

Fabricación Simulada de un Transistor MOSFET Mediante SUPREM (Agosto 2012)

Iván López Espejo

Ejemplo concreto de fabricación simulada de un transistor NMOS mediante el software SUPREM.

I. INTRODUCCIÓN

EL PRESENTE documento muestra un ejemplo básico de fabricación simulada de un transistor MOSFET de canal n mediante la utilización del software SUPREM.

Las características básicas del dispositivo son una longitud de puerta de $1\ \mu\text{m}$, utilización de un sustrato de silicio con orientación cristalográfica $\langle 100 \rangle$ dopado con boro en una concentración de $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ y unas dimensiones de sustrato de $10\ \mu\text{m}$ de longitud por $4\ \mu\text{m}$ de espesor.

A continuación se muestra el procedimiento de fabricación y, finalmente, se adjunta en el último punto el código para SUPREM asociado.

II. DESARROLLO

Partiendo del sustrato de silicio tipo p , se procede con el crecimiento de un óxido de campo cuya misión es limitar la región activa del dispositivo, aislándolo a su vez de los dispositivos vecinos. Dicho óxido de campo es crecido mediante la técnica de oxidación local del silicio, LOCOS (LOCAL Oxidation of Silicon). LOCOS comienza depositando sobre la oblea una fina capa de dióxido de silicio con la finalidad de proteger el sustrato de la deposición, justamente a continuación, de una capa de nitruro de silicio, la cual actúa de máscara durante la etapa de oxidación térmica posterior. Tras el grabado del nitruro de silicio, dejando el descubierto la zona de la oblea donde queremos crecer el óxido, se lleva a cabo un procedimiento de oxidación térmica de tipo húmedo (esta técnica es más rápida que la de tipo seco y se suele emplear cuando deseamos crecer óxidos con un espesor relativamente elevado). Tras ser crecido el SiO_2 , todo el nitruro de silicio restante sobre la superficie del sustrato es eliminado. El perfil bidimensional de concentración de boro tras este primer paso puede observarse en la figura 1.

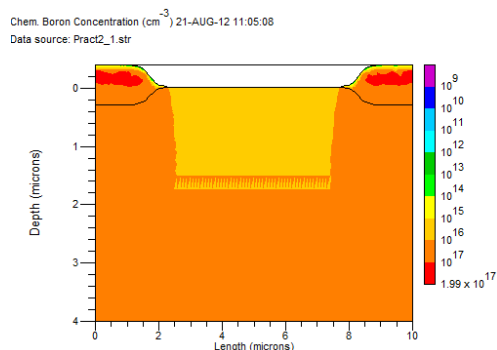


Fig. 1. Fabricación de un MOSFET: paso 1 (perfil 2D de concentración de boro).

En la anterior figura puede apreciarse una alta concentración de boro en la región del óxido de campo, lo que es sinónimo de un coeficiente de segregación menor a la unidad, puesto que las impurezas se han movido rápidamente hacia el óxido, disminuyendo la concentración de estas en el sustrato de silicio:

$$k = \frac{\text{Concentración en equilibrio de impurezas en Si}}{\text{Concentración en equilibrio de impurezas en SiO}_2} < 1.$$

Esto es debido a la redistribución de impurezas acontecida como consecuencia del proceso de oxidación térmica. Las variables tecnológicas de dicho procedimiento son el tiempo y la temperatura, dependiendo el espesor del óxido crecido de estas. Recurriendo a los modelos existentes se determinó que, para conseguir un espesor de SiO_2 de $0.7\ \mu\text{m}$ mediante oxidación húmeda usando una temperatura de proceso de 1100°C , se precisa de, aproximadamente, 1 hora de tiempo. La figura 2(izq) muestra algunas curvas de dependencia del espesor de óxido con las variables tecnológicas para la técnica de oxidación húmeda. En 2(der) se recoge una ampliación del óxido de campo crecido, verificándose que su espesor es prácticamente de $0.7\ \mu\text{m}$.

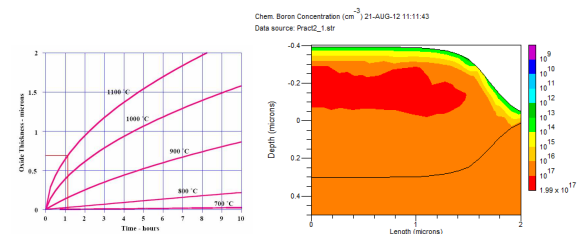


Fig. 2. Detalle sobre el crecimiento del óxido de campo: tiempo escogido de oxidación húmeda en función de la temperatura del proceso (izquierda) y ampliación del óxido de campo para verificar su espesor (derecha).

A continuación se procede con el crecimiento del óxido de puerta. Este se lleva a cabo mediante oxidación térmica de tipo seco, ya que con esta técnica se consiguen óxidos con mejores propiedades eléctricas (se mitiga la aparición de defectos en el óxido o “trampas” que son capaces de formar un camino conductor entre la puerta y el sustrato, produciéndose así el fenómeno de ruptura del óxido de puerta). El resultado puede observarse en el perfil bidimensional de concentración de boro de la figura 3, en el cual también se aprecia claramente el *channel-stop* implantado en el anterior paso bajo el óxido de campo. El *channel-stop* posee la función principal de limitar el área del canal o prevenir la formación de canales parásitos. Particularmente, en tecnología CMOS evita la formación de una capa de inversión que daría lugar a un canal conductor

entre el PMOS y el NMOS.

Al igual que para la anterior situación, recurriendo a los modelos existentes se determinó que, para conseguir un espesor de SiO₂ de 0.05 μm mediante oxidación seca usando una temperatura de proceso de 1000°C, se precisa de, aproximadamente, 1 hora y 20 minutos de tiempo. La figura 4(izq) muestra algunas curvas de dependencia del espesor de óxido con las variables tecnológicas para la técnica de oxidación seca. En 4(der) se recoge una ampliación del óxido de puerta crecido, verificándose que su espesor es cercano al valor planteado (unos 0.06 μm, aproximadamente). También, como se puede comprobar, la técnica de oxidación seca es notablemente más lenta que la de tipo húmedo.

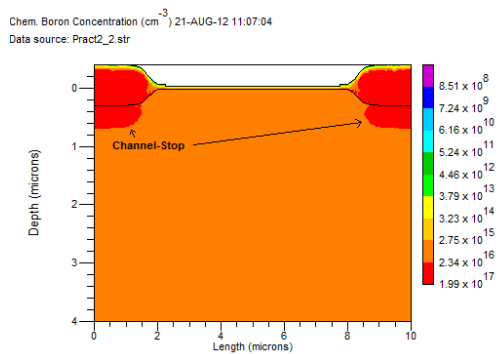


Fig. 3. Fabricación de un MOSFET: paso 2 (perfil 2D de concentración de boro).

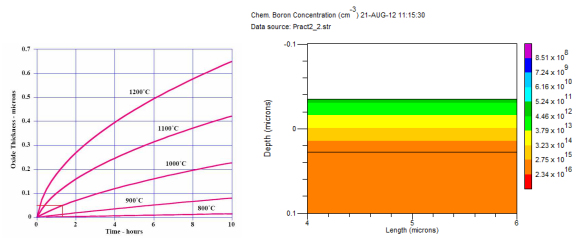


Fig. 4. Detalle sobre el crecimiento del óxido de puerta: tiempo escogido de oxidación seca en función de la temperatura del proceso (izquierda) y ampliación del óxido de puerta para verificar su espesor (derecha).

Seguidamente se continúa con una deposición de polisilicio, sobre toda la estructura, de unos 0.5 μm de espesor. El resultado del proceso se puede observar en la figura 5.

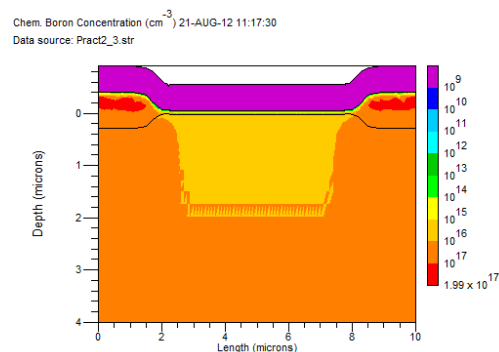


Fig. 5. Fabricación de un MOSFET: paso 3 (perfil 2D de concentración de boro).

Se lleva a cabo tras el paso 3 un grabado del polisilicio previamente depositado para así obtener el electrodo de puerta, teniendo este una longitud de 1 μm. La figura 6 recoge el perfil 2D de concentración de boro que muestra el resultado del proceso.

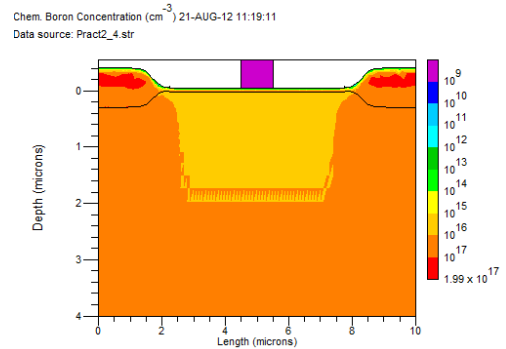


Fig. 6. Fabricación de un MOSFET: paso 4 (perfil 2D de concentración de boro).

A continuación se procede con un grabado del óxido crecido mediante oxidación seca para dejar al descubierto las regiones del sustrato que se corresponderán posteriormente con las zonas de fuente y drenador. El resultado de este procedimiento puede ser visualizado en la figura 7.

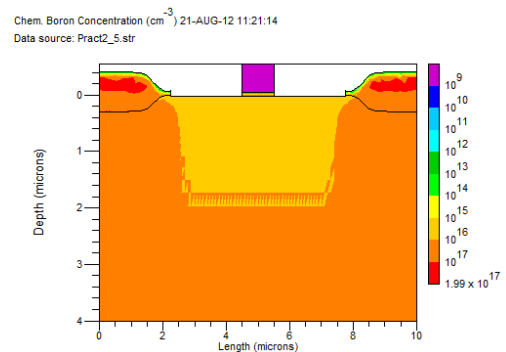


Fig. 7. Fabricación de un MOSFET: paso 5 (perfil 2D de concentración de boro).

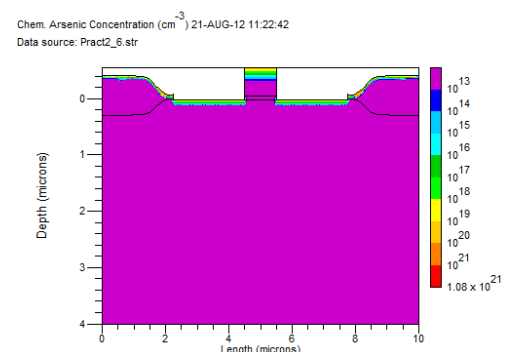


Fig. 8. Fabricación de un MOSFET: paso 6 (perfil 2D de concentración de arsénico).

Se lleva a cabo seguidamente la implantación de las regiones de fuente y drenador haciendo uso de arsénico. En este caso, la figura 8 representa el perfil bidimensional de

concentración de arsénico de la estructura para apreciar los efectos de la implantación. Nótese cómo el propio polisilicio que cubre el sustrato bajo el óxido de puerta actúa como máscara frente a la implantación del arsénico, aislando así de forma efectiva la zona de fuente y de drenador.

A continuación se procede con un recocido de la oblea tras la implantación iónica de arsénico. Este proceso tiene la finalidad de corregir los daños causados por la implantación (degradación de la movilidad y de la vida media) y de hacer que aquellos iones implantados que ocupan posiciones intersticiales ocupen posiciones sustitucionales (es decir, hacerlos eléctricamente activos). Como se observa en la figura 9, la cual representa el perfil bidimensional de concentración de arsénico de la estructura tras el paso 7, esta técnica de reactivación de impurezas ensancha el perfil de dopado debido al efecto de difusión del recocido (compárese con la figura 8).

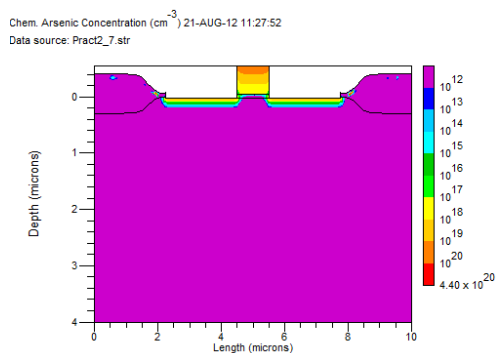


Fig. 9. Fabricación de un MOSFET: paso 7 (perfil 2D de concentración de arsénico).

En el presente paso se cubre toda la oblea con una capa de óxido de 0.5 μm de espesor y se abren ventanas en dicho óxido de 0.5 μm de ancho sobre las regiones de fuente y drenador con el fin de llevar a cabo un posterior paso de metalización. La misión del óxido depositado es doble: por un lado proporciona aislamiento y, por otro, da a la superficie una topografía suave que evite saltos bruscos y pueda provocar la ruptura de la capa de metalización. El resultado del procedimiento de deposición y grabado del óxido se puede apreciar en la figura 10.

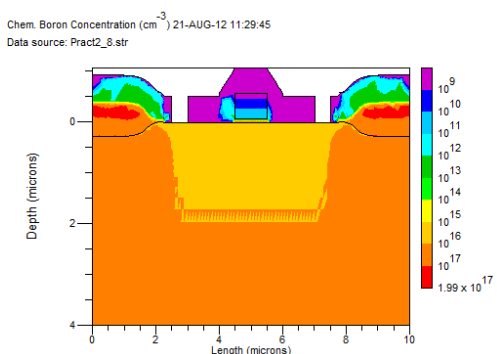


Fig. 10. Fabricación de un MOSFET: paso 8 (perfil 2D de concentración de boro).

Para finalizar, se deposita una capa de aluminio de 0.5 μm

de espesor y se lleva a cabo un grabado de este de tal forma que redunda en la formación de los contactos metálicos de fuente y drenador, los cuales poseen una anchura de 1 μm en su parte alta. El NMOS resultante se puede observar en la figura 11.

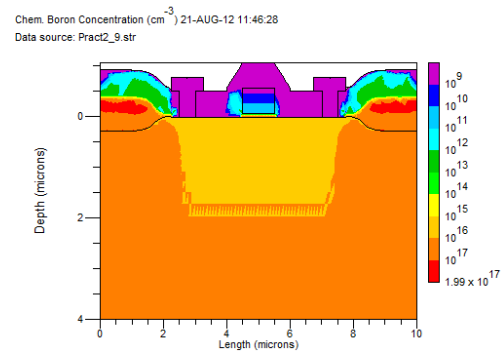


Fig. 11. Fabricación de un MOSFET: paso 9 (perfil 2D de concentración de boro). Estructura final.

III. CÓDIGO PARA SUPREM

El código empleado en la obtención de los resultados presentados en el anterior punto es el siguiente:

```
# Proceso de fabricación de un transistor MOSFET.
# Iván López Espejo.

# Definición estructura.

set echo
option quiet

# Retículo en la dirección x.

line x loc=0.0 spa=0.1 tag=left
line x loc=10.0 spa=0.1 tag=right

# Retículo en la dirección y.

line y loc=0.0 spa=0.1 tag=top
line y loc=4.0 spa=0.4 tag=bot

# Definición del material.

region silicon xlo=left xhi=right ylo=top yhi=bot

bound exposed xlo=left xhi=right ylo=top yhi=top

bound backside xlo=left xhi=right ylo=bot yhi=bot

# Concentración inicial de dopante.

init boron conc=1.0e16

# PASO 1: Óxido de campo (con LOCOS) + chanstop.

deposit oxide thick=0.03
deposit nitride thick=0.5
# Región activa.
etch nitride left pl.x=1.5
etch nitride right pl.x=8.5
# Implantación del chanstop.
implant boron dose=7e12 energy=30
diffuse weto2 temp=1100 time=60
# Limpieza del nitruro y de la fina capa de SiO2.
etch nitride all
etch oxide start x=2.25 y=0.01
```

```

etch continue x=7.75 y=0.01
etch continue x=7.75 y=-0.04
etch done x=2.25 y=-0.04

structure out=Pract2_1.str

# PASO 2: Óxido de puerta.

diffuse dryo2 temp=1000 time=80

structure out=Pract2_2.str

# PASO 3: Deposición de polisilicio.

deposit poly thick=0.5

structure out=Pract2_3.str

# PASO 4: Grabado de la puerta.

etch poly right pl.x=5.5
etch poly left pl.x=4.5

structure out=Pract2_4.str

# PASO 5: Grabado del óxido.

# Ventana de fuente.
etch oxide start x=2.25 y=0.05
etch continue x=4.5 y=0.05
etch continue x=4.5 y=-0.06
etch done x=2.25 y=-0.06
# Ventana de drenador.
etch oxide start x=5.5 y=0.05
etch continue x=7.75 y=0.05
etch continue x=7.75 y=-0.06
etch done x=5.5 y=-0.06

structure out=Pract2_5.str

# PASO 6: Implantación de fuente y drenador.

implant arsenic dose=5e15 energy=30

structure out=Pract2_6.str

# PASO 7: Difusión de fuente y drenador.

diffuse temp=800 time=20

structure out=Pract2_7.str

# PASO 8: Deposición de óxido y apertura de
contactos de S y D.

deposit oxide thick=0.5
# Apertura de fuente.
etch oxide start x=2.5 y=0.05
etch continue x=3 y=0.05
etch continue x=3 y=-0.6
etch done x=2.5 y=-0.6
# Apertura de drenador.
etch oxide start x=7 y=0.05
etch continue x=7.5 y=0.05
etch continue x=7.5 y=-0.6
etch done x=7 y=-0.6

structure out=Pract2_8.str

# PASO 9: Deposición de aluminio y grabado final.

deposit alumin thick=0.5
# Limpieza del aluminio.
etch alumin right pl.x=7.75
etch alumin left pl.x=2.25
# Grabado del aluminio sobre la puerta.

etch alumin start x=3.25 y=-0.25
etch continue x=6.75 y=-0.25
etch continue x=6.75 y=-1.75
etch done x=3.25 y=-1.75
# Grabado del aluminio sobre la fuente.
etch alumin start x=2.25 y=-0.75
etch continue x=3.25 y=-0.75
etch continue x=3.25 y=-1.5
etch done x=2.25 y=-1.5
# Grabado del aluminio sobre el drenador.
etch alumin start x=6.75 y=-0.75
etch continue x=7.75 y=-0.75
etch continue x=7.75 y=-1.5
etch done x=6.75 y=-1.5

structure out=Pract2_9.str

# Fin del programa.

```