

Parámetros relevantes en el estudio de la no-linealidad de fotodiodos

Relevant parameters to investigate the non-linearity of photodiodes

Elisa BORREGUERO, Joaquín CAMPOS, Alejandro FERRERO, Alicia PONS, María Luisa HERNANZ, José Luis VELÁZQUEZ y Berta BERNAD

1. Departamento de Imágenes, Visión e Instrumentación Óptica, Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. C/. Serrano, 144. 28006 Madrid.

Persona de contacto: Joaquín Campos (joaquin.campos@csic.es).

RESUMEN:

El comportamiento lineal en la respuesta de un fotodiodo es una condición fundamental en medidas radiométricas, espectrofotométricas y de radiación pulsada o continua. Por tanto, se requiere que la respuesta eléctrica del fotodiodo sea proporcional al flujo radiante incidente y que se mantenga estable en el tiempo y en un rango de irradiancia. Sin embargo, diversas medidas publicadas evidencian una falta de linealidad dependiente de la estructura interna del fotodiodo, de la potencia y del tamaño del haz incidente.

Este trabajo, para caracterizar la no-linealidad en la respuesta de fotodiodos como función de estos mismos factores, adopta el modelo de eficiencia cuántica interna desarrollado por Ferrero et al. en el Instituto de Óptica (CSIC) [1]. Además, mediante simulaciones para distintos supuestos, evalúa la influencia de cada parámetro en la no-linealidad de respuesta comparando resultados de las simulaciones con datos experimentales seleccionados en una recopilación bibliográfica [2, 3].

Palabras clave: Linealidad, fotodiodos, fotodiodos de silicio, eficiencia cuántica interna.

ABSTRACT:

Linear behavior in the response of a photodiode is a fundamental condition for radiometric, spectrophotometric and pulsed or CW radiation measurements. Therefore, an electrical response of the photodiode proportional to the incoming radiant flux, which must keep stable along the time and over an irradiance range, is required. Nevertheless, several published measurements show a non-linearity which depends on the internal structure of the photodiode, the spot size and the power of the incoming beam.

This work, in order to characterize the non-linearity in the response of photodiodes as a function of these same factors, adopts the internal quantum efficiency model developed by Ferrero et al. at Instituto de Óptica (CSIC) [1]. Moreover, by means of simulations for different scenarios, the influence of each parameter in the non-linearity response is evaluated by comparison of the simulation and experimental data from a bibliographical compilation [2, 3].

Key words: Linearity, photodiodes, silicon photodiodes, internal quantum efficiency.

1.- Introducción

En medidas radiométricas es muy importante que la respuesta eléctrica del detector sea proporcional al flujo radiante incidente, porque así el flujo se determina directamente de la respuesta y porque muchas otras magnitudes se definen como el cociente de dos respuestas del fotodiodo. Por tanto, la linealidad en la respuesta de los fotodiodos es una propiedad esencial que debe ser estable en el tiempo, en el intervalo espectral de respuesta y en el rango de irradiancia.

Las desviaciones más comunes de la linealidad se manifiestan cuando la responsividad, cociente entre la respuesta del detector y la potencia incidente, disminuye (saturación de respuesta) o cuando la respuesta es mayor que el valor constante correspondiente (efecto que se conoce como suprarresponsividad).

En el presente trabajo se relacionan las desviaciones de la linealidad de las curvas características de respuesta de los fotodiodos con su estructura interna, la potencia y el tamaño del haz incidente, a partir del modelo para la eficiencia cuántica interna desarrollado por Ferrero et al. en el Instituto de Óptica (CSIC) [1].

También se comparan las curvas características de linealidad de respuesta obtenidas con las simulaciones realizadas con los resultados experimentales recogidos en la bibliografía para dos tipos de fotodiodos: de silicio [2] y de InGaAs/InP [3].

2.- Parámetros relevantes en la expresión de la fotocorriente

Generalmente, la fotocorriente generada por el fotodiodo, como respuesta a un estímulo de radiación, se expresa en función de su eficiencia cuántica interna, definida como el cociente entre el número de portadores generados por la radiación absorbida y el número de fotones absorbido, que se considera constante, si bien experimentalmente se ha encontrado que existe una dependencia de la misma con el tamaño del haz [2, 3].

La estructura interna del fotodiodo también es determinante para la eficiencia cuántica interna y, por tanto, para el valor de la fotocorriente. En el interior del fotodiodo, en

torno a la unión de las distintas capas de material semiconductor que lo conforman, se extiende la región de agotamiento de carga, flanqueada por la región anterior y posterior.

En este trabajo se ha empleado el modelo de la referencia [1] con el que la fotocorriente viene dada por la ecuación:

$$i = \exp(-\alpha_a a) \left\{ i_\phi \left[1 - \delta_{out} - \frac{1}{2} (\delta_r + \delta_f) \right] - \frac{1}{2} \frac{\delta_r}{\Xi_r} \ln \left(1 + \frac{\Xi_r i_\phi}{1 + \frac{\Xi_r i_\phi \delta_{out}}{\delta_r}} \right) - \frac{1}{2} \frac{\delta_f}{\Xi_f} \ln \left(1 + \frac{\Xi_f i_\phi}{1 + \frac{\Xi_f i_\phi (1 - \delta_f)}{\delta_f}} \right) \right\} \quad (1)$$

En los términos de la fotocorriente de la expresión (1), se refleja la influencia de las distintas regiones del fotodiodo; siendo: i_ϕ la fotocorriente generada si toda la radiación se absorbiera en la región agotamiento de carga (2), δ_f y δ_r la fracción de radiación absorbida en las regiones anterior y posterior, respectivamente (3) y (4), δ_{out} la fracción de radiación que atraviesa el fotodiodo sin ser absorbida (5) y Ξ_f y Ξ_r los términos de supralinealidad debido a la radiación absorbida en la región anterior y posterior, respectivamente (6) y (7).

$$i_\phi = \frac{qn}{hc} (1 - \rho) P \lambda \quad (2)$$

$$\delta_f = 1 - \exp(-\alpha f) \quad (3)$$

$$\delta_r = \exp(-\alpha D) - \exp(-\alpha H) \quad (4)$$

$$\delta_{out} = \exp(-\alpha H) \quad (5)$$

$$\Xi_f = \frac{2\tau_n \alpha \exp(-\alpha_a a) \delta_f}{qN_a S} \quad (6)$$

$$\Xi_r = \frac{2\tau_p \alpha \exp(-\alpha_a a) \delta_r}{qN_d S} \quad (7)$$

La expresión (1) de la fotocorriente es una función del haz incidente (longitud de onda

λ , sección S y potencia P) y de las características del material que constituye el fotodiodo: ópticas (coeficientes de absorción de la capa de pasivación que generalmente lo antecede, α_a y de las capas del fotodiodo α , y reflectancia ρ), electrónicas (tiempo de vida media de electrones τ_n y huecos τ_p y concentración de átomos donadores N_d y aceptadores N_a) y estructurales (espesor de la capa de pasivación a , profundidad total del fotodiodo H , profundidad de la región anterior f y profundidad hasta la que se extiende la región de agotamiento de carga D). Además q , h , c y n , representan la carga del electrón, la constante de Planck, la velocidad de la luz en el vacío y el índice de refracción del aire, respectivamente.

3.- Simulación de curvas características de linealidad de respuesta

Para estudiar la no-linealidad en la respuesta de fotodiodos, se procede a imagen del método de adición de estímulos. Se simulan dos fotocorrientes generadas: la correspondiente a un nivel de flujo incidente y la correspondiente al doble de ese flujo y se calcula el cociente entre la señal del flujo radiante doble y la del doble del flujo radiante simple. Este cociente se conoce como razón de no-linealidad y, representado en función de la fotocorriente calculada para el flujo sencillo, da lugar a la curva característica de respuesta de un fotodiodo.

En las simulaciones realizadas, los parámetros a estudiar f , D , H , N_d , N_a , λ y el diámetro del haz incidente d , son parámetros libres. Se consideraron constantes τ_n y τ_p con un valor típico de 200 ns, además de un recubrimiento transparente tal que $\exp(-\alpha_a a)$ sea 1. A continuación se optimizan los valores de los parámetros variables minimizando la desviación estándar existente entre la curva característica de linealidad de respuesta de la simulación y los datos experimentales. Por último, se verifican los resultados analizando los valores de salida de los parámetros.

3.1.- Fotodiodos de silicio

Para estudiar la no-linealidad de respuesta en fotodiodos de silicio, se introducen como datos experimentales los valores de las curvas características de linealidad de respuesta

de los fotodiodos F y E de la referencia [2]. Además, se conoce que la longitud de onda incidente debe ser mayor que 780 nm ya que en el montaje experimental se colocó un filtro que absorbía las longitudes de onda por debajo de este valor.

Se realiza la optimización para ambos casos obteniendo los resultados mostrados en las tablas 1 y 2:

Parámetro	Valor	Unidades
λ	0,936	nm
d	4763	nm
f	0,12	nm
D	99	nm
H	326	nm
N_d	138	cm ⁻³
N_a	1368	cm ⁻³

Tabla 1: Valores optimizados de los parámetros de la simulación ajustada a los datos experimentales de linealidad de respuesta para el fotodiodo F de la referencia [2].

Parámetro	Valor	Unidades
λ	0,738	nm
d	3201	nm
f	0,97	nm
D	94	nm
H	291	nm
N_d	1077	cm ⁻³
N_a	754	cm ⁻³

Tabla 2: Valores optimizados de los parámetros de la simulación ajustada a los datos experimentales de linealidad de respuesta para el fotodiodo E de la referencia [2].

Analizando los valores optimizados de las tablas 1 y 2, se observa que los parámetros de la simulación correspondientes a la estructura interna adquieren valores razonables en torno a valores típicos para un fotodiodo de silicio. Además, los valores de los parámetros del haz incidente podrían corresponder, por su diámetro, a un haz láser emitiendo en el infrarrojo cercano a una longitud de onda mayor que las que absorbe el filtro del montaje experimental, por lo que también concordaría en ese aspecto.

Para elaborar las gráficas que se muestran en las figuras 1 y 2, se representan las curvas características de linealidad de respuesta

simuladas con los valores optimizados resultantes de la tabla 1 y 2, respectivamente.

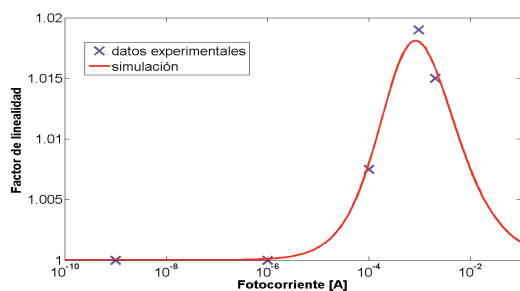


Fig. 1: Ajuste de la curva de linealidad de respuesta simulada a los datos experimentales para el fotodiodo F de la referencia [2].

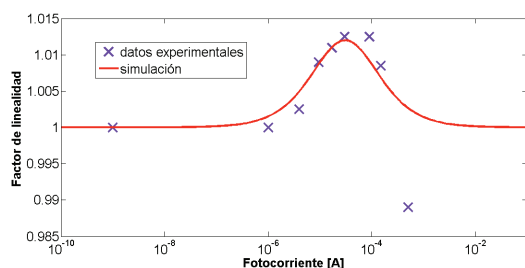


Fig. 2: Ajuste de la curva de linealidad de respuesta simulada a los datos experimentales para el fotodiodo E de la referencia [2].

En la figura 1, se observa que tanto la posición como la anchura del máximo de la curva de la simulación optimizada, se ajusta bastante a los puntos experimentales. Sin embargo, no ocurre lo mismo con la altura, la magnitud de la supralinealidad, dando lugar a una desviación estándar de 0,0007.

En la figura 2, se observa que la altura del máximo de la simulación queda por debajo de los puntos experimentales. Su posición también está desplazada hacia valores menores de fotocorriente, respecto a los puntos experimentales. Sin embargo, la mayor diferencia se debe a que la simulación no es capaz de reproducir la asimetría del máximo en su descenso, dando lugar a una desviación estándar de la curvas de 0,0051.

3.2.- Fotodiodos de InGaAs/InP

Para estudiar la no-linealidad de respuesta en fotodiodos de InGaAs/InP, se procede análogamente al caso anterior. Se introducen como datos experimentales los valores de las curvas características de linealidad de respuesta del fotodiodo, de 3 mm de área activa, ETX-3000T-3 de la referencia [3], en condición de sobre-iluminación de su área activa.

A continuación, se realiza la optimización cuyos resultados muestra la tabla 3:

Parámetro	Valor	Unidades
λ	0,748	μm
d	3070	μm
f	0,4	μm
D	95	μm
H	351	μm
N_d	1538	μm^{-3}
N_a	500	μm^{-3}

Tabla 3: Valores optimizados de los parámetros de la simulación ajustada a los datos experimentales de linealidad de respuesta para el fotodiodo ETX-3000T-3 de la referencia [3].

Atendiendo a los valores optimizados de la tabla 3, se comprueba cómo el diámetro del haz incidente ilumina por completo el área activa del fotodiodo.

Para obtener la gráfica mostrada en la figura 3, se representa la curva característica de linealidad de respuesta simulada con los valores optimizados resultantes de la tabla 3.

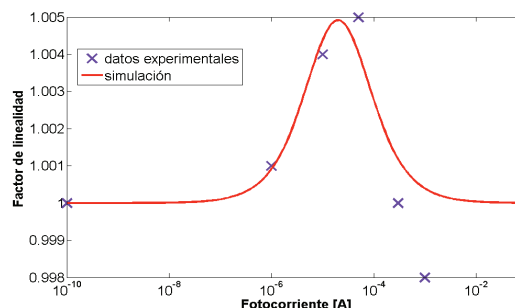


Fig. 3: Ajuste de la curva de linealidad de respuesta simulada a los datos experimentales para el fotodiodo ETX-3000T-3 [3].

En la figura 3 se observa que ni la altura, ni la posición del máximo de la curva de la simulación optimizada se ajustan a los puntos experimentales. Sin embargo, la mayor diferencia se debe a que la simulación no reproduce los puntos por debajo del comportamiento lineal. Este ajuste tiene una desviación estándar de la curva de 0,0013.

4.- Análisis de la no-linealidad

4.1.- Supralinealidad y estructura interna

El parámetro significativo de la estructura interna de un fotodiodo en relación al comportamiento no-lineal es la extensión de la región de agotamiento de carga. En función

de la misma queda definida la fracción absorbida en la región posterior, δ_r , ya que incrementar δ_r implica disminuir la extensión de la región de agotamiento de carga (para una misma profundidad total del fotodiodo). Comparando los máximos de las figuras 1, 2 y 3, se puede observar que la respuesta de los fotodiodos está por encima del comportamiento lineal; es decir, existe suprarresponsividad. Puede comprobarse que incrementar δ_r supone aumentar el valor del máximo, aunque su posición en valor de fotocorriente sería la misma.

4.1.- Supralinealidad y diámetro del haz

El diámetro del haz incidente es otro parámetro que determina la supralinealidad de respuesta de un fotodiodo al definir la irradiancia del haz para una misma potencia. En las figuras 1 y 2, puede observarse cómo al aumentar el diámetro del haz el máximo se desplaza hacia valores mayores de fotocorriente. Es decir, al disminuir la irradiancia la aparición de suprarresponsividad se desplaza hacia valores mayores de fotocorriente. Este hecho puede emplearse para que la no-linealidad aparezca a niveles de corriente que no correspondan con el rango de trabajo del fotodiodo, evitando este efecto.

En el caso estudiado de fotodiodos de InGaAs/InP, es importante determinar el diámetro del haz incidente, además de la irradiancia, para conocer si se están manifestando los efectos correspondientes a una situación de sobre-iluminación del área activa del fotodiodo.

5.- Conclusiones

En primera aproximación, adoptando el modelo para la eficiencia cuántica interna desarrollado por Ferrero et al. en el Instituto de Óptica (CSIC) [1], las simulaciones de curvas de linealidad de respuesta realizadas pueden emplearse para caracterizar cualitativamente un comportamiento no-lineal de respuesta, dependiente de la longitud de onda, identificando qué fenómeno contribuye más significativamente y qué parámetro del fotodiodo o del haz es el responsable. En los mejores casos de ajuste, las diferencias existentes entre las simu-

laciones y los datos experimentales pueden atribuirse al empleo de valores típicos, por simplicidad o porque se desconocen los valores de cada fotodiodo en particular.

En el caso de fotodiodos de InGaAs/InP, la falta de ajuste entre la simulación y los datos experimentales se debe, además, a la diferencia entre la estructura simulada y la que origina realmente la hetero-unión de un fotodiodo de este tipo, donde el coeficiente de absorción es distinto en cada capa. Por otro lado, en condiciones de sobre-iluminación, la suprarresponsividad no depende de la longitud de onda, es casi un orden de magnitud menor que en los fotodiodos de silicio y se origina por la radiación absorbida por el material exterior al área activa, que tiene un comportamiento no-lineal. Reproducir este hecho requeriría, además de una simulación de la absorción de la radiación en función de la profundidad, también en función del desplazamiento respecto al centro del área activa.

Los puntos por debajo del comportamiento lineal suponen un límite de aplicación de estas simulaciones. Se necesitaría incluir algún término que represente la saturación de respuesta.

Agradecimientos: Los autores agradecen al EMRP la subvención del proyecto NEW-STAR. El programa EMRP está financiado conjuntamente por los países de EURAMET participantes y la Unión Europea.

Referencias

- [1] Alejandro FERRERO, Joaquín CAMPOS, Alicia PONS y Antonio CORRÓNS, "New model for the internal quantum efficiency of photodiodes based on photocurrent analysis", *Applied Optics*, 44, 208-216, 2005.
- [2] W. BUDDE, "Multidecade linearity measurements on Si photodiodes", *Applied Optics*, 18, 1555-1558, 1979.
- [3] Pedro CORREDERA, María Luisa HERNANZ, Miguel GONZÁLEZ-HERRÁEZ y Joaquín CAMPOS, "Anomalous non-linear behaviour of InGaAs photodiodes with overlled illumination", *Metrología*, 40, 150-153, 2003.