

## Obtención y caracterización de TiSi<sub>2</sub>

F. Coyotl-Mixcoatl, A. Torres-Jacome

*Departamento de Electrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica,  
72840 Luis Enrique Erro #1 Apartado postal 51y 216, Tonantzintla Puebla, México*

En el departamento de Electrónica del INAOE se desarrolla un proyecto que tiene como fin la reducción de las dimensiones mínimas de 10 a 3  $\mu\text{m}$  en el Laboratorio de Microelectrónica. Este escalamiento implica la reducción en las profundidades de unión, ancho de líneas de interconexión y capas aislantes, así como mejores características eléctricas y estructurales. Por su baja resistividad ( $\sim 20 \mu\Omega\text{-cm}$ ), estabilidad térmica y resistencia en ambientes oxidantes se escogió el disiliciuro de titanio (TiSi<sub>2</sub>) como material de interconexión y de contacto. En este trabajo se presenta un método alternativo de formación de TiSi<sub>2</sub> para evitar, o reducir a un mínimo, el consumo de silicio cristalino en uniones poco profundas durante la formación de los siliciuros. De igual modo, se presentan las características eléctricas (tales como resistencia de capa, resistividad, resistencia de contacto, etc.) y estructurales obtenidas en el Laboratorio de este Instituto. La resistencia de capa obtenida es  $R_S \leq 1 \Omega/\text{cuadro}$  con una correspondiente resistividad  $\rho \sim 25\text{-}30 \mu\Omega\text{-cm}$ . La estabilidad eléctrica y mecánica, por otro lado, está sujeta al grosor de la capa buffer de polisilicio utilizada.

At the department of Electronics of INAOE a project which consists in the reduction from 10  $\mu\text{m}$  to 3  $\mu\text{m}$  in the minimum dimensions in the Microelectronics Laboratory is under development. The scaling implies reduction in junction depths, width of interconnection lines and insulating layers, as well as best electrical and structural characteristics. By its low resistivity ( $\sim 20 \mu\Omega\text{-cm}$ ), thermal stability, and resistance to oxidating atmospheres we chose titanium disilicide (TiSi<sub>2</sub>) as a contact and interconnection material. In this work a formation method is presented of TiSi<sub>2</sub>, to avoid the consumption of crystalline silicon in shallow junctions during the silicide formation. At the same time, the electrical (such as, sheet resistance, resistivity, contact resistance, etc.) and structural characteristics obtained in the Microelectronic laboratory of INAOE are presented. The sheet resistance we have obtained is  $R_S \leq 1 \Omega/\text{square}$  with a respective resistivity of  $\rho \sim 25\text{-}30 \mu\Omega\text{-cm}$ . The electrical and mechanic stability, in the another hand, is subject to thickness of polysilicion buffer layer used.

*Keywords:* Spiking; Silicidación; Salicidación

### 1. Introducción

A medida que los circuitos integrados se diseñan para ser más rápidos y con un nivel de integración mayor, es necesario buscar nuevos materiales con mejores características eléctricas y estructurales. Uno de estos esfuerzos está enfocado a la búsqueda de nuevos materiales conductores para ser utilizados en interconexiones multicapa. La utilidad de estos materiales radica en el cumplimiento de ciertos requisitos impuestos por la tecnología de fabricación y el desempeño requerido del circuito.

Algunos requisitos son; baja resistividad, resistencia a cortos por spiking [1,2], baja densidad de relieves, facilidad de formación, compatibilidad con el proceso de fabricación, resistencia a químicos y a altas temperaturas durante el proceso de fabricación, buena adherencia a otras capas, resistencia a oxidación térmica, formación de contactos a uniones poco profundas, resistencia a electromigración [3], resistencia a corrosión y facilidad en la definición de patrones geométricos, entre otros.

Por su alta estabilidad térmica, resistencia a electromigración y baja resistividad, los siliciuros de metales de transición han llamado la atención durante los últimos 20 años. Desde el punto de vista de transformación de fase, la formación de un siliciuro se puede considerar como una reacción entre dos fases sólidas en contacto

directo para formar un compuesto metálico ordenado a temperaturas muy por debajo de cualquier fase líquida. La reacción es única ya que ocurre entre dos diferentes clases de sólidos, el substrato, un cristal (o policristal) formado por enlaces covalentes, y la película delgada, de naturaleza metálica y formada por granos finos.

La organización de este trabajo es como sigue: en la sección II se hace un bosquejo del método de obtención de TiSi<sub>2</sub>, abarcando los métodos de depósito de polisilicio y titanio, así como el tratamiento térmico de silicidación. En la sección III se presenta la caracterización eléctrica del material y la silicidación de contactos a uniones poco profundas. Al final se presentan las conclusiones del trabajo.

### 2. Obtención de TiSi<sub>2</sub>

En los últimos años se ha investigado el uso de siliciuros metálicos en contactos óhmicos, electrodos de compuerta MOS y silicidación de regiones de fuente/drenaje. Por ejemplo, el disiliciuro de titanio (TiSi<sub>2</sub>) tiene compatibilidad razonablemente buena con tecnologías de fabricación de CIs para una o más aplicaciones. Además, tiene alta conductividad y resistencia a electromigración, puede hacer contactos a uniones poco profundas de manera confiable y con baja resistencia de contacto, además de ser resistente a los químicos utilizados

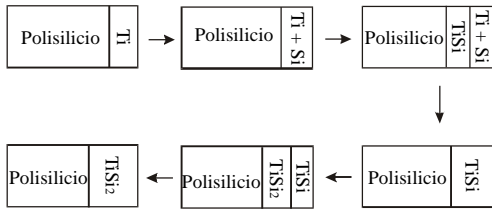


Figura 1. Diagrama esquemático de la interacción entre titanio y polisilicio.

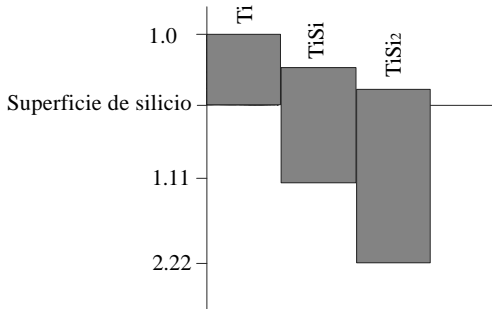


Figura 2. Cambios volumétricos durante la formación de TiSi<sub>2</sub>

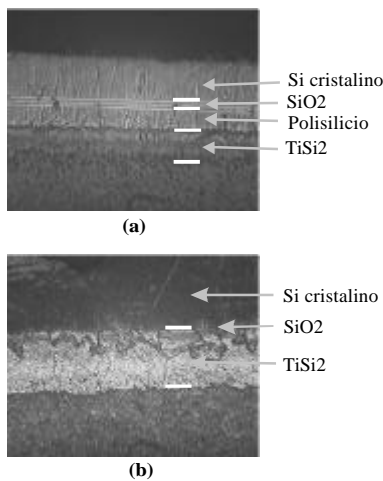


Figura 3. (a) En presencia de una capa “buffer” de polisilicio suficientemente gruesa se tiene una estabilidad mecánica. (b) Cuando el grosor no es suficiente se tiene una fractura del óxido en la estructura TiSi<sub>2</sub>/polisilicio/SiO<sub>2</sub>.

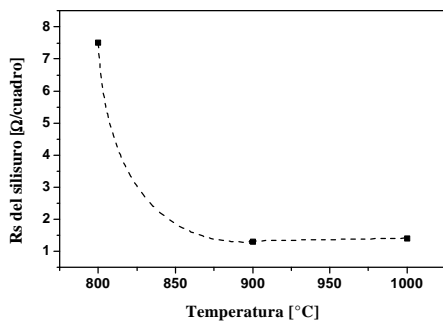


Figura 4. Resistencia de capa en función de la temperatura de silicidación.

normalmente durante el proceso de fabricación (excepto en soluciones conteniendo HF).

La oxidación térmica se puede hacer en oxígeno y vapor de agua para producir una capa de pasivación de SiO<sub>2</sub> y se pueden definir patrones geométricos finos.

Usando diferentes tipos de marcadores para seguir la difusión de las especies, se ha observado que para el sistema Ti-Si los átomos de silicio se difunden en titanio durante la formación de TiSi y TiSi<sub>2</sub> [4] En la Figura 1 se muestra la secuencia de fases durante la formación de TiSi<sub>2</sub>. En primer lugar hay una rápida difusión de silicio en titanio (frontera de grano + intersticial). A esto le sigue la formación de la fase TiSi en la interface y en las fronteras de grano. Durante la difusión de silicio en TiSi se ha observado que el titanio se consume completamente antes de la detección de TiSi<sub>2</sub> [5].

### 2.1 Depósito de polisilicio y titanio

Sobre obleas oxidadas se depositó polisilicio sin dopar en el sistema LPCVD. El depósito de polisilicio se lleva a cabo por la descomposición térmica de silano a una presión de 1.575 mTorr y a 615°C. La uniformidad de los depósitos es relativamente buena (90-95%). Posteriormente, las obleas de prueba se enjuagaron en una solución muy diluida de HF (100:2, H<sub>2</sub>O:HF) para eliminar el óxido nativo antes del depósito en la cámara de evaporación de Ti en alto vacío (1 × 10<sup>-6</sup> mbar).

La razón de depósito de titanio se mantuvo en un valor ≤ 6 Å/s ya que a razones de depósito mayores aumenta el “lagrimeo” en las paredes verticales de la fotorresina y es más difícil remover el metal no deseado cuando se definen los patrones geométricos por lift-off. Al mismo tiempo una razón de depósito alta reduce la uniformidad superficial de la película. El titanio depositado así tiene una uniformidad de 90-95%.

A continuación se hizo el tratamiento térmico de silicidación con diferentes tiempos y temperaturas para obtener la mínima R<sub>S</sub>. Con este método se tiene una R<sub>S</sub> reportada de ~1 Ω/cuadro. Es posible definir patrones geométricos por auto-alineado, aunque la superficie e interface polisilicio-siliciuro son rugosas.

### 2.2 Generación de patrones geométricos

Uno de los criterios más importantes para determinar la utilidad de los siliciuros en la tecnología de fabricación de circuitos integrados es la habilidad de generar patrones geométricos. Estos patrones se pueden obtener por alguno de los siguientes métodos [6]:

- Grabado químico húmedo
- Grabado por plasma
- Generación de patrones por lift-off

El grabado químico húmedo es isotrópico y es difícil encontrar grabantes selectivos. Por otro lado, el grabado por plasma produce daños en la superficie y posible

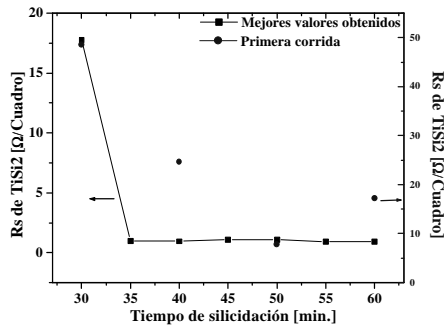


Figura 5. Dependencia de la resistencia de capa del siliciuro con el tiempo de silicidación

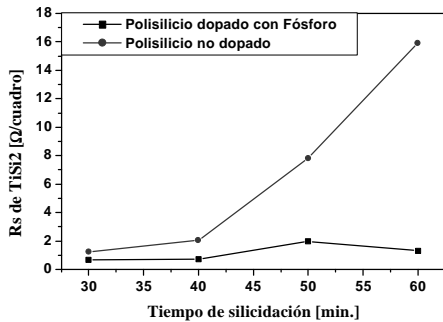


Figura 6. Formación de TiSi<sub>2</sub> sobre polisilicio dopado y no dopado.

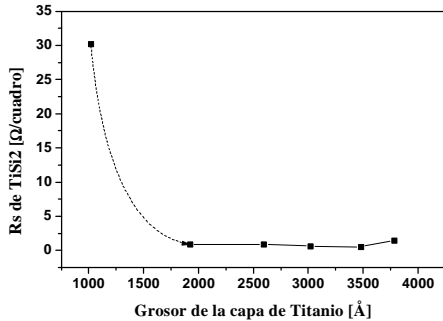


Figura 7. Dependencia de R<sub>S</sub> de TiSi<sub>2</sub> con el espesor de la capa de titanio depositado

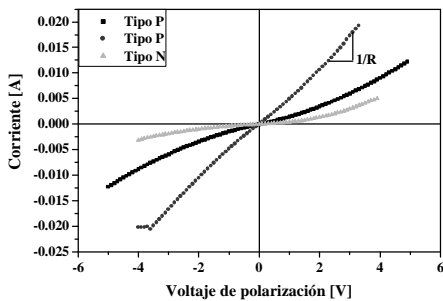


Figura 8. Curvas I-V para estructuras Kelvin con contactos silisurados

contaminación. Al mismo tiempo se deben buscar gases para el grabado selectivo.

Una solución a estos problemas es la definición de patrones por la técnica de lift-off. Esta técnica ofrece la ventaja de que no causa daños en la superficie ni se tiene que buscar un grabante selectivo para cada material, aunque requiere una técnica depurada y una buena calidad de fotorresina.

### 2.3 Cambios volumétricos

Durante la formación de siliciuros de metales de transición siempre hay un cambio volumétrico neto. La Figura 2 ilustra esquemáticamente el consumo de silicio monocristalino durante la formación de las diferentes fases hasta la fase final, TiSi<sub>2</sub>. Esto resulta en una reducción del volumen total. La superficie final del siliciuro de titanio se encuentra sobre la superficie original de silicio.

En este trabajo se encontró que la razón de consumo Si/Ti es diferente a los reportados cuando se utiliza silicio policristalino. Los datos obtenidos en las pruebas de consumo de polisilicio indicaron un factor de escalamiento de 0.57 con respecto a los datos de la Figura 2. Es decir, para un grosor de titanio t<sub>M</sub>, se consumió 1.27t<sub>M</sub> de polisilicio y se produjo un grosor de TiSi<sub>2</sub> de 1.44t<sub>M</sub>, en vez de 2.22t<sub>M</sub> y 2.44t<sub>M</sub>, respectivamente. El cambio volumétrico total siempre resulta en una reducción (t<sub>sil</sub>/(t<sub>M</sub> + t<sub>Si</sub>) < 1). En [4], [6] y [7] se muestran modelos equivalentes para el grosor de silicio y polisilicio consumido y el grosor de TiSi<sub>2</sub> resultante. En estos trabajos se reportan consumos similares para Si cristalino y policristalino.

Asimismo, es importante destacar que el TiSi<sub>2</sub> es muy estable mecánicamente siempre y cuando se tenga una capa "buffer" de silicio policristalino suficientemente gruesa para liberar el estrés tensivo entre la película de siliciuro y el óxido aislante. Esto se muestra en la Figura 3a. A medida que el titanio depositado consume el silicio policristalino, se tiene una creciente fractura del óxido aislante (Figura 3b). Esto se refleja en un aumento de la resistencia de capa del siliciuro.

### 3. Caracterización eléctrica

Es importante tomar en cuenta que el desempeño de un sistema depende del conocimiento de sus características físicas, eléctricas y tecnológicas en ciertas condiciones de procesamiento. Esto conlleva a resaltar la importancia de la caracterización de los materiales utilizados en un proceso de fabricación de CIs. Se hizo una revisión de la influencia de las variables (temperatura, tiempo, dopado de polisilicio y grosores de titanio y polisilicio) sobre la resistencia de capa en el compuesto Ti-Si. Asimismo, se caracterizó la resistencia de contacto del siliciuro a uniones poco profundas.

Se hicieron varias pruebas para verificar cuales eran las mejores condiciones para la obtención de una R<sub>S</sub> mínima. La curva de la Figura 4 se muestra que a partir de

900°C se tiene una  $R_S$  mínima. En la Figura 5 se ve que después de 35 minutos a 900°C se tiene una  $R_S$  mínima para  $t_M \sim 0.3 \mu\text{m}$ . La dependencia del dopado de polisilicio se muestra en la Figura 6, en ella se ve que el dopado del polisilicio con Fósforo reduce la  $R_S$ . Finalmente, en la Figura 7 se muestran que con  $0.2 \mu\text{m}$  de Ti se tiene ya una  $R_S \leq 1 \Omega/\text{cuadro}$ . Este grosor de titanio corresponde a un grosor de  $\text{TiSi}_2$  de  $\sim 0.3 \mu\text{m}$  según los datos obtenidos en la sección II.3. Para este grosor se tiene una resistividad correspondiente de  $\rho \sim 25\text{-}30 \mu\Omega\text{-cm}$ .

Finalmente, uno de los objetivos de este trabajo es la silicidación de contactos en uniones poco profundas. Una manera de evitar el consumo de silicio de la unión es depositar y consumir una capa de sacrificio de polisilicio en los contactos durante la silicidación. En [8] se dan los valores de referencia para uniones poco profundas y los valores obtenidos en la simulación y en el proceso de silicidación. En este trabajo se obtuvo una resistencia de contacto  $R_C > 100 \Omega$  para contactos a difusiones p+ y  $R_C > 80 \Omega$  para contactos a difusiones n+. Estas curvas se muestran en la Figura 8, en ella se muestran un comportamiento casi lineal para un rango de voltaje suficientemente amplio. Estas curvas indican una resistencia alta, pero lineal, es decir, los contactos son óhmicos.

#### 4. Conclusiones

El disiliciuro de titanio ha demostrado ser viable para complementar el uso de aluminio como nivel adicional de metalización. Algunas de sus propiedades se han comprobado, modificado y adaptado a las condiciones de trabajo existentes en Laboratorio de Microelectrónica del INAOE. Se determinó un tiempo mínimo de 40 minutos, una temperatura de 900°C y un grosor de  $\text{TiSi}_2$  mayor a 300 nm para obtener una resistencia de capa mínima en el orden de  $1 \Omega/\text{cuadro}$  que es equivalente a una resistividad en el rango de  $25 - 30 \mu\Omega - \text{cm}$ . Para un grosor dado de titanio  $t_M$  se consumirá un grosor de polisilicio de alrededor

de  $1.27t_M$  y se formará una capa de  $\text{TiSi}_2$  de  $1.44t_M$ , aproximadamente. Cuando se utiliza  $\text{TiSi}_2$  sobre polisilicio y óxido es necesario tener una capa de polisilicio lo suficientemente gruesa para asegurar la estabilidad mecánica del sistema. El dopado del polisilicio reduce la  $R_S$  del  $\text{TiSi}_2$ .

#### Agradecimientos

Los autores le agradecen al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por el apoyo económico otorgado para asistir a este Congreso. De igual modo, a los técnicos del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE: Mauro Landa, Carlos Zúñiga, Pablo Alarcón, Netzahuatlcoyotl Carlos e Ignacio Juárez por la ayuda prestada durante el desarrollo de este trabajo.

#### Referencias

- [1] D. Pramanik and A. N. Saxena, "VLSI metallization using aluminium and its alloys: Part I", *Solid-State Technol.*, January 1983, pp. 127-133.
- [2] D. Pramanik and A. N. Saxena, "VLSI metallization using aluminium and its alloys: Part II", *Solid-State Technol.*, March 1983, pp. 131-138.
- [3] P.B. Ghate, "Electromigration induced failures in VLSI interconnects", *Solid-State Technol.*, March 1983, pp. 113-120.
- [4] J. M. Poate, K. N. Tu and J. W. Mayer; "Thin films, interdiffusion & reactions", John Wiley & Sons, 1978, pp. 359-405.
- [5] S. P. Murarka and D. B. Fraser, "Thin film interaction between titanium and polycrystalline silicon", *J. Appl. Phys.*, **51**, 342 (1980).
- [6] S. P. Murarka; "Refractory silicides for integrated circuits", *J. Vac. Soci. Technol.*, **17**, 775(1980).
- [7] Karen Maex and Marc Van Rossum (editors), "Properties of metal silicides", pp. 15-30, IEE & INSPEC, 1995.
- [8] Coyotl, F., "Obtención y caracterización de  $\text{TiSi}_2$ ", Tesis Maestría, INAOE 2001.