

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

tema 1. Tecnologías de diseño microelectrónico

Diseño de Circuitos Integrados I

José Manuel Mendías Cuadros
 Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática
 Universidad Complutense de Madrid

• • • • • • •

2

•

introducción (i)

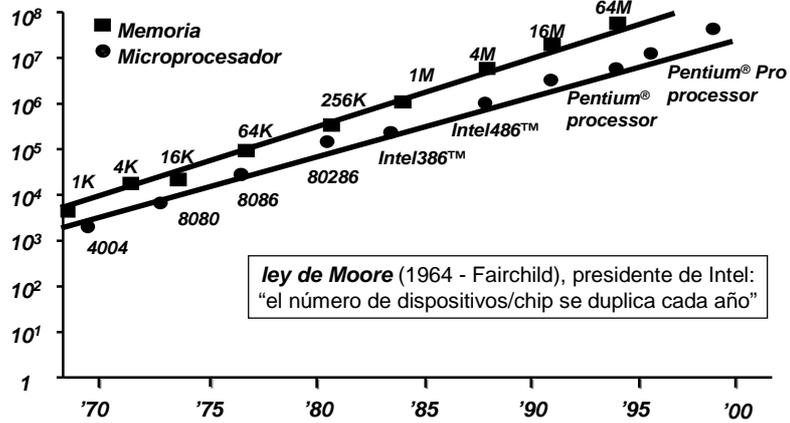
- ☒ La **microelectrónica** es la ciencia que estudia la integración de un gran número de dispositivos electrónicos sobre un único sustrato, y es la base del desarrollo de los sistemas informáticos.
- ☒ Este proceso de integración ha sido debido a la continua reducción de tamaño de los dispositivos, y ha dado lugar a diferentes **familias tecnológicas**:
 - 1947 — invención del transistor.
 - '50 — **diseño con componentes discretos** — 1 dispositivo/chip — transistor.
 - inicio '60 — **SSI** — 10 dispositivos/chip — 20 μm —puertas, flip-flops.
 - med. '60 — **MSI** — $10^2\text{--}10^3$ dispositivos/chip — sumadores, contadores.
 - '70 — **LSI** — $10^3\text{--}10^4$ dispositivos/chip — 5 μm — microprocesadores 8 bits.
 - '80 — **VLSI / ULSI** — $10^4\text{--}10^6$ dispositivos/chip — 2 μm — microprocesadores 16/32 bits.
 - '90 — **GLSI** — $10^7\text{--}10^8$ dispositivos/chip — 0.5 μm — microprocesadores 64 bits.
- ☒ Mayor integración implica:
 - mayor número de dispositivos/chip.
 - menor número de componentes/sistema.
 - mayor velocidad de cálculo.
 - menor consumo.
 - mayor esfuerzo en diseño.
 - mayor esfuerzo en corrección (menor posibilidad de reparación).
 - mayor coste de manufactura que si se compensa con un mayor volumen de ventas, se traduce en un menor coste/unidad.

diseño de circuitos integrados I

• • • • • • •

introducción (ii)

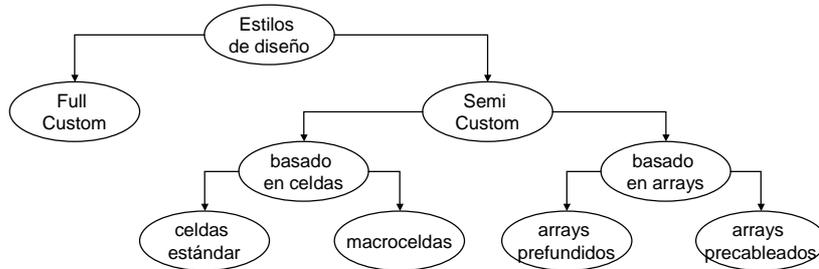
transistores por die
(escala logarítmica)



diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (i)

- ☒ La viabilidad económica de un diseño microelectrónico depende de varios factores:
 - volumen de fabricación
 - número de circuitos correctos / número de circuitos fabricados (yield)
 - precio en mercado
 - rendimiento del circuito
 - tiempo de salida al mercado
- ☒ Para poder adaptar el diseño físico de un circuito a las diferentes necesidades del mercado, nacen los llamados estilos de diseño.
 - Estos se clasifican en atención al grado de libertad que tiene el diseñador a la hora de decidir la topología física del circuito



diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (ii)

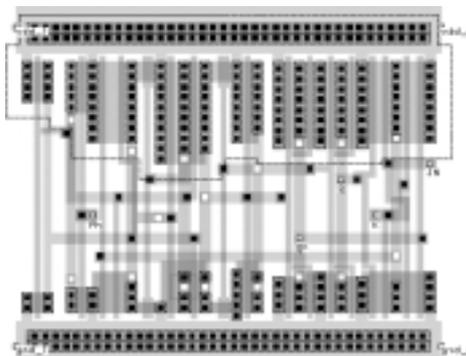
Full custom

- ☒ El diseñador goza de completa libertad durante el diseño físico del circuito
 - no se utilizan elementos prediseñados ni prefabricados.
 - no existen restricciones en el diseño de un bloque funcional.
 - no existen restricciones en la ubicación de los bloques funcionales.
 - no existen restricciones en el trazado de las interconexiones.
 - cualquier aspecto de un circuito puede optimizarse.
 - se suele realizar jerárquicamente.
 - fue muy popular en los primeros años, su uso disminuye día a día.
- ☒ **Ventajas:**
 - flexibilidad.
 - obtención de circuitos de alta calidad.
- ☒ **Desventajas:**
 - no es automatizable.
 - requiere un enorme esfuerzo y diseñadores con alta especialización.
 - tiempos largos de salida al mercado.
 - si no se siguen unas ciertas reglas, no hay seguridad de que el circuito funcione eléctricamente.
 - solamente es rentable cuando los costes se amortizan con un gran volumen de producción (microprocesadores, memorias), con un tiempo de vida largo, o con un alto grado de reutilización (biblioteca de celdas).

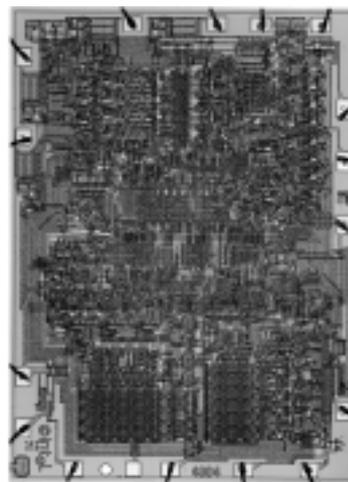
diseño de circuitos integrados I

• • • • • • • • •

estilos de diseño microelectrónico (iii)



layout de un flip-flop CMOS



4004 de Intel

diseño de circuitos integrados I

• • • • • • • • •

estilos de diseño microelectrónico (iv)

Semi custom

- ☒ El diseñador realiza tiene ciertas restricciones durante diseño físico del circuito
 - sólo pueden usar una colección de bloques funcionales primitivos prediseñados o prefabricados.
 - existen restricciones en la ubicación de los bloques funcionales.
 - existen restricciones en el trazado de las interconexiones.
 - sólo se pueden optimizar algunos aspectos del circuito.
- ☒ **Ventajas:**
 - es automatizable.
 - el funcionamiento eléctrico del circuito está asegurado.
 - reduce el esfuerzo de diseño y requiere diseñadores menos especializados.
 - reduce el tiempo de salida al mercado.
- ☒ **Desventajas:**
 - se obtienen circuitos de rendimiento medio

diseño de circuitos integrados I

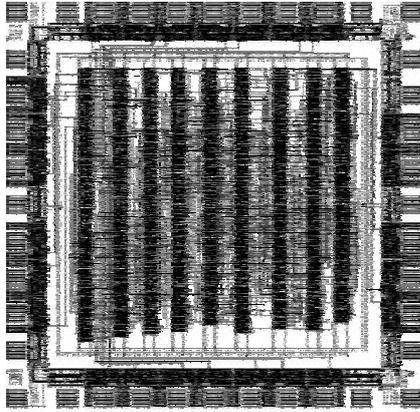
estilos de diseño microelectrónico (v)

Celdas estándar (standard cells)

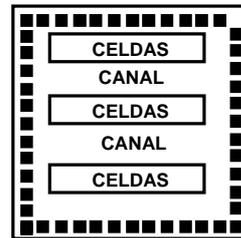
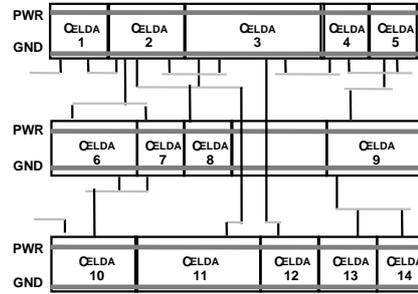
- ☒ **Metodología de diseño:**
 - Todo diseño debe realizarse mediante la interconexión de un conjunto de bloques funcionales prediseñados denominados celdas.
 - Las celdas (de entre 200 y 400 tipos diferentes) se agrupan en bibliotecas facilitadas por el fabricante y se actualizan cuando cambia la tecnología.
 - Funcionalmente las celdas son simples (puerta lógicas, flip-flops).
 - Geométricamente una celda es un rectángulo de altura fija y anchura variable que depende de la complejidad de funcionalidad implementada. Sus entradas y salidas están ubicadas en los extremos superior e inferior del rectángulo, y sus tomas de alimentación y tierra están ubicadas de manera que las líneas de distribución de alimentación y tierra se puedan trazar horizontalmente sobre ellas.
 - Las celdas deben ubicarse en filas de igual altura, dejando entre las filas un espacio libre de anchura variable denominado canal.
 - Las interconexiones entre celdas de la misma fila o entre celdas de filas adyacentes (conexiones cercanas) se trazan en el canal. Las restantes interconexiones (interconexiones lejanas) se realizan a través de celdas de paso o en otros niveles de metalización.
- ☒ **Características:**
 - Requiere el diseño full custom de las celdas y su caracterización.
 - Enlaza fácilmente con la fase previa de diseño lógico mediante un proceso conocido como proyección tecnológica.

diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (vi)



diseño basado en Celdas estándar

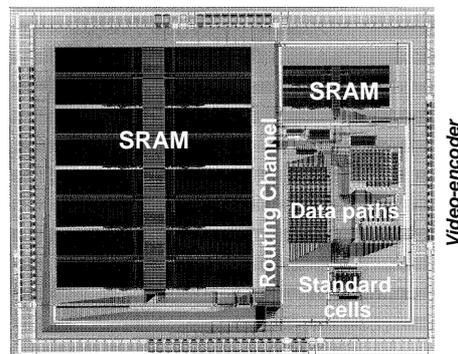


diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (vii)

Macro celdas (macro cells)

- ⊗ Existen circuitos, llamados macroceldas, cuyas implementaciones físicas tienen una estructura regular, fácilmente escalable y con un rendimiento óptimo:
 - Multiplicadores, sumadores, desplazadores, RAM, ROM, PLA ...
- ⊗ Su diseño puede ser fácilmente automatizado mediante los generadores de macroceldas.
 - a partir de los parámetros característicos del módulo, generan su diseño físico.



diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (viii)

Arrays Predifundidos

☒ Metodología de diseño:

- Todo diseño debe realizarse mediante la interconexión de una colección de celdas idénticas.
- Funcionalmente las celdas extremadamente simples (transistor, NAND o NOR).
- Las celdas ya están prefabricadas y dispuestas regularmente sobre el silicio.
- Durante la fase de metalización se decide el interconexiónado e incluso la función de las celdas.

☒ Gate array

- Cada celda está formada por un pequeño número de transistores cuyo interconexiónado local determina su función (este interconexiónado local puede o no estar prefabricado).
- Las celdas se disponen en filas dejando entre un espacio libre vertical y/o horizontal de tamaño fijo llamado canal.
- Las interconexiones entre celdas se trazan por el canal.

☒ Sea of gates

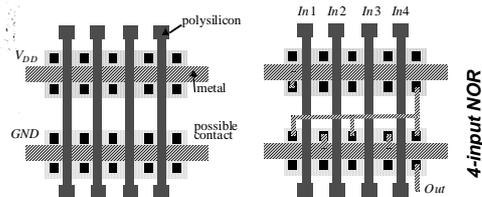
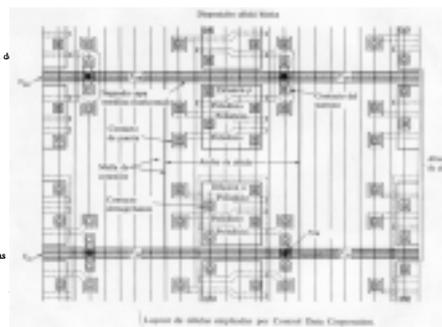
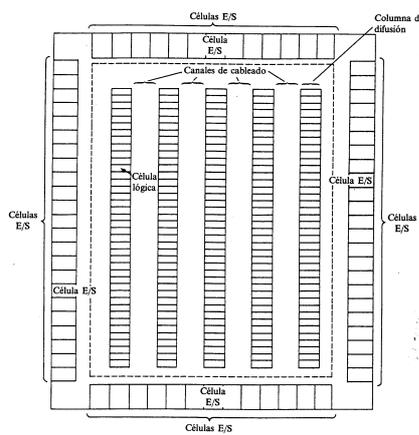
- Cada celda es un único transistor.
- Las celdas se disponen en filas sin dejar espacio libre entre ellas.
- Las interconexiones se trazan sobre celdas sin utilidad, o usando las propias celdas como elemento de interconexión.

☒ Características:

- Solamente la última fase de fabricación (metalización) es dependiente del diseño particular, por lo que las primeras fases son comunes y tienen un gran volumen de producción.
- Siempre queda un porcentaje de celdas sin usar.

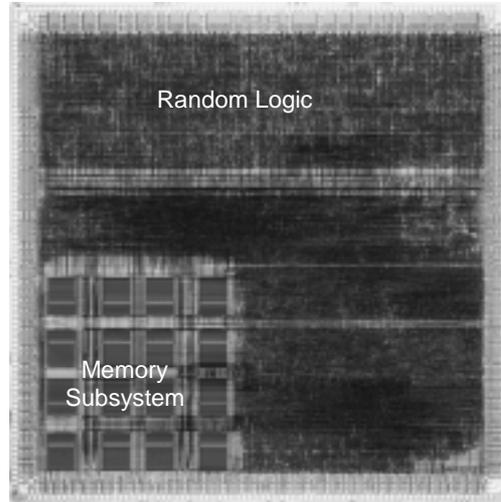
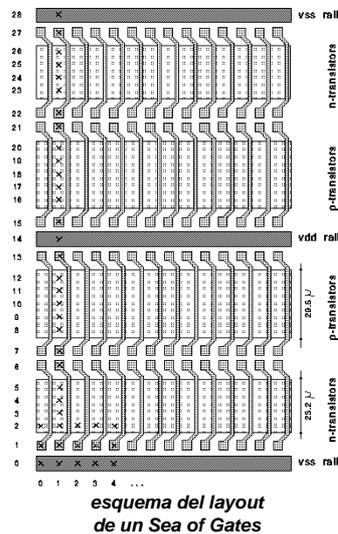
diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (ix)



diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (x)



LSI Logic LEA300K (0.6 mm CMOS)

diseño de circuitos integrados I

estilos de diseño microelectrónico (xi)

Arrays Precableados

☒ Circuitos prefabricados con funcionalidad programable: PLA, PROM, PAL, CPLD, FPGA

☒ FPGA:

- Un array de celdas regularmente dispuestas sobre el silicio cuya funcionalidad es programable, denominados CLB.
- Una colección de celdas de entrada/salida dispuestas perimetralmente cuyas características son programables, denominados IOB
- Una colección de bloques de interconexión, que bajo programación permiten conectar CLBs e IOBs entre sí.

☒ Metodología de diseño para FPGA:

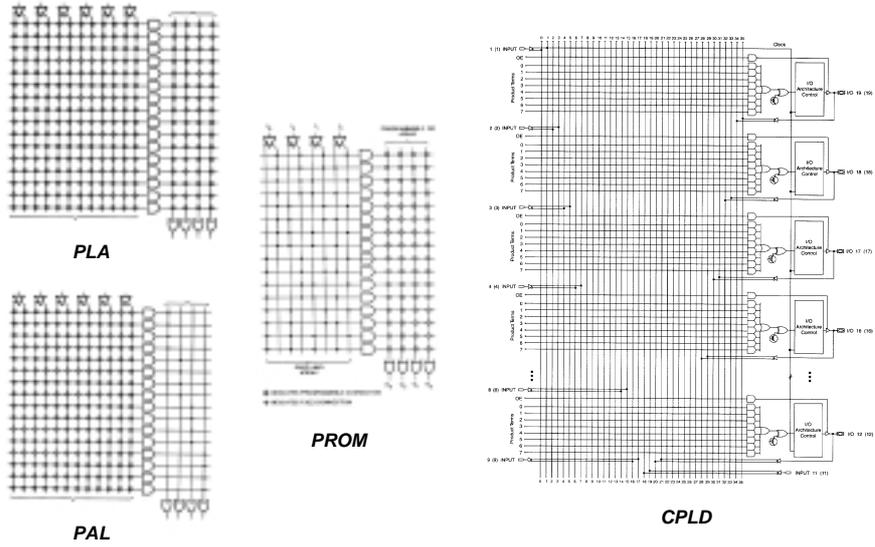
- Los diseños no se fabrican, sino que se realizan programando adecuadamente los CLBs, IOBs y bloques de interconexión.
- Cada bloque almacena su configuración (programa) en una SRAM, EPROM o en antifusibles. Dependiendo del método de almacenaje el diseño volcado sobre la FPGA será o no volátil.
- Funcionalmente las celdas son complejas y su grado de complejidad se denomina granularidad:
 - ✓ Granularidad fina (FPGAs): cualquier función de conmutación de 4-6 variables y varios FFs.
 - ✓ Granularidad gruesa (FIPSOCs, sistemas reconfigurables): ALUs y varios registros.

☒ Características:

- El diseño físico y la fabricación es independiente del diseño particular.
- Diseños complejos pueden no caber en una FPGA.

diseño de circuitos integrados I

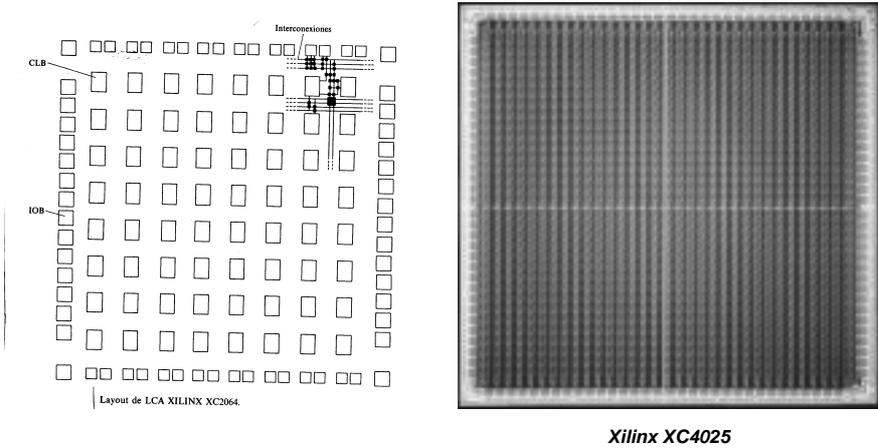
estilos de diseño microelectrónico (xii)



diseño de circuitos integrados I

-
-
-
-
-
-
-
-

estilos de diseño microelectrónico (xiii)

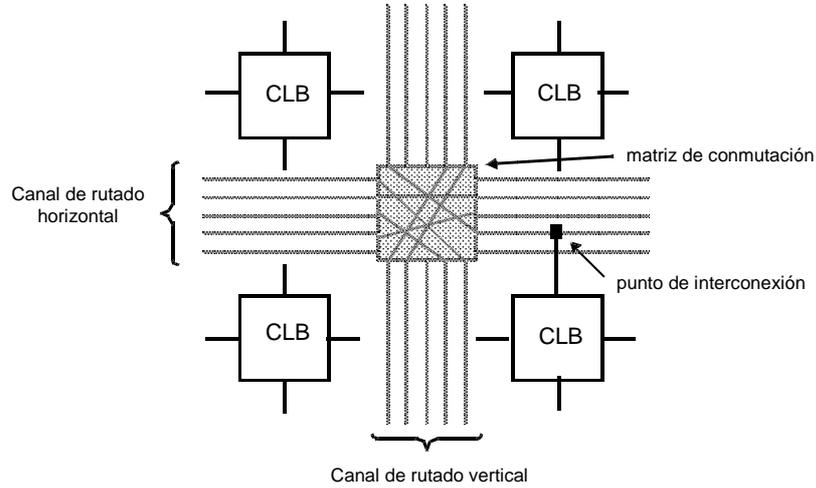


Xilinx XC4025

diseño de circuitos integrados I

-
-
-
-
-
-
-
-

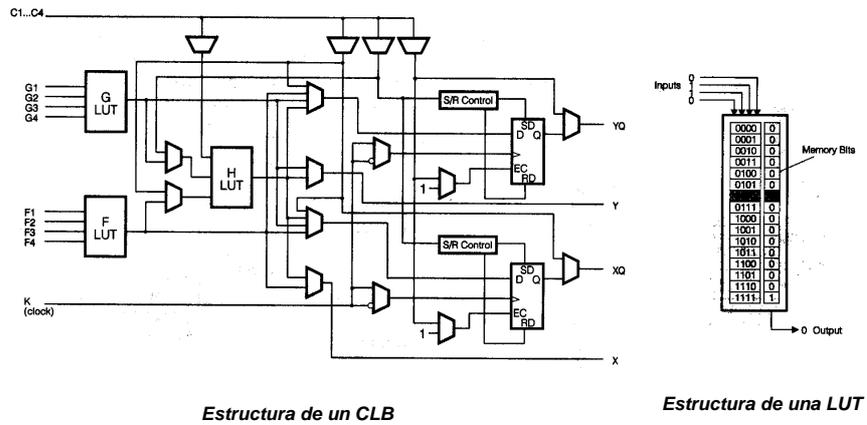
estilos de diseño microelectrónico (xiv)



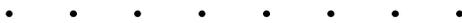
diseño de circuitos integrados I



estilos de diseño microelectrónico (xv)



diseño de circuitos integrados I



estilos de diseño microelectrónico (xvi)

	Full-custom	Basado en celdas	Arrays Predifundidos	Arrays Precableados
Tamaño de celda	Variable	Altura Fija	Fijo	Fijo
Tipo de celda	Variable	Variable	Fijo	Programable
Emplazamiento	Variable	En Filas	Fijo	Fijo
Interconexionado	Variable	Variable	Variable	Programable
Fiabilidad eléctrica	Media	Alta	Alta	Muy Alta
Densidad funcional	Muy Alta	Alta	Alta	Medio
Rendimiento funcional	Muy Alto	Alto	Alto	Medio
Flexibilidad en diseño físico	Muy Alta	Alta	Media	Ninguna
Tiempo de diseño físico	Muy Alto	Medio	Medio	Ninguno
Tiempo de fabricación	Medio	Medio	Bajo	Muy Bajo
Coste baja producción	Muy Alto	Alto	Alto	Bajo
Coste alta producción	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Alto

diseño de circuitos integrados I

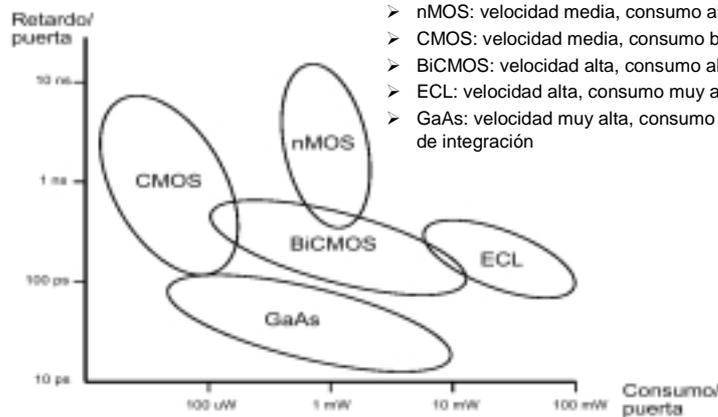
tecnologías VLSI

☒ Dentro del diseño VLSI existen múltiples procesos tecnológicos nacidos para hacer frente, junto a los estilos de diseño, a las diferentes necesidades de un producto.

➤ Velocidad, consumo, complejidad de diseño

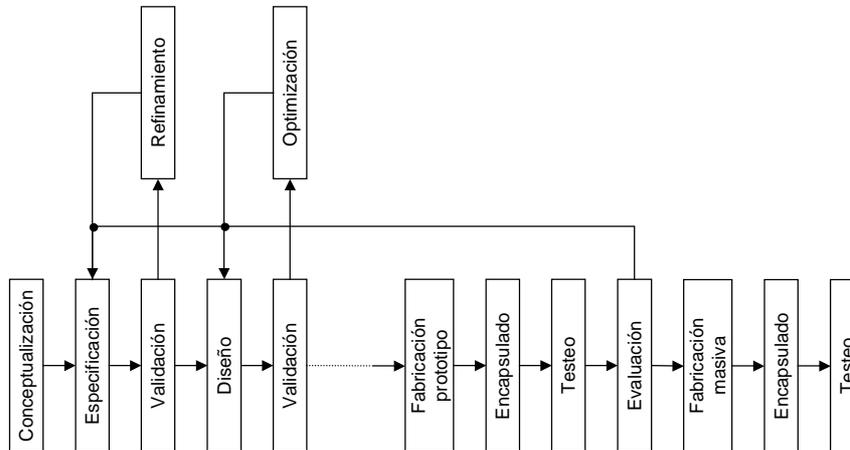
☒ En la actualidad las más comunes son:

- nMOS: velocidad media, consumo alto
- CMOS: velocidad media, consumo bajo
- BiCMOS: velocidad alta, consumo alto
- ECL: velocidad alta, consumo muy alto
- GaAs: velocidad muy alta, consumo alto, dificultad de integración



diseño de circuitos integrados I

ciclo de producción de un circuito VLSI (i)



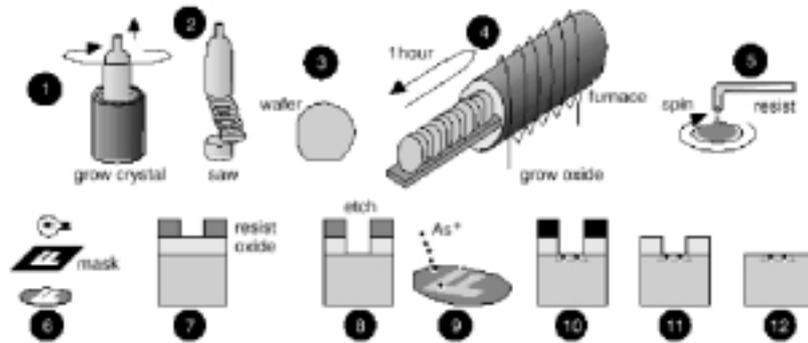
diseño de circuitos integrados I

ciclo de producción de un circuito VLSI (ii)

- ☒ **Conceptualización:** a partir de un concepto, concreción de los requisitos funcionales y no funcionales del circuito que va a implementarlo.
- ☒ **Especificación o modelado:** formalización de los anteriores requisitos en una representación uniforme y procesable por máquina.
- ☒ **Validación de modelos:** comprobación de que se ha especificado correctamente el concepto.
- ☒ **Refinamiento del modelo:** mejora de la calidad de una especificación.
- ☒ **Diseño o síntesis:** transformación de la especificación en una implementación.
- ☒ **Optimización:** mejora de la calidad de una implementación.
- ☒ **Validación de implementación:** comprobación de que se ha sintetizado correctamente la especificación (de aspectos funcionales y no funcionales).
- ☒ **Fabricación:**
 - preparación de la oblea (10 cm de diámetro).
 - deposición, implantación y difusión de materiales en la oblea según las máscaras resultado del proceso de síntesis física.
- ☒ **Encapsulado:**
 - cortado de la oblea en dados (dies).
 - descartado de dados defectuosos por imperfecciones del sustrato.
 - encapsulado del dado en un soporte plástico o cerámico.
 - soldado de los pads del dado con la patillas del chip.
 - sellado del chip.
- ☒ **Validación de la producción o testeo:** comprobación que se ha fabricado correctamente la implementación (de aspectos funcionales y no funcionales).

diseño de circuitos integrados I

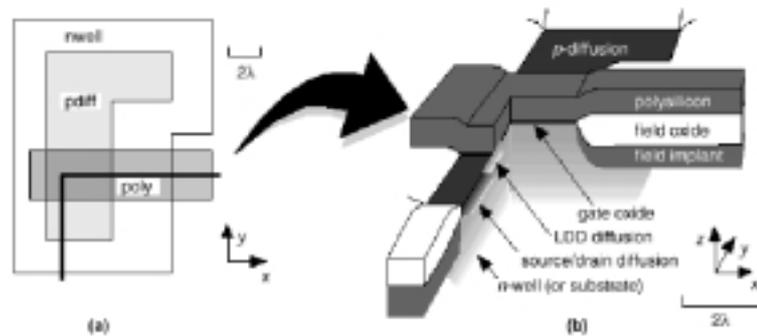
proceso de fabricación (i)



Fabricación de un circuito integrado

diseño de circuitos integrados I

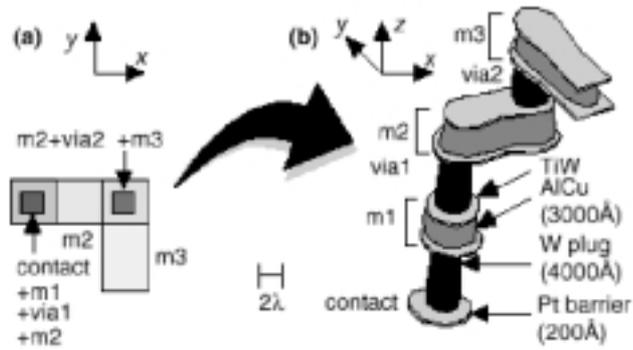
proceso de fabricación (ii)



Sección de un transistor

diseño de circuitos integrados I

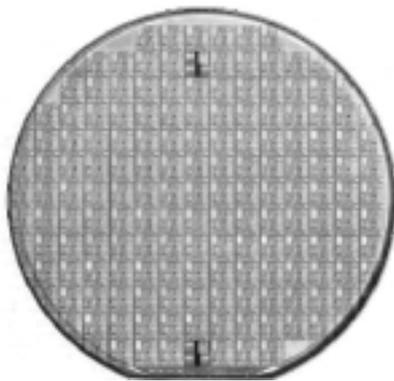
proceso de fabricación (iii)



Sección de una interconexión

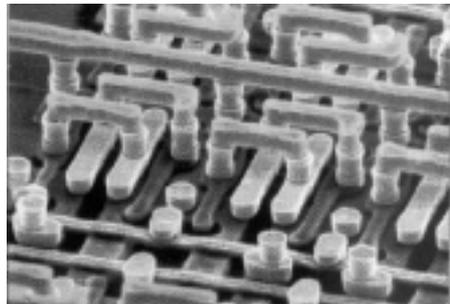
diseño de circuitos integrados I

proceso de fabricación (iv)



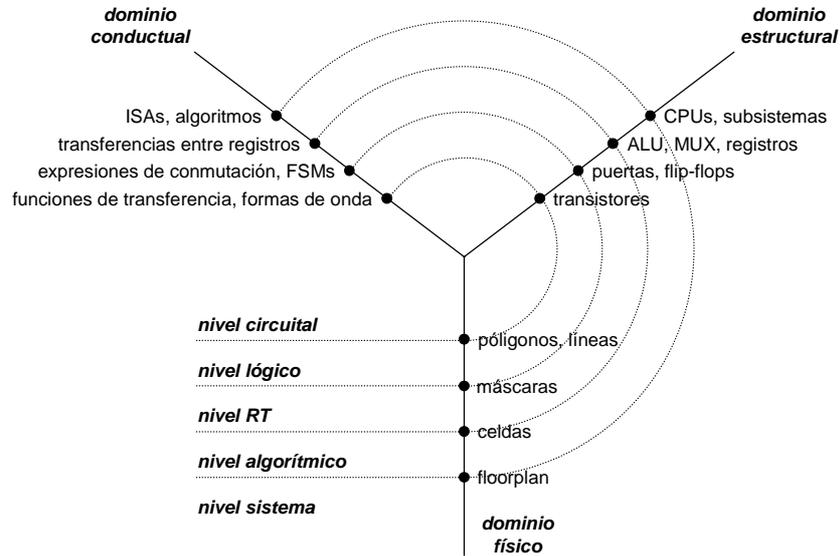
Oblea fabricada

Vista al microscopio electrónico de una porción de circuito integrado



diseño de circuitos integrados I

niveles y dominios de descripción (i)



diseño de circuitos integrados I

niveles y dominios de descripción (ii)

- ☒ Todo sistema digital puede ser descrito según tres ópticas distintas, denominadas **dominios de descripción**:
- **Dominio conductual**: un sistema es descrito por la función que realiza.
 - **Dominio estructural**: un sistema es descrito por la interconexión de los módulos que lo forman (netlist o esquemático).
 - **Dominio físico**: un sistema es descrito por la ubicación espacial y propiedades de los elementos reales que lo constituyen.
- ☒ El nivel de detalle con que se realice cualquiera de las anteriores descripciones, se denomina **nivel de abstracción**:
- **Nivel de circuito o de transistor**: el tiempo es continuo, las variables son magnitudes físicas continuas, no existen por separado las nociones alimentación y computación.
 - **Nivel lógico o de puertas**: el tiempo es continuo, las variables toman valores booleanos (0 ó 1), la alimentación se abstrae permaneciendo la noción de computación.
 - **Nivel RT**: el tiempo es discreto, las variables se agrupan en palabras que toman valores discretos, en la noción de computación se distinguen las nociones de control y procesamiento de datos.
 - **Nivel algorítmico**: el tiempo desaparece apareciendo la noción de dependencia, las variables se agrupan en estructuras abstractas, el control está estructurado.
 - **Nivel sistema**: desaparecen los detalles de los cálculos concretos e interesan las relaciones abstractas entre entre subsistemas, aparecen nociones de sincronización y protocolo.

diseño de circuitos integrados I

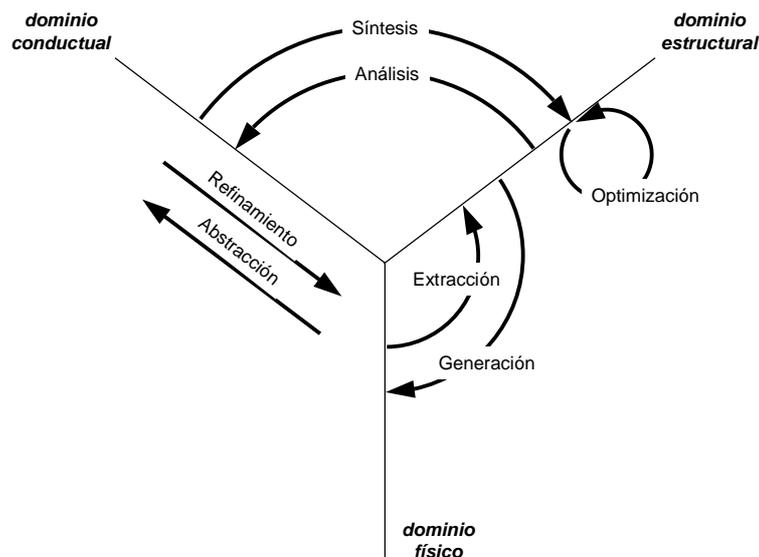
niveles y dominios de descripción (iii)

- ☒ Asimismo cada nivel de abstracción tiene sus propias medidas de calidad:
 - **Nivel de circuito o de transistor:** tiempos de subida/bajada, pendientes de transición, área real.
 - **Nivel lógico:** tiempos de conmutación, incertidumbre, skew, área equivalente.
 - **Nivel RT:** tiempo de ciclo, margen, puertas equivalentes.
 - **Nivel algorítmico:** latencia, cadencia de datos, número de módulos.
 - **Nivel sistema:** ancho de banda, MFLOPS.
- ☒ Las transiciones entre cada uno de los dominios y niveles de abstracción tienen los siguientes nombres:
 - **Síntesis:** todo proceso que genere una netlist a partir una descripción de su conducta (transición del dominio conductual al estructural).
 - **Análisis:** todo proceso que permita obtener la conducta de una netlist (transición del dominio estructural al conductual).
 - **Optimización:** todo proceso que modifique una descripción, sin cambiar de dominio ni de nivel de abstracción de manera que presente un rendimiento distinto.
 - **Generación:** todo proceso que genere una estructura física a partir de una netlist (transición del dominio estructural al físico).
 - **Extracción:** todo proceso que permita obtener la netlist de una estructura física (transición del dominio físico al estructural).
 - **Refinamiento:** todo proceso que disminuya el nivel de abstracción de una descripción sin cambiar de dominio.
 - **Abstracción:** todo proceso que aumente el nivel de abstracción de una descripción sin cambiar de dominio.

diseño de circuitos integrados I

• • • • • • • • • •

niveles y dominios de descripción (iv)



diseño de circuitos integrados I

• • • • • • • • • •