

Filtros interferenciales de silicio nanoestructurado para el desarrollo de sensores hiperspectrales de bajo coste

Torres-Costa, V.^(1,2), Martín-Palma, R.J.⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid, Cantoblanco 28049, Madrid, España.

⁽²⁾Grupo de Teledetección UAM, Cantoblanco 28049, Madrid, España.

Resumen: La peculiar estructura y propiedades físico-químicas del silicio poroso nanoestructurado ha estimulado el uso de este material en una amplia variedad de aplicaciones. En el campo de la optoelectrónica, la posibilidad de producir estructuras multicapa en las que cada una de las capas tiene propiedades ópticas particulares, permite la fabricación de filtros ópticos interferenciales con un comportamiento predefinido. En este trabajo se han utilizado estructuras multicapa de silicio poroso para filtrar la luz incidente sobre un sustrato fotosensible de silicio con la intención de modular su respuesta espectral. El comportamiento óptico del filtro de silicio poroso fue simulado antes de su fabricación, y las medidas ópticas demostraron un buen acuerdo entre el comportamiento del filtro obtenido y las predicciones teóricas. Mediciones de fotocorriente han demostrado que los filtros de silicio poroso han reducido el rango espectral de fotosensibilidad del silicio, de los >750 nm originales a unos 150 nm. Filtros con distintos diseños han permitido no sólo estrechar la banda espectral de sensibilidad del detector pancromático de Si, sino también sintonizarla a lo largo de todo el rango visible. El silicio poroso nanoestructurado es compatible con las técnicas convencionales de fabricación microelectrónica, lo que hace posible incorporar estos filtros interferenciales sobre una amplia variedad de sensores y fotodiodos pancromáticos VIS, NIR o SWIR convencionales. Los resultados presentados en este trabajo demuestran que los filtros interferenciales de silicio poroso reestructurado resultan muy prometedores para el desarrollo de sensores multi- e hiperspectrales de bajo coste.

Palabras clave: silicio poroso, interferencia, filtros ópticos, sensores multispectrales, sensores hiperspectrales.

Assessment of the SBAC atmospheric correction technique applied to Landsat 8-TIRS from ground LST measurements in the Barrax test site

Abstract: *The particular structure and physico-chemical properties of nanostructured porous silicon has stimulated the use of this material in many different applications. In the field of optoelectronics, the possibility of fabricating multilayer stacks where each individual layer has different optical properties allows the formation of optical interference filters with a predesigned behavior. In the present work, nanostructured porous silicon interference multilayer structures have been used to filter incident light reaching a Si photosensitive wafer in order to tailor its spectral response. The optical behavior of the porous silicon filters was simulated prior to their fabrication, and optical measurements showed good agreement between the simulated and experimental spectra. Photocurrent measurements have shown that the porous silicon filters narrowed the spectral responsivity of silicon, from the original value of >750 nm down to around 150 nm. Different filter designs allowed to not only narrowen, but also tune the Si panchromatic sensitivity along the whole visible range. Porous silicon is compatible with standard microelectronic fabrication processes, making it possible to incorporate these interference filters onto a wide variety of conventional panchromatic VIS, NIR or SWIR broad band sensors. These results show that nanostructured silicon interference filters are a promising tool for developing cost-effective multi- and hyperspectral narrowband sensors.*

Keywords: *porous silicon, interference, optical filters, multispectral sensors, hyperspectral sensors.*

1. INTRODUCCIÓN

El silicio poroso nanoestructurado (PSi) es un nanomaterial que se obtiene a partir de silicio cristalino mediante ataque químico o electroquímico en disoluciones de ácido fluorhídrico (Hérino et al., 1987). Este proceso disuelve parcialmente el silicio de partida, dejando una red de fibras nanométricas interconectadas entre sí en una estructura porosa o esponjosa, (Frohnhoff et al., 1995; Martín-Palma et al., 2002) cuya densidad (porosidad) determina, entre otros parámetros, las propiedades ópticas efectivas del PSi. De este modo, es posible ajustar las propiedades ópticas del PSi controlando los parámetros de su fabricación. Además, debido al peculiar proceso de disolución del silicio, es posible variar la densidad de

la red de nanofibras a medida que el proceso tiene lugar, dando lugar a un perfil de porosidad en profundidad del PSi (Münder et al., 1992). Así se obtiene un material cuyas propiedades ópticas varían en profundidad de manera controlada, dando lugar a un filtro óptico interferencial monolítico, a partir de un único material de partida y en un solo paso (Berger et al., 1994; Torres-Costa, et al., 2004, 2005) (Figura 1-a). Esto permite la fabricación de un modo muy sencillo de una amplísima variedad de filtros ópticos interferenciales, tanto con un perfil de índice de refracción abrupto (multicapas dieléctricas) o gradual (filtro corrugado, Figura 1-b). Estas últimas son de un especial interés, ya que con un diseño adecuado del perfil de índice de refracción pueden lograrse filtros con alto factor de calidad,

alta transmitancia y libre de lóbulos en torno a las longitudes de onda centrales (Jalkanen et al., 2011).

Asimismo, puede modificarse el montaje experimental de fabricación de silicio poroso para lograr un gradiente de porosidad lateral, además de en profundidad. (Figura 1-c) De este modo, es posible obtener filtros ópticos cuyas propiedades espectrales varíen lateralmente. La colocación de este tipo de filtro sobre un sensor de imagen CCD permitirá la adquisición de un espectro óptico completo a lo largo de una de las direcciones del CCD (la dirección del gradado del filtro), mientras que a lo largo de la otra dirección se registra una línea de la imagen final (barrido en escoba). Esto daría lugar a dispositivos de imagen multi e hiperespectral a partir de sensores CCD pancromáticos o RGB de bajo coste.

En este trabajo se explora la posibilidad de modular la respuesta espectral de un sensor pancromático mediante un filtro interferencial de silicio poroso.

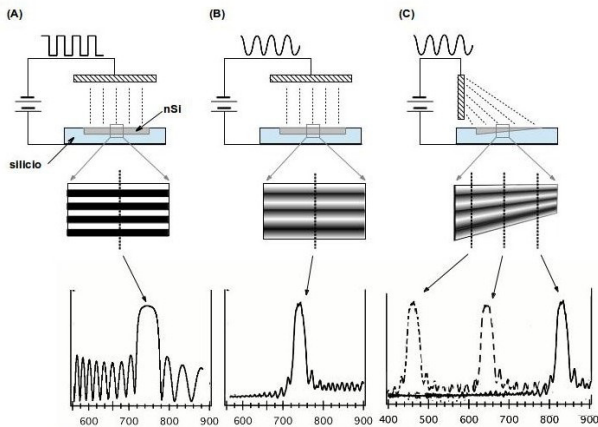


Figura 1. Filtros interferenciales de PSi: Según el proceso de fabricación pueden obtenerse multicapas dieléctricas de PSi (A), estructuras gradadas en profundidad o corrugadas (B), o estructuras corrugadas gradadas lateralmente (C).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Fabricación de silicio poroso

El silicio poroso nanoestructurado se fabricó mediante anodización de silicio monocristalino p+(orientación <100> y resistividad 0,05-0,1 Ω cm) en un electrolito de ácido fluorhídrico (48 wt %) y etanol absoluto en proporción volumétrica de 1:1. La corriente de anodización se proporcionó mediante un potencióstato/galvanostato (HG&G 263) controlado por ordenador. Las estructuras multicapa se obtuvieron alternando repetidas veces la corriente de anodización entre dos valores dispares, de 10 a 150 mA/cm² para obtener capas de alto y bajo índice de refracción ($n=2,22$ y $n=1,44$), respectivamente (Torres-Costa, et al., 2004) (Figura 1-a). Se dotó al dispositivo de un contacto eléctrico transparente superior creciendo una capa de 350 nm de grosor de ITO mediante pulverización catódica. La Figura 2 muestra el esquema y una imagen de microscopía electrónica de los dispositivos completos.

2.2. Caracterización optoelectrónica

En este trabajo, se ha optado por usar el mismo sustrato de silicio a partir del cual se ha formado el PSi como fotodetector, ya que presenta una responsividad pancromática entre 400 y 1100 nm. Las medidas de fotocorriente se llevaron a cabo usando una lámpara halógena y un monocromador SpectraPro 150 de 1200 líneas/mm. La fotocorriente se midió en cortocircuito mediante un amplificador *lock-in* digital dual (Signal Recovery 7225)

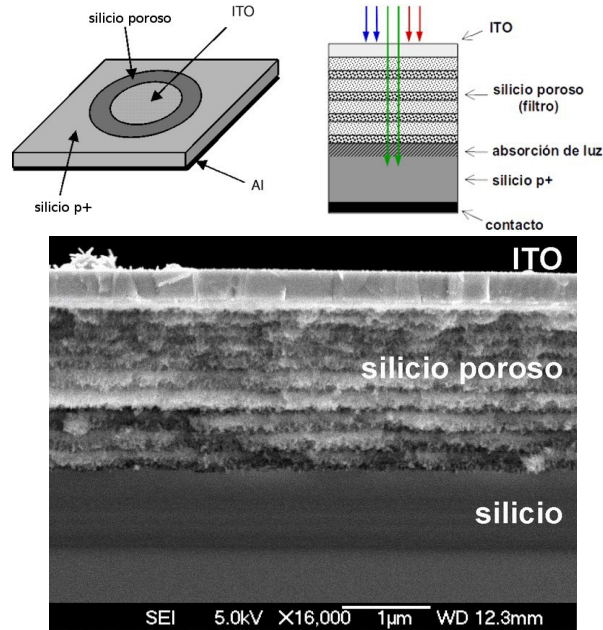


Figura 2. Arriba: Visión esquemática de un filtro de silicio poroso sobre un sustrato de silicio. Abajo: Imagen de microscopía electrónica de la sección transversal de un dispositivo completo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la reflectancia y la responsividad de uno de los dispositivos filtrados. Puede observarse que a las longitudes de onda de mayor reflectancia (menor transmitancia del filtro), la responsividad del dispositivo es menor (ya que el filtro ha rechazado la luz incidente), mientras que donde el sensor presenta mayor fotorespuesta coincide con una menor reflectancia del filtro. De este modo, la responsividad del sustrato ha quedado modulada por la transmitancia del filtro de silicio poroso.

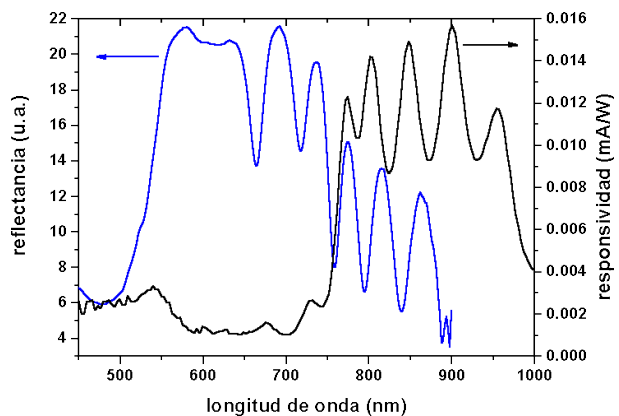


Figura 3. Reflectancia (gris) y responsividad (negro) de un fotodetector filtrado.

Para lograr distintas bandas de responsividad a partir de un mismo sensor pancromático, se utilizaron distintos filtros de silicio poroso. A fin de lograr el comportamiento deseado, la estructura de cada filtro se simuló previamente mediante el método de la matriz de transferencia implementado en un paquete informático específicamente desarrollado para este fin (Torres-Costa et al., 2004b).

La Tabla 1 muestra los parámetros de diseño de algunos filtros usados para sintonizar la respuesta del sustrato de silicio a lo largo de todo el intervalo visible, mientras que la Figura 4 muestra la respuesta espectral lograda con ellos. Puede observarse que la responsividad de los dispositivos filtrados presenta una banda mucho más estrecha que la del sustrato original (unos 150 nm frente a los 750 nm del silicio original). Además, puede observarse también que la banda de detección de estos dispositivos puede sintonizarse entre 500 y 1100 nm dependiendo del diseño del filtro empleado. A longitudes de onda inferiores a 500 nm se obtiene una respuesta muy pobre, por un lado por la baja responsividad del propio silicio p+ a esa longitud de onda, y por otro por la cercanía del borde de absorción del silicio poroso en esa región espectral. Por encima de 1100 nm no puede esperarse respuesta de un fotodetector de silicio, a pesar de que el infrarrojo es la región en la que los filtros de silicio poroso presentan su máxima eficiencia.

Tabla 1. Parámetros de diseño de distintos filtros de silicio poroso fabricados sobre silicio p+.

Filtro	Estructura	Parámetros
F1	(AB) ¹⁰ (CB) ¹⁰	d _A =60nm, d _B =150nm, d _C =90nm
F2	(AB) ⁵ (CD) ⁶	d _A =50nm, d _B =120nm, d _C =100nm, d _D =150nm
F3	(AB) ⁵ (CD) ⁶	d _A =50nm, d _B =90nm, d _C =75nm, d _D =160nm
F4	(AB) ¹⁰	d _A =70nm, d _B =130nm

capas A, C: n = 2.22; capas B, D: n = 1.44.

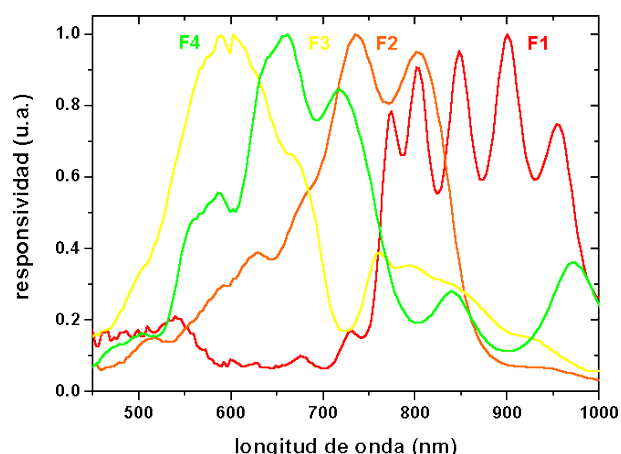


Figura 4. Responsividad de los fotodetectores dotados de los filtros descritos en la Tabla 1.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han diseñado y probado distintas estructuras multicapa interferenciales de silicio poroso para ser usadas como filtros ópticos de paso de banda para fotodetectores y ajustar así su respuesta espectral.

Los resultados han mostrado que diseñando los filtros de forma adecuada, puede reducirse notablemente la banda de detección de sensores pancromáticos. Asimismo, se ha comprobado que un adecuado diseño de los filtros permite también sintonizar la posición de esta banda a lo largo de un amplio rango de longitudes de onda, limitado solamente por la responsividad espectral del fotodetector original usado.

Estos resultados sugieren que los filtros interferenciales basados en silicio poroso resultan muy prometedores para obtener fotodetectores con una banda de detección de posición y anchura predeterminados, a partir de sensores pancromáticos de (más) bajo coste. Asimismo, la posibilidad de obtener un filtro cuyas propiedades ópticas varíen lateralmente, y la posibilidad de integrarlos en sensores CCD convencionales, darían lugar a sensores multi- e hiperespectrales de bajo coste.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Berger, M.G., Dieker, C., Thonissen, M., Vescan, L., Luth, H., Munder, H., ... Grosse, P. (1994). Porosity superlattices: a new class of Si heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(6), 1333.
- Frohnhoff, S., Marso, M., Berger, M. G., Thönissen, M., Lüth, H., Münder, H. (1995). An extended quantum model for porous silicon formation. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(2), 615-620.
- Jalkanen, T., Salonen, J., Torres-Costa, V., Fukami, K., Sakka, T., Ogata, Y.H. (2011). Structural considerations on multistopband mesoporous silicon rugate filters prepared for gas sensing purposes. *Optics express*, 19(14), 13291-13305.
- Herino, R., Bomchil, G., Barla, K., Bertrand, C., Ginoux, J. L. (1987). Porosity and pore size distributions of porous silicon layers. *Journal of the electrochemical society*, 134(8), 1994-2000.
- Martin-Palma, R. J., Pascual, L., Herrero, P., Martínez-Duart, J. M. (2002). Direct determination of grain sizes, lattice parameters, and mismatch of porous silicon. *Applied physics letters*, 81(1), 25-27.
- Münder, H., Andrzejak, C., Berger, M. G., Eickhoff, T., Lüth, H., Theiss, W., ... Ligeon, M. (1992). Optical characterization of porous silicon layers formed on heavily p-doped substrates. *Applied surface science*, 56, 6-10.
- Torres-Costa, V., Martín-Palma, R.J., Martínez-Duart, J.M. (2004). Optical characterization of porous silicon films and multilayer filters. *Applied Physics A*, 79(8), 1919-1923.
- Torres-Costa, V., Martín-Palma, R.J., Martínez-Duart, J.M. (2004b). Optical constants of porous silicon films and multilayers determined by genetic algorithms. *Journal of applied physics*, 96(8), 4197-4203.
- Torres-Costa, V., Agulló-Rueda, F., Martín-Palma, R.J., y Martínez-Duart, J.M. (2005). Porous silicon optical devices for sensing applications. *Optical materials*, 27(5), 1084-1087.

