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

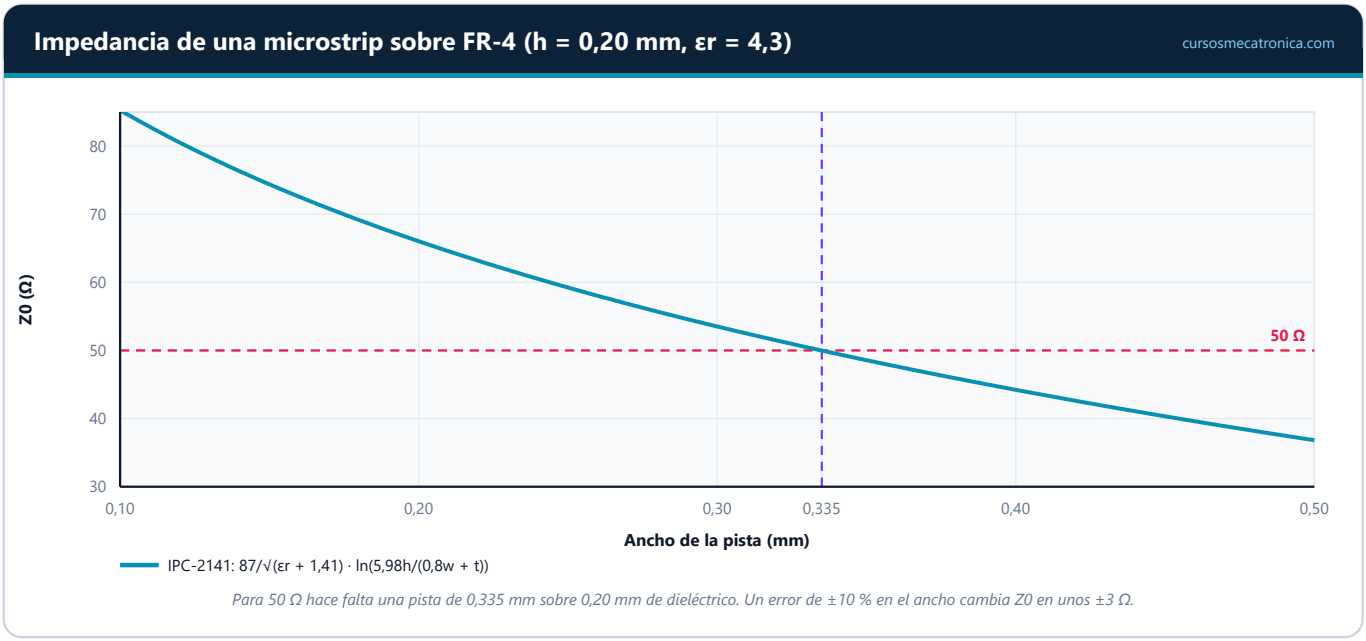
Núcleos ya curados (core) y resina preimpregnada (prepreg) se alternan de forma simétrica para que la placa no se curve. Cada capa de señal rápida debe correr junto a un plano de referencia continuo.



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.