MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Silicio monocristalino, salas blancas y oxidación

Capítulo 01 · En el video: **minuto 0:52** · Duración 14:44

Objetivo. Explicar cómo se obtiene una oblea de silicio y calcular el espesor de un óxido térmico.

Ideas clave

Del cuarzo al polisilicio

La cuarcita se reduce con carbón en un horno de arco (silicio metalúrgico, ~98 %). El proceso Siemens lo convierte en triclorosilano, lo destila y lo deposita como polisilicio de grado electrónico: 9 a 11 nueves de pureza (11N = 99,999999999 %).

Crecimiento Czochralski

Una semilla orientada toca el silicio fundido en un crisol de cuarzo y se levanta girando en sentido contrario al crisol. El "cuello de Dash" elimina las dislocaciones y el lingote crece como un solo cristal con red de diamante.

Segregación

Las impurezas prefieren quedarse en el líquido (coeficiente $k < 1$): la concentración en el lingote sube hacia el final, según Scheil. La zona flotante, sin crisol, logra el silicio más puro.

Del lingote a la oblea

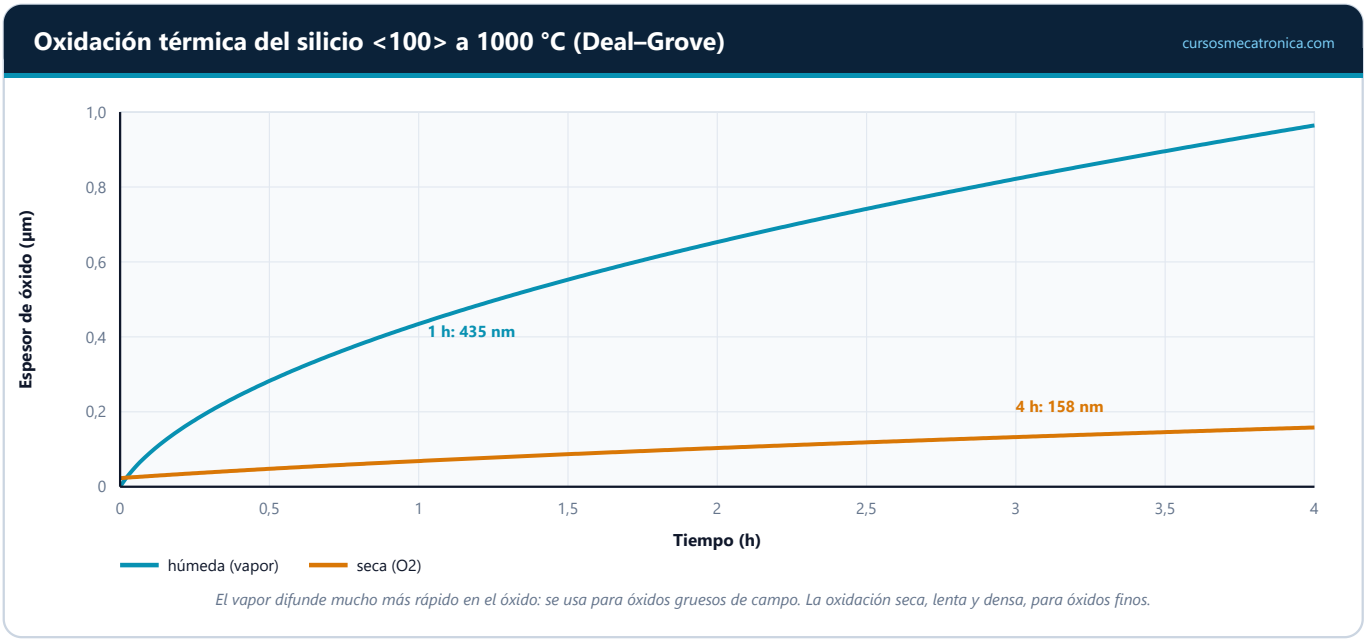
Rectificado del diámetro, muesca que marca la orientación cristalina, corte con hilo diamantado, lapeado, pulido químico-mecánico (CMP) hasta acabado especular y limpieza RCA (SC-1 para partículas y orgánicos, SC-2 para metales, HF para el óxido nativo).

Salas blancas

ISO 14644-1 clasifica por partículas por metro cúbico. El aire baja en flujo laminar a través de filtros ULPA y las obleas viajan en cápsulas herméticas (FOUP), que crean un microambiente aún más limpio que la sala.

Oxidación térmica

El silicio forma su propio aislante, SiO_2, de excelente calidad. La oxidación seca (O_2) es lenta y densa; la húmeda (vapor) es rápida. El modelo de Deal–Grove combina reacción en la interfaz (lineal) y difusión por el óxido (parabólica). Por cada nanómetro de óxido se consumen 0,44 nm de silicio.



Salida de oxidacion_y_cristal.py.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Deal–Grove	$x^2 + A \cdot x = B \cdot (t + \tau)$	Lineal para t corto ($x \approx B/A \cdot t$), parabólica para t largo ($x^2 \approx B \cdot t$).
Espesor	$x = [-A + \sqrt{(A^2 + 4B(t + \tau))}]/2$	Solución positiva.
Silicio consumido	$x_{Si} = 0{,}44 \cdot x_{óxido}$	Relación de densidades.
Scheil	$C_s = k \cdot C_0 \cdot (1 - f)^{k-1}$	f: fracción solidificada.
ISO 14644-1	$C = 10^N \cdot (0{,}1/D)^{2{,}08}$	Partículas/m³ de tamaño ≥ D µm.

Ejemplo resuelto: óxido húmedo de 1 h a 1000 °C

1. Parámetros: A = 0,226 µm, B = 0,287 µm²/h, τ = 0.
2. $x = [-0{,}226 + \sqrt{(0{,}0511 + 1{,}148)}]/2 = 0{,}4345$ µm.
3. Silicio consumido: 0,44·435 = 191 nm.
4. En seco, la misma hora da solo 69 nm.

Un óxido de campo de 500 nm en vapor tarda 1,26 h. Con los parámetros secos el modelo ya arranca en 23 nm (τ = 0,37 h), así que no sirve para óxidos de compuerta más finos (oxidacion_y_cristal.py).

Clases de sala blanca (partículas ≥ 0,5 µm por m^3)

Clase ISO	Límite	Uso típico
3	35	Litografía avanzada (dentro de equipos y FOUP)
5	3520	Zonas de proceso de obleas
7	352 000	Ensamble electrónico fino, salas de apoyo
8	3 520 000	Ensamble general

Código del capítulo

Los archivos completos vienen en el paquete ZIP del capítulo (carpeta `codigo/`).

oxidacion_y_cristal.py — Deal–Grove seco y húmedo, tiempo para un espesor, segregación de Scheil y límites ISO 14644-1.

```
"""
oxidacion_y_cristal.py — Capítulo 01: oxidación térmica (Deal-Grove), segregación de
dopantes en un lingote Czochralski (Scheil) y límite de partículas de una sala blanca.

Parámetros de Deal-Grove para silicio <100> a 1000 °C (valores de referencia de libro):
  seca  (O2)        A = 0,165 µm   B = 0,0117 µm²/h   tau = 0,37 h
  húmeda (H2O)      A = 0,226 µm   B = 0,287  µm²/h   tau = 0
"""
import math

PARAMS = {'seca': (0.165, 0.0117, 0.37), 'humeda': (0.226, 0.287, 0.0)}


def espesor_oxido(t_h, tipo):
    """Resuelve x² + A·x = B·(t + tau) para x (µm)."""
    a, b, tau = PARAMS[tipo]
    return (-a + math.sqrt(a * a + 4 * b * (t_h + tau))) / 2


def tiempo_para(x_um, tipo):
    a, b, tau = PARAMS[tipo]
    return (x_um ** 2 + a * x_um) / b - tau


def scheil(c0, k, fraccion):
    """Concentración en el sólido cuando ha solidificado la fracción f del fundido."""
    return k * c0 * (1 - fraccion) ** (k - 1)


def iso14644(clase, d_um):
    """Partículas por m³ de tamaño ≥ d: C = 10^N · (0,1/d)^2,08."""
    return 10 ** clase * (0.1 / d_um) ** 2.08


if __name__ == '__main__':
    print('Oxidación a 1000 °C (µm)')
    print('  t (h)   seca     húmeda')
    for t in (0.5, 1, 2, 4):
        print(f'  {t:4.1f}   {espesor_oxido(t, "seca"):.4f}   {espesor_oxido(t, "humeda"):.4f}')
    x = espesor_oxido(1, 'humeda')
    print(f'Húmeda 1 h: {1000 * x:.0f} nm de óxido, consume {1000 * 0.44 * x:.0f} nm de silicio')
    print(f'Óxido de compuerta de 20 nm en seco: {60 * tiempo_para(0.020, "seca"):.1f} min'
          f' -> negativo: con tau = 0,37 h el modelo ya parte de'
          f' {1000 * espesor_oxido(0, "seca"):.0f} nm y no describe óxidos más finos')
```

```
print(f'Óxido de campo de 500 nm en húmedo: {tiempo_para(0.500, "humeda"):.2f} h')

print('\nSegregación (Scheil), C0 = 1e15 cm⁻³')
for nombre, k in (('boro', 0.8), ('fósforo', 0.35)):
    fila = '  '.join(f'f={f:.1f}: {scheil(1e15, k, f):.2e}' for f in (0.0, 0.5, 0.9))
    print(f'  {nombre:<8s} k={k}: {fila}')

print('\nISO 14644-1, partículas ≥ 0,5 µm por m³')
for clase in (3, 5, 7):
    print(f'  ISO clase {clase}: {iso14644(clase, 0.5):,.0f}'.replace(',', '.'))
```

Errores frecuentes

- Olvidar que el óxido crece hacia dentro del silicio (consume 44 % de su espesor).
- Usar el modelo de Deal–Grove para óxidos de pocos nanómetros.
- Confundir pureza química (11N) con perfección cristalina.

Autoevaluación

1. ¿Para qué sirve el cuello de Dash?
2. ¿Qué oxidación es más rápida, seca o húmeda?
3. ¿Cuántas partículas ≥ 0,5 µm admite la clase ISO 5?

Respuestas. 1. Para eliminar las dislocaciones antes de ensanchar el cristal. **2.** La húmeda. **3.** 3520 por m^3.