

DETERMINACIÓN DE LA REFLECTANCIA ANGULAR EN FOTODETECTORES CON LUZ POLARIZADA

J. C. Molina, M. López*, J. C. Bermúdez, Jorge A. Huerta-Ruelas**

Centro Nacional de Metrología, km 4,5 carretera a los Cués, El Marqués, Qro. México.

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany

**Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada IPN, Cerro Blanco #141

Col. Colinas del Cimatario, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

Resumen: Se presenta el sistema de medición de reflectancia angular de fotodetectores del laboratorio de espectrorradiometría de detectores de CENAM, así como los resultados de las mediciones realizadas a un fotodetector de silicio sin ventana modelo Hamamatsu S6337-01.

Los valores de reflectancia angular obtenidos son comparables con los valores calculados mediante el modelo de Fresnel para películas delgadas.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas los detectores de semiconductores como el silicio (Si), germanio (Ge), entre otros han sido empleados ampliamente en el área de radiometría [1], las ventajas que ofrecen este tipo de detectores son: el manejo es relativamente sencillo, presentan una buena uniformidad espacial, el área fotosensible tiene diferentes tamaños y formas, una alta responsividad, entre otras. Actualmente los fotodiodos son utilizados en configuraciones especiales, en los cuales se emplean más de un fotodiodo, a este tipo de arreglo se le denomina detector de trampa. Los detectores tipo trampa presentan una mayor uniformidad espacial, buena estabilidad de la responsividad a largo plazo, una baja reflectancia y un amplio alcance de operación lineal en comparación a un solo fotodiodo [2,3]. Además, la eficiencia cuántica que se alcanza con un detector tipo trampa es aproximadamente igual a 1. Estas son algunas de las características de los detectores tipo trampa que los hacen ser considerados como patrones de referencia para el mantenimiento de las escalas radiométricas

La responsividad de un detector tipo trampa se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación [4].

$$s(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} \cdot \rho(\lambda) \cdot \delta(\lambda) \quad (1)$$

donde:

$\rho(\lambda)$ = reflectancia espectral

$\delta(\lambda)$ = eficiencia cuántica

q = carga del electrón ($1,60129 \cdot 10^{-19}$ C)

h = constante de Planck ($6,62620 \cdot 10^{-34}$ Js)

c = velocidad de la luz en el vacío
($2,997925 \cdot 10^8$ m/s)

λ = longitud de onda en nm

La responsividad de un detector tipo trampa depende únicamente de una adecuada medición de la reflectancia y de la eficiencia cuántica con respecto a la longitud de onda.

Actualmente el mantenimiento de la escala de responsividad espectral de detectores en CENAM, está basada en un detector térmico (termopila) como patrón de respuesta plana, el cual presenta desventajas como una lenta respuesta, una deriva grande y la difícil medición de su reflectancia espectral, por lo que se pretende sustituir a la termopila por un detector de semiconductores en configuración tipo trampa. Con el objeto de alcanzar este propósito se establece el sistema de medición de reflectancia angular de detectores de semiconductores.

2. FOTODIODO HAMAMATSU S6337-01

El fotodiodo de silicio modelo Hamamatsu S6337-01 presenta una área fotosensible de 324 mm² (cuadrado de 18 mm x 18 mm), sin ventana (el área sensible se encuentra expuesta) y un alcance de medición de 190 nm a los 1100 nm. La imagen de este detector se muestra en la figura 1.

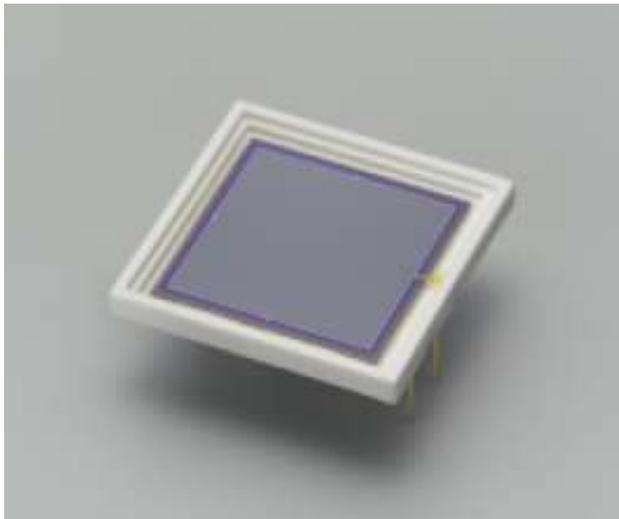


Figura 1. Fotodiodo modelo Hamamatsu S6337-01

3. CÁLCULO DE LA REFLECTANCIA EN FOTODIODOS DE SILICIO.

La estructura de un fotodiodo de silicio se muestra en la figura 2, un fotodiodo de silicio está constituido por una capa superior de óxido de silicio (SiO₂), colocada sobre una base de silicio (Si).

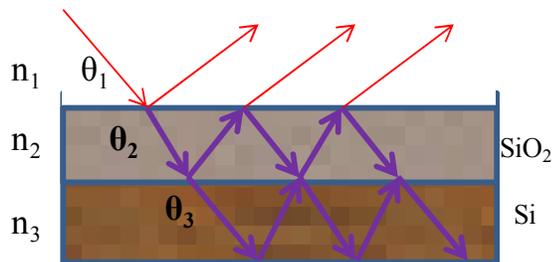


Figura 2. Estructura de un fotodiodo de silicio.

La reflectancia del fotodiodo se calcula con base en las ecuaciones de Fresnel para películas delgadas mediante el índice de refracción del Si (n₃), el espesor del SiO₂ y su índice de refracción n₂ [5].

El índice de refracción del SiO₂ presenta valores reales para la parte visible del espectro electromagnético, mientras que para el silicio se debe considerar la parte imaginaria en el índice de refracción [6,7]:

$$\bar{n}_3 = n_3 - i k_3 \quad (2)$$

donde k₃ es el coeficiente de extinción.

Los coeficientes de la amplitud de la reflectancia r_{mn} y de la transmitancia t_{mn} de un medio m a n (m, n=1, 2, 3) en la interfaz entre dos medios pueden ser determinados empleando las ecuaciones de Fresnel [2].

Para un estado de polarización-p los coeficientes son:

$$r_{mn} = \frac{n_n \cos \theta_m - n_m \cos \theta_n}{n_n \cos \theta_m + n_m \cos \theta_n} \quad (3)$$

$$t_{mn} = \frac{2n_m \cos \theta_m}{n_n \cos \theta_m + n_m \cos \theta_n} \quad (4)$$

y para un estado de polarización-s son:

$$r_{mn} = \frac{n_m \cos \theta_m - n_n \cos \theta_n}{n_m \cos \theta_m + n_n \cos \theta_n} \quad (5)$$

$$t_{mn} = \frac{2n_m \cos \theta_m}{n_m \cos \theta_m + n_n \cos \theta_n} \quad (6)$$

Considerando que los coeficientes entre la interfaz del Si y del SiO₂ tienen una parte compleja. Los ángulos de refracción θ₂ y θ̄₃ en el SiO₂ y Si, respectivamente pueden ser calculados por la ley de Snell [2].

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right) \quad (7)$$

$$\bar{\theta}_3 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 \sin \theta_1}{\bar{n}_3} \right) \quad (8)$$

La reflexión parcial del haz incidente sobre la superficie del fotodiodo resulta en una serie infinita de inter reflexiones entre las capas de Si y del SiO₂. La diferencia de fase entre dos ondas seguidas a la salida de la capa de SiO₂ es:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_1} n_2 t \cos \theta_2 \quad (9)$$

Donde

t = espesor de la capa de SiO₂ en nm.

λ₁ = longitud de onda en nm

El coeficiente de amplitud en el fotodiodo es:

$$\bar{r} = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}\bar{r}_{23}\exp(-2i\beta)}{1+r_{12}r_{23}\exp(-2i\beta)} \quad (10)$$

La intensidad del coeficiente de reflexión puede ser calculada a partir del coeficiente de amplitud del fotodiodo.

$$\rho_{s,p}(\theta_1) = |\bar{r}| \quad (11)$$

4. SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición de reflectancia angular fue diseñado para minimizar las mayores fuentes de incertidumbre en dicha medición.

El sistema total incluye el monitoreo y atenuación de la potencia del haz laser, colimación y polarización del haz laser, posicionamiento eje X, un goniómetro para rotación angular, dos fotodetectores de trampa y el sistema de mediciones eléctricas. La figura 3 muestra un esquema de este sistema de medición.

Como fuentes de radiación se emplean dos laser He-Ne con longitudes de onda de 594.0 nm y 632.8 nm. La potencia de la fuente laser es monitoreada mediante un detector comercial de silicio marca Newport, el cual recibe la señal de un divisor de haz colocado a la salida de la fuente laser figura 3. La potencia del haz laser se atenúa colocando un carrusel de filtros de densidad neutra, con los cuales se alcanza una potencia del haz de aproximadamente 100 μ W.

Dos lentes circulares con valores de f a 120 y 200, son colocadas para colimar el haz. El diámetro del haz sobre el área fotosensible del fotodetector, es de aproximadamente 1.5 mm.

La polarización del haz se realiza mediante dos polarizadores Glan Thompson.

Dos pantallas son colocadas para disminuir efectos de luz extraviada.

El sistema de posicionamiento del detector está constituido por un motor a pasos con resolución de 6 μ m en el eje X, controlado por computadora.

La rotación angular del detector bajo prueba se realiza mediante un goniómetro con una resolución de 1°.

La medición de la fotocorriente de los detectores de trampa y monitoreo se realizó mediante un amplificador de transimpedancia de la marca Grasseby modelo Tramp en la escala de 10^4 , un multiplexor de la marca Agilent modelo 34745 y un multímetro digital de 7 ½ dígitos la marca HP modelo 3457A.

5. MEDICIONES

La reflectancia del fotodetector bajo prueba se obtiene mediante el cociente de la potencia total del haz laser que llega al detector bajo prueba y la potencia del haz que esté refleja con respecto al ángulo en que se encuentra colocado [1].

La medición de la potencia total (100 %) del haz laser se realiza colocando un detector de trampa T1 de manera perpendicular al eje óptico (posición A), figura 3. A continuación se gira el detector bajo prueba al ángulo al cual se desea conocer la reflectancia y se coloca de manera perpendicular al eje óptico. Figura 3.

La medición de la potencia del haz de luz reflejado por el detector bajo prueba se realiza con un segundo detector de trampa T2 (posición B), figura 3. Una vez realizada la medición de la potencia incidente y reflejada se realiza un intercambio de detectores de trampa, repitiendo la medición. Se realizan 10 series de mediciones (potencia total-potencia del haz reflejado) antes y después del intercambio de los detectores de trampa. Esta rotación de los detectores de trampa permite eliminar los factores de corrección necesarios para la determinación de la potencia óptica total y reflejada, de tal forma que el modelo para la reflectancia es:

$$\rho_{Angular} = \sqrt{\frac{T_{2B} T_{1B}}{T_{1A} T_{2A}}} \cdot 100 \quad (12)$$

La medición de la reflectancia angular del fotodiodo se llevó a cabo en el alcance de los 8° hasta 52° con pasos de 4°.

Para minimizar los efectos de la no linealidad de la responsividad del detector las mediciones se realizaron a una potencia de referencia de 100 μ W.

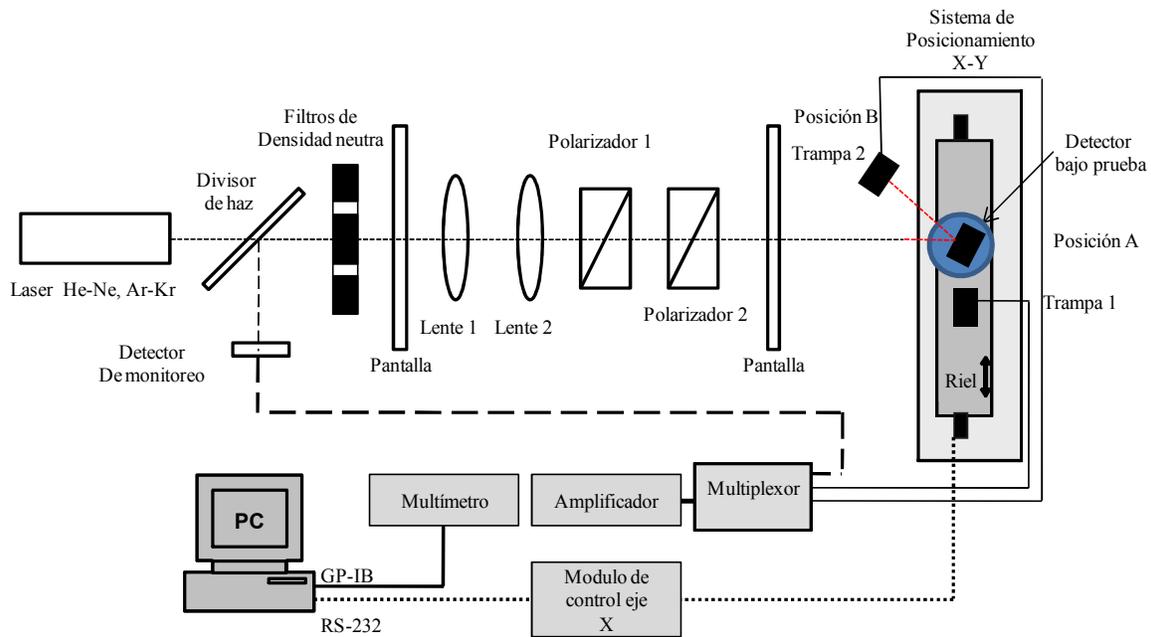


Figura. 3 Sistema de medición de reflectancia angular de detectores de semiconductores en CENAM.

6. RESULTADOS

En la figura 4-a y 4-b se muestra la reflectancia angular ($8^\circ - 52^\circ$) de un fotodiodo modelo Hamamatsu S6337-01 a una longitud de onda de 594.0 nm y 632.8 nm respectivamente. Las líneas solidas mostradas en las figuras 4a y 4b, representa la reflectancia calculada con base en las ecuaciones de Fresnel para películas delgadas, el espesor del óxido de silicio (31.2 nm) empleado en los cálculos se determino empleando un programa de ajuste desarrollado en Matlab.

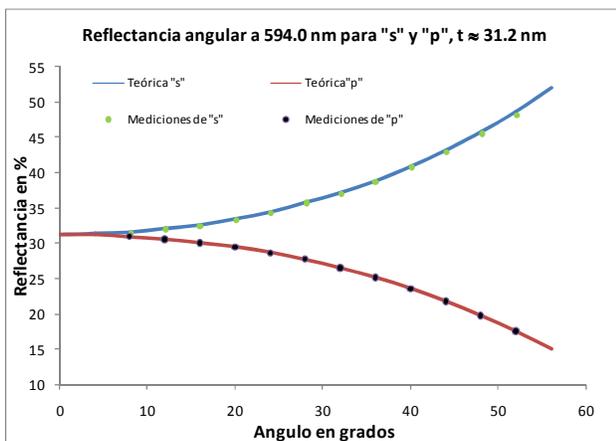


Figura. 4-a Reflectancia angular del fotodiodo Hamamatsu S6337-01 a 594.0 nm

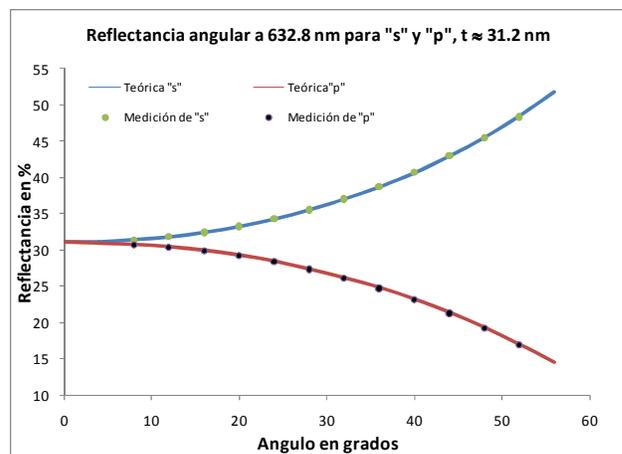


Figura.4-b Reflectancia angular del fotodiodo Hamamatsu S6337-01 a 632.8 nm.

7. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

La tabla 1 muestra el balance de incertidumbre en la medición de reflectancia angular realizada al fotodiodo.

Fuente de incertidumbre	Tipo	Contribución [%]
Repetibilidad	A	0.04
Multímetro	B	5.50E-04
Preamplificador	B	6.60E-03
Resolución	B	4.86E-04
Posición angular (36°)	B	0.07
Uniformidad espacial		
Detector de trampa 1	B	0.04
Detector de trampa 2	B	0.04
Detector bajo prueba	B	0.05
Incertidumbre estándar combinada		0.11

Tabla 1. Balance de incertidumbre para el fotodiodo Hamamatsu S6337-01 a 594.0 nm.

Como se observa en la tabla 1, la posición angular es la contribución dominante y depende de la resolución del goniómetro, la segunda fuente de incertidumbre más importante es la uniformidad espacial, en el caso del detector bajo prueba el valor de la contribución por uniformidad espacial se tomó de la referencia [8] y para los detectores de trampa los valores se tomaron de la referencia [9], ya que los detectores de trampa 1 y 2 son de características similares a los estudiados en esta publicación.

La incertidumbre estándar combinada que se encontró, en la medición de la reflectancia correspondiente a los ángulos de 8°, 12°, 16°, 20°, 24°, 28°, 32°, 36°, 40°, 44°, 48° y 52° del fotodiodo a 594.0 nm y 632.8 nm es $\leq 0.14\%$.

8. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se midió la reflectancia angular de un fotodiodo de Si modelo Hamamatsu S6337-01 sin ventana de 324 mm². La diferencia encontrada entre los valores de la reflectancia angular a 594.0 nm y 632.8 nm y los obtenidos mediante el modelo empleado para el cálculo de la reflectancia angular del fotodiodo es $< 1\%$. El nivel de incertidumbre estándar de las mediciones realizadas al fotodiodo en reflectancia angular es $\leq 0.14\%$, las mediciones realizadas validan el modelo empleado para el cálculo de la reflectancia de fotodiodos por lo tanto se concluye que el método empleado para la determinación de la reflectancia angular de detectores de semiconductores con luz

polarizada en el laboratorio de Espectrorradiometría de Detectores cumple con el uso propuesto.

Como trabajo futuro queda el ensamble del detector de trampa, la medición de la no linealidad y la determinación de su responsividad absoluta con el radiómetro criogénico para proceder al desarrollo del modelo.

REFERENCIAS

- [1] F. Grum, R. J. Becherer, "Optical Radiation Measurements," Volume I: Radiometry, Academic Press, USA, (1979).
- [2] M. Lopez, "Optical characterization of Ge-and InGaAs-semiconductor detectors for high accuracy optical radiant power measurements in the near infrared," Tesis profesional, doctorado en ciencias, Universidad Técnica de Braunschweig, Germany.
- [3] N.P. Fox, "Trap detectors and their properties," Metrología 28, 197-202 (1991)
- [4] J. Gran, "Accurate and independent spectral response scale based on silicon trap detectors spectrally invariant detectors," Aa. S. Sudbø University of Oslo, University Graduate Center - UniK, Kjeller, Norway. Justervesenet (JV), Kjeller, Norway
- [5] Atte Haapalinn, Petri Kärhä and Erkki Ikonen "Spectral reflectance of silicon photodiodes," Vol. 37, No. 4 / Applied Optics (1 February 1998).
- [6] H. R. Philipp and E. A. Taft, "Optical constants of silicon in the region 1 to 10 eV," Vol. 120, No. 1, Physical review (1 October 1960).
- [7] I. H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica," Vol. 55, No. 10, Journal of the optical society of America (October 1965).
- [8] J. C. Molina, J. C. Bermúdez, Jorge A. Huerta-Ruelas, "Medición de la uniformidad espacial de fotodetectores en CENAM," Simposio de metrología 2008.
- [9] Özcan Bazkir, Farhad Samadov, "Characterization of silicon photodiode-based trap detectors and establishment of spectral responsivity scale," Optics and Lasers in Engineering 43 (2005).