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.



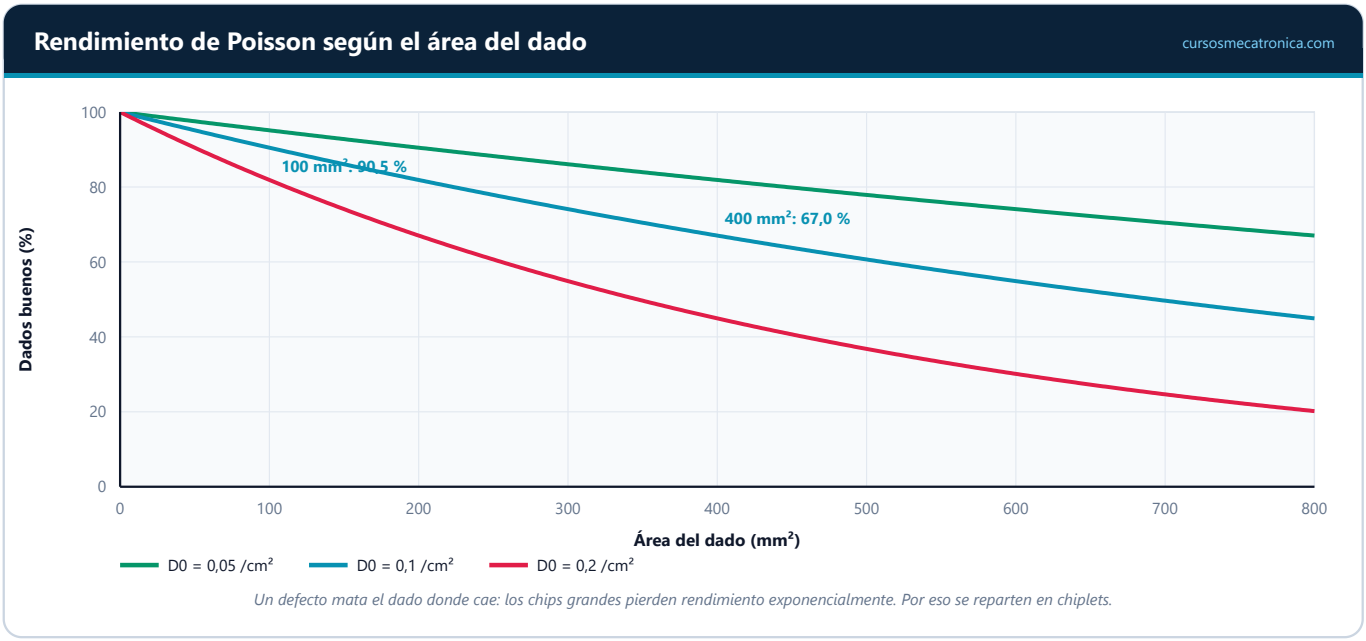
Partición funcional del chip.

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.