

Estudio del mecanismo de transporte en películas de silicio poroso

M. A. Vásquez-A^{*}, G. Romero-Paredes y R. Peña-Sierra

Departamento de Ingeniería Eléctrica, SEES del CINVESTAV-IPN

Apartado Postal 14-740, 07000 México D. F.

(Recibido: 27 de septiembre de 2010; Aceptado: 18 de enero de 2011)

Se identificaron los mecanismos de transporte en películas-de-silicio-poroso (PSiP) por mediciones de Corriente-Voltaje. Las PSiP se hicieron por anodización de obleas de silicio cristalino tipo p, con orientación (100) y resistividad de 1-5 Ω-cm. La resistividad eléctrica medida en las PSiP fue de 4.48×10^9 Ω-cm. El transporte de carga en la PSiP está limitado por regiones de carga espacial (SCL), debido a la carga atrapada en los diversos estados de defecto. Se encontró que de acuerdo al modo de polarización y a la magnitud del potencial aplicado a la estructura planar, se induce la participación de centros de defecto profundos ocasionando que la densidad de trampas N_t , cambie.

Palabras clave: Películas de silicio poroso (PSiP); Características eléctricas; Mecanismo de transporte SCL

The transport mechanisms in Porous Silicon Layer (PSL) were identified by Current-Voltage (I-V) measurements. The PSL was made by anodic etching of p-type crystalline (100) Si wafers and resistivity of 1-5 Ω-cm. The electrical resistivity measured of the PSL was of 4.48×10^9 Ω-cm. The carrier transport in the PSL is space charge limited (SCL) due to the trapped charge in the different defect states. Furthermore, it was found that in accordance with the bias mode and the magnitude of the applied bias to the structure, the change in the charge state of the deep defect centers cause changes in the trap density, N_t .

Keywords: Porous silicon layers; Electrical characteristics; Space charge limited regime; Current transport mechanisms

1. Introducción

El descubrimiento de la luminescencia visible en películas de silicio poroso (PSiP) a 300K en 1990 [1], produjo un gran impulso a la investigación de dispositivos electroluminiscentes con Silicio (Si), en particular diodos emisores de luz (LED's). En varios trabajos se ha mostrado que se puede controlar la luminescencia en las PSiP [2]. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de trabajos publicados sobre el tema, los mecanismos que limitan el transporte de carga en la PSiP no se conocen bien [3-6]. Por ejemplo, en base al comportamiento de la conductividad eléctrica en la PSiP con el campo eléctrico, se sugiere que en estructuras metal-PSiP el flujo de carga está limitado por la barrera Schottky [4,5]. Otros estudios sugieren que el flujo de corriente esta controlado por carga espacial [6] o por efecto túnel [3].

A fin de contribuir a aclarar este aspecto, en este trabajo se estudia el comportamiento de las características corriente-voltaje (I-V) en una estructura plana sobre PSiP, para identificar los mecanismos que limitan el transporte de corriente en la película de silicio poroso.

2. Desarrollo experimental

Las PSiP se obtuvieron por anodización de obleas de Si en una solución electrolítica de ácido fluorhídrico (HF) y etanol [7], las obleas de Si son tipo-p con orientación (100) y resistividad de 1-5 Ω-cm. La densidad de corriente de anodización fue de 10 mA/cm^2 . El espesor de las PSiP se fijó en 62 nm con una porosidad de ~95%, usando un tiempo de anodización de 15 s.

Para caracterizar a la PSiP, se les colocaron electrodos de Au en disposición planar, por evaporación en vacío. Los electrodos son de forma circular con diámetro de 2 mm, y separados por una distancia $L=1\text{mm}$.

Las mediciones I-V se hicieron con un equipo Keithley modelo 236. Para identificar los mecanismos de transporte en la estructura, las mediciones se hicieron solo en la región de polarización directa, en dos modos: Primer modo, se varió el voltaje de 0 a un voltaje V^+ , en el segundo modo, el voltaje se varió desde un voltaje V^+ hasta 0 V.

3. Resultados y discusión

3.1. Características I-V de la PSiP al polarizar de 0 a un voltaje V^+

La Fig. 1 contiene las curvas I-V de la estructura planar en una gráfica logarítmica. En esta gráfica las formas de las curvas permiten identificar el mecanismo de transporte dominante en la estructura planar. Estas características indican que domina el transporte de carga limitado por regiones de carga espacial o SCL (space charge limited) [8].

Las curvas características del mecanismo SCL generan una región triangular en una gráfica logarítmica (log-log). La base del triángulo corresponde a la ley de Ohm, la curva con una variación rápida en la corriente con el voltaje es el voltaje límite de trampas llenas, V_{TFL} , y la línea $I \sim V^2$ describe los efectos de carga espacial en un aislante libre de trampas. Estos mecanismos se manifiestan en

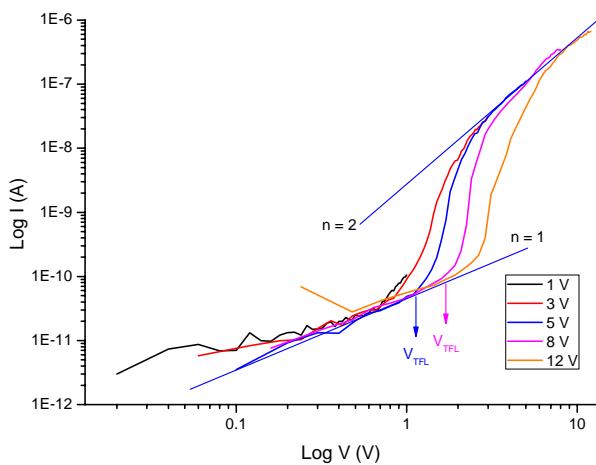


Figura 1. Curva Experimental I-V de la estructura planar Au/PSiP/Au en una grafica log-log (Primer modo de polarización).

estructuras formadas con materiales de gran ancho de banda o con características semi-aislantes.

Como se observa en la Fig. 1, en la región de bajos voltajes la densidad de corriente se puede representar como:

$$J = qp_o \mu_p \frac{V}{d} \quad (1)$$

donde p_o es la densidad de portadores generados térmicamente, q la carga del electrón, μ_p la movilidad de portadores, V voltaje aplicado y d la separación entre los electrodos. Si se considera que la PSiP es un semiconductor homogéneo, los valores de p_o y μ_p son sus parámetros eléctricos.

Con la geometría descrita y la disposición de los contactos, la resistividad de la PSiP es de $4.48 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$, otros autores han reportado valores en el rango de $10^{10}\text{-}10^{12} \Omega\text{-cm}$ [9].

Al aumentar el voltaje de polarización se observa un incremento abrupto en la corriente por efecto del llenado de trampas profundas, este voltaje es el voltaje límite de trampas llenas, V_{TFL} . A partir de este comportamiento se puede obtener la densidad de trampas (N_t) usando la relación del voltaje V_{TFL} y la densidad N_t , dada por:

$$V_{TFL} = \frac{qN_t d^2}{\epsilon_s} \quad (2)$$

donde ϵ_s es la permitividad del material, y $d = L$ es la separación entre los electrodos.

Sustituyendo las cantidades relacionadas, y para un voltaje de polarización de 3V, se encuentra que $N_t = 1.8 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, valor similar al reportado en la literatura [10]. Como es evidente de las curvas (Fig. 1), el voltaje V_{TFL} se desplaza a voltajes mayores al aumentar el voltaje de polarización. Este comportamiento indica que la densidad de trampas N_t aumenta con el voltaje, aunque se puede considerar que la concentración de trampas en la PSiP es constante. Debido a la naturaleza de las películas se puede sugerir la participación de estados profundos y centros de defecto con varios estados.

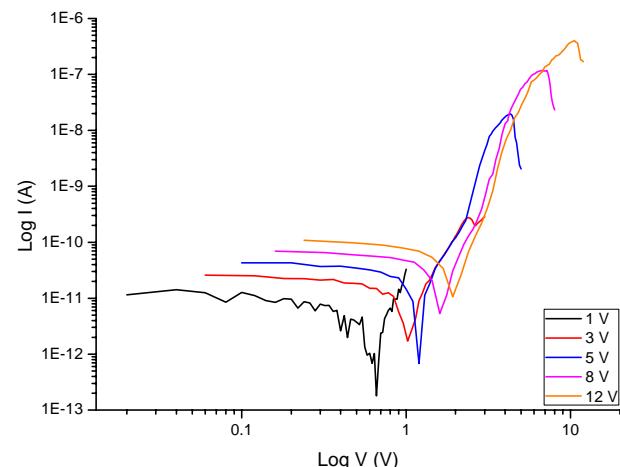


Figura 2. Curva Experimental I-V de la estructura planar Au/PSiP/Au en una grafica log-log (Segundo modo de polarización).

Las mediciones se hicieron usando primero bajos voltajes de polarización, el cual se fue incrementando hasta 12V (Fig.1). Considerando la participación de distintos tipos de trampas y distribución de niveles de trampa, se puede señalar lo siguiente: Al aplicar una pequeña diferencia de potencial, se produce un flujo de portadores y los niveles de defecto comienzan a llenarse, al ocuparse todos los niveles, la corriente aumenta abruptamente a voltajes V_{TFL} bajos. Al eliminar la polarización, parte de los niveles de defecto que estaban cargados liberan su carga, esto modifica la densidad de defectos disponibles, provocando que al realizar la siguiente medición, se tenga un nuevo valor V_{TFL} mayor que el que se tenía en la medición anterior. Este comportamiento implica la existencia de centros de defecto cuya condición de carga depende de la intensidad del campo local.

Para voltajes mayores a V_{TFL} las curvas I-V tienen la forma $J \sim V^2$. En esta región se considera que el material se encuentra con las trampas llenas y estas no influyen en la conducción de corriente del material. Por lo que el flujo de huecos está limitado por niveles discretos. La corriente se expresa como:

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_s \mu_p \frac{N_v}{N_t(s)} \exp\left(\frac{-E_t}{kT}\right) \frac{V^2}{d^3} \quad (3)$$

donde N_v es la densidad de estados en la banda de valencia, $N_t(s)$ es la densidad de trampas discretas y E_t su nivel de energía.

Al considerar distribuciones discretas de niveles de trampa, se hace necesario introducir un factor de ocupación de los niveles de trampa con energía E_t , como:

$$\theta = \frac{N_v}{N_t(s)} \exp\left(\frac{-E_t}{kT}\right) \quad (4)$$

Al sustituir esta expresión en la ecuación (3), la relación para la corriente queda como:

$$J = \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_o \mu_p \theta \frac{V^2}{d^3} \quad (5)$$

En materiales como el silicio poroso, la distribución en energía de los estados puede ser diversa, y los coeficientes para V y d son diferentes a 2 y 3, respectivamente. En general el coeficiente para V es **n**, y depende del modo de polarización.

Para los filamentos del silicio poroso, se puede considerar una distribución exponencial de niveles de energía en la seudo-banda de energía prohibida. En este caso la concentración de trampas por unidad de energía es:

$$N_t(s) = (p_o / kT_c) \exp(-E / kT_c) \quad (6)$$

donde p_o es la concentración de huecos, T_c es la temperatura característica del sistema, y k la constante de Boltzmann. En este caso los valores de **n** son mayores a 2 y la expresión para J es [11]:

$$J = q\mu N_v \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_o}{qP_o kT_c} \right)^l \frac{V^{l+1}}{d_{eff}^{2l+1}} \quad (7)$$

En esta ecuación $n = l+1$, y $(l+1) > 2$. l es la relación T_c/T , y T es la temperatura [12], y d_{eff} es el espesor efectivo de la muestra.

3.2. Características I-V de la PSiP al polarizar de un voltaje V^+ a 0 Volts

En la Fig. 2 se incluyen las curvas I-V en escala logarítmica para este modo de polarización. La condición de polarización se estableció aplicando voltajes de V^+ hasta 0 V, en cada curva V^+ se fue incrementando hasta llegar a 12 Volts. De acuerdo al voltaje de polarización, se distinguen tres regiones, altos voltajes, voltajes intermedios y bajos voltajes.

En este modo de polarización, al aplicar un voltaje V^+ se establece una condición inicial de centros de trampa llenos. El valor de la corriente varía de acuerdo al voltaje de polarización aplicado, y es relativamente baja por la gran resistividad de la PSiP.

En la región de altos voltajes la corriente está formada por las componentes de generación y recombinación en los niveles locales activadas por campo, cuyas magnitudes dependen de la polarización aplicada, de la concentración y tipo de centros de trampa. La reducción en el voltaje debido al modo de polarización, ocasiona una variación en la corriente de emisión de electrones atrapados, produciendo de esta manera el efecto de resistencia negativa, que se observa en las curvas de la fig. 2.

Cuando se incrementa el voltaje inicial V^+ , el máximo de la corriente se desplaza a mayores voltajes, este comportamiento descarta la posibilidad de que exista corriente túnel en la estructura.

Con voltajes de polarización intermedios, la corriente se ajusta a la relación $J \sim V^{l+1}$ (Ec. 7). En esta región **l** toma

valores de $l=6$ y $l=7$. Estos comportamientos se mantienen hasta alcanzar un mínimo que varía de acuerdo al voltaje de polarización aplicado.

Para voltajes de polarización bajos (~ 1 V), se mantiene una cierta densidad de trampas llenas por efecto del campo total aplicado. Al reducirse más el voltaje de polarización, se observa un mínimo en la corriente a un voltaje diferente de 0 V. Luego de producirse el mínimo en la corriente, al reducir la polarización a voltajes próximos a 0 V, se manifiesta un incremento en la corriente producida por la emisión de carga atrapada, lo que ocasiona que la densidad de trampas cambie en la región de bajos voltajes.

En conjunto se observa una diferencia entre los mínimos y máximos de corriente en esta región de un orden de magnitud, y una corriente máxima de $\Delta I \sim 1 \times 10^{-11}$ A. Esta variación se manifiesta como un efecto adicional de resistencia negativa en la región de bajos voltajes.

Este proceso de liberación de carga modifica el estado de carga de los centros de atrapamiento profundos y afectan al siguiente proceso de medición. Es decir cuando se emplean voltajes de polarización mas grandes se observa un efecto de resistencia negativa más notable y el mínimo se produce a un voltaje diferente (mayor que, en la medición anterior), esto se relaciona directamente a la densidad de trampas que participan en los procesos de liberación de carga en la región de bajos voltajes. Estos resultados se confirman por el comportamiento de la corriente en la región de bajos voltajes en ambos modos de polarización.

Cabe señalar que en la PSiP los centros de defecto son diversos, están distribuidos en las superficies de los filamentos, en el volumen de la película o en las interfaces Au/SiO₂/PSiP.

4. Conclusiones

La conductividad eléctrica de la PSiP medida a bajos voltajes de polarización fue de 2.23×10^{-10} ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹. Se encontró que el transporte de carga en la PSiP está dominada por efectos de generación y recombinación en niveles de defecto distribuidas en la película de silicio poroso. La densidad de las trampas cambia de acuerdo al modo de polarización y su magnitud. Los mecanismos de conducción de corriente están ligados al mecanismo SCL en los dos modos de polarización

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado parcialmente por el CONACYT con el proyecto 49860. Los autores desean agradecer al M. C. Miguel Galván Arellano por el amplio apoyo técnico en las mediciones eléctricas realizadas.

Referencias

- [1]. L. T. Canham, Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [2]. Thin Solid Films, 255, "Porous Silicon", edited by Z. Chuan and R. Tsu, World Scientific, Singapore, (1995).
- [3]. Dimova-Malinovska D, Tzolov M, Tzenov N, Nesheva D., Thin Solid Films; **297**, 285 (1997).

- [4]. Ben-Chorin M., Moller F, Koch F., J. Appl. Phys. **77**, 4482 (1995).
- [5]. Dimitrov DB, Phys. Rev. B **51**, 1562 (1995).
- [6]. Paul Maruska H, Namavar F, Kalkhoran NK. Appl. Phys. Lett. **81**, 1338 (1992).
- [7]. Marco Antonio Vásquez Agustín, “Realización y caracterización de estructuras de ZnO/PSiP para diodos electroluminiscentes”, Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN, Depto. Ingeniería Eléctrica, 2007.
- [8]. Murria A. Lampert, Meter Mark, Current Injection in Solids, New York and London: Academia Press, 1970.
- [9]. Takahiro M., Hidenori m., Nobuyoshi K., Yasuaki M., J. Appl. Phys. **84**, 6157 (1998).
- [10]. C. Peng, K. D. Hirschman, and P. M. Fauchet, J. Appl. Phys. **80**, 295 (1996).
- [11]. Peter Mark and Wolfgang Helfrich, J. Appl. Phys, **33**, 205 (1962).
- [12]. D. G. Yarkin, L. A. Balagurov, S. C. Bayliss and I. P. Zvyagin, Semicond. Sci. Technol. **19**, 100 (2004).