

Capítulo Cuatro:

Caracterización óptica del silicio poroso sobre silicio cristalino

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN SILICIO POROSO SOBRE c-SI. APLICACIONES ELÉCTRICAS,
ÓPTICAS Y TÉRMICAS.
Faruk Fonthal Rico
ISBN: 978-84-690-7607-1 / DL: T.1388-2007

4. Caracterización óptica del silicio poroso sobre silicio cristalino

4.1. Antecedentes de las características ópticas

El silicio poroso (PS) presenta una gran relación de área-volumen, alta resistividad y energía de bandgap directa [4]. Estas propiedades intrínsecas del PS lo sitúan como un material interesante para aplicaciones optoelectrónicas usando la tecnología compatible del silicio. Diferentes aplicaciones han sido reportadas, entre las cuales encontramos dispositivos foto luminiscentes [2], capas antireflectivas [27,118-121], dispositivos fotodetectores [24-26,32,122] y LEDs [123-125].

Las prestaciones del PS cuando se ilumina dependen básicamente del espesor y de la morfología de la capa porosa. La minimización de las pérdidas ópticas se ha obtenido por medio del control del ataque electroquímico para la formación de capas de PS y así mejorando la fabricación de dispositivos optoelectrónicos basados en PS [122]. Los dispositivos que incorporan estas superficies texturizadas presentan una reflexión baja y consecuentemente refuerzan la absorción óptica. Las capas de silicio macroporoso (ma-PS) pueden ser usadas como capas antireflectiva simples o multicapas para celdas solares o fotodiodos [29,32,121,126,127]. Las capas de silicio microporoso son usualmente utilizadas como elementos activos en la fabricación de fotodetectores tanto en la topología resistiva (Metal/PS/Metal) [24,26,128,129] como en la topología diodo (Metal/PS/c-Si/Metal) [26,32,122,130].

4.1.1. Capas antireflectantes basadas en silicio poroso

Desde la década de los 60 han sido estudiadas las células solares y las posibles aplicaciones basadas en c-Si. Estas consistían de una típica oblea de silicio cristalino de unas 200 a 500 μm de espesor, sobre la superficies de estas se fabricaban pequeños espesores de unos 50-70 μm con una eficiencia del 12.5% [131]. En los 80 se reporta el primer trabajo del silicio macroporoso como capa antireflectiva (ARC) por Prasad [27]. Hoy en día, varias texturizaciones han sido estudiadas como capas antireflectivas para mejorar la eficiencia de las células solares: La idea común en todas ellas es modificar la superficie del emisor de la célula solar para mejorar la absorción de la luz minimizando la cantidad de luz reflejada. A finales de los 90 se reportaron reflectancias por debajo del 10% utilizando como capa antireflectiva el silicio macroporoso (ma-PS) [132-135], pero se han desarrollado en los últimos cinco años capas antireflectivas basadas en PS con reflectividades menores al 5% [29,119-121].

Strehlke et al [119,136], expuso en sus trabajos a finales de los 90 resultados sobre capas porosas formadas por ataques electroquímicos con soluciones de HF sobre emisores tipo - n en uniones p-n⁺, en donde se obtuvieron resultados de reflectancia entre 3 - 7 % para espesores de capa menores de 1 μm . Martínez-Duart et al ha reportado diversos trabajos en el área de aplicaciones ópticas en donde ha obtenido resultados de reflectancias sobre el 5% en el rango de 300 - 900 nm para capas antireflectivas fabricadas con silicio poroso sobre obleas tipo - p con ataques electroquímicos de HF:C₂H₅OH durante 180 s. [29] y por debajo del 2% con ataques químicos de HF:HNO₃:H₂O hasta 10 min. [118]. En los últimos años Lipiński et al [137-139] ha realizado investigaciones sobre la utilización de las capas macroporosas texturizadas sobre obleas de p-Si multicristalino en busca de mejorar la absorción de luz y así mejorar

la reflectividad normalizada obteniendo valores de reflectancia de 8% en un rango de 400 hasta 1150 nm.

Como explicamos en el capítulo dos en las capas macroporosas los diferentes comportamientos ópticos dependen de las dimensiones características de los poros [134], esto explica que el índice de reflexión de las capas porosas depende fuertemente de la porosidad y morfología de poro [118]. La reflectancia de las ARC fabricadas con capas macroporosas es comparable con las texturizaciones comunes [29,119]. Se han obtenido mejores resultados logrando minimizar las pérdidas ópticas de las capas ma-PS por medio de la optimización del ataque electroquímico en los sustratos de Si [140,141].

- Mejoramiento de las ARC basadas en ma-PS

Uno de los principales obstáculos para la utilización de la potencia eléctrica generada fotovoltaicamente es el alto costo de producción. La eficiencia de las células solares basadas en PS fabricadas en laboratorio es del 14 % aproximadamente [142] y es obtenida por un proceso tecnológico extremadamente complejo, incluyendo una texturización de la superficie, varios pasos de fotolitografía y sistema de evaporación para los contactos.

En los últimos años, se han reportado estudios donde muestran que las ARC basadas en silicio macroporoso pueden reemplazar dos pasos convencionales de la tecnología de las células solares: texturización y deposición de las ARC [140]. Cuando estas capas son aplicadas a nivel industrial con contactos depositados por screen printing ocurre un decremento significativo en el fill factor (FF) de las células solares. El origen es la degradación de los contactos durante la formación del ma-PS por ataques con soluciones de HF. En la Figura 48 se muestra una comparación entre los dos procesos de

formación de las capas ma-PS: el método convencional (Figura 48(a)) y el nuevo método (Figura 48(b)) y el tratamiento térmico (firing) que se hace para los contactos. La no degradación de los contactos permite mejorar el contacto depositado por screen printing.

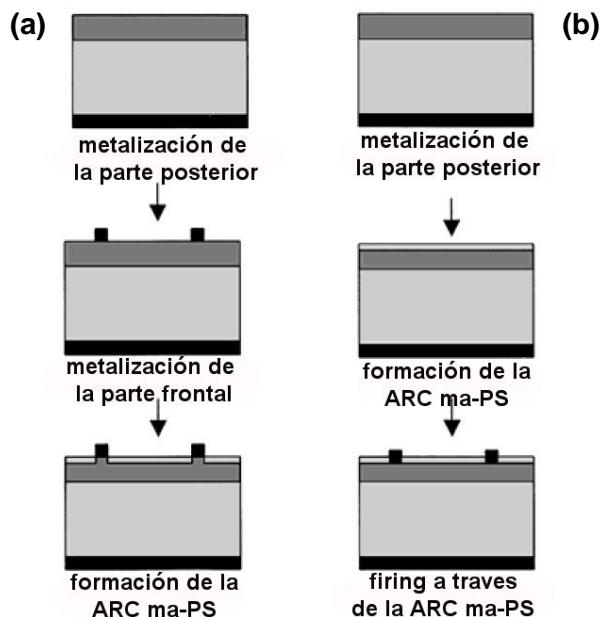


Fig. 48. Comparación de los métodos para la formación de ARC basados en silicio macroporoso, (a) método convencional y (b) nuevo método [140].

4.1.2. Fotodetectores basados en PS

La búsqueda en los últimos años de mejorar la reflexión de las capas porosas ha producido un avance en el desarrollo de diversos dispositivos ópticos capaces de detectar luz en el rango espectral visible [24,26] e IR [121].

Los dispositivos fotodetectores desde un comienzo han tenido un atractivo interés a ser incorporados en la fabricación de circuitos integrados, debido a su fácil fabricación. Pero presentan el problema de la uniformidad y reproducibilidad de las capas porosas.

Hoy en día, representan un candidato potencial por su bajo coste de monitoreo, bajo coste de fabricación y fácil desarrollo con la tecnología del silicio. Para el fotodiodo metal/PS/c-Si/metal, varios autores han reportado que los mecanismos de conducción son controlados por el volumen de la oblea [72]. La unión entre el PS y el c-Si controla más que el metal y el PS, como es descrito en [7,134,143].

El doctor Yu fue uno de los pioneros en los 90 en fabricar fotoconductores metal/PS/metal (MSM) en donde el obtuvo unos resultados de corriente de oscuridad $0.95 \mu\text{A}$ a 10V y sensibilidad de 0.5 A/W [24,128]. Lee et al [129] reportó luego fotoconductores MSM fabricados con PS y tratamientos térmicos RTO (rápida oxidación térmica) y RTA (rápido endurecimiento térmico) con el fin de mejorar la sensibilidad de los dispositivos, presento como resultados una corriente de oscuridad de $65.2 \mu\text{A}$ a 10V y $38.2 \mu\text{A}$ a -10V y una sensibilidad de 2.15 A/W . En los últimos años Rossi et al [26] ha reportado fotoconductores MSM fabricados con PS y tratamientos térmicos con corrientes de oscuridad bajos $9 \mu\text{A}$ a 10V y $1 \mu\text{A}$ a -10V y sensibilidades de 2.5 A/W a 400 nm y 5.5 A/W a 800 nm .

Como fotodiodos Metal/PS/p-Si/Metal, Zheng et al [122] reportó la fabricación del fotodiodo metal/PS con corrientes de oscuridad del orden de $10 \mu\text{A}$ a -9V y una sensibilidad de 0.7 A/W a 900 nm . En los últimos años se han reportado varios trabajos sobre fotodiodos con PS fabricados con RTO y RTA: con el fin de minimizar la corriente de oscuridad del dispositivo. Lee et al [144] reportó fotodiodos con una corriente de oscuridad de $5 \mu\text{A}$ a -10V y una sensibilidad de 0.5 mA/W a 750 nm . Balagurov et al [32,145,146] reportó fotodiodos con corrientes de oscuridad de 50 nA a -5 V y una sensibilidad de 0.4 A/W . Rossi et al [26] reportó un fotodiodo con corrientes de oscuridad $0.4 \mu\text{A}$ a -3V y sensibilidades de 2.5 A/W a 400 nm y 5.5 A/W a 800 nm . También se

han reportado aplicaciones fotodiodos en la detección en el espectro del rango visible [26,32,93] y en el rango IR [93] a 1.55 μm [31].

4.2. Técnicas experimentales

4.2.1. *Caracterización óptica en superficies antirreflejantes*

La Figura 49 describe el sistema de medición espectral utilizado para realizar las medidas de reflexión y permite hacer medidas con una fuente de luz (Xe) con un ángulo de 45° en un rango de longitud de onda desde 200 hasta 1100 nm. Se hace incidir el haz de luz monocromática sobre la superficie de la muestra. El haz reflejado es detectado por un fotodetector y luego estos datos son recopilados por un ordenador el cual nos permite procesar la información de la reflexión de las muestras. También se muestra las diferentes zonas de la muestra donde se hizo incidir la luz monocromática para comprobar la homogeneidad de las medidas sobre la superficie.

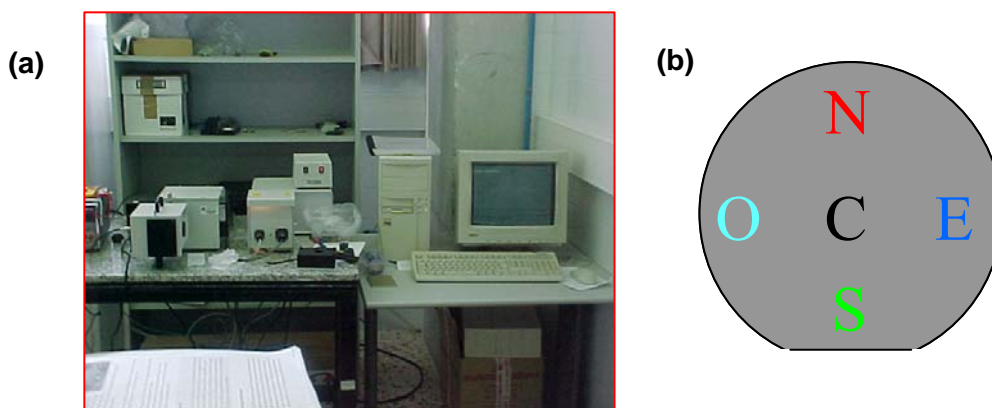


Fig. 49. (a) Sistema de medición espectral monocromador y (b) muestra de las diferentes zonas donde se incide la luz en la superficie macroporosa.

El coeficiente de la reflectividad normalizado para las estructuras macroporosas fue definido como la relación entre la reflectividad medida para cada muestra y la reflectividad medida para una oblea pulida de silicio, a una longitud de onda dada.

En la Figura 50 se presentan resultados en la fabricación de capas macroporosas como capas antireflectivas sobre obleas tipo - n, comparando las diferentes reflectividades normalizadas que se midieron para las muestras desde 1A (15 min.) hasta 5A (75 min.), las condiciones de fabricación se pueden observar en la Tabla V. Se puede observar que a tiempos muy cortos la reflectividad en las capas es muy alta y que empieza a disminuir cuando el tiempo de ataque se incrementa. También se observa que la superficie porosa no es uniforme puesto que la medida depende de la zona de la oblea iluminada.

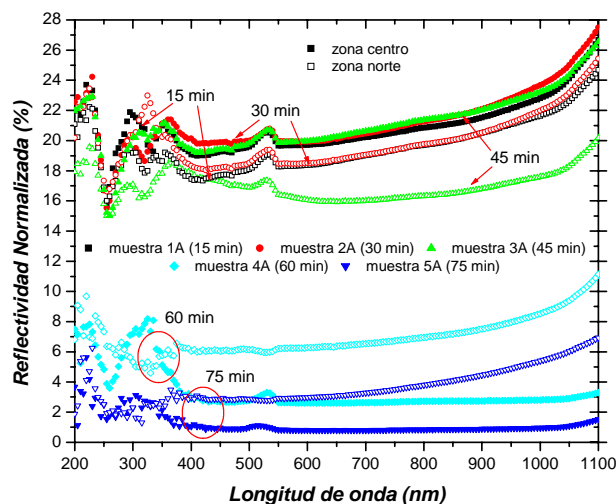


Fig. 50. Espectro de reflectividad normalizada de la estructura ma-PS/n-Si/Al para dos zonas de la oblea y para diferentes tiempo de ataque 15, 30, 45, 60, 75 min.

Se puede observar en la Figura 51 la relación existente entre el aumento del tiempo de ataque y la disminución de la reflectividad normalizada para cuatro

Caracterización óptica en superficies antireflejantes

muestras con diferentes tiempos de ataque con una solución acuosa de HF (2.5%) entre los 45 min. y 95 min. (Muestras 3C, 4C, 5C, 7A) tomadas para 5 zonas (centro, norte, sur, este y oeste). El resto de parámetros de fabricación son iguales como se puede observar en la Tabla V. Además se nota una mejora en la homogeneidad de las capas fabricadas a medida que aumenta el tiempo de ataque como se puede observar en la Figura 13 y 14. Estos resultados nos permitieron pensar en la fabricación de capas antireflectivas basadas en silicio macroporoso sobre silicio cristalino tipo - n.

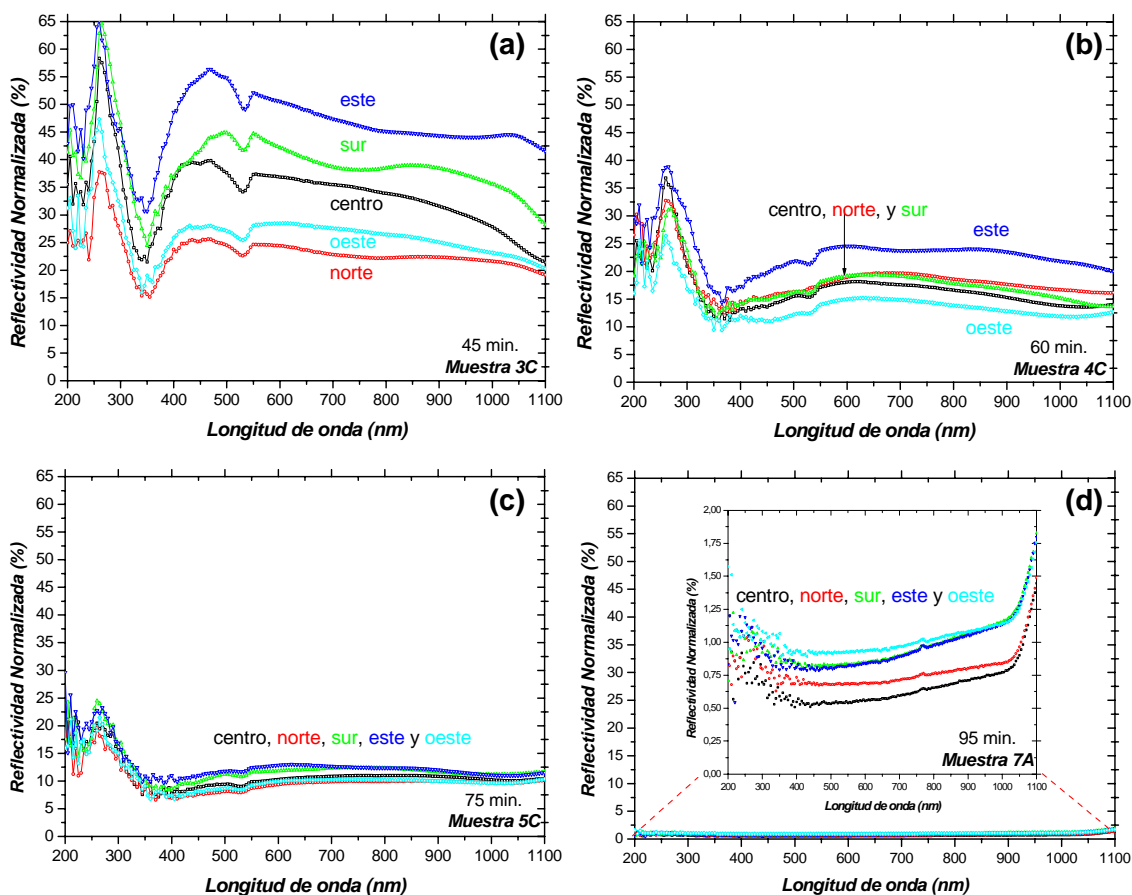


Fig. 51. Espectro de reflectividad normalizada de la estructura ma-PS/n-Si/Al para diferentes orientaciones de la oblea y para diferentes tiempo de ataque (a) 3C, (b) 4C, (c) 5C y (d) 7A.

En la Figura 51(a) observamos la reflectividad normalizada para la muestra 3C, con un tiempo de ataque de 45 min. En esta muestra se obtuvieron muy pequeños poros, como se muestran en las Figuras 13(a) y 14(a), debido a que el tiempo de ataque es el mínimo para que las condiciones del proceso electroquímico generen una capa de ma-PS. Debido a esto los valores de la reflectividad normalizada son relativamente grandes (en un rango de 20% hasta el 55%). Una gran dispersión en la reflectividad normalizada para las diferentes zonas indica una no homogeneidad relacionada con diferentes espesores del ma-PS en la oblea de silicio cristalino.

Cuando se incrementa el tiempo de ataque a 60 min., como se muestra en la Figura 52(b) se observa que la dispersión disminuye en las diferentes zonas de la estructura. Los valores de la reflectividad normalizada disminuyen y se encuentran por debajo del 25%. Esta disminución en la reflectividad y la dispersión muestra una mejor uniformidad en la formación del poro y una mejora de la profundidad del poro más que la muestra anterior, esto se observa en las Figuras 13(b) y 14(b).

Después de incrementar una vez más 15 min. el tiempo de ataque (75 min.) se incrementa la porosidad de la superficie en la capa macroporosa, la cual mejora la absorción de luz. Como se puede observar en la Figura 51(c), la reflectividad normalizada presenta una disminución, con valores por debajo del 10%. Además se observa una mejor homogeneidad y uniformidad de la capa porosa como se puede ver en las Figuras 13(c) y 14(c).

En la Figura 51(d) se observa la reflectividad normalizada de la capa macroporosa con un mayor espesor dado que se ha incrementando el tiempo de ataque a 95 min. Se mejora la absorción de luz y la uniformidad de la capa porosa

pero la superficie esta muy atacada y muchos poros se juntan debilitando la capa para los contactos como se puede ver en la Figura 13(d). Está disminución de la reflectividad esta relacionada con el hecho que la porosidad aumenta con el aumento del tiempo de ataque como ya se dijo en el capítulo 2 en el estudio de la morfología (superficie y espesor) de la capa porosa (Figura 13 y 14).

Esto indica que existe una profundidad crítica en la formación de los poros. Esto es debido a que los valores de la reflectividad normalizada no varían en las diferentes zonas, ya que la uniformidad se ha estabilizado en los poros formados en el diodo ma-PS/n-Si.

4.2.1.1. Capas antireflectivas ma-PS ARC

- Capas ARC comparadas tipo $-p^+/p$ y p^+/n .

La Figura 52(a) muestra una curva comparativa de la reflectividad normalizada de los dos procesos de fabricación para obleas tipo $-p$ poco dopada ($7 - 9 \Omega \text{ cm}$) con un tiempo de ataque de 15 min. y una solución acuosa de HF (25%) tanto para la muestra 10A y otra tipo $-p$ muy dopada ($0.075 - 0.125 \Omega \text{ cm}$) con un tiempo de ataque de 9 min. y una solución acuosa de HF (15%) como la muestra 12A, donde mejoramos la capa porosa. En donde se puede observar la gran dispersión y los valores altos de la reflectividad normalizada para la capa tipo p , mientras que para la capa tipo $-p^+$ con un tiempo de ataque menor se obtuvieron valores de reflectividad normalizada bajos y una mejor homogeneidad.

Para la muestra 12A se obtuvieron unos valores de reflectividad normalizada muy bajos con un tiempo de ataque de 9 min. y una solución acuosa de HF (15%)

comparados con la muestra 7A de tipo - n con un tiempo de ataque de 95 min. y una solución acuosa de HF (2.5%) como se muestra en la Figura 52(b) donde podemos observar la uniformidad de las capas en las diferentes zonas. Además los valores de reflectividad normalizada obtenidas para ambas están por debajo del 1%, de acuerdo con resultados publicados por otros grupos [119,120,147].

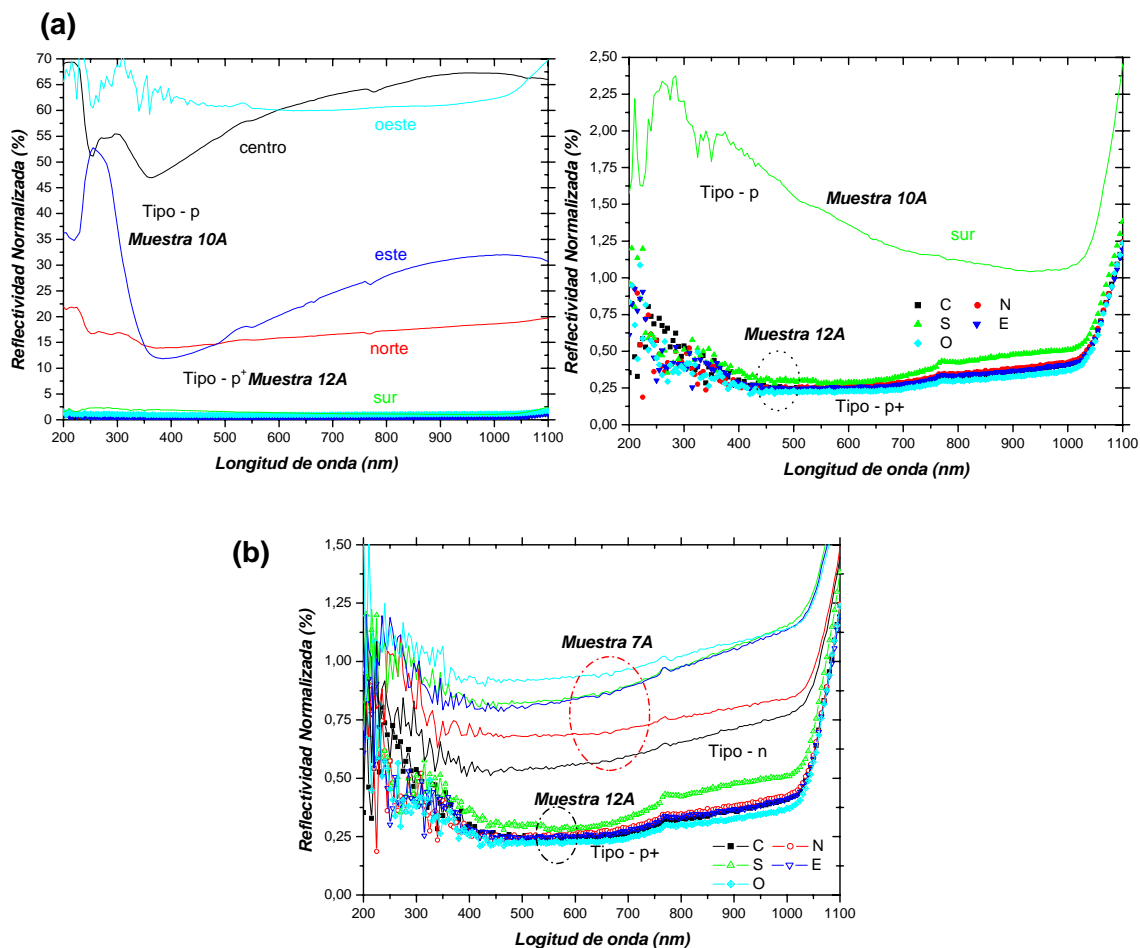


Fig. 52. Espectro de reflectividad normalizada de las estructuras ma-PS/c-Si/Al para diferentes orientaciones de la oblea: (a) comparando los dos procesos de fabricación del ma-PS sobre obleas tipo - p (10A y 12A) y (b) comparándola con los valores obtenidos para dos tipos de oblea distintos una tipo - n (7A) y otra tipo - p⁺ (12A) ambos con valores por debajo del 1%.

En la Figura 53 se puede observar una comparación entre las muestras fabricadas con los resultados publicados para diferentes texturizaciones con otros materiales. Se puede observar en la figura 54 dos muestras fabricadas sobre silicio cristalino tipo - n con una resistividad de (2 – 6 Ω cm) con tiempos de ataque de 75 min. (5C) y 5 min. (6A) con densidades de corriente de 10 y 13 mA/cm² y soluciones acuosas de HF de 2.5% y 10%, respectivamente (imagen comparativa SEM Figura 15), comparándolas con unas muestras fabricadas sobre emisores tipo - n en uniones n⁺-p con dos densidades de corriente entre 2.5 y 80 mA/cm² y solución HF:C₂H₅OH 1:2:1 durante 10 – 900 s y un ARC comercial de ZnS [147].

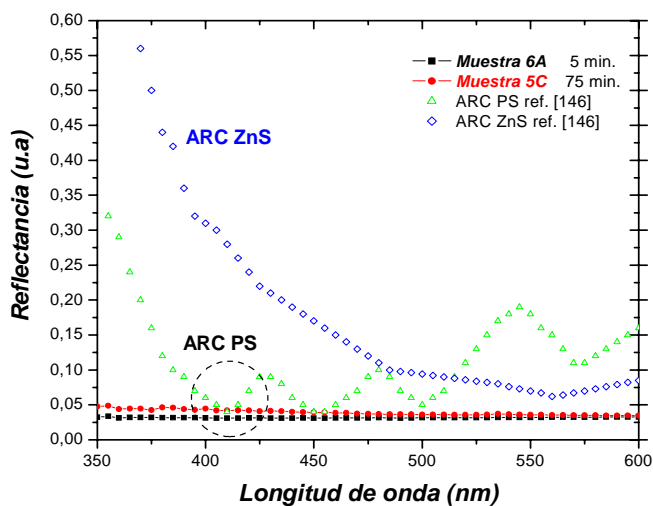


Fig. 53. Espectro de reflectividad normalizada de la estructura ma-PS/n-Si para diferentes tiempos de ataque, espectro comparativo para las muestras fabricadas 5C y 6A y para otras texturizaciones [147].

En la Figura 54 se puede observar la comparación entre dos muestras tipo p⁺-Si de las cuales se han obtenido valores de reflectancia bajos. La Figura 54(a) muestra las imágenes SEM de las muestras comparadas donde la morfología porosa es similar pero los espesores diferentes para muestra 12A es sobre 1 μ m mientras que las muestra reporta un espesor de 15.5 μ m [120]. Los resultados de reflectancia

obtenidos para la muestra 12A son comparados con los resultados reportados en la ref. [120] como se puede ver la Figura 54(b).

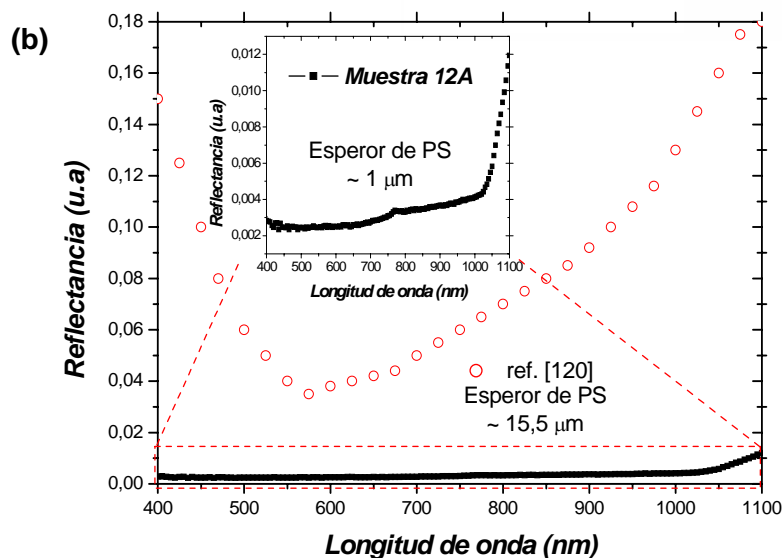
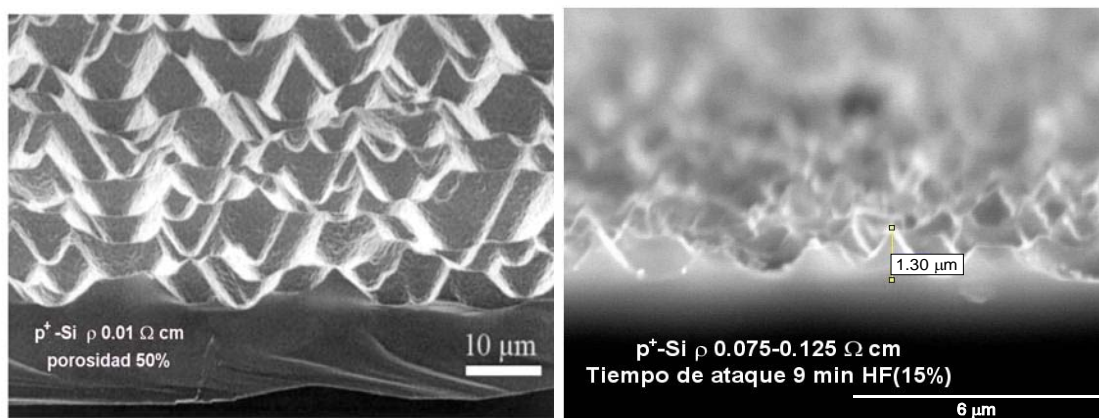


Fig. 54. Capa antireflectiva de estructura ma-PS/p⁺-Si para diferentes orientaciones de la oblea, (a) imágenes SEM de las muestras comparadas y (b) espectro de reflectividad normalizada comparativo para las dos texturizaciones [120].

Se realizó una comparación con una muestra de capa antireflectiva texturizada por TMAH donde se formaron pirámides por medio de TMAH con Iso-

Caracterización óptica en superficies antireflejantes

propanol (IPA), en una concentración de 2:1, con una temperatura de 80 °C y un tiempo de 50 min. Se puede observar en la Figura 55(a) las imágenes SEM para las muestras fabricadas sobre obleas tipo - n con 10% TMAH-5% IPA y una solución acuosa de HF (2.5%) en 95 min. (muestra 7A). Los resultados de reflectancia de ambas texturizaciones son comparados en la Figura 55(b) en la cual se obtuvieron valores por debajo del 1%.

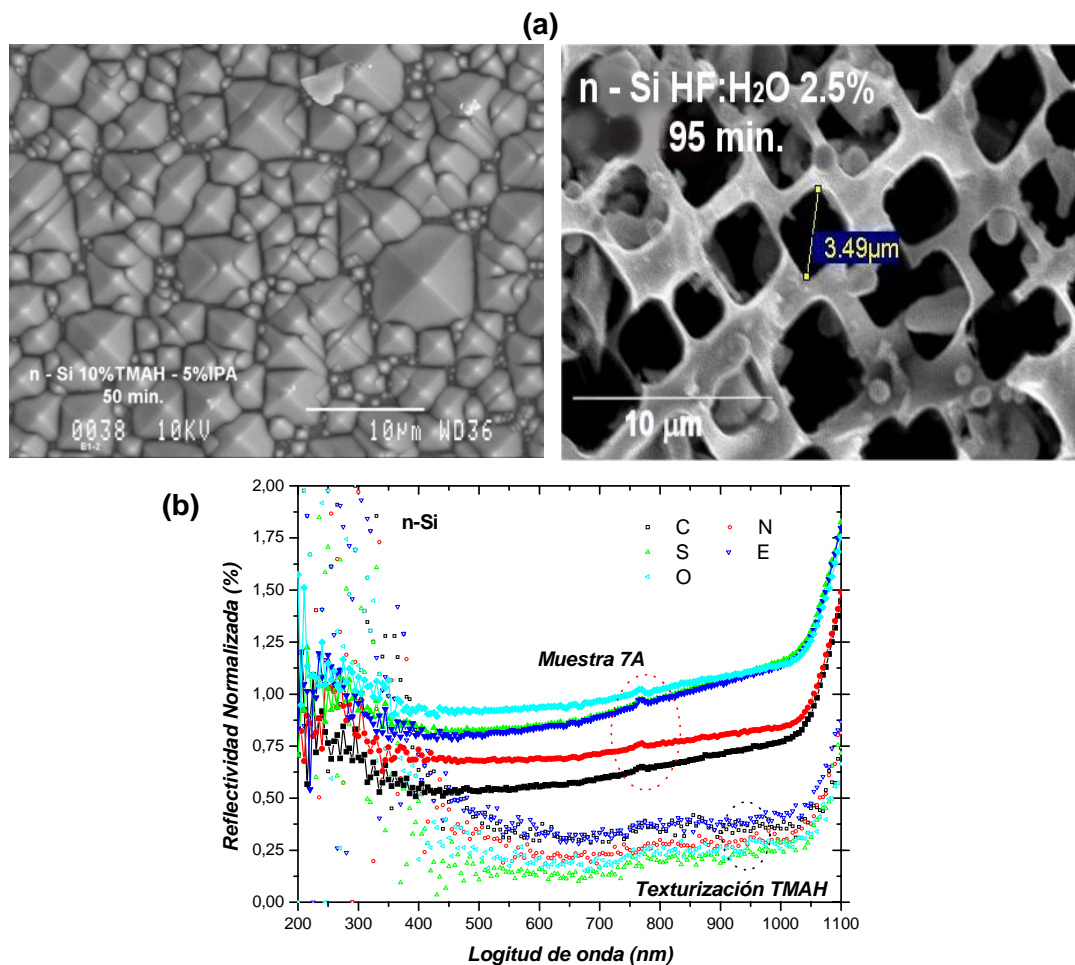


Fig. 55. Capa antireflectiva de estructura ma-PS/n-Si para diferentes orientaciones de la oblea, (a) imágenes SEM de las muestras comparadas y (b) reflectividad normalizada comparativo para las dos texturizaciones.

4.2.2. Caracterización óptica en superficies fotodetectoras

Las características corriente – voltaje de los dispositivos PS/p-Si fueron medidas usando un analizador de parámetros HP 4145B (Figura 56). Las características de los fotoconductores (FC) MSM y fotodiodos (FD) fueron obtenidas en estructuras Au/PS/Au y Au/PS/p-Si/Al, respectivamente.

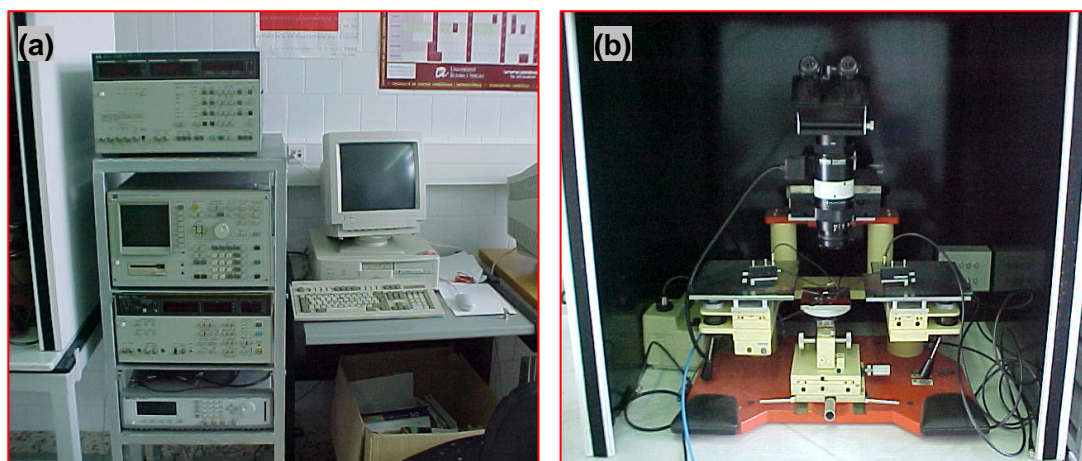


Fig. 56. (a) Analizador de parámetros HP 4145B y (b) equipo de tres puntas con microscopio electrónico utilizado para las medidas I-V en oscuridad y con iluminación.

Se utilizó una lámpara fría de luz blanca con un filtro de IR como fuente de iluminación. La máxima potencia de salida de la fuente fue de $746 \mu\text{W}$, determinada por las características en la puesta a punta del experimento. Finalmente, para estimar una aproximación a la respuesta espectral de los fotodetectores la muestra 20A fue iluminada con dos LEDs uno de 465 nm y otro de 945 nm . La potencia de salida de la fuente y la frecuencia de los pulsos ópticos fueron limitadas a 2.0 mW y 20 Hz , respectivamente debido a las características de los equipos utilizados. El diámetro de los spot utilizados como contactos fue de 0.75 mm y una separación de 2.5 mm , como se observa en la Figura 32 del capítulo tres

4.2.2.1. Fotoconductores

Las características corriente – voltaje de los fotoconductores (FC) basados en la estructura planar Au/PS/Au para las muestras 20A y 19A se muestran en la Figura 57(a) y 57(b), con tiempos de ataque de 1.3 min. y 3 min., respectivamente. Los detalles del proceso de fabricación se pueden ver en la Tabla VI. Se puede observar la respuesta en oscuridad y en iluminación con la lámpara fría de luz blanca acoplada con un filtro IR, en un rango de ± 10 V a temperatura ambiente.

La característica en oscuridad de los dispositivos Au/PS/Au no es simétrica, probablemente es por la rugosidad no uniforme de la superficie PS. Por esta razón, la configuración plana FC es usualmente estudiada como dos uniones Schottky (polarizados de forma opuesta) [24,26,128,129]. Sin embargo, la relación de rectificación es baja (4.4 para la muestra 19A y 2.0 para la muestra 20A, ambos a ± 10 V).

Para la configuración FC, las medidas de corriente fueron mayores para la muestra con mayor tiempo de ataque (muestra 19A), lo cual es de suponer por la menor resistencia asociada a la capa de PS más gruesa. La resistencia en oscuridad a 10 V es de 5 M Ω y 250 M Ω para la muestra 19A y 20A, respectivamente.

La corriente en oscuridad es una de las mayores causas de las pérdidas para este tipo de fotoconductor, y debería ser minimizada. Para a muestra 20A, las corrientes de fuga son 40 nA a +10 V y 78 nA a - 10 V, la cual está en acuerdo con lo reportado en otros estudios [9]. Para la muestra 19A, las corrientes de fuga son dos ordenes de magnitud mayores, 7.6 μ A a +10 V y 1.7 μ A a -10 V.

Bajo iluminación, el efecto no lineal del contacto Au/PS y la no simetría de la característica I-V son más importantes. La relación de rectificación depende de fuertemente del voltaje aplicado. Por ejemplo, a ± 10 V y bajo 0.746 mW de iluminación, los valores calculados son de 6.7 para la muestra 19A y 39.2 para la muestra 20A. Dos regiones diferentes pueden definirse en la curva I-V. La primera curva es para los valores bajos de voltajes, donde la corriente no cambia con la potencia de iluminación. En esta región, la característica se describe como la típica del diodo: una resistencia en paralelo (fugas) y una exponencial (diodo). Los factores de idealidad fueron altos ($\eta \sim 15$ para la muestra 20A), de acuerdo con la literatura [5,7,8]. La segunda región es para valores altos de voltaje, donde la corriente es casi independiente del voltaje y cambia drásticamente con la potencia de iluminación. Esta saturación es debida al número limitado de pares electrón – hueco foto generados para cada potencia óptica. La corriente se incrementa tres ordenes de magnitud para la muestra 20A a 10V cuando es iluminada a 0.746 mW, el cual muestra la buena sensibilidad de este dispositivo.

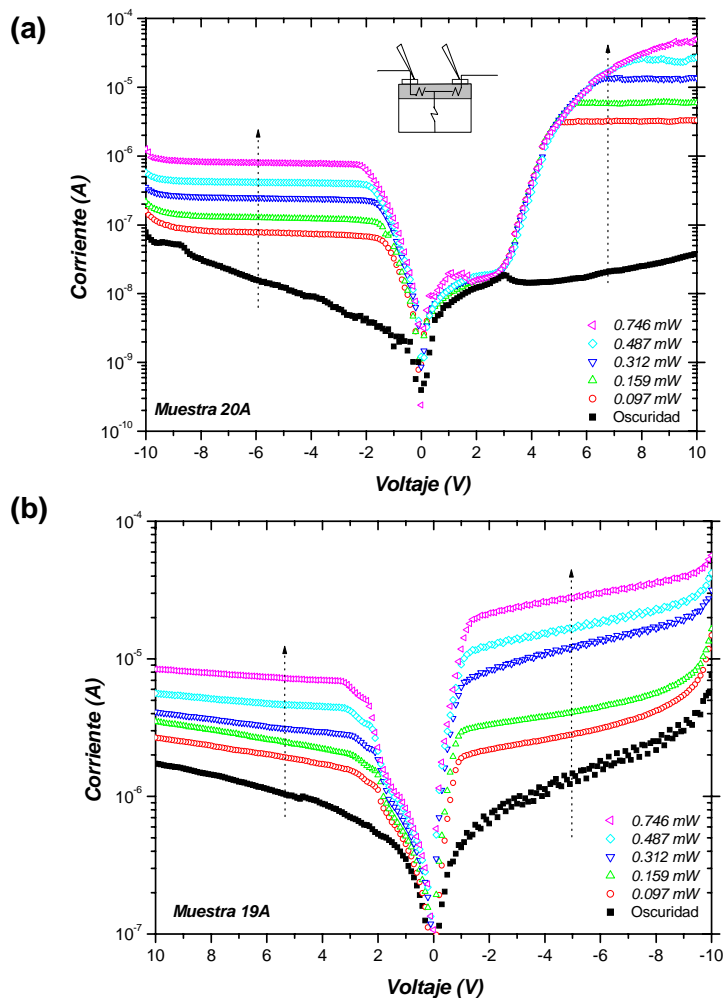


Fig. 57. Característica corriente –voltaje de los fotoconductores (FC) Au/PS/Au para las muestras 20A (a) y 19A (b), en oscuridad y bajo iluminación de una lámpara fría de luz blanca con un filtro IR.

4.2.2.2. Fotodiodos

En la Figura 58(a) y 58(b) se muestran las características de los fotodiodos (FD) basados en la estructura Au/PS/p-Si/Al para las muestras 20A y 19A, respectivamente, bajo las mismas condiciones que para la Figura 57. El voltaje fue aplicado entre el contacto de arriba (Au) y el de abajo (Al).

En este modo de mediciones, las curvas en oscuridad y en iluminación pueden ser divididas en dos regiones. La primera es cuando a los dispositivos se le aplica un voltaje grande en directa (alrededor de 2 V para ambas muestras). Las características son muy similares a las mostradas en los dispositivos FC, i) casi la misma resistencia en oscuridad a 10 V (en este caso 5 M Ω y 600 M Ω para las muestras 19A y 20A, respectivamente; ii) la misma región exponencial bajo iluminación a medio voltaje aplicado donde la corriente no cambia con la potencia de iluminación (en este caso $\eta \sim 15$ para la muestra 20A); y iii) la región de saturación a altos voltajes en directa. Esto permite asumir que en esta primera región la corriente del fotodiodo es limitada por el contacto Au/PS y la capa PS, como se describe para los dispositivos MSM. La segunda región es cuando a los dispositivos se le aplica un voltaje en inversa o en directa con valores menores a 2 V. En este caso, para ambos diodos la corriente no cambia bajo iluminación. Además el dispositivo con capa de PS de menor espesor (muestra 20A) tiene una resistencia paralela mayor que el dispositivo con capa de PS de mayor espesor (muestra 19A). Esto indica que en esta región la corriente no esta limitada por las propiedades del contacto Au/PS o la capa PS sino por la unión PS/p-Si la cual bloquea la foto generación de los pares electrón – hueco.

El mejor incremento de corriente medida es de dos órdenes de magnitud cuando la muestra 20A se ilumina con una potencia de 0.746 mW y se polariza a un voltaje de 10 V. Este incremento es un orden de magnitud menor que el obtenido por el modo fotoconductor, mientras que la corriente en oscuridad es casi la misma. Pero, en el modo fotodiodo la corriente se satura a voltajes más bajos en directa que en el modo FC. Las medidas de corriente en inversa no varían cuando se iluminan las muestras. Esto fue medido a 20 nA y 100 nA a -10 V para las muestras 20A y 19A respectivamente (mayor para la muestra con mayor tiempo de ataque).

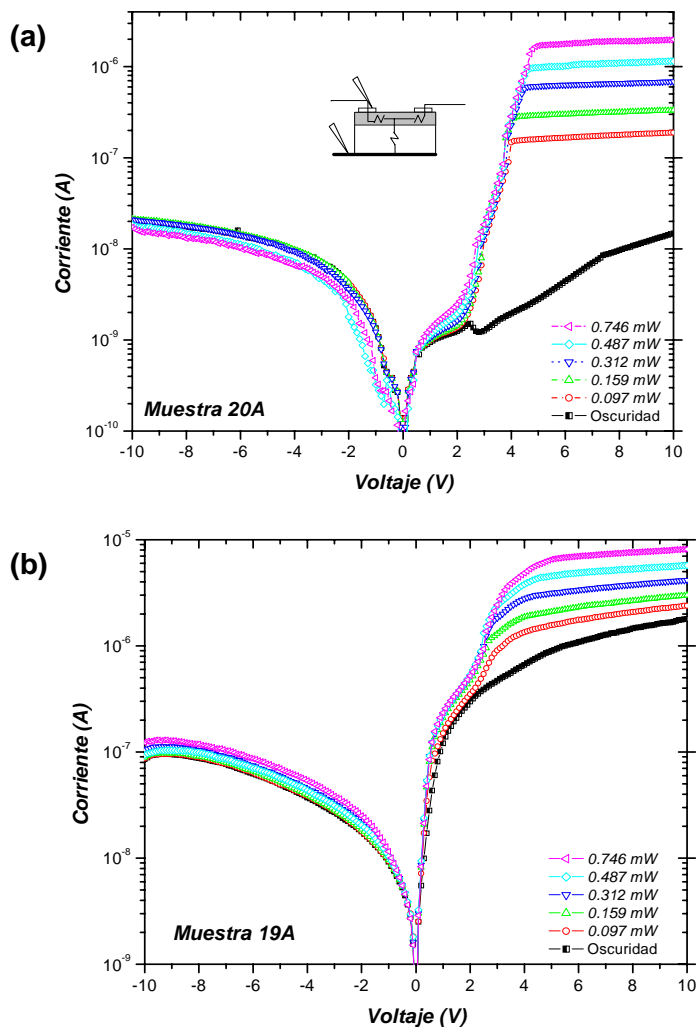


Fig. 58. Característica corriente –voltaje de los fotodiodos (FD) Au/PS/Au para las muestras 20A (a) y 19A (b), en oscuridad y bajo iluminación de una lámpara fría de luz blanca con un filtro IR.

En la Figura 59 muestra la fotocorriente, I_{ph} , vs. la potencia óptica, P_{opt} , para las estructuras Au/PS/p-Si/Al (fotodiodo, FD) a 10 V y Au/PS/Au (fotoconductor, FC) a ± 10 V. La fotocorriente se calcula para cada potencia óptica como la diferencia entre la corriente medida y la corriente en oscuridad. La fotocorriente tiene

una dependencia con la potencia óptica del tipo, $I_{ph} = \rho P_{opt}^m$. Los valores ajustados del parámetro m son casi ideal ($m = 1.0$) en todas las estructuras. Para ambas muestras, la fotocorriente fue más grande cuando las mediciones fueron realizadas en el modo fotoconductor y a voltaje en directa. La máxima fotocorriente medida fue $50 \mu A$, obtenida para ambas muestras en el modo fotoconductor a $10 V$ y $0.746 mW$. En este caso la sensibilidad calculada por la relación: $S = \frac{I_{ph}}{P_{opt}}$, es $67 mA/W$, de acuerdo con lo reportado en la ref. [84].

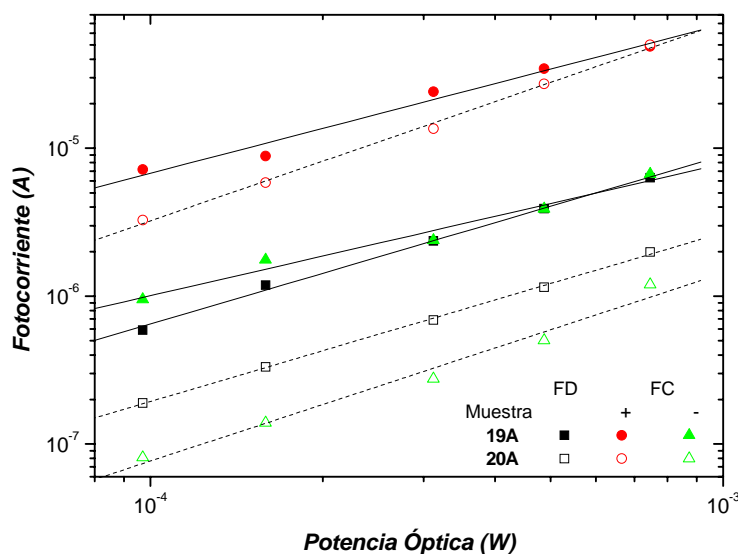


Fig. 59. La fotocorriente de la muestra 20A (símbolos vacíos) y la muestra 19A (símbolos llenos) bajo iluminación con una lámpara fría de luz blanca con un filtro IR, medidas como fotodiodo a $10 V$ (cuadrados), fotoconductor a $10 V$ (círculos) y fotoconductor a $-10 V$ (triángulos).

Los dispositivos con menor espesor de la capa de PS (muestra 20A) tiene una baja corriente de oscuridad (menor corriente de perdida) y las corrientes son incrementadas cuando es iluminada. De otra mano, el dispositivo mas grueso (muestra 19A) posee una mayor fotocorriente (mayor sensibilidad) para las configuraciones dadas. Finalmente, el modo fotoconductor las corrientes más altas se

incrementan para una potencia de iluminación dada pero alcanzan una región de saturación a altos voltajes aplicados.

Como ejemplo de la respuesta transitoria de los dispositivos fabricados, en la Figura 60 se muestra la respuesta transitoria para la muestra 20A con una resolución en la medida de 1s. La corriente es medida a 10 V, usando el modo fotodiodo, y una lámpara fría de luz blanca con un filtro IR es alternativamente cambiando el interruptor on/off a diferentes niveles de iluminación. Se puede comprobar que el FD responde perfectamente a los cambios de iluminación.

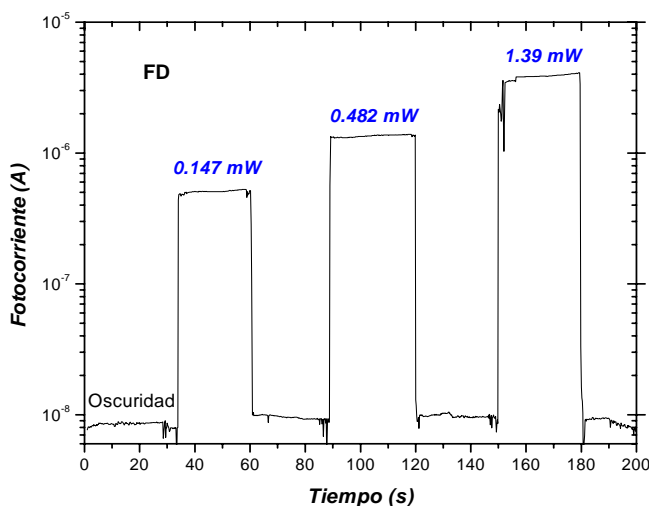


Fig. 60. Respuesta transitoria de la muestra 20A, usando la configuración fotodiodo, bajo iluminación con una lámpara fría de luz blanca con un filtro IR medido a 10V a temperatura ambiente.

La Figura 61 muestra la característica lineal corriente – voltaje cuando la muestra 20A es iluminada con un LED de 465 nm o con uno de 945 nm, usando el modo fotodiodo. La corriente en oscuridad es además descrita con el propósito de comparación. La curva I-V es similar a la obtenida cuando la muestra es iluminada

con una lámpara fría de luz blanca con filtro IR: rectificación en inversa y a bajos voltajes, la dependencia exponencial en la región media en directa y saturación a altos voltajes. Para una potencia particular, la medida de corriente para el LED IR es más grande que la corriente para el LED azul, de acuerdo con lo reportado en la literatura [26,31,94,145].

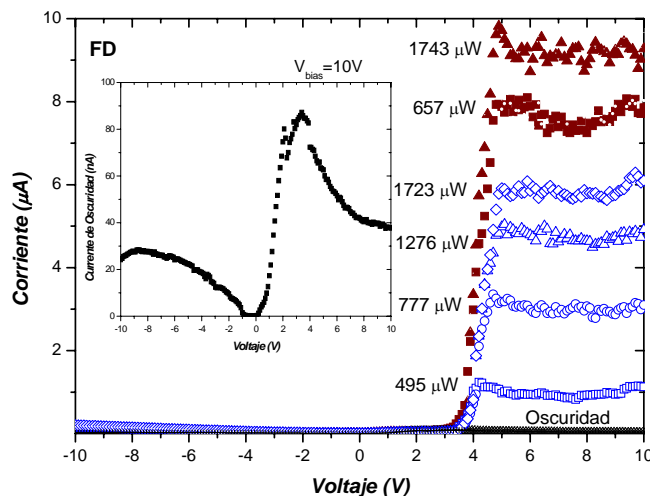


Fig. 61. Características del fotodiodo (FD) fabricado de la muestra 20A, corriente – voltaje en oscuridad y bajo iluminación monocromática. La corriente en oscuridad también es mostrada dentro. La luz monocromática utilizada fueron LEDs de 465 nm (símbolos abiertos) y 945 nm (símbolos cerrados).

Las mejores sensibilidades son 3.5 mA/W a 465 nm y 5.1 mA/W a 945 nm, medidas a 10 V y a las mayores potencias de iluminación. Y la eficiencia cuántica calculada por la relación: $QE = \frac{1240}{\lambda(nm)} \times S$, es de 0.92% para el LED de 465 nm y 0.67% para el LED de 945 nm. Los valores de la sensibilidad y de la eficiencia cuánticas medidas son menores que los reportados en la literatura [31,84,130,146]. Para mejorar estos valores es necesario usar contactos tipo electrodos interdigitados sobre los poros [26] y utilizar capas oxidadas [146].

La Figura 62 muestra la respuesta transitoria de la muestra 20A, a 10 V en una configuración fotodiodo, iluminada con una potencia óptica de $430 \mu\text{W}$ a una frecuencia de 1 Hz y usando dos tipos de LEDs: 465 nm y 945 nm. La corriente en oscuridad es de 40 nA a 10 V. La corriente fotogenerada se incrementa sobre un orden de magnitud para 465 nm y sobre dos órdenes de magnitud para 945 nm. La respuesta transitoria es buena hasta los 25 Hz, el máximo permitido por el equipo experimental de medida HP 4145B.

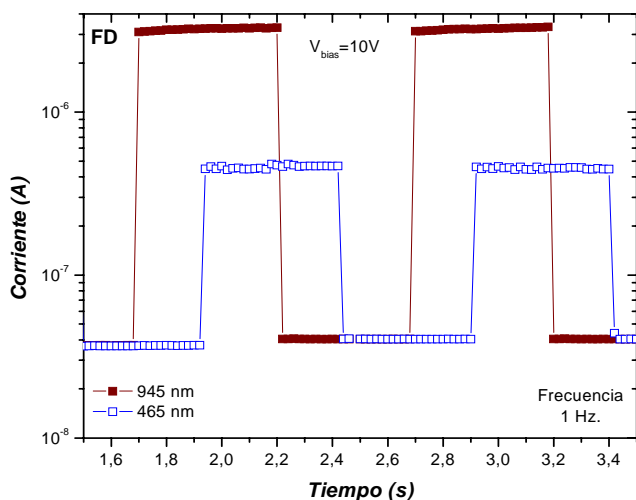


Fig. 62. Respuesta transitoria a 10 V, bajo iluminación monocromática a una frecuencia de 1 Hz, la potencia óptica es $430 \mu\text{W}$. La luz monocromática utilizada fueron LEDs de 465 nm (símbolos abiertos) y 945 nm (símbolos cerrados).