MANUAL DE ESTUDIO · FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS Y PCB

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

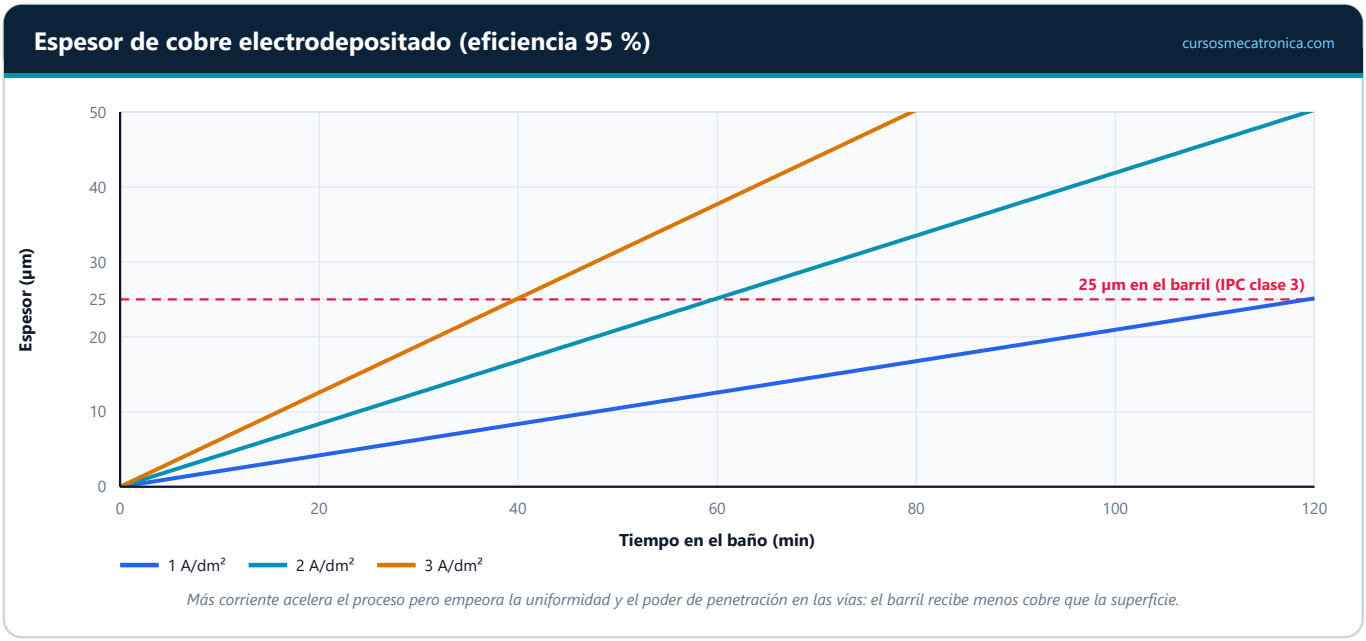
La AOI compara cada capa con los datos de diseño. Un tratamiento de óxido marrón da rugosidad para la adherencia; las capas se alinean con pasadores y se curan en prensa al vacío.

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).