

Experiencias en diseño y prueba de fotodetectores en circuitos integrados standard: del fotodiodo a la cámara CMOS.

Alfredo Arnaud, Fernando Silveira

E-mail: aarnaud@iie.edu.uy, silveira@iie.edu.uy.

Instituto de Ingeniería Eléctrica – Univ.de la República Oriental del Uruguay

Resumen

Las facilidades de diseño se extienden cada vez mas, y hoy es posible pensar en sistemas fotodetectores a medida, en tecnologías estándar ya sea analógicas o digitales. El presente trabajo revisa por un lado las posibilidades de trabajo con fotodiodos en circuitos integrados CMOS, así como plantea el diseño y muestra resultados de la prueba de dichos dispositivos. Para caracterizar los mismos se diseñaron y fabricaron las siguientes estructuras: cuatro fotodiodos de diferentes tipos, y una línea de 32x1 fotodiodos con circuitería APS para cada pixel, que es la base de las cámaras digitales modernas. Este trabajo pretende ser un primer paso en el diseño de sensores ópticos con su detección y procesamiento de señal primario incorporado.

La primer sección parte del fotodiodo hasta la cámara CMOS indicando las dificultades y las soluciones de diseño en un marco general, presentando también los diseños concretos enviados a fabricar. En la segunda sección se muestran los resultados de la caracterización de los fotodiodos, incluyendo curvas características y respuesta espectral. Finalmente trabajando sobre la respuesta espectral medimos el grosor de las capas de nitruro y óxido que recubren al silicio en la tecnología empleada.

Abstract

Design facilities are widely extended and nowadays it is possible to think in custom photonic-detection systems in standard technologies both analog or digital. The present work reviews the design possibilities of photodiodes in CMOS integrated circuits as well as it present the design and test results obtained with characterization circuits. For this characterization we have designed the following structures: Four different type photodiodes, and a 32x1 array of photodiodes with APS circuitry that is the base of modern digital cameras. This work pretends to be a first step in the design of optical based sensors with integrated detection and primary signal processing.

The first section starts with the photodiode and ends with the CMOS camera, indicating on each step the difficulties and design solutions. It is also presented the concrete test design that has been fabricated. In the second section we show the results obtained in the characterization of photodiodes including characteristic curves and spectral response. In the end we apply this spectral response to measure the thickness of the oxide and nitride layers that cover the silicon in the process employed.

Sección I: del fotodiodo a la cámara CMOS.

Introducción

Día a día, las facilidades de diseño se extienden, el prototipado y fabricación de pequeñas cantidades de circuitos integrados es accesible para pequeñas compañías o grupos de investigación. Esta expansión de tecnologías estándar ha desplazado un número importante de aplicaciones con fotodetectores incluidas las cámaras, del campo de las fábricas especiales, al campo de los diseños tipo 'custom' que son luego fabricados en tecnologías estándar ya sea analógicas o digitales. Aproximadamente 8-9 millones de cámaras fotográficas digitales se fabricarán el siguiente año, con un costo cercano a los 500 millones de dólares solo en U.S.A. [1]. Es importante pues, revisar las posibles aplicaciones y estructuras en tecnología CMOS, y testar sus capacidades y principales

características como primer paso en la construcción de sistemas fotónicos en un chip ya que, al día de hoy, los fabricantes no tienen por norma brindar información sobre las características de los diferentes elementos fotodetectores posibles de ser fabricados en su tecnología.

Sin embargo las cámaras no son el único destino de los sistemas fotodetectores integrados. Son frecuentes también los avances y aplicaciones en el campo procesamiento masivo de imágenes 'on chip', y lo que es de nuestro interés en especial los llamados sensores inteligentes. Este trabajo pretende ser un primer paso en el diseño de sensores ópticos con una fuerte componente integrada, apuntando a las áreas de trabajo del Grupo de Óptica Aplicada en nuestra Facultad en caracterización de sustancias químicas por polarimetría y espectroscopía.

Fotodetectores en tecnología CMOS estándar

De todas las estructuras fotodetectoras las más importantes son los fotodiodos. Tres tipos de fotodiodos pueden ser construidos sobre la base de una tecnología CMOS (Fig.1):

- N-diff. - P-substrate, presentan una zona de desértica ancha debido al bajo dopaje, por lo tanto una amplia respuesta espectral.
- N-well - P-sub. La respuesta mejora hacia el rojo e infrarrojo cercano debido a la profundidad de la juntura.
- P-diff - N-well. Más sensibles para longitudes de onda cercanas al azul ya que presentan una zona desértica angosta y cercana a la superficie.

A pesar de que nos concentraremos en fotodiodos, estos no son el único tipo de detector posible en CMOS; también es posible construir fotorresistencias, fototransistores y fotocompuertas [2],[3],[4],[13].

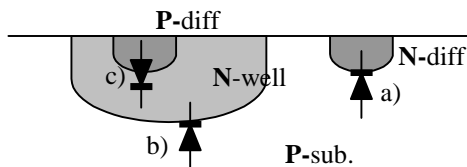


Fig.1: Fotodiodos en tecnología CMOS estándar:

- N-diff - P-substrato.
- N-well - P-substrato.
- P-diff - N-well.

Para testar la factibilidad de sensores ópticos construidos con las tecnologías de uso frecuente por el Grupo de Microelectrónica del IIE (Instituto de Ingeniería Eléctrica – U.R.O.U.) se diseñaron y mandaron construir las siguientes estructuras en un proceso de 0.8μ : Cuatro tipos de fotodiodos para testar sus propiedades ópticas y un array de 32×1 pixeles con procesamiento tipo APS (Active Pixel Sensor). Los cuatro tipos de fotodiodos se resumen en la Tabla 1, corresponden a los tres tipos básicos y un fotodiodo múltiple formado por 64 más pequeños. El layout del circuito aparece en la Fig.4.

Estructuras integradas para arreglos de fotodiodos:

Passive pixel sensor (PPS)

Es la configuración más sencilla para acceder a un arreglo de diodos (Fig.2). Si bien el acceso es totalmente aleatorio también es destructivo y los demás diodos no hacen nada

mientras leo otro, además presenta problemas de ruido resistivo en la llave. Sin embargo la simplicidad del diseño hace que sea una opción adecuada para arreglos pequeños o con baja velocidad de acceso..

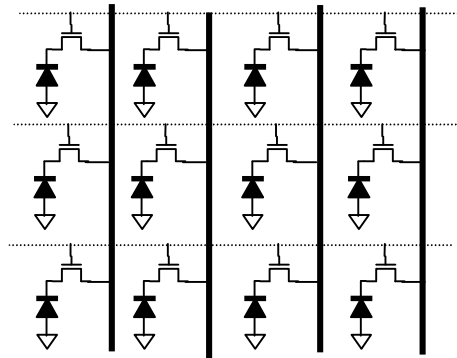


Fig.2: Arreglo de fotodiodos PPS.

Active Pixel Sensor (APS)

La estructura básica de un APS (Active Pixel Sensor) se muestra en la Fig.3.

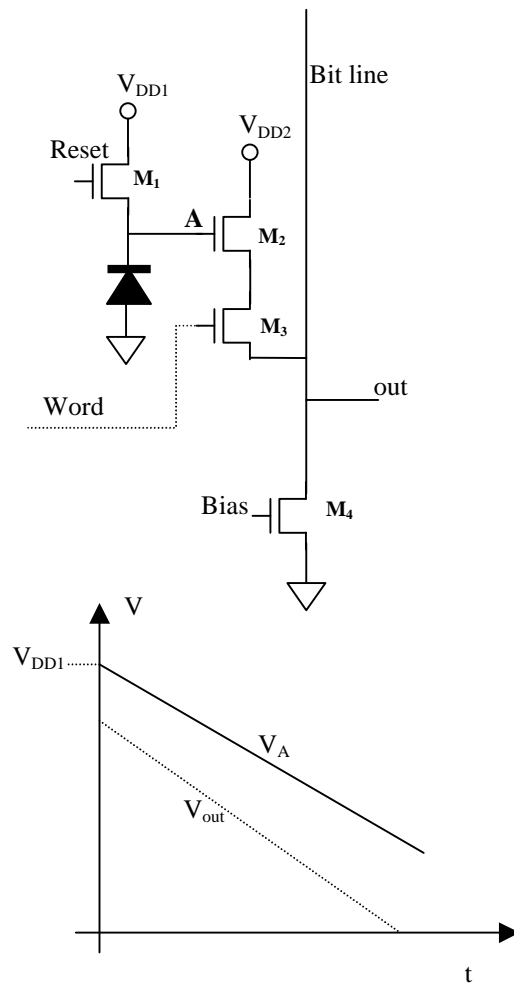
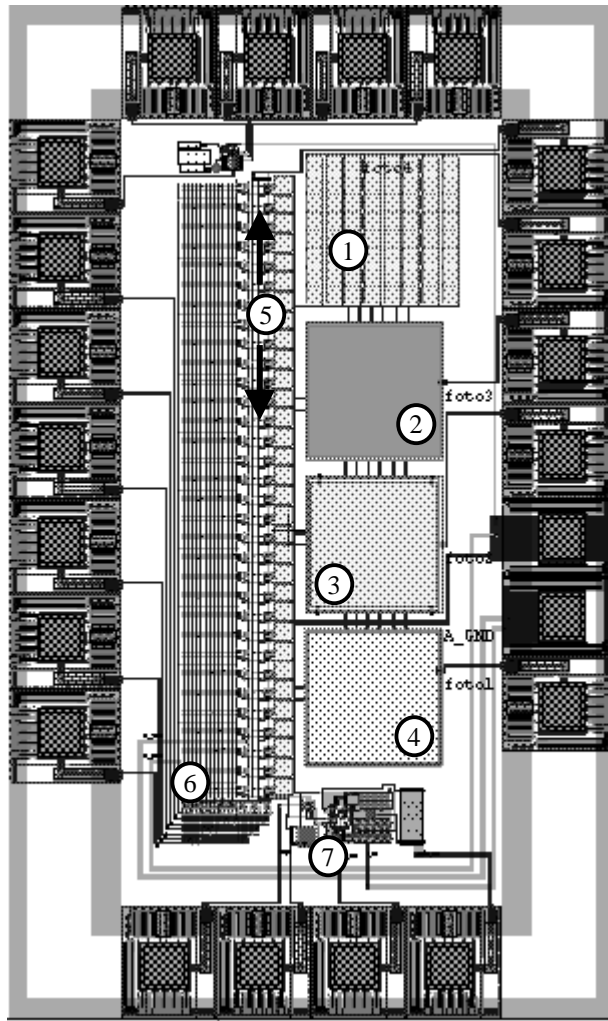


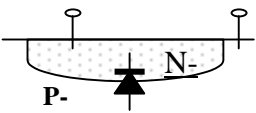
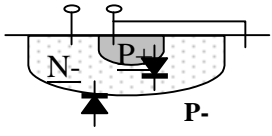
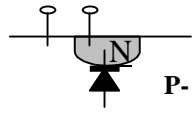
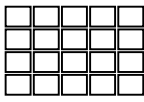
Fig.3: Esquema de un Active Pixel Sensor (APS) en CMOS.



- ① Fotodiodo Tipo I
- ② Fotodiodo Tipo II
- ③ Fotodiodo Tipo III
- ④ Fotodiode Tipo IV
- ⑤ 32 Fotodiodos con APS line
- ⑥ Lógica de decodificación (APS)
- ⑦ APS bias, S&H y buffer de salida.

Fig.4: Layout del crcuito construido para chequear propiedades ópticas relevantes de dispositivos.

Tabla 1: Los cuatro tipos de fotodiodo a probar.

<u>Tipo</u>	<u>Estructura</u>	<u>Area (mm²)</u>
Tipo I		N_Well - P_Sub. .0699
Tipo II		N_Well - (P_Diff.+P_Sub.) .0632 + .003 (*)
Tipo III		N_Diff - P_Sub. .0699
Tipo IV		64 diodos Tipo II. .0572 (8.94x10 ⁻⁴ each)

(*) Area extra de fotodiodo Tipo I.

Esta estructura utiliza un source follower (M_2) asociado con cada fotodiodo, lo que permite independizar la integración de la lectura. El ciclo de lectura comienza con un pulso de Reset que fuerza el ánodo del diodo a V_{DD1} , luego, el potencial de este punto va a estar determinado por la fotocorriente que descarga el condensador formado por la capacidad en la juntura del diodo, y el gate de M_2 . Para la lectura del pixel se habilita M_3 . De esta manera tenemos (ver Fig.3) que el potencial de salida va bajando en función del tiempo con una pendiente proporcional a la luz incidente. Los píxeles están integrando mientras no son leídos. El peor problema en el APS es el ruido de reset debido al muestreo de la señal de ruido de la llave de reset al abrir esta. El valor eficaz de esta tensión

de ruido es de la forma $\sqrt{kT/C}$, siendo C el condensador de integración. La técnica usual para mejorar éste y otros aspectos es el Correlated Double Sampling.

Correlated double sampling (CDS) y la cadena de procesamiento de la señal.

El CDS (Fig.5) es una técnica ampliamente empleada para la reducción de ruido. En los APS se aplica para reducir el ruido de reset, y en este caso en particular también para cancelar variaciones en el source follower M_2 de un pixel a otro. La idea es simple y consiste en samplear la salida inmediatamente después del reset, y restar este valor al medir. Como el error del reset se mantiene constante, de esta manera es eliminado. La técnica del CDS fue desarrollada para las CCD, donde era implementada usualmente fuera del chip[14].

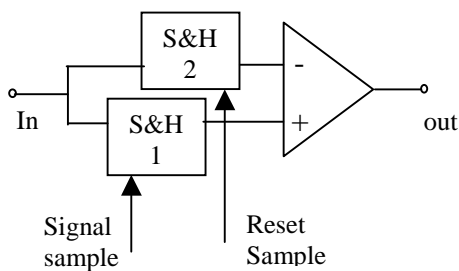


Fig.5: Correlated Double Sampling (CDS), implementación genérica.

El procesamiento de la señal desde el pixel a la imagen digital se muestra en la Fig.6. En este trabajo mostramos el procesamiento propuesto por S.K.Mendis et al.[4] que incluye CDS y delta double sampling (DDS) para un circuito

APS con una fotocompuerta CMOS como elemento sensor.

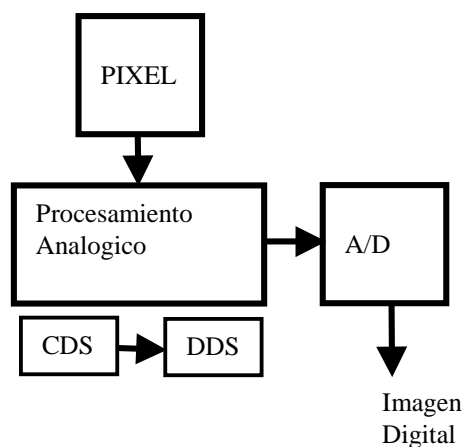


Fig.6: Cadena de procesamiento analógico de la señal.

La implementación de CDS en un APS CMOS se muestra en la Fig.7, si eliminamos del esquemático los transistores dibujados con trazo grueso. Los valores de reset y señal son sampleados y se ven a la salida en forma diferencial a través de los source follower correspondientes. Sin embargo el esquema propuesto para CDS sufre todavía de mismatch entre los transistores de ambos source follower.

Para solucionar este problema, luego de leer los valores de señal y reset sampleados, se cierran las llaves de Select y crowbar (CB). La lectura diferencial a la salida, ahora es proporcional a la diferencia de voltaje de threshold de los transistores de los source follower. Restando este voltaje diferencial a la señal previamente leída, eliminamos este mismatch. Esta operación recibe el nombre de delta-difference sampling (DDS).

Etapa del convertor AD:

Los convertidores A/D van de 6 a 16 bits para cámaras digitales. Las cámaras de vídeo de baja calidad tienen usualmente una resolución de 8 bits, mientras que las cámaras fotográficas comerciales, tienen una resolución de alrededor de 10 bits. Resoluciones mayores requieren cámaras especiales y/o enfriadas.

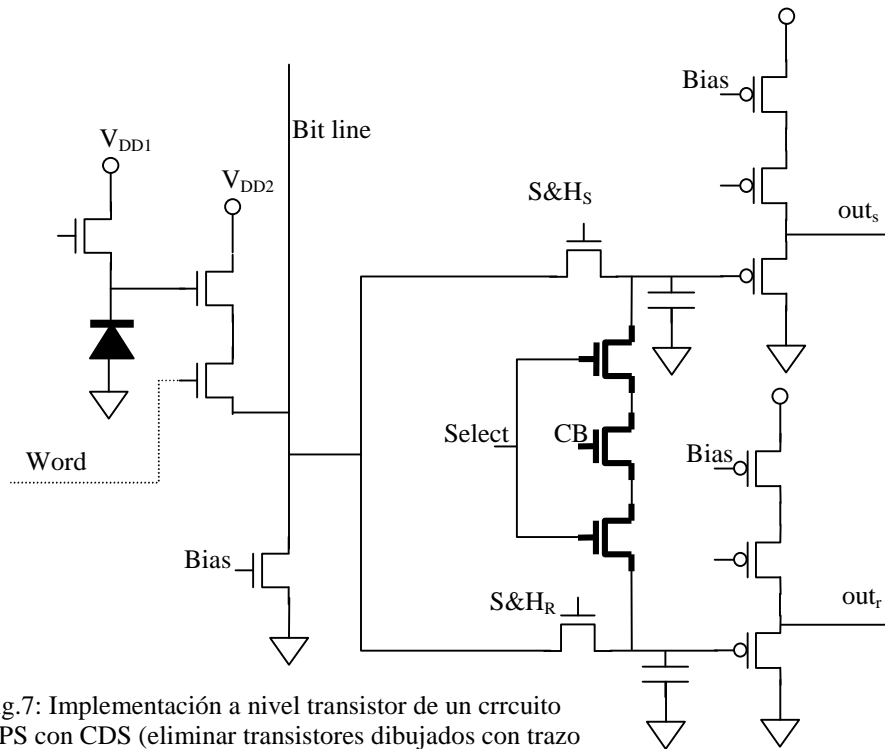


Fig.7: Implementación a nivel transistor de un circuito APS con CDS (eliminar transistores dibujados con trazo grueso) y DDS.

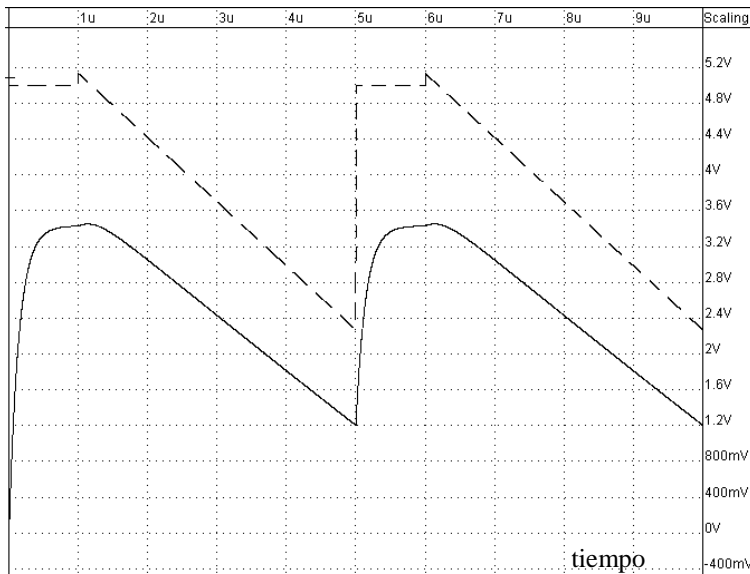


Fig.8: Se muestra una simulación sobre la extracción del layout del APS para un pixel. La corriente por el source follower es de $10\mu\text{A}$. En línea continua se muestra la salida del circuito con una carga de 2pF , mientras que la línea punteada corresponde al voltaje en el ánodo del diodo. Nótese el salto por inyección de cargas que da este punto luego del pulso de reset.

El circuito APS diseñado:

Como prueba se diseñó una línea de 32×1 fotodiodos Tipo II con circuito de lectura APS similar al de la Fig.3. Como criterio de diseño se tomó el consumo y no la velocidad de lectura ya que la aplicación prevista para esta línea son los sensores ópticos, sin requerimientos de alta velocidad de salida. En este sentido, en las Figuras 7,8 puede verse en una simulación, el correcto funcionamiento del circuito, con un

consumo total del orden de $20\mu\text{A}$ (incluido un buffer de salida). La lógica de decodificación de los pixeles emula una decodificación de RAM, aunque con lógica complementaria y no dinámica por un tema de simplicidad de diseño, consumo y facilidad de test. Si bien el circuito fue recientemente fabricado, al día de hoy aún no fue caracterizado.

Sección II: Caracterización de fotodiodos.

Característica V-I de los fotodiodos:

El primer experimento realizado fue medir la transferencia de los diodos con diferentes niveles de iluminación. La medida se realizó con un analizador de parámetros de semiconductores Hewlett-Packard 4155. Una curva típica se muestra en la Fig.9

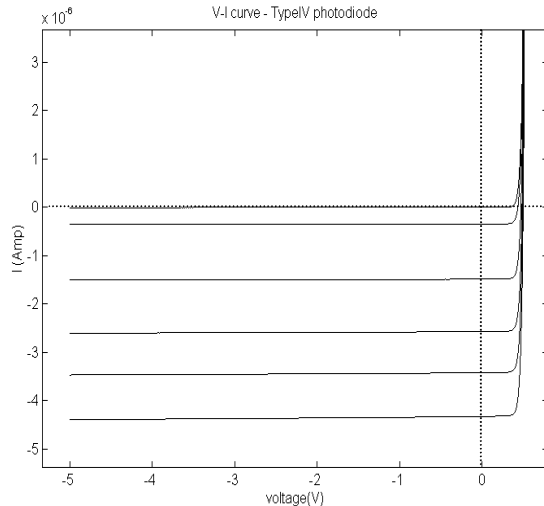


Fig.9: Curvas I-V para un fotodiodo tipo II bajo diferentes niveles de iluminación.

Respuesta espectral de los fotodiodos:

Para medir la respuesta espectral de los fotodiodos se empleó un esquema clásico [5] con una lámpara de Xenon Oriel 6271 [6], un chopper, un monocromador ORIEL 77250 (red de difracción de 100 a 1000nm), y un amplificador lock-in EG&G Princeton Applied Research Model 5209. La idea del sistema es medir la respuesta barriendo en la longitud de onda que se selecciona con el monocromador. El chopper alternadamente deja pasar o no la luz a una frecuencia f_{ch} , y esta frecuencia se usa como referencia del amplificador lock-in de modo de obtener una buena resolución, aprovechando las ventajas de la detección sincrónica.

La irradiancia espectral de la lámpara $I(\lambda)$ no es constante así que debemos normalizar la lectura $V(\lambda)$ del lock-in. Sea $R_{ref}(\lambda)$ la responsividad espectral de un detector conocido, y $R_x(\lambda)$ la respuesta del detector que queremos medir:

$$R_x(\lambda) \propto \frac{V_x(\lambda) \cdot R_{ref}(\lambda)}{V_{ref}(\lambda)} \quad (1)$$

Como referencia usamos un fotodiodo OPT202 con respuesta típica dada por el fabricante, o un

fotomultiplicador ORIEL 77341. Las curvas medidas se muestran en la Fig.13. Un láser de He-Ne ($\lambda=632\text{nm}$) en conjunto con un fotómetro calibrado fue empleado para calcular la responsividad de los detectores en forma absoluta a una longitud de onda determinada de modo de normalizar las curvas de repuesta espectral. El resumen de los valores obtenidos se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.

	Pot.Optica Incidente(μW)	Corriente (μA)	Resp. (A/W)
OPT-202	11.5	4.9	0.425
Tipo I	0.154	0.089	0.58
Tipo II	0.140	0.074	0.53
Tipo III	0.154	0.067	0.44
Tipo IV	0.205	0.104	0.51

Cabe acotar que la potencia óptica incidente fue calculada en términos del área y por eso los altos valores de responsividad, incluso cerca del 100% de eficiencia cuántica. En realidad un buen porcentaje de los fotones incidentes fuera del área del diodo, difunden y son capturados por la juntura, por lo que la potencia óptica incidente esta subestimada.

Como conclusiones cabe resaltar que:

- Las curvas de respuesta espectral de todos los fotodiodos son casi iguales en su forma contrariamente a lo esperado; sin embargo curvas muy similares también son reportadas por otros autores [7]. El fotodiodo Diff-P – Pozo debería sin embargo dar algo corrido hacia el azul, efecto que no se ve debido a que en el Tipo II se conectó un diodo tipo Pozo-Sustrato en paralelo internamente.
- Importa por sus implicancias tecnológicas (espectroscopia) la respuesta de los sensores al UV y esta ha demostrado ser casi nula debajo de los 350nm.

Efecto del fenómeno de interferencia en la respuesta espectral.

Las sucesivas reflexiones en las interfases ópticas de las capas que cubren los dispositivos foto-detectores, pueden dar lugar a un fenómeno de interferencia que aparece como un patrón de picos y valles sobreimpresos en la curva de respuesta espectral típica de la estructura detectora. El problema de una capa de material transparente de índice de refracción n y ancho d sobre un sustrato semi-infinito ha sido ampliamente estudiado (Figs.11,12). Un máximo en la respuesta espectral se va a dar cuando la luz transmitida en los puntos A y C

interfiera en forma constructiva. Para este caso se calcula la siguiente relación:

$$d = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot n \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}, \quad (2)$$

siendo λ_1 , λ_2 las longitudes de onda correspondientes a dos máximos sucesivos. Esta relación se obtiene en forma sencilla [8], mientras que las referencias [9][10],[11] cubren el problema en forma mas detallada.

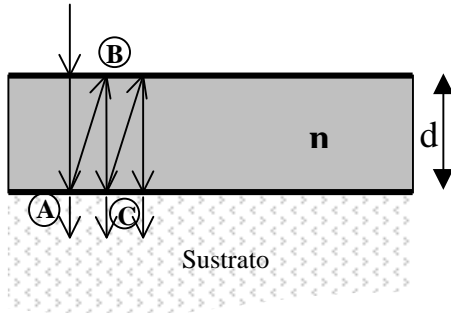


Fig.11: El fenomeno de interferencia en una película delgada

Los materiales que cubren al silicio en esta tecnología en particular se muestran en la Tabla 3. Tenemos dióxido de silicio (SiO_2), que forma el óxido de campo y las capas aislantes entre metal I – poly, y metal I – metal II. Los grosores de las capas aparecen en la Tabla 4, y cabe recordar que sobre las difusiones, no hay óxido de campo, sino solamente un óxido fino de gate de ancho despreciable. Sobre la capa de óxido hay una capa de nitruro protector. Una descripción mas detallada de estos materiales se puede encontrar en [12].

Material		Indice n de refracción	Gap
Dióxido de Silicio	SiO_2	1.46	8eV
Nitruro de Silicio	Si_3N_4	2.05	5eV
Silicio	Si	3.42	1.12eV
Aire		1	

Tabla 3: Resumen de propiedades ópticas de los materiales

De aquí en mas llamaremos d_1 al grosor de la capa de nitruro, y d_2 al de la capa de dióxido de silicio (suma de las capas anteriormente mencionadas que pueden verse como una sola desde el punto de vista óptico). El ancho total se calcula: $d = d_1 + d_2$.

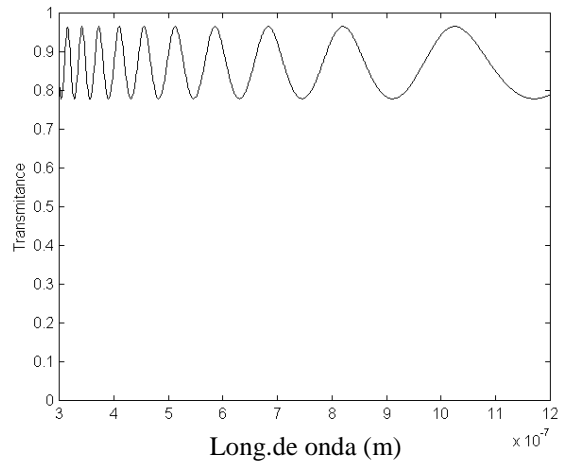


Fig.12: Transmancia teórica para un film fino de índice $n=2.05$ y grosor una micra, sobre un sustrato de índice $s=1.5$.

Medida del grosor de las capas de óxido y nitruro por el patrón de interferencia.

El problema de dos capas de material con diferentes índices n_1 , n_2 sobre un sustrato semi-infinito no es tan sencillo de resolver. No es fácil arribar a una ecuación equivalente a la ec.2, debido a las sucesivas reflexiones entre ambas capas que también interferirán entre sí (Fig.14a).Este será el caso para un fotodiodo construido en tecnología estándar, sin capa antirrefleitora. Sin embargo podemos hacer la hipótesis de que la interfase n_1-n_2 no aporta al patrón de interferencia (estructura de máximos y mínimos en la curva de respuesta espectral) y encontrar la siguiente relación:

$$d = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot \bar{n} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (3)$$

$$\text{con } \bar{n} = \frac{n_1 d_1 + n_2 d_2}{d_1 + d_2}, \text{ y } d = d_1 + d_2.$$

Esta hipótesis desde el punto de vista físico descansa en el hecho de que en este caso ($n_s=1$, $n_1=2.05$, $n_2=1.47$, $n_s=3.47$), el salto en el índice de refracción entre n_1-n_2 es mucho menor que en la interfase n_1 -aire o n_2 -silicio.

Asumiendo las capas anteriormente mencionadas trataremos de medir su grosor procesando la información contenida en la respuesta espectral de los diodos. Como la ec.3 tiene dos incógnitas debemos asumir alguna para poder hallar la otra. En primer lugar lo que hacemos es corroborar el valor del ancho total d de la siguiente forma:

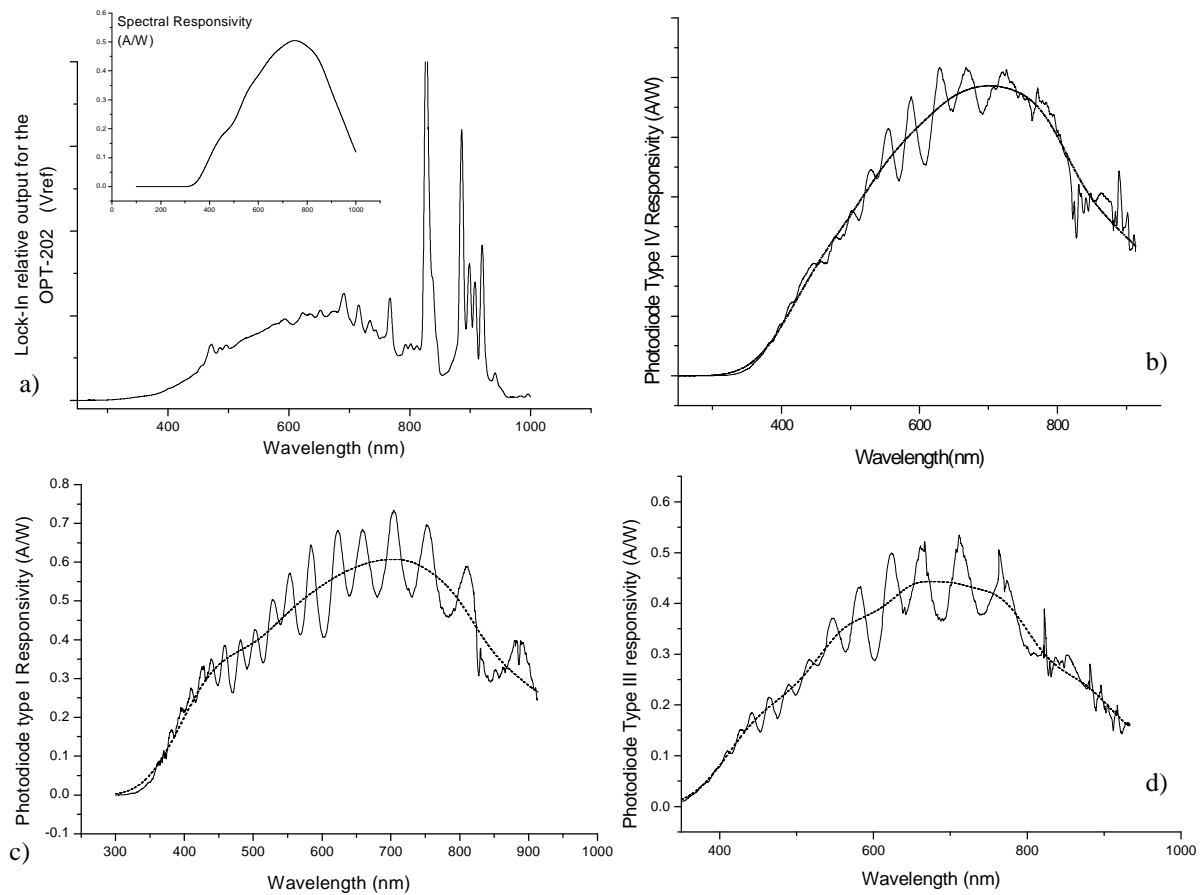


Fig.13 a) Voltaje de referencia V_{ref} y respuesta espectral del fotodiodo OPT202. Notar la ausencia de picos de interferencia debido seguramente a una capa antirrefleora sobre el chip. b,c,d) Respuesta espectral medida para los fotodiodos (Tipo IV , I , III respectivamente) bajo test. En línea continúa se muestra la respuesta espectral, y en punteado la misma respuesta pero eliminando los picos de interferencia.

- Tomamos un par de máximos sucesivos λ_1 , λ_2 y estimamos d utilizando \bar{n} calculado con d_{1-tp} , d_{2-tp} de la Tabla 4.
- Repetimos la operación para los siguientes pares $\lambda_2-\lambda_3$, $\lambda_3-\lambda_4$ etc. El valor final \bar{d} se calcula promediando todos los valores de d obtenidos.

Los cálculos se realizaron con MATLAB y el resultado aparece en la Tabla 4.

Un segundo proceso de la información pretende calcular el grosor del óxido d_2 suponiendo conocido d_1 . Para ello se modifica la ec.3:

$$d_2 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot n_2 \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{n_1}{n_2} \cdot d_1, \quad (4)$$

y se procede de igual forma. Los resultados vuelven a aparecer en la Tabla 4. De esta manera podemos verificar que el grosor del óxido es mayor sobre los fotodiodos Tipo I, ya que aquí sí tenemos presente la capa gruesa de óxido de campo. Nótese que los resultados coinciden extraordinariamente con los previstos, excepto para el Tipo IV. Esto se debe sin duda a la naturaleza múltiple de este fotodiodo lo que resulta en imperfecciones en la capa de óxido sobre la superficie sensible, y altera los resultados de la interferencia. Esto se nota inclusive en la Fig.13 b), donde ya los picos de interferencia son difíciles de identificar.

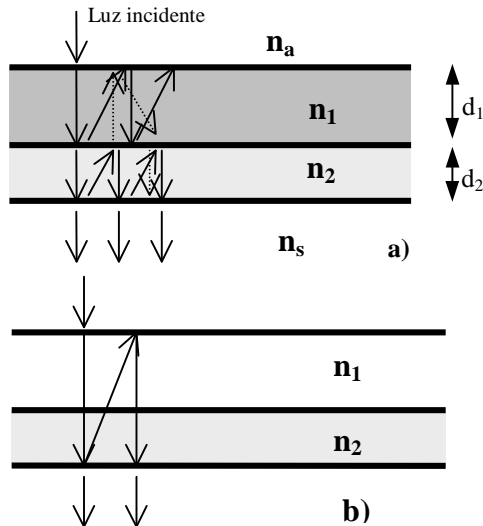


Fig.14: Sucesivas reflexiones en dos capas de materiales diferentes sobre el silicio. a) Problema real. b) Simplificación asumida para estimar distancias entre máximos del patrón de interferencia.

Tipo	$d_{2\text{-typ}}$ (μm)	$d_{1\text{-typ}}$ (μm)	\bar{d} (μm)	\bar{d}_2 (μm)
I	2.17 ± 0.3	3.17 ± 0.4	3.14	2.22 ± 0.18
II	1.67 ± 0.3	2.67 ± 0.4	2.77	1.80 ± 0.19
III	1.67 ± 0.3	2.67 ± 0.4	2.67	1.79 ± 0.14
IV	1.67 ± 0.3	2.67 ± 0.4	2.99	2.00 ± 0.14

Tabla 4: Grosor típico de las diferentes capas dados por el fabricante y estimados experimentalmente a partir de la curva de respuesta espectral, para los 4 tipos de fotodiodo bajo test. En la última columna el error se estima tomando los valores extremos de $d_{1\text{-typ}}$ para calcular d_2 .

$d_{1\text{-typ}}$, $d_{2\text{-typ}}$: Grosos típicos para la capa de nitruro y la capa de óxido (SiO_2).

$d_{1\text{-typ}} = 1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ en todos los casos.

$d_{\text{typ}} = d_{1\text{-typ}} + d_{2\text{-typ}}$.

\bar{d} : Estimación experimental del grosor total d .

\bar{d}_2 : Estimación experimental del grosor de la capa de SiO_2 .

Conclusiones:

Se presentó una visión básica sobre fotodiodos y su aplicación a sistemas fotodetectores integrados, ya sea sensores o cámaras digitales. En este sentido se planteó también las dificultades que existen en el procesamiento de la señal, y las estructura que se utilizan en los desarrollos modernos para solucionarlas. Debido a la falta de caracterización de dispositivos fotónicos en las tecnologías que manejamos frecuentemente se diseñó y envió a construir un circuito integrado

con fotodiodos de prueba y una línea de fotodiodos con circuitería tipo APS para la lectura de los pixeles.

Fueron caracterizados cuatro tipos de fotodiodos en tecnología CMOS, los cuales no presentaron grandes diferencias entre sí. Demostraron ser adecuados para su empleo en sensores ópticos, teniendo su pico de respuesta espectral para una longitud de onda entre 700 y 750nm, con una alta eficiencia cuántica, similar a los fotodiodos comerciales. Cerca del UV su respuesta cae abruptamente entre 350 y 400nm como era de esperar para una tecnología estándar. Esta caída los hace poco atractivos para ser empleados en espectroscopia.

Finalmente se estudió el patrón de interferencia en la respuesta espectral de modo de medir el grosor de las capas de óxido y nitruro protector que se encuentran sobre el silicio, verificando que la interferencia en estas capas es la responsable de las ondulaciones en dicha respuesta. Suponiendo conocido el ancho de nitruro se llegó a valores muy exactos del ancho del óxido, verificándose el hecho de que esta capa es más angosta sobre las difusiones. Si bien es conocido el hecho que en las foundries se utilizan métodos interferométricos para caracterizar el grosor de diferentes capas, en la literatura pudimos encontrar solo referencia a medidas de reflectancia en función de la longitud de onda y no de transmitancia como sería este caso; de todos modos suponemos que el método es conocido.

Agradecimientos:

Los autores quieren agradecer especialmente al Dr. Ricardo Marotti y el Dr. José Ferrari por el apoyo prestado, ya que sin su aporte el trabajo no hubiera sido posible.

Referencias:

- [1] C.Afghani, "Course: Integrated CMOS Image Sensors: Theory and VLSI Implementation", Course Notes, 1998 IEEE Int.Symposium on Circuits and Systems-Monterey-CA.
- [2] S.M.Sze, "Semiconductor Devices - Physics and Technology", John Wiley & Sons - 1985.
- [3] R.W.Sandage, J.A.Connely, "A 128x128 Imaging Array Using Lateral Bipolar Phototransistors in a Standard CMOS Process", Proc.IEEE ISCAS 98, Vol II, p197.
- [4] S.K.Mendis et al, "CMOS Active Pixel Image Sensors for Highly Integrated Imaging Systems", IEEE - JSSC, Vol.32, N°2, feb.1997.
- [5] I.Mártir, G.González Díaz, "Undergraduate laboratory experiment: Measurement of the

- complex refractive index and the band gap of a thin film semiconductor.*", Am.J.Phys.**60** (1),Jan.1992.
- [6] ORIEL Instruments, "*The book of Photonic Tools*". Product catalogue and technical reference.
- [7] R.Carmona Galán, "*CMOS Circuits for image processing*", course notes, IEEE CAS Society tour..
- [8] E.Márquez, J.Ramírez, P.Villares, R.Jiménez-Garay, P.J.S.Ewen, A.E.Owen, "*Calculation of the thickness and optical constants of amorphous arsenic sulphide films from their transmission spectra*", J.Phys.D:Appl.Phys.**25**(1992) 536-541.
- [9] Z.Yinping, Z.Chuang, G.Xinshi, L.Xingang,"*A precise and simple method, the relative transmission fringe depth method, of determining the optical constants and thickness of thin semi-transparent films*", J.Phys.D: Appl. Phys.**25**(1992) 1004-1009.
- [10] I.Chambouleyron, J.Martínez, A.C.Moretti, M.Mulato,"*Retrieval of optical constants and thickness of thin films from transmission spectra*", Applied Optics, Vol.36,Nº31,Nov.1997.
- [11] U.Pal, D.Samanta, S.Ghorai, A.Chaudhuri, "*Optical constants of vacuum-evaporated polycrystalline cadmium selenide thin films*", J.Appl.Phys. **74**(10), Nov.1993.
- [12] B.ElKareh,"*Fundamentals of semiconductor processing technologies*", Kluwer Academic Publishers,1995.
- [13] A.Khan, A.Deval, L.A.Akers, "*A Locally Adaptive Multimode Photodetector Circuit*", Analog Int.Circuits and Sig.Proc. 18,255-275 (1999), Kluwer Academic Pub.
- [14] S.Baier, "*CCD Imaging Systems*", Seminar Burr Brown Corp. 1996.