

MEDICIÓN DE NO-LINEALIDAD EN FOTODIODOS DE Ge E InGaAs A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA Y TAMAÑO DE HAZ

M. López¹, G. Ramos² y W. Schmid¹

¹ Centro Nacional de Metrología (CENAM), Carr. a Los Cués Km. 4.5. Mpio. El Marqués

Tel.: (442) 211 0500. E-mail: alopez@cenam.mx y wschmid@cenam.mx

² Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA-IPN), José Siurob No. 10, Col. Alameda, 76040 Querétaro, Qro. Tel.: (442) 224 1645. E-mail: gramos@cicataqro.ipn.mx

Resumen: La no-linealidad en los fotodiodos depende de varios factores, entre ellos de la longitud de onda y del tamaño del haz que lo irradia. En este artículo se presenta, tanto el sistema de medición implementado en el CENAM como los resultados obtenidos de medición de no-linealidad en fotodiodos de Ge e InGaAs a diferentes longitudes de onda, en el infrarrojo cercano, y tamaño del haz.

INTRODUCCIÓN

La linealidad de los fotodiodos en todo el alcance es una característica indispensable para mediciones de alta exactitud. Debido a que habitualmente la divergencia del comportamiento lineal es muy pequeña, esta propiedad se caracteriza mas bien a través de la no-linealidad, la cual queda definida como la diferencia relativa entre la responsividad, R , del detector a un flujo óptico arbitrario Φ y la responsividad a un flujo óptico de calibración Φ_c , usado como referencia [1]:

$$NL(\Phi; \Phi_c) = \frac{R(\Phi) - R(\Phi_c)}{R(\Phi_c)} \quad (1)$$

La no-linealidad puede ser de dos tipos: de superlinealidad, debido a trampas creadas en el fotodiodo durante su fabricación, o de saturación [2]. Se han reportado resultados de no-linealidad en fotodiodos, principalmente de Si y Ge [2-5] donde se muestran estos dos tipos de no-linealidades.

En el campo de las telecomunicaciones por fibra óptica los medidores de potencia óptica utilizan fotodiodos de Ge e InGaAs, debido a que su sensibilidad abarca las longitudes de onda a las cuales se transmite la señal (generalmente en las ventanas de 850 nm, 1 300 nm o 1 550 nm, según el tipo de fibra óptica utilizada).

En este artículo se presentan mediciones de la no-linealidad en fotodiodos de Ge e InGaAs realizadas con el sistema implementado en el CENAM, evaluando la influencia de la longitud de onda y tamaño del haz empleado en las mismas.

ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental empleado aquí (Figura 1) es un arreglo mejorado respecto al reportado anteriormente, sin embargo el método empleado es el mismo [4]; el arreglo actual garantiza que la incidencia de los haces sea normal a la superficie del detector. Esto se logra utilizando un segundo divisor de haz.

Como fuentes se emplean láseres sintonizables (FLS1 y FLS2), las cuales permiten ajustar la longitud de onda dentro de los alcances de 992 nm – 1 032 nm y 1 293 nm – 1 339 nm, respectivamente. El haz proveniente de la fuente láser es dividido en dos mediante un divisor de haz (DH1). Cada rama es polarizada linealmente por el mismo divisor con polarizaciones mutuamente perpendiculares. Esto es conveniente, pues evita interferencia al ser unidos nuevamente mediante el divisor DH2.

Las aperturas A1 y A2 permiten que los flujos ópticos Φ_1 , Φ_2 o ambos incidan sobre el fotodiodo. La placa retardadora rota la polarización del haz que incide sobre DH1, de tal forma que éste pueda dividir el haz en dos flujos ópticos similares ($\Phi_1 \cong \Phi_2$).

Debido a que el fotodiodo es utilizado en el así llamado modo de corto circuito, éste es conectado a un amplificador transimpedancia [6], que a su vez es conectado a un voltímetro. Las mediciones son registradas automáticamente mediante la computadora.

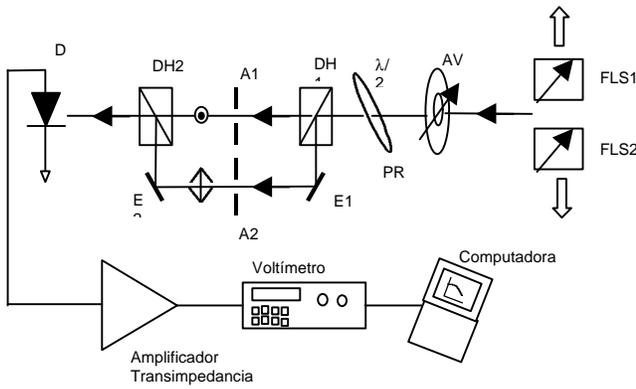


Fig. 1 Arreglo experimental para la medición de no-linealidad. Donde D: detector bajo prueba, DH1 y DH2: divisores haz polarizadores, A1 y A2: aperturas controladas eléctricamente, PR: placa retardadora $\lambda/2$, FLS1 y 2: fuentes láser sintonizables, E1 y E2: espejos y AV: atenuador variable.

El fotodiodo de Ge utilizado en este estudio es del tipo *p-n* (modelo: B1920-01, Hamamatsu), mientras el de InGaAs es del tipo *p-i-n* (modelo: G8370-03, Hamamatsu).

PROCESO DE MEDICIÓN

La medición se realiza mediante el método de superposición de haces con pasos integrados descrito en las referencias [2, 7]. Este método consiste en hacer incidir dos flujos ópticos Φ_1 y Φ_2 parecidos ($\Phi_1 \cong \Phi_2$) sucesivamente sobre el detector, los cuales generan las señales de salida S_1 y S_2 respectivamente. En un segundo paso, ambos flujos $\Phi_1 + \Phi_2$ irradian el detector al mismo tiempo, generando una señal $S_{1,2}$. Si $S_{1,2} \neq S_1 + S_2$, entonces el detector presenta una no-linealidad, que se calcula mediante:

$$NL(S_{1,2}; S_1) = \frac{(S_1 + S_2) - S_{1,2}}{S_{1,2}} \quad (2)$$

donde: $S_1 \gg S_2$.

Los valores de NL obtenidos por la ec. (2) pueden ser aproximados fácilmente por una función polinomial de tercer orden, tal como se muestra en la ec. (3), ya que el error del ajuste de dicha función se encuentra dentro de la incertidumbre de la medición de No-linealidad.

$$NL^* = a + m_1 S + m_2 S^2 + m_3 S^3 \quad (3)$$

La no-linealidad obtenida por la ec. (2) es relativa, por lo que en la práctica es más útil conocer el factor de corrección debido a la no-linealidad acumulada $(1 - E(S_0, S_N))$ [8] desde el flujo óptico inicial S_0 hasta el flujo óptico de interés S_N , la que queda dada por :

$$E(S_0, S_N) \approx NL^*(2S_0, S_0) + NL^*(4S_0, S_0) + \dots \\ \dots NL^*(2^N S_0, 2^{N-1} S_0) \quad (4)$$

donde NL^* es la no-linealidad obtenida con la curva de ajuste a un flujo óptico dado y N es el número de pasos desde S_0 hasta S_N .

RESULTADOS

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en la medición de la no-linealidad del fotodiodo de unión *p-n* de Ge, a diferentes longitudes de onda (1 310 nm, 1 327 nm y 1 024 nm). El área activa de este fotodiodo es de $78,5 \text{ mm}^2$ (10 mm de diámetro). El haz con el que fue irradiado tiene un perfil semi-elíptico de aproximadamente 6 mm de diámetro en su parte más ancha. Para esta determinación se consideraron solamente intensidades superiores a 10% del valor máximo.

La no-linealidad observada en la Figura 2 presenta un comportamiento típico de saturación. Cuando el fotodiodo se utiliza a longitudes de onda mayores éste se satura más rápidamente, es decir, a un flujo óptico más pequeño.

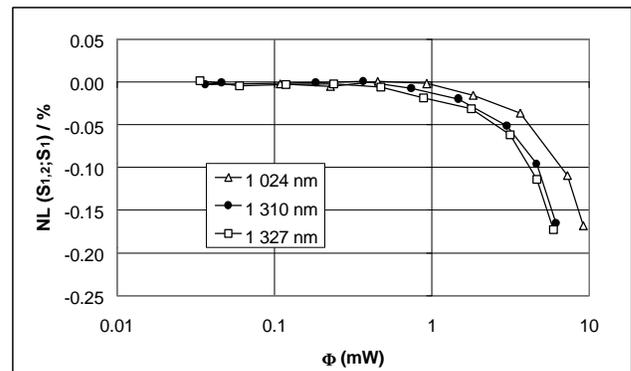


Fig. 2 No-linealidad en fotodiodo de Ge modelo: B1920-01, para diferentes longitudes de onda.

En la Figura 3 se muestran los resultados de no-linealidad para el fotodiodo de InGaAs a diferentes longitudes de onda. En este caso, el área del detector es de 7 mm^2 (3 mm de diámetro) y el haz

con el que fue irradiado tiene un diámetro de ≈ 2 mm. Se observa aquí el mismo comportamiento que para el fotodiodo de Ge, también la no-linealidad se reduce a longitudes de onda menores.

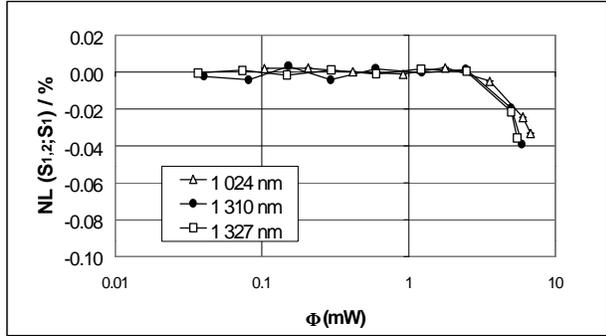


Fig. 3 No-linealidad en fotodiodo de InGaAs modelo: G8370-03, a diferentes longitudes de onda.

La Figura 4 muestra la no-linealidad del fotodiodo de Ge en función del diámetro del haz con el que fue irradiado. Los diámetros de haz elegidos fueron: 10 mm, 8 mm, 6 mm y 2 mm. Este tipo de estudio se realizó únicamente en el fotodiodo de Ge ya que su área activa es relativamente grande, lo cual permite trabajar fácilmente con haces de diferente diámetro.

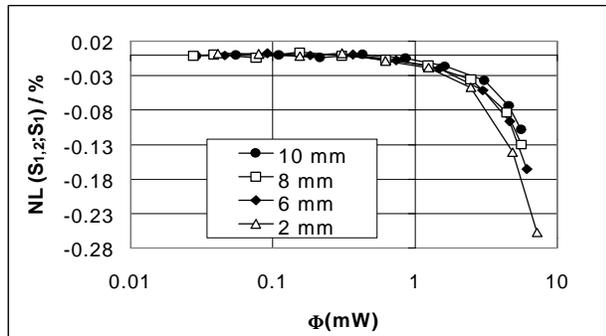


Fig. 4 No-linealidad en fotodiodo de Ge con diferentes diámetro de haz.

Se observa que la no-linealidad del fotodiodo de Ge depende considerablemente del diámetro del haz. Mientras más grande sea el diámetro del haz, es decir, cubra más área activa del fotodiodo, éste será más lineal.

DISCUSIÓN

La no-linealidad de los fotodiodos estudiados aquí es del tipo de saturación. El efecto de saturación se deja explicar fácilmente con ayuda del circuito equivalente del fotodiodo (Figura 5). La fotocorriente

I_f generada por el fotodiodo es dividida en dos, I_{shunt} que pasa a través de la resistencia de la unión (R_{shunt}), e I (señal de salida) que pasa a través de las resistencias en serie (R_s) y de carga (R_L):

$$I_f = I_{shunt} + I \quad (5)$$

Cuando un flujo óptico alto incide sobre el fotodiodo, se genera una fotocorriente alta y consecuentemente una tensión alta a través de R_{shunt} . Debido a que el valor de esta resistencia cae a tensiones altas, la corriente I_{shunt} aumenta, ocasionando que la corriente I disminuya.

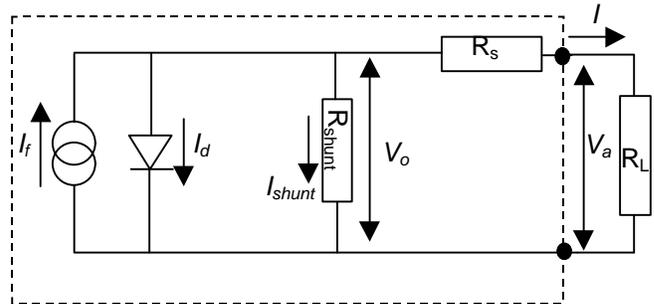


Fig. 5 Circuito equivalente de un fotodiodo

La responsividad de un fotodiodo es función de la longitud de onda, λ , y su eficiencia cuántica, η (número de fotoelectrones generados por la incidencia de fotones),

$$R(\lambda) = \frac{I_f}{\Phi} = \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad (6)$$

donde:

Φ = flujo óptico,

I_f = fotocorriente,

q = carga del electrón,

h = constante de Planck,

c = velocidad de la luz en el vacío.

Dado que la responsividad de un fotodiodo es distinta para diferentes longitudes de onda, para analizar el efecto que esto tiene sobre la no-linealidad, se han graficado en la Figura 6 mismos resultados obtenidos para el fotodiodo de Ge (Figura 2), esta vez no en función del flujo óptico, sino en función de la fotocorriente. En esta figura se observa que las diferentes gráficas prácticamente se superponen. Esto permite decir que la variación de no-linealidad con la longitud de onda observada en la Figura 2 se debe en realidad a que el fotodiodo tiene diferente responsividad a distintas longitudes de onda.

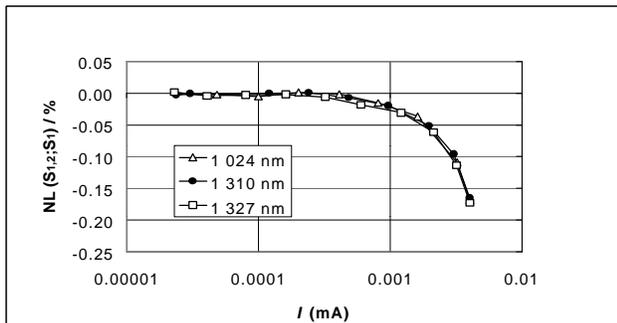


Fig. 6 No-linealidad en fotodiodo de Ge a diferentes longitudes de onda.

La dependencia de la no-linealidad respecto al tamaño del haz es indicativo de que el efecto de no-linealidad está más bien relacionado con la densidad de flujo óptico que incide sobre el detector, y no con un determinado flujo óptico. Un mismo flujo óptico si es concentrado en un área muy pequeña puede conducir a la saturación, mientras que si es distribuido en un área mayor puede ser que no sature al detector. Esto a su vez parecer ser indicativo de que la saturación del detector no se produce por efecto de una fotocorriente determinada sino más bien debido a una densidad crítica de fotocorriente por unidad de área.

CONCLUSIONES

Se ha investigado la no-linealidad de dos tipos de fotodiodos (Ge e InGaAs) que son utilizados frecuentemente en medidores de potencia óptica en el infrarrojo cercano. Se determinó el comportamiento de ésta a diferentes longitudes de onda y tamaños de haz. Ambos fotodiodos presentaron no-linealidad del tipo de saturación tanto en función de la longitud de onda como del diámetro del haz. Las diferencias de la no-linealidad observadas en función de la longitud de onda pueden ser explicadas si se toma en cuenta la responsividad del fotodiodo. Las diferencias de la no-linealidad observadas en función del tamaño del haz pueden ser explicadas asumiendo que el efecto de saturación se debe a una densidad crítica de flujo óptico.

REFERENCIAS

- [1] Calibration of Fiber-Optic Power Meters, International Standard, IEC 1315, 1995, 21.
- [2] Shao Yang, Igor Vayshenker, et. al., Optical Detector Nonlinearity: Simulation, NIST Technical Note 1376, 1995, 5-6.
- [3] L. P. Boivin, Automated Absolute and Relative Spectral Linearity Measurements on Photovoltaic Detectors, Metrologia 30, 1993, 355-360
- [4] K.D. Stock Ge photodiodes as transfer standards for radiant power measurements in the field of fibre optics, Measurement, Vol 8, 1990, 33-34.
- [5] A.R. Schaefer, E. F. Zalewski and Jon Geist, Silicon detector nonlinearity and related effect, Applied Optics, Vol 22, No.8, 1983, 1323-1235.
- [6] George P. Eppeldauer, Optical Radiation Measurement with selected detectors and matched electronic circuits between 200 nm and 20 μ m, NIST Technical Note 1438, 2001, 1-9.
- [7] M. López, G. Ramos y W. Schmid, Determinación de No-linealidad en detectores fotovoltaicos de silicio, Simposio de Metrología, 2001, B3-1 – B3-3.
- [8] Joachim Fischer and Lei Fu, Photodiode nonlinearity measurement with an intensity stabilized laser as a radiation source, Applied Optics, Vol. 32, No. 22, 1993, 4187-4190.