

## **Capítulo Uno:**

### ***Introducción***

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN SILICIO POROSO SOBRE c-SI. APLICACIONES ELÉCTRICAS,  
ÓPTICAS Y TÉRMICAS.  
Faruk Fonthal Rico  
ISBN: 978-84-690-7607-1 / DL: T.1388-2007

## 1. **Introducción**

---

La promoción del silicio como material interesante para la microelectrónica debido a que sus propiedades eléctricas y ópticas permite pensar en realizar estudios de dispositivos basados en Silicio Poroso (PS), ya que posee una compatibilidad con las tecnologías de fabricación del silicio. El silicio poroso se fabrica a partir de una oblea de silicio cristalino por medio de un ataque electroquímico con una solución de HF. Según la densidad y la profundidad de los poros se pueden obtener diferentes propiedades eléctricas y ópticas así como formar uniones p-n semiconductoras. Dependiendo de su comportamiento se pueden utilizar como dispositivos electrónicos. El uso de capas de PS como elementos activos de los dispositivos optoelectrónicos y microelectrónicos requiere que sus propiedades eléctricas y ópticas sean estudiadas. Como su nombre indica, el silicio poroso forma una estructura tipo esponja con columnas y poros interconectados entre si.

Se han realizado numerosos estudios para la formación del PS sobre obleas de silicio cristalino, en donde se observan la variedad de soluciones y de concentraciones de HF utilizadas con el fin de mejorar la formación de los poros en las obleas de c-Si expuesto por los doctores Turner [1], Canham [2,3] y Parkhutik [3,4]. Dos de las aplicaciones mas estudiadas en los dispositivos basados en PS son las eléctricas y las ópticas:

### Aplicaciones Eléctricas:

Muchos autores han divulgado la modificación de las características eléctricas del transporte de portadores en la capa porosa desde que se descubrió que PS tiene

una relación superficie/volumen muy larga lo cual resulta conveniente para los sensores. En la actualidad, varios autores siguen estudiando los diferentes mecanismos de conducción que se observan: como el que ocurre cuando hay contacto shocctky por los doctores Pavesi [5], Ben-Chorin [6,7] y Martín-Palma [8], cuando hay contacto ohmico por los doctores Simons [9], Diligenti [10] y Theodoropoulou [11] o cuando se observa corriente limitada por carga espacial de corriente (SCLC) por Balagurov [12-14]. Estos mecanismos son los que controlan el transporte en las capas porosas ya sea por el contacto Metal/PS o por la interfase PS/c-Si.

### *Sensores de Temperatura*

Uno de los principales parámetros para tener en cuenta en la utilización de dispositivos electrónicos es la temperatura. En la actualidad muchos de los dispositivos electrónicos llevan incorporados diferentes sensores de temperatura el cual regulan esta condición mejorando su respuesta. En los últimos años se han reportado diferentes trabajos por los doctores Baratto [15,16] y Gaburro [17,18], donde se estudia la dependencia con la temperatura y la humedad en los sensores basados en PS estableciendo la posibilidad de integrar sensores de humedad y temperatura dentro de chips basados en silicio. Actualmente el grupo de Salonen [19,20] es uno de los grupos de investigación que trabajan en el estudio sobre el comportamiento de dispositivos sensores basados en PS bajo dependencia de la temperatura y la humedad, en el cual han desarrollado capas porosas que permiten obtener coeficientes de temperatura elevados para termistores y respuestas a diferentes humedades para sensores de humedad.

---

### Aplicaciones Ópticas:

La eficiencia luminiscente representa un papel muy importante en el desarrollo de dispositivos basados en PS, tal cual como dispositivos emisores de luz que han sido estudiados por los doctores Feng [21], Fauchet [22] y Pavesi [23], también como fotodetectores por los doctores Yu [24], Tsai [25] y Rossi [26], y como capas antireflectivas para las celdas solares por los doctores Prasad [27], Vitanov [28] y Martín-Palma [29], etc. El primer suceso en donde se presentó un mejoramiento en las propiedades ópticas del silicio, fue cuando se descubrió un eficiente emisor de luz basado en PS [30], donde nanocristales de Si se formaron y produjeron un confinamiento de portadores foto excitados generando un band gap ancho y un incremento en el índice de transición. El segundo logro fue gracias al grupo de Pavesi [3] en 1995, con el desarrollo de las microcavidades para el silicio poroso en la cual la capa activa se sitúa en un resonante óptico formado por dos espejos de PS. El cambio del comportamiento tanto electrónico como el óptico por el uso del PS, mejora la estructura Fabry-Perot formada en las microcavidades.

#### *Conversión de energía y Sensores ópticos*

La primera aplicación de un óxido electroquímicamente formado de silicio macroporoso (ma-PS) como capa antireflectiva (ARC) para celdas solares basadas en silicio policristalino fue reportado en 1982 [27]. Esto define el punto de partida en la búsqueda de un proceso simplificado de fabricación de ma-PS para obtener ARC y estructuras con un emisor selectivo. Los materiales extensamente más utilizados para la fabricación de ARC son por ejemplo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_3$ .

Desde la década de los 90 se han venido reportando la fabricación de dispositivos fotodetectores basados en PS. Yu y Wie [24] fueron unos de los pioneros en fabricar una estructura de metal-semiconductor-metal (MSM) como un

detector fotoconductor con una respuesta espectral buena a una longitud de onda de 628 nm, en los últimos años se han reportado resultados de fotodiodos con respuesta espectral en el rango infrarrojo a una longitud de onda de 1,55  $\mu\text{m}$  [31] y con corrientes de oscuridad bajos [26].

Basándonos en estos puntos anteriormente expuestos en esta tesis sobre los diferentes aplicaciones tanto eléctricas como ópticas basadas en PS, se ha desarrollado un estudio de la fabricación de capas de silicio poroso sobre silicio cristalino para estructuras metal-semiconductor-metal y metal/PS/c-Si/metal, Además se han estudiado las propiedades eléctricas y ópticas para cada estructura fabricada en diferentes aplicaciones (como capas antireflectivas, fotodetectores y termistores). Para realizar este estudio nos apoyaremos en trabajos de otros grupos de investigadores como de los doctores Pavesi [5,23], Balagurov [32,33], Martínez-Duart [34,35], Parkhutik [36,37] entre otros. Se han realizado investigaciones del comportamiento eléctrico, óptico y térmico de las estructuras basadas en PS tanto en DC y como en AC con varios metales como AlAg, Au, Ag, utilizándolos como contactos sobre la superficie de la capa porosa.

Este estudio representa un papel muy importante en el desarrollo de futuros dispositivos basados en PS. Las estructuras que estudiamos son de más bajo coste y su fabricación permite desarrollar una técnica conveniente para realizar sensores pequeños y más eficientes usados en la microelectrónica.

Para realizar el estudio se han propuestos los siguientes objetivos con el fin de lograr un buen entendimiento de los dispositivos basados en el silicio poroso:

## 1.1. Objetivos:

Los objetivos principales de la tesis se pueden agrupar en tres bloques principales:

✓ Desarrollo del proceso de fabricación y caracterización morfológica para las capas de silicio poroso.

- Este primer estudio comprende establecer los métodos de fabricación de las capas porosas sobre silicio cristalino, dependiendo de los parámetros del proceso para poder obtener un mecanismo para la formación de poros con la geometría y dimensiones deseadas. Se optimizará los procesos de fabricación para los diferentes substratos de silicio a utilizar tipo – n y tipo – p con diferentes resistividades con el fin de desarrollar dispositivos con unas mínimas condiciones de fabricación y bajo coste.
- *Caracterización Morfológica:* Para poder obtener buenos dispositivos basados en PS el primer paso que debemos analizar es la capa de PS. Para establecer la morfología de la misma como diámetros de los poros, profundidad de los poros y la uniformidad y homogeneidad de la capa se realizarán estudios por medio de la técnica SEM para diferentes tipos de substratos de Si y diferentes condiciones de fabricación donde podremos determinar la formación de las capas para los dispositivos.

## Objetivos

---

✓ Metalización y caracterización eléctrica en estructuras Metal/PS/Metal y Metal/PS/c-Si/Metal.

- Se realizará metalizaciones tanto de capa gruesa como capa delgada por medio de las técnicas screen printing y evaporación, respectivamente. Con el fin de obtener un buen contacto con la capa porosa se realizarán pruebas con diferentes metales entre los cuales está la plata (Ag), aluminio – plata (AlAg), y el oro (Au).
- *Caracterización Eléctrica:* Estudiaremos las propiedades eléctricas para las capas porosas con el fin de establecer el mejor metal para los contactos tanto frontales como posteriores. Realizaremos medidas en DC utilizando un analizador de parámetros HP 4145B con el cual podremos determinar las características corriente-voltaje (I-V) típicas para los dispositivos y por medio de un sistema controlado de temperatura podremos realizar curvas (I-V-T) con el fin de obtener los mecanismos de conducción y los parámetros físicos que controlan el contacto Metal/PS y la interfase PS/c-Si. Para las medidas en AC utilizaremos un analizador de impedancias HP 4192A para poder establecer la dependencia con la frecuencia de los dispositivos fabricados como también podremos estudiar el comportamiento de las constantes ópticas dieléctricas de los dispositivos fabricados. Se establecerá modelos eléctricos que expliquen parámetros físicos tales como factor de idealidad, resistencias de capa, energías de activación, corrientes de oscuridad entre otros, con el fin de entender el comportamiento de los mecanismos de conducción presentes en los dispositivos fabricados.
- *Aplicación Eléctrica:* Para la aplicación de sensores de temperatura como los termistores en estructuras Au/PS/Au, realizaremos investigaciones con el fin de



obtener la dependencia y diferentes comportamientos de las capas porosas en función de la temperatura. Obtendremos los parámetros y constantes típicas de estos dispositivos como coeficiente de temperatura y constante del termistor, al igual podremos comparar su comportamiento con otros sensores de temperatura fabricados con diferentes materiales.

- ✓ Caracterización óptica en estructuras Metal/PS/Metal y Metal/PS/c-Si/Metal.
  - *Caracterización Óptica:* Por medio de un sistema de medición espectral (monocromador) analizaremos la reflexión normalizada en un rango espectral de 200 a 1100 nm, para un ángulo de 45°. Por medio de un sistema de tres fuentes luminosas estudiaremos el comportamiento de los fotodetectores (fotodiodos y fotoconductores), estableciendo las diferentes longitudes de onda en las cuales estos fotodetectores funcionan. Estableceremos el tiempo de respuesta de estos dispositivos por medio de señales conmutadas (pulsos) en las cuales observaremos su comportamiento a diferentes potencias ópticas.
  - *Aplicación Óptica:* Para la aplicación de capas antireflectantes en estructuras PS/c-Si realizaremos diferentes mediciones sobre diferentes zonas de la oblea, para determinar el porcentaje de absorción de energía luminosa en un rango de longitud de onda entre 200 a 1100 nm. También para el estudio de las estructuras Au/PS/Au y Au/PS/p-Si/Al como fotoconductores y fotodiodos, respectivamente realizaremos investigaciones con el fin de obtener corrientes de oscuridad bajos y determinaremos las longitudes de onda en las cuales los dispositivos detectan al igual que obtendremos el tiempo de respuesta de los fotodetectores.

La tesis doctoral presentada es dividida en tres capítulos centrales en donde expondremos los resultados obtenidos con el fin de poder cumplir los objetivos antes expuestos.

El capítulo dos detalla el proceso de fabricación y caracterización de las capas porosas, en donde se explican los pasos para la formación de las capas porosas desde la disolución química del silicio con el HF, cubeta de anodización y las condiciones que se necesitan para la formación de los poros. Se muestra también la caracterización morfológica en donde se puede observar las diferentes morfologías presentes en las muestras fabricadas para los dos tipos de silicio cristalino tipo - n y tipo - p.

En el capítulo tres se explican los diferentes métodos de metalización que se utilizan para depositar los metales a utilizar como contactos de capa gruesa y capa delgada, además de las diferentes caracterizaciones eléctricas tanto en DC como en AC que se deben realizar para el estudio de los dispositivos fabricados. Se puede observar en este capítulo los diversos resultados de los comportamientos de las propiedades eléctricas en DC y en AC que presentan los dispositivos fabricados tanto resistores (metal/PS/metal) como diodos (metal/PS/c-Si/metal). También se puede determinar los mecanismos de conducción que controlan el contacto del metal con la capa porosa por medio de modelos eléctricos y ecuaciones que nos permiten determinar los diferentes parámetros físicos presentes en las estructuras estudiadas. Finalmente se muestra los resultados obtenidos como aplicación eléctrica para los termistores fabricados comparados con otros termistores fabricados con PS y otros materiales.

El capítulo cuatro detalla las diferentes caracterizaciones de las propiedades ópticas presentes en las capas porosas como la absorción de la luz que está relacionada con la reflectividad normalizada, la detección de luz en el rango espectral y las fotocorrientes obtenidas a diferentes potencias ópticas. Se pueden observar las diferentes caracterizaciones realizadas para los dispositivos fabricados como aplicaciones ópticas, tanto las capas antireflectivas (ARC) para los diferentes substratos de silicio tipo - n y tipo - p comparándolas con otros trabajos publicados. Al igual que las ARC también se muestran los resultados obtenidos para la detección de luz con diferentes fuentes luminosas al igual para diferentes potencias ópticas.

En el capítulo cinco se exponen las conclusiones finales obtenidas para el trabajo presentado en la tesis doctoral, en el capítulo seis se presentan las publicaciones obtenidas donde se han reportado los diferentes resultados presentados en la tesis doctoral y para finalizar las referencias utilizadas como base para realizar los estudios y los diferentes análisis.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI  
FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS BASADOS EN SILICIO POROSO SOBRE c-SI. APLICACIONES ELÉCTRICAS,  
ÓPTICAS Y TÉRMICAS.  
Faruk Fonthal Rico  
ISBN: 978-84-690-7607-1 / DL: T.1388-2007