MANUAL COMPLETO DEL MINICURSO · CURSOSMECATRONICA.COM

Fabricación de Circuitos Integrados y PCB

Silicio y obleas, fotolitografía, grabado, dopaje y películas, integración CMOS y encapsulado, sustratos y apilamiento de PCB, fabricación de la placa, ensamble SMT y THT, pruebas e inspección.

Cómo usar este manual. Cada capítulo corresponde a un tramo del video (se indica el minuto). Mira el tramo, estudia el manual y ejecuta el programa del capítulo: python archivo.py. Todos usan solo la biblioteca estándar de Python 3.8 o superior y reproducen las cifras de los ejemplos resueltos.

Contenido

N.º	Capítulo	Video
00	**Introducción** Qué cubre el minicurso y cómo usar el material.	min 0:00
01	**Silicio monocristalino, salas blancas y oxidación** Del cuarzo al polisilicio, Czochralski, segregación, obleas, limpieza RCA, salas blancas y oxidación de Deal–Grove.	min 0:52
02	**Fotolitografía, grabado, dopaje iónico y deposición de películas** Ciclo litográfico, resinas, criterio de Rayleigh, grabado húmedo y RIE, difusión, implantación, CVD, PVD, ALD y CMP.	min 15:36
03	**Integración CMOS, metalización, pruebas y encapsulado** STI, pozos, HKMG, FinFET y GAA, FEOL y BEOL, damasquinado de cobre, rendimiento de oblea, pruebas y encapsulados.	min 31:00
04	**Sustratos PCB, apilamiento multicapa y preparación CAM** Tipos de placa, FR-4 y otros sustratos, cobre, apilamiento, impedancia, vías, Gerber y reglas DFM.	min 46:06
05	**Fabricación industrial de PCB: LDI, metalización, grabado y acabados** Película seca y LDI, grabado, AOI, laminación, taladrado, metalización por Faraday, máscara y acabados superficiales.	min 1:01:21
06	**Pruebas eléctricas, montaje SMT y THT e inspección** Panelización, prueba eléctrica, clases IPC, pasta y SPI, pick-and-place, reflujo, ola, AOI y rayos X.	min 1:15:57
07	**Resumen y cierre** Síntesis del minicurso.	min 1:30:56

Curso gratuito en video: **cursosmecatronica.com/cursos/fabricacion-circuitos-integrados-y-pcb/**

MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Introducción

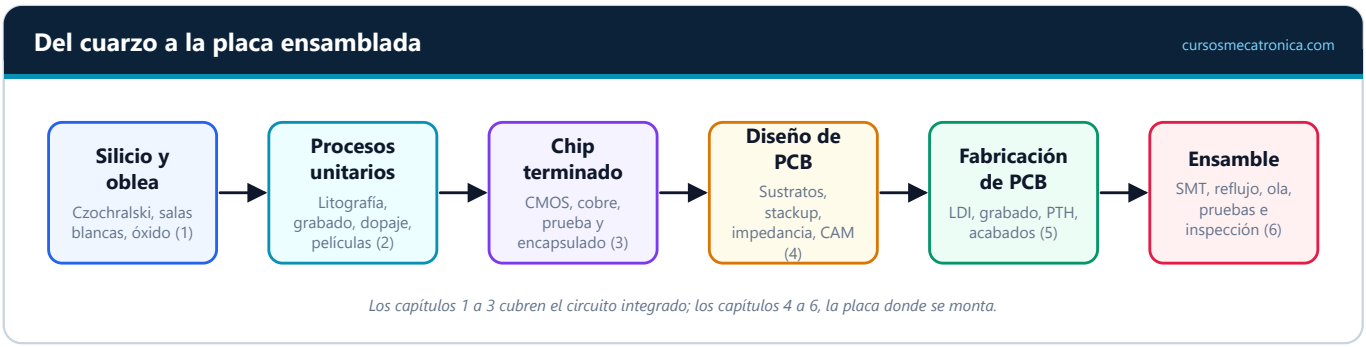
Introducción · En el video: **minuto 0:00** · Duración 0:52

Objetivo. Conocer el recorrido del minicurso, del silicio a la placa ensamblada.

Ideas clave

Dos fábricas encadenadas

Un producto electrónico pasa por dos industrias: la de semiconductores, que convierte arena en circuitos integrados encapsulados, y la de placas de circuito impreso, que fabrica la PCB y monta en ella los componentes. El minicurso sigue ese camino en seis capítulos.



Estructura del minicurso.

Cómo estudiar

Mira cada tramo del video, lee el manual y ejecuta el programa del capítulo con `python archivo.py`. Los programas usan solo la biblioteca estándar y calculan las mismas cifras de los ejemplos: espesor de óxido, profundidad de unión, rendimiento, impedancia, cobre depositado y perfil de reflujo.

Autoevaluación

1. ¿Qué dos industrias recorre el minicurso?

Respuestas. 1. La de semiconductores y la de placas de circuito impreso y ensamble.

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

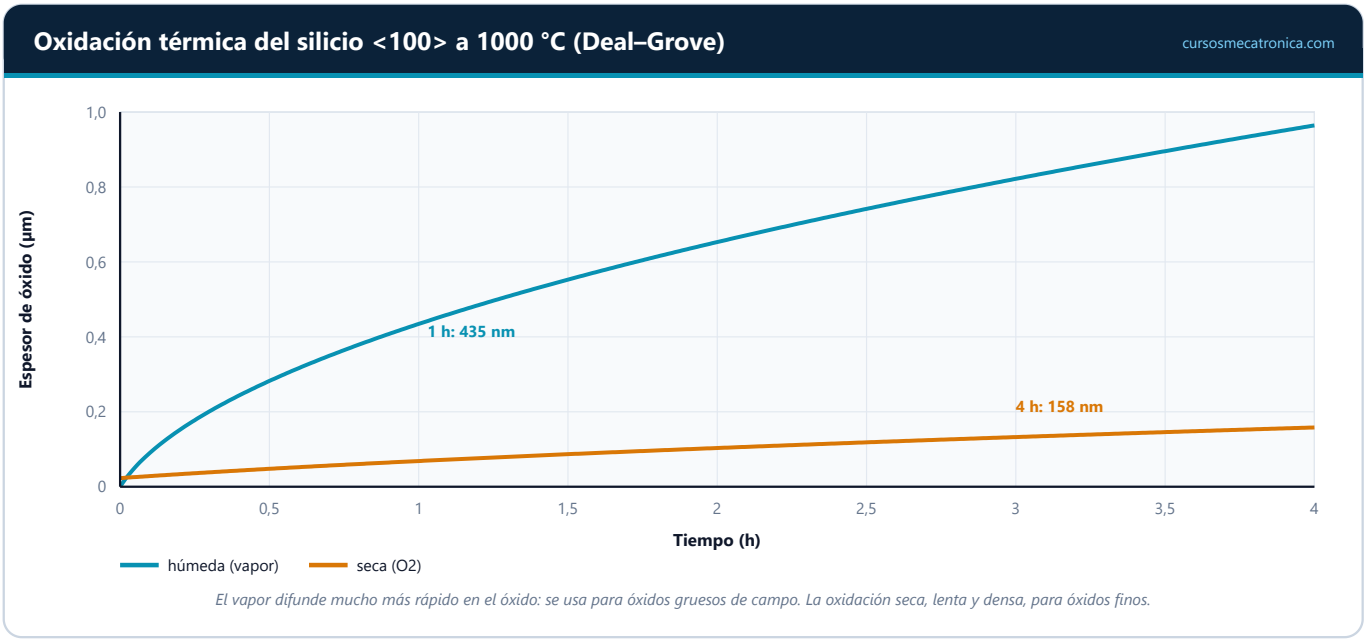
Rectificado del diámetro, muesca que marca la orientación cristalina, corte con hilo diamantado, lapeado, pulido químico-mecánico (CMP) hasta acabado especular y limpieza RCA (SC-1 para partículas y orgánicos, SC-2 para metales, HF para el óxido nativo).

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.

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

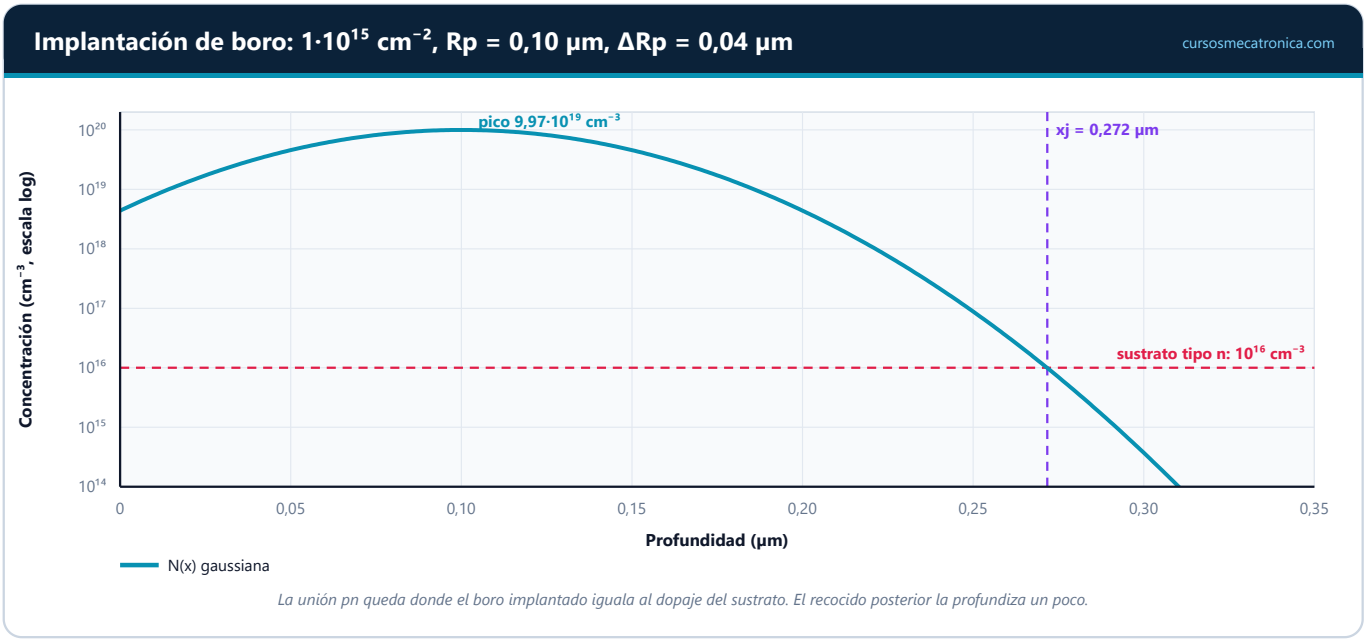
La menor dimensión imprimible es $\mathrm{CD} = \mathrm{k_1}\cdot\lambda/\mathrm{NA}$. Se mejoró bajando λ (365 → 193 → 13,5 nm), subiendo NA (inmersión en agua: NA 1,35) y bajando $\mathrm{k_1}$ con trucos de proceso. La profundidad de foco cae con NA^2, por eso la oblea debe estar casi perfectamente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

MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Integración CMOS, metalización, pruebas y encapsulado

Capítulo 03 · En el video: **minuto 31:00** · Duración 15:06

Objetivo. Seguir la fabricación de un chip CMOS hasta su encapsulado y estimar su costo a partir del rendimiento.

Ideas clave

Integración CMOS

Trincheras de aislamiento (STI) separan los transistores; se forman pozos n y p; la compuerta usa un dieléctrico de alta permitividad con metal (HKMG); fuente y drenador se implantan y se cubren con siliciuro para bajar la resistencia de contacto.

Del MOSFET plano al GAA

Al acortar el canal, la compuerta pierde control (efectos de canal corto). El FinFET levanta el canal en una aleta rodeada por tres lados; el GAAFET apila nanohojas rodeadas por los cuatro.



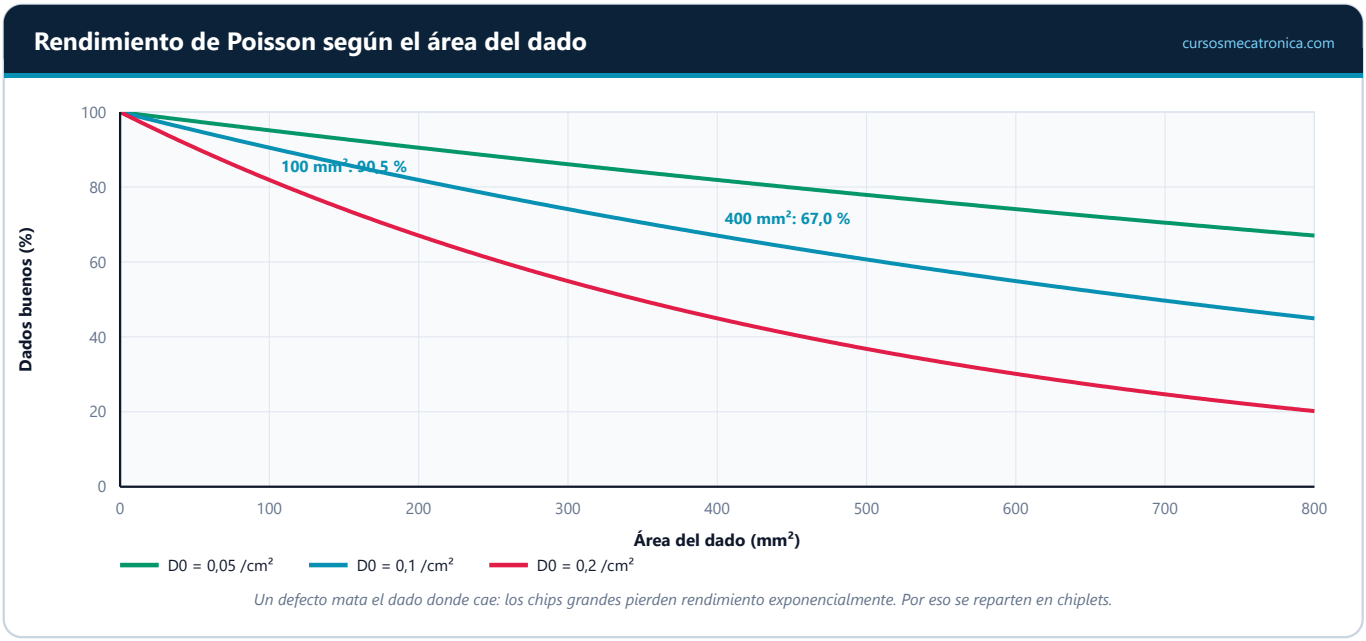
Partición funcional del chip.

Cobre y doble damasquinado

El cobre conduce mejor que el aluminio pero no se puede grabar con plasma. Se graban primero la trinchera y la vía en el dieléctrico, se deposita una barrera (TaN/Ta) y una semilla, se llena por electrodeposición y el CMP retira el sobrante.

Rendimiento

Los dados que caben en una oblea dependen del área y de la pérdida en el borde. Si los defectos caen al azar con densidad D_0, la fracción de dados buenos es $Y = e^{-D_0 \cdot A}$.



Salida de rendimiento_oblea.py.

Prueba y corte

La tarjeta de microagujas prueba cada dado en la oblea (wafer sort) y genera un mapa de bins. Luego la oblea se adelgaza por detrás y se corta con disco de diamante o láser.

Encapsulado

El dado se pega y se conecta con hilos (wire bonding) o se voltea sobre microesferas (flip-chip). Las vías a través del silicio (TSV) permiten apilar chips en 3D. Familias: QFP (patas periféricas), QFN (con almohadilla térmica), BGA (matriz de esferas) y CSP (del tamaño del chip).

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Dados por oblea	$N = \pi(d/2)^2/S - \pi\cdot d/\sqrt{(2S)}$	d: diámetro útil; S: área del dado.
Poisson	$Y = e^{-D_0\cdot A}$	A en cm².
Costo por dado bueno	$C = C_{oblea} / (N\cdot Y)$	Sin prueba ni encapsulado.

Ejemplo resuelto: costo de un dado de 100 mm²

1. Oblea de 300 mm con 3 mm de borde: d útil = 294 mm.
2. $N = \pi\cdot 147^2/100 - \pi\cdot 294/\sqrt{200} = 679 - 65 = 613$ dados.
3. Con D_0 = 0,1/cm² y A = 1 cm²: $Y = e^{-0,1} = 90,5\ \%$ → 555 buenos.
4. Con 10 000 USD por oblea: 18,03 USD por dado bueno.

Un dado de 400 mm² rinde solo 67 % y cuesta 108,89 USD; cuatro chiplets de 100 mm² suman 72,12 USD de silicio, más el encapsulado avanzado (rendimiento_oblea.py).

Encapsulados

Familia	Conexión	Ventaja	Cuidado
QFP	Patas en los cuatro lados	Inspección visual fácil	Patas frágiles, área grande
QFN	Contactos bajo el borde + almohadilla	Pequeño, buena disipación	Vacíos bajo la almohadilla
BGA	Matriz de esferas	Muchos contactos	Solo se inspecciona con rayos X
CSP / WLCSP	Esferas sobre el propio dado	Mínimo tamaño	Ensamble exigente
3D-IC	Pilas con TSV	Ancho de banda enorme	Costo y calor

Código del capítulo

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

rendimiento_oblea.py — dados por oblea, rendimiento de Poisson, costo por dado bueno y chiplets.

```
"""
rendimiento_oblea.py — Capítulo 03: dados por oblea, rendimiento de Poisson, costo por
dado bueno y comparación entre un chip monolítico y chiplets.
"""
import math


def dados_por_oblea(diametro_mm, area_mm2, borde_mm=3):
    """Fórmula clásica con corrección de borde: πr²/S − πd/√(2S)."""
    d = diametro_mm - 2 * borde_mm
    return int(math.pi * (d / 2) ** 2 / area_mm2 - math.pi * d / math.sqrt(2 * area_mm2))


def poisson(area_mm2, d0_cm2):
    return math.exp(-d0_cm2 * area_mm2 / 100)


def costo_dado(costo_oblea, diametro_mm, area_mm2, d0):
    n = dados_por_oblea(diametro_mm, area_mm2)
    y = poisson(area_mm2, d0)
    buenos = n * y
    return n, y, buenos, costo_oblea / buenos


if __name__ == '__main__':
    costo = 10000.0          # USD por oblea procesada de 300 mm
    print('Oblea de 300 mm, borde de 3 mm, D0 = 0,1 defectos/cm², 10 000 USD')
    print('  área (mm²)  dados   rendimiento   buenos   USD por dado bueno')
    for area in (25, 100, 400, 800):
        n, y, b, c = costo_dado(costo, 300, area, 0.1)
        print(f'  {area:9d}  {n:6d}   {100 * y:9.1f} %   {b:6.0f}   {c:10.2f}')

    print('\nChip de 400 mm² frente a 4 chiplets de 100 mm² (D0 = 0,1)')
    _, y1, _, c1 = costo_dado(costo, 300, 400, 0.1)
    _, y4, _, c4 = costo_dado(costo, 300, 100, 0.1)
    print(f'  Monolítico : rendimiento {100 * y1:.1f} %, {c1:.2f} USD')
    print(f'  4 chiplets : rendimiento {100 * y4:.1f} % c/u, silicio {4 * c4:.2f} USD'
          f' (+ costo del encapsulado avanzado)')
```

Errores frecuentes

- Calcular los dados por oblea solo con el área, sin la pérdida del borde.
- Suponer que el rendimiento baja linealmente con el área.
- Confundir FEOL (transistores) con BEOL (interconexiones).

Autoevaluación

1. ¿Por qué el cobre se deposita con damasquinado?
2. ¿Qué rendimiento tiene un dado de 1 cm^2 con D0 = 0,1/cm^2?
3. ¿Qué encapsulado exige rayos X para inspeccionar sus uniones?

Respuestas. 1. Porque no se puede grabar con plasma: se llena una trinchera y se pule. **2.** 90,5 %. **3.** El BGA.

MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Sustratos PCB, apilamiento multicapa y preparación CAM

Capítulo 04 · En el video: **minuto 46:06** · Duración 15:15

Objetivo. Elegir sustrato y apilamiento de una PCB y dimensionar pistas por corriente e impedancia.

Ideas clave

Tipos de placa

Una cara, doble cara con agujeros metalizados (PTH), multicapa y rígido-flexible. Cada salto agrega capas de ruteo y planos, y también costo.

Sustratos

El FR-4 (epoxi con fibra de vidrio) es el estándar; su temperatura de transición vítrea Tg debe superar con margen las del proceso sin plomo (Tg alta ≥ 170 °C). Para RF se usan laminados de PTFE o hidrocarburo (εr estable, bajas pérdidas); para LED de potencia, núcleo de aluminio; para circuitos flexibles, poliimida.

Cobre y pistas

El espesor se da en onzas por pie cuadrado: 1 oz ≈ 35 µm. La resistencia de una pista es $R = \rho \cdot L/(w \cdot t)$ y sube 0,39 % por °C. IPC-2152 (y la fórmula clásica de IPC-2221) relacionan corriente, sección y calentamiento.

Apilamiento

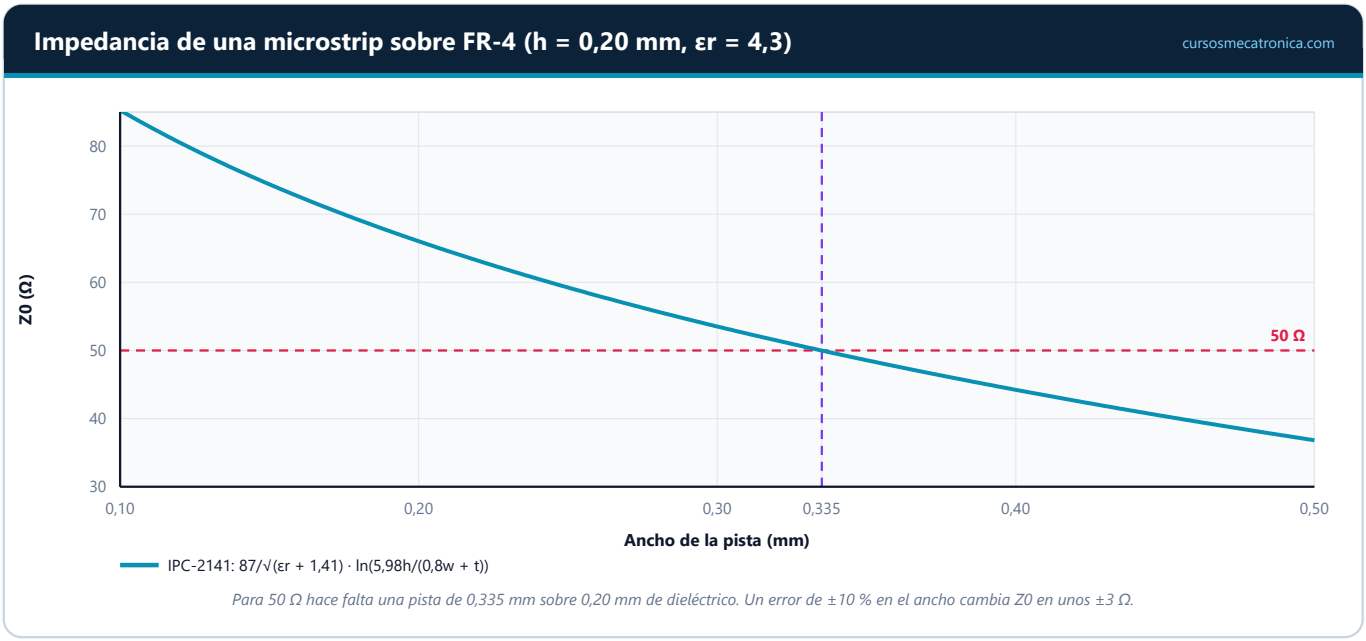
Núcleos ya curados (core) y resina preimpregnada (prepreg) se alternan de forma simétrica para que la placa no se curve. Cada capa de señal rápida debe correr junto a un plano de referencia continuo.



Orden de las capas de una placa típica.

Impedancia controlada

A alta frecuencia la pista y su plano forman una línea de transmisión. La microstrip (pista exterior sobre un plano) y la stripline (entre dos planos) se dimensionan para 50 Ω, o 90–100 Ω en pares diferenciales como USB o Ethernet.



Salida de pista_y_microstrip.py.

Vías

Pasante (atraviesa todo), ciega (de una cara a una capa interna), enterrada (entre capas internas) y microvía láser de las placas HDI, que puede rellenarse y taparse en la misma almohadilla (via-in-pad, VIPPO).

Datos de fabricación y DFM

Gerber X2 (una imagen por capa con atributos), Excellon (taladros), o formatos únicos como ODB++ e IPC-2581. Las reglas DFM fijan ancho y separación mínimos, anillo anular, lágrimas en las uniones pista-pad y alivios térmicos en los planos.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Resistencia de pista	$R = \rho \cdot L/(w \cdot t) \cdot [1 + 0{,}00393 \cdot (T - 20)]$	ρ_{Cu} = 1,72·10^{-8} Ω·m.
Corriente (IPC-2221)	$I = k \cdot \Delta T^{0{,}44} \cdot A^{0{,}725}$	A en mil^2; k = 0,048 externa, 0,024 interna.
Microstrip (IPC-2141)	$Z_0 = 87/\sqrt{(\varepsilon_r + 1{,}41)} \cdot \ln[5{,}98h/(0{,}8w + t)]$	Válida para 0,1 < w/h < 2.
Espesor de cobre	$1\ \text{oz/ft}^2 \approx 35\ \mu\text{m}$	2 oz ≈ 70 µm.

Ejemplo resuelto: una pista de potencia y una línea de 50 Ω

1. Pista de 100 mm × 0,25 mm en 1 oz: $R = 1{,}72 \cdot 10^{-8} \cdot 0{,}1 / (0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 35 \cdot 10^{-6}) = 197\ \text{m}\Omega$.
2. Con 2 A cae 393 mV y disipa 786 mW: demasiado. IPC-2221 da 0,88 A para ΔT = 10 °C; 1 mm de ancho soporta 2,39 A.
3. Microstrip sobre 0,20 mm de FR-4 (εr = 4,3): con 0,36 mm, Z_0 = 47,7 Ω.
4. Por bisección, 50 Ω exactos piden 0,335 mm.

La pista de 2 A debe ensancharse a ~1 mm y la línea de RF debe ajustarse a 0,335 mm (pista_y_microstrip.py). El fabricante confirma el ancho final con su simulador y cupones de impedancia.

Sustratos de PCB

Material	ε_r típico	Uso
FR-4 estándar	4,2–4,7	Electrónica general
FR-4 Tg alta	4,2–4,6	Multicapa y procesos sin plomo
PTFE / hidrocarburo	2,2–3,5	RF y microondas, radar
Núcleo de aluminio (MCPCB)	—	LED y fuentes de potencia
Poliimida	3,2–3,5	Circuitos flexibles y rígido-flex

Código del capítulo

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

pista_y_microstrip.py — resistencia de una pista, corriente admisible IPC-2221, impedancia microstrip y ancho para 50 Ω.

```
"""
pista_y_microstrip.py — Capítulo 04: resistencia y calentamiento de una pista, capacidad
de corriente (IPC-2221) e impedancia de una línea microstrip (IPC-2141).
"""
import math

RHO_CU = 1.72e-8      # Ω·m a 20 °C
ALFA_CU = 0.00393     # 1/°C
UM_POR_OZ = 35.0      # 1 oz/ft² ≈ 35 µm


def resistencia(largo_mm, ancho_mm, oz=1.0, temp_c=20):
    t = UM_POR_OZ * oz * 1e-6
    r20 = RHO_CU * (largo_mm * 1e-3) / (ancho_mm * 1e-3 * t)
    return r20 * (1 + ALFA_CU * (temp_c - 20))


def corriente_ipc2221(ancho_mm, oz, delta_t, externa=True):
    """I = k·ΔT^0,44·A^0,725 con A en mil² (k = 0,048 externa, 0,024 interna)."""
    area_mil2 = (ancho_mm / 0.0254) * (UM_POR_OZ * oz / 25.4)
    k = 0.048 if externa else 0.024
    return k * delta_t ** 0.44 * area_mil2 ** 0.725


def z0_microstrip(w_mm, h_mm, t_mm, er):
    """IPC-2141: Z0 = 87/√(εr + 1,41) · ln(5,98h / (0,8w + t)); válida para 0,1 < w/h < 2."""
    return 87 / math.sqrt(er + 1.41) * math.log(5.98 * h_mm / (0.8 * w_mm + t_mm))
```

```
def ancho_para(z_obj, h_mm, t_mm, er):
    """Bisección: Z0 baja al aumentar el ancho."""
    lo, hi = 0.02, 2 * h_mm
    for _ in range(60):
        mid = (lo + hi) / 2
        if z0_microstrip(mid, h_mm, t_mm, er) > z_obj:
            lo = mid
        else:
            hi = mid
    return (lo + hi) / 2


if __name__ == '__main__':
    r = resistencia(100, 0.25)
    print(f'Pista de 100 mm × 0,25 mm en 1 oz: R = {1000 * r:.1f} mΩ a 20 °C,'
          f' {1000 * resistencia(100, 0.25, temp_c=80):.1f} mΩ a 80 °C')
    print(f'  Con 2 A: caída {2 * r * 1000:.0f} mV y {4 * r * 1000:.0f} mW disipados')
    for w in (0.25, 0.5, 1.0, 2.0):
        print(f'  Ancho {w:4.2f} mm, 1 oz externa, ΔT = 10 °C: {corriente_ipc2221(w, 1, 10):.2f} A')

    h, t, er = 0.20, 0.035, 4.3
    print(f'\nMicrostrip sobre FR-4 (h = {h} mm, εr = {er}, cobre 35 µm)')
    for w in (0.20, 0.30, 0.36, 0.45):
        print(f'  w = {w:.2f} mm -> Z0 = {z0_microstrip(w, h, t, er):.1f} Ω')
    w50 = ancho_para(50, h, t, er)
    print(f'  Ancho para 50 Ω: {w50:.3f} mm')
```

Errores frecuentes

- Dimensionar pistas de potencia por costumbre y no por corriente.
- Cortar el plano de referencia bajo una señal rápida.
- Apilamiento asimétrico: la placa se curva en el horno.
- Enviar solo el Gerber sin el archivo de taladros ni el stackup.

Autoevaluación

1. ¿Cuántos micrómetros tiene el cobre de 1 oz?
2. ¿Qué pasa con Z0 si se ensancha la pista?
3. ¿Qué es una vía ciega?

Respuestas. 1. Unos 35 µm. **2.** Baja. **3.** La que conecta una cara externa con una capa interna sin atravesar toda la placa.

Fabricación industrial de PCB: LDI, metalización, grabado y acabados

Capítulo 05 · En el video: **minuto 1:01:21** · Duración 14:36

Objetivo. Seguir la ruta de fabricación de una placa multicapa y calcular el tiempo de metalización de sus vías.

Ideas clave

La ruta de fábrica

Se trabaja en paneles grandes. Primero se fabrican las capas internas, se inspeccionan, se laminan con prepreg al vacío, se taladran y metalizan los agujeros, se forman las capas externas, y se terminan con máscara, serigrafía y acabado.

Imagen de las capas

Tras un micrograbado que limpia el cobre, se lamina una película seca fotosensible y un láser la expone directamente desde los datos CAM (LDI), sin fotoherramientas. El revelado alcalino deja protegido el cobre que será pista.

Grabado

El cloruro cúprico disuelve el cobre expuesto, pero también ataca de lado bajo la película: la pista queda trapezoidal. El factor de grabado (profundidad sobre socavado lateral) mide la calidad y obliga a compensar el ancho en CAM.

Capas internas y laminación

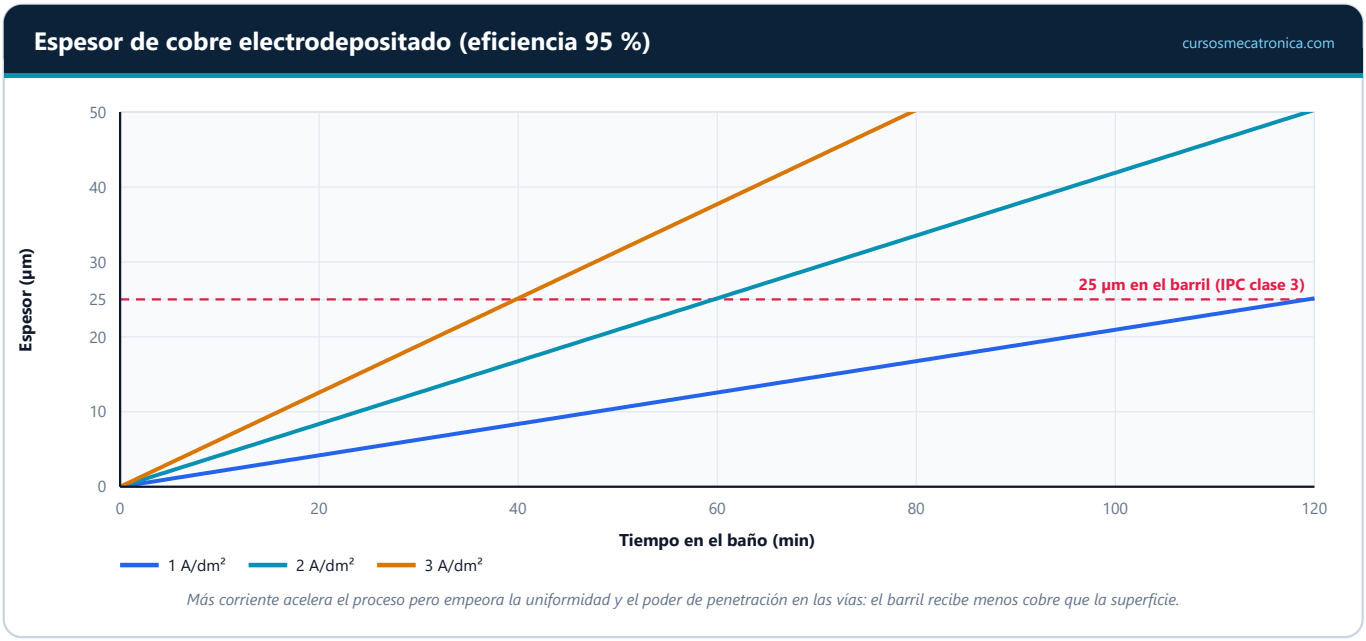
La AOI compara cada capa con los datos de diseño. Un tratamiento de óxido marrón da rugosidad para la adherencia; las capas se alinean con pasadores y se curan en prensa al vacío.

Taladrado

Husillos de más de 100 000 rpm con brocas de carburo de tungsteno; el láser UV abre las microvías HDI. El desmear retira la resina fundida de las paredes para que el cobre se adhiera.

Metalización de agujeros (PTH)

Un catalizador de paladio permite depositar cobre químico de ~1 µm en las paredes aislantes; luego un baño galvánico ácido engrosa el cobre según la ley de Faraday. El poder de penetración indica cuánto cobre llega al interior del barril frente a la superficie.



Salida de galvanoplastia_pth.py.

Capas externas y terminación

En el pattern plating se engrosan solo las pistas y se protegen con estaño mientras se graba el resto. Después se aplica la máscara líquida fotosensible (LPI), la leyenda por inyección UV y el acabado. Los cupones del borde se cortan, pulen y miden al microscopio (microsección).

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Faraday	$v = J \cdot M \cdot \eta \,/\, (n \cdot F \cdot \rho)$	Cu: M = 63,55 g/mol, n = 2, ρ = 8,96 g/cm³.
Relación de aspecto	$AR = \text{espesor de la placa} \,/\, \text{diámetro del agujero}$	Más de 8:1 complica la metalización.
Poder de penetración	$TP = \text{espesor en el barril} \,/\, \text{espesor en superficie}$	Típico 70–90 %.
Factor de grabado	$FG = 2h \,/\, (W_{abajo} - W_{arriba})$	Mayor es mejor.

Ejemplo resuelto: cobre en una vía de 0,2 mm

1. Con J = 2 A/dm² y η = 95 %:
   $v = 0{,}02 \cdot 63{,}55 \cdot 0{,}95 / (2 \cdot 96\,485 \cdot 8{,}96) = 6{,}98 \cdot 10^{-7}\ \text{cm/s} = 0{,}419\ \mu\text{m/min}.$
2. 25 µm en superficie: 60 min.
3. Placa de 1,6 mm con broca de 0,2 mm: AR = 8:1. Con un poder de penetración de 80 %, para 25 µm en el barril hacen falta 31,2 µm en superficie: 75 min.
4. Si el poder de penetración cae a 60 %: 41,7 µm y 99 min.

Las vías finas en placas gruesas alargan el baño y engrosan de más la superficie, lo que complica grabar pistas finas (galvanoplastia_pth.py).

Acabados superficiales

Acabado	Planitud	Vida útil	Uso
HASL sin plomo	Baja	Larga	Placas económicas THT
ENIG (níquel + oro)	Excelente	Larga	BGA y paso fino
OSP (orgánico)	Excelente	Corta	Alto volumen, bajo costo
Plata o estaño de inmersión	Excelente	Media	Paso fino, alta frecuencia
Oro duro	Buena	Muy larga	Contactos de borde y conectores

Código del capítulo

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

galvanoplastia_pth.py — velocidad de depósito por Faraday, tiempo para 25 µm, poder de penetración y factor de grabado.

```
"""
galvanoplastia_pth.py — Capítulo 05: espesor de cobre por la ley de Faraday, cobre en el
barril de una vía según el poder de penetración, relación de aspecto y factor de grabado.
"""
M_CU, N_E, RHO_CU, F = 63.55, 2, 8.96, 96485.0   # g/mol, e⁻, g/cm³, C/mol


def velocidad_um_min(j_a_dm2, eficiencia=0.95):
    """Crecimiento en µm/min para una densidad de corriente en A/dm²."""
    j_a_cm2 = j_a_dm2 / 100
    cm_s = j_a_cm2 * M_CU * eficiencia / (N_E * F * RHO_CU)
    return cm_s * 1e4 * 60


def tiempo_para(espesor_um, j_a_dm2, eficiencia=0.95):
    return espesor_um / velocidad_um_min(j_a_dm2, eficiencia)


def factor_grabado(profundidad_um, ancho_arriba_um, ancho_abajo_um):
    """FG = profundidad / socavado de un lado = 2·h / (W_abajo − W_arriba)."""
    return 2 * profundidad_um / (ancho_abajo_um - ancho_arriba_um)


if __name__ == '__main__':
    for j in (1.0, 2.0, 3.0):
        print(f'J = {j:.0f} A/dm²: {velocidad_um_min(j):.3f} µm/min;'
              f' 25 µm en {tiempo_para(25, j):.0f} min')

    espesor_placa, broca = 1.6, 0.20
    ar = espesor_placa / broca
    print(f'\nVía de {broca} mm en placa de {espesor_placa} mm: relación de aspecto {ar:.0f}:1')
    for poder in (0.9, 0.8, 0.6):
        superficie = 25.0 / poder
        print(f'  Poder de penetración {100 * poder:.0f} %: para 25 µm en el barril'
              f' hacen falta {superficie:.1f} µm en superficie'
              f' ({tiempo_para(superficie, 2.0):.0f} min a 2 A/dm²)')

    fg = factor_grabado(35, 100, 128)
    print(f'\nPista de 35 µm: 100 µm arriba y 128 µm abajo -> factor de grabado {fg:.1f}')
```

Errores frecuentes

- Diseñar vías de 0,15 mm en placas de 2,4 mm (relación 16:1) sin consultar al fabricante.
- Olvidar compensar en CAM el socavado del grabado.
- Elegir HASL para un BGA de paso fino.

Autoevaluación

1. ¿Qué ventaja tiene el LDI sobre la exposición con fotoherramienta?
2. ¿Cuánto cobre deposita 2 A/dm^2 por minuto?
3. ¿Qué acabado conviene para un BGA?

Respuestas. 1. Expone directo desde los datos, con mejor registro y sin película maestra. **2.** Unos 0,42 µm. **3.** ENIG (u otro plano como OSP o plata).

MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

Pruebas eléctricas, montaje SMT y THT e inspección

Capítulo 06 · En el video: **minuto 1:15:57** · Duración 14:59

Objetivo. Describir el ensamble de una placa y verificar un esténcil y un perfil de reflujo con criterios cuantitativos.

Ideas clave

Panelización

Las placas se agrupan en paneles para la línea SMT y se separan después por ranurado en V (cortes rectos) o por pestañas fresadas con perforaciones.

Prueba eléctrica de la placa desnuda

Se compara cada red con la lista del diseño (IPC-D-356): continuidad con baja resistencia y aislamiento a alta tensión. Las sondas voladoras sirven para prototipos; la cama de agujas, para volumen.

Clases IPC

IPC-A-600 juzga la placa desnuda e IPC-A-610 el ensamble. Clase 1: productos de consumo general; clase 2: equipos de servicio dedicado (industria); clase 3: alta confiabilidad (médico, aeroespacial, automotriz de seguridad).

THT frente a SMT

Los componentes pasantes (THT) aguantan esfuerzos mecánicos; los de montaje superficial (SMT) permiten paso fino, ambas caras y montaje automático a gran velocidad.



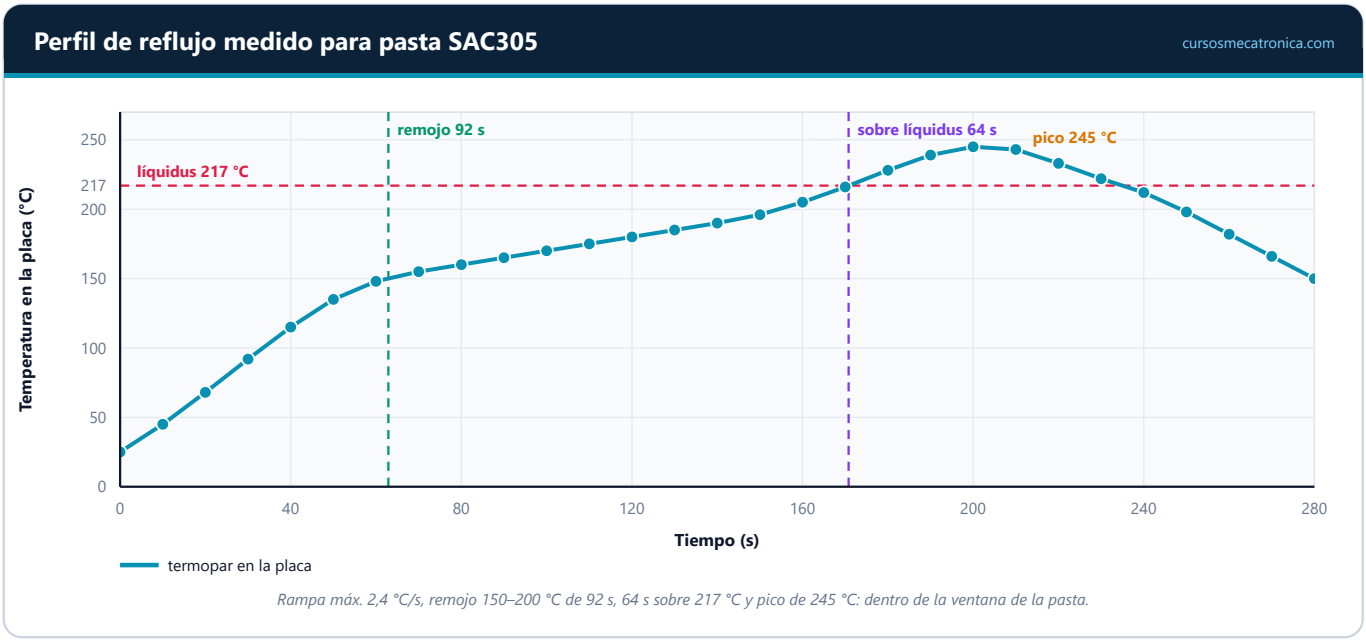
Flujo SMT del capítulo 06.

Pasta y esténcil

La pasta SAC305 (estaño, 3 % de plata, 0,5 % de cobre) se imprime a través de un esténcil cortado con láser. Para que la pasta se suelte, la relación entre el área de la abertura y el área de sus paredes debe ser al menos 0,66. La SPI 3D mide el volumen de cada depósito.

Colocación y reflujo

La máquina lee los fiduciales, toma cada componente con boquillas de vacío y lo centra con visión al vuelo. El horno de convección (a menudo con nitrógeno) aplica precalentamiento, remojo, pico sobre el líquidus y enfriamiento controlado. Pads desiguales en componentes pequeños provocan el efecto lápida (tombstoning).



Salida de perfil_reflujo.py.

Ola e inspección

En placas mixtas los THT se sueldan por ola o por ola selectiva robotizada. La AOI 3D revisa presencia, polaridad y filetes; la AXI (rayos X) mira bajo los BGA y QFN, donde un criterio habitual limita los vacíos a menos de 25–30 % del área de la esfera. Al final, prueba en circuito (ICT) o funcional.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Relación de área	$\mathrm{AR} = (\mathrm{L}\cdot\mathrm{W}) \,/\, [2(\mathrm{L}+\mathrm{W})\cdot\mathrm{t}]$	≥ 0,66 para buena liberación.
Tiempo sobre líquidus	$\mathrm{TAL} = \mathrm{t}(\text{baja de } 217\ °\mathrm{C}) - \mathrm{t}(\text{sube de } 217\ °\mathrm{C})$	Típico 45–90 s.
Pendiente	$\mathrm{dT/dt} \leq 3\ °\mathrm{C/s}$ en la subida	Evita choque térmico y salpicaduras.

Ejemplo resuelto: esténcil para un 0201

1. Abertura de 0,25 × 0,30 mm con esténcil de 100 µm: $\mathrm{AR} = 0{,}075/(2\cdot0{,}55\cdot0{,}10) = 0{,}68$ → libera bien.
2. Con esténcil de 125 µm: AR = 0,55 → la pasta queda pegada en la abertura.
3. Para un 0402 (0,50 × 0,55 mm) en 100 µm: AR = 1,31.
4. Solución habitual: esténcil escalonado o de 100 µm para toda la placa.

El perfil medido de la figura cumple: rampa 2,4 °C/s, remojo de 92 s, 64 s sobre líquidus y pico de 245 °C (perfil_reflujo.py).

Ventana de un perfil SAC305 (referencia)

Parámetro	Ventana	Perfil medido
Rampa de subida	≤ 3 °C/s	2,4 °C/s
Remojo 150–200 °C	60–120 s	92 s
Tiempo sobre 217 °C	45–90 s	64 s
Pico	235–250 °C	245 °C
Enfriamiento	≤ 6 °C/s	1,6 °C/s

Código del capítulo

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

perfil_reflujo.py — relación de área del esténcil y análisis de un perfil de reflujo medido.

```
"""
perfil_reflujo.py — Capítulo 06: relación de área del esténcil y validación de un perfil
de reflujo sin plomo (SAC305, líquidus 217 °C) medido con un termopar en la placa.
"""

LIQUIDUS = 217.0

# Perfil medido: (tiempo s, temperatura °C), un punto cada 10 s
PERFIL = [(0, 25), (10, 45), (20, 68), (30, 92), (40, 115), (50, 135), (60, 148),
          (70, 155), (80, 160), (90, 165), (100, 170), (110, 175), (120, 180),
          (130, 185), (140, 190), (150, 196), (160, 205), (170, 216), (180, 228),
          (190, 239), (200, 245), (210, 243), (220, 233), (230, 222), (240, 212),
          (250, 198), (260, 182), (270, 166), (280, 150)]

LIMITES = {'pendiente_max': 3.0, 'remojo': (60, 120), 'tal': (45, 90),
           'pico': (235, 250), 'enfriamiento_max': 6.0}


def area_ratio(largo_mm, ancho_mm, espesor_mm):
    """Área de la abertura / área de las paredes; debe ser ≥ 0,66."""
    return (largo_mm * ancho_mm) / (2 * (largo_mm + ancho_mm) * espesor_mm)


def cruce(perfil, nivel, subiendo=True):
    """Instante (interpolado) en que el perfil cruza un nivel."""
    for (t0, y0), (t1, y1) in zip(perfil, perfil[1:]):
        if (subiendo and y0 < nivel <= y1) or (not subiendo and y0 >= nivel > y1):
            return t0 + (nivel - y0) * (t1 - t0) / (y1 - y0)
    return None


def analizar(perfil):
    pend = [(y1 - y0) / (t1 - t0) for (t0, y0), (t1, y1) in zip(perfil, perfil[1:])]
    remojo = cruce(perfil, 200) - cruce(perfil, 150)
    tal = cruce(perfil, LIQUIDUS, False) - cruce(perfil, LIQUIDUS)
    pico = max(y for _, y in perfil)
    return dict(pendiente_max=max(pend), enfriamiento_max=-min(pend), remojo=remojo, tal=tal, pico=pico)


if __name__ == '__main__':
    aberturas = [('0402 con esténcil de 100 µm', 0.50, 0.55, 0.10),
                 ('0201 con esténcil de 100 µm', 0.25, 0.30, 0.10),
                 ('0201 con esténcil de 125 µm', 0.25, 0.30, 0.125)]
    for nombre, l, w, e in aberturas:
```

```
        ar = area_ratio(l, w, e)
        print(f'{nombre}: relación de área {ar:.2f} {"OK" if ar >= 0.66 else "insuficiente"}')

    r = analizar(PERFIL)
    print('\nPerfil de reflujo SAC305')
    print(f'  Pendiente máxima de subida : {r["pendiente_max"]:.1f} °C/s (máx 3)')
    print(f'  Remojo 150–200 °C          : {r["remojo"]:.0f} s (60–120)')
    print(f'  Tiempo sobre líquidus      : {r["tal"]:.0f} s (45–90)')
    print(f'  Pico                       : {r["pico"]:.0f} °C (235–250)')
    print(f'  Enfriamiento máximo        : {r["enfriamiento_max"]:.1f} °C/s (máx 6)')
    ok = (r['pendiente_max'] <= 3 and 60 <= r['remojo'] <= 120 and 45 <= r['tal'] <= 90
          and 235 <= r['pico'] <= 250 and r['enfriamiento_max'] <= 6)
    print(f'  Dictamen: {"perfil dentro de la ventana" if ok else "ajustar el horno"}')
```

Errores frecuentes

- Usar un esténcil grueso con componentes 0201 o BGA de paso fino.
- Ajustar el horno con un termopar sobre el transportador en vez de sobre la placa.
- Aceptar un BGA sin inspección por rayos X.

Autoevaluación

1. ¿Qué relación de área mínima se recomienda?
2. ¿Cuál es el líquidus de la SAC305?
3. ¿Qué clase IPC corresponde a un equipo médico de soporte vital?

Respuestas. 1. 0,66. **2.** 217 °C. **3.** Clase 3.

Resumen y cierre

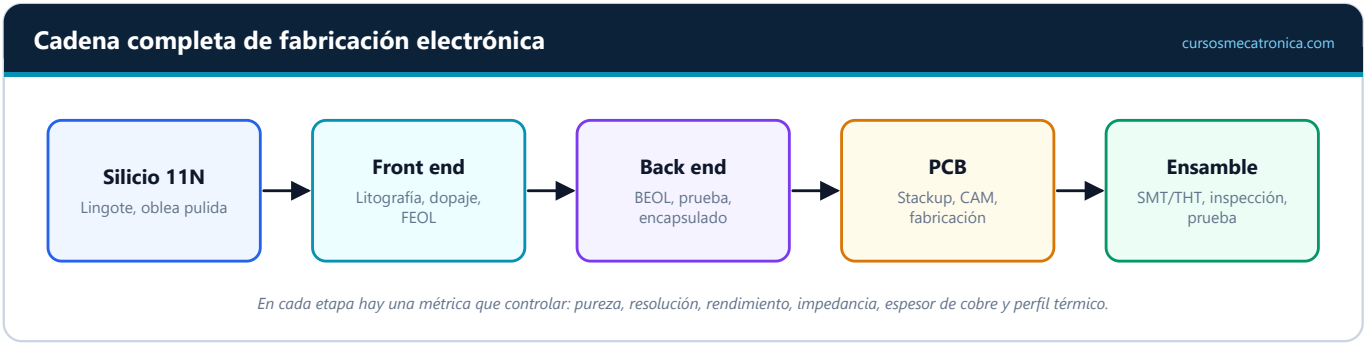
Cierre · En el video: **minuto 1:30:56** · Duración 0:47

Objetivo. Repasar la cadena completa de fabricación electrónica.

Ideas clave

Lo que se recorrió

Del cuarzo al silicio de once nueves, la oblea, los procesos unitarios repetidos capa tras capa, el chip CMOS probado y encapsulado; y luego la placa: sustrato, apilamiento, fabricación y ensamble con su inspección.



Síntesis del minicurso.

Para seguir

Con el diseño de tu próxima PCB, calcula el ancho de las pistas de potencia y de las líneas de 50 Ω con los programas del minicurso y compáralos con la calculadora de tu fabricante.

Fórmulas del minicurso

Tema	Relación
Oxidación	$x^2 + A \cdot x = B(t + \tau)$
Resolución	$CD = k_1 \lambda / NA$
Unión implantada	$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{(2 \ln(N_p/N_B))}$
Rendimiento	$Y = e^{-D_0 A}$
Microstrip	$Z_0 = 87/\sqrt{(\varepsilon_r + 1{,}41)} \cdot \ln(5{,}98h/(0{,}8w+t))$
Faraday	$v = J \cdot M \cdot \eta/(nF\rho)$
Esténcil	$AR = LW/[2(L+W)t] \geq 0{,}66$

Autoevaluación

1. ¿Qué métrica controla el costo de un chip grande?
2. ¿Qué norma juzga la calidad de un ensamble?

Respuestas. 1. El rendimiento (densidad de defectos por área). **2.** IPC-A-610.