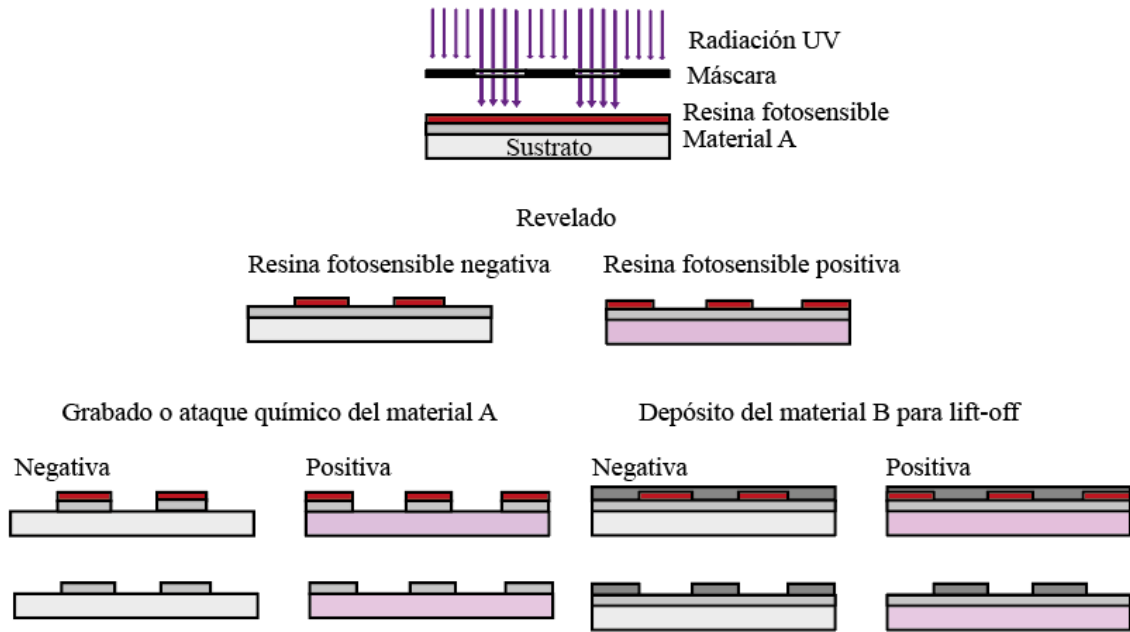


Figura 2.17. Imágenes esquemáticas del proceso básico de fotolitografía con máscara, omitiendo los tratamientos térmicos, para el ataque de un material A o la deposición de un material B en regiones definidas de acuerdo con el patrón de la máscara y el tipo de resina fotosensible.

2.5 Técnicas de caracterización estructural y espectroscópica

2.5.1 Difracción de rayos X

La interacción de los rayos X con los átomos de un cristal genera patrones de difracción característicos de cada estructura cristalina. Por ello, la difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés *X-Ray Diffraction*) es una técnica ampliamente utilizada en la caracterización de materiales. Es una técnica no destructiva que permite obtener información sobre estructuras, fases, orientaciones cristalinas y parámetros estructurales, tales como el tamaño medio de grano, el grado de cristalinidad, la deformación y la presencia de defectos cristalinos [64].

Los rayos X se generan en un tubo de rayos catódicos con ánodo metálico, se filtran para obtener radiación monocromática, se coliman para concentrar el haz y se dirigen a la muestra a un ángulo determinado. Al interactuar la muestra con el rayo incidente, se genera una

interferencia constructiva y un haz difractado cuando se cumplen las condiciones descritas por la ley de Bragg, Ecuación (2) [12].

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2)$$

En donde n es el orden de reflexión que corresponde a un número entero, λ la longitud de onda de la radiación incidente, d la distancia interplanar y θ el ángulo de difracción (Figura 2.18). Esta ley relaciona la longitud de onda de los rayos X, la geometría cristalina y el ángulo de incidencia para que ocurra una interferencia constructiva [64].

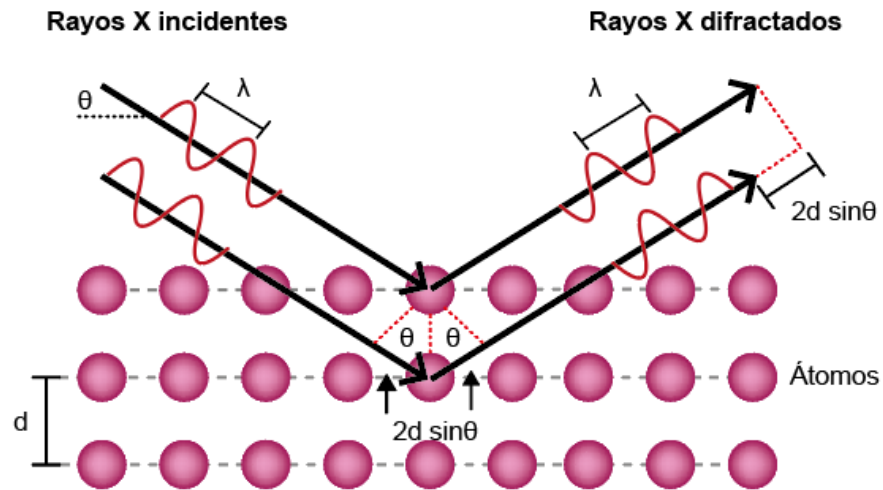


Figura 2.18. Representación esquemática de la ley de Bragg.

En un cristal, cada átomo dispersa el haz de rayos X incidente en múltiples direcciones. Debido a que los átomos se encuentran en un arreglo ordenado y periódico, las ondas dispersas pueden interferir de manera constructiva. Ningún material cristalino presenta patrones de difracción idénticos al considerar la dirección y la intensidad de todos los haces difractados, por lo que estos patrones son considerados una huella digital única de cada material [65].

2.5.2 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscopy*) es una técnica no destructiva de análisis que proporciona información morfológica de los materiales. Su principio de funcionamiento se basa en un haz de electrones focalizado que barre la superficie de una muestra ubicada dentro de una cámara de vacío. Durante el barrido, la interacción entre los átomos del material con el haz de electrones produce distintas señales que son recolectadas por los detectores. La intensidad de estas señales modula cada píxel de la imagen, lo que permite reconstruir una imagen de alta resolución (orden nanométrico) al combinar todas las señales recolectadas, en la Figura 2.19 se observan imágenes esquemáticas del funcionamiento de un sistema SEM [66].

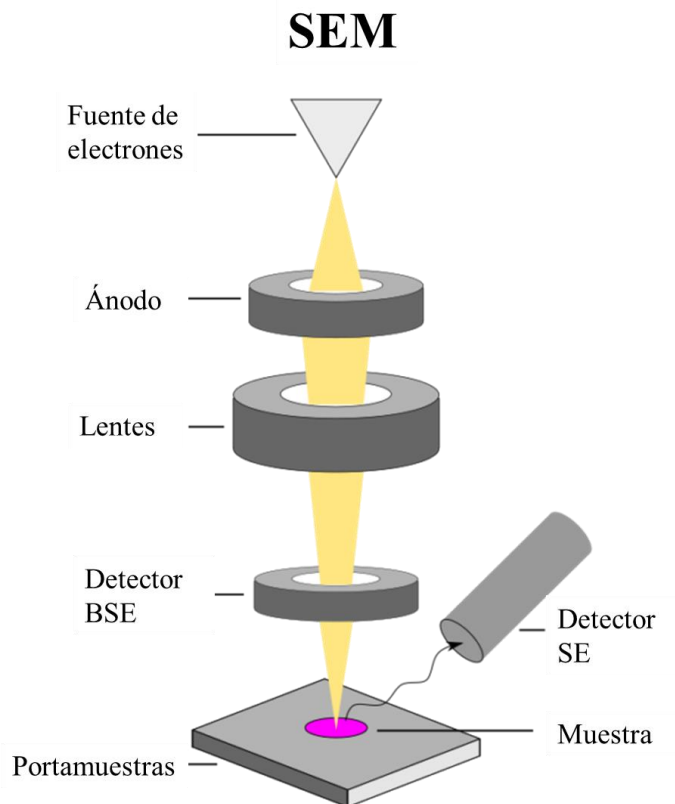


Figura 2.19. Imágenes esquemáticas del funcionamiento de un sistema SEM.

2.5.3 Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía

La espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS, por sus siglas en inglés *Energy-Dispersive Spectroscopy*) es una técnica utilizada para analizar la composición elemental de una muestra. Los electrones de las capas internas del átomo son excitados y expulsados por electrones incidentes, los cuales pueden generarse con un microscopio electrónico de barrido o con un microscopio electrónico de transmisión (TEM). Cuando se produce la vacante en un nivel interno, esta se ocupa por un electrón proveniente de un nivel de energía superior. Durante la transición, se emite un fotón de rayos X característico. La energía del fotón corresponde a la diferencia entre los dos niveles de energía y es característica de cada elemento, por lo que es posible identificar y cuantificar los elementos presentes en la muestra a través de los picos de energía obtenidos en el espectro [66].

2.5.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés *Fourier Transform Infrared*) es una técnica utilizada para determinar la composición cualitativa y cuantitativa de especies moleculares por medio de la absorción y reflexión de la radiación infrarroja, permitiendo analizar gases, líquidos y sólidos [67].

Las aplicaciones de la espectrometría en el infrarrojo se dividen en tres regiones espectrales, infrarrojo cercano ($14\,000$ a $4\,000\text{ cm}^{-1}$), infrarrojo medio ($4\,000$ a 670 cm^{-1}) e infrarrojo lejano (670 a 15 cm^{-1}). La más utilizada es la región de infrarrojo medio, ya que los instrumentos diseñados para esta región ofrecen mayor rendimiento y resoluciones más altas, permitiendo la obtención de información estructural más precisa de los materiales. En la Figura 2.20 se muestra una imagen de un equipo de espectroscopía FTIR [67].



Figura 2.20. Equipo de espectroscopía FTIR.

2.5.5 Espectroscopía ultravioleta-visible

La espectroscopía UV-Vis es una técnica óptica utilizada para el análisis cualitativo y cuantitativo de materiales; se basa en la absorción, transmitancia o reflectancia de la radiación electromagnética en el rango de 200 a 800 nm. La absorción de los fotones con la materia promueve transiciones electrónicas desde los orbitales de menor energía hacia los orbitales de mayor energía, permitiendo determinar el ancho de E_g de un material, en la Figura 2.21 se observa un equipo de espectroscopía UV-Vis [68].



Figura 2.21. Equipo de espectroscopía UV-Vis.

El principio de la técnica consiste en la medición de la intensidad de luz transmitida a través de una muestra y su comparación con la intensidad incidente, permitiendo el cálculo de la absorbancia a través de la ley de Beer-Lambert, Ecuación (3).

$$A = \epsilon cl \quad (3)$$

En donde A es la absorbancia, ε el coeficiente de extinción molar, c es la concentración de la especie absorbente y l la longitud de paso óptico [68].

2.5.6 Elipsometría

Es una técnica óptica no destructiva que se basa en la medición de los cambios en el estado de polarización de la luz tras reflejarse en la superficie de una muestra, mediante la determinación de los parámetros elipsométricos (Ψ y Δ), que describen la variación relativa entre las componentes paralela (p) y perpendicular (s) del haz incidente. Por lo que, a partir de estas magnitudes, es posible determinar el índice de refracción (n), el coeficiente de extinción (k) y en películas delgadas, su espesor, en la Figura 2.22 se muestra la imagen de un elipsómetro espectroscópico [69].



Figura 2.22. Elipsómetro espectroscópico.

2.6 Caracterización eléctrica de dispositivos fotodetectores

Existen diferentes tipos de dispositivos fotodetectores; algunos se describen en la Tabla 2.2. En la caracterización eléctrica de los dispositivos, es importante considerar diversas variables experimentales. La señal detectada es el valor de corriente que se obtiene al incidir una radiación sobre el dispositivo, este valor depende del voltaje de polarización aplicado V , la frecuencia de modulación f , la longitud de onda λ , la potencia de radiación incidente Φ_e , el área activa del semiconductor A_d y de la temperatura T [70].

Tabla 2.2. Tipos de fotodetectores y sus características principales.

Tipos de fotodetectores	Características
Fotoconductivos (intrínsecos y extrínsecos)	Incrementan su conductividad debido a la generación de portadores de carga libres al incidir una radiación sobre el semiconductor. Su respuesta espectral depende principalmente de la E_g del semiconductor.
Fotodiodo de unión p–n	Cuando los fotones con energía superior a la E_g del semiconductor inciden sobre el dispositivo, se generan pares electrón–hueco en las regiones neutras de la unión; los portadores generados dentro de la longitud de difusión desde la unión alcanzan la región de carga espacial por difusión, donde son separados por un campo eléctrico, generando una fotocorriente.
Fotodiodo Schottky Metal–Semiconductor	La interfaz metal–semiconductor genera una barrera de potencial que separa los pares electrón–hueco generados. La generación de los pares puede ocurrir tanto en la región neutra como en la región de carga espacial del dispositivo.

2.6.1 Curvas I–V

Las curvas de corriente-voltaje (I–V) son indispensables en la determinación del comportamiento eléctrico de los dispositivos semiconductores bajo diferentes condiciones. Su análisis permite evaluar e identificar parámetros clave, como la resistencia y el umbral de conducción, así como el tipo de contacto semiconductor–metal (óhmico o Schottky). En los dispositivos fotodetectores, es indispensable obtener las curvas bajo iluminación de una radiación electromagnética y en completa oscuridad con el fin de determinar su selectividad y ganancia [70], [71].

Las curvas I–V se pueden obtener utilizando un trazador de curvas I–V o mediante un amperímetro en serie con una fuente de voltaje, o con un voltímetro y una fuente de corriente como se muestra en la Figura 2.23. Estas mediciones también se pueden realizar utilizando una unidad de medición y fuente (SMU, por sus siglas en inglés *Source Measure Unit*) como el de la Figura 2.24, la cual permite aplicar voltajes o corrientes controlados y precisos,

registrando simultáneamente la respuesta eléctrica del dispositivo, simplificando la obtención de las curvas con alta resolución [72].

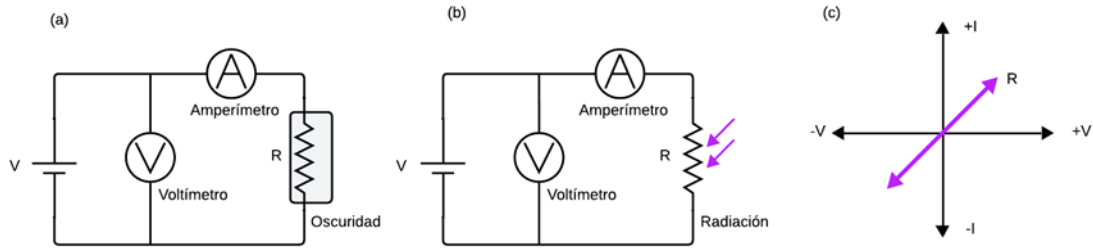


Figura 2.23. Circuito para obtener la curva I–V (suministrar corriente, medir voltaje) del dispositivo en oscuridad (a), bajo incidencia de radiación (b), y ejemplo de curva I–V.



Figura 2.24. Imagen de un equipo de medición y fuente “Model 2450 SourceMeter SMU Instrument – Keithley”.

En dispositivos fotosensibles, las curvas I–V deben obtenerse en completa oscuridad para establecer un valor base. Posteriormente, la fotocorriente se mide con el mismo circuito, pero sometiendo el dispositivo a una fuente de radiación con parámetros controlados, como fuentes con longitudes de onda específicas para determinar la respuesta espectral del dispositivo [70], [71].

2.6.2 Corriente en oscuridad

Se refiere al flujo de corriente que circula por el dispositivo en ausencia de radiación incidente. Su valor es un indicador importante para determinar la calidad del material semiconductor, de las uniones formadas y del dispositivo en general, ya que una alta corriente en oscuridad puede deberse a imperfecciones estructurales en el material o a conducciones parásitas a través de los contactos metálicos. Por lo tanto, es recomendable una baja corriente en oscuridad.

2.6.3 Fotocorriente

Es la diferencia de corriente de un dispositivo al incidir una radiación, menos su corriente en condiciones de oscuridad Ecuación (4). Esta corriente adicional se genera por la absorción de fotones y la formación de pares electrón–hueco en el material semiconductor. Su valor refleja la eficiencia de conversión fotónica del dispositivo y permite determinar su capacidad de detección.

$$\text{Fotocorriente} = I_{\text{iluminación}} - I_{\text{oscuridad}} \quad (4)$$

2.6.4 Respuesta temporal

Es fundamental conocer la velocidad de trabajo de los dispositivos, particularmente, de los fotodetectores. La determinación de su respuesta a los cambios de iluminación se obtiene al encender y apagar la fuente de iluminación a una frecuencia determinada, lo que permite conocer los tiempos de subida (*rise time*) y de bajada (*fall time*) de la señal generada.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

“Lo que no puedo crear, no lo entiendo.”

— *Richard Feynman*

3.1 Síntesis y caracterización del nanopolvo de ZnO por coprecipitación

3.1.1 Síntesis por coprecipitación

La síntesis del ZnO se realizó utilizando acetato de zinc deshidratado [$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$], el cual se disolvió en agua desionizada (DI) para obtener Zn^{2+} a una concentración de 0.5 M. El pH de la solución se ajustó a 14 con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M, agregando una gota cada 7 segundos, manteniendo la solución en agitación constante. Se filtraron de la solución madre los precipitados de hidróxido de zinc [$\text{Zn}(\text{OH})_2$] formados. El $\text{Zn}(\text{OH})_2$ se lavó repetidamente con alcohol y agua DI y, posteriormente, se secó a 80 °C durante 12 horas. Finalmente, el $\text{Zn}(\text{OH})_2$ seco se calcinó a 400 °C durante 2 horas, obteniéndose así el ZnO.

3.1.2 Caracterización estructural, composicional y óptica

El equipo utilizado para obtener la morfología del nanopolvo fue un SEM (FE–SEM Lyra 3 XMU) equipado con un EDS. El voltaje de aceleración para la obtención de imágenes SEM fue de 10 kV a una distancia de 9 mm. Se obtuvo la composición química cualitativamente mediante EDS, utilizando las mismas condiciones que en SEM, con un tiempo de adquisición de 1 minuto.

En la Figura 3.1 se muestra la morfología del nanopolvo, donde se observa la formación de aglomeraciones constituidas por partículas de 20 a 50 nm. En la Figura 3.2 se presenta el espectro EDS del nanopolvo de ZnO, donde se identifican algunos de los picos característicos más intensos correspondientes al O y al Zn, asociados a las líneas espectrales $K\alpha$ y $L\alpha$. Asimismo, no se observó la contribución de contaminantes en el espectro, por lo que se delimitó al intervalo de energía de 0.4 a 1.4 keV.

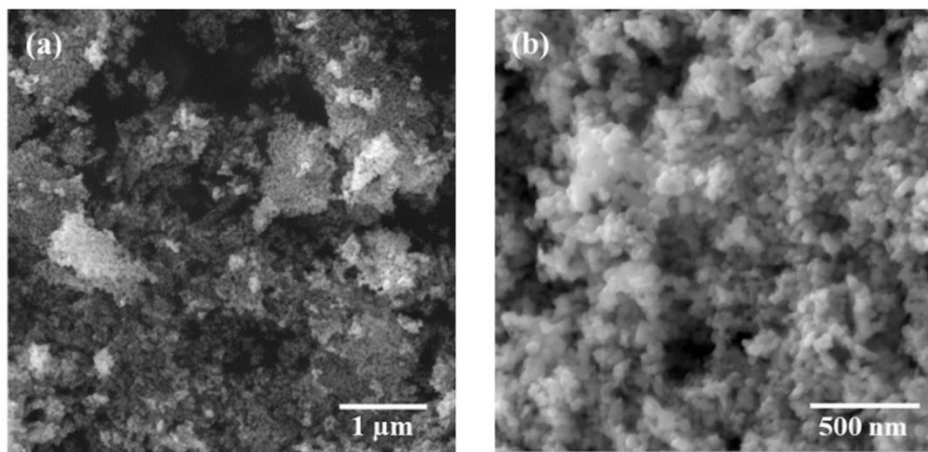


Figura 3.1. Imágenes SEM del nanopolvo de ZnO a magnificaciones de (a) 40× y (b) 100×.

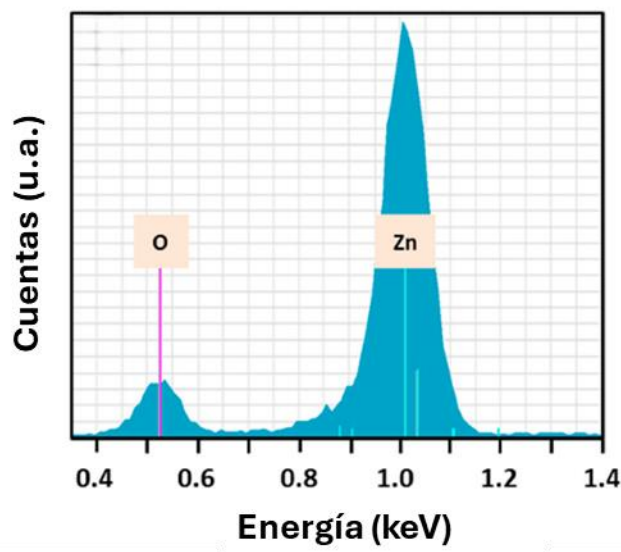


Figura 3.2. Espectro EDS del nanopolvo de ZnO.

El equipo utilizado para obtener la información cristalográfica y estructural mediante XRD fue un difractómetro PANalytical Empyrean con una fuente de radiación Cu K α ($\lambda = 0.15406$ nm) y un detector de tiempo real multi-pass X'Celerator. El nanopolvo se escaneó en 2θ en el rango de 20 a 80°. En la Figura 3.3 se muestran los patrones obtenidos del ZnO con picos a 2θ de 31.9°, 34.5°, 36.35°, 47.6°, 56.6°, 62.9°, 66.4°, 67.9°, 69.2°, 72.6° y 77.0°, correspondientes a los planos (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201),

(004) y (202). Los cuales coinciden con los picos de una estructura wurtzita con fase hexagonal.

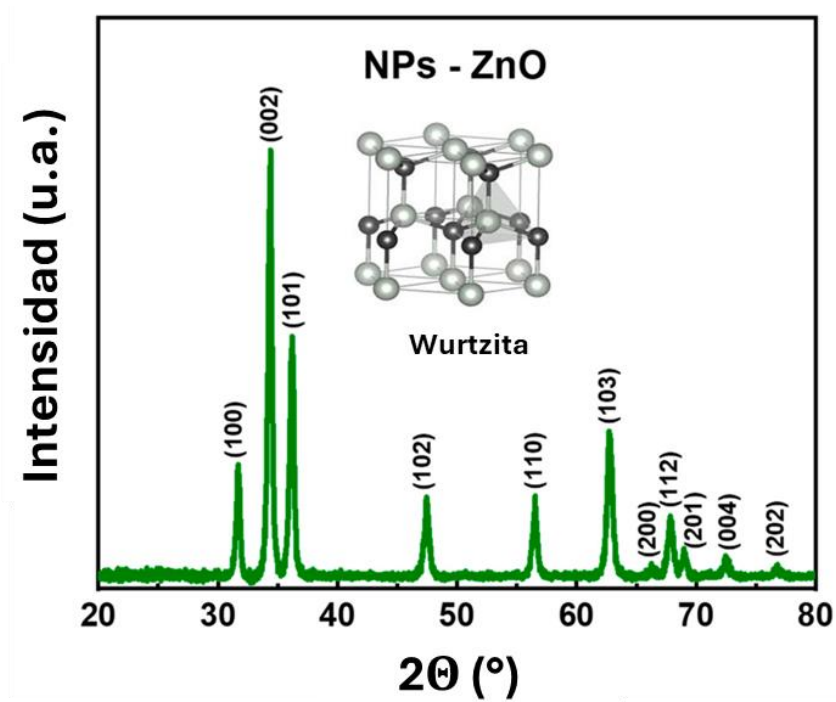


Figura 3.3. Patrones de difracción del nanopolvo de ZnO.

Se utilizó la Ecuación de Scherrer (5) para determinar el tamaño de cristalito del nanopolvo de ZnO (Tabla 3.1), en donde D es el tamaño del cristalito, λ es la longitud de onda del rayo X, β es la anchura a media altura y θ es el ángulo de Bragg en radianes.

$$D = \frac{0.89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5)$$

Tabla 3.1. Tamaño de cristalito de ZnO obtenido mediante la ecuación de Scherrer.

$2\theta(^{\circ})$	β	(hkl)	Dimensión del cristalito (nm)
34.39	0.387	(002)	~21.2

El espectro FTIR se obtuvo en un rango de 500 a 4000 cm^{-1} utilizando un FTIR Frontier en modo de atenuación total. Como resultado, el espectro reveló un pico a 510 cm^{-1} (Figura 3.4), correspondiente al modo vibracional de estiramiento de Zn–O. Además, no se observó absorción en el rango de 3200 a 3650 cm^{-1} , lo que indica la ausencia de grupos O–H en el material.

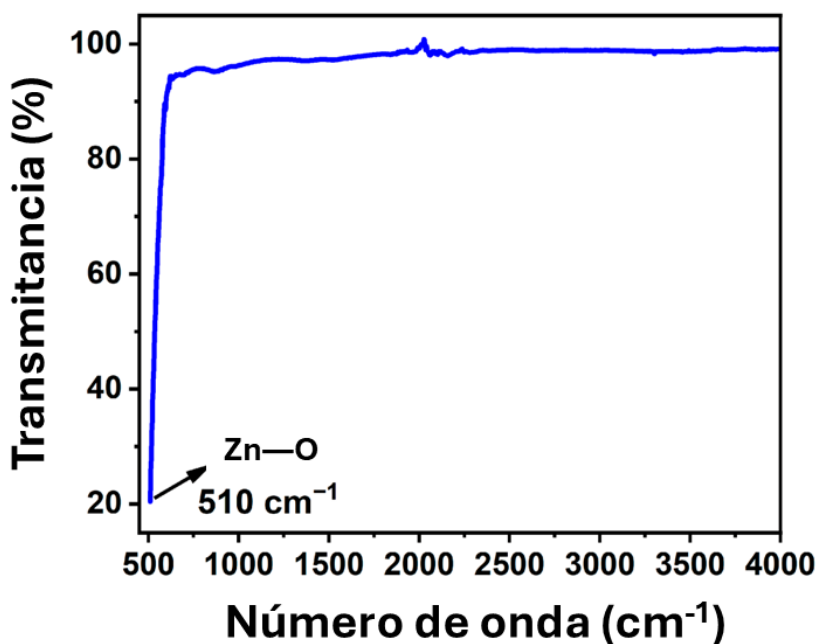


Figura 3.4. Espectro FTIR del nanopolvo de ZnO.

El espectro de absorción UV-Vis se midió en un rango de 300 a 800 nm utilizando un equipo Cary model 50 espectrometer, el espectro obtenido se muestra en la Figura 3.5.

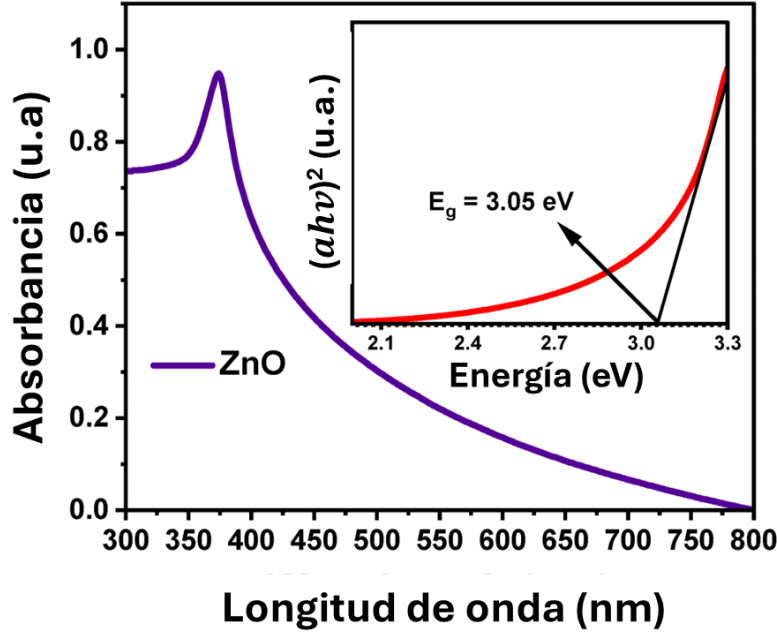


Figura 3.5. Espectro UV-Vis del nanopolvo de ZnO y E_g determinada por el modelo de Tauc.

Para estimar la E_g del material se emplearon el espectro de absorción y el método de Tauc, que relaciona la E_g con el coeficiente de absorción mediante la Ecuación (6), donde $h\nu$ es la energía del fotón y n es un número que depende de la naturaleza de las transiciones electrónicas responsables de la absorción. El ZnO es un semiconductor de banda directa por lo que n es igual a 2 y E_g se determina ajustando la parte lineal de la dependencia $(\alpha h\nu)^2$ contra $h\nu$ extrapolando hasta el eje de energía como se muestra en el recuadro de la Figura 3.5 en donde se obtuvo una E_g de aproximadamente 3.05 eV.

$$\alpha h\nu = B[(h\nu - E_g)]^n \quad (6)$$

3.2 Fabricación de fotodetector termolaminado

El dispositivo se fabricó utilizando dos rectángulos de polímero con dimensiones de 40×20 mm. Al primer rectángulo (polímero 1) se le realizó un desbaste con micromaquinado CNC en el centro con dimensiones de $4.6 \times 3.9 \times 0.04$ (x, y, z) mm, al segundo rectángulo (polímero 2) se le realizaron dos cortes cuadrados alineados concéntricos a los contactos metálicos de 2×2 mm. Se diseñaron dos contactos metálicos mediante un

software CAD. Posteriormente, una lámina delgada de Cu fue cortada según los diseños mediante micromaquinado CNC. En la Figura 3.6 se muestra una imagen esquemática de las dimensiones empleadas en el diseño de ambos contactos.

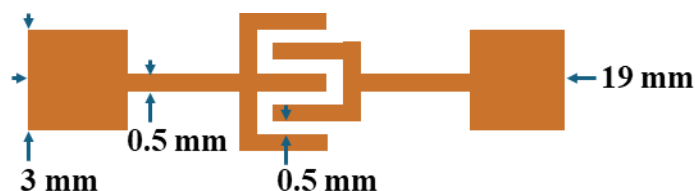


Figura 3.6. Imagen esquemática de las dimensiones en mm de los contactos de Cu del dispositivo.

Después, al primer rectángulo (polímero 1) se le añadió nanopolvo de ZnO sobre el desbaste. Se colocaron los contactos de Cu con los dedos entrelazados a una distancia de 0.5 mm entre sí y, finalmente, se colocó el segundo rectángulo (polímero 2), como se observa en la Figura 3.7. Una vez colocados los materiales, se introdujo el dispositivo en una termolaminadora a 120 °C.

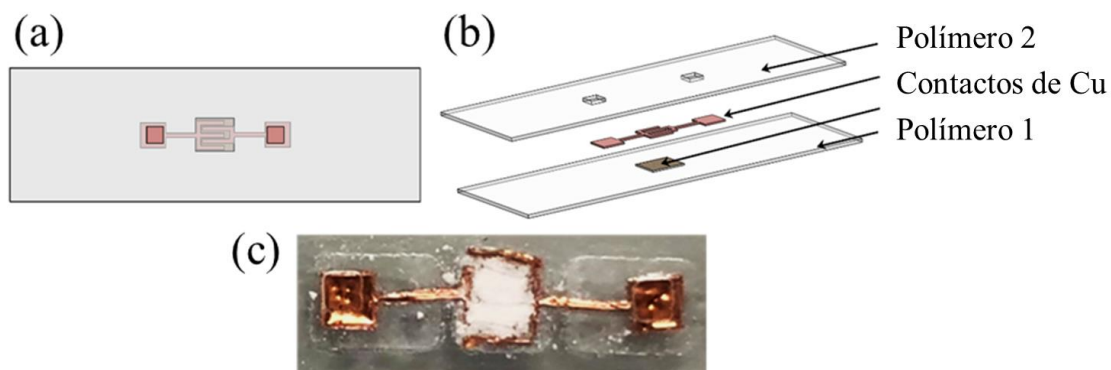


Figura 3.7. (a) Vista superior del diseño del fotodetector. (b) Imagen esquemática del acomodo de los materiales empleados en la fabricación del fotodetector. (c) Imagen real de dispositivo fabricado.

3.3 Fabricación de fotodetectores encapsulados en PDMS

3.3.1 Caracterización óptica del PDMS

Con el objetivo de identificar los grupos funcionales característicos del PDMS, se obtuvo su espectro FTIR en modo de atenuación total. En la Figura 3.8 se observa el espectro obtenido, delimitado en el rango de 600 a 3100 cm^{-1} . La señal en 2962 cm^{-1} se asocia al estiramiento C-H de los grupos metilo (Si-CH_3). Las señales observadas en 2162 cm^{-1} y alrededor de 2026 cm^{-1} se asocian con grupos Si-H, lo que indica la presencia de un agente reticulante residual en la muestra. La señal en 1258 cm^{-1} está asociada a la deformación de los grupos Si-CH_3 ; la banda entre 1090 y 1010 cm^{-1} corresponde al estiramiento asimétrico Si-O-Si, característico del PDMS. Las bandas entre 840 y 790 cm^{-1} corresponden al modo *rocking* de los grupos CH_3 y al estiramiento de Si-C y de Si-CH_3 .

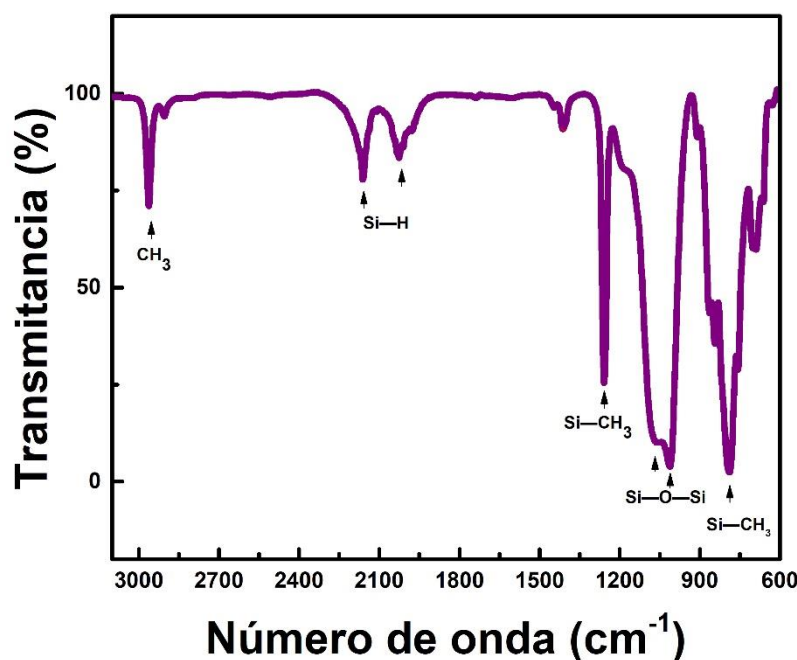


Figura 3.8. Espectro FTIR en modo de transmitancia de PDMS su reticulación (Sylgard 184).

En la Figura 3.9, se observa el espectro UV-Vis en un rango de 250 a 800 nm de una muestra de PDMS reticulada obtenido mediante un elipsómetro espectroscópico de ángulo variable (VASE, por sus siglas en inglés, *Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry*) de J.A. Wollam

Co. La región sombreada en morado comprende entre 320 y 400 nm, una región de mayor interés para la aplicación del PDMS como material de encapsulamiento del dispositivo. El espectro confirma una alta transparencia óptica en la región de interés y en el rango visible.

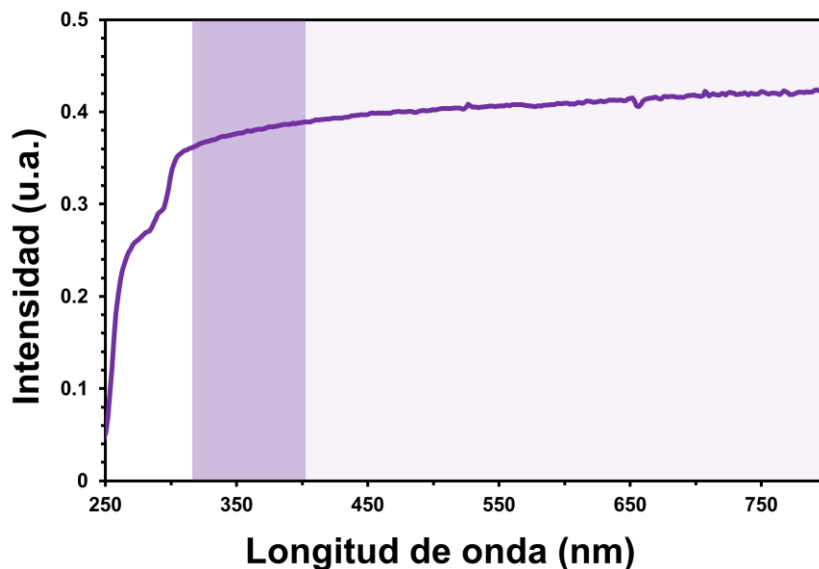


Figura 3.9. Espectro de transmisión (UV-Vis/VASE) del PDMS.

3.3.2 Pruebas de adhesión del PDMS

Se realizaron nueve moldes con dimensiones de $30 \times 30 \times 10$ mm en los cuales se vertió 1.5 g de PDMS sin reticular. Los moldes se dividieron en tres secciones (M1, M2 y M3) como se muestra en la Figura 3.10. A los moldes se les vertió la segunda capa de PDMS de acuerdo con la Tabla 3.2.



Figura 3.10. Moldes para pruebas de adhesión.

Tabla 3.2. Tiempo en el que se añadió la segunda capa de PDMS y la cantidad de PDMS añadida en gramos.

Tiempo (h)	M1	M2	M3
0	1.5 g	1.5 g	1.5 g
12	1.5 g		
36		1.5g	
84			1.5

El PDMS se reticuló a temperatura ambiente durante un periodo de 7 días. Las muestras reticuladas presentaron dimensiones de $30 \times 30 \times 4$ mm. Se realizaron pruebas de flexión con un radio de curvatura de 5 mm en cada una de las muestras (Figura 3.11). Todas las muestras fueron sometidas a 200, 400, 600, 800 y 1000 ciclos de flexión, acumulando un total de 3000 ciclos. A partir de estas pruebas, se comprobó la fuerte adhesión del PDMS al añadir en una capa de PDMS sin reticular sobre otra capa en diferentes etapas de reticulación.

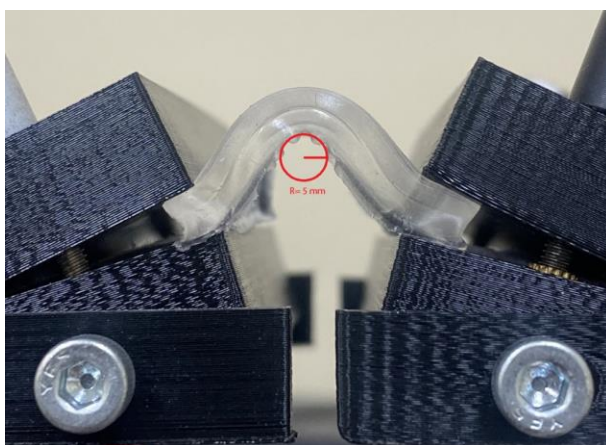


Figura 3.11. Prueba de flexión con radio de 5 mm.

3.3.3 Fabricación de contactos de Cu

Para la definición de los contactos metálicos, se utilizó una hoja de Cu a la cual se le realizó el siguiente procedimiento de acuerdo con la Figura 3.12:

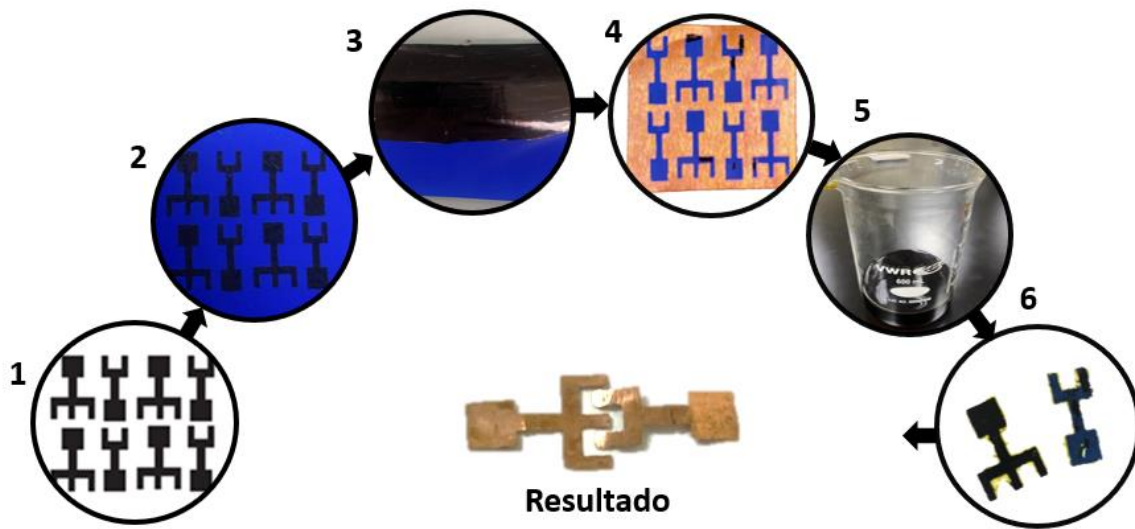


Figura 3.12. Proceso de fabricación de contactos de Cu.

1. Se realizó el diseño de los contactos utilizando un software CAD especializado en diseño gráfico profesional para generar los diseños con las dimensiones deseadas.
2. Se imprimieron los diseños en una hoja de transferencia con una impresora láser.
3. Al reverso de la hoja de transferencia se aplicó marcador permanente. Se colocó una lámina de Cu sobre el lado con el diseño impreso y ambas hojas se colocaron en una placa calefactora a 200 °C durante 5 minutos.
3. Se dejaron reposar las hojas durante algunos minutos y después se desprendió la hoja de transferencia, como resultado, el diseño de los contactos se transfirió a la hoja de Cu.
4. Se colocó la hoja de Cu en una solución de FeCl_3 y H_2O (2:1) durante 3 minutos, bajo agitación constante, para eliminar las zonas de Cu expuestas.
5. Los contactos definidos se enjuagaron con agua DI. Después, se realizó una limpieza ultrasónica con isopropanol (IPA), acetona y agua DI. Finalmente, se obtuvieron los contactos que se muestran en la Figura 3.13, donde se observan sus respectivas dimensiones obtenidas con un microscopio digital.

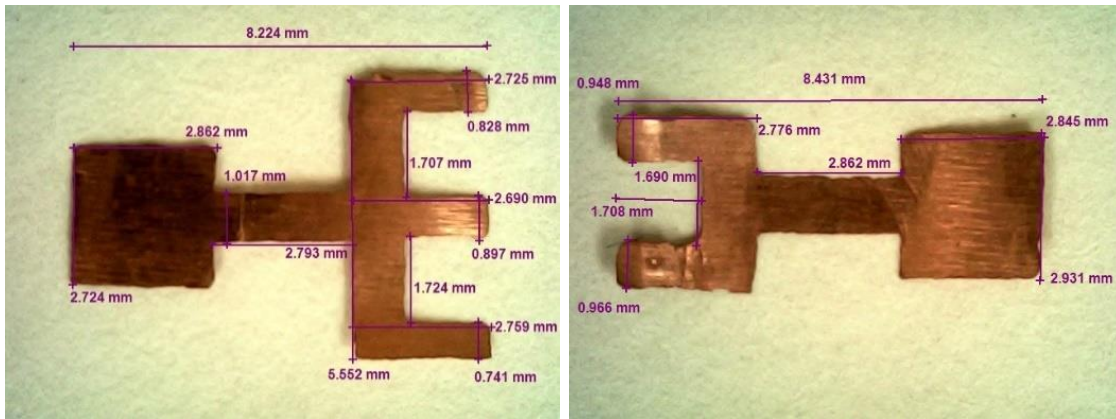


Figura 3.13. Contactos de Cu con dimensiones.

3.3.4 Fabricación de moldes para PDMS

Se diseñaron dos moldes utilizando un software CAD especializado en modelado 3D con las dimensiones que se muestran en la Figura 3.14.

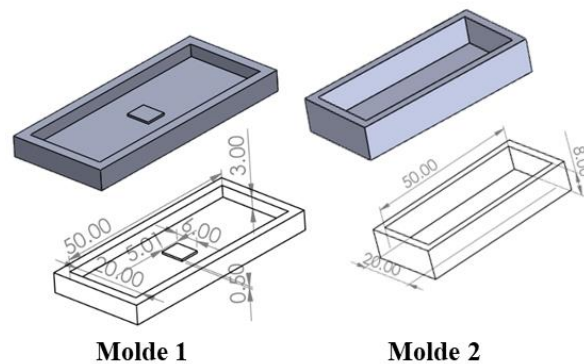


Figura 3.14. Modelos 3D de moldes con dimensiones en mm.

Se utilizó una impresora ELEGOO Mars con resina fotopolimerizable para fabricar los moldes. Una vez impresos, los moldes se sometieron a radiación UV para asegurar su fotopolimerización.

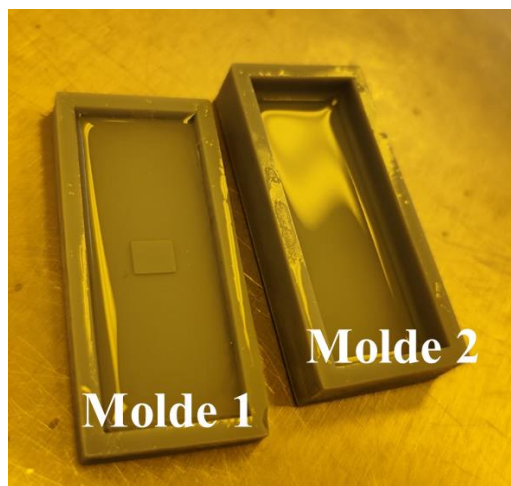


Figura 3.15. Moldes para verter PDMS fabricados mediante impresión 3D.

3.3.5 Ensamble de los materiales

Primero, se mezcló PDMS Sylgard 184 en una proporción de 10:1 (base:agente reticulante). La mezcla se dejó reposar unos minutos para favorecer la eliminación de burbujas. Posteriormente, se fabricaron dos dispositivos iguales siguiendo dos procedimientos diferentes para su encapsulamiento con PDMS.

Para el primero se vertieron 2 g de la mezcla en los moldes 1 y 2. Se colocaron en un horno a 80 °C durante 2 horas. Generando dos rectángulos de PDMS reticulados, uno con un pequeño “pozo” y otro completamente liso. En el rectángulo con pozo se colocó nanopolvo de ZnO. Después se colocaron los contactos de Cu centrados sobre el nanopolvo. Se vertió una fina capa de PDMS no reticulado alrededor del pozo y se colocó el rectángulo reticulado del molde 2, alineado sobre el primero. El ensamble se colocó en un horno durante 2 horas a 80 °C.

Para el segundo, se vertió PDMS en el Molde 1 y se llevó al horno durante 2 horas a 80 °C. Una vez reticulado, se retiró el rectángulo de PDMS del molde 1 y se colocó dentro del molde 2 con el pozo hacia arriba. Se añadieron nanopolvos de ZnO en el pozo y se colocaron los contactos de Cu centrados. Una vez alineados, se vertió PDMS sin reticular y se colocó en el horno durante 2 horas a 80 °C. Finalizado el tiempo, se retiró el dispositivo del molde 2. En la Figura 3.16 se observan ambos resultados.

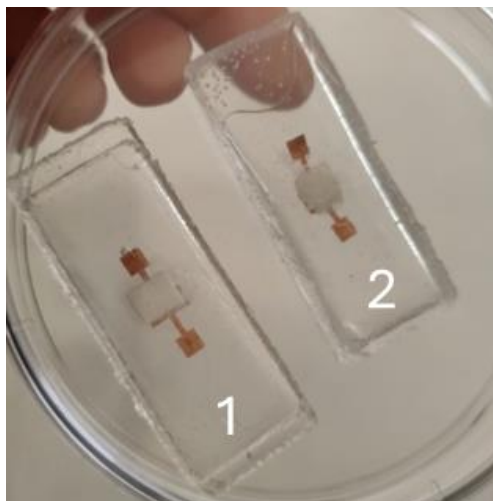


Figura 3.16. Dispositivos fabricados mediante encapsulación con PDMS.

3.4 Fabricación de fotodetectores de película delgada mediante fotolitografía

3.4.1 Diseño asistido por computadora de los dispositivos

Los dispositivos se diseñaron con un software CAD especializado en el diseño de máscaras fotolitográficas para microfabricación, que permite definir con precisión las distintas capas de los dispositivos. En la Figura 3.17 se muestra el diseño completo, en el que cada color representa un material o una capa distinta. El color azul corresponde al Al, el gris al ZnO, el morado al óxido de plata (AgO), al titanio (Ti) y al Au. En el centro del diseño se identifican las marcas de alineación, fundamentales para garantizar la superposición entre las capas en los procesos de fotolitografía. El arreglo de los dispositivos diseñados se organizó dentro de un recuadro de 16×16 mm.

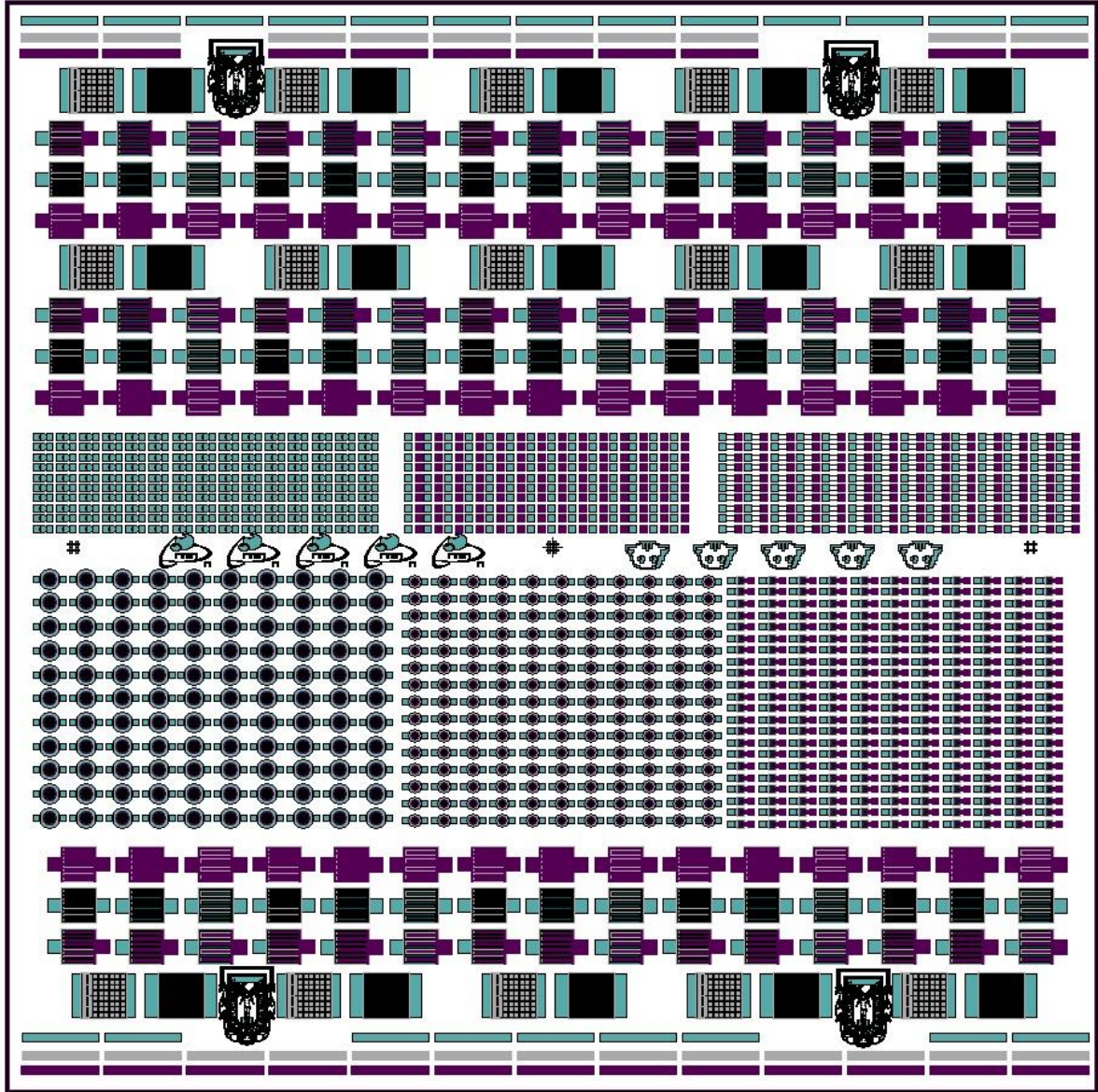
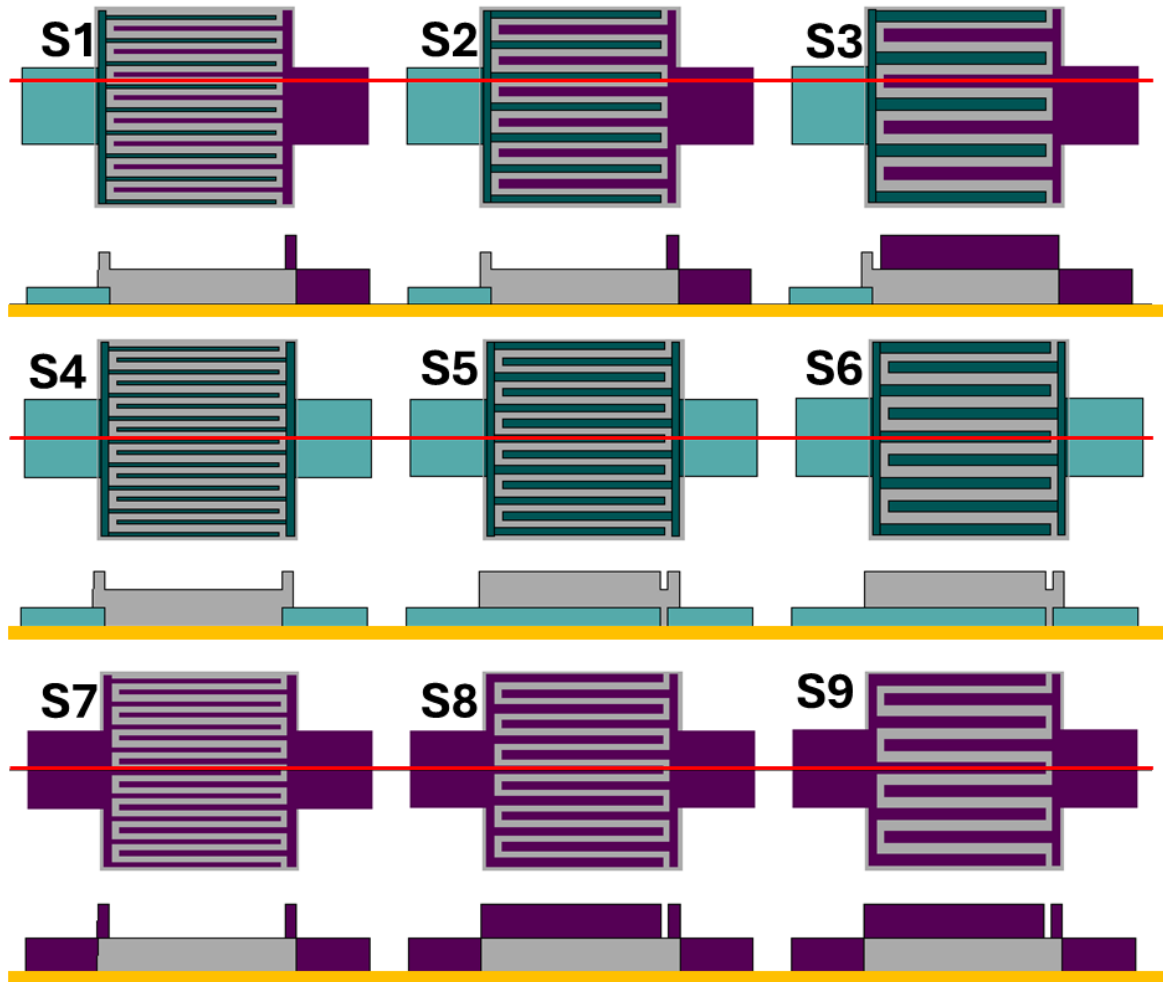


Figura 3.17. Arreglo de dispositivos diseñados.

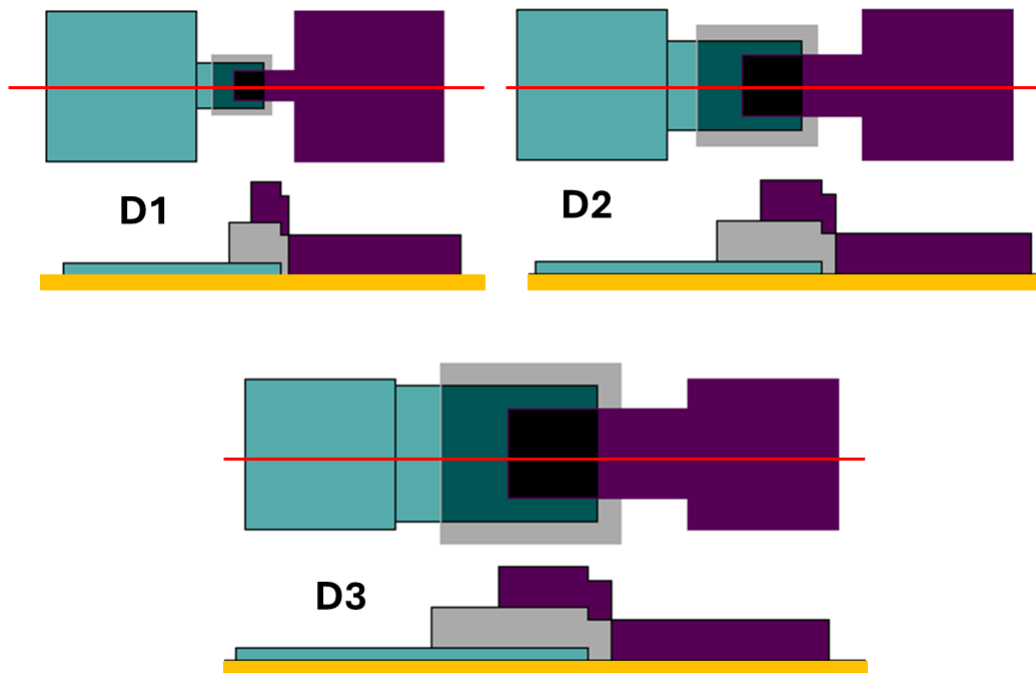
Dentro del arreglo se diseñaron nueve dispositivos como potenciales fotodetectores (Figura 3.18). Los dispositivos S1, S4 y S7 presentan un ancho de dedo (w) de $10\ \mu\text{m}$ y un espaciado entre dedos (g) de $20\ \mu\text{m}$. Los dispositivos S2, S5 y S8 mantienen un w de $20\ \mu\text{m}$ y un g de $20\ \mu\text{m}$, y S3, S6 y S9 cuentan con un w de $30\ \mu\text{m}$ y un g de $30\ \mu\text{m}$. En todos los casos, se conservó la misma área activa de $520 \times 520\ \mu\text{m}$ correspondiente al ZnO. La variación entre las dimensiones de w y g permite analizar la influencia de la geometría de los electrodos interdigitados en el desempeño de los fotodetectores.



Ancho de dedos (w) = 10 μm , 20 μm y 30 μm
Separación entre los dedos (g) = 20 μm , 20 μm y 30 μm .
Dimensiones del ZnO = 520 $\times$ 520 μm

Figura 3.18. Diseño de los nueve potenciales fotodetectores con sección transversal.

Por otro lado, se diseñaron tres uniones Al/ZnO/AgO/Ti/Au con el objetivo de evaluar el área de contacto entre todos los materiales. La unión D1 presenta un área de 400 μm^2 , D2 de 1600 μm^2 y D3 de 3600 μm^2 (Figura 3.19). Al incrementar el área de unión, se espera un aumento de la corriente total bajo polarización. El diseño permite comparar el desempeño de los dispositivos y establecer tendencias en función de sus dimensiones.



Área de la unión Al/ZnO/AgO = D1 ($400 \mu\text{m}^2$), D2 ($1600 \mu\text{m}^2$) y D3 ($3600 \mu\text{m}^2$).

Figura 3.19. Diseño de los tres dispositivos en sección transversal.

3.4.2 Preparación del sustrato

Como sustrato, se utilizó Kapton HN PI al cual se le realizó una limpieza ultrasónica para eliminar contaminantes, sumergiendo la muestra en acetona, IPA y agua DI, respetando la secuencia y la duración de 3 minutos en cada paso. Se secó el sustrato con aire para posteriormente realizar un tratamiento térmico en una mufla durante una hora a 300°C con una rampa de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{minuto}$ (Figura 3.20). Finalmente, se repitió la limpieza ultrasónica con solventes siguiendo los pasos anteriores.

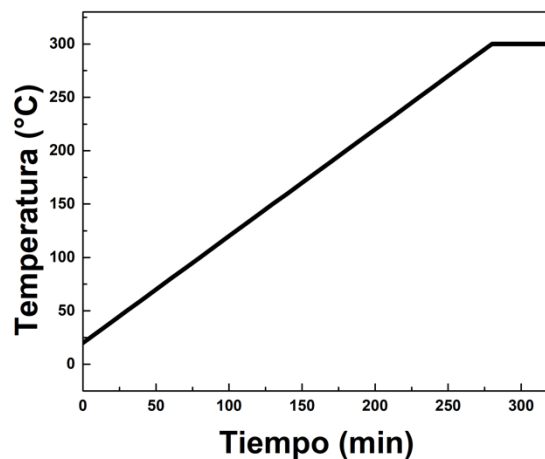


Figura 3.20. Rampa de calentamiento para el PI.

3.4.3 Depósito y fotolitografía de Al

Se depositó Al mediante pulverización catódica de DC, con los parámetros de la Tabla 3.3. Después, se realizó el proceso de fotolitografía (Apéndice I: Proceso de fotolitografía sobre PI) en un cuarto limpio clase 100. Se adhirió el sustrato flexible a un vidrio para depositar la resina fotosensible (MICROPOSIT S1813 G2) mediante *spin coating* a 4000 rpm durante 30 segundos. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico a 115 °C durante 1 minuto. El patrón diseñado para el Al fue transferido a la resina fotosensible mediante el equipo Heidelberg DWL66FS de escritura directa, equipado con un láser de 405 nm. Una vez transferido el patrón, se sumergió la muestra en el revelador (MICROPOSIT MF –319 DEVELOPER) en agitación constante durante 35 segundos, se enjuagó con agua DI y se secó con nitrógeno. Finalmente, se realizó un tratamiento térmico en una plancha a 115 °C durante un minuto.

Tabla 3.3. Parámetros para el depósito de Al mediante pulverización catódica de DC.

Presión de depósito	Flujo de Ar	Potencia DC	Temperatura
5 mTorr	13.4 sccm	150 W	20.2 °C

Para realizar el proceso de grabado químico, se sumergió la muestra en agitación constante durante 35 segundos en el atacante de Al (mezcla 5:20:1 de agua DI, ácido fosfórico al 85%

y ácido nítrico al 70% a 40 °C), después, se limpió la muestra sumergiéndola en acetona (dos veces consecutivas), seguido de IPA y agua DI en agitación constante durante un minuto en cada paso, respetando la secuencia. Finalmente, se secó la muestra con nitrógeno. El resultado se muestra en la Figura 3.21.

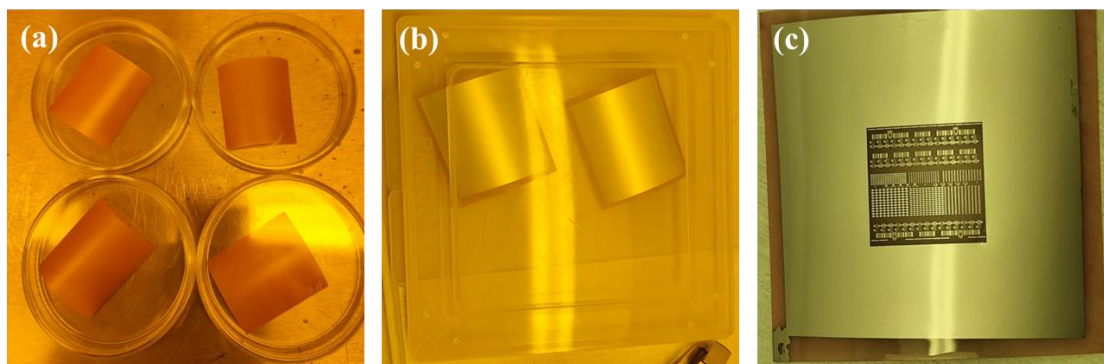


Figura 3.21. (a) Sustratos flexibles. (b) Sustratos flexibles con depósito de Al mediante pulverización catódica. (c) Resultado del proceso de fotolitografía de Al.

Al finalizar el proceso de fotolitografía, se obtuvieron imágenes (Figura 3.22) con un microscopio óptico para verificar la definición de las estructuras metálicas.

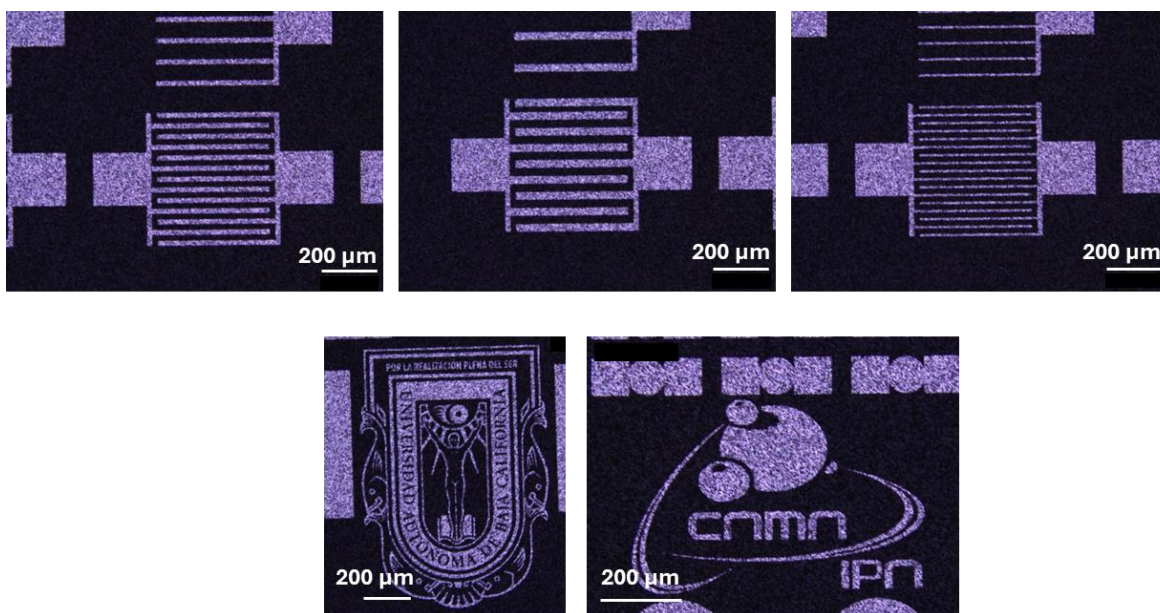


Figura 3.22. Imágenes ópticas del resultado de la primera fotolitografía (Al).

3.4.4 Depósito de ZnO y fotolitografía (*lift-off*)

Se realizó el proceso de fotolitografía directa para la deposición de la resina fotosensible y la transferencia del patrón diseñado al sustrato, omitiendo el recocido final a 115 °C durante 1 minuto. Después, se depositó ZnO mediante pulverización catódica de RF, con los parámetros de la Tabla 3.4. Al retirar la muestra del equipo, se llevó a cabo el proceso de *lift-off* utilizando el equipo de limpieza ultrasónica, sumergiendo la muestra en acetona (dos veces consecutivas), IPA y agua DI, en la secuencia indicada, con una duración de 1 minuto en cada paso. Se colocó la muestra en la placa calefactora a 100 °C, cada 10 minutos se aumentó la temperatura 10 °C hasta llegar a 150 °C y se mantuvo durante una hora.

Tabla 3.4. Parámetros para el depósito de ZnO mediante pulverización catódica de RF.

Presión	Flujo de Ar	Potencia RF	Temperatura
5 mTorr	15.1 sccm	100 W	20.3 °C

Al finalizar el proceso de fotolitografía, se obtuvieron imágenes con un microscopio óptico para verificar la definición del ZnO (Figura 3.23).

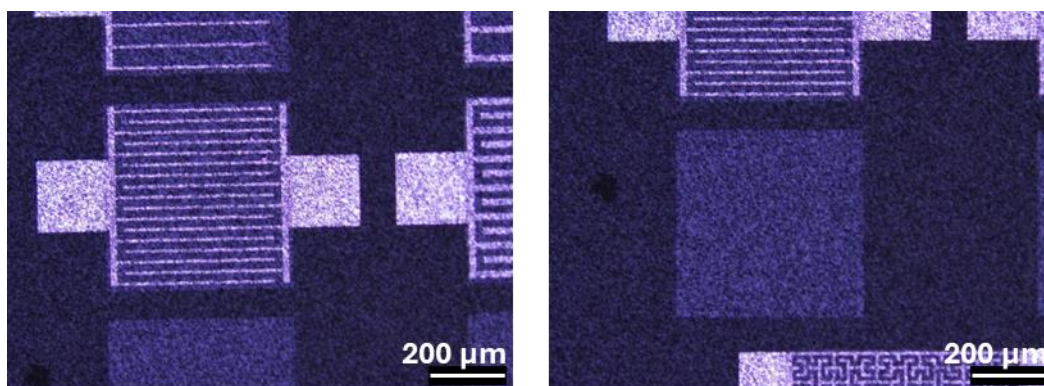


Figura 3.23. Imágenes ópticas de la definición del ZnO.

3.4.5 Depósito de AgO/Ti/Au y fotolitografía (*lift-off*)

Se realizó el proceso de fotolitografía directa para la deposición de la resina fotosensible y la transferencia del patrón diseñado al sustrato, omitiendo el recocido final a 115 °C durante 1 minuto. Posteriormente, se preparó una solución compuesta por 250 μL de ácido

clorhídrico y 100 ml de agua DI, en la que se sumergió la muestra durante 5 segundos. A continuación, se colocó la muestra sobre una placa calefactora a 100 °C durante 3 minutos.

Después, se depositó AgO mediante pulverización catódica en DC, siguiendo los parámetros de la Tabla 3.5. Posteriormente, se depositaron Ti y Au mediante evaporación por haz de electrones, con los parámetros de la Tabla 3.6 y de la Tabla 3.7, respectivamente. Finalmente, el proceso de *lift-off* se completó utilizando un equipo de limpieza ultrasónica, sumergiendo la muestra en acetona (dos veces consecutivas), IPA y agua DI durante 1 minuto en cada etapa, respetando la secuencia indicada y secando la muestra con nitrógeno al finalizar.

Tabla 3.5. Parámetros para el depósito de AgO mediante pulverización catódica de RF.

Presión de depósito	Flujo de Ar	Potencia RF	Temperatura
5 mTorr	15.1 sccm	100 W	20.3 °C

Tabla 3.6. Parámetros de depósito de Ti/Au mediante evaporación por haz de electrones.

Presión de depósito	Tasa	Espesor
1.4×10^{-6} Torr	0.1 Å/s	5 nm

Tabla 3.7. Parámetros de depósito de Au mediante evaporación por haz de electrones.

Presión de depósito	Tasa	Espesor
1.4×10^{-6} Torr	0.2 Å/s	30 nm

Se corroboró la definición de las últimas películas delgadas mediante microscopio óptico. En la Figura 3.24 se observan algunas de las estructuras fabricadas.

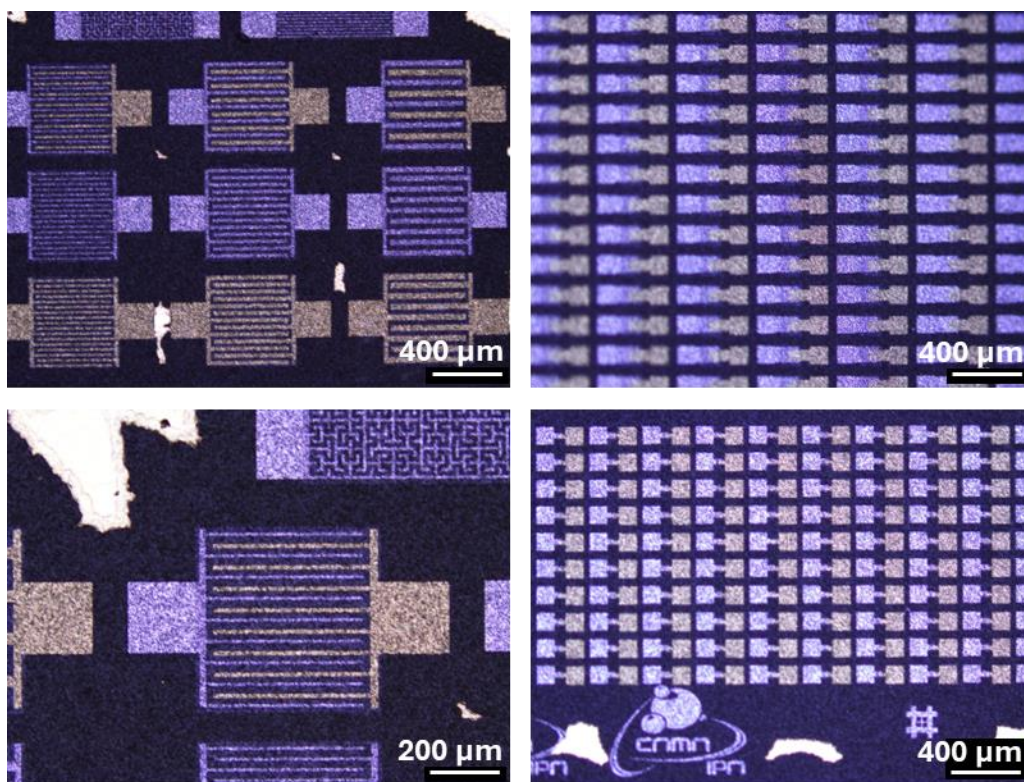


Figura 3.24. Imágenes ópticas de algunas secciones del sustrato.

En la Figura 3.25 se muestra una fotografía del sustrato con todos los dispositivos definidos.

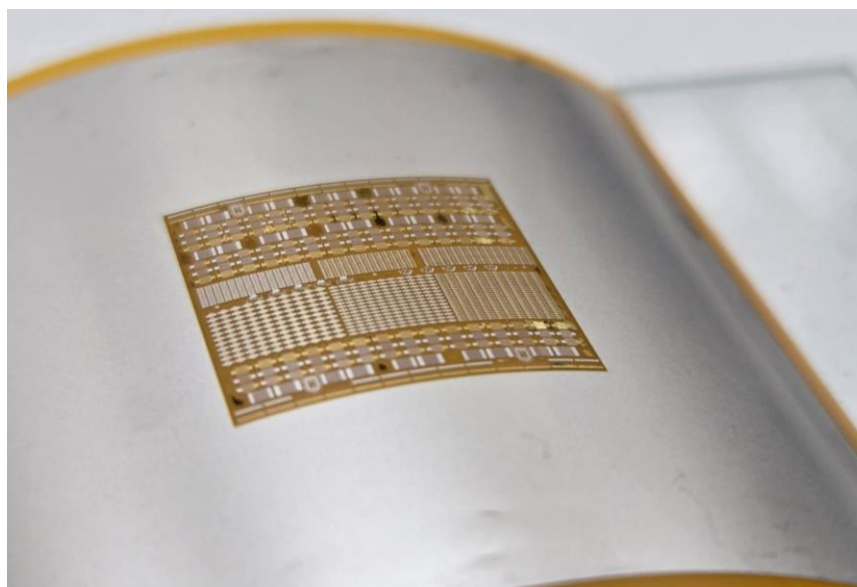


Figura 3.25. Fotografía de los dispositivos fabricados.

3.5 Fabricación de fotodetectores basados en nanopolvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía

3.5.1 Diseño asistido por computadora de los dispositivos

En la Figura 3.26 se observa el diseño de los dispositivos, donde el color azul representa la película delgada de Al. Los veinte pares de contactos interdigitados de Al mantienen las mismas dimensiones ($w = 20 \mu\text{m}$ y $g = 20 \mu\text{m}$) debido a que el análisis se centra en las variaciones de uniformidad en el depósito del nanopolvo de ZnO.

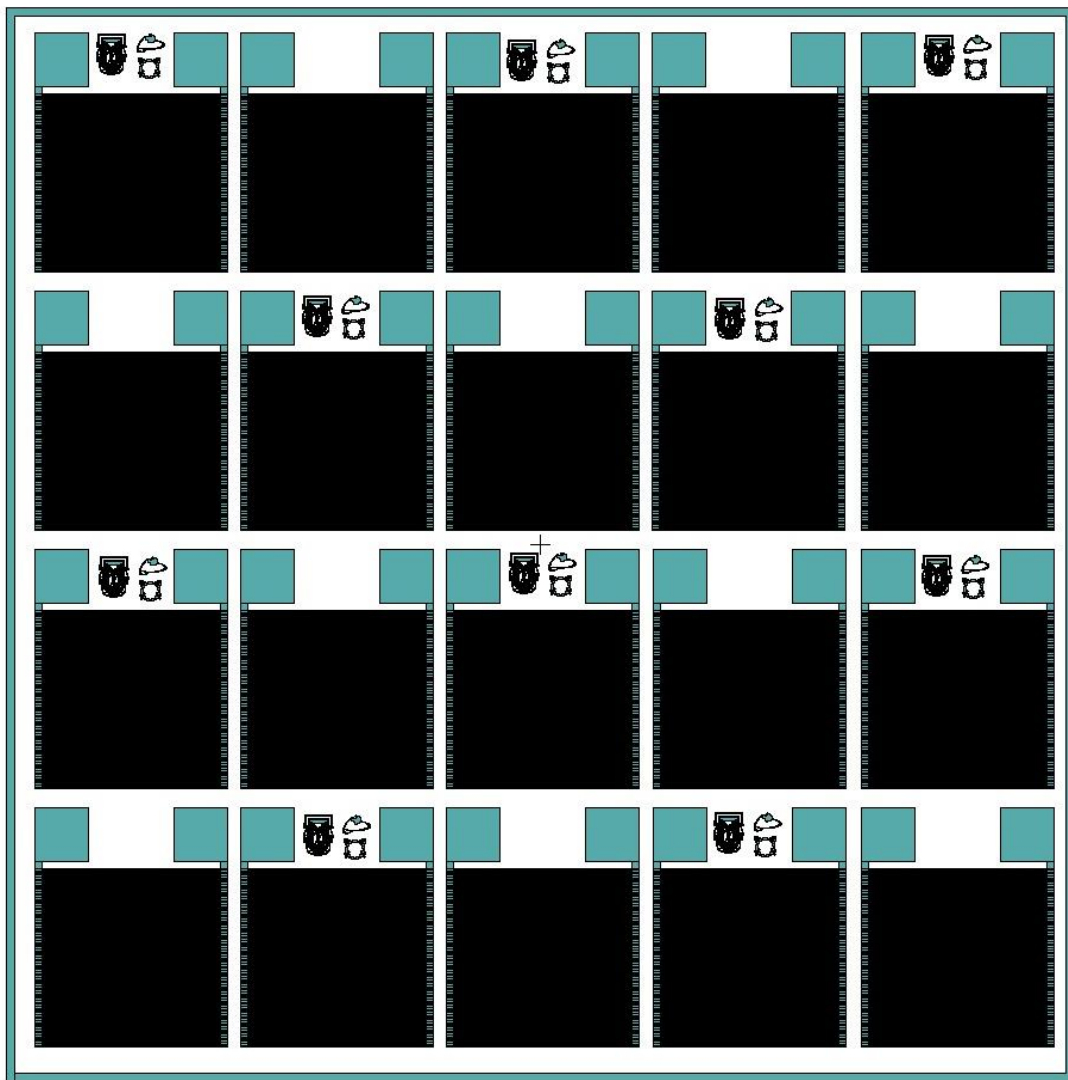


Figura 3.26. Arreglo de contactos interdigitados diseñados, en donde $w = 20 \mu\text{m}$ y $g = 20 \mu\text{m}$.

3.5.2 Preparación del sustrato

Como sustrato se utilizó Kapton HN PI, al cual se le realizó una limpieza ultrasónica para eliminar contaminantes, sumergiendo la muestra en acetona, IPA y agua DI, respetando la secuencia y la duración de 3 minutos en cada paso. Se secó el sustrato con aire y, posteriormente, se realizó un tratamiento térmico en una mufla durante una hora a 300 °C, con una rampa de 10 °C/minuto (Figura 3.20). Finalmente, se repitió la limpieza ultrasónica con solventes siguiendo los pasos anteriores.

3.5.3 Depósito y fotolitografía de Al

Se depositó Al por pulverización catódica de DC con los parámetros de la Tabla 3.3. Después, se inició el proceso de fotolitografía (Apéndice I: Proceso de fotolitografía sobre PI) en un cuarto limpio clase 100 depositando la resina fotosensible mediante *spin coating* a 4000 rpm durante 30 segundos. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico a 115 °C durante 1 minuto. El patrón diseñado se transfirió a la resina fotosensible mediante escritura directa con un equipo Heidelberg DWL66FS. Una vez transferido el patrón, se sumergió la muestra en el revelador, agitándola constantemente durante 35 segundos; luego se enjuagó con agua DI y se secó con nitrógeno. Finalmente, se realizó un tratamiento térmico en una placa calefactora a 115 °C durante 1 minuto.

3.5.4 Depósito de nanopulvos de ZnO

Los nanopulvos de ZnO se mezclaron con IPA en una proporción de 2:1 (ZnO:IPA) para obtener una solución de ZnO. La muestra, con los contactos de Al definidos mediante fotolitografía, se colocó sobre una plancha a 150 °C. Después, la solución de ZnO se depositó gota a gota con una jeringa. Una vez depositada la solución de ZnO, la muestra se mantuvo sobre la plancha durante 10 minutos para evaporar por completo el IPA. En la Figura 3.27 se observan imágenes tomadas con un microscopio óptico de algunas secciones de la muestra con la capa de nanopulvos de ZnO depositada.

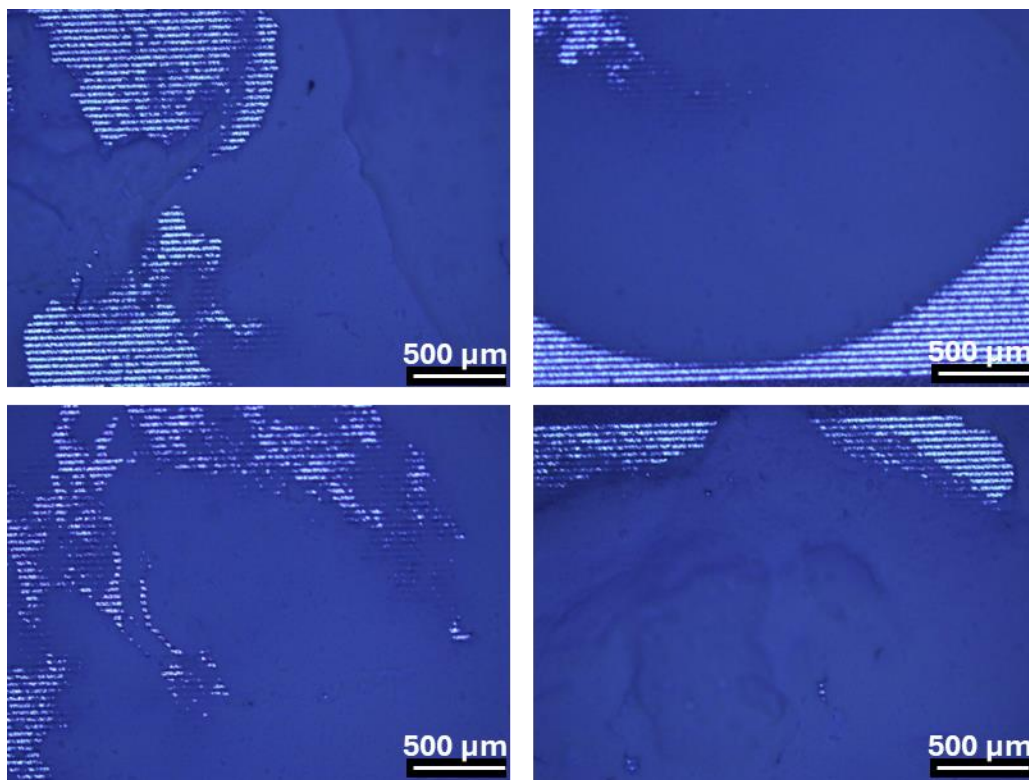


Figura 3.27. Imágenes tomadas con un microscopio óptico a una escala de 500 μm antes de añadir SU-8.

3.5.5 Depósito de SU-8

Se depositó SU-8 mediante recubrimiento por rotación sobre la muestra con los contactos interdigitados definidos y el nanopolvo de ZnO previamente depositado. Posteriormente, se realizó un tratamiento térmico a 95 °C durante 60 segundos y se expuso la muestra a radiación UV a 20 mW/cm² durante 60 segundos, seguido de un tratamiento térmico de tres etapas: Primero, manteniendo la muestra a 95 °C durante 90 segundos, seguido de una rampa de calentamiento de 10 °C/min desde 100 °C hasta 200 °C, y finalmente, manteniendo la muestra a 200 °C durante 10 minutos. El proceso de depósito de SU-8 se repitió dos veces.

En la Figura 3.28 se observan imágenes tomadas con un microscopio óptico de la muestra con SU-8 depositado.

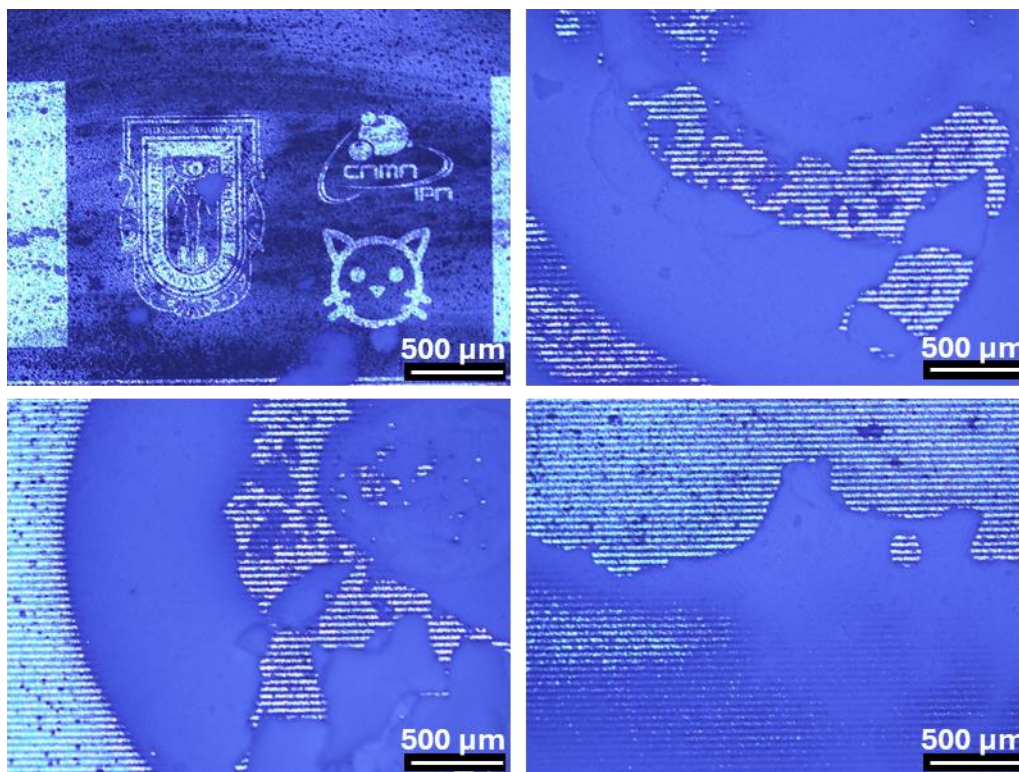


Figura 3.28. Imágenes tomadas con un microscopio óptico a una escala de 500 μm después de añadir SU-8.

En la Figura 3.29 se observan imágenes de los contactos de Al definidos por fotolitografía y de la muestra antes y después de su sometimiento al depósito de SU-8, donde resulta evidente la pérdida de nanopolvos y la escasa uniformidad del proceso. Por otro lado, el SU-8 no logró encapsular los nanopolvos, como se esperaba para garantizar la flexibilidad de los dispositivos.

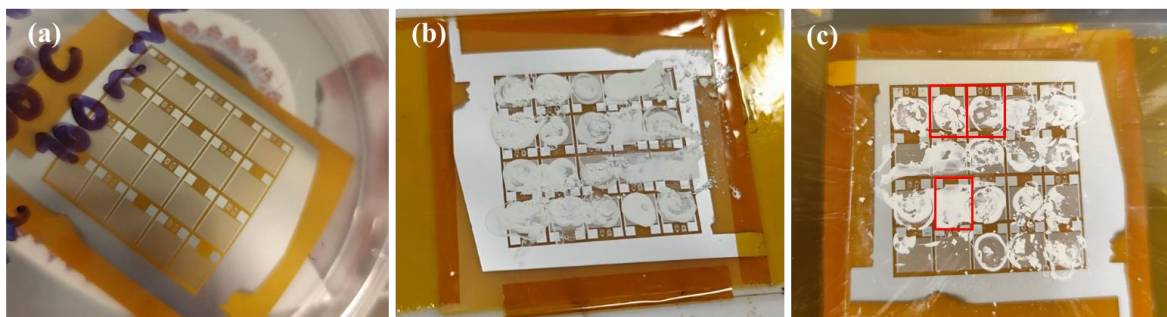


Figura 3.29. (a) Sustrato después de la fotolitografía del Al. (b) Sustrato con contactos de Al y depósito de nanopolvos de ZnO. (c) Sustrato con contactos de Al, depósito de nanopolvos de ZnO y de SU-8 (los recuadros rojos representan los dispositivos de interés).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

*“Un experimento es una pregunta que la ciencia plantea a la naturaleza, y
una medición es el registro de la respuesta de la naturaleza.”*

– Max Planck

4.1 Caracterización eléctrica de fotodetector termolaminado

Las mediciones se realizaron con un Source Monitor Unit Keithley 2400–C, en configuración de 4 puntas, a temperatura ambiente. Como fuente de iluminación UV, se utilizó un LED comercial de 5 mm con una longitud de onda central de 395 nm. La potencia óptica del LED se obtuvo utilizando un medidor de potencia PMUSB100 de Thorlabs (Newton, NJ, EE. UU.) con un sensor S120VC de Thorlabs en un rango de 200 a 800 nm, en la Figura 4.1 se muestra la potencia óptica para cada longitud de onda. El software utilizado fue el “Optical Power Monitor” de Thorlabs. La densidad de potencia óptica de la fuente UV a 395 nm fue de 120 mW/cm².

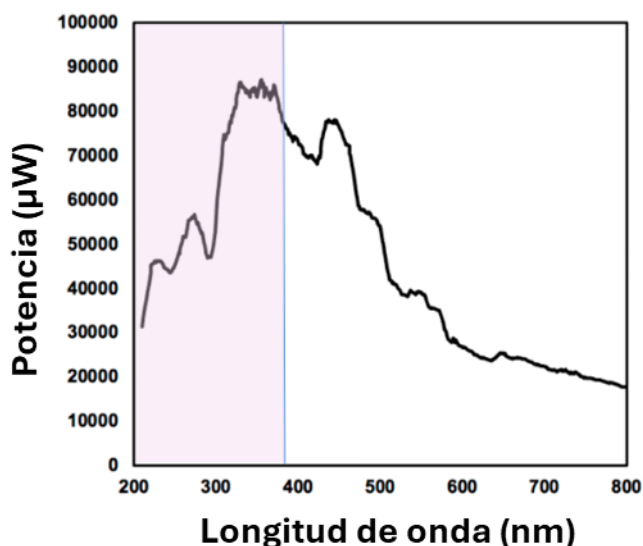


Figura 4.1. Potencia óptica de la fuente de iluminación UV en un rango de 200 a 800 nm. La región espectral de la fuente UV, posicionada a la izquierda de la línea azul, es potencialmente detectable por el dispositivo propuesto.

Se obtuvieron las curvas I–V tanto en oscuridad como bajo irradiación de diferentes longitudes de onda, utilizando las fuentes de iluminación roja, verde, azul y UV ubicadas perpendicularmente a 50 mm de distancia del dispositivo. La configuración para los barridos de voltaje fue a pasos de ± 0.05 V en rangos de 0 a ± 10 V, primero se obtuvieron las curvas I–V en oscuridad y posteriormente desde la longitud de onda más larga a la más corta.

En la Figura 4.2 se observa una mayor selectividad del dispositivo frente a la radiación UV, evidenciada por una respuesta espectral superior registrada tanto en condiciones de oscuridad

como bajo iluminación en el rango visible del espectro. Este comportamiento se atribuye a la generación de pares electrón–hueco inducidos por la absorción de la radiación UV en el ZnO.

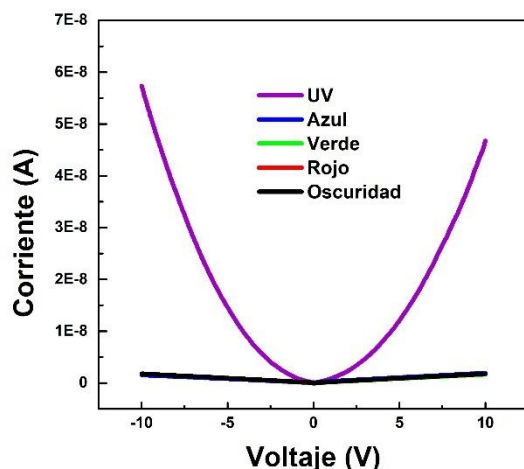


Figura 4.2. Curvas I–V del dispositivo termolaminado, obtenidas en oscuridad y bajo la incidencia de diferentes fuentes de iluminación a una distancia de 50 mm.

Después, se realizaron diferentes series de mediciones, primero en el orden de la Tabla 4.1(a), donde los barridos de voltaje se realizaron inicialmente en oscuridad y posteriormente bajo incidencia de radiación UV, iniciando en 0 V y aumentando en 1 V hasta alcanzar 10 V. Posteriormente, se realizaron los barridos de voltaje negativo siguiendo la misma secuencia. Los barridos de la Tabla 4.1(b) se realizaron de 0 a 5 V en oscuridad y de 0 a 5 V bajo incidencia de radiación UV, incrementando en 1 V, siguiendo la misma secuencia, hasta alcanzar 10 V.

Tabla 4.1. Secuencias de barrido de voltaje: (a) Barridos iniciando con voltaje positivo y finalizando con voltaje negativo, alternando entre oscuridad y radiación UV y, (b) Barridos de voltaje alternando los voltajes, alternando entre oscuridad y radiación UV.

(a)			(b)		
Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje	Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje
1.	Oscuridad	0 a 5	1.	Oscuridad	0 a 5 V
2.	UV	0 a 5	2.	UV	0 a 5 V
3.	Oscuridad	0 a 6	3.	Oscuridad	0 a -5 V
4.	UV	0 a 6	4.	UV	0 a -5 V
5.	Oscuridad	0 a 7	5.	Oscuridad	0 a 6 V
6.	UV	0 a 7	6.	UV	0 a 6 V
7.	Oscuridad	0 a 8	7.	Oscuridad	0 a -6 V
8.	UV	0 a 8	8.	UV	0 a -6 V
9.	Oscuridad	0 a 9	9.	Oscuridad	0 a 7 V
10.	UV	0 a 9	10.	UV	0 a 7 V
11.	Oscuridad	0 a 10	11.	Oscuridad	0 a -7 V
12.	UV	0 a 10	12.	UV	0 a -7 V
13.	Oscuridad	0 a -5	13.	Oscuridad	0 a 8 V
14.	UV	0 a -5	14.	UV	0 a 8 V
15.	Oscuridad	0 a -6	15.	Oscuridad	0 a -8 V
16.	UV	0 a -6	16.	UV	0 a -8 V
17.	Oscuridad	0 a -7	17.	Oscuridad	0 a 9 V
18.	UV	0 a -7	18.	UV	0 a 9 V
19.	Oscuridad	0 a -8	19.	Oscuridad	0 a -9 V
20.	UV	0 a -8	20.	UV	0 a -9 V
21.	Oscuridad	0 a -9	21.	Oscuridad	0 a 10 V
22.	UV	0 a -9	22.	UV	0 a 10 V
23.	Oscuridad	0 a -10	23.	Oscuridad	0 a -10 V
24.	UV	0 a -10	24.	UV	0 a -10 V

En las gráficas de la Figura 4.3 es notorio el efecto del orden de medición del dispositivo. En la Figura 4.3(a), el dispositivo se midió iniciando con voltajes positivos hasta llegar a 10 V, es posible visualizar cómo la corriente en UV y oscuridad incrementa. Por ello, las corrientes

con voltaje negativo son mayores debido al efecto de PPC. Por otro lado, en la Figura 4.3(b), las mediciones se realizaron alternando los voltajes, por lo que se obtiene un comportamiento más simétrico entre las corrientes obtenidas con voltaje positivo y negativo. Sin embargo, el efecto de PPC se mantiene, ya que se observa un incremento progresivo de la corriente conforme avanza la secuencia de mediciones.

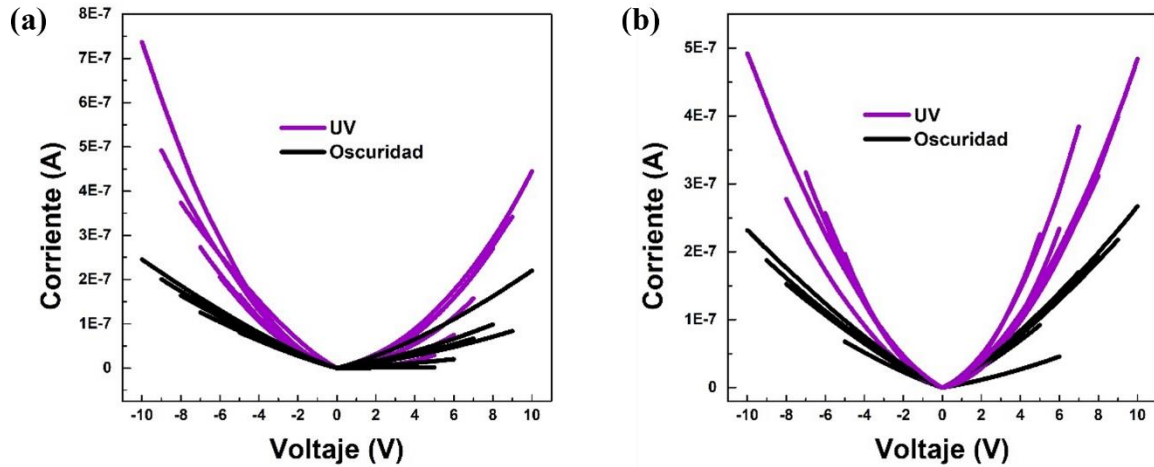


Figura 4.3. (a) Curvas I–V obtenidas alternando entre la iluminación UV y la oscuridad, iniciando con voltajes positivos y finalizando con voltajes negativos. (b) Curvas I–V obtenidas alternando tanto los voltajes como las condiciones de iluminación entre UV y oscuridad.

Los barridos de la Tabla 4.2(a) se realizan bajo incidencia de radiación UV de 0 a 5 V con incrementos de 1 V seguidos de un barrido de 0 a –10 V en oscuridad hasta alcanzar 10 V. Por el contrario, en la Tabla 4.2(b) los barridos se realizan bajo incidencia de radiación UV de 0 a –5 V con incrementos de –1 V seguidos de un barrido de 0 a 10 V en oscuridad hasta alcanzar –10 V.

Tabla 4.2. Secuencias de barrido de voltaje: (a) Voltaje positivo bajo iluminación UV y negativo en oscuridad. (b) Voltaje negativo bajo iluminación UV y positivo en oscuridad.

(a)			(b)		
Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje	Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje
1.	UV	0 a 5 V	1.	UV	0 a -5 V
2.	Oscuridad	0 a -10 V	2.	Oscuridad	0 a 10 V
3.	UV	0 a 6 V	3.	UV	0 a -6 V
4.	Oscuridad	0 a -10 V	4.	Oscuridad	0 a 10 V
5.	UV	0 a 7 V	5.	UV	0 a -7 V
6.	Oscuridad	0 a -10 V	6.	Oscuridad	0 a 10 V
7.	UV	0 a 8 V	7.	UV	0 a -8 V
8.	Oscuridad	0 a -10 V	8.	Oscuridad	0 a 10 V
9.	UV	0 a 9 V	9.	UV	0 a 9 V
10.	Oscuridad	0 a -10 V	10.	Oscuridad	0 a 10 V
11.	UV	0 a 10 V	11.	UV	0 a 10 V
12.	Oscuridad	0 a -10 V	12.	Oscuridad	0 a 10 V

Con base en la Figura 4.4 es posible analizar el efecto que tiene el polarizar en una dirección el dispositivo bajo radiación UV y en dirección opuesta en oscuridad. En la Figura 4.4(a), al dispositivo se le aplicó un voltaje de 0 a 10 V bajo incidencia de radiación UV y, posterior a cada medición, se realizó un barrido de 0 a -10 V. Se aprecia que la corriente con voltajes negativos en oscuridad es más estable y siempre menor a la corriente bajo radiación UV, indicando una disminución del efecto de PPC. Esto se puede atribuir a que la inversión del campo eléctrico favorece la redistribución y recombinación de los portadores fotogenerados durante la irradiación UV. Por el contrario, en la Figura 4.4(b), donde se incidió radiación UV de 0 a -10 V con un barrido de 0 a 10 V en oscuridad tras cada medición, es visible el efecto de PPC en las corrientes en oscuridad, ya que los valores de corriente en oscuridad incluso alcanzan los mismos valores que bajo incidencia de radiación UV, lo que indica que los portadores de carga generados bajo irradiación UV no se recombinan de forma inmediata.

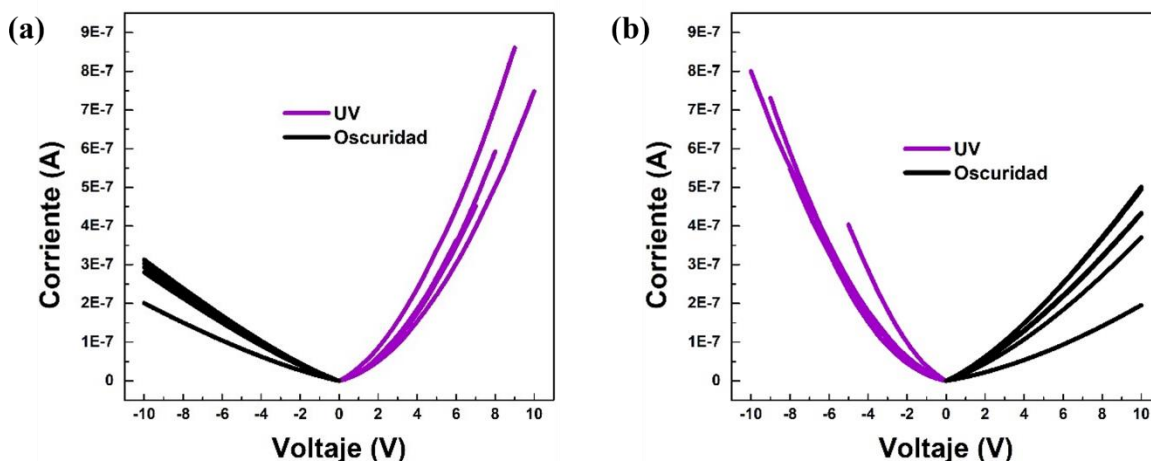


Figura 4.4. (a) Curvas I–V obtenidas mediante un barrido de voltaje positivo bajo iluminación UV y un barrido de voltaje negativo en oscuridad. (b) Curvas I–V obtenidas con un barrido de voltaje negativo bajo iluminación UV y con un barrido de voltaje positivo en oscuridad.

Además, se realizaron mediciones eléctricas después de someter al dispositivo a pruebas de estrés mecánico, en donde el dispositivo se dobló a un radio de 3.1 mm (Figura 4.5) y se desdobló (1 ciclo). Se realizaron diferentes series de ciclos (200, 400, 600, 800, 1000 y 2000 ciclos), después de finalizar cada serie, el dispositivo se midió en oscuridad y bajo incidencia de radiación UV.

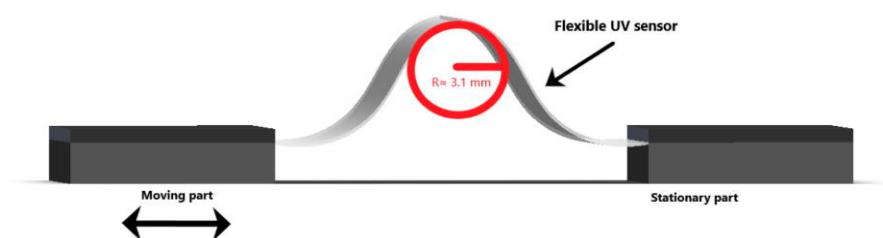


Figura 4.5. Imagen esquemática de la posición del dispositivo en el equipo de pruebas de estrés mecánico.

Los resultados de las pruebas de estrés mecánico del dispositivo (Figura 4.6) demuestran que el dispositivo mantiene su funcionalidad incluso tras someterse a 2000 ciclos. Sin embargo, es evidente el efecto de PPC, por ello, se visualiza un incremento en las corrientes de acuerdo con el orden en que se realizaron las mediciones.

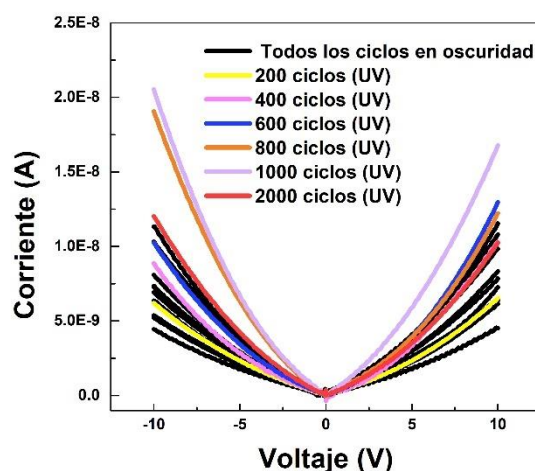


Figura 4.6. Curvas I–V del dispositivo obtenidas después de realizar diferentes ciclos de flexión.

La Tabla 4.3 muestra la resistencia eléctrica del dispositivo a ± 10 V en oscuridad y bajo la incidencia de radiación UV. Se aprecia que en la oscuridad la resistencia eléctrica es muy alta, lo que indica bajas corrientes de fuga, lo cual es previsible en dispositivos fotodetectores. Bajo la incidencia de radiación UV, la resistencia eléctrica disminuye significativamente, lo que confirma un aumento de la conductividad debido a la generación de pares electrón–hueco al incidir una radiación electromagnética más energética que el E_g del ZnO.

Tabla 4.3. Resistencia eléctrica del dispositivo termolaminado a ± 10 V.

	Oscuridad _i		Radiación UV	
Voltaje	-10 V	10 V	-10 V	10 V
Resistencia	5.60 G Ω	5.71 G Ω	174.45 M Ω	213.90 M Ω

En la Figura 4.7(a) se presenta la relación entre la corriente bajo iluminación UV y la corriente en oscuridad inicial ($I_{UV}/I_{OSCURIDAD}$), en función del voltaje aplicado, en un rango de 0 a ± 10 V, para el dispositivo termolaminado. Es evidente que el valor de la corriente aumenta linealmente en ambos intervalos de voltaje, demostrando que, al aumentar el voltaje aplicado, la respuesta del dispositivo a la radiación UV se incrementa ~ 30 veces más que en oscuridad. Esto se debe a que la corriente en oscuridad permanece prácticamente constante, permitiendo que la fotocorriente generada sea la dominante.

Por otra parte, la relación de rechazo del dispositivo termolaminado frente a longitudes de onda visibles (Figura 4.7(b)) coincide con la relación de corriente bajo iluminación UV y la corriente en oscuridad inicial, siguiendo la misma tendencia lineal, donde predomina la fotocorriente generada.

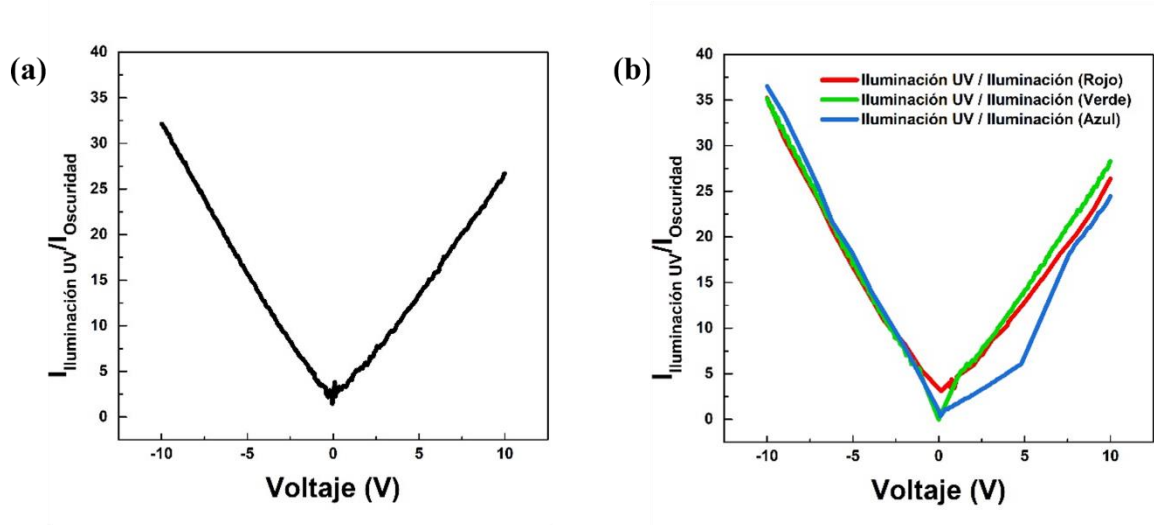


Figura 4.7. (a) Corriente bajo iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V del dispositivo termolaminado (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis del dispositivo termolaminado.

La relación de rectificación (RR) indica la relación entre las corrientes obtenidas al aplicar voltajes positivos y negativos. La RR se describe con la Ecuación (7).

$$RR = \frac{I_{\text{positiva}}}{I_{\text{negativa}}} \quad (7)$$

En donde RR con valor cercano a 1 indica simetría entre las corrientes obtenidas bajo ambas direcciones de voltaje aplicado, un valor menor a 1 indica que la corriente con voltaje negativo es mayor que con voltaje positivo, por el contrario de un valor de RR mayor a 1 que indica que la corriente obtenida aplicando voltaje positivo es mayor. En la Figura 4.8 es posible observar que el valor de RR se mantiene constante en ~ 0.8 , lo cual es evidente en la curvas I–V obtenidas en donde la corriente es mayor al aplicar voltaje negativo.

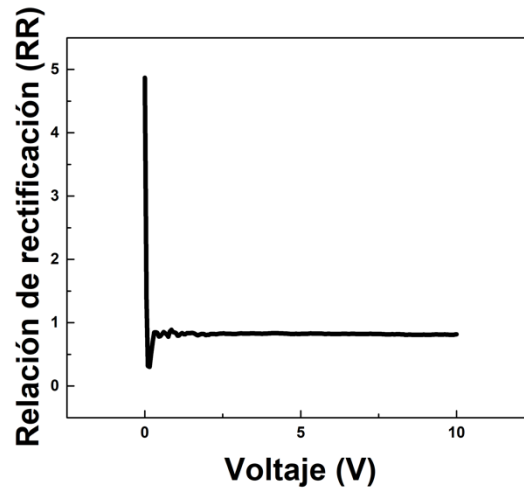


Figura 4.8. Relación de rectificación en un rango de 0 a ± 10 V del dispositivo termolaminado.

4.2 Caracterización eléctrica de fotodetector encapsulado con PDMS

Ambos dispositivos se sometieron a pruebas eléctricas utilizando un Keithley 2500 SCS para obtener sus curvas I–V en un rango de 0 a ± 10 V, en oscuridad y bajo la incidencia de radiación con diferentes longitudes de onda desde el UV hasta la luz visible, como se muestra en la Figura 4.9.

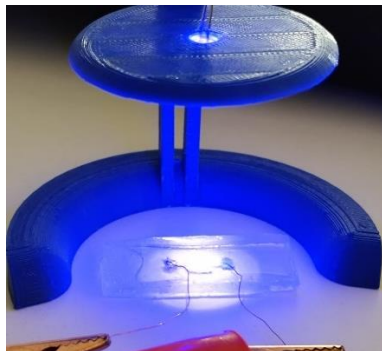


Figura 4.9. Dispositivo fabricado con PDMS en proceso de caracterización eléctrica.

Como resultado, ninguna de las mediciones en ambos dispositivos mostró señales eléctricas detectables. Sin embargo, se realizaron pruebas eléctricas utilizando únicamente el

nanopolvo de ZnO con contactos de Cu para verificar la funcionalidad de ambos materiales sin el encapsulamiento de PDMS, pruebas que sí mostraron resultados eléctricos deseables, por lo que se concluyó que la falla en los dispositivos se debe a la falta de contacto entre todos los materiales.

4.3 Caracterización eléctrica de fotodetectores de película delgada fabricados mediante fotolitografía

Se obtuvieron las curvas I–V en condiciones de oscuridad y bajo irradiación de diferentes longitudes de onda, utilizando una fuente de iluminación perpendicular a los dispositivos, ubicada a 30 mm de distancia. Las longitudes de onda incidentes fueron de 620, 520, 470 y 380 nm (Figura 4.10). Las mediciones se realizaron con un Keithley 4200 SCS, configurando un barrido de voltaje a pasos lentos de ± 0.04 V a temperatura ambiente.

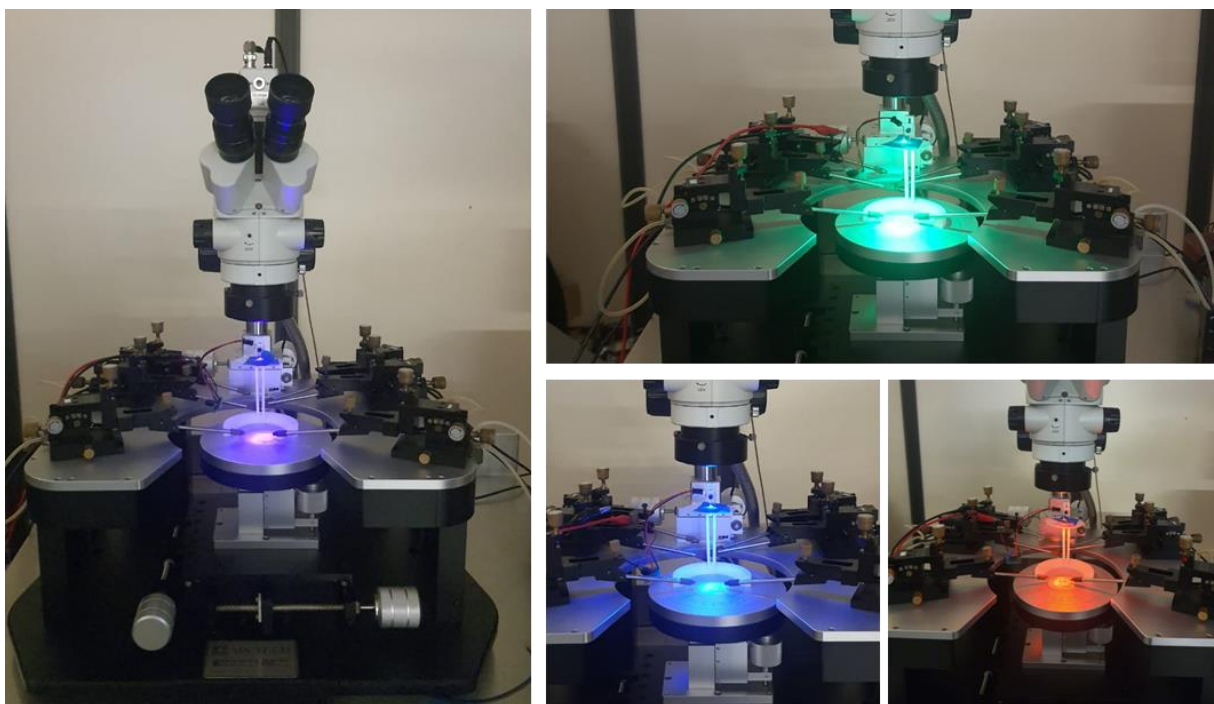


Figura 4.10. Fotografías del proceso de caracterización eléctrica, con incidencia de radiación con diferentes longitudes de onda.

Primero se obtuvieron las curvas I–V siguiendo el orden de la Tabla 4.4(a), donde se muestra que primero se realizó un barrido de 0 a 10 V en oscuridad y, posteriormente, de 0 a –10 V.

El orden en que se realizaron las mediciones fue desde la longitud de onda más larga hasta la más corta, finalizando con un último barrido en oscuridad.

Finalizando la primera serie de mediciones eléctricas, se continuó con los barridos de voltaje de la Tabla 4.4(b), en los que se midió con voltaje positivo (0 a 10 V), iniciando en oscuridad, siguiendo la longitud de onda más larga a la más corta y finalizando en oscuridad. Se obtuvo la misma serie de mediciones con voltaje negativo (0 a -10 V).

Tabla 4.4. (a) Barridos de voltaje alternando los voltajes bajo la incidencia de iluminación con diferentes longitudes de onda. (b) Barridos iniciando con voltaje positivo y finalizando con voltaje negativo, ambos bajo iluminación de longitudes de onda diferentes.

(a)			(b)		
Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje	Orden	Condición de iluminación	Barrido de voltaje
1.	Oscuridad	0 a 10 V	1.	Oscuridad	0 a 10 V
2.	Oscuridad	0 a -10 V	2.	620 nm	0 a 10 V
3.	620 nm	0 a 10 V	3.	520 nm	0 a 10 V
4.	620 nm	0 a -10 V	4.	470 nm	0 a 10 V
5.	520 nm	0 a 10 V	5.	380 nm	0 a 10 V
6.	520 nm	0 a -10 V	6.	Oscuridad	0 a 10 V
7.	470 nm	0 a 10 V	7.	Oscuridad	0 a -10 V
8.	470 nm	0 a -10 V	8.	620 nm	0 a -10 V
9.	380 nm	0 a 10 V	9.	520 nm	0 a -10 V
10.	380 nm	0 a -10 V	10.	470 nm	0 a -10 V
11.	Oscuridad	0 a 10 V	11.	380 nm	0 a -10 V
12.	Oscuridad	0 a -10 V	12.	Oscuridad	0 a -10 V

Los dispositivos se pueden dividir en tres tipos: dispositivos con un contacto de AgO y otro de Al (S1, S2 y S3), dispositivos con dos contactos de Al (S3, S4 y S5) y dispositivos con dos contactos de AgO (S7, S8 y S9). A continuación, se presentará un análisis más profundo de cada estructura, según el material de sus contactos interdigitados.

4.3.1 Dispositivos con contactos de AgO y Al

Primero se obtuvieron las curvas I–V de todos los dispositivos S1 (Figura 4.11), S2 (Figura 4.12) y S3 (Figura 4.13) siguiendo el orden indicado en la Tabla 4.4(a) y, posteriormente, se obtuvieron en el orden de la Tabla 4.4(b). En todos los resultados se aprecia una respuesta asimétrica entre las aplicaciones de voltaje positivo y negativo, así como una alta selectividad bajo iluminación UV, asociada a la formación de una unión rectificante. Además, se identifica la presencia de PPC atribuida a la acumulación de carga.

Por ello, las corrientes registradas según la secuencia de mediciones de la Tabla 4.4(b) resultan mayores que las obtenidas en la primera serie de mediciones (Tabla 4.4(a)). Por otro lado, las corrientes obtenidas con voltaje negativo, según el orden de la Tabla 4.4(b), son menores debido a que el dispositivo tuvo tiempo suficiente para reducir el nivel de carga atrapada durante las mediciones previas.

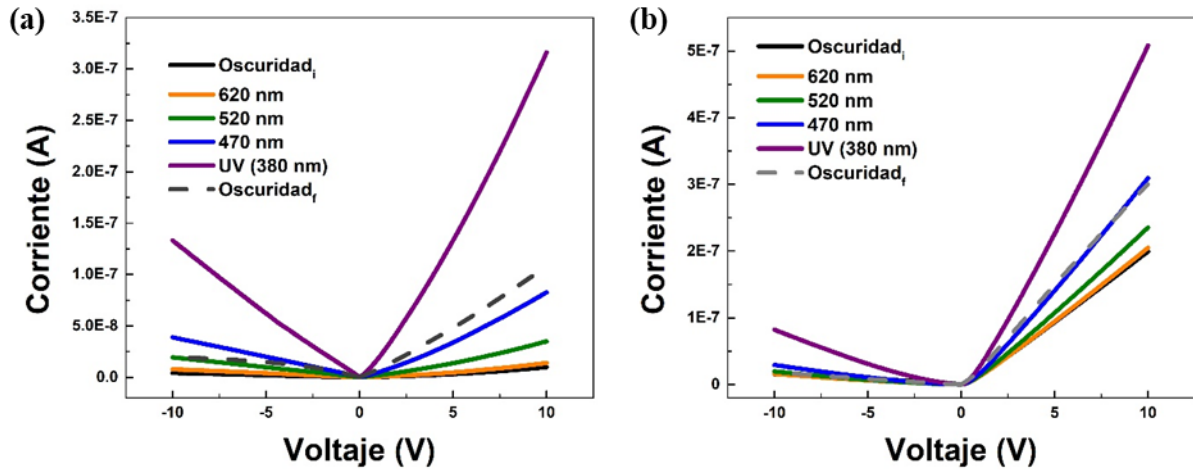


Figura 4.11. Curvas I–V del dispositivo S1 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

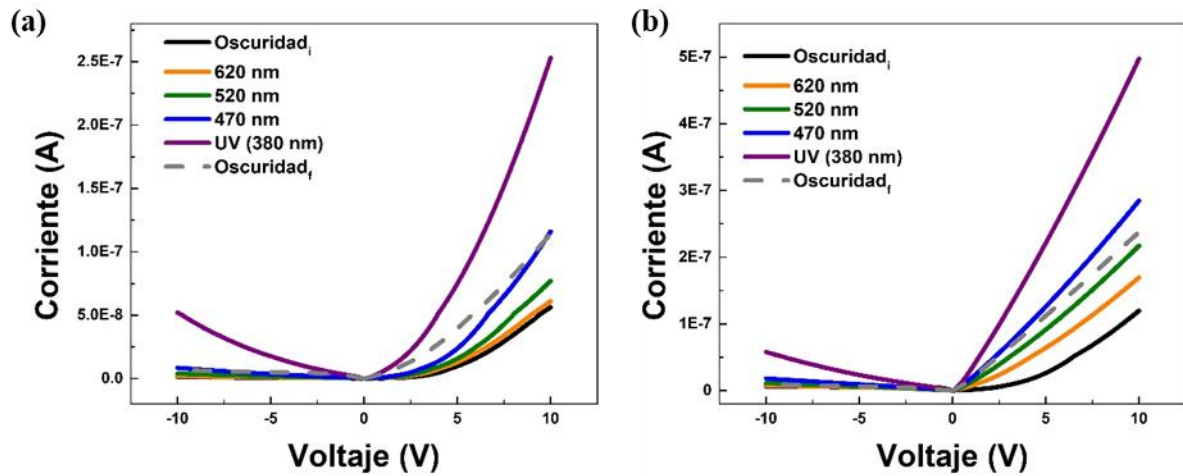


Figura 4.12. Curvas I–V del dispositivo S2 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

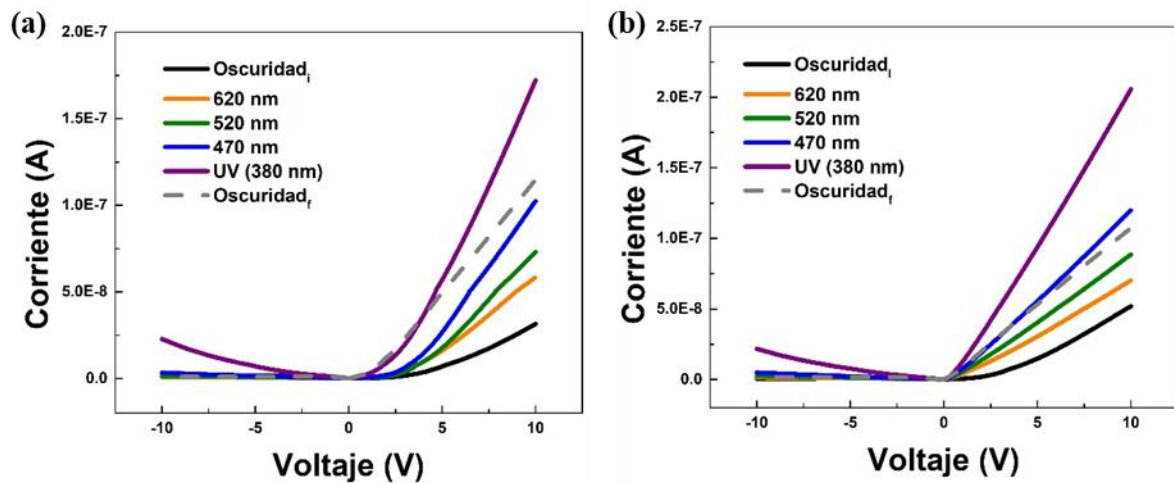


Figura 4.13. Curvas I–V del dispositivo S3 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Tabla 4.5 se observa una comparación entre las corrientes máximas alcanzadas a -10 V y a 10 V en oscuridad inicial, bajo incidencia de radiación UV y en oscuridad posterior a la incidencia de la radiación UV al seguir la secuencia de mediciones de la Tabla 4.4(a). Comparando S1 y S2, aun cuando S2 presenta un w mayor ($20\ \mu\text{m}$), con voltaje negativo, S2

siempre mantiene resistencias más altas que S1, alcanzando valores hasta 3 veces mayores en todas las condiciones. Por otro lado, con voltaje positivo, en oscuridad inicial, S2 presenta una resistencia eléctrica hasta 6 veces menor que S1, mientras que bajo radiación UV y en oscuridad final, ambos presentan valores similares.

Por otro lado, comparando S2 con S3, se observa que S3 tiene una resistencia eléctrica mayor que S2 en todas las condiciones (excepto en 10 V, donde mantiene un valor similar), sin embargo, exhibe una PPC mayor. Las diferencias entre los dispositivos, en este caso, no se pueden atribuir a la geometría de los contactos, pero sí a la calidad de las uniones.

Tabla 4.5. Resistencia eléctrica de los dispositivos S1, S2 y S3 a ± 10 V.

Dispositivo	Oscuridad _i		Radiación UV		Oscuridad _f	
	-10 V	10 V	-10 V	10 V	-10 V	10 V
S1	2.33 G Ω	1 G Ω	75.02 M Ω	31.63 M Ω	508.94 M Ω	92.37 M Ω
S2	7.73 G Ω	177.73 M Ω	191.80 M Ω	39.54 M Ω	1.47 G Ω	87.54 M Ω
S3	9 G Ω	317.80 M Ω	438.21 M Ω	58.07 M Ω	10.40 G Ω	87.27 M Ω

En la Figura 4.14(a) se observa la sensibilidad de los dispositivos S1, S2 y S3 a la radiación UV. El dispositivo S1 es el que presenta valores más altos en la mayor parte del barrido de voltaje, sin contar las fluctuaciones debidas a la medición a 0 V. Los valores de S1 son entre 30 y 45 veces mayores bajo UV que en oscuridad, por lo que el dispositivo se vuelve el más eficiente de los 3. Por otro lado, S2 y S3, en un rango de 0 a 10 V, mantienen valores similares, de entre 5 y 25; en cambio, con voltaje negativo, el dispositivo S2 alcanza un valor de 40, mientras que S3 exhibe un valor de 20, por lo que el dispositivo S3 resulta ser el menos sensible a la radiación UV.

Por otro lado, en la Figura 4.14(b) se presentan los resultados de la selectividad espectral de la corriente generada ante la radiación UV y ante diferentes longitudes de onda visibles. Se aprecia que, ante la aplicación de voltajes negativos, los dispositivos S2 y S3 exhiben una mayor selectividad frente al UV, especialmente a 620 nm. Por otro lado, en los casos restantes, parece haber un comportamiento constante con valores entre 6 y 15, lo que indica una menor discriminación espectral.

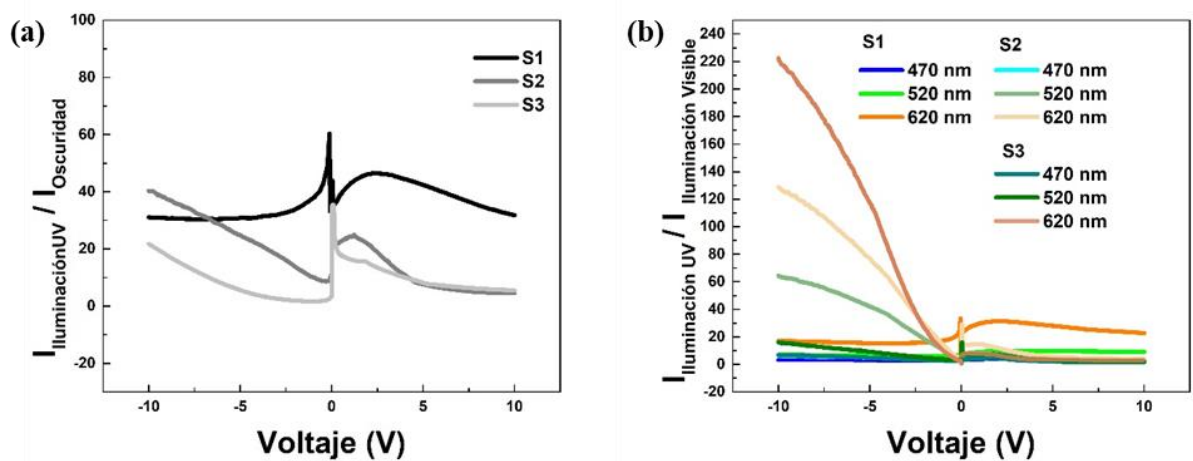


Figura 4.14. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de 0 a ± 10 V de los dispositivos S1, S2 y S3. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S4, S5 y S6.

En la Figura 4.15 se observa que, en todos los casos, el valor de RR bajo la incidencia de radiación UV es mayor que 1. El dispositivo S3 presenta los valores más altos, cercanos a 2.8. En los tres dispositivos evaluados, la corriente bajo polarización positiva supera a la obtenida bajo polarización negativa. Asimismo, se aprecia un incremento de la RR a medida que aumenta el voltaje positivo, lo que refleja un comportamiento más rectificante.

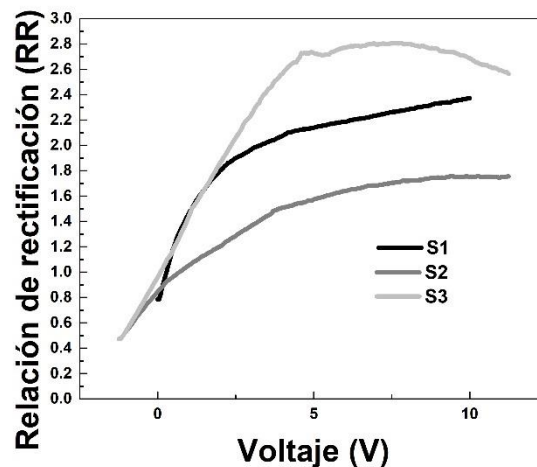


Figura 4.15. Relación de rectificación de los dispositivos S1, S2 y S3.

A continuación, se muestra la respuesta temporal de la corriente para los dispositivos S1, S2 y S3 bajo polarización constante de 10 V y con modulación de la iluminación a diferentes frecuencias (Figura 4.16, Figura 4.17 y Figura 4.18) para cuatro longitudes de onda (380 nm, 470 nm, 520 nm y 620 nm). En cada gráfica, el área sombreada representa un intervalo en el que la iluminación está encendida.

Bajo iluminación UV, el incremento de corriente es mayor en los tres dispositivos, especialmente en S1. Conforme aumenta la longitud de onda incidente, la amplitud de la fotocorriente disminuye.

El valor base de la corriente en cada medición está influido por el efecto de PPC, por lo que la respuesta de los dispositivos se determina por la corriente previa al encendido y la corriente inmediatamente antes de apagar la fuente de iluminación. La diferencia entre estos dos valores de corriente corresponde a la fotocorriente generada en cada ciclo de encendido–apagado; por ello, se evidencia cómo este intervalo disminuye al iluminar con longitudes de onda más largas, por lo tanto, con fotones menos energéticos.

En la Figura 4.16 y la Figura 4.17, a frecuencias de encendido–apagado de 10 y 100 mHz, se observa una respuesta temporal de corriente de ascenso y descenso asimétrica, que se caracteriza por un ascenso abrupto de corriente al encender la iluminación, en este caso la UV, seguido de un incremento más lento mientras la iluminación permanece encendida. Al apagar la iluminación, se produce un descenso abrupto, seguido de una relajación lenta de la corriente, sin retornar al valor anterior de corriente en oscuridad, por lo que el nivel de corriente base aumenta a medida que aumentan los ciclos de mediciones.

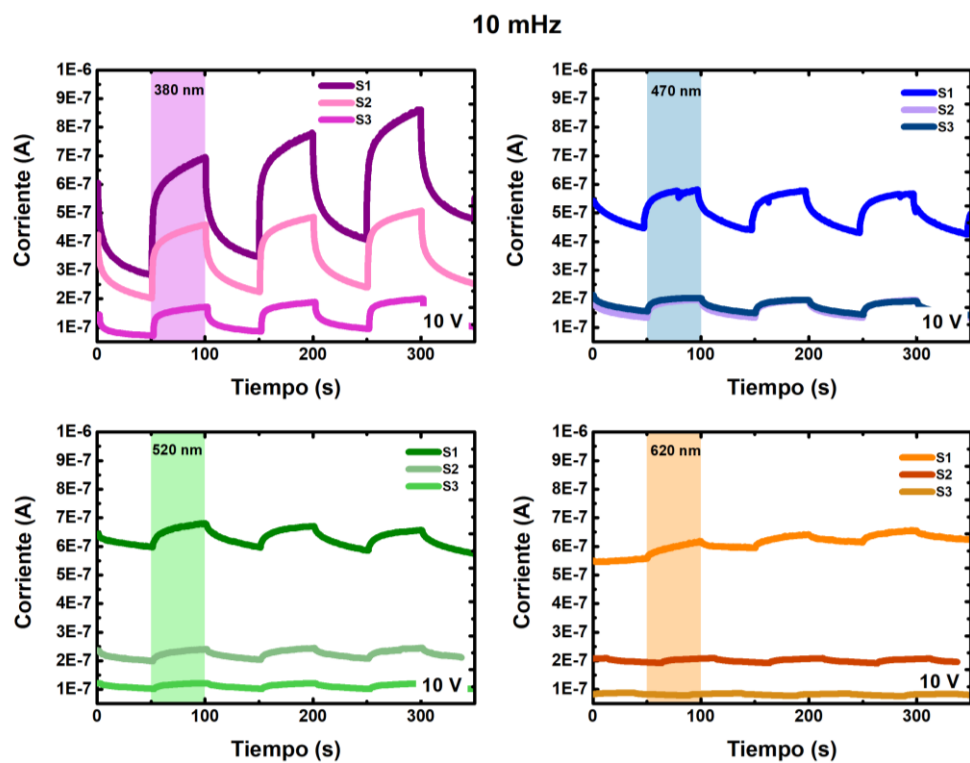


Figura 4.16. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.

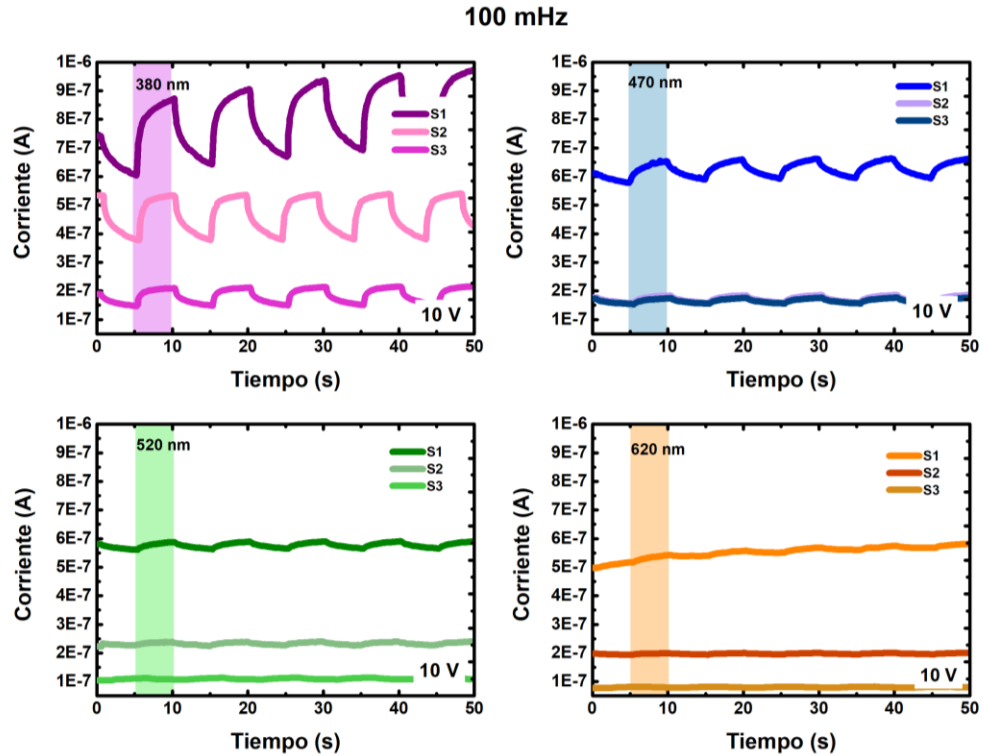


Figura 4.17. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V, bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.

En las Figura 4.18 y Figura 4.19 se presentan los resultados obtenidos al incrementar la frecuencia de modulación de la iluminación a 500 mHz y 1 Hz para las diferentes longitudes de onda utilizadas. Al aumentar la frecuencia, las longitudes de onda superiores al UV producen fotocorriente prácticamente imperceptible en los tres dispositivos. Además, la fotocorriente generada bajo irradiación UV disminuye considerablemente debido al tiempo de iluminación, en donde para 500 mHz es de 1 s, mientras que para 1 Hz es de 0.5 s. En ambos casos, evaluando el dispositivo S1 bajo irradiación UV, el dispositivo logra generar 100 nA de fotocorriente, en contraste con las mediciones a menor frecuencia, donde la corriente generada alcanzó 400 nA para 10 mHz y 300 nA para 100 mHz, valores que coinciden aproximadamente con la fotocorriente generada a 10 V en las curvas I–V de la Figura 4.11. Los resultados confirman que el incremento de la frecuencia limita la capacidad de generación de fotocorriente del dispositivo.

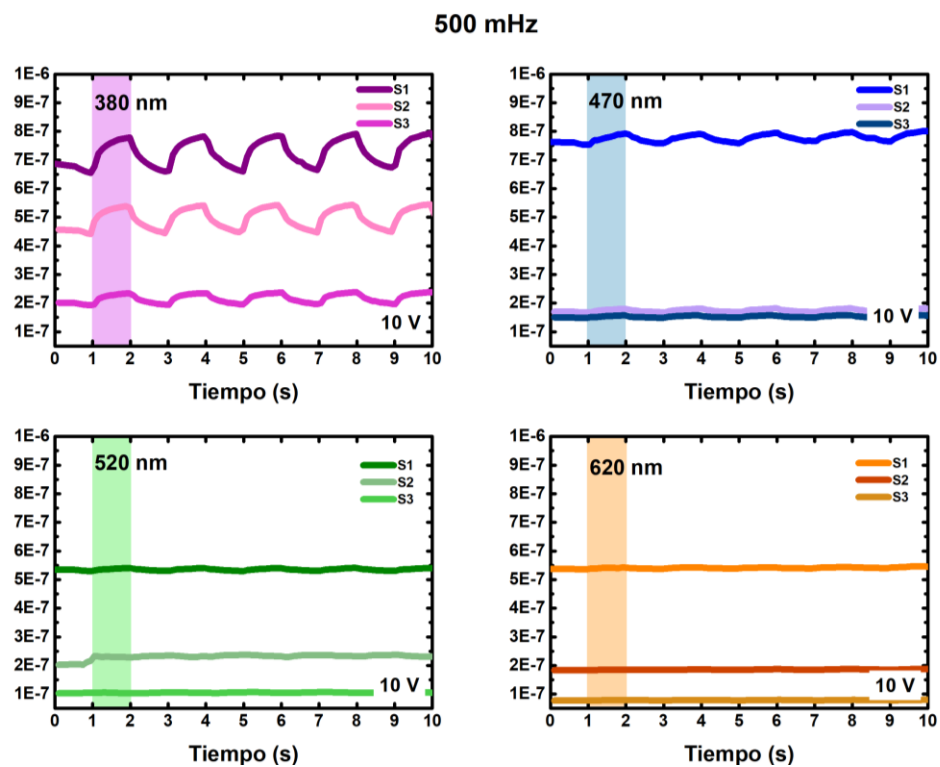


Figura 4.18. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V, bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.

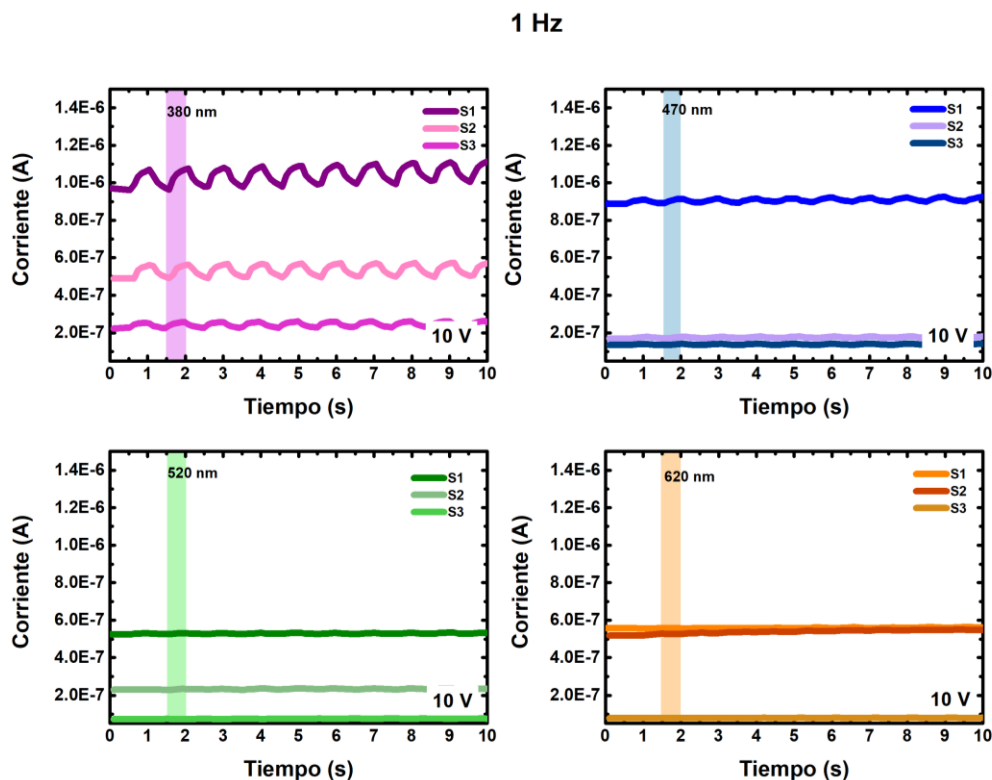


Figura 4.19. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S1, S2 y S3, polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.

4.3.2 Dispositivos con contactos de Al

Primero se obtuvieron las curvas I–V de todos los dispositivos en el orden la Tabla 4.4(a) y después en el orden de la Tabla 4.4(b), la Figura 4.20 corresponde al dispositivo S4, la Figura 4.21 corresponde al dispositivo S5 y la Figura 4.22 corresponde al dispositivo S6.

En las Figura 4.20, Figura 4.21 y Figura 4.22 se observa una evidente repetibilidad en las curvas I–V, independientemente del orden de medición empleado (Tabla 4.4(a) o Tabla 4.4(b)). Por ello, para los análisis más detallados, se consideraron únicamente las curvas I–V obtenidas en el orden de medición establecido en la Tabla 4.4(a).

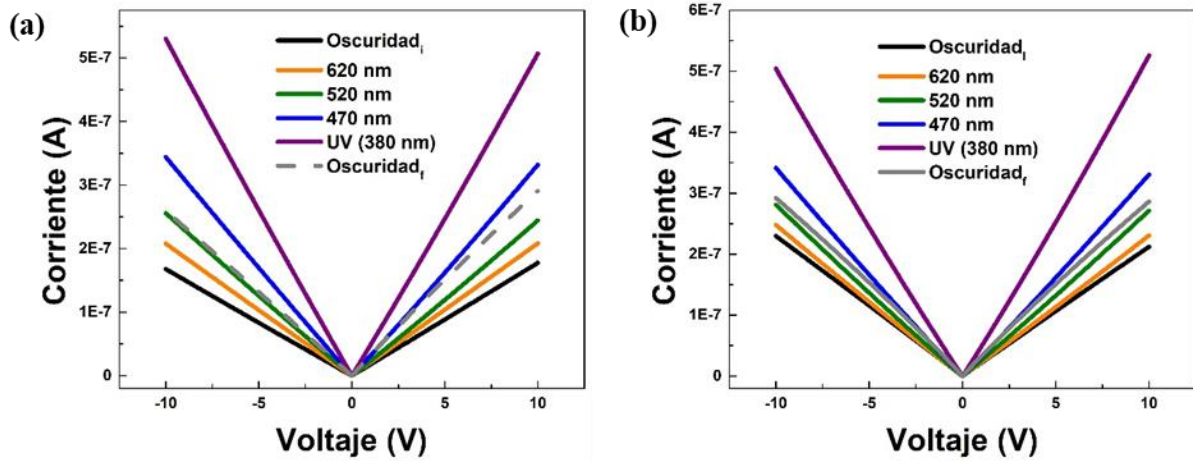


Figura 4.20. Curvas I-V del dispositivo S4 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

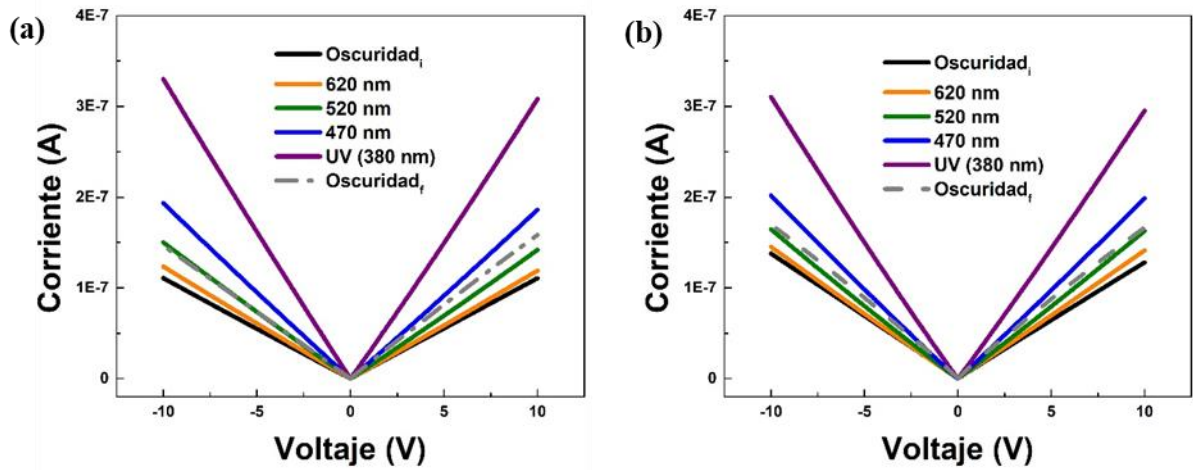


Figura 4.21. Curvas I-V del dispositivo S5 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a) y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

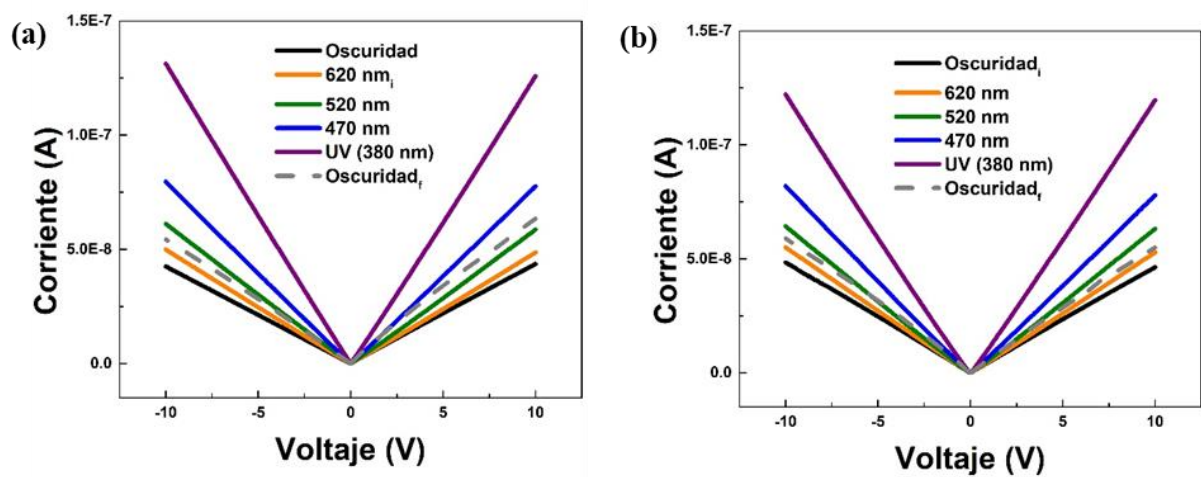


Figura 4.22. Curvas I–V del dispositivo S6 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a) y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Tabla 4.6 se observa una comparación de la resistencia eléctrica de los dispositivos a -10 V y a 10 V en oscuridad inicial, bajo incidencia de radiación UV y en oscuridad posterior a dicha incidencia.

Tabla 4.6. Resistencia eléctrica de los dispositivos S4, S5 y S6 a ± 10 V.

Dispositivo	Oscuridad _i		Radiación UV		Oscuridad _f	
	-10 V	10 V	-10 V	10 V	-10 V	10 V
S4	59.64 M Ω	56.31 M Ω	18.86 M Ω	19.72 M Ω	38.55 M Ω	34.37 M Ω
S5	90.27 M Ω	90.33 M Ω	30.27 M Ω	32.44 M Ω	68.38 M Ω	63.11 M Ω
S6	235.04 M Ω	229.41 M Ω	76.11 M Ω	79.38 M Ω	183.79 M Ω	157.47 M Ω

En la Figura 4.23 se presenta una comparación gráfica de los resultados de los dispositivos S4, S5 y S6. En los dispositivos S4 y S5, donde solo se varió w aumentando su valor $10 \mu\text{m}$ y manteniendo el mismo valor de g , se observa que w influye en la resistencia eléctrica, debido a que en el dispositivo S5 se observó un incremento de la resistencia eléctrica en todas las condiciones. Bajo incidencia de radiación UV, ambos dispositivos disminuyeron su resistencia eléctrica, el dispositivo S4 disminuyó un 66.7% como se muestra en la Tabla 4.7,

respecto a su resistencia eléctrica en condiciones de oscuridad inicial, mientras que S5 disminuyo en promedio 65.3%, por lo que se puede concluir que S4 es un poco más sensible a la radiación UV. En cuanto a su recuperación, la medición en oscuridad final mostró PPC en ambos dispositivos ya que recuperan parcialmente en comparación al valor de la medición en oscuridad_i, sin embargo, S5 refleja una mayor recuperación en cuanto a su resistencia eléctrica inicial, recuperándose en un ~72.8%, en comparación con S4 que se recupera un 62.8%. En general, S5 presenta resistencias un 66.3% más altas que S4.

Comparando los dispositivos S5 y S6, en donde para S6 se aumentó 10 μm de w y g respectivamente. En cuanto a la sensibilidad a la radiación UV, ambos presentan una disminución muy cercana: S5 65.3% y S6 66.5%, con una diferencia de 1.2%. En cuanto a la recuperación de su resistencia eléctrica en oscuridad inicial, ambos presentan PPC, ambos se recuperan en un ~73%. El incremento de w y g no representa un cambio notable en cuanto a sensibilidad y recuperación, sin embargo, en promedio, S6 presenta resistencias un 154.8% más altas que S5.

No se observan diferencias significativas entre las características de sensibilidad y recuperación de los 3 dispositivos, sin embargo, en cuanto a los valores absolutos de resistencia eléctrica, las diferencias son notables y dependen directamente de w y g .

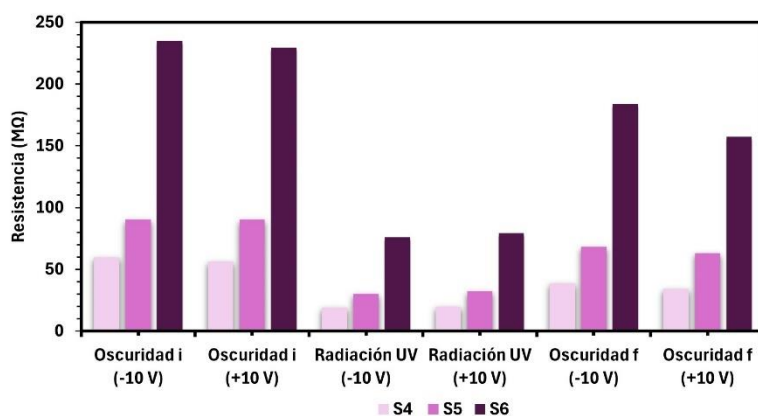


Figura 4.23. Gráfica comparativa de la resistencia eléctrica de los dispositivos S4, S5 y S6.

Tabla 4.7. Comparación del porcentaje de disminución de resistencia eléctrica al incidir radiación UV y la recuperación de la resistencia eléctrica en su estado en oscuridad inicial.

Dispositivo	% Disminución de resistencia eléctrica	% Recuperación de resistencia eléctrica inicial
S4	66.7%	62.8%
S5	65.3%	72.8%
S6	66.5%	73.4%

En la Figura 4.24(a) se muestra la relación de la corriente bajo iluminación UV y la corriente inicial en oscuridad, en función del voltaje aplicado en un rango de 0 a ± 10 V para los dispositivos S4, S5 y S6. En todos los casos se observa un valor constante cercano a 3 para ambas polarizaciones, con una ligera variación entre los resultados de ambos intervalos de medición, lo que evidencia que la respuesta de los dispositivos es la misma independientemente de la polarización aplicada, ya que la corriente en oscuridad también aumenta al incrementar el voltaje de polarización. Además, los resultados sugieren que las dimensiones de w y g de los contactos interdigitados no afectan significativamente la respuesta de los dispositivos, ya que solo influyen en sus niveles absolutos de corriente.

Por otro lado, en la Figura 4.24(b), se observa la relación de rechazo del dispositivo frente a longitudes de onda visibles (620 nm, 520 nm y 470 nm). Los resultados de los tres dispositivos coinciden, mantienen la misma tendencia, coherente con la energía de cada longitud de onda. En oscuridad, la relación llega a 3, disminuyendo a 2.7 a 620 nm y alcanzando 1.5 a 470 nm, longitud de onda más energética. Además, en los tres casos, los valores permanecen constantes en el rango de polarización aplicado (0 a ± 10 V). Sin embargo, aunque los dispositivos muestran selectividad frente a la radiación visible, la corriente bajo iluminación UV solo es tres veces mayor que en oscuridad y para la longitud de onda de 470 nm solo es 1.5 veces mayor, mostrando poca eficiencia para la detección UV.

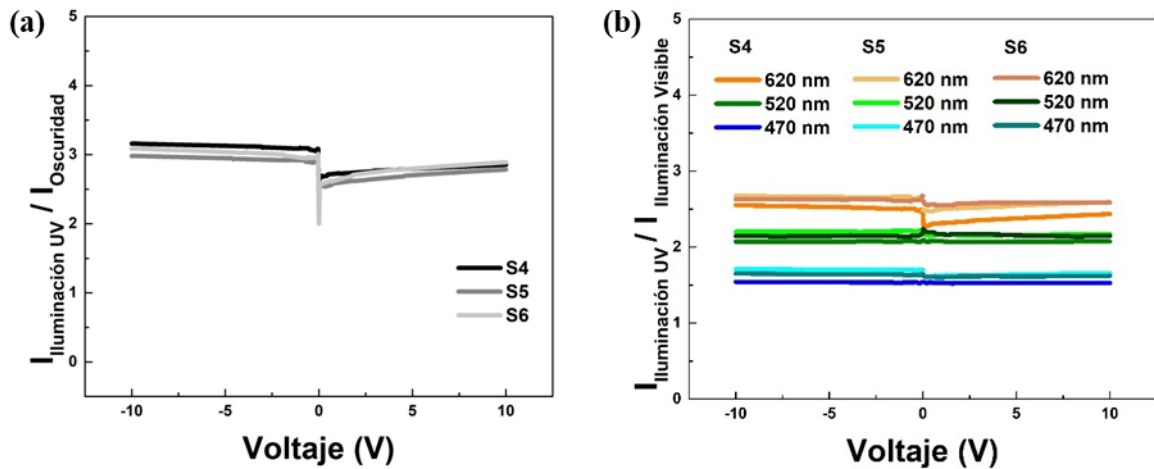


Figura 4.24. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V para los dispositivos S4, S5 y S6. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S4, S5 y S6.

La Figura 4.25 muestra la relación que existe entre las corrientes obtenidas con un barrido de voltaje positivo y negativo bajo radiación UV, se aprecia un valor constante de ~ 0.9 , cercano a 1 en todos los dispositivos, lo que evidencia una simetría casi perfecta en la conducción bajo ambas polarizaciones, característica asociada a la formación de contactos óhmicos entre el Al y ZnO.

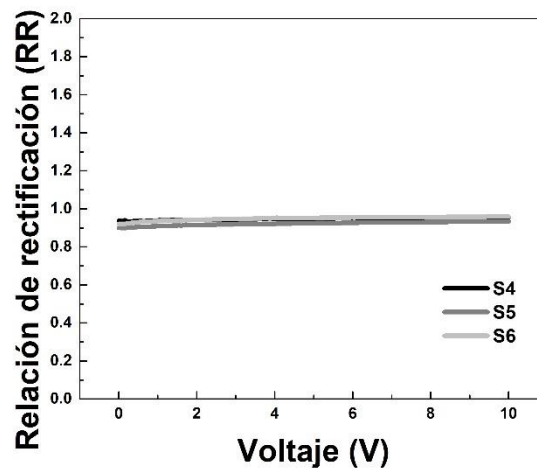


Figura 4.25. Relación de rectificación de los dispositivos S4, S5 y S6.

En la Figura 4.26 y Figura 4.27 se presenta la respuesta temporal de la corriente para los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados constantemente a 10 V, con iluminación de 380 nm, 520 nm y 620 nm modulada a una frecuencia de encendido–apagado de 10 mHz (Figura 4.26) y 100 mHz (Figura 4.27), el área sombreada representa un intervalo en el que la iluminación incide sobre el dispositivo.

Bajo ambas modulaciones de frecuencia de iluminación, los tres dispositivos exhiben una respuesta caracterizada por una mayor generación de fotocorriente bajo radiación UV, al igual que en los dispositivos con un contacto de Al y otro de AgO, se aprecia un incremento abrupto de la corriente al encender la iluminación, seguido de una generación de fotocorriente más gradual, así como un descenso abrupto al apagar la iluminación, con una recuperación lenta que no regresa a su valor de corriente inicial de corriente en oscuridad, comportamiento asociado al efecto de PPC.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la fotocorriente generada bajo radiación UV es aproximadamente tres veces mayor que la generada bajo una incidencia de 470 nm, que corresponde a la longitud de onda más energética después del UV. Para las demás longitudes de onda evaluadas, la amplitud de las señales es mínima, lo que indica una baja generación de fotocorriente y confirma que los dispositivos discriminan adecuadamente las longitudes de onda alejadas del UV. En general, S4 exhibe la corriente base y la fotocorriente generada más altas, seguido de S5 y S6.

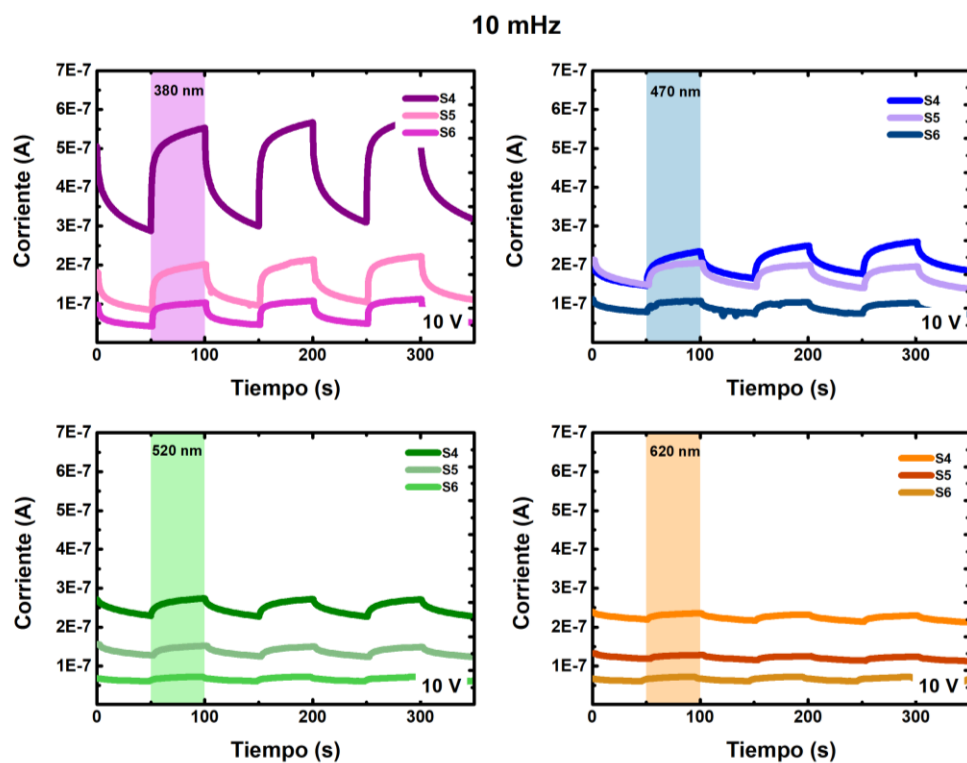


Figura 4.26. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.

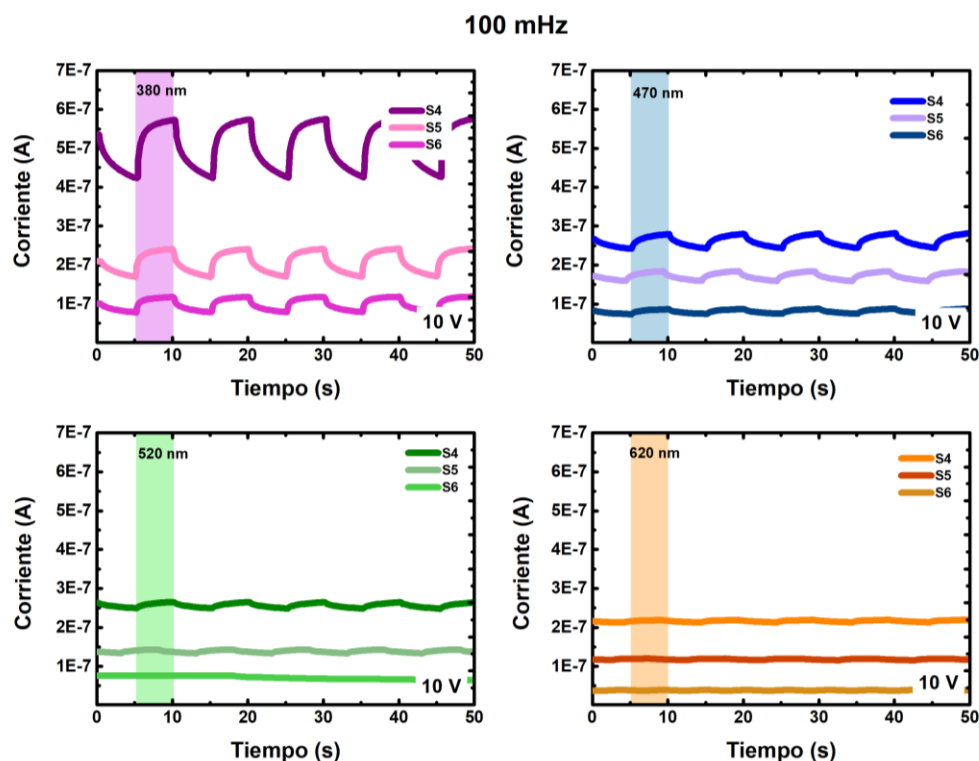


Figura 4.27. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.

En cuanto a la respuesta temporal en modulaciones de 500 mHz (Figura 4.28) y 1 Hz (Figura 4.29), los tres dispositivos mantienen respuesta ante la radiación UV; sin embargo, en comparación con las modulaciones a menor frecuencia, la fotocorriente generada se ve disminuida. Para la longitud de onda de 470 nm, las amplitudes de la señal se vuelven casi imperceptibles, mientras que para 520 y 620 nm la corriente permanece prácticamente constante.

La reducción del tiempo de iluminación limita la generación de fotocorriente, ya que los portadores de carga no alcanzan a acumularse de forma significativa en ciclos de encendido cortos. En ambas modulaciones de frecuencia se aprecia que el orden de magnitud de las corrientes se mantiene, siendo S4 el dispositivo que presenta las corrientes más altas, seguido de S5 y S6.

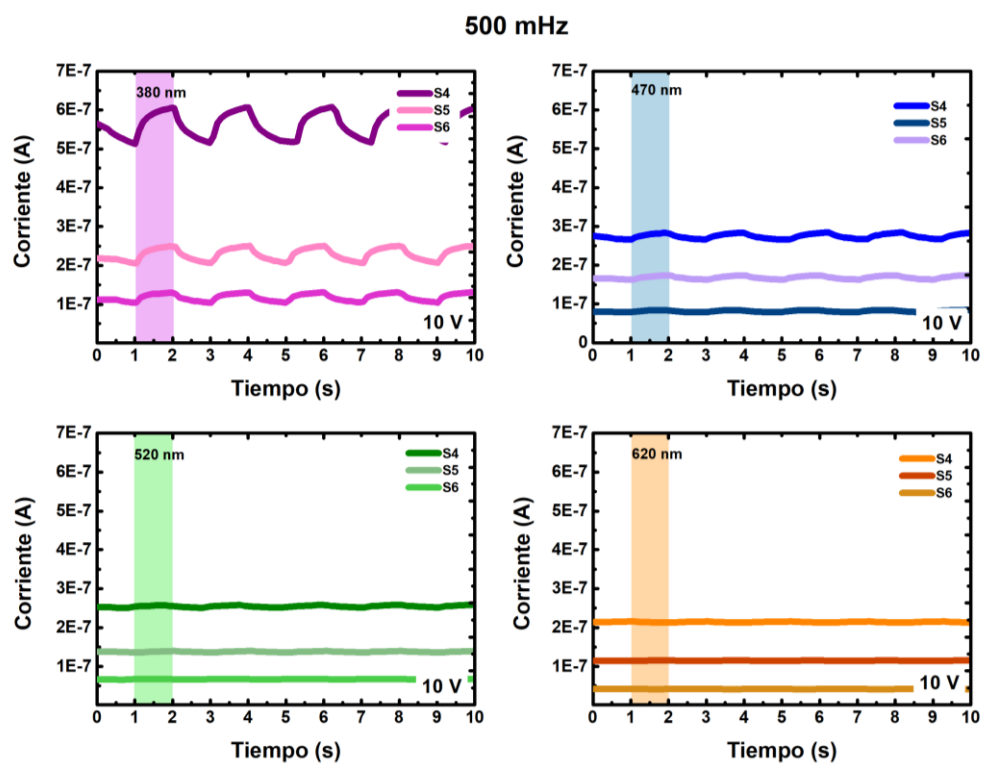


Figura 4.28. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.

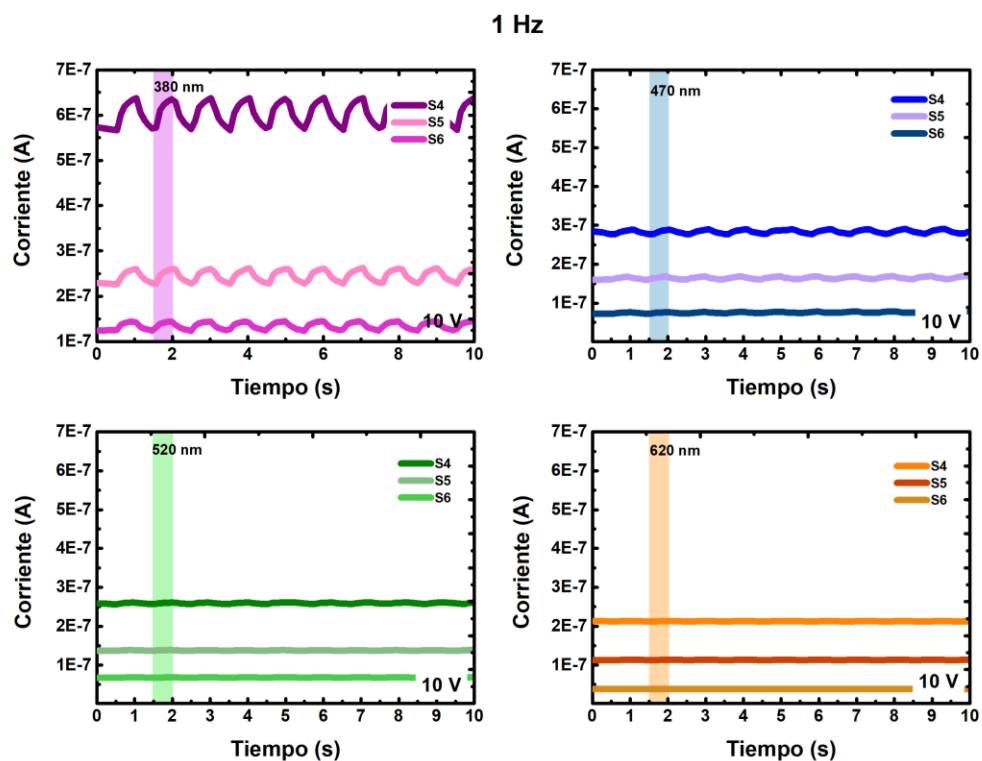


Figura 4.29. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S4, S5 y S6 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.

4.3.3 Dispositivos con contactos de AgO

Primero se obtuvieron las curvas I–V de todos los dispositivos en el orden la Tabla 4.4(a) y después en el orden de la Tabla 4.4(b), la Figura 4.30 corresponde al dispositivo S7, la Figura 4.31 corresponde al dispositivo S8 y la Figura 4.32 corresponde al dispositivo S9.

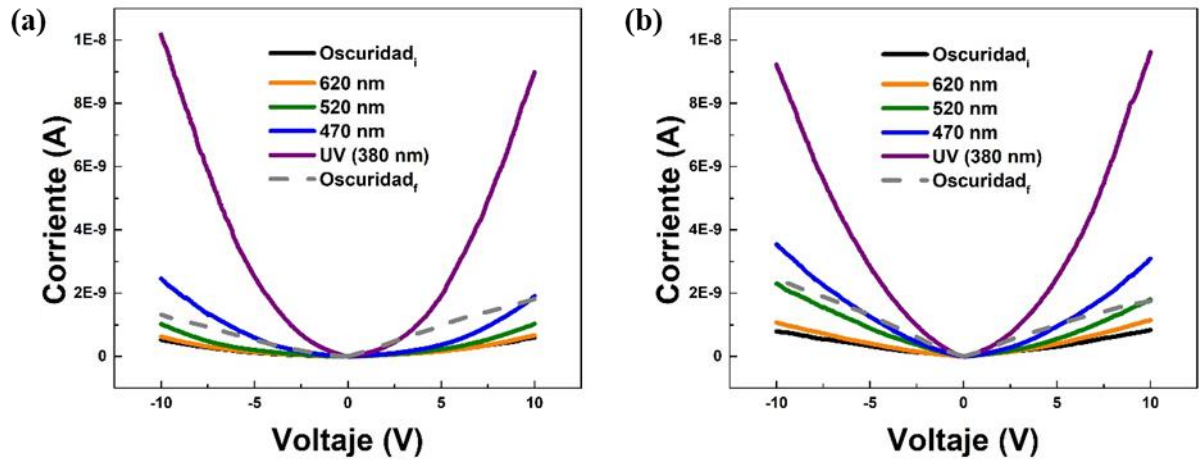


Figura 4.30. Curvas I-V del dispositivo S7 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

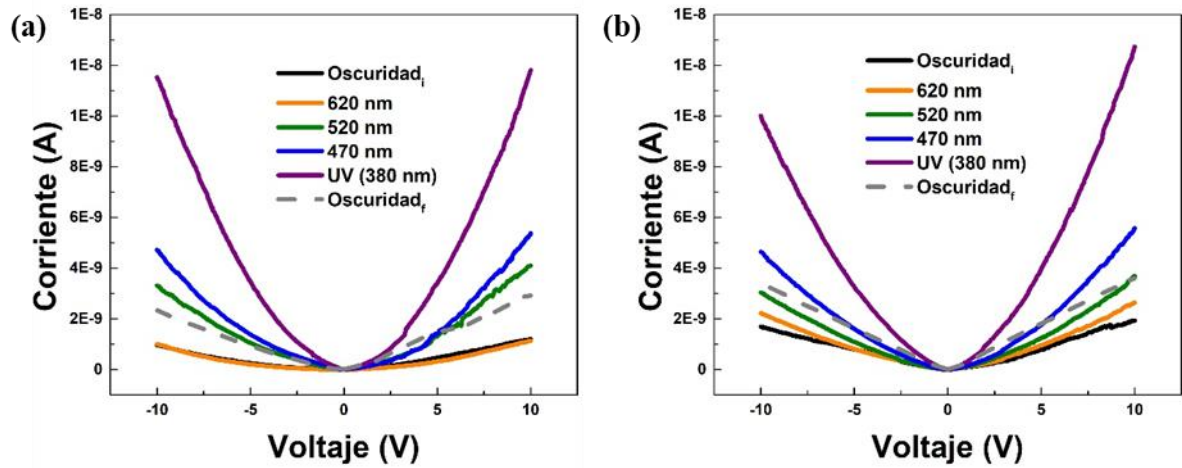


Figura 4.31. Curvas I-V del dispositivo S8 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

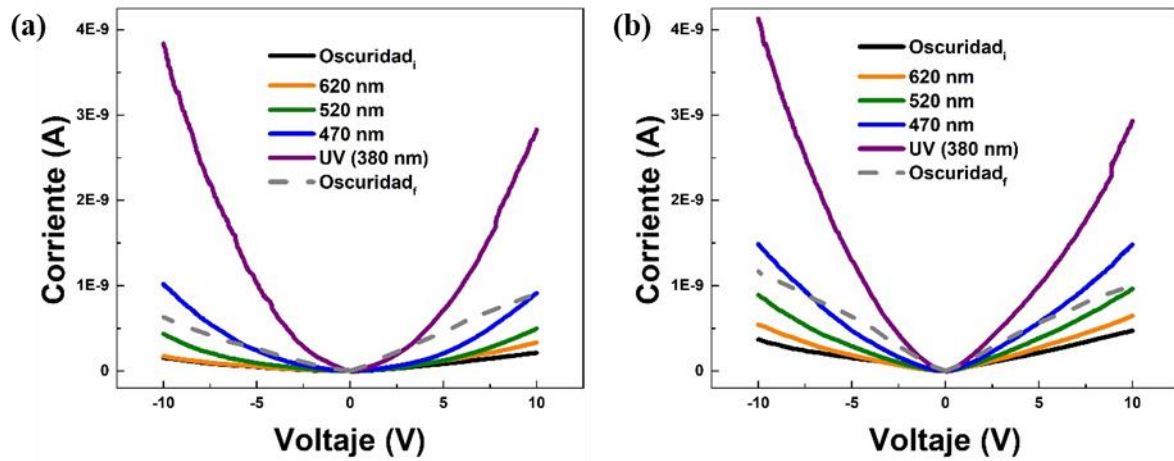


Figura 4.32. Curvas I–V del dispositivo S9 obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Tabla 4.8 se presenta una comparación de las resistencias eléctricas obtenidas en oscuridad inicial, bajo irradiación UV y en oscuridad posterior a la exposición UV, a -10 V y 10 V, para los dispositivos S7, S8 y S9, considerando únicamente las mediciones realizadas en el orden de los barridos descritos en la Tabla 4.4(a). Se observa que las resistencias en oscuridad inicial se encuentran en el orden de gigaohmios, disminuyendo hasta el orden de megaohmios bajo exposición a la radiación UV, evidenciando la fotorrespuesta de los dispositivos. El dispositivo S8 exhibe las menores resistencias bajo irradiación UV, con valores comparables a los de S7, mientras que el dispositivo S9 exhibe las mayores resistencias en todas las condiciones evaluadas, lo cual se atribuye a que es el dispositivo con mayor w y g . Posterior a la irradiación UV, todos los dispositivos registran valores inferiores a la resistencia inicial en oscuridad, debido al efecto de PPC.

Tabla 4.8. Resistencia eléctrica de los dispositivos S7, S8 y S9 a ± 10 V.

Dispositivo	Oscuridad _i		Radiación UV		Oscuridad _f	
	-10 V	10 V	-10 V	10 V	-10 V	10 V
S7	19 G Ω	16.8 G Ω	982 M Ω	1.11 G Ω	7.58 G Ω	5.52 G Ω
S8	10.4 G Ω	8.4 G Ω	867 M Ω	846 M Ω	4.29 G Ω	3.44 G Ω
S9	64.6 G Ω	46.8 G Ω	2.61 G Ω	3.55 G Ω	15.8 G Ω	11 G Ω

Por otro lado, al evaluar detalladamente el comportamiento de los dispositivos mediante la relación entre la corriente obtenida bajo iluminación UV y la corriente inicial en oscuridad (Figura 4.33(a)), se descartaron los resultados obtenidos entre -2 y 1 V debido a que se considera ruido en las mediciones. En el rango de 0 a 10 V, se observa que el dispositivo S7 presenta los valores más altos, seguido de S9 y S8, con los más bajos. Sin embargo, los tres dispositivos se mantienen en un rango similar, entre 15 y 20 aproximadamente. En el intervalo de 0 a -10 V, el dispositivo S9 supera los 20 , seguido de S7, con valores cercanos a 20 , y S8, con valores del orden de 15 . Los resultados indican que los dispositivos generan una mayor fotocorriente a voltaje negativo. Sin embargo, en ambos rangos de voltaje, la corriente medida bajo irradiación UV es al menos 15 veces mayor que la corriente inicial en oscuridad, lo que confirma una alta sensibilidad de los dispositivos a la radiación UV.

En cuanto a la selectividad de los dispositivos frente a la incidencia de longitudes de onda distintas al UV, mostrada en la Figura 4.33(b), se observa que las longitudes de onda de 620 nm y 520 nm exhiben valores similares al de la Figura 4.33(a), mientras que para 470 nm la respuesta bajo radiación UV es solo aproximadamente tres veces mayor, evidenciando una selectividad más limitado en esta longitud de onda.

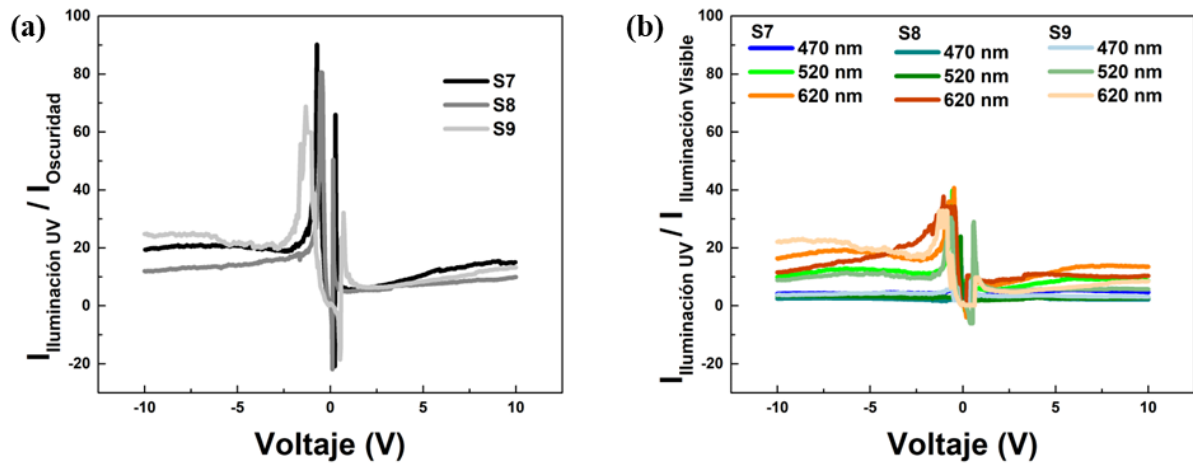


Figura 4.33. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V de los dispositivos S7, S8 y S9. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos S7, S8 y S9.

En cuanto a la RR observado en la Figura 4.34, al descartar el intervalo de 0 a 0.5 V debido al ruido observado, se aprecia un comportamiento relativamente constante con valores cercanos a 1 , lo que evidencia la posible formación de contactos óhmicos en los dispositivos, indicando una conducción de corriente similar en voltaje negativo y positivo, con ligeras variaciones atribuibles al orden de las mediciones y a los efectos de PPC. Por otro lado, se observa que S8 alcanza el valor de 1 , seguido de S7 con aproximadamente 0.8 y S9 con valores de aproximadamente 0.7 . Los valores menores que 1 se asocian a que el dispositivo presenta una mayor conducción en voltaje negativo.

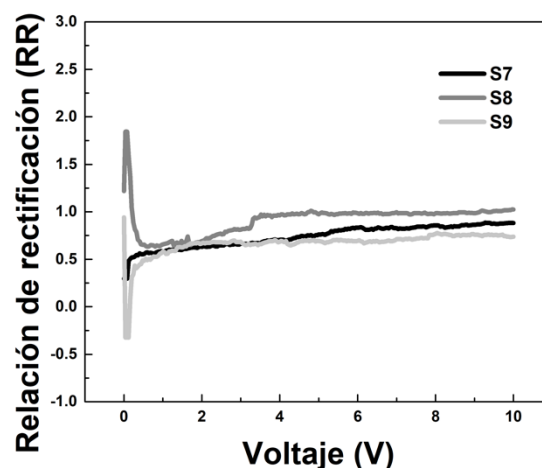


Figura 4.34 Relación de rectificación de los dispositivos S7, S8 y S9.

A continuación se muestra la respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9, polarizados de manera constante a 10 V, bajo iluminación de 380 nm, 520 nm y 620 nm, modulada a una frecuencia de encendido–apagado de 10 mHz (Figura 4.35), 100 mHz (Figura 4.36), 500 mHz (Figura 4.37) y 1 Hz (Figura 4.38). El área sombreada en cada gráfica indica el intervalo en el que la iluminación incide sobre el dispositivo.

Los dispositivos bajo incidencia de iluminación modulada a 10 mHz y 100 mHz muestran el mismo comportamiento en el incremento de la corriente que los dispositivos fabricados con un contacto de Al y otro de AgO, así como aquellos con dos contactos de Al. Dicho comportamiento se caracteriza por un incremento abrupto de la corriente al encender la iluminación, seguido de una generación gradual de fotocorriente, durante 50 s para 10 mHz y 5 s para 100 mHz, seguido de un descenso abrupto al apagar la iluminación, acompañado de una relajación lenta que no retorna al valor inicial de corriente en oscuridad, efecto asociado a la PPC.

La comparación de la fotocorriente generada bajo radiación UV revela que los dispositivos S7 y S8 mantienen valores similares en ambas frecuencias de modulación; sin embargo, bajo iluminación de 470 nm, la fotocorriente generada es menor en S8. Para longitudes de onda de 520 nm y 620 nm, la fotocorriente disminuye hasta volverse prácticamente constante en ambos casos, lo que indica una baja generación de portadores y confirma la selectividad de los dispositivos ante la radiación UV.

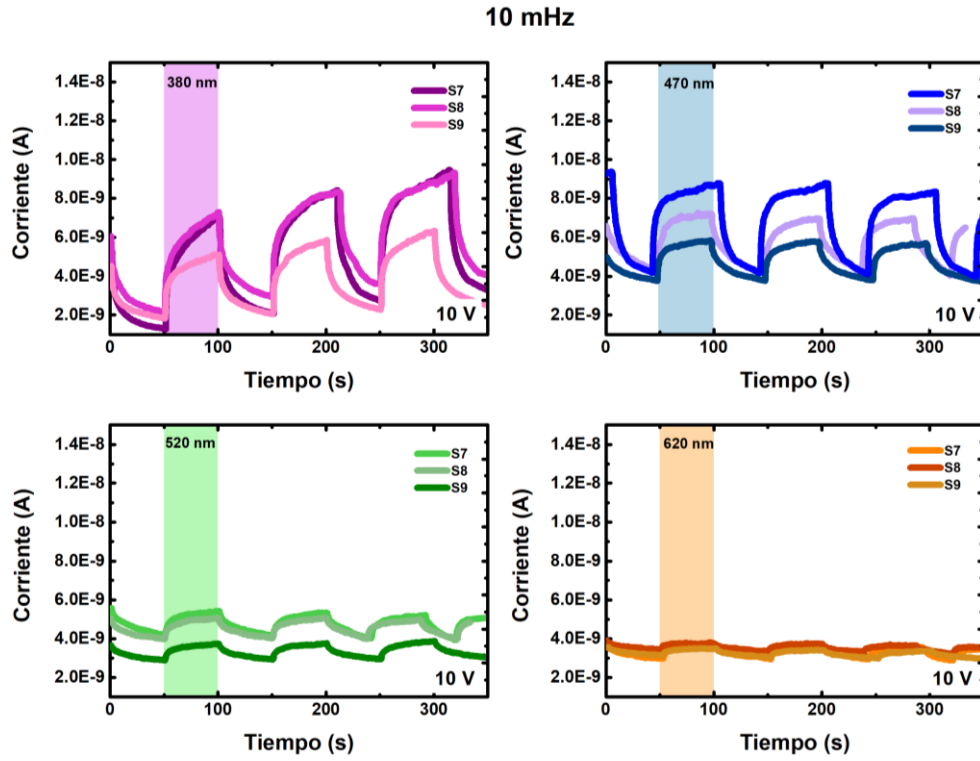


Figura 4.35. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 10 mHz.

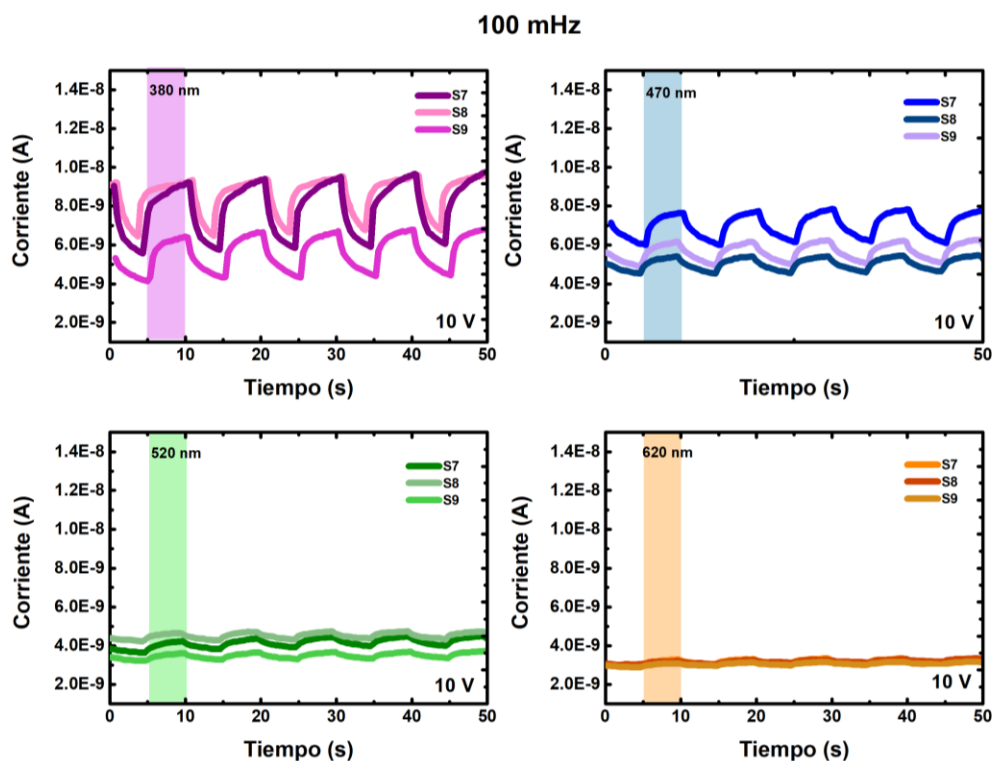


Figura 4.36. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 100 mHz.

En cuanto a la modulación de iluminación a 500 Hz (Figura 4.37) y 1 Hz (Figura 4.38), los dispositivos mantienen respuesta ante la radiación UV, sin embargo, en comparaciones con las modulaciones a menor frecuencia, se observa una disminución en la generación de fotocorriente en ambas frecuencias de modulación, en donde para 500 mHz la iluminación permanece encendida 1 s y para 1 Hz durante 0.5 s, indicando una menor generación de portadores de carga debido a la falta de tiempo de exposición a la radiación UV. Para longitudes de onda visibles (470 nm, 520 nm y 620 nm), la respuesta temporal se debilita hasta permanecer prácticamente constante, confirmando la selectividad de los dispositivos ante la radiación UV. En general, los resultados indican que los dispositivos se ven limitados ante frecuencias de modulación más altas debido a la dependencia del tiempo de exposición a la radiación UV para la generación de fotocorriente.

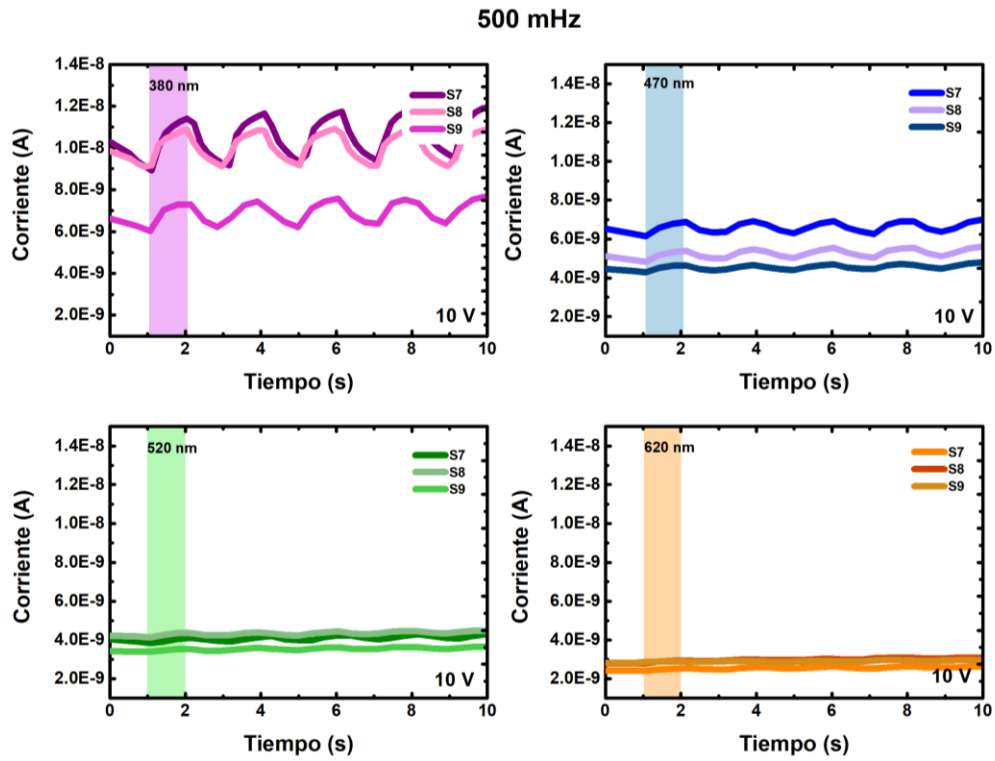


Figura 4.37. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 500 mHz.

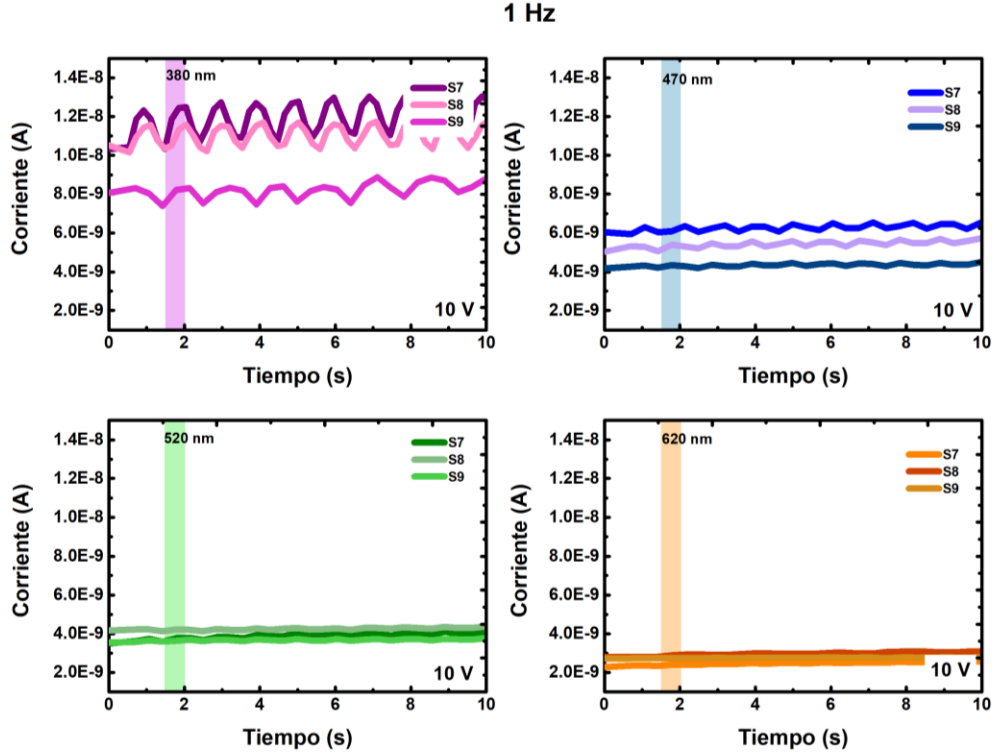


Figura 4.38. Respuesta temporal de la corriente de los dispositivos S7, S8 y S9 polarizados a 10 V bajo iluminación con diferentes longitudes de onda moduladas a 1 Hz.

4.4 Caracterización eléctrica de las uniones Al/ZnO/AgO/Ti/Au

En la Figura 4.39 se observan las curvas I–V de los dispositivos D1, D2 y D3. Los tres dispositivos se sometieron a incidencia de radiación UV, sin embargo, no se observó incremento en la corriente, por lo que no presentaron un comportamiento fotodetector, esto se asocia al diseño de los dispositivos, ya que la mayor parte de la capa de ZnO se recubrió por AgO/Ti/Au, limitando la generación de fotocorriente debido a la interacción de la capa activa de ZnO con la radiación UV.

Por otro lado, el dispositivo D1 de menor área de contacto ($400 \mu\text{m}^2$) exhibe la corriente más baja en el rango de voltaje evaluado, en cambio D3 ($3600 \mu\text{m}^2$) presenta valores de corriente ligeramente menores a D2 ($1600 \mu\text{m}^2$), por lo que el análisis I–V – área no presenta una tendencia clara en cuanto a la relación del aumento de conducción y la geometría de las uniones.

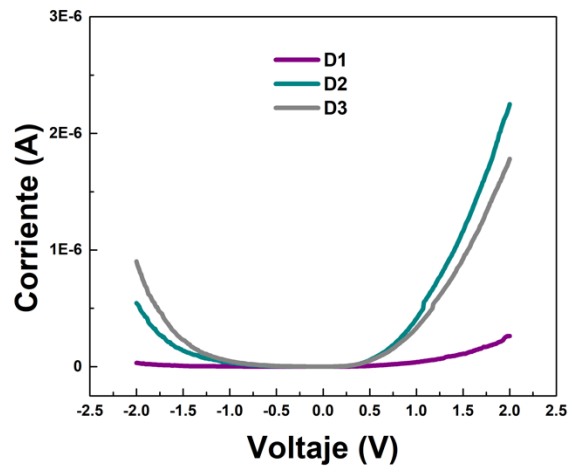


Figura 4.39. Curvas I-V de los dispositivos D1, D2 y D3.

En la Figura 4.40 se presenta el análisis de la RR, en el que se evidencia un comportamiento dependiente del área de contacto entre los materiales. Se observa que, a menor área de unión, mayor es el valor de RR. El dispositivo D1 alcanza un valor más rectificante cercano a 35, mientras que D2 alcanza 15 y D3 alcanza 8. Los resultados indican que el área de contacto favorece la conducción de los dispositivos en voltaje positivo, sobre todo de 0.5 a 1 V, ya que se observa una disminución de la RR a partir de 1 V.

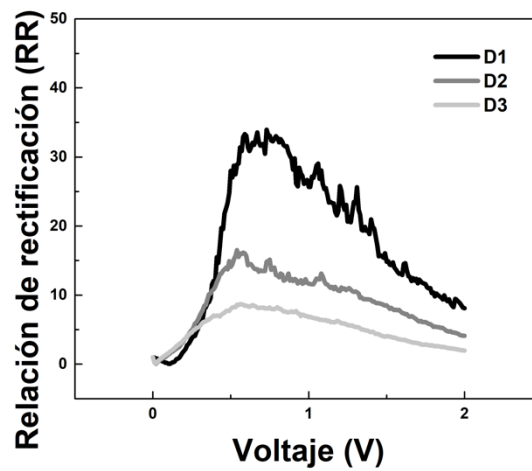


Figura 4.40. Relación de rectificación de los dispositivos D1, D2, D3.

4.5 Caracterización eléctrica de fotodetectores basados en nanopolvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía

Se realizó la caracterización de tres dispositivos fabricados con el mismo proceso y con contactos interdigitados idénticos. Los tres dispositivos se seleccionaron con la intención de evaluar el desempeño eléctrico en función del grado de uniformidad visible de la capa de nanopolvos de ZnO depositada sobre los contactos, eligiéndose un dispositivo con mayor uniformidad (D1–Nps), otro con media uniformidad (D2–Nps) y otro con baja uniformidad (D3–Nps), como se observa en la Figura 4.41.

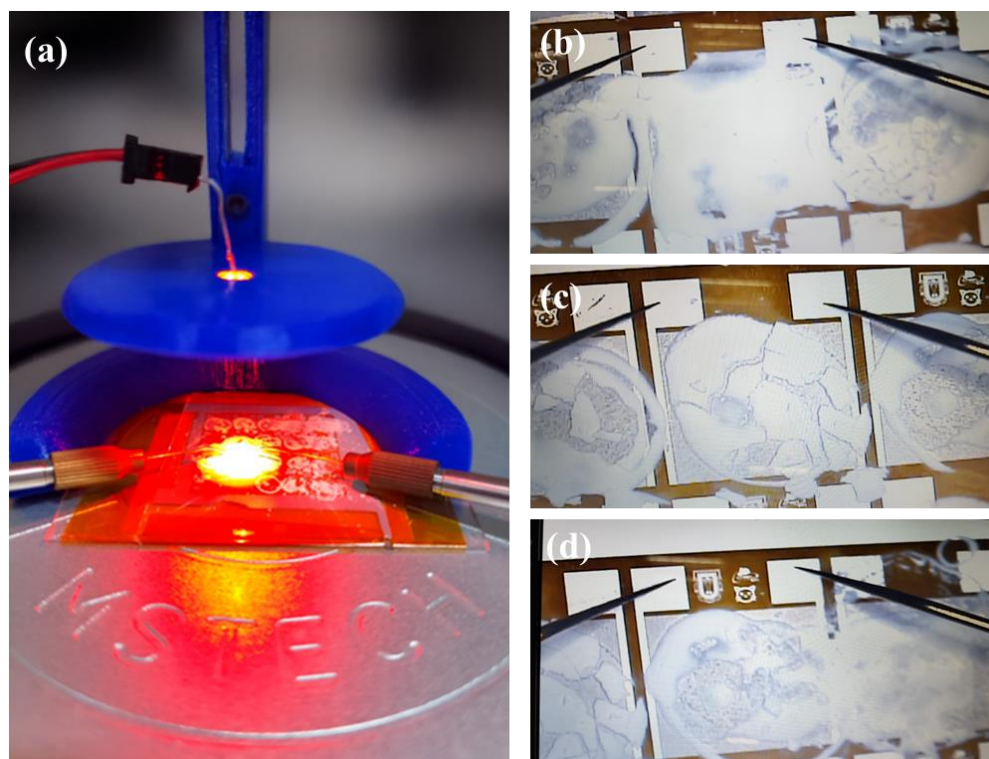


Figura 4.41. (a) Fotografía del proceso de caracterización eléctrica. (b) Dispositivo con mayor uniformidad de nanopolvos de ZnO (D1–Nps). (c) Dispositivo medianamente uniforme (D2–Nps). (d) Dispositivo con menor uniformidad (D3–Nps).

Se obtuvieron las curvas I–V en oscuridad y bajo iluminación con diferentes longitudes de onda (620 nm, 520 nm, 470 nm y 380 nm), las fuentes de iluminación se colocaron perpendicularmente a 30 mm del área activa de los dispositivos. Las curvas I–V se obtuvieron

con un Keithley 4200 SCS a temperatura ambiente, configurando barridos de 0 a ± 10 V con pasos lentos de 0.04 V. La primera serie de mediciones en todos los dispositivos siguió la secuencia de la Tabla 4.4(a), en donde se efectuaron las mediciones iniciando con un barrido de 0 a 10 V en oscuridad, seguido de uno de 0 a -10 V bajo las mismas condiciones, posteriormente se repitió el orden de la secuencia de barridos desde la iluminación con la longitud de onda más larga (620 nm) hasta la más corta (380 nm) y finalizando nuevamente en oscuridad.

Una vez completada la primera serie de mediciones, se procedió a realizar los barridos de voltaje descritos en la Tabla 4.4(b). En este caso, se inició con barridos con voltaje positivo (0 a 10 V), iniciando en oscuridad, seguido nuevamente por mediciones desde la longitud de onda más larga a la más corta y finalizando en oscuridad. El proceso se repitió con barridos de voltaje negativo de 0 a -10 V bajo el mismo orden de condiciones.

En la Figura 4.42 se observan las curvas I–V del dispositivo con mayor uniformidad, en la Figura 4.42(a), se observa que la medición en oscuridad realizada de 0 a 10 V, después de incidir radiación UV en el dispositivo D1–Nps, presenta una corriente mayor, con un valor de 17.99 μA , que la obtenida bajo radiación UV, con un valor de 10.19 μA , mientras que en los resultados obtenidos de los barridos de 0 a -10 V el valor de la corriente bajo irradiación UV (20.62 μA) y en oscuridad después de exponer al UV el dispositivo (19.26 μA) resultan similares.

Además, se observa un comportamiento similar en la serie de mediciones mostrada en la Figura 4.42(b), las corrientes aumentan aun bajo longitudes de onda diferentes al UV e incluso en oscuridad. Bajo irradiación UV a 10 V se alcanza un valor de 22.14 μA , mientras que a -10 V se alcanzan 26.50 μA . En oscuridad, después de irradiar con UV, se registran valores de 20.63 μA a 10 V y de 24.41 μA a -10 V. Esto confirma la presencia de una PPC significativamente alta. Debido a este efecto, la corriente registrada bajo irradiación UV con polarización negativa es mayor, ya que, al realizar los barridos con voltaje negativo, en ambos casos el dispositivo se expuso previamente a la radiación, lo que favorece el atrapamiento de carga.

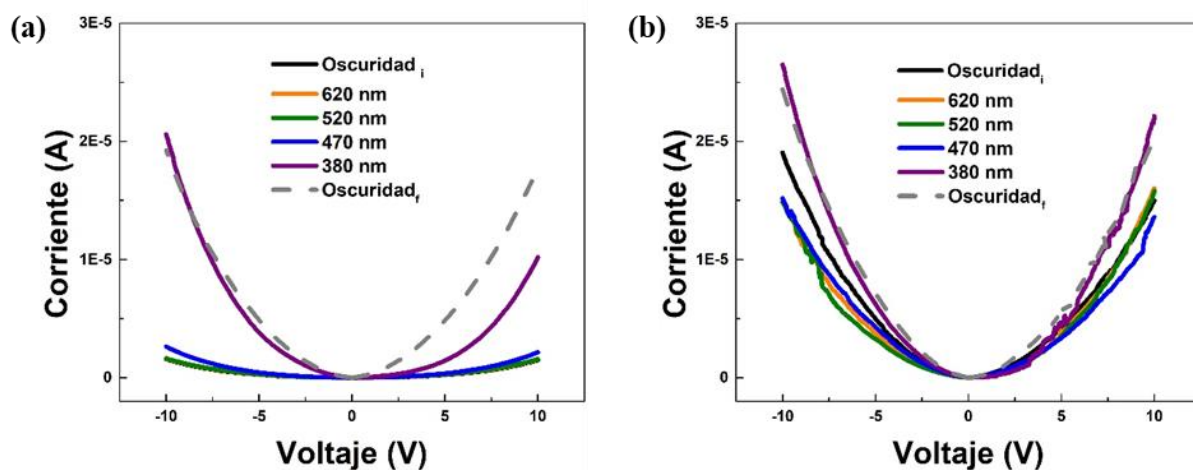


Figura 4.42. Curvas I–V del dispositivo con mayor uniformidad obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Figura 4.43 se observan las curvas I–V obtenidas del dispositivo con un depósito medianamente uniforme de nanopulvos de ZnO. En la Figura 4.43(a) se observa que la corriente bajo irradiación UV alcanza valores de 14.24 μA a 10 V y 24.26 μA a -10 V, lo que evidencia la generación de fotocorriente en el dispositivo. Sin embargo, la medición en oscuridad posterior a la exposición a la radiación UV exhibe valores altos de 16.98 μA a 10 V y 16.49 μA a -10 V, los cuales se mantienen elevados, indicando la presencia de PPC.

En la Figura 4.43(b), se observa un incremento general de las corrientes en comparación con la Figura 4.43(a). Bajo irradiación UV, la corriente alcanza 30.89 μA a 10 V y 50.61 μA a -10 V, mientras que, en oscuridad, después de irradiar, se registran 26.07 μA a 10 V y 42.21 μA a -10 V. El aumento de la corriente tras la exposición a la radiación UV confirma la acumulación de carga atrapada en cualquier orden de mediciones.

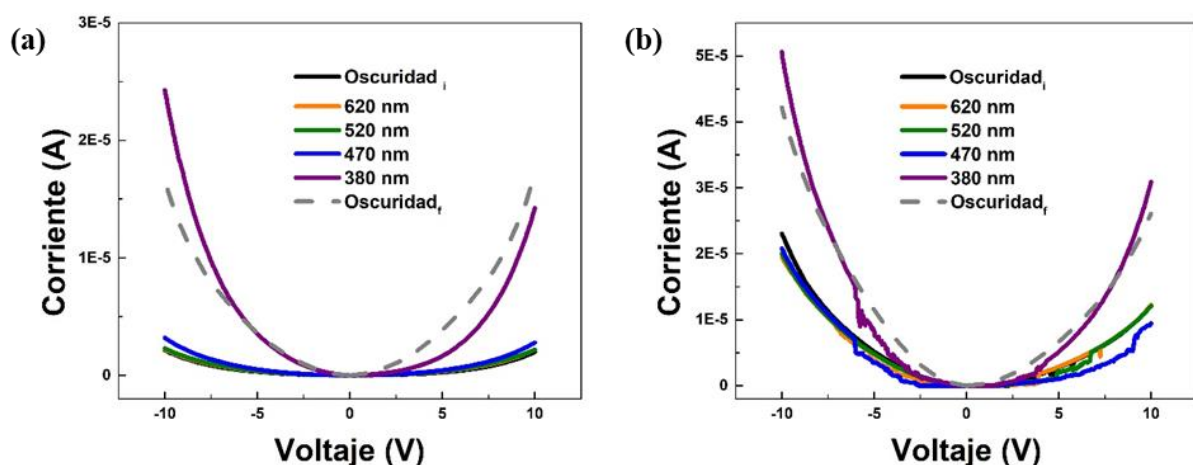


Figura 4.43. Curvas I–V del dispositivo medianamente uniforme obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Figura 4.44 se muestran las curvas I–V del dispositivo con un depósito poco uniforme de nanopulvos de ZnO. En la Figura 4.44(a) se observa que el dispositivo mantiene la misma tendencia que los dispositivos de mediana y alta uniformidad. Bajo irradiación UV, la corriente presenta valores de 26.45 μA a 10 V y de 38.32 μA a -10 V. Tras la exposición UV, las mediciones en oscuridad registran corrientes de 29.93 μA a 10 V y de 27.52 μA a -10 V, lo que evidencia nuevamente la presencia de PPC.

Por otro lado, la Figura 4.44(b) muestra un incremento en los valores de corriente. Bajo irradiación UV se alcanzan 41.61 μA a 10 V y 74.29 μA a -10 V. En oscuridad, después de irradiar con UV, se obtienen 37.48 μA a 10 V y 53.01 μA a -10 V, lo que refleja una tendencia similar a la obtenida antes con los demás dispositivos, por lo que la uniformidad o el aumento de la capa de nanopulvos de ZnO no parece indicar un incremento o disminución de PPC.

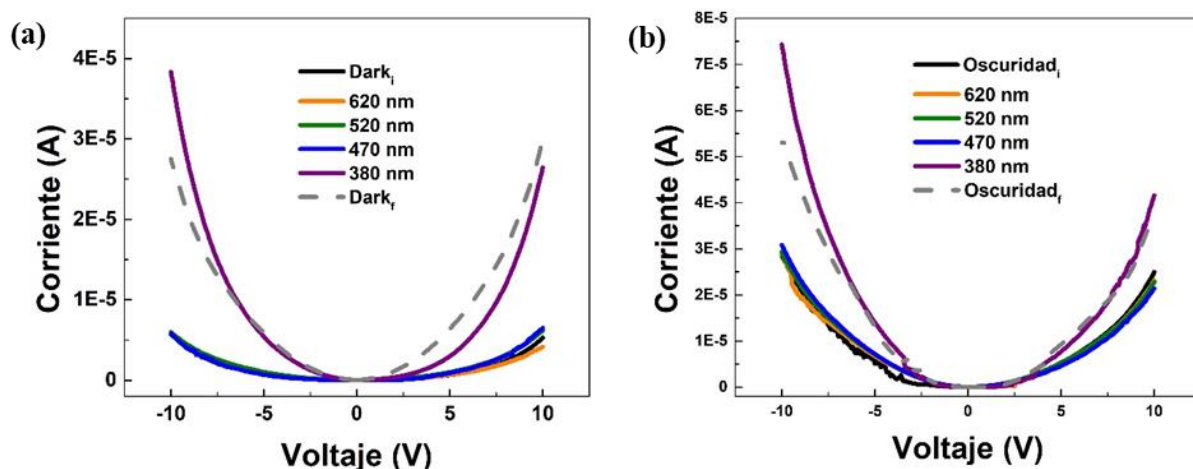


Figura 4.44. Curvas I-V del dispositivo poco uniforme obtenidas bajo diferentes secuencias de barrido de voltaje: (a) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(a), y (b) resultados correspondientes al orden de barridos descrito en la Tabla 4.4(b).

En la Figura 4.45(a) se muestra la diferencia entre la corriente bajo iluminación UV y la corriente inicial en oscuridad. En el intervalo de 0 a 10 V, los dispositivos D1-Nps y D2-Nps exhiben valores similares, que oscilan entre 4 y 7, mientras que D3-Nps presenta valores menores, del orden de 2.3 a 5. Por otro lado, con voltajes negativos, D1-Nps presenta valores entre 13 y 15.6, D2-Nps, entre 11 y 12, y D3-Nps, entre 6.7 y 5. Los resultados indican que el dispositivo con menor uniformidad presenta menor selectividad en la detección de la radiación UV.

En cuanto a la relación de rechazo frente al espectro visible, los resultados presentados en la Figura 4.45(b), muestran comportamientos distintos según la uniformidad del depósito. Para el dispositivo D1-Nps, la relación de rechazo a 620 nm y a 520 nm es prácticamente equivalente a la obtenida en oscuridad. Bajo iluminación a 470 nm, la relación disminuye, alcanzando un valor cercano a 5 en voltaje positivo y a aproximadamente 10 en voltaje negativo. El dispositivo D2-Nps presenta una relación más constante y estable cercana a 11 para 620 nm y 520 nm, mientras que a 470 nm alcanza valores cercanos a 10 con voltaje positivo y a 7.5 con voltaje negativo. Los resultados del dispositivo D3-Nps registran valores menores a 5 para voltajes positivos y aproximadamente 5 para voltajes negativos bajo radiación a 620 y 520 nm. Para 470 nm, el resultado presenta ruido entre -5 y 5 V, lo que

dificulta su interpretación. En general, los resultados son coherentes con la capacidad de rechazo esperada del material semiconductor utilizado, ya que las longitudes de onda más largas presentan niveles más altos de rechazo. Por otro lado, se observa que los dispositivos con menor uniformidad presentan menor selectividad espectral.

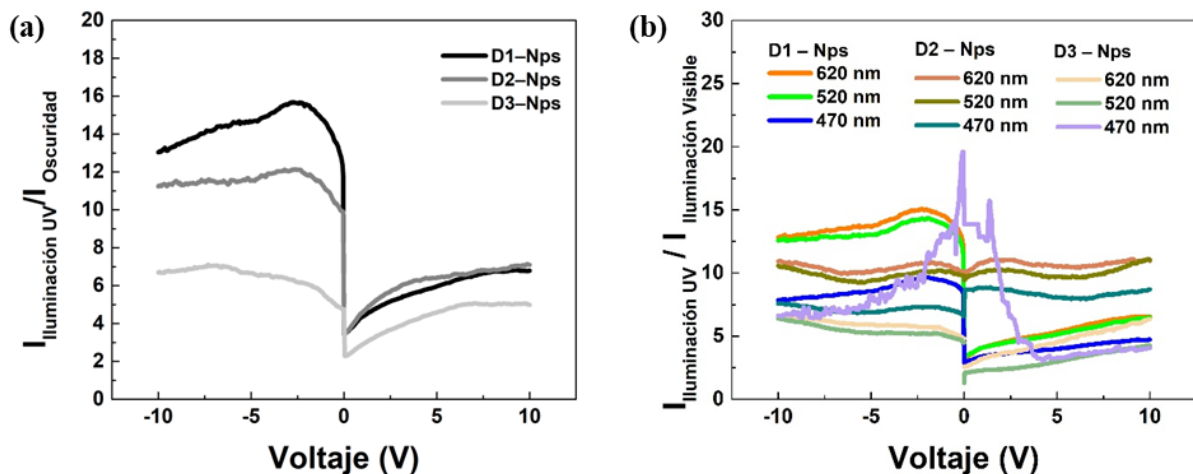


Figura 4.45. (a) Corriente con iluminación UV / Corriente en oscuridad inicial en un rango de voltaje de -10 a 10 V para los dispositivos D1, D2 y D3. (b) Relación de rechazo en la región UV-Vis de los dispositivos D1, D2 y D3.

La relación de rectificación de los dispositivos D1-Nps, D2-Nps y D3-Nps se observa en la Figura 4.46, los tres dispositivos mantienen valores por debajo de 1, indicativo de que la corriente obtenida con voltaje negativo es mayor que la obtenida con voltaje positivo. Además, se observa la misma tendencia en los tres dispositivos en la que el RR aumenta gradualmente conforme incrementa el voltaje aplicado. El efecto de la asimetría entre ambos rangos de voltaje, negativo y positivo se atribuye a la PPC, ya que como se observó en las curvas I-V, la corriente incrementó conforme avanzaron las mediciones, generando mayores corrientes en voltajes negativos y por lo tanto una asimetría significativa en cuanto a RR. Por otro lado, no se encontró una relación significativa entre la uniformidad del depósito de los nanopolvos y la RR.

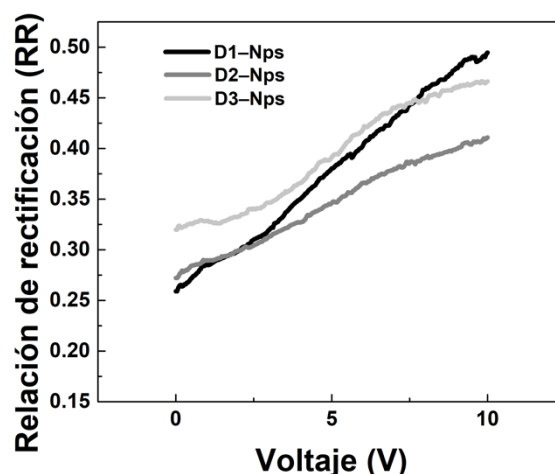


Figura 4.46. Relación de rectificación de los dispositivos D1–Nps, D2–Nps y D3–Nps en un rango de 0 a 10 V.

Los valores de resistencia eléctrica obtenidos para los dispositivos D1–Nps, D2–Nps y D3–Nps se muestran en la Tabla 4.9. Es evidente la tendencia asociada en cuanto a la uniformidad de depósito de nanopulvos de ZnO en los dispositivos, ya que la resistencia eléctrica en inicial oscuridad disminuye conforme disminuye la uniformidad del depósito, D1–Nps presenta los valores más altos seguido de D2–Nps y D3–Nps con los valores más bajos de resistencia eléctrica. Bajo irradiación UV, la tendencia se conserva, mientras que la resistencia eléctrica en oscuridad después de irradiar con UV los dispositivos, se mantiene alta, indicando la presencia de PPC:

Tabla 4.9. Resistencia eléctrica de los dispositivos D1–Nps, D2–Nps y D3–Nps a ± 10 V.

Dispositivo	Oscuridad _i		Radiación UV		Oscuridad _f	
	–10 V	10 V	–10 V	10 V	–10 V	10 V
D1– Nps	6.32 M Ω	6.64 M Ω	485.43 k Ω	980.47 k Ω	519.09 k Ω	555.67 k Ω
D2 – Nps	4.62 M Ω	4.98 M Ω	412.05 k Ω	702.02 k Ω	606.07 k Ω	588.91 k Ω
D3 – Nps	1.74 M Ω	1.88 M Ω	260.90 k Ω	378.01 k Ω	363.28 k Ω	334.02 k Ω

En la Figura 4.47 se muestra la respuesta temporal del dispositivo D1–Nps bajo iluminación UV a 380 nm, con polarización constante a 10 V. La región sombreada de morado representa

a la iluminación UV encendida, por lo que la corriente aumenta abruptamente desde 692 nA a 10 μ A, en cambio al apagar la iluminación, la corriente presenta un decaimiento gradual, el cual alcanza el mínimo de 7.06 μ A en un tiempo de 380 s en oscuridad, valor claramente lejano al de la corriente inicial en oscuridad.

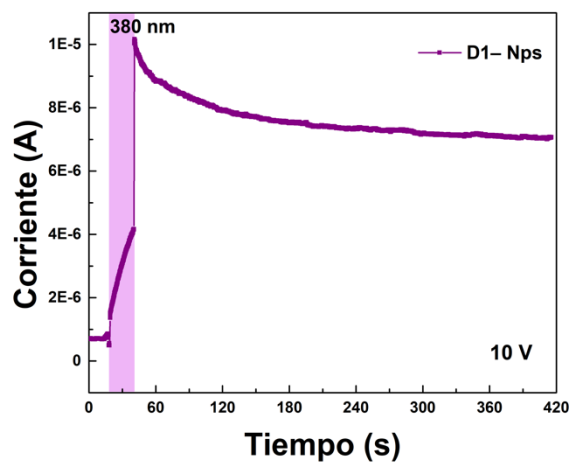


Figura 4.47. Respuesta temporal del dispositivo D1–Nps bajo radiación UV (380 nm) polarizado a 10 V.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

“La ciencia progresa mejor cuando las observaciones nos obligan a modificar nuestras preconcepciones.”

— Vera C. Rubin

5.1 Conclusiones

Se concluye que el dispositivo termolaminado resulta funcional para la detección de la radiación UV, y que su método de fabricación lo convierte en una alternativa sencilla, económica y fácilmente reproducible. Adicionalmente, el encapsulamiento mediante termolaminado permite una manipulación práctica del dispositivo. Sin embargo, para llevar este dispositivo a una aplicación real, es necesario implementar etapas de acondicionamiento de la señal eléctrica.

Por otro lado, los dispositivos encapsulados con PDMS no presentaron conducción eléctrica bajo las condiciones evaluadas, pero pueden considerarse para futuras evaluaciones como dispositivos piezoeléctricos, aprovechando las propiedades intrínsecas del ZnO, la flexibilidad del PDMS y la ausencia de presión o contacto observada en el ensamble de los materiales empleados para fabricar los dispositivos.

En el caso de los dispositivos fabricados mediante fotolitografía directa, se concluye que la geometría de los contactos interdigitados influye directamente en el rango de valores de corriente obtenidos, al modificar el área efectiva de contacto metal-semiconductor y la separación entre los contactos, ya que en la relación de $I_{UV}/I_{OSCURIDAD}$ se observa una tendencia en la que los dispositivos S1, S4 y S7 son los que presentan una respuesta a la radiación UV superior y son los dispositivos con menor w y g .

Asimismo, el material de los contactos empleados desempeña un papel determinante en el tipo de contacto eléctrico establecido con el ZnO, ya que la diferencia entre la función de trabajo de los metales y la afinidad electrónica del semiconductor condiciona la formación de contactos de carácter óhmico o rectificante en los dispositivos, así como en la eficiencia de generación de fotocorriente. Los contactos de Al, debido a su menor función de trabajo, favorecen la formación de contactos óhmicos, lo que se refleja en la simetría de las curvas I-V y en la RR. Por el contrario, de los contactos de AgO, que forman una interfaz AgO-ZnO con características rectificadoras, asociadas a una barrera de potencial más pronunciada, lo cual también se manifiesta en la asimetría de las curvas I-V y en la RR.

Por otro lado, debido a factores intrínsecos de la capa activa de ZnO, se observan efectos como PPC, lo que disminuye la calidad del desempeño eléctrico debido a la dificultad para que el dispositivo retorne a la corriente base previa a la incidencia de la radiación UV.

Para las uniones Al/ZnO/AgO/Ti/Au, se concluye que, a menor área de contacto entre los materiales, mayor es la rectificación del dispositivo, lo que evidencia la influencia del área de unión en el transporte de carga.

Respecto a los dispositivos fabricados mediante fotolitografía y nanopulvos de ZnO, se concluye que es indispensable mejorar la homogeneidad en la deposición de la capa de nanopulvos, ya que este factor incide significativamente en la eficiencia y la reproducibilidad del desempeño eléctrico de los dispositivos. Además, el método de encapsulado empleado no resulta funcional, ya que elimina parcialmente el depósito de nanopulvos y no logra un encapsulamiento efectivo que permita utilizar los dispositivos como fotodetectores mecánicamente flexibles.

En general, de acuerdo con los valores obtenidos de la relación de la corriente en iluminación UV entre la corriente en oscuridad para todos los dispositivos fabricados, se observa que el dispositivo termolaminado es uno de los que presentan la mayor relación $I_{UV}/I_{OSCURIDAD}$, caracterizada por un comportamiento relativamente lineal. En el rango de 0 a 10 V, la relación aumenta desde valores cercanos a cero hasta aproximadamente 25, mientras que en el intervalo de 0 a -10 V aumenta de manera similar hasta alcanzar valores cercanos a 35. En el caso de los dispositivos de película delgada mediante fotolitografía, al compararlos según su configuración de contactos interdigitados, se observa que, en los dispositivos de Al//ZnO/AgO/Ti/Au, S1 presenta valores superiores a 40 bajo polarización positiva. Por otro lado, los dispositivos con contactos exclusivamente de Al muestran un comportamiento más constante y estable; sin embargo, la relación presenta valores de aproximadamente 3. Finalmente, los dispositivos con contactos exclusivamente de AgO alcanzan valores cercanos a 20. En el caso de los dispositivos fabricados mediante la combinación de película delgada de Al y nanopulvos de ZnO, el dispositivo con mayor uniformidad de nanopulvos es el que presenta la relación más alta, alcanzando valores cercanos a 16 con voltajes negativos.

Finalmente, se concluye que se exploraron diferentes rutas de fabricación de fotodetectores flexibles de radiación UV, que incluyen procesos que emplean materiales y equipos de fácil

acceso, así como técnicas que requieren equipo especializado. La combinación de estas rutas permitió la fabricación de diferentes dispositivos basados en el mismo material semiconductor, ZnO, los cuales presentaron comportamiento eléctrico distinto en función de la morfología del ZnO, ya sea en nanopolvos o en película delgada, así como del diseño y del material de los electrodos, entre los que se emplearon Cu, Al y AgO/Ti/Au. Los resultados demuestran la versatilidad del ZnO y la relevancia del diseño de los dispositivos.

5.2 Trabajo futuro

En todos los dispositivos realizados, tanto con nanopolvos o película delgada de ZnO, se observó el efecto de PPC, característico del ZnO; por lo que se propone realizar estudios orientados a su reducción, mediante la aplicación de tratamientos térmicos o dopaje con el fin de favorecer la tasa de recombinación de los portadores y la recuperación del estado inicial de la corriente en los dispositivos después de incidir radiación UV.

5.2.1 Fotodetector termolaminado

Se propone implementar etapas de acondicionamiento de la señal eléctrica del dispositivo, con el objetivo de integrarlo en distintas aplicaciones.

5.2.2 Fotodetectores encapsulados con PDMS

Se propone explorar alternativas de encapsulado distintas del PDMS, así como evaluar los dispositivos como potenciales sistemas piezoeléctricos, considerando las propiedades del ZnO y su posible respuesta ante estímulos de deformación mecánica. Esta propuesta surge a partir de la nula respuesta eléctrica observada, atribuida a la falta de presión entre los materiales que conformaron los dispositivos. Por ello, se plantea la posibilidad de aprovechar la aplicación de presión mecánica sobre los dispositivos para inducir el contacto entre los materiales, lo que permite generar una señal eléctrica.

5.2.3 Fotodetectores de película delgada fabricados mediante fotolitografía

Para los dispositivos de película delgada realizados mediante fotolitografía, se propone realizar una caracterización detallada de las películas de ZnO y AgO, que incluya el análisis de sus propiedades estructurales, ópticas y eléctricas, así como la determinación de sus

espesores, con el objetivo de relacionar y mejorar dichas propiedades para obtener un buen desempeño eléctrico en los dispositivos. Además, se plantea la realización de pruebas de flexión mecánica, así como su caracterización eléctrica posterior a dichas pruebas, para evaluar su estabilidad. Finalmente, se considera el diseño de etapas de acondicionamiento de la señal eléctrica, así como el desarrollo de técnicas para su encapsulado o empaquetamiento, con el fin de integrar los dispositivos en diferentes aplicaciones.

5.2.3.1 Uniones Al/ZnO/AgO/Ti/Au

Se propone realizar caracterizaciones eléctricas adicionales, así como un análisis más profundo del comportamiento eléctrico de los dispositivos, incorporando pruebas de flexión mecánica.

5.2.4 Fotodetectores basados en nanopolvos de ZnO con contactos definidos mediante fotolitografía

Se propone buscar alternativas para el método de encapsulado con el objetivo de embeber adecuadamente los nanopolvos de ZnO y asegurar una mayor estabilidad del material activo. Además, se plantea buscar alternativas para optimizar o sustituir el método de deposición de los nanopolvos de ZnO, con el fin de obtener capas más homogéneas y reproducibles, lo que permitiría evitar la variabilidad en el desempeño eléctrico de los dispositivos.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

“Si he visto más lejos, ha sido porque he subido a los hombros de gigantes.”

— Isaac Newton

- [1] M. Razeghi and A. Rogalski, “Semiconductor ultraviolet detectors,” *J Appl Phys*, vol. 79, no. 10, pp. 7433–7473, 1996.
- [2] E. Monroy, F. Omnès, and F. Calle, “Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors,” *Semicond Sci Technol*, vol. 18, no. 4, p. R33, 2003.
- [3] C. Soci *et al.*, “ZnO nanowire UV photodetectors with high internal gain,” *Nano Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 1003–1009, 2007.
- [4] S. P. Ghosh *et al.*, “Ultraviolet photodetection characteristics of Zinc oxide thin films and nanostructures,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, p. 12035.
- [5] J. H. Jun, H. Seong, K. Cho, B.-M. Moon, and S. Kim, “Ultraviolet photodetectors based on ZnO nanoparticles,” *Ceram Int*, vol. 35, no. 7, pp. 2797–2801, 2009.
- [6] C. G. Núñez, A. Vilouras, W. T. Navaraj, F. Liu, and R. Dahiya, “ZnO nanowires-based flexible UV photodetector system for wearable dosimetry,” *IEEE Sens J*, vol. 18, no. 19, pp. 7881–7888, 2018.
- [7] R. Singh, C. Patel, V. K. Verma, S. Sriram, and S. Mukherjee, “ZnO-based flexible UV photodetector for wearable electronic applications,” *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 21, pp. 25903–25910, 2023.
- [8] W. A. MacDonald, “Latest advances in substrates for flexible electronics,” *Large Area and Flexible Electronics*, pp. 291–314, 2015.
- [9] S.-T. Han *et al.*, “An overview of the development of flexible sensors,” *Advanced materials*, vol. 29, no. 33, p. 1700375, 2017.
- [10] S.-J. Young, L.-W. Ji, S.-J. Chang, and Y.-K. Su, “ZnO metal–semiconductor–metal ultraviolet sensors with various contact electrodes,” *J Cryst Growth*, vol. 293, no. 1, pp. 43–47, 2006.
- [11] S. Cai, X. Xu, W. Yang, J. Chen, and X. Fang, “Materials and designs for wearable photodetectors,” *Advanced Materials*, vol. 31, no. 18, p. 1808138, 2019.

- [12] M. J. Bathaei *et al.*, “Photolithography-based microfabrication of biodegradable flexible and stretchable sensors,” *Advanced Materials*, vol. 35, no. 6, p. 2207081, 2023.
- [13] S. K. Panda and C. Jacob, “Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices,” *Solid State Electron*, vol. 73, pp. 44–50, 2012.
- [14] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, “Materials science and engineering: an introduction,” *John wiley & sons*, 2020.
- [15] W. F. Smith, J. Hashemi, and F. Presuel-Moreno, *Foundations of materials science and engineering*, vol. 509. McGraw-hill New York, 2006.
- [16] D. R. H. Jones and M. F. Ashby, *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [17] G. Park, W. Lee, H. Shin, and J.-H. Yun, “Proof of principle demonstration of electro driven silver nanowire for stretchable circuit junctions,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 12762, 2025.
- [18] J. Xue, J. Song, Y. Dong, L. Xu, J. Li, and H. Zeng, “Nanowire-based transparent conductors for flexible electronics and optoelectronics,” *Sci Bull (Beijing)*, vol. 62, no. 2, pp. 143–156, 2017.
- [19] C. N. R. Rao, A. Müller, and A. K. Cheetham, *The chemistry of nanomaterials: synthesis, properties and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [20] B. G. Streetman, S. Banerjee, and others, *Solid state electronic devices*, vol. 4. Prentice hall New Jersey, 2000.
- [21] B. D. Boruah, “Zinc oxide ultraviolet photodetectors: rapid progress from conventional to self-powered photodetectors,” *Nanoscale Adv*, vol. 1, no. 6, pp. 2059–2085, 2019.

- [22] A. M. Abd-Elnaiem, M. Rashad, T. A. Hanafy, and N. M. Shaalan, "Improvement of optical properties of functionalized polyvinyl alcohol-zinc oxide hybrid nanocomposites for wide UV optoelectronic applications," *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 33, no. 8, pp. 2429–2444, 2023.
- [23] D. C. Look, "Recent advances in ZnO materials and devices," *Materials science and engineering: B*, vol. 80, no. 1–3, pp. 383–387, 2001.
- [24] Z. L. Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications," *Journal of physics: condensed matter*, vol. 16, no. 25, p. R829, 2004.
- [25] W. A. Bhutto *et al.*, "Controlled growth of zinc oxide nanowire arrays by chemical vapor deposition (CVD) method," *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur*, vol. 19, pp. 135–141, 2019.
- [26] E. Guzewicz *et al.*, "ALD grown zinc oxide with controllable electrical properties," *Semicond Sci Technol*, vol. 27, no. 7, p. 74011, 2012.
- [27] K. Ellmer, "Magnetron sputtering of transparent conductive zinc oxide: relation between the sputtering parameters and the electronic properties," *J Phys D Appl Phys*, vol. 33, no. 4, p. R17, 2000.
- [28] S. Mohan, M. Vellakkat, A. Aravind, and others, "Hydrothermal synthesis and characterization of Zinc Oxide nanoparticles of various shapes under different reaction conditions," *Nano Express*, vol. 1, no. 3, p. 30028, 2020.
- [29] T. Nimalan and M. R. Begam, "Physical and chemical methods: a review on the analysis of deposition parameters of thin film preparation methods," *Int. J. Thin. Fil. Sci. Tec*, vol. 13, no. 1, pp. 59–66, 2024.
- [30] R. Wahab, Y.-S. Kim, and H.-S. Shin, "Synthesis, characterization and effect of pH variation on zinc oxide nanostructures," *Mater Trans*, vol. 50, no. 8, pp. 2092–2097, 2009.
- [31] I. Miranda *et al.*, "Properties and applications of PDMS for biomedical engineering: A review," *J Funct Biomater*, vol. 13, no. 1, p. 2, 2021.

- [32] D. Corning, “Information about high technology silicone materials,” *available from Dow Corning Corp*, 1991.
- [33] D. DuPont, “KAPTON® summary of properties,” *EI-10142 (1/22)*, 2022.
- [34] P. Toledo, M. L. Hernandez-Pichardo, S. I. Garduño, J. L. Hernandez-Lopez, F. Hernandez-Cuevas, and N. Hernandez-Como, “Threshold voltage reliability in flexible amorphous In–Ga–ZnO TFTs under simultaneous electrical and mechanical stress,” *Flexible and Printed Electronics*, vol. 7, no. 2, p. 25015, 2022.
- [35] H. Yousef, “High aspect ratio microstructures in flexible printed circuit boards: process and applications,” *Acta Universitatis Upsaliensis*, 2008.
- [36] F. L. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to optics*. Cambridge university press, 2017.
- [37] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of photonics, 2 volume set*. John Wiley & sons, 2019.
- [38] R. Loudon, *The quantum theory of light*. OUP Oxford, 2000.
- [39] F. Cao *et al.*, “Wide bandgap semiconductors for ultraviolet photodetectors: approaches, applications, and prospects,” *Research*, vol. 7, p. 385, 2024.
- [40] Z. Alaie, S. M. Nejad, and M. H. Yousefi, “Recent advances in ultraviolet photodetectors,” *Mater Sci Semicond Process*, vol. 29, pp. 16–55, 2015.
- [41] T. Bintsis, E. Litopoulou-Tzanetaki, and R. K. Robinson, “Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry—a critical review,” *J Sci Food Agric*, vol. 80, no. 6, pp. 637–645, 2000.
- [42] K. Wladyslaw, “Ultraviolet germicidal irradiation handbook,” *New York: NY*, 2009.
- [43] M. Buonanno, D. Welch, I. Shuryak, and D. J. Brenner, “Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 10285, 2020.

- [44] C. Dreyer and F. Mildner, “Application of LEDs for UV-curing,” in *III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications*, Springer, 2015, pp. 415–434.
- [45] C. Decker, “UV-radiation curing chemistry,” *Pigment & resin technology*, vol. 30, no. 5, pp. 278–286, 2001.
- [46] R. S. Crandall, “Photoconductivity,” *Semiconductors and Semimetals*, vol. 21, pp. 245–297, 1984.
- [47] R. H. Bube and S. A. Rice, “Photoconductivity of solids,” 1961, *American Institute of Physics*.
- [48] Y. Kang, H.-H. Nahm, and S. Han, “Light-induced peroxide formation in ZnO: Origin of persistent photoconductivity,” *Sci Rep*, vol. 6, no. 1, p. 35148, 2016.
- [49] R. Laiho, Y. P. Stepanov, M. P. Vlasenko, and L. S. Vlasenko, “Persistent photoconductivity of ZnO,” *Physica B Condens Matter*, vol. 404, no. 23–24, pp. 4787–4790, 2009.
- [50] L. A. Kolahalam, I. V. K. Viswanath, B. S. Diwakar, B. Govindh, V. Reddy, and Y. L. N. Murthy, “Review on nanomaterials: Synthesis and applications,” *Mater Today Proc*, vol. 18, pp. 2182–2190, 2019.
- [51] R. Kripal, A. K. Gupta, R. K. Srivastava, and S. K. Mishra, “Photoconductivity and photoluminescence of ZnO nanoparticles synthesized via co-precipitation method,” *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, vol. 79, no. 5, pp. 1605–1612, 2011.
- [52] R. C. Jaeger, *Introduction to microelectronic fabrication*, vol. 5. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [53] J. D. Plummer and P. B. Griffin, *Integrated Circuit Fabrication: Science and Technology*. Cambridge University Press, 2023.
- [54] H. Ito, “Chemical amplification resists: History and development within IBM,” *IBM J Res Dev*, vol. 41, no. 1.2, pp. 119–130, 1997.
- [55] K. H. J. Buschow, “Encyclopedia of materials: science and technology,” (*No Title*), 2001.

- [56] S. A. Campbell, “The science and engineering of microelectronic fabrication,” (*No Title*), 2001.
- [57] H. Kipphan, *Handbook of print media: technologies and production methods*. Springer, 2014.
- [58] S. M. Sze, Y. Li, and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons, 2021.
- [59] S. Chen *et al.*, “Crystallization in one-step solution deposition of perovskite films: Upward or downward?,” *Sci Adv*, vol. 7, no. 4, p. eabb2412, 2021.
- [60] A. Ramya and S. L. Vanapalli, “3D printing technologies in various applications,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 396–409, 2016.
- [61] I. Karakurt and L. Lin, “3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing,” *Curr Opin Chem Eng*, vol. 28, pp. 134–143, 2020.
- [62] P. Smid, *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc., 2003.
- [63] M. J. Madou, *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology, three-volume set*. CRC Press, 2018.
- [64] B. D. Cullity and S. R. Stock, “Elements of X-ray Diffraction Third Edition, 2001,” *Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall*.
- [65] B. E. Warren, *X-ray Diffraction*. Courier Corporation, 1990.
- [66] B. J. Inkson, “Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization,” in *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods*, Elsevier, 2016, pp. 17–43.
- [67] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, “Principios de Análisis Instrumental (sexta edición ed.),” *Cengage Learning*, 2008.
- [68] H.-H. Perkampus, *UV-VIS Spectroscopy and its Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.

- [69] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, “Ellipsometry and polarized light. Amsterdam etc,” 1987, *North-Holland, XVII*.
- [70] Z. Bielecki, K. Achtenberg, M. Kopytko, J. Mikołajczyk, J. Wojtas, and A. Rogalski, “Review of photodetectors characterization methods,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, vol. 70, no. 2, 2022.
- [71] S. Kasap and P. Capper, *Springer handbook of electronic and photonic materials*. Springer, 2017.
- [72] K. Instruments, “Model 2400 SourceMeter Service Manual,” 2006, *Cleveland, Ohio, USA Document*.

CAPÍTULO 7: APÉNDICES

“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.”

— *Aristóteles*

Apéndice I: Proceso de fotolitografía sobre PI

1. Limpieza del sustrato

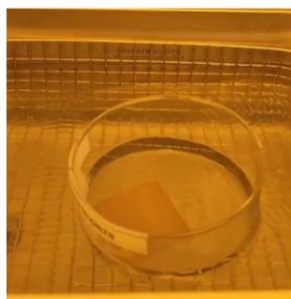
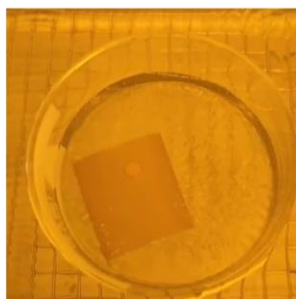
Limpieza ultrasónica

- Acetona (3 min)
- IPA (3 min)
- Agua DI (3 min)

Rampa 10 °C/min hasta
300 °C por 1 hora

Limpieza ultrasónica

- Acetona (3 min)
- IPA (3 min)
- Agua DI (3 min)

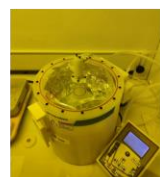
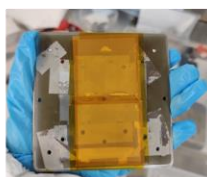


2. Fotolitografía

Depósito por pulverización
catódica

Depósito de la resina fotosensible
mediante spin coating

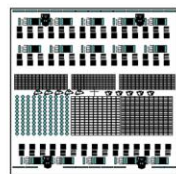
- Tratamiento térmico a 115 °C (1 min)



Transferencia del patrón
mediante escritura directa

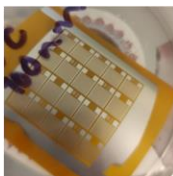
Revelado

- Enjuague
- Secado con nitrógeno
- Tratamiento térmico 115 °C (1 min)



Grabado químico

Validación del patrón definido



Apéndice II: Publicación primer autor

Munguía-Fernández, N. A., Castillo-Saenz, J. R., Pérez-Landeros, O. M., Nedev, R., Mateos, D., Paz, J., Suárez, M., Curiel-Álvarez, M. A., Nedev, N., & Arias, A. (2023). *Flexible ultraviolet sensor based on zinc oxide nanoparticle powder*. *Crystals*, 13(12), 1672. <https://doi.org/10.3390/cryst13121672>



Article

Flexible Ultraviolet Sensor Based on Zinc Oxide Nanoparticle Powder

Nicol Alejandra Munguía-Fernández¹, Jhonathan Rafael Castillo-Saenz², Oscar Manuel Perez-Landeros^{2,*}, Roumen Nedev², David Mateos², Judith Paz², Mariel Suárez¹, Mario Alberto Curiel-Álvarez², Nicola Nedev² and Abraham Arias^{1,*}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez s/n C.P., Mexicali 21280, Mexico

² Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez s/n C.P., Mexicali 21280, Mexico

* Correspondence: oscar.manuel.perez.landeros@uabc.edu.mx (O.M.P.-L.); arias.abraham@uabc.edu.mx (A.A.)

Abstract: Zinc oxide nanopowder was synthesized by the coprecipitation method. FT-IR and EDS analyses were performed to qualitatively determine the composition of the nanopowder. FE-SEM images revealed the morphology of the nanopowder formed by clusters of nanoparticles. An XRD analysis confirmed the wurtzite structure with a crystallite size of ~21.2 nm. UV-Vis measurements were performed to determine the ZnO bandgap (~3.05 eV) using the Tauc plot method in the absorbance spectra. The ZnO nanopowder and two comb-like metal contacts were confined and compacted between two polymeric layers by a low-temperature thermal lamination method, resulting in a flexible Polymer/ZnO/Metal/ZnO/Polymer structure. Part of each comb-like metal was kept uncovered by a polymeric layer in order to be used for electrical characterization. I-V measurements of the flexible structure were performed in the dark and under UV illumination, showing the capacity to detect UV radiation and its potential application as a visible-blind UV sensor. A facile and low-cost flexible optoelectronic device is presented, avoiding using high-vacuum or high-temperature technology. This new and novel approach to developing optoelectronic devices proposes using powder materials as semiconducting active regions instead of thin films; this could eliminate the cracking and delamination problems of flexible devices based on thin film technology.

Keywords: flexible electronics; nanopowder; UV sensor



Citation: Munguía-Fernández, N.A.; Castillo-Saenz, J.R.; Perez-Landeros, O.M.; Nedev, R.; Mateos, D.; Paz, J.; Suárez, M.; Curiel-Álvarez, M.A.; Nedev, N.; Arias, A. Flexible Ultraviolet Sensor Based on Zinc Oxide Nanoparticle Powder. *Crystals* **2023**, *13*, 1672. <https://doi.org/10.3390/cryst13121672>

Academic Editors: Andreas Thissen and Ludmila Isaenko

Received: 15 September 2023

Revised: 28 November 2023

Accepted: 8 December 2023

Published: 11 December 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

We can explore different areas and applications of the flexible electronics technology due to its compatibility with movable parts and arbitrarily curved surfaces [1], such as wearable sensors for health monitoring and optoelectronic devices [2]. The mechanical properties and transparency characteristics of flexible electronics have become a critical-improvement field. ZnO nanoparticles are part of deformable and bendable nanomaterials deposited on polymer substrates, employing different fabrication processes [2].

Devices for monitoring UV radiation can be beneficial in different applications such as communications, biomedical instrumentation, and high-temperature plasma research [3]. However, humans are susceptible to UV-A radiation which has a wavelength of 320–400 nm, and the constant exposure to UV-A radiation can cause health problems including premature aging and skin cancer. For these reasons, interest has been generated in UV photodetectors [4].

Zinc oxide (ZnO) is a transparent semiconductor oxide that has attracted considerable attention because of its electrical and optical properties and excellent chemical stability [5]. ZnO has a bandgap in the 3.0–3.4 eV range, depending on the synthesis method or the preparation parameters [6]. In addition, ZnO has applications in thin-film transistors [7],

Apéndice III: Publicación coautor

García-Soriano, A. A., Hernández-Luna, I. S., Torres Sánchez, A., Munguía-Fernández, N. A., Quintero-López, J., Sánchez-Fernández, L., & Hernández-Como, N. (2025). *STEM education in electronics*. En **2025 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC)** (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LAEDC65721.2025.11289015>

2025 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC) Guadalajara, Jalisco, October 8-10, 2025

STEM education in electronics

1st Abril A García-Soriano
Escuela Superior de Ingeniería
Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
a.abilene.gs@ieee.org

2nd Isai S Hernandez-Luna
Centro de Nanociencias y Micro
y Nanotecnologías
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
hdezisai@ieee.org

3rd Arturo Torres Sanchez
Centro de Nanociencias y Micro
y Nanotecnologías
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
atorressa@ipn.mx

4th Nicol A Munguía-Fernández
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja
California
Baja California, Mexico
na.munguia@ieee.org

5th Jimena Quintero-Lopez
Escuela Superior de Ingeniería
Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
jime05quint@ieee.org

6th Leonardo Sanchez-Fernandez
Escuela Superior de Ingeniería
Química e Industrias Extractivas
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
leonardo.ssf@ieee.org

7th Norberto Hernandez-Como
Centro de Nanociencias y Micro
y Nanotecnologías
Instituto Politécnico Nacional
CDMX, Mexico
norberto@ieee.org

Abstract—The goal of this project was to expose and inspire children and young people (age range of 4 to 17 years) in the field of electronics, renewable energy, and coding, using hands-on activities with homemade and commercial educational kits. The purpose of this exposure is to encourage them to pursue a career related to science, technology, engineering, and mathematics (STEM). With this, we aim to impact the rate of tertiary education attainment in the Mexican population (range: 25-34 years old), which according to the Organization for Economic Co-operation and Development was 27% in 2022, a value below the average of 47%. Additionally, nearly 24% of the total population of CDMX (approximately 9 million people) is in a vulnerable situation or living in poverty which drastically impacts the expectations for a better education and job. More educated and skilled people will lead to better job opportunities and help reduce the talent shortage. Additionally, this will contribute to increased research, development, and innovation of products and services in the field of semiconductor devices in Mexico. Our key parties were IEEE Mexico Section, “Tezozomoc” Museum, “Luis Enrique Erro” Planetarium, the Instituto Politécnico Nacional, and the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.

Keywords—STEM, education, electronics, electron devices

I. INTRODUCTION

According to the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), in 2022, only 27% of Mexicans aged 25 to 34 had attained tertiary education, one of the lowest rates compared to the OECD average of 47% [1]. On the other hand, CDMX is one of the largest cities in all the world with about six thousand people per square kilometer, a population of more than 9 million people, and according to the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), in 2020 CDMX had 2.3 million people in the age range of 0 to 19 years [2]. Additionally, nearly 24% of the total population of CDMX is in a vulnerable situation or living in poverty which drastically impacts the expectations for a better education and job [3]. Given these numbers, the goal of this project was to expose and inspire children and young people (aged 4 to 17 years) in the field of electronics, renewable energy, and coding, using hands-on activities with homemade and commercial educational kits. The

purpose of this exposure is to encourage them to pursue a science, technology, engineering, and mathematics (STEM) related career. In addition, since the global semiconductor supply chain is relocating in the United States, the nearshoring of the semiconductor industry represents an strategic opportunity for Mexico to attract investment and develop local talent and infrastructure in high-tech manufacturing [4].

Our motivation is that having a talent pipeline with more educated and skilled people will lead to better job opportunities and help reduce the talent shortage. Additionally, this will contribute to increased research, development, and innovation of products and services in the field of semiconductor devices. Promoting STEM activities from an early age, we aim to inspire future generations of engineers, scientists, and innovators.

In this work, we developed hands-on STEM activities focused on: 1) electronics, 2) renewable energy and 3) coding. The activities were adapted to properly achieve public communication of science and technology (PCST). PCST is defined as the conditions necessary to establish effective communication with non-specialized audiences [5].

II. MATERIALS AND METHODS

The STEM activities were performed with the following commercial educational kits: Snap Circuits model 203, model Green Energy from Elenco Electronics LLC, and Dash robots from Wonder Workshop Inc. Another activity was prepared with off the shelf electronic components. Educational planning for each activity was prepared in Spanish language following the recommendations from PCST. Each activity was designed with the following information: title, duration, number of participants, age range, objective, teaching strategy, materials and activity script.

Due to the learning curve associated with hands-on engineering tasks, especially for novice learners, the duration of these activities may vary between 15 and 45 minutes, as students require additional time to plan, troubleshoot, and gain familiarity with the tools and procedures involved [6].

979-8-3315-1524-9/25/\$31.00 ©2025 IEEE

Authorized licensed use limited to: Nicol Munguia Fernandez. Downloaded on January 05, 2026 at 12:37:57 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

2025 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC) | 979-8-3315-1524-9/25/\$31.00 ©2025 IEEE | DOI: 10.1109/LAEDC65721.2025.11289015

Apéndice IV: Estancia de investigación

Estancia de investigación en el **Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional**, Ciudad de México, de septiembre de 2024 – julio de 2025.



Educación

Secretaría de Educación Pública



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Secretaría de Investigación y Posgrado
Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías




Asunto

Conclusión de Estancia de Investigación

NICOL ALEJANDRA MUNGUÍA FERNÁNDEZ
Estudiante del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California

PRESENTE

Por medio de la presente, me permito informarle la conclusión de su estancia de investigación en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMNM). Dicha estancia se llevó a cabo del 17 de septiembre de 2024 al 25 de julio de 2025, en el marco del proyecto titulado "Diseño, fabricación y caracterización eléctrica de dispositivos fotodetectores".

Aprovecho la ocasión para expresarle mi sincero agradecimiento por el compromiso, la dedicación y la calidad del trabajo desarrollado durante este periodo. Su participación contribuyó significativamente al avance de las actividades del proyecto y al fortalecimiento de las líneas de investigación del Centro.

Le deseo el mayor de los éxitos en sus proyectos futuros, confiando en que esta experiencia haya sido de provecho para su desarrollo académico y profesional.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A QUIEN CORRESPONDA PRESENTE

Me permito hacer CONSTAR que la C. Nicol Alejandra Munguia Fernandez, estudiante de la Universidad Autónoma de Baja California, realizó la Estancia Presencial del 30° Verno de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico, en el periodo del 9 de junio al 25 de julio de 2025, colaborando en el proyecto "DISPOSITIVO FOTODETECTORES UV BASADO EN NANOPOLVOS DE ZNO Y MICROCONTACTOS INTERDIGITADOS DE AL", asesorada por el Dr. Norberto Hernández Como, investigador del Instituto Politécnico Nacional.

Se extiende la presente para los fines legales a que haya lugar, el día 28 de julio de 2025, en la Ciudad de Tepic, Nayarit, México.



ATENTAMENTE
"POR UNA CULTURA CIENTÍFICA"



MTRO. CARLOS HUMBERTO JIMÉNEZ GONZÁLEZ,
COORDINADOR GENERAL



COORDINACIÓN GENERAL

"Por una cultura científica"

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Dr. Norberto Hernández Como
Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías
Instituto Politécnico Nacional
Correo electrónico: nohernandez@ipn.mx



2025
La Mujer Indígena

Alc. Luis Donaldo Colón Cisneros, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatecas, C.P. 97300, Blvd. Guadalupe A. Guerrero, Cd. Morel.

Tel.: 0181 379 1000 ext. 37504 - 37505 - www.ipn.edu.mx









COORDINACIÓN GENERAL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
Ciudad de la Cultura s/n, Col. Centro, C.P. 83000
Tepic, Nayarit, México., tel.: 311 112 2799
coordinacion.generale@programadefte.com

Apéndice V: Participación en congresos e impartición de talleres

Munguía-Fernández, N. A., Castillo-Saenz, J., Hernandez Rafael, D., Perez-Landeros, O. M., Nedev, R., Mateos, D., Paz, J., Suárez, M., Curiel-Alvarez, M. A., Nedev, N., & Arias, A., “AMPN-P-62: Zinc oxide nanopowder embedded in polymer films to create a flexible UV sensor,” póster presentado en el SNN 2024, 2024.

Munguía-Fernández, N. A., Quintero López, J., Pérez Landeros, O. M., Arias León, A., & Hernández-Como, N., “Fabricación y caracterización de fotodetectores de radiación ultravioleta basados en óxido de zinc”, póster presentado en el 1.er Congreso Multidisciplinario IEEE–Cinvestav, 2024.

Munguía-Fernández, N. A., Sánchez-Fernández, L., “Diodos y celdas solares”, taller impartido en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, 2025

Munguía-Fernández, N. A., “Fotodetectores”, taller impartido en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, 2025



