MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Fotolitografía, grabado, dopaje iónico y deposición de películas

Capítulo 02 · En el video: **minuto 15:36** · Duración 15:24

Objetivo. Calcular la resolución de un equipo de litografía y la profundidad de una unión implantada.

Ideas clave

El ciclo litográfico

Promotor de adherencia (HMDS), resina por centrifugado, precocido, exposición alineada con la capa anterior, revelado (TMAH), grabado o implantación y remoción de la resina. Se repite por cada capa con dibujo.



Etapas de cada capa del chip.

Resinas y retículas

En la resina positiva se disuelve lo expuesto; en la negativa, lo no expuesto. La retícula de cuarzo y cromo lleva el dibujo cuatro veces más grande: la óptica lo reduce 4X sobre la oblea. Las resinas de amplificación química multiplican el efecto de cada fotón.

Criterio de Rayleigh

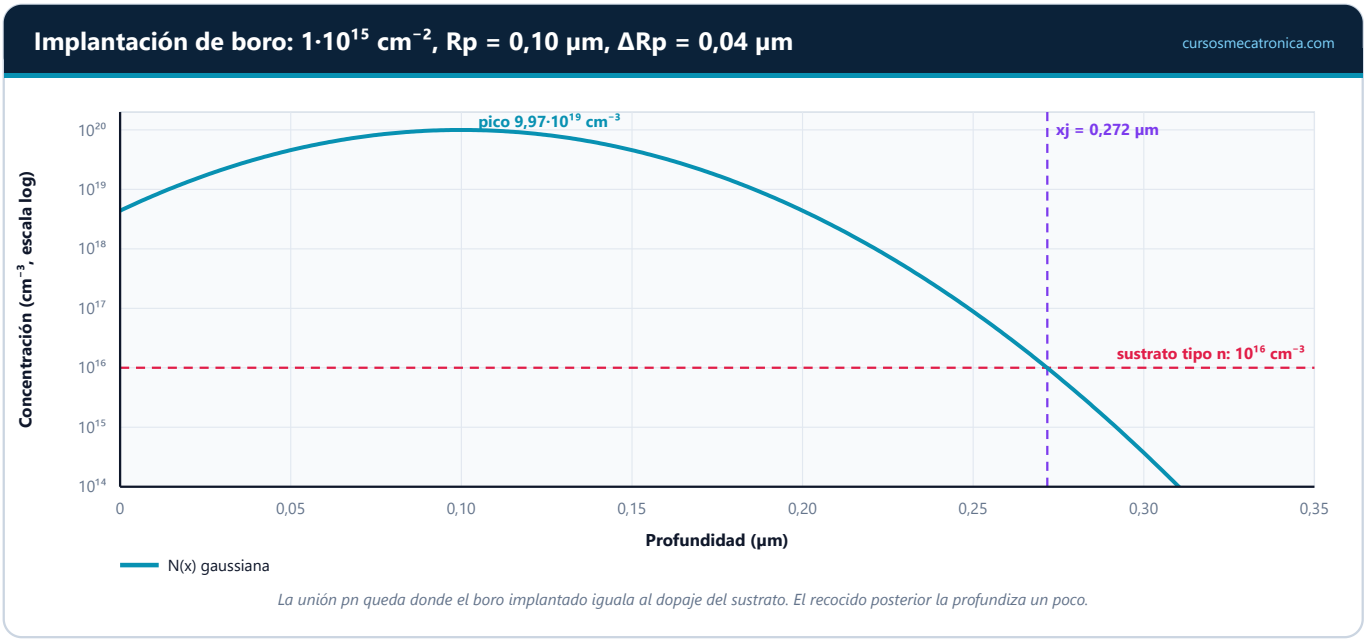
La menor dimensión imprimible es $\mathrm{CD} = k_1 \cdot \lambda / \mathrm{NA}$. Se mejoró bajando λ (365 → 193 → 13,5 nm), subiendo NA (inmersión en agua: NA 1,35) y bajando k_1 con trucos de proceso. La profundidad de foco cae con NA^2, por eso la oblea debe estar casi perfectamente plana.

Grabado

El húmedo es isotrópico: socava por debajo de la resina. El grabado seco por iones reactivos (RIE) combina química y bombardeo vertical, con pasivación de las paredes, y logra flancos casi verticales.

Dopaje

La difusión térmica sigue la ley de Fick (predeposición y redistribución). La implantación iónica acelera iones seleccionados por un imán y controla dosis y profundidad: el perfil es casi gaussiano alrededor del rango proyectado Rp. Se inclina la oblea unos 7° para evitar la canalización y se recuece con RTA para activar el dopante.



Salida de litografia_e_implante.py.

Películas y planarización

LPCVD y PECVD depositan dieléctricos y polisilicio; ALD crece capas de un átomo por ciclo; el sputtering (PVD) deposita metales. El CMP aplana cada nivel para que la siguiente litografía quede dentro de la profundidad de foco.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Resolución	$CD = k_1 \cdot \lambda / NA$	$k_1 \geq 0{,}25$ en la práctica.
Profundidad de foco	$DOF = k_2 \cdot \lambda / NA^2$	Cae rápido al subir NA.
Implantación	$N(x) = \Phi / (\sqrt{(2\pi)} \cdot \Delta R_p) \cdot e^{-(x-R_p)^2/(2\Delta R_p{}^2)}$	Φ: dosis (cm^{-2}).
Profundidad de unión	$x_j = R_p + \Delta R_p \cdot \sqrt{(2 \cdot \ln(N_p/N_B))}$	Donde N(x) = N_B.
Difusión	$L = 2\sqrt{(D \cdot t)}$, $D = D_0 \cdot e^{-E_a/kT}$	Boro: D_0 = 0,76 cm^2/s, E_a = 3,46 eV.

Ejemplo resuelto: unión p^+n implantada

1. Boro con $\Phi = 10^{15}$ cm^{-2}, R_p = 0,10 µm, ΔR_p = 0,04 µm, sustrato n de 10^{16} cm^{-3}.
2. $N_p = 10^{15}/(2{,}507 \cdot 0{,}04 \cdot 10^{-4}) = 9{,}97 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}.
3. $x_j = 0{,}10 + 0{,}04 \cdot \sqrt{(2 \cdot \ln 9974)} = 0{,}272$ µm.
4. Un RTA de 20 s a 1050 °C difunde el boro unos 20 nm; un horno de 30 min a 1000 °C, unos 105 nm.

Por eso las uniones someras se activan con recocidos rápidos. litografia_e_implante.py calcula además CD y DOF para cinco generaciones de litografía (40 nm con ArF de inmersión; 16,4 nm con EUV de NA 0,33).

Generaciones de litografía

Fuente	λ	NA	k_1	CD
Lámpara de mercurio (i-line)	365 nm	0,60	0,6	365 nm
ArF seco	193 nm	0,93	0,4	83 nm
ArF inmersión	193 nm	1,35	0,28	40 nm
EUV	13,5 nm	0,33	0,4	16,4 nm
EUV de alta NA	13,5 nm	0,55	0,4	9,8 nm

Código del capítulo

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

litografia_e_implante.py — resolución y profundidad de foco, perfil de implantación, profundidad de unión y difusión del boro.

```
"""
litografia_e_implante.py — Capítulo 02: resolución de Rayleigh, perfil gaussiano de una
implantación iónica, profundidad de unión y difusión térmica posterior.
"""
import math


def rayleigh(k1, lam_nm, na):
    return k1 * lam_nm / na


def profundidad_foco(k2, lam_nm, na):
    return k2 * lam_nm / na ** 2


def perfil_implante(x_um, dosis, rp_um, drp_um):
    """N(x) = Φ / (√(2π)·ΔRp) · exp(−(x − Rp)² / (2ΔRp²))   [cm⁻³]."""
    drp_cm = drp_um * 1e-4
    pico = dosis / (math.sqrt(2 * math.pi) * drp_cm)
    return pico * math.exp(-((x_um - rp_um) ** 2) / (2 * drp_um ** 2))


def union(dosis, rp_um, drp_um, n_sustrato):
    pico = dosis / (math.sqrt(2 * math.pi) * drp_um * 1e-4)
    return pico, rp_um + drp_um * math.sqrt(2 * math.log(pico / n_sustrato))


def difusion_boro(t_s, temp_c):
    """D = D0·exp(−Ea/kT) con D0 = 0,76 cm²/s y Ea = 3,46 eV (boro en silicio)."""
    k = 8.617e-5
    return 0.76 * math.exp(-3.46 / (k * (temp_c + 273.15)))


if __name__ == '__main__':
    print('Resolución y profundidad de foco (k1, k2 indicados)')
    casos = [('i-line 365 nm, NA 0,60, k1 0,6', 0.6, 365, 0.60),
             ('ArF seco 193 nm, NA 0,93, k1 0,4', 0.4, 193, 0.93),
             ('ArF inmersión 193 nm, NA 1,35, k1 0,28', 0.28, 193, 1.35),
             ('EUV 13,5 nm, NA 0,33, k1 0,4', 0.4, 13.5, 0.33),
             ('EUV alta NA 13,5 nm, NA 0,55, k1 0,4', 0.4, 13.5, 0.55)]
    for nombre, k1, lam, na in casos:
        print(f'  {nombre:<40s} CD = {rayleigh(k1, lam, na):6.1f} nm'
```

```
            f'   DOF = {profundidad_foco(1.0, lam, na):6.1f} nm')

dosis, rp, drp, nb = 1e15, 0.10, 0.04, 1e16
pico, xj = union(dosis, rp, drp, nb)
print(f'\nBoro 1e15 cm⁻², Rp = {rp} µm, ΔRp = {drp} µm sobre sustrato {nb:.0e} cm⁻³')
print(f'  Concentración pico = {pico:.3e} cm⁻³ a {rp} µm')
print(f'  Profundidad de unión xj = {xj:.4f} µm')
for x in (0.0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30):
    print(f'    N({x:.2f} µm) = {perfil_implante(x, dosis, rp, drp):.2e}')

d = difusion_boro(20, 1050)
print(f'\nRecocido rápido 1050 °C, 20 s: D = {d:.2e} cm²/s,'
      f' longitud de difusión 2√(Dt) = {2e4 * math.sqrt(d * 20) * 1000:.1f} nm')
d = difusion_boro(1800, 1000)
print(f'Horno 1000 °C, 30 min: longitud de difusión = {2e4 * math.sqrt(d * 1800) * 1000:.0f} nm')
```

Errores frecuentes

- Creer que la resolución depende solo de la longitud de onda.
- Olvidar que el grabado húmedo socava bajo la máscara.
- Implantar sin inclinar la oblea y obtener colas profundas por canalización.

Autoevaluación

1. ¿Qué gana la litografía de inmersión?
2. ¿Qué tipo de grabado da flancos verticales?
3. ¿Para qué se recuece después de implantar?

Respuestas. 1. NA mayor que 1 (≈ 1,35), por el índice del agua. **2.** El seco por iones reactivos (RIE). **3.** Para reparar la red y activar el dopante.