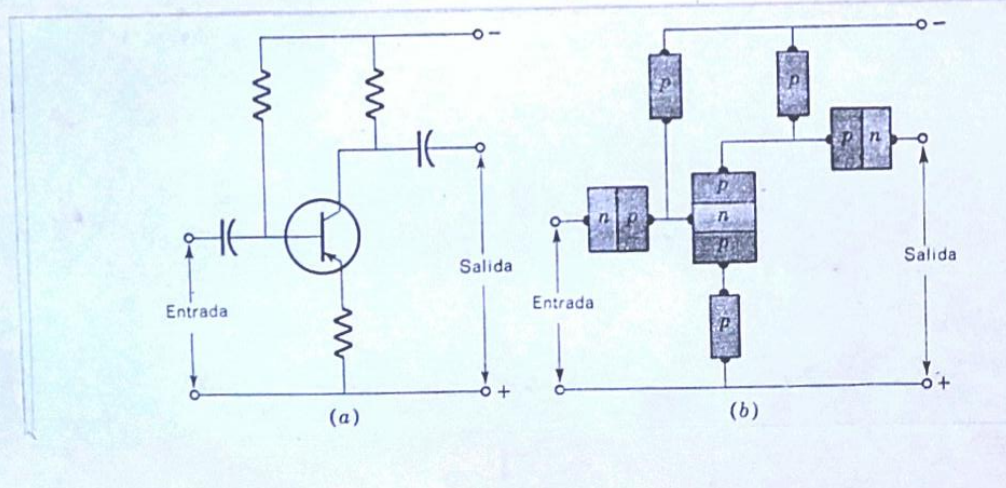


6-21 Circuitos integrados

Las propiedades de los semiconductores hacen posible crear todo un circuito electrónico dentro de un monocristal. Un tal *circuito integrado* permite montar redes electrónicas miniatura y reducir también el número de componentes individuales de circuitos electrónicos complicados. Esto es así porque un circuito integrado completo representa, en efecto, un solo componente.

La idea del circuito integrado puede ilustrarse muy fácilmente considerando un circuito amplificador de transistor rudimentario (fig. 6-42a). Los seis componentes individuales de este circuito suelen fijarse a un soporte común y conectarse mediante hilos metálicos. Como la resistencia de un pedazo de semiconductor se puede ajustar regulando el contenido de impureza, las resistencias del circuito pueden ser de la misma sustancia que el transistor, o sea, silicio. Análogamente, para los condensadores de entrada y salida puede utilizarse la capacidad de una unión *pn*. Así pues, el circuito puede conjuntarse por completo mediante piezas de silicio unidas por hilos metálicos (fig. 6-42b). En realidad, no es necesario conectar las piezas semiconductoras de igual tipo de conductibilidad mediante hilos, por lo que el circuito puede reducirse a tres componentes solamente (fig. 6-42c). Mediante una distribución geométrica bien pensada pueden combinarse en un sólo bloque semiconductor monocristalino, como en la figura 6-42d. El bloque contiene la estructura adecuada de regiones tipo *n*, tipo *p* e intrínsecas aislantes. Olvidando de momento que la figura 6-42d se ha desarrollado partiendo de un circuito ordinario, el resultado final parece un dispositivo semiconductor único. En cambio este único componente desempeña la función de todo un amplificador.

Este ejemplo elemental no hace más que presentar los rudimentos del método del circuito integrado. En realidad se han fabricado amplificadores completos, receptores de radio y subconjuntos calculadores. En todos estos circuitos hay que prestar especial atención a las capacidades parásitas y resistencias de fuga existentes entre las diferentes partes del cristal. Surgen del hecho de que todos los componentes del circuito están contenidos en un cristal semiconductor. Otro problema reside en la dificultad de crear inductancias mediante las técnicas del circuito integrado. Para salvar esta dificultad se utilizan frecuentemente redes *RC* de efectos análogos a los resonantes, tales como el puente de Wien o la doble T estudiados en el capítulo 3.



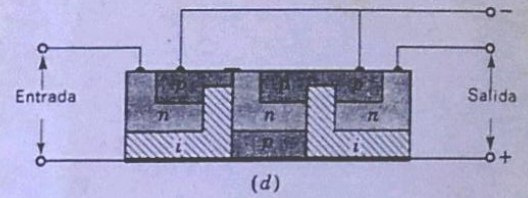
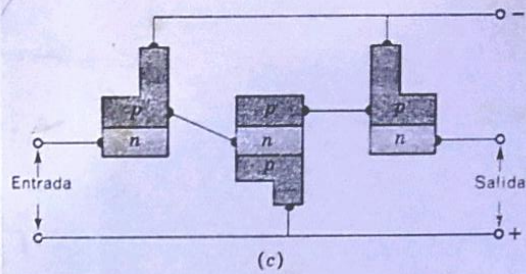


FIGURA 6-42 Desarrollo del circuito amplificador integrado a partir de un circuito ordinario de transistor.

Circuitos Integrados Digitales

Qué son los circuitos integrados

- Tecnologías de fabricación
- Breve historia
- Escalas de integración
- Cómo se fabrican los circuitos integrados
- Tendencias

Qué son los circuitos integrados

La principal razón para que los sistemas digitales hayan adquirido tanta popularidad y sean cada vez más sofisticados, compactos y económicos ha sido el alto grado de perfeccionamiento logrado en el desarrollo en masa de circuitos integrados.

Prácticamente, todos los equipos digitales modernos se fabrican usando circuitos integrados.

Un circuito integrado o CI es aquel en el cual todos los componentes, incluyendo transistores, diodos, resistencias, condensadores y alambres de conexión, se fabrican e interconectan completamente sobre un chip o pastilla semiconductor de silicio.

Una vez procesado, el chip se encierra en una cápsula plástica o de cerámica que contiene los pines de conexión a los circuitos externos.

Las cápsulas plásticas son más livianas pero las cerámicas son más resistentes y pueden trabajar a más altas temperaturas.

Una pastilla típica (figura 9) tiene aproximadamente de 2.5 a 6.5 mm de lado y 0.5 mm de espesor. Los chips digitales más pequeños contienen varios componentes sencillos como compuertas, inversores y flip-flops. Los más grandes contienen circuitos y sistemas completos como contadores, memorias, microprocesadores, etc.

La mayoría de los circuitos integrados digitales vienen en presentación tipo DIP (Dual In-line Package) o de doble hilera. El pin N° 1 se identifica mediante una ranura o un punto grabado en la parte

Pastilla de silicio

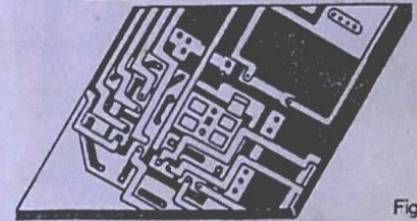


Fig. 9

se realiza en sentido contrario al de las manecillas del reloj. (figura 10).

Circuito integrado tipo DIP

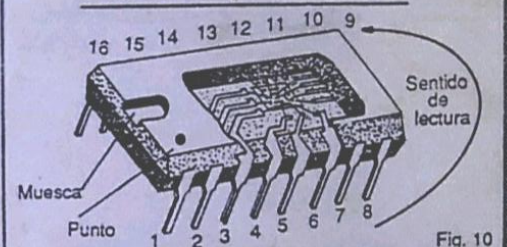
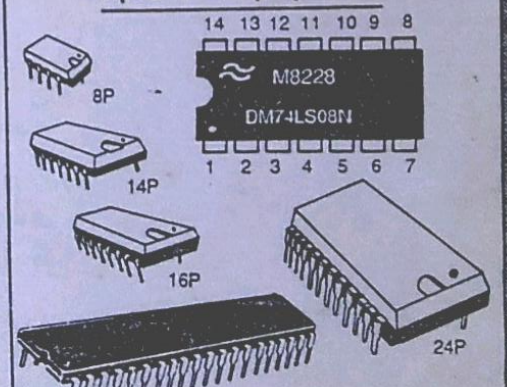


Fig. 10

Las configuraciones más comunes de los CI digitales tipo DIP son las de 8, 14, 16, 24, 40 y 64 pines. (figura 11). Estas dos últimas contienen generalmente microprocesadores y otras funciones digitales relativamente complejas.

Tipos de empaque DIP



La cápsula trae impresa la información respecto al fabricante, la referencia del dispositivo y la fecha de fabricación. Cada fabricante de circuitos integrados (National, Texas, Fairchild, Motorola, etc.) se identifica mediante un logotipo distintivo (figura 12). La referencia (SN74LS73, CD4048B, etc.) designa específicamente al dispositivo.



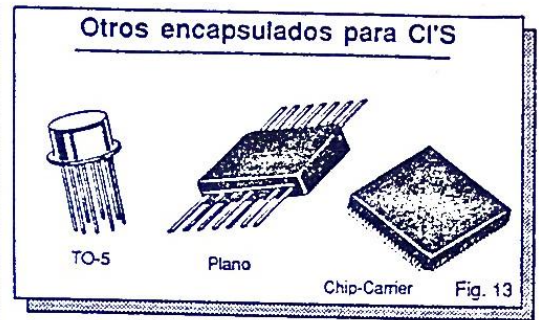
El código de la fecha informa cuando fue manufacturado el chip. Las dos primeras cifras indican el año y las dos últimas se refieren al mes o semana de fabricación. Por ejemplo, "8307" significa la séptima semana de 1983.

En la presentación tipo DIP, los pines de acceso están espaciados entre sí 2.5 mm. Para efectos de montaje experimental los CI pueden insertarse en un protoboard o tablero sin soldaduras.

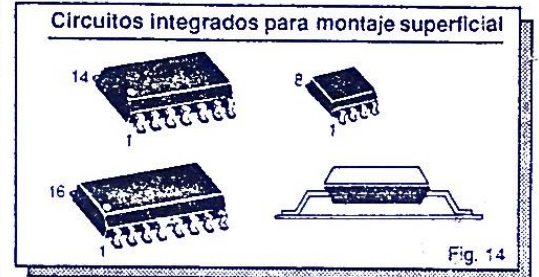
Para los montajes definitivos en circuito impreso pueden estar soldados directamente al cobre o montados sobre una base o "socket". La utilización de bases simplifica la instalación durante el ensamble y el remplazo en caso de daño.

Además del tipo DIP, existen otras presentaciones comunes de los circuitos integrados digitales como la cápsula metálica (TO-5), la plana y la "chip carrier" (figura 13). La TO-5, aunque es muy resistente, está siendo remplazada en muchos casos por empaques plásticos, que son más livianos.

Actualmente se dispone de una gran variedad de circuitos integrados digitales que utilizan cápsulas



SMT o de montaje superficial (figura 14). Los chips SMT son casi 4 veces más pequeños que los DIP equivalentes y no requieren de perforaciones para su instalación: se sueldan directamente a los trazos de circuito impreso.



La miniaturización introducida por la tecnología de montaje superficial o SMT (Surface-Mount Technology) es la que ha permitido, por ejemplo, obtener calculadoras del tamaño de una tarjeta de crédito.

Este tipo de encapsulado es cada vez más popular y en el futuro será uno de los más utilizados por la sencillez de su manufactura y otras ventajas, especialmente económicas.

Tecnologías de fabricación

Los circuitos integrados digitales se pueden clasificar en dos grandes grupos de acuerdo al tipo de transistores utilizados para implementar sus funciones internas de conmutación: bipolares y MOS.

Los circuitos integrados bipolares se fabrican con transistores bipolares tipo NPN y PNP y los de tipo MOS utilizan MOSFETs (transistores de efecto de campo de compuerta aislada).

Dentro de cada categoría, los fabricantes han desarrollado una amplia variedad de familias lógicas de circuitos integrados tanto MOS como bipolares.

Una familia lógica es un grupo de chips o módulos funcionales, fabricados de acuerdo a la misma tecnología y eléctricamente compatibles, es decir se pueden interconectar directamente entre sí para configurar cualquier tipo de sistema digital.

Algunas veces es posible interconectar circuitos de dos familias diferentes adaptando los niveles de voltaje entre ellos mediante interfaces apropiadas.

Dependiendo de cómo se interconecten estos bloques lógicos, usted puede construir un computador, una calculadora, un sintetizador de música, un multímetro digital, un contador de eventos, un sistema de control industrial y miles más de posibilidades, limitadas únicamente por su imaginación.

Las familias bipolares más conocidas son la RTL (lógica de resistor a transistor), la DTL (lógica de diodo a transistor), la TTL (lógica de transistor a transistor), la ECL (lógica de emisor acoplado) y la I²L (lógica de inyección integrada).

Las dos primeras familias son completamente obsoletas en la actualidad pero fueron muy populares en los inicios de la electrónica digital.

Dentro de las familias bipolares, los circuitos más utilizados son los TTL. La familia ECL se utiliza principalmente en aplicaciones de muy alta frecuencia y la I²L en aplicaciones de control. Los dispositivos de esta última familia son generalmente *híbridos*, es decir realizan operaciones análogas y digitales en una misma pastilla.

Las familias MOS más conocidas son la CMOS (lógica de transistores MOSFET complementarios), la PMOS (lógica de transistores MOSFET canal P) y la NMOS (lógica de transistores MOSFET canal N). Los dispositivos de estas familias se caracterizan por su bajo consumo de potencia y su alta capacidad de integración.

Dentro de la familia MOS, los circuitos más utilizados son los CMOS. Las tecnologías PMOS y NMOS se utilizan principalmente en la fabricación de microprocesadores, memorias, calculadoras, etc.

Los circuitos integrados digitales TTL se caracterizan por su bajo costo, su alta velocidad, su moderada inmunidad al ruido y otros factores que expondremos más adelante.

La serie más popular de esta familia es la 74XX, constituida por los chips cuya referencia comienza por 74 como el 7400, 7404, 7447, 74LS04, 74L93, 74S181, 74ALS1035, etc.

Los circuitos integrados CMOS se caracterizan, entre otras cosas, por su amplio rango de voltajes de operación, su bajo consumo de corriente y su alta inmunidad al ruido.

Una de las series más populares de esta familia es la 40XXB, constituida por los chips cuya referencia comienza por 40 ó 45 y termina en B como 4017B, 40163B, 4522B, 4543B, etc.

El cuadro de la figura 15 resume las dos grandes familias (bipolar y MOS) de circuitos integrados digitales y sus correspondientes subdivisiones.

Breve historia

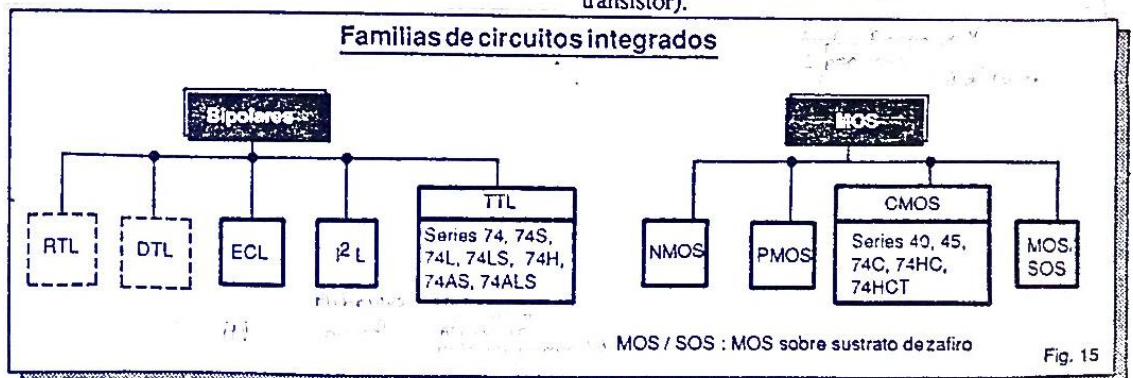
El primer circuito integrado digital conocido fue concebido por Jack Kilby de Texas Instruments en 1959, más de una década después de la invención del transistor en los Laboratorios Bell (1947). Se trataba de un flip-flop desarrollado enteramente sobre un sustrato de germanio.

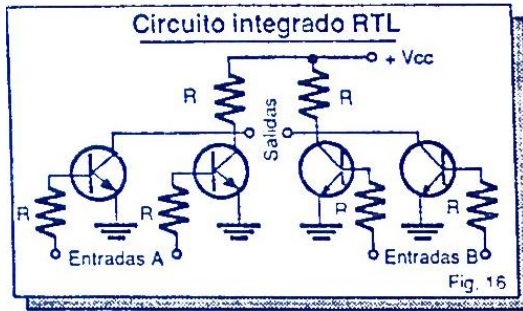
El flip-flop de Kilby contenía apenas 4 transistores, una cifra insignificante comparada con los casi 1.000.000 (!Un millón!) de transistores de un microprocesador moderno, como el 68030 de Motorola o el 80486 de Intel.

Veamos entonces, a grandes rasgos, cómo ha evolucionado la tecnología de los circuitos integrados desde sus comienzos hasta nuestros días.

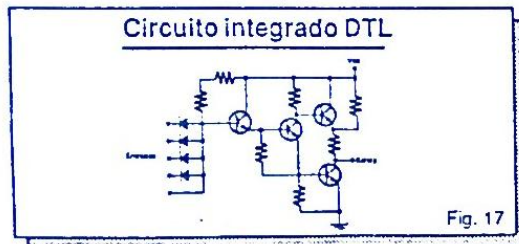
La primera familia de circuitos integrados digitales comercialmente disponible fue la serie 900 de Fairchild Semiconductor, introducida en 1961. Los chips de esta familia, denominada RTL, operaban a 3.2 V y utilizaban internamente resistencias y transistores para realizar operaciones lógicas.

En la figura 16 se muestra el circuito interno de un dispositivo RTL típico. RTL es un acrónimo de Resistor-Transistor Logic (lógica de resistencia a transistor).



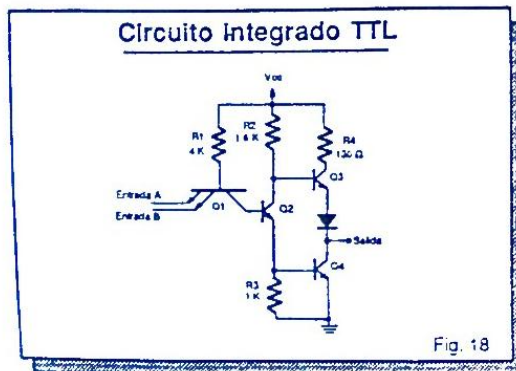


La familia RTL dio paso a otra familia de circuitos integrados digitales construidos a base de diodos y transistores. A esta nueva familia se le denominó DTL, un acrónimo de Diode-Transistor Logic (lógica de diodo a transistor). En la figura 17 se muestra el circuito de un dispositivo DTL típico.



La siguiente familia en aparecer (1962) fue la TTL, que utilizaba sólo transistores y era más rápida que sus predecesoras. TTL es un acrónimo de Transistor-Transistor Logic (lógica de transistor a transistor). Los primeros trabajos en TTL fueron realizados por James Buie de Pacific Semiconductors (ahora subsidiaria de TRW).

Con el tiempo se impuso en el mercado la serie TTL 74XX, lanzada originalmente por Texas Instruments, la cual sigue siendo una de las más utilizadas y económicas. En la figura 18 se muestra el circuito de un dispositivo TTL típico.

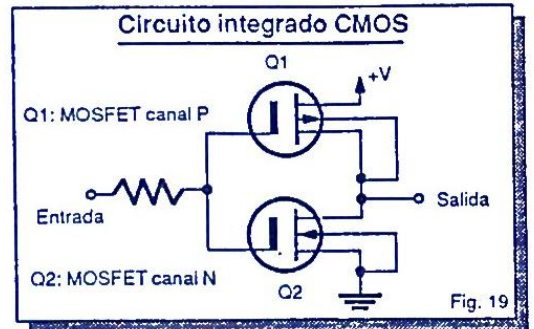


Mientras se desarrollaba la tecnología bipolar o TTL, algunos fabricantes, especialmente RCA, concentraban sus esfuerzos en los transistores de efecto de campo (FETs) y sus aplicaciones. En 1957, John Wallmark de RCA patentó el FET.

En 1962, Steven Hofstein y Frederic Heiman, también de RCA, desarrollaron el transistor MOS o MOSFET (FET de compuerta aislada). A finales de este año, Hofstein y Heiman lograron fabricar el primer circuito integrado MOS, el cual contenía 16 transistores MOSFET distribuidos sobre una pastilla de silicio de 0.063 mm de lado.

Para 1963, RCA ya producía chips que contenían cientos de transistores MOSFET en una área muy reducida. El desarrollo del transistor MOS y su facilidad de integración permitió el surgimiento de familias como la MOS de canal P (PMOS), la MOS de canal N (NMOS) y la MOS complementaria (CMOS), todas de gran aceptación.

Dentro de las familias CMOS se impuso con el tiempo la serie 40XX, lanzada originalmente por la RCA, una de las más populares en la actualidad junto con la serie 74CXX de National. En la figura 19 se muestra el circuito interno de un dispositivo CMOS típico.



A pesar de que los circuitos integrados MOS prometían ser más simples de procesar, consumían menos potencia y permitían mayores niveles de integración que los bipolares, existían serios problemas en su fabricación, especialmente su extrema sensibilidad a la electricidad estática (ESD).

Además, los dispositivos MOS eran más lentos que los bipolares y requerían diferentes fuentes de alimentación. Debido a estos y otros inconvenientes, la tecnología MOS no tuvo mucha aceptación en sus comienzos.

Durante la mayor parte de los años 60's, sólo dos compañías, General Microelectronics y General Instruments producían chips MOS. Incluso RCA, pionero de la tecnología MOS, desplazó la mayor parte de su interés hacia la tecnología bipolar, que era económicamente más rentable.

Sin embargo, la tecnología MOS resurgió con fuerza en 1967 cuando Fairchild lanzó al mercado la primera memoria MOS (una ROM de 64 bits) y se consolidó definitivamente en junio de 1971 con la introducción, por parte de Intel Corporation, del primer microprocesador (el 4004, de 4 bits).

Posterioros avances en los procesos de fabricación de los circuitos integrados aceleraron el crecimiento de una industria ya en expansión. En 1972, Mostek Corporation lanza la primera memoria de alta densidad (una RAM dinámica de 1024 bits) e Intel ofrece los primer microprocesadores de 8 bits (el 8008 y el 8080).

En los años siguientes, otras industrias como National Semiconductor, Rockwell, AMI, Signetics Western Digital, RCA, Motorola y Zilog producen sus propios microprocesadores (1802, TMS1000, 6800, Z80, 8048, 8086, Z8000, 68000, etc.).

Para mediados de la década de los 70's, existían cerca de 40 microprocesadores diferentes en el mercado. Actualmente, la cifra de microprocesadores disponibles es muy alta.

Escalas de integración

De acuerdo a su complejidad, los circuitos integrados digitales se clasifican en 4 categorías básicas llamadas SSI, MSI, LSI y VLSI. Esta clasificación se fundamenta en la cantidad de compuertas utilizadas para implementar la función propia del chip. Como sabemos, las compuertas son los bloques constructivos básicos de todos los circuitos digitales.

SSI significa Small Scale Integration (integración en pequeña escala) y comprende los chips que contienen menos de 13 compuertas. Ejemplos: compuertas y flip-flops. Los CI SSI se fabrican principalmente empleando tecnologías TTL, CMOS y ECL. Los primeros circuitos integrados eran SSI.

MSI significa Medium Scale Integration (integración en mediana escala) y comprende los chips que contienen de 13 a 100 compuertas. Ejemplos: codificadores, registros, contadores, multiplexores, decodificadores, demultiplexores. Los CI MSI se fabrican empleando tecnologías TTL, CMOS y ECL.

LSI significa Large Scale Integration (integración en alta escala) y comprende los chips que contienen de 100 a 1000 compuertas. Ejemplos: memorias, unidades aritméticas y lógicas (ALU's), microprocesadores de 8 y 16 bits. Los CI LSI se fabrican principalmente empleando tecnologías I²L, NMOS y PMOS.

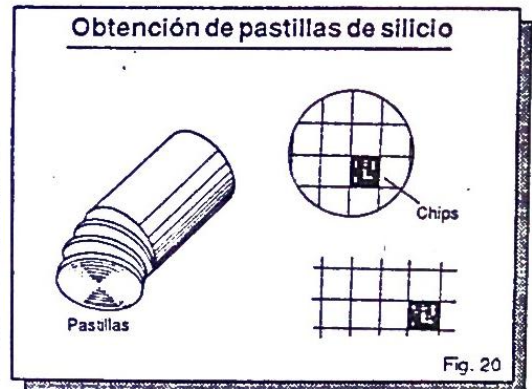
VLSI significa Very Large Scale Integration (integración en muy alta escala) y comprende los chips que contienen más de 1000 compuertas. Ejemplos: microprocesadores de 32 bits, microcontroladores, sistemas de adquisición de datos. Los CI VLSI se fabrican también empleando tecnologías I²L, NMOS Y PMOS.

Cómo se fabrican los circuitos integrados

Prácticamente, todos los CI digitales disponibles en la actualidad se fabrican a partir de pastillas de silicio, aunque están apareciendo otras tecnologías como la basada en el arseniuro de galio (GaAs). El procesamiento del silicio para obtener CIs o chips es relativamente complicado pero intentaremos describirlo de una forma sencilla.

El silicio utilizado para la fabricación de chips es de una pureza del orden del 99.9999999%; y se produce químicamente a partir del bióxido de silicio (SiO₂), el principal constituyente de la arena. Una vez sintetizado, el silicio se funde en una atmósfera inerte y se cristaliza en forma de barras cilíndricas de hasta 10 cm de diámetro y 1 m de largo.

Cada barra se corta en pastillas de 0.25 a 0.50 mm de espesor y las superficies de estas últimas se pulen hasta quedar brillantes (figura 20). Dependiendo de su tamaño, se obtienen varios cientos de circuitos idénticos (chips) sobre ambas superficies mediante un proceso llamado *planar*, el mismo utilizado para producir transistores en masa.



Para fabricar un chip, las pastillas de silicio se procesan primero para hacer transistores. Una pastilla de silicio por sí misma es aislante y no conduce corriente. Los transistores se crean agregando impurezas como fósforo o arsénico a determinadas regiones de la pastilla. Las conexiones se realizan a través de líneas metálicas.

El proceso de agregado de impurezas se denomina *dopado*. Los transistores y las líneas metálicas de contacto se denominan *rasgos*. El dopado se realiza por *difusión* a altas temperaturas, exponiendo la pastilla al vapor de las impurezas para que sus átomos penetren selectivamente en el silicio.

Cada rasgo se forma sobre la pastilla rociando en las regiones seleccionadas un químico protector sensible a la luz llamado *photoresist*, el cual forma