

Medida de la reflectancia de fotodiodos de InGaAs/InP

Measuring the reflectance of InGaAs/InP photodiodes

A. L. Muñoz Zurita ⁽¹⁾, J. Campos Acosta ⁽²⁾, A. Pons Aglio ⁽²⁾, A. Shcherbakov ⁽¹⁾

(1) Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. (INAOE) Apartado postal 51 y 216, Tonantzintla, Puebla, México.

(2) CSIC-Instituto de Física Aplicada. C. P. 28006 Madrid España.

E-mail de contacto: joaquin.campos@ifa.cetef.csic.es

RESUMEN:

La reflectancia de un fotodiodo, junto con su eficiencia cuántica interna, determinan el valor de la responsividad espectral, característica radiométrica fundamental de estos dispositivos usados en la medida de radiación óptica. En este trabajo se presenta el montaje experimental y los resultados obtenidos al medir la reflectancia de fotodiodos de InGaAs/InP de los usados habitualmente en laboratorios nacionales, procedentes de tres fabricantes diferentes. Asimismo se estudia la variación de la reflectancia con el estado de polarización de la radiación incidente para ángulos pequeños. Los resultados obtenidos indican que algunos modelos poseen una estructura antirreflejante en su superficie sensible y que para ángulos menores que 7,4°, la reflectancia no cambia con el estado de polarización, dentro de la incertidumbre de las medidas.

Palabras clave: Fotodiodos InGaAs, Infrarrojo Cercano, Reflectancia, Patrones en IR próximo.

ABSTRACT:

Both the reflectance and the internal quantum efficiency determine the photodiode spectral responsivity, which is the radiometric characteristic of interest in the fields where these devices can be used for optical radiation measurements. In this work, we present the experimental set-up for measuring the photodiode reflectance as well as the results of such measurements related to InGaAs/InP-photodiodes exploited in national laboratories and coming from three different manufacturers. Changing the reflectance with varying the polarization state of the incoming optical radiation for small angles of incidence has been also studied. The obtained experimental results show that some models of photodiodes have got an anti-reflecting coating on their sensitive facets and that reflectance does not change with varying the light polarization state within the measurement uncertainty, when the angles of incidence were smaller than 7,4°.

Keywords: InGaAs Photodiodes, Near infrared, Reflectance, Near IR standards.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] K. D. Stock, R. Heine, "Spectral characterization of InGaAs trap detectors and photodiodes used as transfer standards", *Metrologia* **37**, 449-452 (2000).
- [2] E. G. Atkinson, D. J. Butler, "Calibration of an InGaAs photodiode at 1300 nm with a cryogenic radiometer and a diode laser", *Metrologia* **35**, 241-245 (1998).
- [3] L. Werner, R. Friedrich, U. Johannsen, A. Steiger, "Precise scale of spectral responsivity for InGaAs detectors based on a cryogenic radiometer and several laser sources", *Metrologia* **37**, 523-526 (2000).
- [4] P. Corredera, J. Campos, M. L. Hernanz, J. L. Fontecha, A. Pons, A. Corróns, "Calibration of near infrared transfer standards at optical fibres communication wavelengths by direct comparison with a cryogenic radiometer", *Metrologia* **35**, 273-277 (1998).
- [5] J. M. Coutin, F. Chandoul, J. Bastie. "Characterization of new trap detectors as transfer standards", *Proc. 9th Int. Conf. on New Developments and Applications in Optical Radiometry*, Switzerland (2005).

- [6] J. Campos, A. Pons, A. Corróns, “Autocalibrado de algunos fotodiodos de silicio”, *Opt. Pura Apl.* **17**, 141-148 (1984).
- [7] J. Campos, J. L. Fontecha, A. Pons, P. Corredera, A. Corróns, “Measurement of standard aluminum mirrors, reflectance versus light polarisation”, *Meas. Sci. Technol.* **9**, 1-5 (1998).
- [8] J. Campos, J. L. Fontecha, A. Pons, A. Hanson, D. Williams, J. Verrill, “NPL-CSIC comparison of regular reflectance measurements”, *Metrologia* **37**, 323-327 (2000).

1. Introducción

Los fotodiodos de InGaAs/InP presentan hoy en día un nivel bajo de ruido a temperatura ambiente, una buena uniformidad de respuesta superficial y un amplio rango dinámico. Por estos motivos son los elementos detectores por excelencia en instrumentos de medida de la radiación óptica en el intervalo comprendido entre 800 nm y 1600 nm, aproximadamente, intervalo espectral en el que están desplazando a los fotodiodos de germanio. Por las mismas razones, estos fotodiodos de InGaAs se usan para mantener escalas de responsividad espectral en muchos laboratorios internacionales [1-5].

Si se mide la corriente de cortocircuito como respuesta a la radiación óptica, la responsividad espectral de un fotodiodo viene dada por la ecuación [8]:

$$R(\lambda) = [I - \rho(\lambda)] \eta(\lambda) \frac{\lambda q}{hc}, \quad (1)$$

donde ρ es la reflectancia de la superficie sensible del fotodiodo, η es la eficiencia cuántica interna, que indica el número de electrones producidos por cada fotón absorbido, λ es la longitud de onda, q es la carga eléctrica del electrón, h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz. Luego si se conoce la reflectancia y la eficiencia cuántica interna, se conoce la responsividad.

En el Departamento de Metrología del Instituto de Física Aplicada del CSIC se está desarrollando una nueva escala de responsividad espectral en el IR próximo basada en este tipo de fotodiodos. Para conocer la responsividad, se pretende determinar tanto la reflectancia como la eficiencia cuántica interna de un conjunto de fotodiodos. El punto de partida de este proyecto consiste en conocer la reflectancia a ciertas longitudes de onda, para poder interpolar después el valor a otras longitudes de onda. En este trabajo se presenta el montaje experimental desarrollado para este tipo de medida, asumiendo que la radiación se refleja de forma especular, así como los resultados obtenidos para la reflectancia de varios modelos de fotodiodo de distintos fabricantes. Asimismo, se estudia el cambio de la reflectancia con el estado de polarización de la radiación incidente para ángulos de incidencia

pequeños. Este aspecto es muy importante al desarrollar patrones de responsividad, puesto que, aunque los fotodiodos se usan en incidencia normal, los haces siempre tienen una cierta distribución angular que suele estar definida por una apertura numérica de $\pm 5^\circ$, aproximadamente. Dada la probable estructura compleja de la superficie sensible del detector la reflectancia podría cambiar con la polarización incluso para ángulos tan pequeños.

2. Montaje experimental

La medida de la reflectancia especular se puede realizar por un método directo [6] o por un método indirecto, comparando con un patrón de reflectancia. El método directo puede dar valores de incertidumbre menores en el resultado final, pero en este caso se ha optado por un método indirecto que ofrece mejor repetibilidad, puesto que el alineamiento es más sencillo. Este aspecto es importante cuando se usa radiación infrarroja.

Para llevar a cabo la medida de la reflectancia de los fotodiodos, se realizó el montaje experimental cuyo esquema se puede observar en la figura 1. Una lámpara de incandescencia con halógenos, alimentada con una corriente eléctrica continua estabilizada en 1 mA, ilumina un monocromador que cubre el intervalo espectral entre 800 nm y 1600 nm, con sus correspondientes filtros de bloqueo de las longitudes de onda de segundo orden. Tras el monocromador se sitúa un polarizador lineal en aquellas medidas que lo precisan y un divisor de haz que sirve para controlar las variaciones temporales de potencia con un detector monitor (fotodiodo de germanio). Un sistema óptico a base de espejos forma la imagen de la rendija de salida del monocromador sobre la superficie del fotodiodo a medir y recoge la luz reflejada por éste y la hace incidir sobre otro fotodiodo de germanio. El ángulo de incidencia elegido es $7,4^\circ$, que es el ángulo para el que se conoce la reflectancia especular del espejo patrón usado como referencia. Téngase en cuenta que la CIE admite asemejar a incidencia normal ángulos menores que 10° .

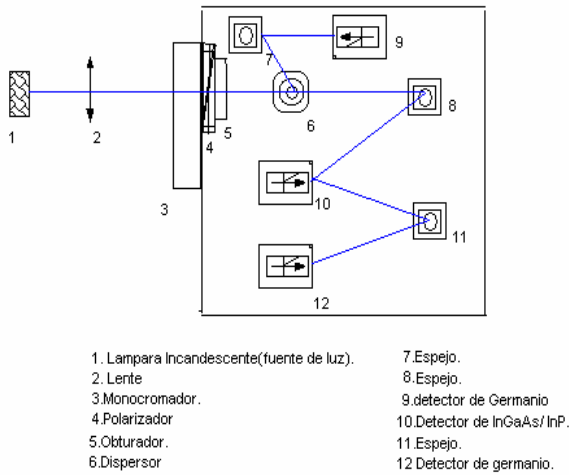


Fig. 1. Montaje experimental usado para la medida de reflectancia espectral de fotodiodos de InGaAs/InP.

El método de medida consiste en comparar la radiación reflejada por el fotodiodo de InGaAs/InP con la reflejada por un espejo de aluminio de reflectancia conocida para cada longitud de onda. La reflectancia del espejo de aluminio se ha determinado en el IFA-CSIC como se indica en las referencias [7, 8]. Con este método, la reflectancia del fotodiodo viene dada por [8]:

$$\rho(\lambda) = \frac{I_p(\lambda)}{I_m(\lambda)} \rho_m(\lambda), \quad (2)$$

siendo $I_p(\lambda)$ la respuesta del fotodiodo de germanio a la luz reflejada por el fotodiodo de InGaAs, $I_m(\lambda)$ la respuesta del mismo fotodiodo a la radiación reflejada por el espejo y $\rho_m(\lambda)$ la reflectancia del espejo. Con este montaje y este método se ha medido la reflectancia de dos fotodiodos de cada uno de los tres fabricantes diferentes. Los de un fabricante son cuadrados de 8 mm de lado, mientras que los de los otros dos fabricantes son circulares de 5 mm de diámetro.

3. Resultados

En las figuras 2a, 2b y 2c se muestran los valores espectrales de reflectancia que se han obtenido para un fotodiodo de cada fabricante, utilizando radiación con el grado de polarización propio del monocromador usado, que varía de unas longitudes de onda a otras.

Como se puede observar, el espectro de reflectancia cambia del fotodiodo de un fabricante al de otro. En los fotodiodos de 5 mm de diámetro la reflectancia es mínima en la zona de 1000 nm a 1600 nm, aproximadamente, lo que pone de

manifiesto la existencia de una estructura de capas diseñada para maximizar la respuesta en el intervalo espectral de mayor utilidad de estos detectores, que es el de las comunicaciones ópticas en el IR próximo, si bien los del primer fabricante son más eficientes que los del segundo desde el punto de vista de la minimización de la reflectancia.

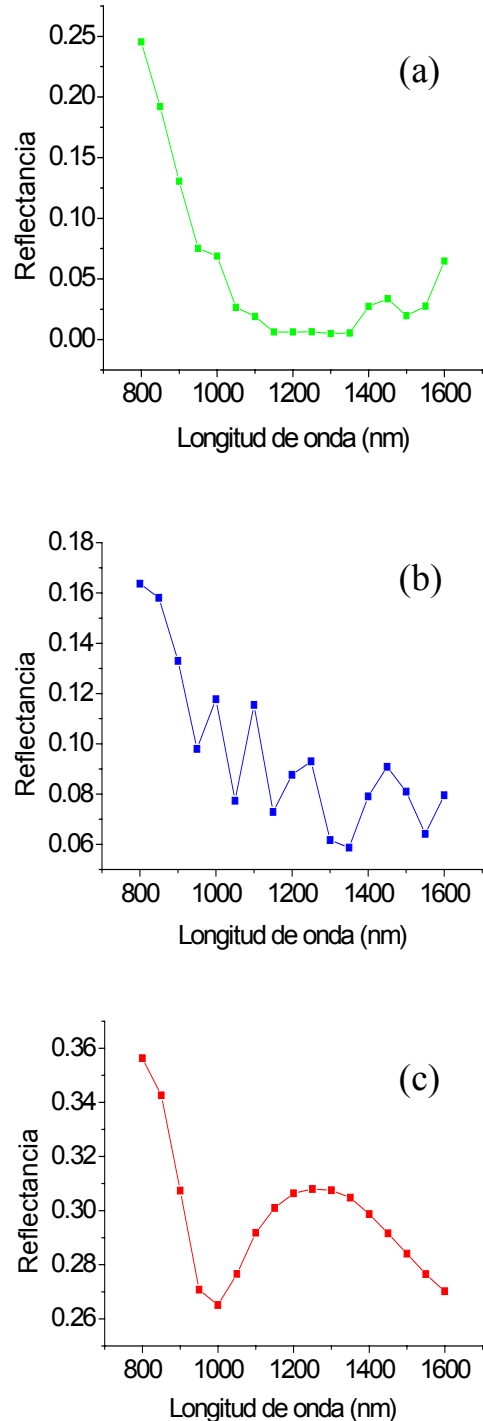


Fig. 2. Reflectancia del (a) fotodiodo 1 (5 mm) con luz parcialmente polarizada, (b) fotodiodo 2 (5 mm) con luz polarizada, y (c) fotodiodo 3 (8 mm, cuadrado) con luz parcialmente polarizada.

El fotodiodo 3, de 8 mm de lado, presenta un espectro de reflectancia diferente. Hay un valor mínimo alrededor de 1000 nm y otro alrededor de 1600 nm, pero la reflectancia presenta un máximo entre ellos. Hay que decir que este fotodiodo es más antiguo que los otros dos y corresponde a un estadio tecnológico anterior, por lo que es posible que no existiera un buen control sobre el diseño de capas en la superficie sensible para modificar la reflectancia. En cualquier caso, este tipo de fotodiodo resulta menos interesante por este motivo para utilizarlo como patrón de referencia.

Tampoco se conoce en ningún caso de forma fehaciente el material que constituye la superficie sensible, por lo que no cabe hacer hipótesis sobre la relación de estos espectros de reflectancia con el del material sin estructura, tarea que se abordará en el futuro. Los fotodiodos 1 y 2 tienen un espectro diferente entre ellos, si bien los dos parecen estar diseñados para minimizar la reflectancia en la región espectral de mayor interés. En el fotodiodo 2 se observa un comportamiento interferencial típico con ese conjunto de máximos y mínimos, lo cual concuerda con las franjas que se ven sobre el fotodiodo al observarlo bajo luz blanca.

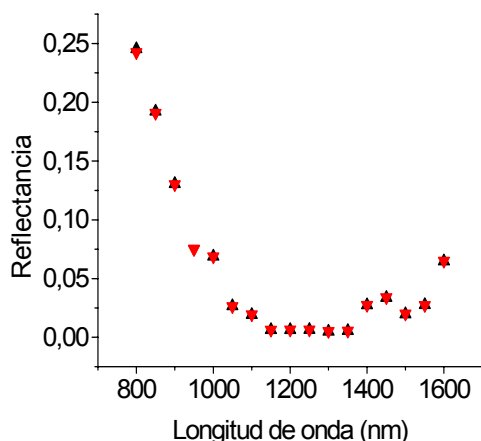


Fig. 3. Espectro de reflectancia de los fotodiodos 1 (negro) y 4 (rojo), ambos del mismo fabricante, con luz linealmente polarizada.

En la figura 3 se presenta el espectro de reflectancia de los fotodiodos 1 y 4, que pertenecen al mismo lote del mismo fabricante, obtenidos, además, con radiación linealmente polarizada. Como se puede observar, la diferencia entre ellos es despreciable y siempre mucho menor que la incertidumbre experimental de estas medidas, que varía de unas longitudes de onda a otras debido a la dependencia espectral, pero que se puede situar de forma genérica alrededor del 2%. Lo mismo ocurre con los fotodiodos 2 y 5 pertenecientes al segundo

fabricante y con los 3 y 6 pertenecientes al tercer fabricante, razón por la cual no se presentan gráficamente esos resultados. En resumen se puede decir que la repetibilidad de la reflectancia de fotodiodos de un mismo lote es alta, lo que indica la madurez de la tecnología de fabricación.

En la figura 4 se presenta la reflectancia del fotodiodo 2 medida tanto con luz linealmente polarizada como con el grado de polarización propio del monocromador usado en estas medidas (fig. 2b) para el mismo ángulo de incidencia (7,4°). La medida de la influencia de la polarización se ha realizado para todos los fotodiodos, siendo los fotodiodos 2 y 4 (del mismo fabricante) los que presentan un mayor cambio de reflectancia con el cambio de la polarización. Se observa que el cambio del espectro de reflectancia al utilizar radiación linealmente polarizada es menor que la incertidumbre de medida (2%) en prácticamente todos los casos. Esto es importante puesto que cuando el fotodiodo se usa para la medida de radiación óptica, ésta incidirá habitualmente con una divergencia menor que 5°, pero con un estado de polarización desconocido. Resultados análogos se obtienen para los otros tipos de fotodiodo.

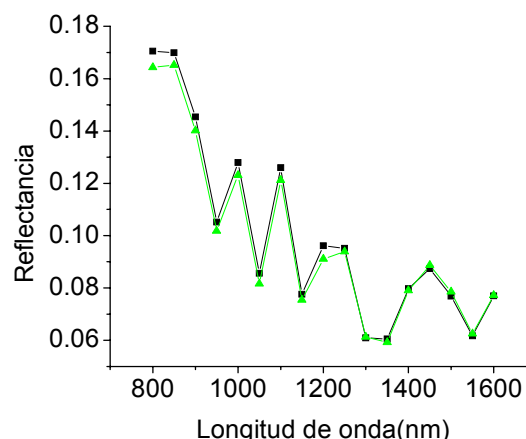


Fig. 4. Comparación de la reflectancia del fotodiodo 2 (5mm) con luz linealmente polarizada (color negro) y parcialmente polarizada (verde).

4. Conclusiones

Se ha medido la reflectancia espectral de fotodiodos de InGaAs de área grande procedentes de tres fabricantes diferentes con respecto a un patrón de reflectancia especular, desarrollando el montaje experimental apropiado para ello. Los resultados alcanzados muestran una alta repetibilidad en el espectro de los fotodiodos del mismo fabricante y lote, lo que soporta la bondad del montaje experimental usado.

Se ha comprobado que los fotodiodos de dos fabricantes (fotodiodos 1, 2, 3 y 4) presentan una superficie sensible diseñada para minimizar la reflectancia en el intervalo espectral de 1000 nm a 1600 nm, en el que tienen mayor interés estos detectores, si bien el comportamiento antirreflejante es diferente de un fabricante a otro. También se ha comprobado que las variaciones del espectro de reflectancia con el estado de polarización de la radiación incidente, en condiciones de incidencia próximas a la normal ($7,4^\circ$), están dentro de la incertidumbre experimental de estas medidas, lo cual es muy importante para poder usar estos detectores como patrones de medida de la radiación óptica.

Por último, se ha comprobado que la variación de la reflectancia entre fotodiodos del mismo lote es despreciable comparada con la incertidumbre de estas medidas.

Agradecimientos

A. L. Muñoz Zurita agradece a CONACyT, México, por la beca mixta que le ha otorgado para su estancia en el IFA-CSIC.