



**Universidad Autónoma
de Baja California**



Escuela de Ingeniería Ensenada

PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN MICROPROCESADOR

**GUIÓN DE LA UNIDAD AUDIOVISUAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

PRESENTA

Santiago Alvarez Meléndez

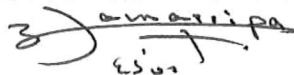
Ensenada B. C., Junio de 1998

Universidad Autónoma de Baja California
Escuela de Ingeniería Ensenada

**PROCESO DE FABRICACIÓN
DE UN MICROPROCESADOR**

**GUIÓN DE LA UNIDAD AUDIOVISUAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA
PRESENTA
Santiago Alvarez Meléndez**

APROBADA POR:



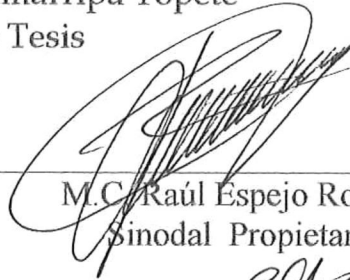
M.C. José de Jesús Zamarripa Topete
Director de Tesis



M.C. Humberto Cervantes de Avila
Sinodal Propietario



M.C. Benjamin Ramírez Durán
Sinodal Propietario



M.C. Raúl Espejo Rodarte
Sinodal Propietario



Ing. Luz Evelyn López Chico
Sinodal Propietario

Ensenada B. C., Junio de 1998

A Elu y Alex
A Mis Padres
A Mis Maestros

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
i.- Índice de Contenido	III
ii.- Prólogo.	1
I.- Introducción.....	3
1.1.-La Influencia de las Computadoras en la Sociedad Moderna.....	4
1.2.- La Revolución de las PC's.....	6
1.3.- IBM y su Participación.....	8
1.4.- El Transistor.....	11
1.5.- Breve Historia del Transistor.....	12
1.6.- El Transistor de Silicio.....	15
1.7.- Tecnología del Estado Sólido.....	17
1.8.- La Unión P-N	19
1.9.- El Transistor NPN	21
1.10.- El Transistor y su Influencia en la Industria Electrónica.....	22
1.11.- Definición de Micra.....	22
1.12.- Definición de Microprocesador	23
1.13.- El Circuito Integrado.....	23
1.14.- Referencias.....	27
II.- Tecnología de Fabricación de los Circuitos Integrados.....	28
2.1.- Introducción.....	29
2.1.1.- ¿Porqué Silicio?.....	30
2.1.2.- Resumen del Proceso.....	35
2.2.- Preparación del Material.....	38
2.2.1.- Extracción y Preparación del Silicio.....	38
2.2.2.- Proceso de Czochralski.....	42
2.2.3.- Generación de la Oblea.....	48
2.3.- Etapa de Diseño.....	51
2.3.1.- ¿Qué es VHDL?.....	51
2.3.2.- Breve Historia de VHDL.....	52
2.3.3.- El estándar IEEE 1076.1987.....	52
2.3.4.- ¿Cómo es Usado VHDL?.....	53
2.3.5.- Resumen del proceso de Diseño.....	54
2.4.- Procesamiento de la Oblea	56
2.4.1.- Introducción.....	56
2.4.2.- La Tecnología Planar.....	56
2.4.3.- Crecimiento Epitaxial.....	57
2.4.4.- Difusión en el Estado Sólido.....	60
2.4.5.- Oxidación.....	62

2.4.6.- Oxidación Térmica.....	63
2.5.- Proceso Fotolitográfico.....	66
2.5.1.- Grabado Químico.....	67
2.5.2.- Defectos y Limitaciones de la Fotolitografía.....	67
2.5.3.- Eliminación Selectiva de Óxido.....	68
2.5.4.- Difusión.....	69
2.5.5.- Implantación de Iones.....	69
2.5.6.- Implantación de Iones vs. Difusión.....	70
2.6.- Resumen del Proceso.....	71
2.7.- Metalización.....	74
2.7.1.- Contactos Óhmicos	74
2.7.2.- Pasivación Post-metálica.....	75
2.8.- Comprobación y Ensamblado.....	76
2.8.1.- Comprobación.....	76
2.8.2.- Separación de los Chips.....	76
2.9.- Consideraciones Sobre el Rendimiento de Producción.....	78
2.10.- Referencias.....	80
III .- Guión De La Unidad Audiovisual	82
3.1- Referencias.....	95
IV .- ANEXOS	97
4.1.- Cuestionario Sobre el contenido del Video.....	98
4.2.- Temas de Interés: Lecturas Selectas y Direcciones en Internet.....	99
4.3.- Página de Texas Instruments con la Historia del Transistor.....	102
4.4.- Roadmap de los Productos PowerMac de Motorola.....	104
4.5.- El Pentium-II de la compañía Intel.....	107
4.6.- IBM Rompe la Barrera del Microprocesador de 1000 MHz.....	110

Índice de Figuras.

Figura 1.1.- Steve Jobs, Presidente de Apple Co.	8
Figura 1.2.- William Shockley y un diagrama de un transistor.....	12
Figura 1.3.- Fotografía del transistor de punto de contacto.....	13
Figura 1.4.- Diagrama de un transistor npn.....	21
Figura 1.5.- Fotografía de un microprocesador Pentium – Pro	24
Figura 2.1.- Capa de dióxido de silicio sobre un sustrato.	31
Figura 2.1.1.- Diagrama a bloques del proceso de fabricación.	33
Figura 2.1.2.- Tipos de resist.....	36
Figura 2.2.- Pedazo de roca con cuarzita.....	39
Figura 2.3.- Contenedor con silicio purificado.....	42
Figura 2.4.- Lingote de silicio terminado	43
Figura 2.5.- Vista interior de un horno de Czochralski.....	44

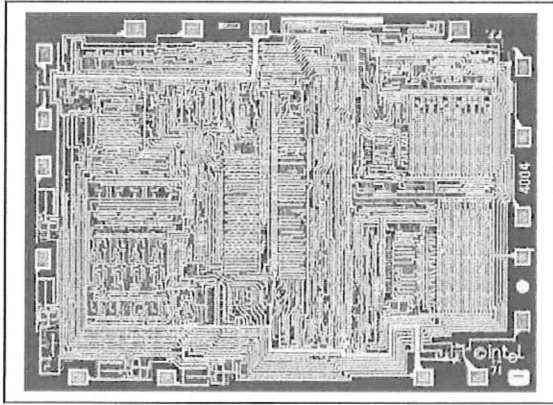
Figura 2.6.- Semilla siendo extraída.....	45
Figura 2.7.- Lingotes de silicio de 2 metros.....	46
Figura 2.8.- Método de zona flotante.....	47
Figura 2.9.- Diagrama de una cortadora.....	48
Figura 2.10.- Movimientos de pulido	49
Figura 2.11.- Proceso de grabado químico.....	50
Figura 2.12.- Diagram de un horno de difusión.....	58
Figura 2.13.- Interior de un horno de difusión.....	60
Figura 2.14.- Frontera n-p	61
Figura 2.15.- Formación de una unión npn.....	61

Índice de tablas

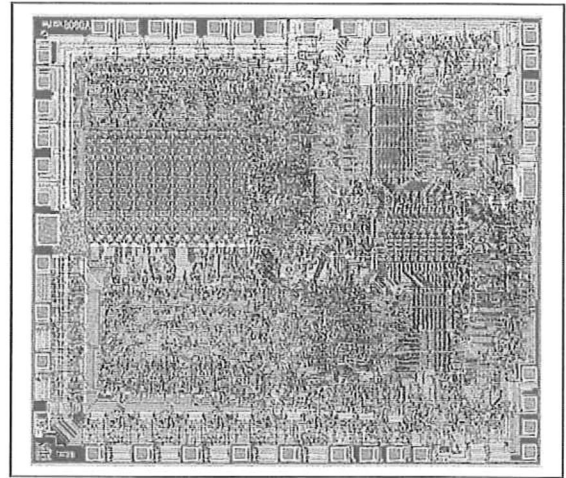
Tabla 2.1.- Propiedades del silicio.....	40
Tabla 2.2.- Comparación de los procesos de oxidación.....	64
Tabla 2.3.- Tipos de dopantes para la fabricación de chips.....	69

MICROPROCESADORES

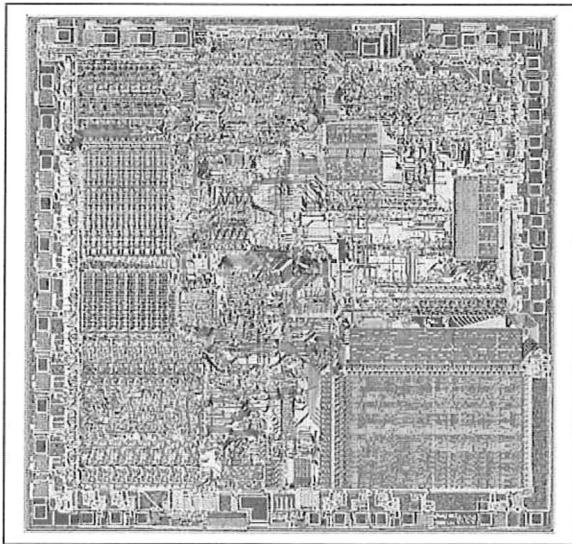
Imágenes Del Interior De Algunos De Microprocesadores Antes De Encapsularlos (Dados)



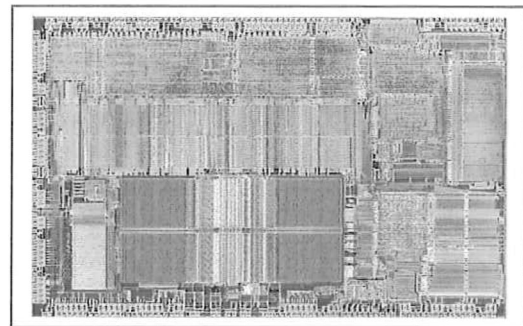
1.- 4004



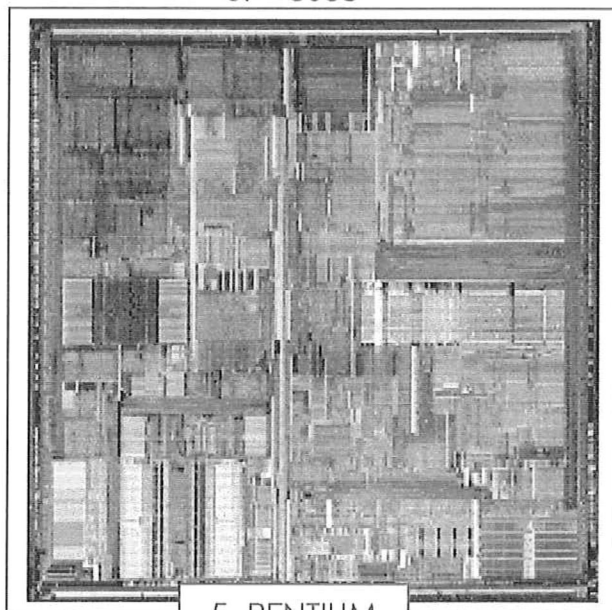
2.- 8080



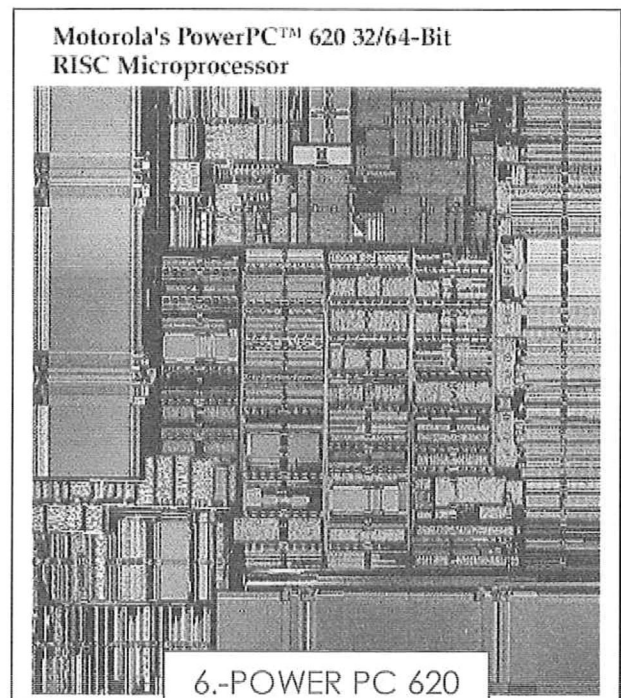
3.- 8088



4.- 80486

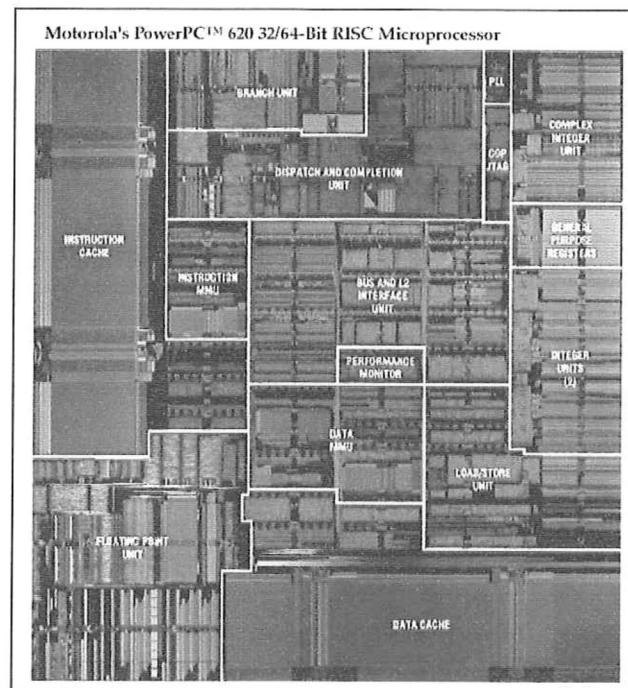


5.-PENTIUM

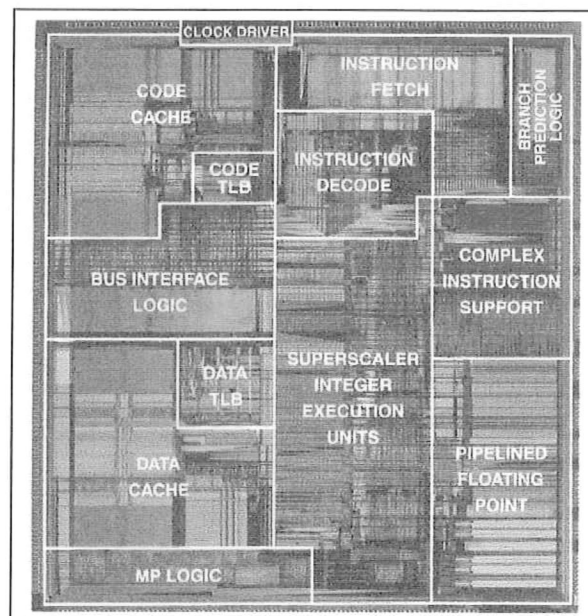


6.-POWER PC 620

Imágenes de los segmentos que componen a un microprocesador
(el texto viene originalmente en inglés).



7.- Microprocesador PowerPC® 620 de MOTOROLA



8.- Microprocesador PentiumPro® de INTEL

(Figuras 1,2,3,4,5 y 8: Cortesía de Intel Corp. de su página en internet www.intel.com,
figuras 6 y 7 cortesía de Motorola Corp. de su página en internet www.mot.com).

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

PRÓLOGO

En principio, éste trabajo está dedicado a ser utilizado como material de apoyo en las materias de *Electrónica Digital I* y *Electrónica Digital II*, impartidas en el programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela de Ingeniería Ensenada, aunque se espera que sea de utilidad para estudiantes y maestros, tanto de otras materias como de otras carreras.

El presente trabajo se desarrolló con el fin de contribuir a disminuir la falta de información disponible que, sobre el tema de la Fabricación de Microprocesadores, se da en nuestra Unidad Académica.

Por su contenido tan genérico, el video puede ser referenciado como el proceso mediante el cual es fabricado un chip, no importando su aplicación, ya sea un microprocesador, una memoria, un microcontrolador ó un ASIC (por sus siglas en inglés: Application Specific Integrated Circuit), aunque por ser una de las partes principales de las computadoras, el trabajo marca cierta preferencia por mencionar a los microprocesadores, tanto en el video como en el presente manual.

De hecho, tanto la introducción como los anexos que se presentan al final de este manual, versan principalmente sobre el pasado, presente y futuro de dichos circuitos integrados, mientras que en el resto del manual se discuten las tecnologías de fabricación.

Durante el transcurso del trabajo tanto audiovisual como escrito, se manejan indistintamente los términos **chip**, **circuito integrado** o **microprocesador**, los cuales son exactamente lo mismo para efectos de este trabajo, aunque en sentido estricto el Microprocesador es uno de los muchos circuitos integrados o chips que existen.

El presente trabajo está elaborado intencionalmente con un lenguaje sencillo y sin muchos tecnicismos para que, de esta manera, sea más fácil la comprensión del Proceso. De cada paso del mismo, se deriva una área de estudio (del Silicio: *Metalurgia* y *Física de Semiconductores*; de Diseño: *Lenguajes VHDL*; de Fotolitografía: *Óptica* y *Procesos Químicos de Develado*, y así para otras etapas).

Al final del guión escrito se listan algunas referencias tales como libros o direcciones en Internet donde el estudiante (o maestro) interesado puede obtener mayor información y/o profundizar en los temas de su particular interés.

Durante la Introducción se hace una breve retrospectiva al origen de las computadoras tal como las conocemos hoy en día. Así mismo, en este capítulo, se hace un intento por llevar al lector del presente manual de lo general a lo particular en el conocimiento de los circuitos integrados, es decir, iniciamos con la influencia de las computadoras en la sociedad contemporánea como un producto de consumo, para terminar con la parte fundamental de los circuitos integrados: La unión N-P-N.

En el capítulo I se presenta la historia y antecedentes de la tecnología de los chips.

En el capítulo II se revisan las tecnologías con las que se lleva a cabo la fabricación de un circuito integrado, iniciando con la extracción del silicio y su posterior tratamiento hasta llegar al empaquetado del producto final.

En el capítulo III se encuentra el contenido o narración del video. Éste contiene los tiempos de cada sección en que fué dividido (por temas), como son la etapa de extracción, la etapa fotolitográfica, hasta llegar a la de prueba y empaquetado final.

Al final de este manual se encuentra material (anexos) que se consideró de importancia, así como puntos de referencia de las fuentes de donde se extrajo material informativo.

Se incluye un cuestionario que el maestro de la clase podrá aplicar a sus alumnos, para evaluar el aprendizaje obtenido durante el video. Este cuestionario es sólo una propuesta, ya que el maestro tendrá toda la libertad de evaluar el contenido del video y/o del manual que acompaña al mismo.

Se pretende que, tanto el manual como el video, sean de utilidad para los alumnos de las diversas carreras de la Universidad Autónoma de Baja California en su Unidad Ensenada, pues aunque, como se comentó líneas arriba, está dirigido a estudiantes de Ingeniería en Electrónica de 5to. y 6to. semestres, los contenidos de este trabajo se realizaron con el fin de proporcionar a los alumnos y maestros de otras carreras (incluidas aquellas que no son necesariamente del área de electrónica ó computación), un primer acercamiento al proceso mediante el cual se fabrica un chip. Quizás, la intención escondida es que despierte en el lector una inquietud de conocer más sobre el tema, y por ende, surjan más trabajos relacionados con el mismo, enriqueciéndose así el conocimiento, fin último de las Universidades. Dentro de los alcances de este trabajo se encuentra el de ser un primer antecedente de trabajos similares en el amplio tema de los microprocesadores y su fabricación.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- LA INFLUENCIA DE LAS COMPUTADORAS EN LA SOCIEDAD MODERNA

La computadora es el invento del hombre que más ha influido en la sociedad contemporánea, equiparable con el automóvil y la electricidad. Actualmente vivimos en lo que han dado por llamar la “Sociedad de la Información”, en la que cualquier persona está en posibilidad de adquirir un equipo de cómputo para su hogar o negocio.

Los usos son innumerables: tareas escolares de los hijos, aprendizaje de un nuevo idioma utilizando multimedia, entretenimiento, juegos con tercera dimensión (3D), llevar las finanzas y los gastos familiares, tener disponibles cientos de recetas para la cocina, tomar ideas para arreglar el jardín, escuchar música, etcétera.

Inclusive, administrar un pequeño negocio desde la casa. Actualmente, en Estados Unidos, existe una corriente muy fuerte en los llamados “Home Business” (negocios caseros), en los que con el ingenio de una persona, su equipo de cómputo y un teléfono, se llevan verdaderas empresas hogareñas con uno ó más empleados.

Pero eso no es todo, al mismo tiempo que la generalización del uso de las computadoras en los hogares, se ha dado el crecimiento de una red mundial de información llamada **Internet**, que en un principio, antes de que se le diera este nombre, ya se vislumbraba su aparición con el nombre de “Supercarretera de la Información”.

A través de Internet, una familia puede obtener información sobre el clima, localizar y conseguir información de los temas más variados y extraños, comunicarse con personas en distintas partes del país o del planeta, no solo en forma escrita -utilizando el correo electrónico o “e-mail”- sino que actualmente ya están disponibles sistemas económicos de comunicación mediante videoconferencia, en los que se puede estar viendo al interlocutor en la pantalla de la computadora, al tiempo que él también nos mira en su monitor. Actualmente, estos sistemas están en el orden de los \$100 dólares los económicos y \$400 dólares los que tienen electrónica más compleja como: captura de video, edición de imágenes, fax interno, etcétera

Pero si el impacto de la computadora en la vida familiar ha sido espectacular, no menos lo ha sido en el ambiente de los negocios y de las empresas, en donde se ha convertido en una herramienta de trabajo insustituible. La computadora es utilizada para llevar la contabilidad de la empresa ó la nómina de los empleados, entre otras aplicaciones, tales como la utilización de **procesadores de palabras**, con los cuales la computadora ha venido a sustituir la antigua máquina de escribir, convirtiéndose en una gran ayuda para el cuerpo secretarial en la elaboración de escritos, memorandums, cartas, cotizaciones, etcétera.

Las empresas utilizan la computadora para comunicarse con su banco y realizar transacciones vía telefónica; reciben de sus filiales o de otras empresas páginas de información vital, que de usarse la vía tradicional del correo, tardarían días en llegar.

En la actualidad, la información es una herramienta de poder. Aquél o aquella empresa que posea la información oportuna en el momento oportuno, tendrá una clara ventaja competitiva sobre su –valga la redundancia- competidor. La principal importancia de la información es que nos da la capacidad de tomar decisiones a tiempo.

Estar al margen de la información es estar en clara desventaja. Puede hacer que nuestra empresa pierda importantes oportunidades de negocio y con ello la posibilidad de permanecer en el mercado, al no estar en posibilidades de tomar a tiempo las decisiones vitales para su supervivencia y/o crecimiento.

Es por eso que se dice que estamos viviendo una revolución: la Revolución de la Información. Esta revolución la podemos comparar con la que originó la imprenta de Gutenberg en el siglo XV, la cual revolucionó el conocimiento, pues al hacerse los libros con el tipógrafo, en vez de a mano como se hacían anteriormente, permitió que más y más personas tuvieran acceso a los mismos y se pudiese intercambiar y compartir conocimiento, lo cual enriqueció culturalmente a la sociedad de ese entonces, saliendo de la etapa que ahora llamamos *El Oscurantismo*, por la poca facilidad que había para obtener un libro, pues sólo se encontraban a disposición de los monjes, es decir, de la iglesia, la cual limitaba el acceso a los libros por temor a perder poder. Un ejemplo clásico de esta sociedad del siglo XV la podemos encontrar en una magnífica película: *En nombre de la rosa*, en la cual podemos comparar cómo se manejaba en ese tiempo el intercambio de información y cómo se realiza hoy en día.

1.2.- LA REVOLUCIÓN DE LAS PC's

Pero toda esta revolución no hubiese sido posible sin la invención y posterior desarrollo de la computadora personal – la llamada PC, del inglés *Personal Computer* - en los años setenta y principios de los ochenta.

Aunque el desarrollo de la computadora personal ha tenido varios actores, una de las parejas que más influyó en la aparición y consiguiente explosión de esta industria, fue la formada por Steve Jobs y Steve Wozniak.

En el otoño de 1975, **Steve Wozniak** le presentó a un grupo de amigos (En un club conocido como “Homebrew Computer Club”) una computadora diseñada y fabricada por él. Aunque varios de los miembros del club admiraron el aparato, -que se basaba en un nuevo chip de la compañía MOS Technology, el **6502**, en vez del **Intel 8080**, que era el que estaba de moda-, muy pocos miraron el potencial de aquel aparato. Uno de los que le vieron futuro al nuevo aparato era la misma persona que le impulsó a presentar en el club la nueva computadora, esta persona fue **Steve Jobs**, quién era amigo de muchos años de Wozniak. En esa época, Wozniak trabajaba para la Hewlett-Packard y Jobs para Atari., de donde “liberaron” las partes necesarias para construir la incipiente computadora.

Jobs fue el de la idea de llevar al mercado el invento de Wozniak, y vendérselo a sus amigos del club y a las pocas tiendas de computación que había en su zona de residencia: Los altos, California, (una población cercana a lo que se conoce como “Silicon Valley” o Valle del Silicio por la cantidad de empresas fabricantes de chips que allí se han instalado).

De esta manera, en abril de 1976 ambos firmaron un acuerdo de asociación. Wozniak pondría su talento en electrónica y Jobs su audacia para la comercialización del producto. De esta manera nació una de las empresas más exitosas de la computación: Apple Computers.

No es claro el origen del nombre de Apple, unos aseguran que Jobs sugirió este nombre en honor a la fruta que tanto le gustaba, y otros por que durante su época de hippie, trabajó en una granja comunal en Oregon, recolectando manzanas. Pero uno de los motivos que tenía Jobs para darle este nombre, y que Wozniak estuvo de acuerdo, era que querían desmitificar a la computadora; querían que todo el mundo pudiera tener una, es decir, llevar el poder a la gente (*the people*, en inglés). Recordemos que en estos años aún era fuerte la influencia del *Movimiento Hippie*, sobre todo en la zona de la bahía de San Francisco, que era su área de residencia.

Fue así que, con un capital inicial de \$1,300.00 dólares, producto de la venta de una combi Volkswagen de Jobs y una sofisticada calculadora programable de Wozniak, los dos steves comenzaron a construir las primeras Apple en una recámara de la casa de la Familia Jobs. Allí se fabricaron 50 de éstas máquinas que se vendieron en la tienda *Byte Shop*. Al crecer el negocio se mudaron a la cochera, donde prosiguieron con el ensamblaje de las Apple, de las cuales se llegaron a ensamblar 200 en total.

Al tiempo que “Woz” -como le decían sus amigos- se dedicaba a mejorar su diseño (que posteriormente sería la exitosa Apple II), Jobs pensaba en grande. Se dedicó a conseguir talentos que le ayudaran a crear una empresa tan excitante como la máquina de Wozniak. Buscó expertos en el campo de las relaciones públicas, así como patrocinadores financieros para tal empresa; uno de ellos fue A.C. “Mike” Markkula –un ejecutivo retirado de Intel, pero millonario en sus años treinta -.

Markkula visitó el garaje y le gustó lo que vio en la combinación del genio para el diseño de Woz y la ambición para los negocios de Jobs. Markkula invirtió su dinero y tiempo en la empresa, y supervisó la metamorfosis de Apple en una corporación lo cual se culminó en la primera semana de 1977, poco más de un año desde que Wozniak les presentara a sus amigos del club su computadora.

Unos meses después, el producto de la nueva corporación fue revelado en el *West Coast Computer Faire*, una feria de San Francisco, CA. Empacado en plástico rígido, el producto de sólo 12 libras podía generar gráficas a color con un mínimo de integrados, dicho producto era la Apple II, la cual fué todo un suceso, pues tan solo en ese primer año, las ventas explotaron hasta \$2.7 millones de dólares. Para el año de 1980, las ventas alcanzaron los \$117 millones de dólares. La fortuna de Wozniak y Jobs combinada sumaba la cantidad de 400 millones de dólares..

En la actualidad, 1998, APPLE es parte de una de las dos corrientes o plataformas fundamentales de la industria de computo. Con la alianza Motorola-IBM-Apple, se desarrolló el nuevo microprocesador PowerPC que es el componente de las nuevas y poderosas Apple: las PowerMac, con velocidades de reloj de 400MHz. (en el anexo 3 se encuentra el roadmap o plan de trabajo para las próximas generaciones de estos chips, que cambian de nombre a G3 y G4 , donde la G es de Generación).

Steve Jobs ha sido llamado de nuevo para dirigir la compañía que fundó y salvarla de la quiebra. Para esto, Jobs ha implantado la misma política que le dio vida a Apple: Los diseños propietarios y la mercadotecnia dirigida a un segmento de mercado exclusivo: Tener una Mac es como tener un RollsRoyce es su filosofía. Su actual slogan publicitario es “Piensa Diferente”, lo cual hace a muchas personas y usuarios potenciales decidirse por esta plataforma tan poderosa para los gráficos y el diseño, así como la modelación. En la figura 1.1 se muestra una fotografía de Steve Jobs, nuevamente al mando de Apple Corporation.

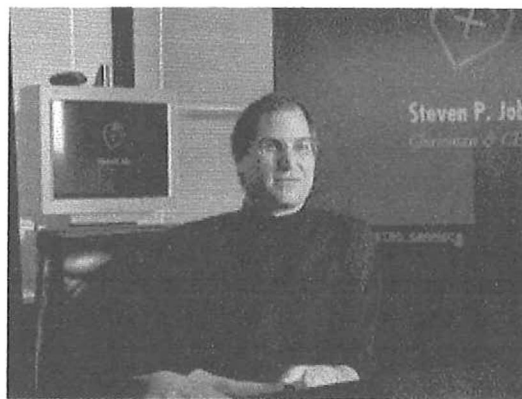


Figura 1.1.- Steve Jobs, Presidente de Apple Corp.

Cortesía de Apple Corp. (Página en internet: www.apple.com)

1.3.- IBM Y SU PARTICIPACION

Pero Apple no hubiera podido por sí sola generar una revolución. Se necesitaban otros actores.

Hubo compañías que vieron el éxito comercial de Apple y con ello la posibilidad de hacer ganancias producto de este segmento del mercado que eran los usuarios individuales. Si una pequeña empresa podía hacer tanto dinero, imagínese una empresa con tradición, instalaciones y tecnología para fabricar computadoras.

Este fue el caso de **IBM**, quien decidió participar en las computadoras personales.

Fue así como el gigante de las computadoras, IBM, conocido como “Big Blue” por su logotipo color azul, que hasta ese entonces había enfocado su interés únicamente en las grandes computadoras o “Main Frames”, dedicadas a las grandes empresas y a dependencias del gobierno, cambió sus estrategias de mercado y sacó una computadora personal: la IBM PC.

La IBM lanzó su PC al mercado en 1981, con un precio “accesible” de solo \$4 mil dólares, comparado con el costo, en ese entonces, de una minicomputadora cuyo precio oscilaba entre los 10 mil y 100 mil dólares.

La IBM PC fue novedosa por su concepto y su diseño. Este fue uno de los más grandes errores de IBM: hizo el diseño fácil de reproducir, además que liberó los “lay-outs” o planos de sus diseños para que otras empresas fabricaran componentes para sus equipos.

El microprocesador que utilizarían estas computadoras era el 8088 de *Intel*, el cual lo podía comprar cualquier otra compañía, como de hecho lo hacían, para diversas aplicaciones, pero no en computadoras. Fue IBM la que le dio un fuerte impulso a este microprocesador al incluirlo en sus nacientes máquinas, a las cuales les dio el nombre de **IBM PC's** (Computadoras Personales IBM).

Otro factor fue el software. IBM necesitaba un sistema operativo para sus máquinas. La primer opción era un software diseñado por la compañía Digital Research, que era una de las empresas más fuertes en el área de software en ese entonces, pero ésta declinó la oferta. La segunda opción era una pequeña compañía que acababa de nacer, IBM le propuso comprarle un sistema operativo que esta compañía aún no tenía. Existía la idea de qué se necesitaba pero no había quién la desarrollara. Esta compañía se llamaba MICROSOFT y su fundador: William Gates. Bill Gates contrató a la gente necesaria para diseñar el sistema operativo y así fue como le entregó a la IBM el primer MS-DOS 1.0. Uno de los errores de IBM fue el de no hacer propia la tecnología del MS-DOS, sino que pagaba por la licencia. Al igual que muchas compañías lo harían posteriormente

Actualmente, el mercado es dominado por este dúo, al grado de que más del 80% de las computadoras que existen son de esta tecnología o plataforma: Windows-Intel, o como le llaman muchos: Wintel.

De esta manera nace una nueva generación de fabricantes de computadoras, de las llamadas IBM-Compatible. IBM utilizaba partes conseguibles con varios fabricantes, por lo tanto, cualquiera podía hacer una computadora y que ésta trabajara como una IBM, pero que costara mucho menos que una IBM original. Una de estas empresas fue la **COMPAQ** (que realizó lo que llaman “reverse engineering”, es decir del producto original obtuvo un diseño-copia, sin violar patentes) que tuvo un éxito inusitado vendiendo equipos iguales o mejores que las mismas IBM, entre ellas la primer computadora portátil. Al notar lo anterior, la compañía IBM decidió hacer un nuevo diseño propietario, es decir no liberó esta vez los planos. Este diseño se llamó Microcanal y la computadora que lo utilizaba: PS/1. Pero ya nada podía hacer el gigante azul para detener la bola de nieve que el mismo había ayudado a hacer crecer: las PC's o IBM-Compatible.

En la actualidad, y en el futuro, las computadoras personales ya no son diseños propiedad de una compañía en particular, sino que los estándares de un producto son el resultado de un consorcio industrial formado por los principales fabricantes de tales productos, de manera que todos se ven beneficiados.

Un caso fue el estándar del **ducto PCI**, para el cual se formó una corporación: la PCI Inc., la cual determina las características eléctricas, físicas, etc., del ducto.

Esta industria tiene un valor -en ventas- en su conjunto de mas de 100 mil millones de dólares anuales y tenderá a crecer aún más, en beneficio de nosotros los usuarios comunes, pues cada vez tendremos computadoras más poderosas a precios más económicos. Gracias a Jobs, Wosniak y la IBM.

1.4.- EL TRANSISTOR

¿Pero qué fué lo que originó que se pudiesen fabricar computadoras cada vez más sofisticadas pero económicas?, ¿poderosas pero pequeñas?. La respuesta viene de la invención de un pequeño dispositivo electrónico el cual recibió el nombre de **TRANSISTOR**.

El primero de Julio de 1948, dos y medio años después de que viera la luz pública la supercomputadora ENIAC (la primera computadora digital de gran escala en el mundo), una breve historia apareció en la página 46 del *New York Times*. El artículo reportaba la invención de un nuevo artefacto “un dispositivo llamado transistor, el cual tiene varias aplicaciones en radio, en donde comúnmente se utiliza un tubo de vacío” (bulbo). Aunque una retrospectiva unos años más tarde llamarían a este “el invento del siglo”, en ese momento nadie reconoció su importancia. Tal noticia apareció en una sección aburrida del *Times* denominada *Noticias de la Radio*. En el cuerpo del texto de tal noticia no aparecía en ningún momento que tal dispositivo tuviera alguna relación con las computadoras como la ENIAC, que en ese momento se robaba todos los reflectores, pues aún seguía siendo noticia de primera plana.

La computadora desde su origen ha manejado la información en forma binaria (unos y ceros, encendido/apagado), es por eso que las primeras computadoras estaban hechas con **relevadores** (relay's) mecánicos, los cuales conmutaban de conectado a desconectado y viceversa para dar paso a una corriente eléctrica o cortar su paso y de esta manera realizar la función de encendido/apagado según se necesitara, pero estos relevadores tenía la desventaja de ser muy ruidosos, voluminosos y requerir grandes cantidades de corrientes.

Posteriormente los relevadores fueron sustituidos por los **tubos al vacío**, mejor conocidos como bulbos, que eran más confiables que los relevadores, pero se dañaban con facilidad y requerían de grandes cantidades de corrientes, al tiempo que el calor que generaban era enorme y eran sumamente delicados pues se descomponían rápidamente y había que estarlos cambiando constantemente, además de que los locales donde debían estar estas computadoras eran enormes habitaciones con refrigeración y su mantenimiento era costoso tanto por estas instalaciones como por el personal especializado que se necesitaba para su operación. Aún así, estos dispositivos fueron los que dominaron el mercado de las computadoras durante bastantes años (de 1944 en la ENIAC hasta 1962, que fué cuando se fabricó la primera computadora con transistores de germanio).

El transistor (inventado por J. Bardeen y W.H. Brattain) vino a sustituir a los bulbos, pues realizaba exactamente las mismas funciones que estos, pero con las enormes ventajas de que era mucho más pequeño, no tenía partes móviles, no producía calor y era más económico (no en un principio, sino cuando entró en fabricación en serie y en serio).

1.5.- BREVE HISTORIA DEL TRANSISTOR

En la segunda semana de diciembre de 1947, en los laboratorios de investigación y desarrollo de los Bell Telephone Laboratories, en Nueva York, John Bardeen y Walter H. Brattain demostraron las dos propiedades fundamentales de lo que hoy conocemos como Transistor: amplificar y conmutar. Ellos desarrollaron un transistor funcional de material semiconductor (germanio). Su objetivo era generar un dispositivo que realizara las mismas funciones de los tubos al vacío, por lo que faltaba que este nuevo aparato también produjera oscilación.

La anécdota sobre de donde proviene el nombre transistor, relata que el 23 de diciembre de 1947 se encontraban Brattain y otro colega, H.R. Moore, demostrando un transistor amplificador de audio con una ganancia de 18, ante otros colegas, entre ellos William Shockley y John Bardeen, entre otros, cuando Bardeen y Brattain pidieron sugerencias de nombre para el nuevo dispositivo, un científico del equipo, John Pierce, mencionó que el transistor era el dual del bulbo, cuyo parámetro más importante era la “transconductancia”, salió a plática la palabra “transresistencia”, a lo que Pierce mencionó “Transistor” y Brattain dijo: “Pierce, eso es”. Y con ese nombre quedó. En la figura 1.2 se muestra una imagen de Shockley en los primeros días de sus investigaciones.

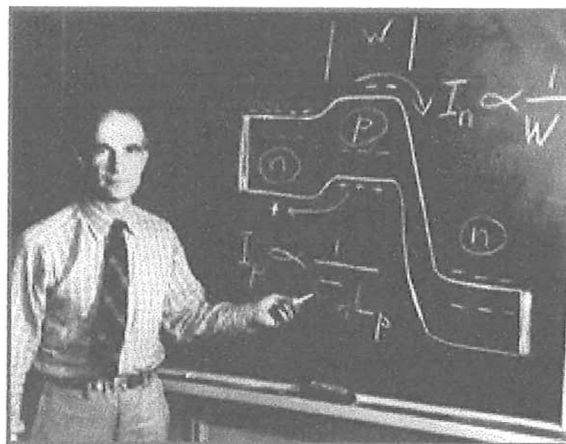


Figura 1.2.- William Shockley mostrando un diagrama esquemático del transistor.

Cortesía: american-computer.com (página en internet)

Durante esa misma tarde, un ejecutivo de la Bell preguntó -sobre el transistor- ¿puede oscilar?.

La vispera de navidad, es decir al día siguiente, Bardeen le demostró a su jefe, William Shockley, que el nuevo dispositivo podía también oscilar. De ésta manera, quedó demostrado que el nuevo dispositivo realizaba las tres funciones que poseía el bulbo.

El transistor fue patentado en enero de 1948, por J. Bardeen y W.H. Brattain, no apareciendo en la patente William Shockley, entonces director de los laboratorios, lo cual lo dejó -según unos amigos- profundamente amargado. Sin embargo su participación fue reconocida años después (en 1956) cuando les fue entregado a los tres el Premio Nobel de Física por su descubrimiento. Shockley es uno de los nombres que más se asocia con el descubrimiento del transistor, quizá porque en ese mismo año él patentó lo que sería el transistor más común: el transistor de unión (Junction Transistor), ya que el aparato que Bardeen y Brattain patentaron era un transistor de punto de contacto. Posteriormente, en 1952, Shockley patentó el transistor de efecto de campo (FET). La figura 1.3 muestra una fotografía de lo que Bell divulgó al mundo como el primer transistor de material semiconductor.

Aunque el transistor de germanio de punto de contacto fue inventado durante la tercer semana de diciembre de 1947, se mantuvo en secreto (por cuestiones militares) y no fue sino hasta el 17 de junio de 1948 que se patentó. Y el 26 del mismo mes, Shockley patentó una aplicación para su teoría del transistor de unión.

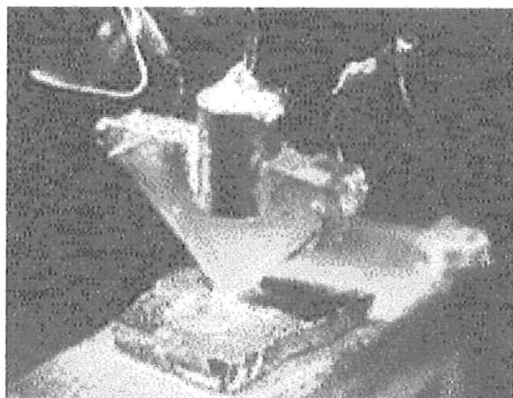


Fig.1.3.- Fotografía del transistor de punto de contacto. 1947.

Cortesia del Bell Laboratories Museum en línea www.bellabs.museum.com

Aunque fué en los Laboratorios Bell donde se realizó el descubrimiento, estos decidieron vender los derechos para que otras compañías los fabricaran, pues ellos no le veían aplicación en telefonía, aún, pues el transistor no era mas que uno de los muchos frentes en los que los Laboratorios Bell estaban trabajando, otros frentes o líneas de investigación lo eran los cables conductores, aislantes, cables submarinos, conmutadores telefónicos, teléfonos, entre otras.

Una de estas compañías que compraron derechos en 25 mil dólares, como anticipo del 5% de las regalías para fabricar transistores, fue la **Raytheon**, la cual fabricaba el 90% del los aparatos auditivos de bulbos que en ese entonces se hacían en los Estados Unidos. Y fue esta una de las primeras aplicaciones del transistor de germanio: como amplificador en aparatos auditivos de ayuda para las personas con este impedimento.

Norman Krim y su grupo de Raytheon diseñaron el primer auxiliar auditivo transistorizado en 1952 el cual contenía tres o cuatro transistores que sustituyeron a los 3 o cuatro bulbos con los cuales funcionaban anteriormente. La ventaja, aparte del tamaño, era que los transistores solo gastaban un 10% de la energía de la batería con la que funcionaban estos aparatos. Raytheon fue el mayor fabricante de transistores de 1952 a 1955, produciendo alrededor de la mitad de los transistores que se fabricaban en el mundo. Hasta que llegó Texas Instruments.

Sin embargo, uno de los errores más grandes que una compañía como Raytheon puede cometer, fué el siguiente: en el verano de 1955, un japonés de nombre AKITA MORITA visitó Raytheon y les ofreció el 20% de su compañía a cambio de que Raytheon le enseñara a sus ingenieros a fabricar transistores. Esta compañía planeaba fabricar radios de bolsillo usando transistores. Conociendo que los costos de mano de obra en Japón eran una séptima parte de los costos en Estados Unidos, Raytheon declinó aceptar tal oferta. Gran error, Akita Morita era el fundador y presidente de SONY.

Pero hasta aquí los transistores eran de germanio y muy inestables. La persona que le dio un impulso al silicio como material semiconductor de importancia para los transistores fue **John Moll**, quién, por encargo de la Bell, investigó el material adecuado para la fabricación de “switches” o conmutadores para sustituir sus viejos relevadores mecánicos en una oficina central, de las ahora conocidas como centrales telefónicas.

Moll dictaminó en 1953 que sólo el silicio podría ser usado, pues el germanio tenía una alta interferencia a los 40°C o 50°C que había en la oficina central, en cambio el silicio podría ser el único en proveer los 60dB (decibeles) de supresión de interferencia requeridos. Moll se convirtió en el campeón del silicio. De hecho Moll fué uno de los teóricos más importantes del transistor y muchos de los términos emitidos por él siguen vigentes, un ejemplo es el modelo Moll-Ebers del transistor bipolar.

Este pequeño dispositivo, el transistor, podía manejar las funciones de conmutación (ó “switchéo”) necesarias para que una computadora operara con unos y ceros para realizar sus funciones lógicas-aritméticas, pero aún no había quién visionara esta aplicación. Todavía faltaban muchos años y desarrollo de tecnologías para que se diera su aplicación.

1.6.- EL TRANSISTOR DE SILICIO

La primer compañía en utilizar Silicio como material base para sus transistores fué la TEXAS INSTRUMENTS la cual necesitaba fabricar transistores para aplicaciones militares.

La compañía Geophysical Services Inc. era una compañía dedicada a la investigación sísmica, con especialidad en localización de yacimientos petroleros. Esta compañía se mudó en 1948 de New Jersey a Texas, donde estaban las grandes exploraciones y compañías petroleras.

La compañía había desarrollado un excelente departamento de investigación y fabricaba sus propios aparatos electrónicos, pero al no tener éxito en venderse los a las empresas petroleras, tenía que encontrarle un uso a su capacidad electrónica y comenzó a construir sistemas para los equipos submarinos de guerra. En el año de 1951, cambió su nombre a Texas Instruments Inc.

Texas Instruments fué una de las 20 compañías que pagó los 25 mil dólares que pedía la Bell por la licencia para fabricar transistores.

Texas Instruments era una de las compañías que fabricaban transistores de germanio, pero debido a la alta inestabilidad en la potencia de salida (capacidad de amplificación) de los mismos en ambientes de altas temperaturas, aunado a que el germanio era un elemento raro, aunque de fácil manejo, es que se hacía imperioso encontrar otro elemento que lo sustituyera. Varios laboratorios y muchas compañías se encontraban experimentando con el silicio, pero no habían logrado repetir el proceso de obtención y fabricación como para llevarlo a una línea de producción.

El silicio tenía un comportamiento de operación aceptable aún a los 150°C, mucho más del doble de la temperatura que permitía el germanio, además que el silicio es el segundo elemento más común en la tierra, solo superado por el oxígeno.

El 10 de mayo de 1954, Texas Instruments anunció el inicio de la producción de un transistor de silicio. El primero en la historia, en una línea de producción.

El hombre responsable de esta proeza tecnológica fue Willis Adcock. Adcock fue contratado por TI junto con Mark Sheppard con un solo fin: Crecer silicio (en el siguiente capítulo se explica el significado de éste concepto), lo cual lograron llevar a producción 4 años antes que cualquier otro competidor.

1954 no sólo fue un gran año para TI por tener el transistor de silicio en producción sino por que en ese año también lanzaron al mercado el primer radio de transistores, de germanio, en tan solo 50 dólares al público, un gran éxito comercial en la navidad de ese año.

En el anexo 4, se encuentra el texto, en inglés, de la noticia que dio al mundo la compañía TI. Dicho texto fue obtenido de la página en Internet de TI (www.ti.com).

1.7.- TECNOLOGÍA DEL ESTADO SÓLIDO

Para que se diera semejante salto tecnológico, como ocurrió con el transistor, se necesitaba del desarrollo de una nueva tecnología: El Estado Sólido.

“Un componente de estado sólido es un elemento electrónico que opera en virtud del movimiento de los electrones dentro de un fragmento sólido de un material semiconductor”.

Aunque durante los años treinta existía actividad en el estudio del estado sólido a nivel laboratorio, la guerra hizo que muchos físicos teóricos e investigadores en laboratorios abandonaran estos estudios, y no fue sino hasta el fin de la II guerra que se reiniciaron los trabajos de investigación de estos materiales. Uno de los laboratorios que más esfuerzos y recursos invirtió, fueron los Bell Telephone Laboratories, por eso se dice que la actividad en el estudio de los semiconductores inició con el invento del transistor, pues este evento desencadenó los experimentos en todo el mundo desarrollado sobre este tipo de materiales.

Como se describió anteriormente, el transistor es un pequeño dispositivo electrónico con las características de funcionamiento tanto de amplificar como la de conmutar (switch), inventado en 1948 por William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain. Una de las primeras aplicaciones del transistor fue la de amplificador en aparatos auditivos y en radios de bolsillo.

¿Pero, qué es el Estado Sólido?. Si miráramos los elementos que conforman la tabla periódica y recordamos de lo visto en los días en la preparatoria en Química I, notaremos que están clasificados por grupos. De estos grupos de elementos y materiales existentes en la naturaleza, se desprenden tres clasificaciones de suma importancia para la electrónica: los *conductores*, los *no-conductores* o aislantes y los *semiconductores*.

En un **conductor**, el flujo de la corriente eléctrica consiste en un movimiento de electrones libres. Los electrones exteriores o de valencia de un buen conductor se hallan unidos al átomo tan débilmente que -a temperatura ambiente- la energía térmica hace que, aproximadamente, un electrón se desligue de cada átomo para moverse libremente, lo cual da origen a una corriente cuando se aplica un potencial eléctrico o voltaje. Dentro de esta categoría se encuentran los metales como el oro, la plata, el aluminio y el cobre, entre otros metales.

Los aislantes o *no-conductores* son unos materiales o elementos cuyos electrones de la capa de valencia se encuentran fuertemente unidos al átomo, no habiendo electrones libres para desplazarse. En consecuencia, no puede haber circulación de corriente cuando se aplica una tensión o voltaje. Dentro de ésta clasificación se encuentran materiales como el plástico, la madera, el papel, etcétera.

Entre estas dos principales categorías, existe una clase denominada *semiconductores*, cuya propiedad se encuentra, aproximadamente, a la mitad del camino entre los conductores y los aislantes. Sin embargo un semiconductor no es sólo un mal conductor, sino que tiene dos propiedades muy importantes.

En primer lugar, su resistencia disminuye, normalmente, con el aumento de la temperatura -contrariamente a conductores como los metales, en los que la resistencia aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura-.

En segundo, el flujo de la corriente en un semiconductor puede ser debido a dos motivos: bien al flujo de electrones, similar a la corriente a través de los conductores, o bien al movimiento de los *lugares* en los que falta un electrón, en dirección opuesta (al flujo normal de los electrones como tales).

Veamos bien esto último: Si falta un electrón en la capa de valencia, puede ocurrir que otro electrón en la capa de valencia de un átomo contiguo “salte” a ese lugar vacante, quedando un nuevo átomo sin un electrón o, dicho de otra manera, con una vacante en su capa de valencia. Este vacío puede a su vez ser ocupado por el electrón de un tercer átomo, y así sucesivamente.

Entonces ocurre que lo que se ha desplazado es el vacío producido por la ausencia de un electrón. Tales vacíos son denominados **Huecos** y, puesto que hay la carencia de un electrón, se pueden considerar como *cargas positivas*. Este concepto de movimiento de huecos, originarios de una corriente, es muy importante para la comprensión del comportamiento de los semiconductores.

De aquí una de las principales características de los semiconductores : **Su conductividad puede ser modificada a voluntad.** El material semiconductor puede ser “dopado” (es decir alterado químicamente) con otro elemento (generalmente se utiliza boro o fósforo), el cual aportará los electrones o los huecos, según sea el caso, necesarios para que el semiconductor original se comporte como el fabricante desea.

El material semiconductor en el que la conducción es debida al flujo de electrones recibe el nombre de material “n” (por ser negativos los portadores) y el material en que la conducción se debe al movimiento de huecos positivos, recibe el nombre de material “p” (por los portadores positivos). Entonces, tenemos dos tipos de material semiconductor; uno tipo N y otro tipo P.

Desde el punto de vista de los Circuitos Integrados, el material semiconductor más importante es el **Silicio**.

El silicio tiene cuatro electrones exteriores, o dicho de otra forma: en la capa de valencia.

Si le añadimos una pequeña cantidad de impurezas en forma de un elemento de cinco electrones de valencia, tal como el Fósforo, un electrón por cada átomo de la impureza se hallará libre, y tendremos el *silicio tipo n*. Igualmente, si añadimos una impureza con sólo tres electrones de valencia, tal como el Boro, habrá una carencia de un electrón es decir, habrá un hueco por cada átomo de boro, y entonces tendremos *silicio tipo p*. Es de esta manera como se puede controlar a voluntad la conducción: sea tipo p ó tipo n , con la sola adición de una impureza o “dopante” adecuada.

1.8.- LA UNION P-N

La actuación de la mayoría de los componentes de estado sólido depende de las propiedades de una o más uniones *p-n* incorporadas a su estructura.

Una *unión p-n* es una transición de un semiconductor *p* a un semiconductor tipo *n*, dentro del mismo fragmento de material.

Esta unión tiene dos características muy importantes y fundamentales para el funcionamiento del Transistor, las cuales se dan cuando se aplica un voltaje o tensión a las terminales o bornes del dispositivo.

La primera es que, conectando la terminal positiva al material tipo p y la terminal negativa al material tipo n, los electrones libres del lado tipo *n* son atraídos, a través de la unión, hacia el contacto positivo, y los *huecos* positivos del lado tipo *p* son atraídos, a través de la unión, en sentido opuesto, hacia el contacto negativo. Esto recibe el nombre de *sentido de conducción* ó *sentido directo* (también llamada: polarización directa). Es decir, si aplicamos una pequeña tensión, circula una gran corriente, dándose una resistencia muy pequeña.

La segunda es que, si invertimos las terminales, los huecos del lado *p* tienden a alejarse de la unión hacia la terminal positiva y los electrones del lado *n* tienden a alejarse de la unión, con lo que no circula corriente a través de la unión aunque se aplique un voltaje muy elevado. Esto es el llamado *sentido inverso* o de no-conducción (polarización inversa).

En la práctica se da una corriente muy pequeña, llamada corriente de fuga, debida a los electrones y huecos generados cerca de la unión por la energía térmica.

Esta unión p-n es la que forman los diodos, y si analizamos las dos características anteriores podremos observar que son las que proporcionan las habilidades de *rectificación*, características de los diodos. Pero también una unión *p-n-p* (ó *n-p-n*) nos da las propiedades características de los transistores: Amplificar una señal (a una señal pequeña, responde con una gran corriente, es decir la amplifica) y la de conmutar (se enciende, se apaga, se enciende, se apaga, etc.) a voluntad (invirtiendo las polaridades de las terminales).

1.9.- EL TRANSISTOR DE UNION N-P-N.

Un transistor de unión consiste en dos uniones p-n, formadas en una pequeña porción de material semiconductor, separadas solamente por una distancia en el orden de micras (una micra es una distancia de una millonésima de metro)

Un *transistor npn* se forma de la unión de un emparedado de material *p* con dos de material *n*. La figura 1.4 muestra el diagrama de un transistor npn con sus tensiones de trabajo. La primera región de tipo *n* recibe el nombre de *emisor*, ya que es la que emite o inyecta los electrones a la región central, de tipo *p*, la cual recibe el nombre de *base*. La segunda región tipo *n* es llamada *colector*, la cual recoge los electrones procedentes de la base. La unión entre emisor y base recibe el nombre de *Unión de Emisor*, y al existente entre el colector y la base, *Unión de Colector*. La figura 1.4 muestra un diagrama de un transistor de union *nnp*.

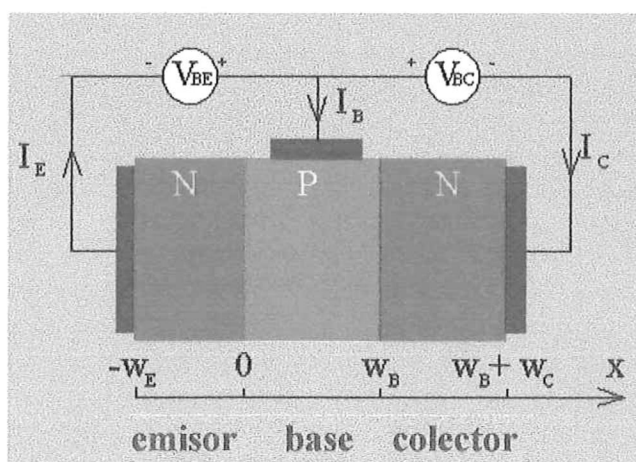


Figura 1.4.- Diagrama de un transistor npn, muestra la representación del emisor, la base y del colector.

Cortesía de la Universidad de Colorado. (página en internet : colorado.edu)

Similarmente a como ocurre con el transistor npn, se forma un transistor pnp, con dos capas de material *p* y una de material *n*.

1.10.- EL TRANSISTOR Y SU INFLUENCIA EN LA INDUSTRIA ELECTRONICA.

¿Por qué comentamos sobre los transistores pnp y los npn? Bueno pues porque los circuitos integrados están hechos precisamente de transistores. Son ellos los que realizan las funciones de conmutación que realizaban los relevadores mecánicos o los bulbos de las primeras computadoras. Los transistores a su vez forman conjuntos de elementos electrónicos más complejos conocidos como *Compuertas Lógicas*. Éstas realizan operaciones como sumas, conjunciones, negaciones, entre otras, que conllevan a operaciones lógicas y aritméticas con señales eléctricas (la presencia de un voltaje se traduce en un UNO y una ausencia de voltaje se traduce como un CERO) que son las señales con las que trabaja un circuito electrónico y por ende una computadora. El conocimiento del funcionamiento de estos dispositivos, es importante para comprender el funcionamiento de los microprocesadores o chips.

Mientras tanto trataremos la importancia del transistor.

El transistor fue una radical innovación en electrónica. Antes de que pudiese ser aceptado como una nueva base en los circuitos electrónicos, fue necesario desarrollar una nueva teoría de circuitos, desplegar nuevos procesos técnicos y de ingeniería, y establecer nuevas instalaciones de fabricación para la producción en gran volumen de estos nuevos componentes. En consecuencia, pasaron entre diez y quince años antes de que la electrónica del estado sólido quedase firmemente asentada, por esta razón el impacto del transistor, aunque revolucionario en naturaleza, fue gradual en su efecto en la sociedad.

1.11.- DEFINICION DE MICRA

Una MICRA es una unidad de medida para representar una distancia de una millonésima de metro, esto es, una milésima parte de un milímetro. En notación ingeniería es 1×10^{-6} mts. En inglés el término micra se traduce como micron.

¿Por qué es importante definir una micra en el lenguaje de los circuitos integrados? Porque las dimensiones de las líneas o imágenes que se manejan a nivel chip están en el orden de las micras. Aunque para ser más específicos, en la actualidad, estas líneas que unen a un componente con otro en un chip están en el orden de las submicras (submicron, en inglés), es decir, las imágenes que se están manejando hoy en día para fabricar transistores en un chip son de unas 0.25 micras en producción, pero a nivel experimental se han logrado líneas de tan sólo 0.19 micras, un verdadero logro tecnológico.

Si tomamos en cuenta que el espesor o diámetro de un cabello humano, promedio, es de unas 100 micras, alrededor de 0.1 milímetros, debemos imaginarnos las dimensiones de las cuales estamos hablando. Es decir, en el diámetro de un cabello cabrían cuatrocientas líneas que unen a transistores en un chip. Por eso no debemos sorprendernos cuando en un chip (un Pentium), de tan solo cuatro centímetros cuadrados (20mm x 20mm) está formado por 5.5 millones de transistores.

1.12.- DEFINICIÓN DE MICROPROCESADOR

Un microprocesador consiste en uno o más dispositivos LSI (Large Scale Integration: Integración a alta escala), que realizan la función de Unidad Central de Proceso (CPU) . El microprocesador es un dispositivo lógico utilizado en electrónica digital. El CPU es un elemento lógico complejo que realiza operaciones aritméticas, lógicas y de control, las cuales son generalmente incorporadas como un circuito integrado.

1.13.- EL CIRCUITO INTEGRADO

De acuerdo al diccionario on-line FOLDOC (en Internet <http://www.wombat.doc.ic.ac.uk/foldoc/>) un circuito integrado o chip es “un dispositivo semiconductor microelectrónico, conteniendo muchos transistores y otros componentes interconectados”. Los IC's, como son llamados por sus siglas en inglés (de: Integrated Circuits), son “construidos (“fabricados”) en un pequeño rectángulo (o “dado”) de una oblea de silicio”. Este -el silicio- es conocido como: el “sustrato”.

La implementación del concepto de *circuito integrado*, que implica la inclusión de todos los elementos necesarios de un circuito en un solo bloque monolítico o chip, y la implantación del **proceso planar**, condujo a la fabricación de chips cada vez más complejos hasta llegar a los circuitos integrados actuales (tanto analógicos como digitales). La figura 1.5 muestra una fotografía de dos circuitos integrados en su encapsulado. Ambos circuitos están interconectados. El de la izquierda es una memoria llamada caché de nivel dos (L2) y el de la derecha es el chip del microprocesador Pentium Pro

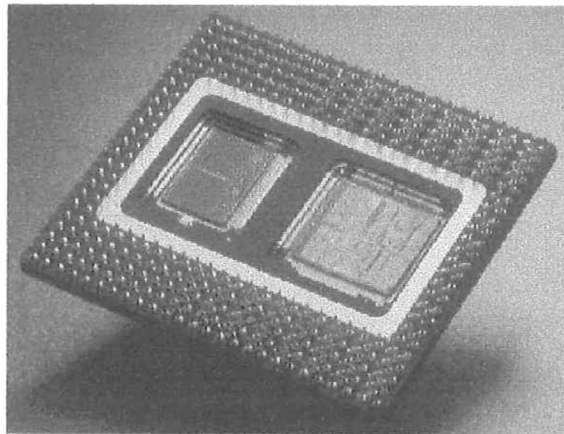


Figura 1.5.- Fotografía de un circuito integrado conocido como microprocesador. Se muestra el Pentium-Pro.

Cortesía de Intel Corp. (Página en internet www.intel.com)

El circuito integrado fue concebido, o inventado si se pudiera decir, simultáneamente, pero por separado, por dos investigadores: Jack Kilby de Texas Instruments y Robert Noyce de Fairchild Semiconductor, en 1959.

El *Circuito Integrado* monolítico de silicio es una evolución posterior de las actividades de investigación y fabricación generadas por el transistor. En general, los circuitos integrados se fabrican con los mismos materiales y procesos empleados en la construcción del transistor planar epitaxial, de tal modo que la experiencia obtenida con el transistor ha sido aplicada directamente en los circuitos integrados. Ello causó que en un periodo más reducido -de solamente unos siete años- se desarrollaran los circuitos integrados y fueran aceptados por la industria electrónica.

La fabricación de un circuito integrado requiere de una secuencia de varias fases u operaciones independientes de proceso, tales como: (1) preparación del material, (2) crecimiento epitaxial, (3) pasivación de la superficie, (4) fotolitografía, (5) formación de uniones, (6) deposición de película, (7) prueba y corte de la oblea en dados, (8) inserción del dado en un encapsulado y soldado de las terminales. Todos estos pasos se explicarán en el siguiente capítulo.

No puede haber ninguna duda acerca de la influencia tan extendida de los circuitos integrados en la electrónica, debido a su progresivo y creciente número de aplicaciones como, por ejemplo, en proyectiles, satélites y computadoras, donde sus propiedades particulares de tamaño reducido y gran precisión ofrecieron ventajas inmediatas, y, más recientemente, en equipos para la industria y el usuario, en donde la característica más importante es el costo reducido.

Al analizar el gran impacto de los circuitos integrados, se deben de tener en cuenta los siguientes aspectos. Tal vez el mayor efecto ha recaído sobre el cliente o usuario de los circuitos integrados: el fabricante de equipo electrónico (OEM, por sus siglas en inglés). Tradicionalmente, el fabricante se procuraba los distintos componentes y entonces se llevaba a cabo un diseño de circuito y la fabricación de un prototipo, antes de la construcción del equipo. En la actualidad, tiene a su alcance, a un precio más reducido, una serie de circuitos que son más pequeños y de mejor calidad, con un rendimiento semejante, si no es que mejor en muchas ocasiones.

El fabricante de equipo electrónico debe de utilizar los IC's existentes para poder mantenerse en una competencia económica, lo cual quiere decir que tendrá que hacer menos diseño de circuitos, pudiendo dedicarle más tiempo y esfuerzo a mejorar las operaciones y versatilidad de su equipo o producto.

El fabricante de circuitos integrados debe, por su parte, establecer una gran diversidad en el diseño de circuitos y mantener un mayor contacto con el fabricante de equipos, a fin de satisfacer sus requerimientos del modo más económico posible. El diseño detallado de los circuitos integrados debe combinar en una forma juiciosa dichos requerimientos con las posibilidades tecnológicas.

De aquí la importancia del transistor, el cual ha permitido una verdadera revolución en la industria electrónica. La miniaturización que ha sufrido es constante al tiempo que la reducción de costo es asombrosa. Para darnos una idea, en la actualidad un circuito integrado muy conocido como el **Pentium**, como mencionamos anteriormente, posee 5.5 millones de transistores a un costo menor a los 100 dólares. Pero, ¿qué es el transistor, sino dos uniones n-p de silicio?. Más adelante, trataremos de la importancia del silicio así como su preparación como material semiconductor *p* ó *n*.

Creemos que hasta este punto, (Capítulo I: Introducción), el lector ya ha obtenido una idea básica y los conocimientos necesarios para los siguientes temas.

El siguiente capítulo, II, tiene como objetivo iniciar al lector con el proceso de fabricación del chip, a manera de un resumen rápido, mediante el cual comprenderá gran parte de la terminología utilizada en el guión del video, (Unidad 3), así como el contenido del capítulo IV, el cual trata sobre el futuro del mismo proceso.

1.14.- REFERENCIAS:

- 1).- COMPUTER BASICS
UNDERSTANDING COMPUTERS
TIME-LIFE BOOKS
1985
QA76.C556
- 2).- THE TRANSISTOR
ELECTRONIC ENGINEERING TIMES MAGAZINE
25TH ANNIVERSARY EDITION , ISSUE 978
OCTUBRE 30 DE 1997
CMP PUBLICATIONS
- 3).- INTEL CORPORATION
Página en Internet: *www.intel.com*
- 4).- TEXAS INSTRUMENTS CORPORATION
Página en Internet: *www.ti.com*
- 6).- APPLE CORPORATION
Página en Internet: *www.apple.com*
- 7).- IBM CORPORATION
Página en Internet: *www.ibm.com*
- 8).- DEVICE ELECTRONICS FOR INTEGRATED CIRCUITS
RICHARD SMULLER
JOHN WILEY & SONS DE.
TK7871.85
1985

CAPÍTULO II

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS

II.- TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS.

2.1.- INTRODUCCIÓN

El rápido avance en la tecnología de los dispositivos semiconductores no hubiera sido posible de no ser por el impresionante progreso hecho en la purificación y preparación de los materiales semiconductores. Si se van a fabricar dispositivos de alta calidad, consistentes y confiables, se necesitan cristales casi perfectos de pureza virtualmente absoluta. Los niveles de impureza deben ser controlados a menos de un átomo de impureza por millón, -a veces, a menos de un átomo de impureza por cada mil millones-. Este nivel de pureza no es detectable ni química ni espectroscópicamente. Su medición depende enteramente de la conductividad eléctrica del material.

La evolución de la tecnología de los semiconductores fue determinada en mucho por las propiedades químicas de los materiales disponibles, así como por sus propiedades eléctricas. Los primeros semiconductores desarrollados extensivamente fueron el germanio y el silicio. Ambos elementos se cristalizan en una estructura de diamante, donde cada átomo forma enlaces covalentes con sus cuatro átomos vecinos. Algunas de las propiedades del silicio se encuentran en la tabla 2.1.

El germanio fue usado extensivamente antes que el uso del silicio se hiciera común. El germanio es menos reactivo que el silicio y puede, por lo tanto, ser refinado y procesado más fácilmente. Como se mencionó en el capítulo anterior, el transistor de germanio fue inventado en 1947 y no fue sino hasta 1954 que se logró obtener y dominar la tecnología para poder desarrollar transistores de silicio.

Todos los materiales que existen en la naturaleza están formados por átomos y estos a su vez por neutrones, protones y electrones. Estos últimos son los que (cuando existe una diferencia de energía) se cambian de un átomo a otro y es entonces cuando decimos que *se mueven*, es decir tienen **movilidad**. Este movimiento de electrones, es decir, de cargas, es lo que nos origina una **corriente eléctrica**.

Por otro lado, como se mencionó en el capítulo anterior, se puede mover ya sea el electrón o el hueco que deja el mismo al desplazarse al siguiente electrón. A estos se les llaman **portadores**, es decir, quién porta la polaridad *n* ó *p*. Si el electrón se mueve entonces estamos hablando de portadores tipo *n*, y si es el hueco el que se mueve, estamos hablando de portadores tipo *p*.

Lo anterior viene a manera de recordatorio para saber que la movilidad de los portadores en el germanio es mayor que la movilidad de los mismos en el silicio. Y aún más, debido a que la respuesta en frecuencia de un dispositivo semiconductor usualmente depende de la velocidad de los portadores, la cual es proporcional a la movilidad y al campo eléctrico aplicado, es deseable la más alta movilidad. Entonces, como la movilidad en el germanio es casi tres veces mayor que en el silicio, las respuestas en frecuencia de los dispositivos fabricados en germanio pueden ser superiores a aquellos fabricados con silicio. Entonces, ¿porqué se cambió la tecnología a silicio?

2.1.1.- ¿PORQUÉ SILICIO?

Sin embargo a medida que la tecnología progresaba, las limitaciones del germanio se hacían evidentes. No había un método conveniente para introducir cantidades controladas de impurezas dopantes en pequeñas áreas seleccionadas de una pieza de germanio para formar regiones localizadas de material tipo-*n* o tipo-*p*, de aquí que los dispositivos de germanio estuvieran restringidos a geometrías relativamente grandes, cuando lo que se buscaba era la miniaturización. Debido a que la respuesta en frecuencia de un semiconductor está limitada por el tiempo requerido por los portadores para moverse de una región a otra, es que las dimensiones del dispositivo son tan importantes, tanto como las velocidades de los portadores.

Adicionalmente, el valor de la barrera de potencial en el germanio, menor que la del silicio, causaba una concentración intrínseca de portadores, la cual se acercaba a la concentración del dopante, a temperaturas más bajas que en el silicio. Esto hacía que el germanio se comportara de una manera intrínseca. Debemos anotar que la mayoría de los dispositivos semiconductores se vuelven inútiles cuando el semiconductor se comporta intrínsecamente. El resultado era que el germanio se volvía inestable, perdía su capacidad de amplificación controlada. De aquí, en este aspecto, que el silicio era preferible al germanio.

Las restricciones a las grandes dimensiones fueron eliminadas haciendo uso de la facilidad con la que la superficie de un cristal de silicio es oxidada para formar un óxido químicamente estable. El dióxido de silicio, cuando es “crecido” de esta manera es amorfo, aunque muy resistente a la mayoría de los ácidos y solventes comunes. Sin embargo, y afortunadamente, el Ácido Fluorhídrico ataca la capa de dióxido de silicio, pero no desprende el silicio (sustrato). Esta es una característica importante del silicio que es sumamente aprovechada en la fabricación de circuitos integrados.

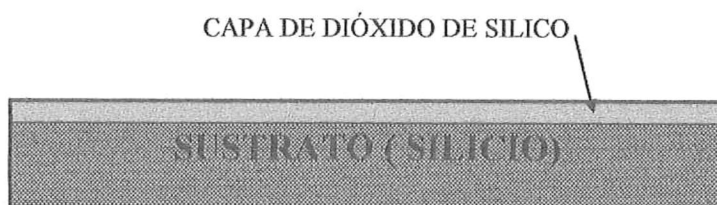


Figura 2.1.- El dióxido de silicio es una capa protectora del sustrato.

Pero igualmente importante es que, aún a altas temperaturas, la mayoría de los átomos dopantes no penetran rápidamente el dióxido de silicio. Por lo tanto, es posible cubrir una pieza de silicio con regiones de dióxido de silicio, luego el silicio puede ser colocado en un ambiente que depositará átomos dopantes en su superficie. Los átomos dopantes pueden penetrar las regiones del silicio expuesto pero no las cubiertas por el dióxido de silicio. La figura 2.1 muestra un diagrama de un sustrato de silicio con una capa de dióxido de silicio crecido, que protegerá al silicio contra los dopantes en las subsiguientes fases.

Este dopado selectivo puede ser controlado con el uso de polímeros fotosensitivos que actúan como escudos a un desprendimiento por un baño en ácido Fluorhídrico (HF) en las regiones que han sido definidas por las placas fotográficas.

Este proceso de desprendimiento (o “**grabado**” -de aquí en adelante-, de la palabra en inglés: **etch**) selectivo, desarrollado originalmente para aplicaciones en impresiones litográficas, permite el delineamiento de geometrías muy pequeñas. Con esto se dio un gran paso en la miniaturización de los elementos en un chip. El polímero más usado actualmente se llama Resist, y es una capa de barniz fotosensitivo, su aplicación se explica mas detalladamente en la sección de *proceso litográfico*.

Mediante la repetición de las secuencias de operación arriba mencionadas, podemos dopar regiones localizadas del semiconductor ya sea como tipo-n o como tipo-p en una superficie del sustrato de silicio con dimensiones de tan solo unas décimas de micra (actualmente se trabaja en el orden de las $0.25\ \mu\text{m}$ y experimentalmente con dimensiones de 0.19micras).

“La habilidad de dopar, selectivamente, pequeñas regiones de silicio es la base de la tecnología de semiconductores en nuestros días y es una de las principales razones por las cuales el silicio reemplazó al germanio como el material semiconductor más comúnmente usado. Pero a un nivel de importancia mayor, se encuentra que la ventaja del silicio como semiconductor resulta de la facilidad con la que, con una tecnología tan controlada, puede uno obtener ya sea un semiconductor de excelente calidad ó un aislante (dióxido de silicio) con magníficas propiedades”.

De aquí que el proceso para fabricar un chip, comience con la obtención del material semiconductor.

En la figura 2.1.1 se muestra el diagrama a bloques del proceso que sigue el chip en su fabricación.

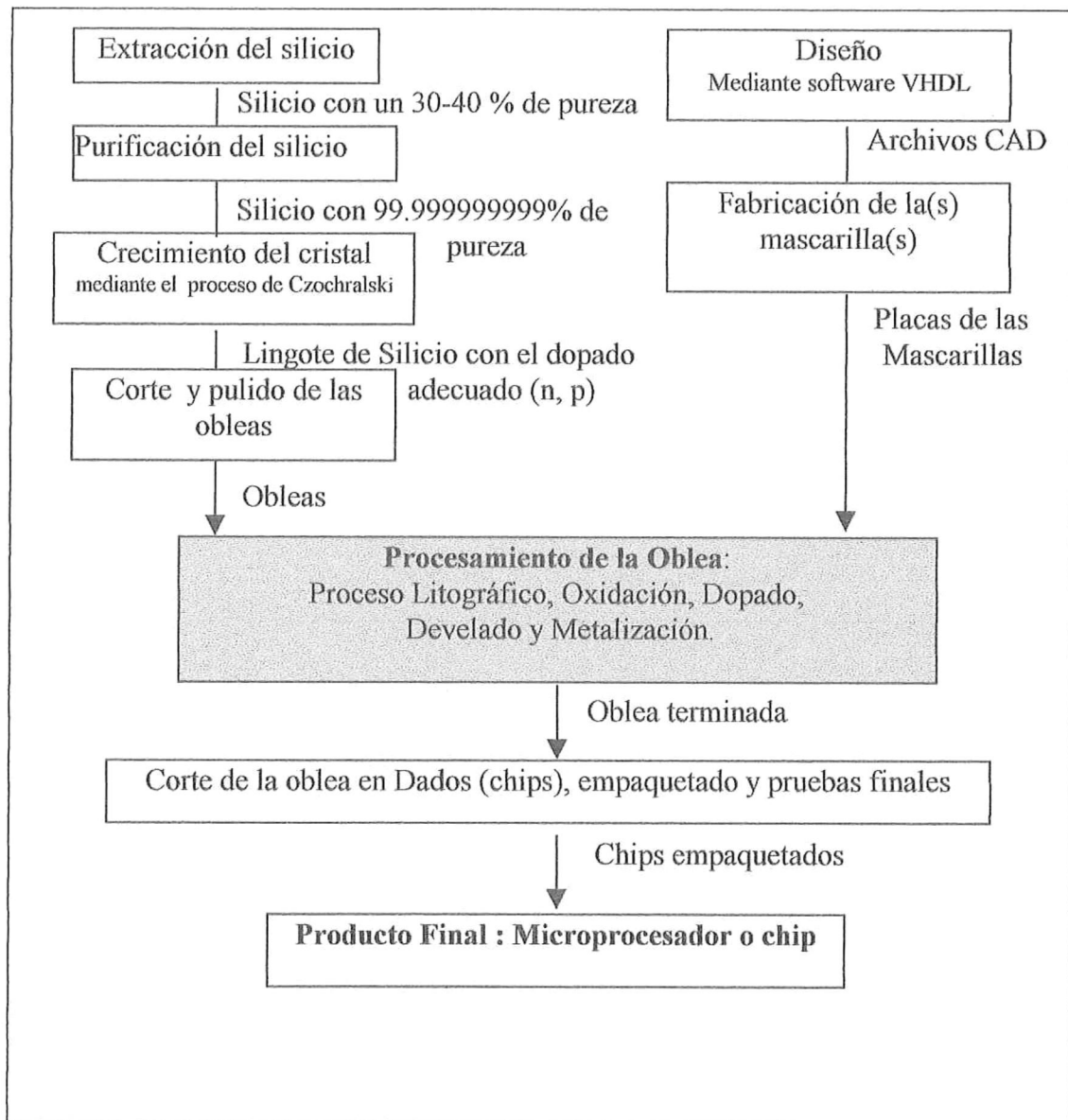


Figura 2.1.1. - Diagrama a bloques del proceso.

Aunque muchos autores de libros sobre el tema de tecnologías de los microprocesadores no consideran a la etapa de extracción del silicio, su posterior purificación y su terminado como lingote de silicio, así como la etapa de diseño y elaboración de las mascarillas, como parte del proceso de la fabricación de un circuito integrado, en este trabajo se considera que estas dos etapas sí forman parte fundamental de dicho proceso. Por lo tanto, como se puede apreciar en el diagrama 2.1, el proceso se inicia paralelamente con la extracción del silicio y del diseño de las mascarillas del circuito.

Aunque en realidad, en muchos casos, las empresas fabricantes de circuitos integrados tienen en sus plantas, o instalaciones, únicamente al departamento ó sección de diseño, el cual tiene la misión de entregar, al de producción, una mascarilla para cada uno de los pasos por los que va a pasar el circuito integrado, y en cambio toma a la oblea como un insumo más, como parte de su materia prima. Esto se debe a que existen en el mercado empresas que se han especializado en la fabricación de obleas de muy alta calidad, lo cual le reduce los costos a las empresas fabricantes de chips, al tiempo que les disminuye el tiempo desde que tienen terminado el diseño en plantillas o máscaras, hasta el momento en que ponen en producción los chips.

El tiempo que toma fabricar un chip desde que se tiene lista la oblea de silicio y las mascarillas, puede variar desde unos pocos días, unos 4 ó 7, hasta un proceso que puede durar dos ó tres semanas, dependiendo de la complejidad del circuito y del número de niveles metalizados que contenga. Mientras más mascarillas lleve el proceso, más tiempo lleva el terminarlo. Esta relatividad de tiempo, se debe también a que los procesos de difusión, oxidación y crecimiento (conceptos que más adelante se explicarán) influyen mucho en la duración total del proceso pues, dependiendo del método utilizado, puede variar desde 15 minutos hasta 2.5 horas para un solo paso del proceso. Debido a que las empresas fabricantes de chips guardan celosamente este tipo de información (el tiempo total que dura el proceso de la fabricación del chip), es que la anterior aseveración fue deducida de la poca información disponible en cuanto a tiempos del proceso y en cuanto a número de pasos para su terminado.

Como un ejemplo histórico, la fabricación del microprocesador 486 con un millón de transistores, necesitó de 39 mascarillas diferentes, donde cada una de ellas es un paso completo del proceso.

2.1.2.- RESÚMEN DEL PROCESO

La siguiente es una descripción altamente simplificada del proceso de la fabricación de un circuito microelectrónico semiconductor, mejor conocido como chip.

La fabricación de un circuito microelectrónico comienza con una oblea de silicio apropiadamente dopada. La superficie de ésta es lijada, pulida al espejo y sujeta a procesos químicos para remover cualquier imperfección de la superficie.

En el siguiente paso, una delgada capa de la superficie de la oblea es convertida a dióxido de silicio. Esta capa, de 1 micra de espesor o menos, está destinada a servir de barrera a los dopantes en el proceso de difusión de los mismos sobre la superficie, es decir, impedir que los dopantes penetren en el silicio. Esta capa de dióxido de silicio puede ser formada de muchas maneras, pero es usualmente hecha mediante la exposición de la superficie de silicio a un vapor de agua en una temperatura de, aproximadamente, 1,100°C por un lapso de una a dos horas. Los detalles del procedimiento determinan la calidad y el espesor de la película de óxido.

El siguiente paso es aplicar al óxido, un barniz fotosensitivo llamado Resist, el cual una vez que es expuesto a la luz y al revelado, se convierte en una película la cual se adhiere al material soporte (óxido) y resiste (de allí su nombre) la acción química. Donde no es expuesto a la luz, se deslava en el revelador. Tal Resist es llamado “resist negativo”; un resist positivo es aquél que se deslava donde fue expuesto y se fija donde no fue expuesto.

RESIST NEGATIVO (EXPUESTO A LA LUZ ULTRAVIOLETA)	RESIST POSITIVO (EXPUESTO A LA LUZ ULTRAVIOLETA)
SE QUEDA	SE DESLAVA

Para cada paso del proceso de difusión, se requiere una máscara o placa fotográfica apropiada. Para este propósito se hace un dibujo a escala, a veces hasta 500 veces el tamaño que va a tener en el chip, de aquellas áreas en el óxido que formarán los “hoyos” o cavidades que serán grabadas ya sea para difusión o para deposición de aluminio —el aluminio es el material conductor que forma las conexiones metálicas entre un elemento y otro del chip—. El dibujo es entonces reducido, al tamaño que tendrá el chip, en una placa fotográfica. Esta placa comprende la mascarilla a través de la cual el resist será expuesto a la luz y revelado. Como resultado, el resist es removido y la película de óxido queda al descubierto en aquellas áreas de la oblea de silicio donde la difusión del dopante tomará lugar. La figura 2.1.2 muestra el comportamiento de los tipos de resist a la exposición de la luz.

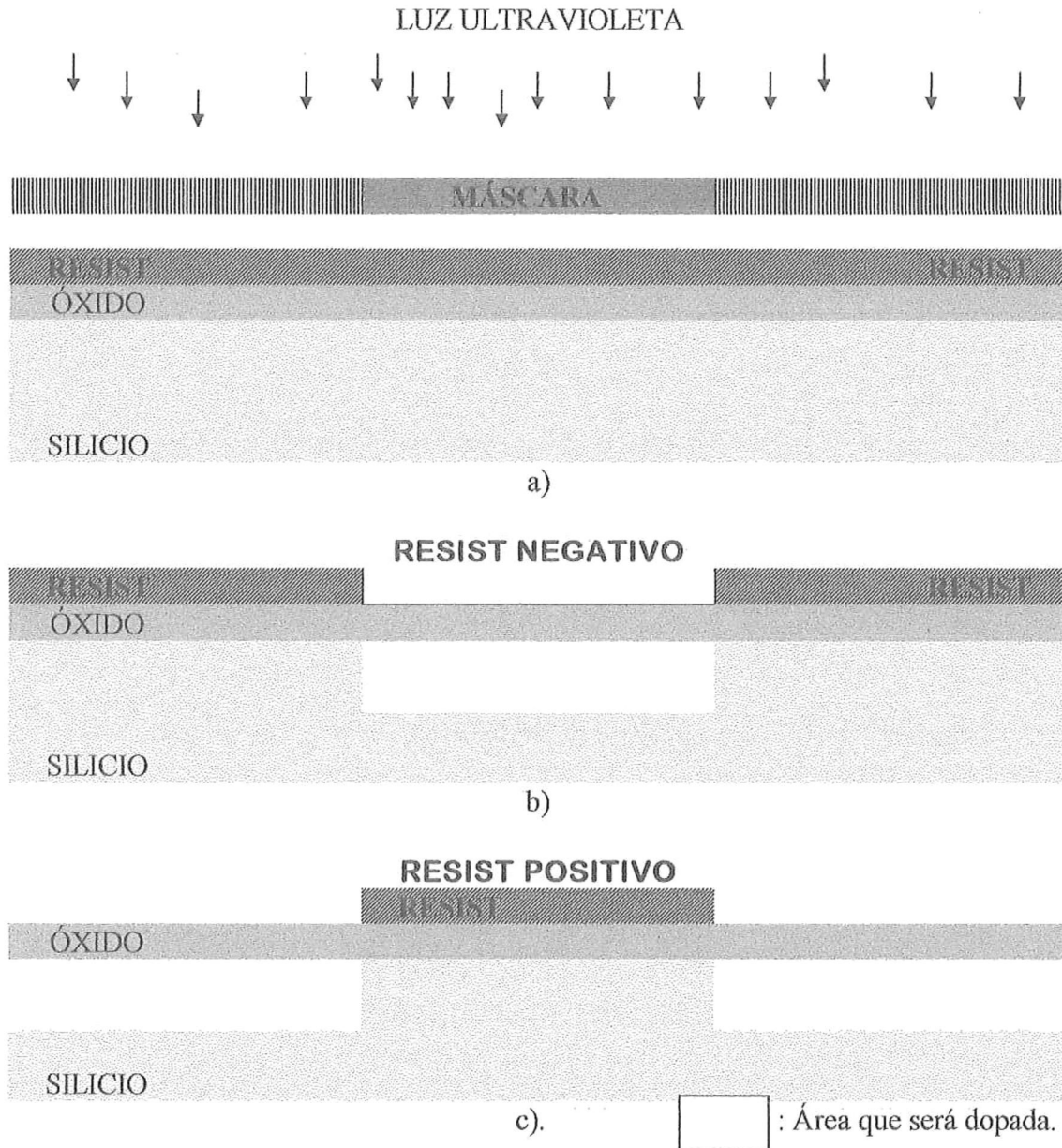


Figura 2.1.2.- Tipos de resist (positivo y negativo).

a).- Silicio cubierto de una capa de dióxido de silicio, la cual tiene colocada encima el revestimiento fotosensible llamado fotoresist. Una luz ultravioleta es incidida sobre la mascarilla colocada entre el emisor del haz de luz y el fotoresist.

b) y c).- El resist negativo (ópositivo en c) permanece sobre el dióxido de silicio, protegiéndolo contra la acción del ácido flourhídrico.

La oblea es entonces sumergida en un removedor químico el cual elimina el óxido y expone el silicio, después de lo cual el resist es completamente removido también.

El producto hasta aquí es la oblea con el silicio con las partes que se desean dopar al descubierto. Listas para el dopaje.

La oblea es ahora colocada en un horno a gran temperatura, generalmente entre los 1000 y 1300°C, y expuesta a una corriente de gas conteniendo átomos del dopante que serán difundidos en el silicio para formar el material *n* o el material *p*, según el dopante que se esté utilizando en este paso.

La profundidad de la difusión, así como la concentración de los átomos de dopado en función de la profundidad, están controladas por los detalles del proceso a alta temperatura. De esta manera, se obtiene un dopado controlado de un área deseada de la oblea de silicio. En algunos procesos no se utiliza la corriente de gas, sino que la oblea es sometida a un bombardeo de iones de los materiales dopantes, esta tecnología es conocida como implantación de iones (Ion Implantation)

El proceso puede ser repetido tantas veces como sea necesario, eliminando la vieja máscara de óxido, formando una nueva película de óxido, aplicando una nueva capa de resist, imprimiendo la nueva placa fotolitográfica y grabando las cavidades en la misma para la siguiente difusión requerida, etc. (recordemos que, en este paso, *grabando* significa desprender o eliminar un material, en este caso el óxido). Todos los componentes del circuito así como las barreras aislantes entre una capa y otra pueden ser difundidas en la oblea siguiendo este procedimiento.

Para completar el circuito, los componentes son interconectados, en lo que se llama capa de metalización, por conductores de aluminio evaporado al alto vacío. En los puntos donde se harán los contactos metálicos se produce una película completa de óxido y se graban las respectivas cavidades de esos puntos. Una gruesa película de aluminio es depositada sobre toda la oblea por evaporación al vacío y el fotoresist es removido. Este aluminio pasa a través de las cavidades formadas en el óxido para hacer contacto con los componentes difundidos. A continuación, la oblea se hornea a una temperatura de 600°C para permitir que el aluminio se mezcle en el silicio.

Para este procedimiento es importante recalcar el significado de la palabra **grabar**, la cual es la traducción más cercana de la palabra en inglés *etch*. Este concepto lo podemos ejemplificar de la siguiente manera: “cuando uno quiere grabar el nombre de una persona en un árbol: debemos eliminar la parte superficial de la corteza del mismo para que quede al descubierto una área nueva de la corteza del tronco y por lo tanto el texto que deseábamos, quede grabado en el árbol por mucho tiempo, si no es que por toda la vida del mismo”. Este grabado, como se mencionó anteriormente, lo realizan los ácidos a los que se ve sujeta la oblea en cada paso del proceso.

Debido a que en la oblea existe un gran número de chips, cada chip recibe la impresión de las respectivas placas fotográficas del patrón, dibujo ó diseño del circuito usado en la fabricación. Cada paso es repetido para formar un arreglo cuadrulado de imágenes idénticas en toda la oblea. Este procedimiento es conocido como una operación “step-and-repeat”: reducir y repetir. De aquí el nombre de los enormes equipos que realizan esta función: **STEPPERS**.

Una vez que la oblea está terminada, ésta es cortada y separada en circuitos ó chips individuales llamados “dados”, los cuales son tomados por un brazo robot y colocados en un encapsulado, se le soldan sus puntos de contacto con las terminales con las cuales enviarán o recibirán señales eléctricas del exterior y son sellados en una solución epóxica o de cerámica. , empaquetados y, finalmente, enviados al cliente.

2.2.- PREPARACIÓN DEL MATERIAL

2.2.1.- EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DEL SILICIO

El silicio es un material semiconductor de color gris claro. Aparece en la naturaleza bajo la forma de Dióxido de Silicio (mejor conocida como Sílice: SiO_2) y de diferentes silicatos. Algunas de sus presentaciones en la naturaleza son en forma de arena común de playa u otros depósitos minerales tierra adentro. Los puntos oscuros que se observan en los granos de arena son los que forman la sílice.

El silicio es el segundo elemento más abundante en la tierra, sólo superado por el oxígeno. Su nombre proviene del griego sílex, el cual es una roca de color gris oscuro o negro.

El silicio se presenta en dos formas alotrópicas: amorfa y cristalizada. No existe libre en la naturaleza, pero son muy abundantes sus óxidos (sílice) y los silicatos (rocas agatizadas) y cuarzitas. Forma el 28% de la corteza terrestre. En sus propiedades químicas se parece al carbono y se puede contar como el elemento central del mundo inorgánico, así como el carbono lo es para el orgánico. El silicio sigue el arreglo de cristal del diamante, pero apenas es tan duro como el vidrio.

La sílice (SiO_2), que se puede encontrar en la naturaleza como arena, cuarzo, pedernal y feldespato, -también conocido como dióxido de silicio ó anhídrido silícico-, es insoluble en agua y resistente a los ácidos, excepto al Fluorhídrico. Esta propiedad química es una de sus características más importantes que se aplica en el proceso de fabricación de los chips: que, mediante el uso de los ácidos o químicos adecuados, se puede eliminar una capa de material dióxido de silicio, permitiendo que se quede o no se remueva el silicio que forma parte del sustrato de la oblea. En la figura 2.2 se muestra una fotografía de un material con cristales ricos en sílice.

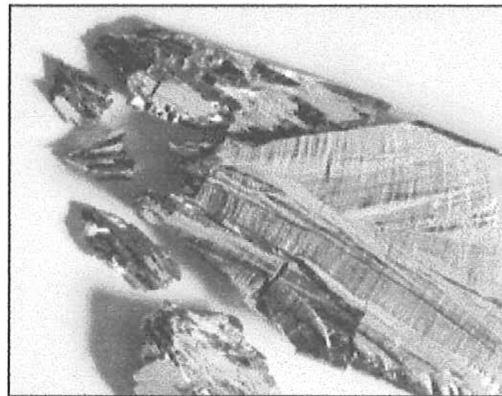


Figura 2.2.- Fotografía de un pedazo de roca con material de cuarzita

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>.

En la tabla 2.1 se muestran algunas de las propiedades químicas más importantes del silicio como elemento, para efectos de este trabajo.

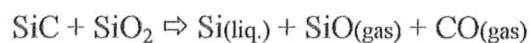
TABLA 2.1. - Propiedades adicionales del Silicio

Propiedad	Valor
Número atómico	14
Peso atómico	28.086
Densidad atómica	4.96×10^{22} átomos/cm ³
Densidad	2.328 g/cm ³
Punto de fusión	1417 (± 4) °C
Valencia	4
Constante dieléctrica	11.7 (± 0.2)

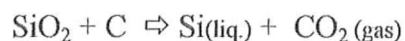
El silicio es extraído de grandes depósitos de cuarzita y de otros minerales ricos en sílice. Estos depósitos tienen la ventaja de estar al aire libre, por lo que es relativamente fácil su explotación. En esta etapa interviene la metalurgia, pues estos depósitos tienen que ser en ocasiones minados para granular las rocas agatizadas ricas en sílice.

En el video se puede apreciar la extracción del material conteniendo sílice (aquí la pureza del material es de un 30-40%), el cual es transportado hasta enormes fundiciones con grandes hornos eléctricos en donde es calentado a altas temperaturas hasta su fusión o derretimiento (a 2000° Centígrados), obteniéndose un material (silicio líquido) el cual tiene una pureza del 98%. Aún así, con ésta pureza, el silicio aún no es útil para su aplicación en la fabricación de circuitos integrados. Esta presentación se puede observar en el video en el momento en que un montacargas deposita una placa de silicio sobre otras placas enfriándose.

Esta reducción de la arena usando coque o carbón se puede representar por la siguiente reacción química básica:



Ó en otros procesos (otras empresas) se da:

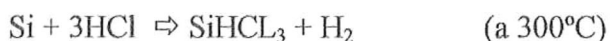


Existen dos exigencias primordiales en la preparación del silicio para los componentes de estado sólido. La primera es una pureza extraordinariamente elevada, con un nivel de impurezas no deseadas inferior a 1 parte en 10^{10} , es decir 99.99999999%, una parte en una mil millonésima, un 99% seguido de 9 nueves.

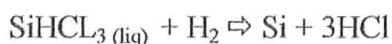
La segunda es que, para que una unión p-n funcione en la forma indicada anteriormente, el silicio debe de tener una estructura cristalina regular, y para ello debe de ser convertido a lo que se le denomina *forma monocristalina*.

El primer paso en la preparación de un silicio apto para el uso como semiconductor es reducir la sílice, calentándola con carbón (coque) en un horno eléctrico. El silicio resultante tiene un grado de pureza, como se mencionó líneas arriba, de aproximadamente 98%. El paso siguiente es purificar ese material. Para ello se le transforma en un compuesto tal como un haluro (en algunos casos con SiCl_4 : tetracloruro de silicio), el cual se purifica a lo largo de repetidas destilaciones. Acto seguido, el haluro purificado se transforma de nuevo en silicio por medio de reducciones al hidrógeno.

Algunas empresas utilizan otras tecnologías para la obtención del silicio: una vez que se obtiene el silicio puro al 98%, este es pulverizado nuevamente, el cual es calentado a 300°C produciendo triclorosilano mediante la siguiente reacción química:



Enseguida, se destila el triclorosilano a temperatura ambiente (room temperature) y reducido en hidrógeno, mediante la siguiente reacción:



El silicio resultante es depositado en un tubo calentado eléctricamente, y una vez que se deja enfriar es despegado, en formar de pedazos.

El resultado de estos procesos químicos de transformaciones y destilaciones es la separación y remoción de impurezas, dejando un material de silicio policristalino, químicamente puro.

Hasta aquí, el silicio ya está altamente purificado y en estado policristalino, listo para ser usado en el crisol y pasar por el “Proceso de Czochralski”. Esta presentación se puede observar en el video en el momento que una persona con las manos enguantadas saca unos pedazos de un material metálico gris oscuro para

depositarlos en un contenedor con aspecto de olla. Este contenedor es un crisol donde será derretido el material. Este material y el contenedor se muestran en la figura 2.3.

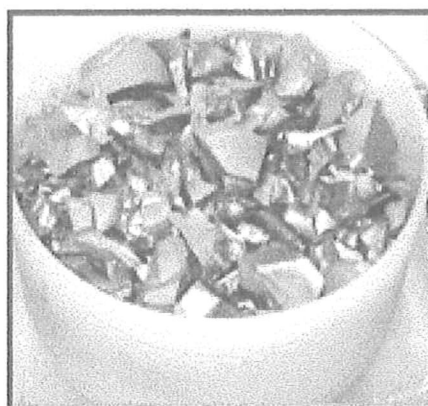


Figura 2.3.- Fotografía de un contenedor con silicio purificado.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

2.2.2.- PROCESO DE CZOCHRALSKI

A manera de un rápido resumen diremos que, en este proceso, el silicio, junto con la cantidad adecuada del material dopante (boro ó fósforo) se deposita en el interior de un contenedor en el cual está un crisol. Este crisol, ya con el material en su interior, y en una atmósfera de vacío más gas argon, es calentado por inducción hasta una temperatura de 1420°C para derretir el material y es girado para que logre una uniformidad en su distribución, es decir, se logre una mezcla uniforme. Hasta aquí se obtiene un material de silicio policristalino dopado ya sea tipo-p ó tipo-n.

Posteriormente es insertada en la mezcla una varilla de silicio puro monocristalino, girando a un hertz, esto es, a una revolución por segundo. Esta varilla recibe el nombre de **crystal semilla**, por que de él va a nacer o crecer el material deseado: Silicio Monocristalino.

Una vez que se inserta muy lentamente el cristal semilla en la mezcla, los átomos de silicio policristalino que se encuentran en la frontera entre la semilla y la mezcla caliente, se van adhiriendo por diferencia de temperatura a la semilla, pero siguiendo exactamente el patrón de la estructura cristalina de la semilla, es decir, ésta comienza a crecer producto del material que se le va pegando, en su constante rotación, del resto del material de silicio derretido convirtiéndose de silicio policristalino en silicio monocristalino.

Al mismo tiempo que la semilla sigue con su rotación, ésta es jalada hacia fuera de la mezcla, - por esto a este proceso se le llama “Técnica *Pulling* de Czochralski”-, el producto es la formación de un lingote de silicio similar en aspecto a un embutido de bolonia o salami. Las dimensiones tanto de la longitud del lingote como del diámetro del mismo varían de acuerdo a la tecnología utilizada. A continuación se describe más detalladamente el proceso. La figura 2.4 muestra un lingote terminado

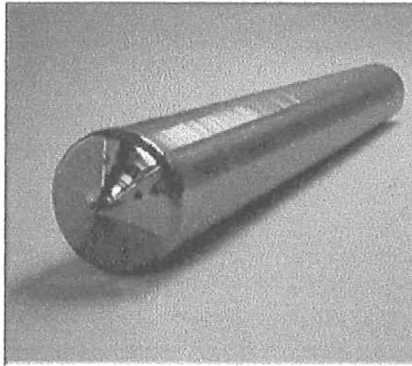


Figura 2.4.- Lingote de silicio terminado.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

El llamado método, proceso o técnica de Czochralski es en el que, en un crisol (no reactivo, de cuarzo), se depositan pedazos de silicio policristalino de alta pureza (Figura 2.3) y se le agrega una cantidad cuidadosamente controlada de una impureza dopante deseada tal como boro o fósforo.

Para lograr una concentración de dopante común de 10^{15} átomos/cm³, se le agrega 0.1 miligramos del dopante por cada kilogramo de silicio.

En la figura 2.5 se muestra un diagrama del interior de un horno en un *Puller de Czochralski*.

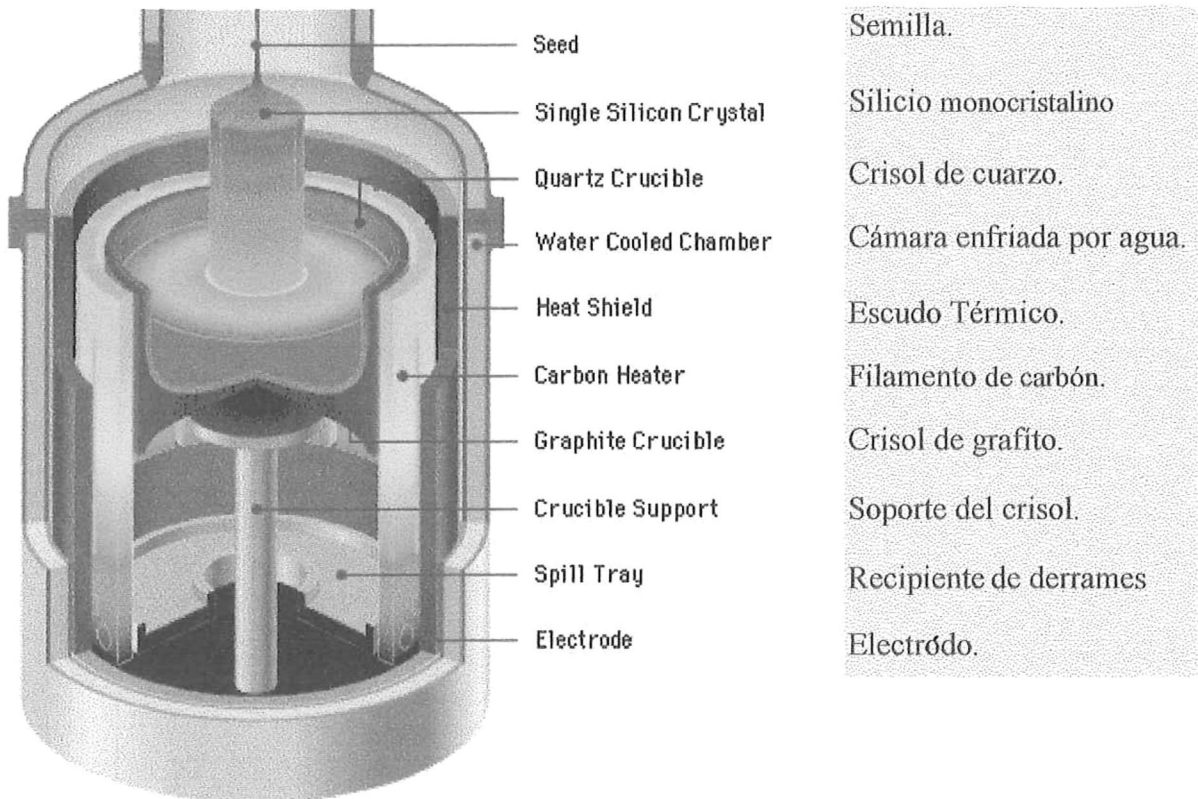


Figura 2.5.- Diagrama de una vista interior de un horno de Czochralski. A la derecha se encuentra la traducción de las partes que componen el horno.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Este material es derretido y mantenido a una temperatura justo arriba del punto de fusión, en una atmósfera inerte, -generalmente gas argón-, mediante el uso de calentamiento utilizando bobinas resistivas calefactoras de grafito (como las planchas) o por inducción, usando ondas de radio frecuencia (RF).

A continuación, un cristal semilla de alta calidad con la orientación cristalina deseada es colocado en la punta de una flecha, y girando a una vuelta por segundo, es bajada lentamente e introducida en la mezcla fundida.

Una vez que la semilla ha sido introducida en la mezcla, inicia la extracción de la varilla, siendo elevada lentamente, -en algunos procesos este paso dura de 24 a 30 horas, a una velocidad de 2.54cm. por hora-, mientras continúa girando. En la figura 2.6 se aprecia un cristal siendo extraído de la mezcla y formando el lingote de silicio.

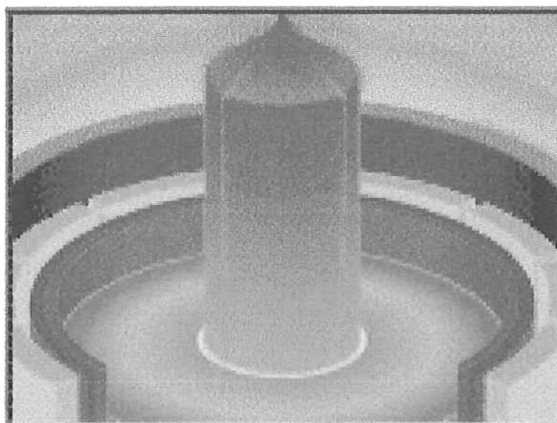


Figura 2.6.- Imagen de un cristal semilla siendo extraído de la mezcla de silicio fundido

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Es aquí donde el derretimiento y re-enfriamiento del silicio en la interface con la semilla, permite que se forme el cristal, siguiendo exactamente la estructura cristalina de la semilla introducida, a la cual se le va adhiriendo material y se dice que crece (figura 2.6). Una vez que el lingote alcanza su longitud terminal se deja enfriar a temperatura ambiente. El producto de este proceso se puede observar en la figura 2.4

Como se mencionaba líneas arriba, tanto el grosor (diámetro) del cilindro así como su longitud varían de acuerdo a la tecnología utilizada. A medida que las tecnologías de crecimiento de cristal se han desarrollado, los diámetros de los cristales se han incrementado progresivamente desde unas pocas pulgadas en los años sesenta y setenta, hasta un diámetro de 300mm en nuestros días, con desarrollos de 400mm en etapa experimental, es decir lingotes de silicio con un diámetro de 40 centímetros!.

La longitud del lingote depende del continuo suministro de silicio fundido. En un principio, en los años sesenta, se lograron lingotes con una longitud de unos treinta centímetros, mientras que actualmente se han logrado lingotes de hasta 2 metros. Esto se ha logrado con el uso de crisoles dobles: en uno se inserta la semilla y el otro provee un suministro mayor de silicio fundido. La figura 2.7 muestra una imagen con lingotes de silicio de 2 metros.



Figura 2.7.- Lingotes de silicio de 2 metros.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Los *parámetros críticos* en el crecimiento de un cristal son: las tasas de rotación y de extracción de la semilla y, la pureza y uniformidad de la mezcla. Los equipos en los cuales se lleva a cabo el proceso de Czochralski llevan el nombre en inglés de *Pullers*, pues lo que hacen es jalar hacia arriba el lingote para que se enfríe. Actualmente se utilizan Pullers de cristal altamente computarizados, que eliminan al máximo la intervención del hombre. Sin embargo, como en el mejor de los procesos, también en este proceso de crecimiento ocurren imperfecciones o dislocaciones en los cristales que pueden causar problemas posteriores en el proceso de impresión y grabado.

Una vez que se tiene el lingote, este es pulido en su superficie como cuando se lija un pedazo de leño de árbol para producir una madera cilíndrica. Aquí se logra el diámetro uniforme. El lingote es cortado en sus extremos con una sierra de diamante,

dejando los extremos (punta y cola -se dicen en el argot de los técnicos) planos.

Ya que se tiene el lingote pulido y cortado, es necesario obtener su plano cristalográfico, es decir, como el lingote es redondo en su diámetro se necesita conocer la orientación de los cristales, para esto se utilizan técnicas de rayos x. El conocer la orientación de los cristales es importante para las etapas de corte, la de grabado y la de corte de la oblea en dados. Imagínese esto como el encontrar la veta de la madera para poder lijarla.

A continuación, una vez que se encontró el eje de crecimiento de los átomos, el lingote es cortado en uno sus lados, paralelamente al eje de crecimiento, a esto se le llama “plano”, y es la razón por la cual las obleas parecen estar chatas de un lado y no todas redondas o completamente circulares: Porque ésta es una referencia. Este plano será usado en todo el proceso de fabricación como una referencia para el alineamiento ó convergencia durante la impresión o durante las pruebas con las puntas eléctricas, así como para el corte del lingote en obleas, como se mencionó líneas arriba.

Aparte de la producción de lingotes de silicio monocristalino mediante el proceso de Czochralski, existe otro que recibe el nombre de **Zona Flotante**, pero fue abandonado en los años setenta cuando no se logró obtener diámetros mayores, además que probó ser extremadamente inestable e impredecible, pues cualquier vibración durante el proceso hacía fallar toda la producción. El diámetro que se logró con este método fue de 30-50mm. En la figura 2.8 se observa un diagrama de este método.

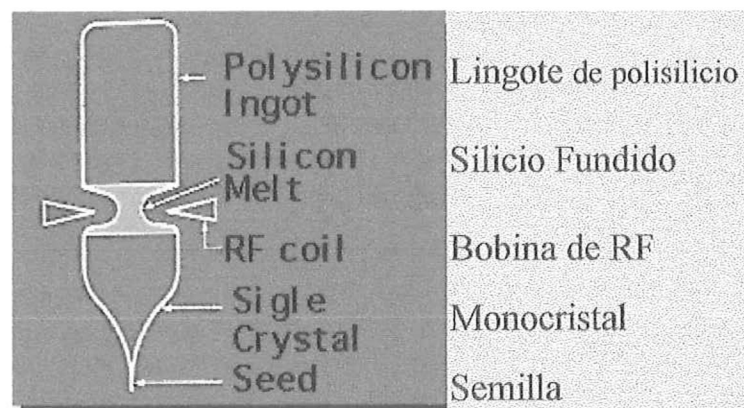


Figura 2.8.- Método de Zona Flotante.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

2.2.3.- GENERACIÓN DE LA OBLEA (wafer)

Después que se produce el plano en el lingote, éste pasa a ser cortado en rodajas o rebanadas (tal como se ve cuando se pide salchichón en el supermercado), las cuales reciben el nombre de obleas, con un grosor de 5 a 10 milímetros, utilizando sierras de diamante. Actualmente en algunas empresas se utiliza el corte mediante sierras de alambre de diamante, en vez de discos, lo cual reduce sensiblemente la vibración durante el corte, y por consiguiente la oblea es producida con menos rizado. Es como si cortáramos la bolonia con un alambre fino, en vez de hacerlo con un cuchillo desafilado. La figura 2.9 muestra una cortadora de lingotes de silicio, produciendo obleas de 5 a 10 mm de espesor.

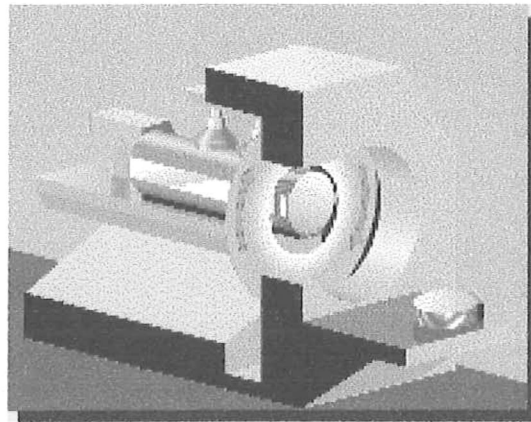


Figura 2.9.- Diagrama de una cortadora.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Las obleas cortadas son ahora sujetas a un proceso de preparación para eliminarles todo el rizo de la superficie, imperfecciones sobre la misma y cualquier otro daño causado durante el corte del lingote.

En el primer paso la oblea es lijada (pulida mecánicamente) en un proceso llamado pulido (del inglés lapped), en el cual una oblea pasa por varias etapas. Durante este proceso se usan diferentes grados de compuestos de pulido para producir obleas con superficies sucesivamente más suaves, -tal como cuando vamos a lijar una madera rústica, empezamos con la lija mas gruesa, seguimos con una de grano más fino, así hasta llegar a usar una que deje la superficie lo suficientemente lisa a nuestro interés-.

La primera etapa es una máquina que le aplica un lijado grueso. Posteriormente, pasa a otra máquina donde la oblea es colocada junto con otras. Se les aplica una solución abrasiva de polvo de alúmina (Al_2O_3) y agua, a través de una tolva y la máquina comienza a girar para realizar su función de pulido, sólo que la placa (o “plato”) sobre la que están las obleas, que gira independientemente en un sentido, está sobre un portador orbitando en sentido contrario, lo cual crea una rotación de 4-vías y tiene como producto una oblea con una superficie muy lisa, entonces se dice que la oblea está pulida al espejo. Este procedimiento a permanecido más o menos sin cambios desde 1962 hasta el presente. La figura 2.10 muestra un diagrama de una máquina pulidora de 4-vías.

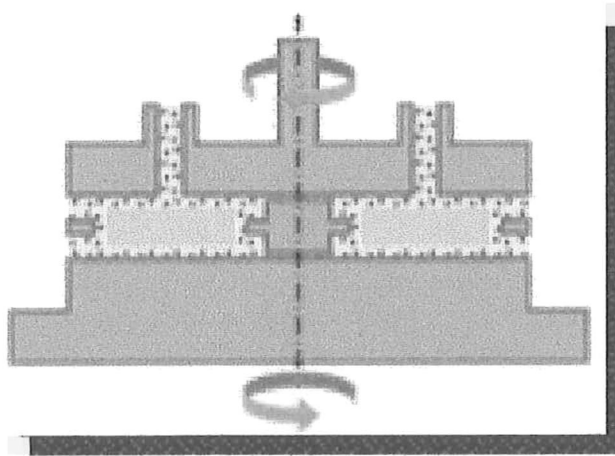


Figura 2.10.- Movimientos de pulido.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

La siguiente fase para producir superficies de alta calidad para la impresión, es un proceso de grabado químico del silicio, para remover cualquier residuo, microgrieta o daño superficial que haya sido introducido o dejado por la alúmina abrasiva del paso anterior. Este grabado es hecho químicamente usando una mezcla corrosiva de ácido nítrico y solución de ácido acético glacial. Esta técnica es comúnmente usada en Japón, a diferencia de una mezcla cáustica en Estados Unidos, que utiliza una solución a base de Hidróxido de sodio (NaOH).

Una vez que la oblea ha pasado por la solución disolvente, es pasada por agua, y posteriormente por agua destilada. La figura 2.11 muestra este proceso. Para secar la oblea, ésta se coloca debajo de una lámpara en lo que se llama *horneado suave*, para eliminar la humedad de la superficie y permitir una buena adhesión del resist. Adicionalmente a la oblea se le aplica un promotor de resist, es decir, se le prepara para recibir el mismo, de igual manera que a los autos se les da una capa de prime antes de la pintura final –se les praiméa, se dice comúnmente–.

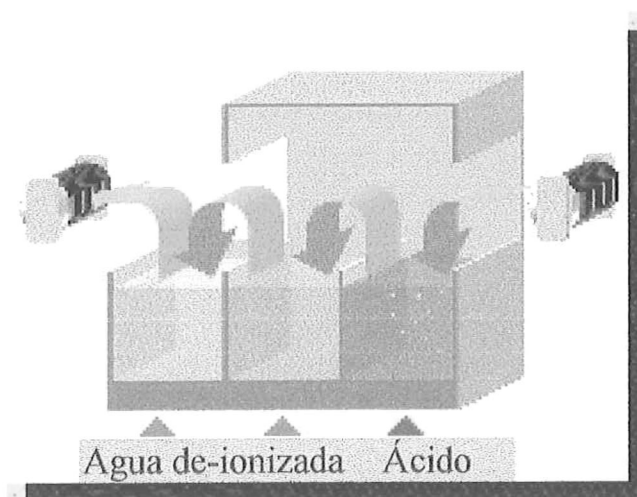


Figura 2.11.- Proceso de grabado químico.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Hasta aquí la oblea ya está lista para ser enviada a la siguiente fase del proceso, generalmente a un cliente que fabrique circuitos integrados.

A continuación, y siguiendo con el diagrama 2.1 (diagrama a bloques del proceso) está el proceso mediante el cual un circuito integrado es diseñado y se obtiene como producto final las mascarillas de Rubylith, que contendrán el patrón o dibujo del circuito a fabricar, para ser usadas en las siguientes fases del proceso.

2.3.- ETAPA DE DISEÑO

En esta etapa, el fabricante de chips integra un equipo de ingenieros en diseño de circuitos para que lleven a cabo un diseño óptimo de las funciones a realizar por el chip.

Este personal altamente entrenado y con experiencia, utiliza software CAD para realizar el diseño del circuito. Dicho software es el VHDL.

VHDL es un acrónimo del inglés *Very high speed integrated circuit Hardware Description Language*: Leguaje de Descripción de Hardware para circuitos integrados de muy alta velocidad.

2.3.1.- PERO QUE ES VHDL?

VHDL es un lenguaje de programación que ha sido diseñado y optimizado para describir el comportamiento de circuitos y sistemas digitales. Como tal, combina las siguientes características:

.- Es un lenguaje de modelación y simulación: VHDL tiene varias características apropiadas para describir (a un nivel de detalle increíble) el comportamiento de componentes electrónicos, que van desde simples compuertas lógicas hasta microprocesadores completos y chips de aplicaciones específicas. Las características del VHDL permiten que los aspectos eléctricos de un circuito (tales como los tiempos de subida y bajada de las señales, los retardos a través de las compuertas y la operación funcional) sean descritos con gran precisión. Los modelos resultantes de la simulación con VHDL pueden ser usados como bloques constructores en circuitos más grandes (usando descripción esquemática, de diagramas de bloques o VHDL de nivel sistema) para propósitos de simulación.

.- Un Lenguaje de diseño de entrada: Exactamente igual que los lenguajes de programación de alto nivel permiten que los conceptos de diseño sean expresados como programas de computadora, VHDL permite que los comportamientos de circuitos electrónicos complejos sean capturados en un sistema de diseño para realizar una síntesis de circuitos automática o para una simulación del sistema. Al igual, como ocurre en Pascal, C y C++, VHDL incluye características útiles para las técnicas de diseño estructurado, y ofrece una gran variedad de funciones de control y representación de datos. A diferencia de estos lenguajes de programación, VHDL provee características que permiten que sean descritos eventos concurrentes. Esto es

importante debido a que el hardware descrito usando VHDL es inherentemente concurrente en su operación.

.- Un lenguaje de prueba: Uno de los aspectos más importantes (y menos utilizado) del VHDL es su habilidad para capturar las especificaciones de desempeño para un circuito, en una forma comúnmente llamada banco de pruebas (test bench). Los bancos de prueba son descripciones VHDL de los estímulos al circuitos y sus correspondientes respuestas que verifican el comportamiento de un circuito en el tiempo. Los bancos de prueba deben ser parte integral de cualquier proyecto VHDL, y deben ser creados en paralelo con otras descripciones del circuito.

2.3.2.- Breve historia del VHDL.

El VHDL fue desarrollado a principio de los '80 como un programa piloto para un proyecto de investigación en circuitos integrados de alta velocidad (VHSIC) patrocinado por el Departamento de la Defensa de los Estados Unidos. Durante este programa, los investigadores confrontaron la ardua tarea de describir circuitos de enorme escala (para su tiempo) y el manejo de problemas con el diseño de circuitos muy grandes que envolvían a múltiples equipos de ingenieros. Con herramientas de diseño sólo a nivel compuerta disponibles en ese entonces, se hacía claro que se necesitaban desarrollar herramientas y métodos de diseño mejores y más estructurados.

Para lograr esta meta, un grupo de ingenieros de tres compañías –IBM, Texas Instruments e Intermetrics- fueron contratados por el Departamento de Defensa para completar las especificaciones y la implementación de un nuevo método de descripción de diseño basado en lenguaje. La primera versión publicable disponible de VHDL, la versión 7.2, fue hecha en 1985.

2.3.3.- El Estándar IEEE 1076-1987

En 1986, le fue presentada a la IEEE (instituto de Ingenieros en Eléctrica y Electrónica) una propuesta para estandarizar el lenguaje, lo cual hizo en 1987, después de que le fueran hechas algunas modificaciones y mejoras sustanciales por un equipo de representantes comerciales, gubernamentales y académicos. El estándar resultante, IEEE 1076-1987, es virtualmente la base de cada producto de simulación y síntesis que se vende hoy en día. Una versión actualizada y mejorada del lenguaje fue liberada en 1994 (IEEE 1076-1993) y los vendedores de herramientas VHDL han respondido agregando estas nuevas características a sus productos.

2.3.4.- ¿Cómo es usado VHDL?

VHDL es un lenguaje de programación de propósito general. Como tal, existen varios puntos en todo el proceso de diseño en los cuales VHDL puede ayudar. Como por ejemplo:

Para especificaciones de diseño.- VHDL puede ser usado al mismo tiempo que se está diseñando a alto nivel, para capturar el desempeño y los requerimientos de interface de cada componente en un sistema grande. Esto es particularmente importante para grandes proyectos que involucran equipos de trabajo de muchos miembros. Usando un planteamiento para diseñar de arriba-hacia-abajo, un diseñador de sistemas puede definir la interface para cada componente del sistema, y describir los requerimientos de aceptación de aquellos componentes en la forma de un banco de pruebas de alto nivel. La definición de la interface (típicamente expresada como una declaración de entidades VHDL) y las especificaciones de desempeño pueden ser entonces pasadas a otros miembros del equipo de diseño para su complementación.

En la captura del diseño.- La captura del diseño es la fase en la cual los detalles del sistema son introducidas (capturados) en un sistema de diseño basado en computadora (CAD). En esta fase se puede expresar el diseño (ó parte de este) como un diagrama esquemático (ya sea a nivel tarjeta o puramente funcional) o usando descripciones VHDL. La captura en diagrama esquemático es exactamente como se hace con el programa *Draft* del OrCAD®.

Para simulación.- Una vez hecha la captura utilizando CAD, probablemente se desea hacer una simulación de la operación del circuito para encontrar si cumple con los requerimientos funcionales y de temporización desarrollados durante las especificaciones. En esta tarea, VHDL es muy útil pues puede hacer las pruebas de banco necesarias.

Los programas que son más comunes en el diseño de circuitos integrados son de los llamados lenguajes PLD (Programmable Logic Devices) tales como PALASM, ABEL, CUPL y, naturalmente VHDL.

Existen otros lenguajes de descripción de hardware, uno de ellos muy ampliamente utilizado como lo es VERILOG[®] HDL, que tiene un buen número de seguidores que lo usan tanto para simulación como para síntesis. Se ha convertido en el lenguaje de facto para el diseño de dispositivos ASICs (application Specific Integrated Circuits). Una de las características de Verilog es su estándar abierto y muy transportable de un lenguaje a otro, inclusive C o C++. La sintaxis de programación con Verilog es muy similar a C, mientras que la de VHDL es más parecida a Pascal o Ada.

Para aquellos interesados en lenguajes VHDL se les recomienda la dirección en internet: http://www.acc-eda.com/h_intro.htm

2.3.5.- RESUMEN DEL PROCESO DE DISEÑO

Una vez que el departamento de diseño ha obtenido el circuito en un diagrama (generalmente de una dimensión de 1x1.20mts.), en una hoja de material similar al de los acetatos, se utilizan reducciones sucesivas de alta resolución hasta obtener una máscara fotográfica apropiada. En esta máscara se encuentra el patrón o dibujo de cada uno de los pasos del proceso (difusión, contactos, interconexión, etc.), generados con el software VHDL.

Resumiendo: el diseño y distribución iniciales de un circuito integrado se llevan a cabo en una escala cientos de veces mayor que las dimensiones deseadas finalmente para el formato del circuito en la oblea. La distribución inicial de un C.I. se lleva a cabo normalmente en una escala ampliada en el margen de 250:1 a 500:1. Esta distribución es una composición de distintas plantillas de máscaras correspondientes a las distintas fases de enmascaramiento asociadas al proceso de fabricación.

Cada plantilla de máscara es cortada en una capa de laminado plástico dimensionalmente estable, llamado *rubylith*, que consiste en una base transparente de milar cubierta con una sobrecapa opaca separable de Rubí, que puede ser cortada con una navaja afilada y separada para formar áreas transparentes sobre un campo opaco. Después se utilizan técnicas fotográficas para reducir a cada una de las máscaras a las dimensiones finales del circuito.

La forma reducida de la máscara es después reproducida sobre la diapositiva de un cristal transparente usando un proceso fotográfico repetitivo. El último resultado de este proceso es una máscara final que contiene múltiples imágenes del modelo del circuito para cubrir (en cuadrulado) toda la superficie de la oblea de silicio que debe ser enmascarada. Por lo tanto, un gran número de circuitos idénticos pueden ser aplicados sobre la superficie de la oblea en una única operación de enmascaramiento. Cuanto mayor es el número de circuitos que puedan ser fabricados al mismo tiempo y en la misma oblea, menor es el costo del circuito individual.

Hasta este momento tenemos a la oblea lista para que le sea aplicada el Resist y también tenemos las máscaras de los diferentes pasos del proceso. A continuación y siguiendo las etapas del diagrama 2.1, se inicia el procesamiento de la oblea: Oxidación, alineación, exposición, dopado, grabado y metalización.

2.4.- PROCESAMIENTO DE LA OBLEA.

2.4.1.- Introducción.

Antes de iniciar con la descripción del procesamiento de la oblea, definiremos algunos conceptos importantes: uno es el **Proceso o Tecnología Planar** (plannar Process), otro es **Crecimiento Epitaxial** (Epitaxial Growing), **Difusión en el Estado Sólido**, **Oxidación**, y, por último, el **Proceso Litográfico**

2.4.2.- La Tecnología Planar

El proceso planar del silicio consiste en la introducción selectiva de átomos dopantes en pequeñas áreas del silicio de una oblea, de manera que se formen regiones de material *tipo-p* y *tipo-n*.

La tecnología es planar debido a que la fabricación es realizada por procesos llevados a cabo en una **superficie plana**.

Los átomos dopantes son típicamente agregados depositándolos sobre la superficie de silicio y posteriormente difundiendo en aquellas regiones del silicio que no fueron protegidas por una capa de dióxido de silicio. Debido a que los átomos dopantes son introducidos desde la superficie y que la difusión típica es del orden de unas cuantas micras (o menos), las regiones activas de los dispositivos semiconductores son por sí mismas de unas cuantas micras del espesor de la superficie de la oblea. El resto de la oblea (en el orden de cientos de micras) sirve simplemente como un soporte mecánico para la importante región de la superficie.

Una ventaja crucial de la tecnología planar es que cada porción del proceso de fabricación (anterior a la conexión de los conductores con el exterior), es aplicada a la oblea entera al mismo tiempo. De esta manera los átomos dopantes pueden ser introducidos simultáneamente en varias miles de pequeñas partes de la oblea (que van a ser los dispositivos tales como transistores, resistencias, capacitores, etc.), separadas por distancias de micras.

Debido a que los costos de procesamiento de una oblea no cambian significativamente con su tamaño o por las dimensiones de las regiones difundidas, el uso de obleas de mayor diámetro, así como la disminución de las dimensiones de las regiones, minimizan enormemente el costo de procesamiento por dispositivo.

La fabricación simultánea de varios dispositivos semiconductores relacionados y sus interconexiones en la misma pieza de semiconductor resulta en un circuito entero en una hojuela (chip) de silicio. Este tipo de elementos, llamados *circuitos integrados*, evolucionaron de la capacidad inherente del proceso planar de fabricar muchos dispositivos al mismo tiempo. En la siguiente sección se mostrarán los pasos de fabricación más importantes del proceso planar.

Proceso Planar

- 1.- Formación de una capa protectora de óxido de silicio.
- 2.- Impresión fotográfica del patrón del circuito.
- 3.- Eliminación selectiva del óxido.
- 4.- Deposición de los dopantes en la superficie de la oblea.
- 5.- Difusión de los dopantes depositados hacia las regiones expuestas del silicio.

Este proceso determina las ubicaciones o colocaciones de los dopantes en la superficie de la oblea y sus profundidades de penetración dentro de las primeras micras de la superficie de la oblea. A su vez, esta ubicación de los dopantes determina las características de los dispositivos fabricados (dispositivos *n-p-n*, etc.)

2.4.3.- Crecimiento Epitaxial.

Epitaxial, derivado de la palabra griega que significa “*colocado encima*”, es una técnica de crecimiento en la cual la estructura cristalina de un sustrato de silicio es extendida (verticalmente) por la colocación de nuevas capas de átomos, siguiendo precisamente la estructura cristalina del sustrato. Las capas adicionales se forman por *deposición en fase vapor* en un reactor epitaxial (a este proceso se le llama CVD: Chemical Vapor Deposition).

Controlando las velocidades de deposición e introduciendo cantidades controladas de impurezas en la corriente del gas portador, pueden controlarse el grosor y la resistividad de la capa depositada.

En otras palabras, en la fabricación de estructuras de estado sólido, a menudo se desea formar una capa muy fina de silicio monocristalino (con ciertas propiedades de conducción), sobre la superficie de la lámina de silicio. El proceso empleado para esto es el llamado *crecimiento epitaxial*, con el cual se obtienen capas de unas cuantas

micras de espesor. La placa inicial debe de ser monocristalina y poseer la requerida orientación del cristal, y recibe el nombre de *sustrato*.

Al hacer pasar burbujas de hidrógeno a través de un compuesto volátil de silicio, tal como el tetracloruro de silicio (SiCl_4), éste se evapora. Entonces se conduce la mezcla de vapor e hidrógeno a una cámara de reacción, donde el sustrato de silicio es calentado hasta cerca de los 1200°C . El tetracloruro de silicio se disocia (es decir, se separa) y el silicio se deposita sobre la superficie de la placa caliente (oblea) formando la capa epitaxial, la cual crece a razón de **1 micra por minuto**, aproximadamente. Para controlar la conductividad de la capa de epitaxial y conseguir el silicio tipo-p o el tipo-n deseado, como se mencionó líneas arriba, se añade a la corriente de hidrógeno y vapor de tetracloruro de silicio, el vapor del material deseado (boro o fósforo). La superficie de la capa epitaxial se adapta con bastante exactitud a la superficie del sustrato de silicio, no siendo necesaria ninguna preparación adicional para los procesos subsiguientes.

Se han desarrollado distintos sistemas para el crecimiento de capas epitaxiales. Actualmente los sistemas más comúnmente utilizados son los de tubo abierto, en los que el silicio es depositado en la superficie de las obleas calentadas por la reacción del hidrógeno con el tetracloruro de silicio o por la descomposición del silano (SiH_4). La figura 2.12 es el diagrama de un reactor u horno de difusión de crecimiento epitaxial típico.



Figura 2.12.- Diagrama de un horno de difusión.

Cortesia de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Como se mencionó anteriormente, la resistividad de las capas depositadas puede controlarse mediante la introducción de cantidades dosificadas de impurezas del tipo n o del tipo p , en el gas portador.

El SiCl_4 es una fuente barata de silicio, fácil de purificar y no tóxico; sin embargo, requiere de temperaturas relativamente altas, lo que origina una considerable redistribución de las impurezas previamente introducidas.

Otro proceso de crecimiento epitaxial que ha obtenido una considerable importancia es el que está basado en la descomposición pirolítica del silano (SiH_4) en Si y H_2 . El inconveniente de este proceso es que el SiH_4 es altamente tóxico y de difícil manejo. Sin embargo este inconveniente está compensado por una temperatura inferior en el proceso.

Puesto que la pureza y perfección cristalina de la capa epitaxial dependen en gran parte de las condiciones superficiales del sustrato, la limpieza de las pastillas (obleas) de sustrato es muy importante. Esta limpieza se efectúa normalmente en las cámaras de reacción, mediante ácido clorhídrico en fase gas.

De modo distinto a como se da en el proceso de difusión (en el cual el material es depositado sobre zonas muy concretas, muy localizadas), el crecimiento epitaxial tiene lugar por la adición uniforme de capas atómicas en todo el sustrato, en toda la oblea. Así, las impurezas del dopante se distribuyen de manera uniforme sobre la capa epitaxial, y no muestran un gradiente significativo de concentración.

El proceso de crecimiento epitaxial tiene lugar a temperaturas comparables con las halladas durante las distintas fases de la difusión. Consecuentemente, cuando la resistividad de la capa epitaxial es diferente de la resistividad de la base (y aquí entiéndase *resistividad* por el tipo de material semiconductor: sea n ó p), puede tener lugar alguna redistribución de las impurezas debido a intercambios de impurezas por difusión. Es decir, la misma temperatura a la que es sujeta la oblea, provoca que se dé un intercambio de átomos de una región a otra, lo que recibe el nombre de redistribución.

2.4.4.- DIFUSIÓN EN EL ESTADO SÓLIDO.

La difusión en el estado sólido es el proceso mediante el cual se logra la introducción de las impurezas de *tipo p* o de *tipo n* en la placa de silicio. Para llevar esto a cabo, es necesario calentar el silicio hasta una temperatura elevada, entre 800 y 1200° C, en presencia de la densidad exacta de átomos de la impureza deseada, y, aún entonces, la introducción de estos es muy lenta –un valor usual es de 2.5 micras por hora. Debido a la posibilidad de modificar las propiedades de conducción de capas muy finas con gran precisión, la difusión es un proceso fundamental en la fabricación de microprocesadores y otros circuitos integrados.

En la práctica, este proceso se lleva a cabo frecuentemente en dos etapas. La primera consiste en el calentamiento de la placa de silicio en (un horno con) una atmósfera del vapor de la impureza, con el fin de formar una concentración elevada de impurezas en la superficie. Este paso se llama *sedimentación*. La placa es entonces trasladada a otro horno, donde se calienta a una temperatura mayor, para que los átomos de la impureza que se hallen en la superficie se desplacen, o *se difundan*, dentro del silicio. Éste es el llamado paso de *difusión*. La figura 2.13 muestra el interior de un horno de difusión.

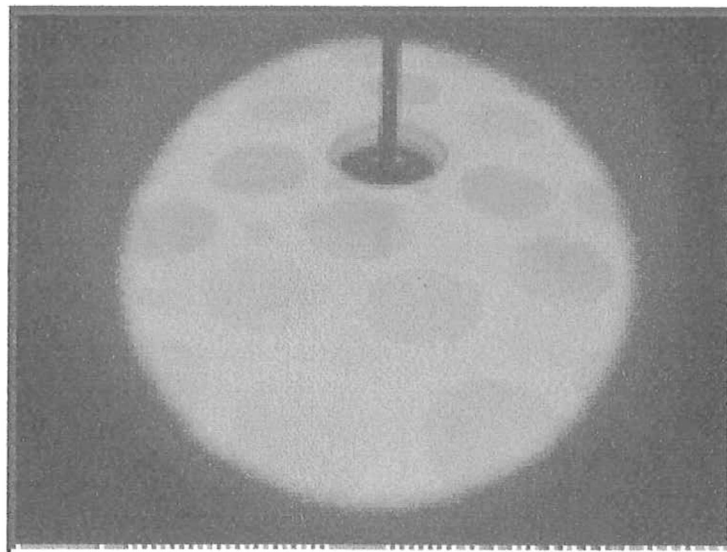


Figura 2.13.- Interior de un horno de difusión.

Cortesía de MSIL. Página en internet: <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>

Si una impureza de tipo *p* se difunde sobre la superficie de la placa de tipo *n* de tal forma que la densidad de átomos de tipo *p* supera la densidad original de átomos tipo *n* en la placa, la superficie cambiará al tipo *p*, y se obtendrá una unión *p-n* a una pequeña distancia de la superficie, en el punto donde la densidad de los átomos *tipo p* iguala a la densidad original *tipo n*. En otras palabras, la *unión p-n* es la frontera de los dos materiales: uno predominantemente *p*, y el otro predominantemente *n*, como de observa en la figura 2.14.

Primera difusión:

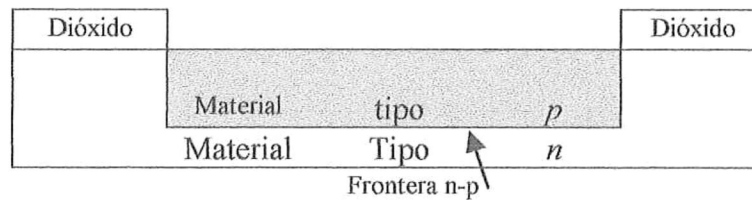


Figura 2.14.- frontera n-p

Existe la posibilidad de hacer una segunda difusión sobre la zona de la primera. En este caso, es necesario establecer para la segunda difusión una concentración de impurezas mayor que la producida para la primera. Debido a la segunda unión *p-n*, y el resultado de las dos difusiones será una estructura *n-p-n*. El conocido transistor. La figura 2.15 muestra un diagrama de una unión *n-p-n*.

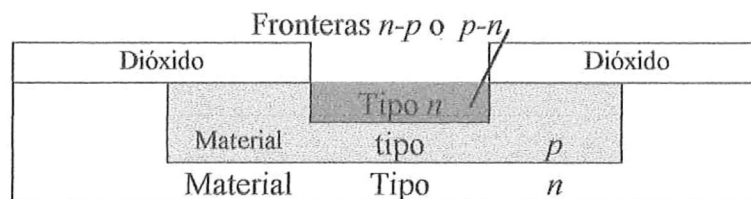


Figura 2.15.- Formación de una unión n-p-n.

Las impurezas apropiadas para el silicio son:
el BORO como *tipo p* y el FÓSFORO como *tipo n*.

Este proceso se encuentra muy relacionado con los procesos de oxidación (lo cual es la capa protectora del silicio), el proceso de fotoprotección (generado durante la aplicación de la mascarilla del circuito) y por el proceso de eliminación selectiva del óxido (llevada a cabo en las ventanas originadas por las mascarillas)

El dióxido de silicio sirve como un aislante o barrera para la difusión del boro o del fósforo en la capa de silicio. Ahora bien, dependiendo del espesor de la capa de dióxido y de la temperatura, será el tiempo de duración del proceso de difusión en la misma. Por ejemplo si suponemos una capa de dióxido de silicio de tan sólo 0.1 micras y una temperatura en el proceso de 1000° C, el tiempo de difusión del boro es de casi 200 horas, mientras que para el fósforo es de aproximadamente 6 horas.

2.4.5.- OXIDACIÓN (Pasivación de la Superficie con Óxido de Silicio)

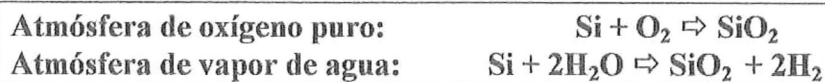
La Pasivación de la superficie de silicio por medio de una capa de aislante es una de las principales características del proceso planar. Normalmente la pasivación se consigue por medio de la **oxidación térmica** del silicio. La fina capa de dióxido de silicio obtenida de esta forma tiene cuatro funciones:

- 1.- Sirve como máscara de difusión y permite la difusión selectiva en el silicio por medio de aberturas (ventanas) practicadas en el dióxido de silicio.
- 2.- Protege a las uniones difundidas de la contaminación por impurezas.
- 3.- Sirve como superficie aislante que separa dispositivos (transistores, etc.) de la capa de interconexiones metálicas.
- 4.- Puede utilizarse como dieléctrico para la fabricación de condensadores monolíticos.

Recordemos que la presentación del dióxido de silicio en la naturaleza es en forma de cristales agatizados, rocas de cuarzita y en la arena, la cual si miramos bien, pareciera que tiene diminutas partícula de vidrio oscuro. Pues bien, la capa que se crea en la superficie del silicio es exactamente de esa consistencia y estructura: color cristalino, arreglo de diamante y una dureza poco mayor que la del vidrio.

2.4.6.- Oxidación Térmica

La oxidación del silicio es quizás el proceso más fundamental de todos los usados en la fabricación de circuitos integrados. El **dióxido de silicio** (SiO_2) es un material muy estable que es usado casi universalmente como la superficie para la operación de la aplicación del fotoresist. El SiO_2 es *crecido* en dos atmósferas: ya sea en una de oxígeno o en una de vapor de agua. El silicio interactúa con la atmósfera en cualquiera de las dos siguientes maneras:



Lo cual nos da como resultado después de la reacción química una capa de dióxido de silicio en la superficie de la oblea (a esta capa es a la que se le aplica el fotoresist para posteriormente pasar a la aplicación de la luz ultravioleta que le imprimirá el patrón de la placa respectiva).

Al primer tipo se le conoce como *oxidación seca* y al segundo: *oxidación húmeda*. En el primero se utiliza oxígeno puro y en el segundo, el proceso de generación, o crecimiento de la capa de óxido, se acelera por la presencia de vapor de agua.

La oxidación térmica de las pastillas de silicio se lleva a cabo usualmente en un horno de difusión a temperaturas comprendidas entre los 900° y los 1200° C. Para lograr el grosor normal de una capa de óxido de 1 micra, a 1000° C, para el tipo seco se necesitan alrededor de casi 30 horas en el horno, mientras que en los procesos que utilizan el tipo de oxidación húmedo se necesitan tan sólo 4 horas. Éste es el método más frecuentemente usado, pues permite un crecimiento más rápido.

Existen otras técnicas para la protección de los circuitos. Por ejemplo, el nitruro de silicio (Si_3N_4) es más resistente a la contaminación iónica que el SiO_2 . El nitruro puede ser utilizado como una capa adicional para evitar que los contaminantes superficiales lleguen a la capa de SiO_2 .

La **Oxidación Seca** toma lugar cuando las obleas son colocadas en un tubo de oxidación (también llamado “tubo de difusión” u “horno de oxidación”) a una temperatura entre 950 y 1250°C . Un tubo de oxidación típico contiene varios juegos de bobinas calefactoras controladas electrónicamente, alrededor del tubo, el cual es ya sea de cuarzo, de carborundo de silicio o de silicio. En este tipo de oxidación, las obleas son colocadas en el tubo en un “bote” de cuarzo (también llamado “elefante”) y el flujo de gas es dirigido a través de la superficie de la oblea, hacia el otro extremo, o

escape, del tubo. La temperatura en éste es altamente controlada, generalmente a $\pm 1/2$ °C, para asegurar una uniformidad extrema y un crecimiento de la capa de óxido bastante predecible. Para lo anterior se utilizan tablas obtenidas por años de experiencia en el proceso.

En la *Oxidación Húmeda*, un gas portador de oxígeno o de nitrógeno es dirigido hacia un burbujeador que contiene agua. Aquí, el gas es saturado con vapor de agua y es entonces dirigido al tubo u horno de difusión. El agua en el generador de burbujas es mantenida debajo de los 100°C para asegurar una presión de vapor de agua constante, lo que origina tasas de crecimiento uniformes.

Es de mencionar que los “botes” en los que se manejan las obleas son introducidos o extraídos lentamente de los hornos en ambos procesos

Las altas temperaturas en los procesos de oxidación pueden causar la redistribución de los iones de impureza, por lo que para evitar lo anterior, la oxidación se lleva a cabo a una presión mayor y a una temperatura menor. Una oxidación a alta presión, de unas 25 atmósferas (25 atm), reduce la relación tiempo/temperatura del proceso. Por cada 1 atm que se incrementa, se permite una disminución de 25 a 35°C en la temperatura, lo que ha permitido que el proceso dure aproximadamente 15 minutos.

En la tabla 2.2 se muestra una comparación de los procesos de oxidación.

Tabla 2.2 Comparación de los procesos de oxidación

Tipo de Oxidación	Tiempo requerido para el crecimiento de una capa de 1 micra de espesor.
Oxígeno seco, 1200° C	2.5 horas
Oxígeno húmedo, 1200° C	1.5 horas
Oxígeno a alta presión, 25 atm	15 minutos

En todos los procesos de oxidación se deben de tomar medidas extremas de cuidado en el manejo de las obleas para prevenir contaminación química (hierro, sodio, potasio, etc.) o por partículas. Por ejemplo, el tocar una oblea, inevitablemente se causará una contaminación por sodio proveniente de la sal en la piel y esto causará fallas en los dispositivos. Las obleas deben manejarse siempre con pinzas y guantes especiales diseñados para manejar los botes con las obleas.

Importante:

- Todo este proceso se lleva a cabo también, al igual que todos los procesos posteriores al corte de las obleas, en cuartos limpios clase 100 o clase 10 (un cuarto limpio clase 100 es aquél en el cual no se permite más de 100 partículas por pie cúbico de aire y éstas no deben ser mayores de 1 micra de espesor). El cuarto limpio clase 10 sólo permite 10 partículas y de un espesor de 0.2 micras.
- El principal uso de las capas de SiO_2 es el de proveer una base para la adhesión del resist o fotoresist y la impresión.
- Las capas también pueden ser usadas como una aislante dieléctrico, impedirá la difusión de ciertos elementos, incluidos el boro y el fósforo, en el silicio.
- También es de suma importancia que el óxido pueda ser fácilmente eliminado de la superficie de la placa por reacción con una solución de ácido fluorhídrico, sin que ésta ataque al silicio

En consecuencia, si oxidamos una placa de silicio, calentándola en una corriente de oxígeno, con el fin de formar una capa de dióxido de silicio en la superficie, y, a continuación, eliminamos el óxido de ciertas zonas, por medio de corrosión, se pueden difundir impurezas únicamente en dichas zonas. Esta **difusión selectiva** es la base de toda la fabricación de los circuitos integrados monolíticos de silicio, pues es la que permite la formación simultánea de millones de diferentes elementos en una misma placa de silicio.

2.5.- PROCESO FOTOLITOGRÁFICO

Hasta aquí, hemos visto los conceptos fundamentales utilizados en el procesamiento de la oblea, desde que ésta es procesada químicamente para recibir el fotoresist, pasando por los de tecnología planar, crecimiento epitaxial, difusión y la oxidación. Pasemos ahora a discutir el proceso mediante el cual se imprime la imagen del circuito en una región de la oblea.

Una vez que la oblea es recibida por el departamento de producción, inicia la fabricación de los circuitos integrados en ella. Antes de este paso, la oblea se encuentra totalmente limpia y sin desperfectos químicos o físicos.

Los siguientes pasos del proceso se repiten tantas veces como sean necesarios hasta completar el circuito en la oblea. Dependiendo del número de placas a imprimir, será el número de veces por las que pasará la oblea por el proceso fotolitográfico. Este proceso termina cuando la oblea pasa a la etapa de pruebas eléctricas con las micropuntas eléctricas, que van a calificar si un chip es aprobado o no. En el caso de que un chip no sea aprobado, se deja caer una gota de tinta roja (o negra) sobre el chip defectuoso para identificarlo.

Hasta aquí, tenemos dos insumos importantes: uno es la oblea y el otro es, o mejor dicho son, las placas o máscaras de las diferentes capas.

El primer paso es crear, o *crecer*, en la oblea una capa de dióxido de silicio, tal como se explicó en la sección anterior de *Oxidación*. Posteriormente es aplicada otra capa protectora de un barniz especial como se describe en el siguiente párrafo.

Durante la operación de enmascaramiento, la superficie de la oblea que debe ser enmascarada es cubierta con un revestimiento fotosensible conocido como *fotoresist* o *resist*. La lámina de la máscara se utiliza luego como una máscara de contacto y es expuesta a la luz ultravioleta.

Si se utiliza un **resist negativo**, las porciones de resist fotosensible no cubiertas por las regiones opacas de la máscara, se polimerizan y se endurecen después de la exposición. Las partes no expuestas del resist se disuelven y lavan, dejando una *máscara de fotoresist* en la superficie de la oblea. Si, por el contrario, se utiliza un **resist positivo**, las regiones que si fueron expuestas a la luz ultravioleta, son las que se deslavan.

Para lograr esto (que el resist se deslave o *grave*) se somete a la oblea a un baño de disolvente especial.

Una vez aplicada la capa o máscara de resist, se calienta la oblea durante un tiempo corto para retirar los restos de disolvente y para densificar la capa de resist.

2.5.1.- Grabado químico:

La etapa de enmascaramiento es seguida de una etapa de grabado. En esta etapa, las partes de la capa de dióxido de silicio que no están cubiertas por fotoresist, son eliminadas por ataque químico, dejando el silicio al descubierto para formar ventanas de difusión o contacto en la capa de óxido. Para el ataque del SiO_2 a velocidad controlada se emplea como mordiente una solución compensada de ácido fluorhídrico. Después del proceso de grabado, el fotoresist restante es eliminado en un disolvente especial. Este procedimiento de fotoenmascaramiento se repite para las restantes operaciones de difusión, así como para la formación de las interconexiones metalizadas.

2.5.2.- Defectos y limitaciones de la fotolitografía.

Las tres limitaciones fundamentales de este proceso son: el alineamiento, la resolución de las plantillas o formatos de máscaras y los defectos del grabado químico.

Alineamiento de las máscaras: El formato de cada capa de máscara aplicada a la oblea de silicio debe alinearse adecuadamente con los formatos previamente aplicados. Esta alineación se realiza por medio de ajustes micrométricos bidireccionales. Este proceso requiere la ayuda de un microscopio.

Resolución: La resolución de operación de fotoenmascaramiento puede medirse por la anchura mínima de línea necesaria para discriminar dos líneas paralelas separadas por la anchura de otra línea. Las principales limitaciones de la resolución de la máscara son debidas al tamaño de grano fino de las emulsiones fotográficas y a la difracción de la luz en los bordes de la máscara.

Defectos de grabado: Los defectos de grabado son debidos al espesor irregular o a las propiedades de adherencia del fotoresist, o bien a las propiedades no uniformes del óxido. Estos defectos pueden dar lugar a bordes pobremente definidos del óxido y podrían aumentar el tamaño de las ventanas resultantes en la difusión.

2.5.3.- ELIMINACIÓN SELECTIVA DE ÓXIDO.

Veamos bien este proceso tan importante. La **eliminación selectiva del dióxido de silicio** se efectúa por un proceso fotolitográfico, en el que se utiliza el material fotoprotector llamado resist.

1. .-Después de la Oxidación (es decir, de que ha sido aplicada una capa de SiO_2 sobre la oblea), la superficie oxidada de la lámina es cubierta con una capa fina de una laca fotoprotectora, este resist es una sustancia orgánica que se polimeriza cuando se expone a una luz ultravioleta, y, una vez polimerizada, resiste el ataque de ácidos disolventes. Recordemos que existen resist *negativos* y *positivos*.
2. .-Enseguida se coloca sobre la lámina, una placa fotográfica conteniendo el patrón del circuito a imprimir, con zonas opacas en las partes en que se requiere eliminar el óxido de silicio.
3. .- La oblea es sometida a la luz ultravioleta en cada uno de los chips que se van a hacer en la totalidad de la oblea. Este paso se realiza en unos equipos, llamados "steppers" en inglés, cuya función es la de reducir la imagen que se encuentra en la placa fotográfica a una dimensión de miniaturización correspondiente. Este equipo utiliza un juego de lentes para realizar la reducción. Su nombre proviene de su función: "step and repeat": reducir y repetir.
4. .- La oblea es sometida a un baño de disolventes químicos para eliminar el resist que no deseamos en la oblea y que fue expuesto a la luz (en el caso de resist positivo). El resultado es una "ventana" a través de la cual una porción del dióxido de silicio queda al descubierto. El resist que permanece en la oblea nos servirá como capa protectora para impedir que la parte de dióxido de silicio que esta protegiendo, se deslave.
5. .- La oblea es sometida a un baño de ácido fluorhídrico, para eliminar la capa de dióxido que quedó descubierta con la ventana creada por el resist. Recordemos que el ácido fluorhídrico solo ataca al dióxido, dejando intacto al silicio (el cual es el sustrato).
6. .- La oblea es nuevamente sometida a otro baño de disolventes (más fuertes) para eliminar la capa residual del resist.

En este punto la oblea se encuentra lista para los procesos de dopaje, ya sea mediante difusión o por implantación de iones (que sólo ocurrirán a través de las aberturas o ventanas del óxido), que son los procesos subsecuentes. De las secciones anteriores sabemos que la difusión es el proceso en el cual son inyectados o introducidos los átomos dopantes en el silicio. Existen dos métodos de dopaje, para la creación de zonas o regiones *tipo-p* o *tipo-n*: uno es el método de **difusión** y otro es el de **implantación de iones**.

2.5.4.- DIFUSIÓN

El proceso de difusión es hasta la fecha el método más ampliamente utilizado para la introducción de cantidades controladas de impurezas en el sustrato de silicio. Se trata de un proceso relativamente bien conocido y altamente reproducible, que se presta fácilmente al ventajoso proceso por lotes de la tecnología planar, en el que pueden ser fabricados varios chips al mismo tiempo en una sola operación.

En la tabla 2.3 se muestran algunos de los dopantes más utilizados para la fabricación de circuitos integrados.

Tabla 2.3. Dopantes tipos n y p para la fabricación de dispositivos de silicio

Tipo p	Tipo n
Boro (B)	Fósforo (P)
Aluminio (Al)	Arsénico (As)
Galio (Ga)	Antimonio (Sb)
Indio (In)	

2.5.5.- Implantación de Iones

El proceso de implantación iónica proporciona un método alternativo para la introducción de impurezas. A diferencia de los procesos de difusión, el número de iones implantados es controlado por el sistema externo, más que por las propiedades físicas del sustrato. Esto permite un control exacto de las dosis de las capas implantadas, incluso a temperaturas a las que la difusión normal es insignificante. En este proceso, las impurezas son introducidas bombardeando la superficie con iones de la impureza a alta energía. La operación de implantación se realiza en el vacío. Los iones de la impureza son acelerados desde una fuente de iones y se utiliza un espectrómetro de masas para separar las impurezas no deseadas del haz.

La superficie del semiconductor puede ser preservada de los iones implantados utilizando una capa de metal (tal como el aluminio) o una gruesa capa de óxido como máscara. De este modo las regiones implantadas con iones pueden ser configuradas o modeladas con facilidad en la superficie del silicio de la misma manera que las regiones difundidas, utilizando técnicas de fotomascaramiento.

2.5.6.- Implantación de Iones vs. Difusión.

El objetivo de dopar una oblea es la de colocar, dentro de una estructura cristalina, cantidades conocidas de impurezas seleccionadas que variarán, predeciblemente, las propiedades eléctricas del circuito. El dopado se realiza mediante la utilización de interfaces fotolitográficas que proveen los límites dimensionales dentro de los cuales se llevara a cabo el dopaje con los iones. Las máscaras de fotograbado y de fotoimpresión tanto del óxido como del resist sirven para proveer las barreras para los iones dopantes.

El mayor cambio en la tecnología de dopado ha sido el cambio que se dio de los procesos de difusión a los procesos de implantación de iones a alta energía.

La manera en la que se lleva a cabo la difusión, -en la cual los iones dopantes son primero predepositados y después térmicamente manejados en procesos de alta temperatura-, resulta en un mayor consumo de área o “terreno” de silicio en la dirección horizontal, la cual es sumamente crítica e importante. La implantación de iones provee líneas de pared más verticales, mediante la colocación de iones en la oblea a ángulos más cerrados, cercanos a los 90° . Los resultados son contornos de dopado que tienden a ser más planos y profundos, comparados con los que se obtienen mediante procesos de difusión convencionales.

La estrategia básica para incrementar la densidad de componentes en un chip (es decir, más circuitos funcionales por unidad de área) es: reducir el ancho de línea, agregar más capas de material, y, esencialmente, mover la tecnología del proceso en la dirección de los circuitos integrados tridimensionales.

Hasta aquí hemos descrito los procesos básicos con los cuales se producen los elementos (componentes tales como transistores, resistencias, diodos, etc.) en un chip. Valdría la pena repetir la explicación que se dio líneas arriba sobre el proceso general, en aras de que la repetitibilidad nos acerque al conocimiento y por ende a la comprensión del proceso entero hasta el punto en el que la oblea se encuentra para recibir las últimas dos capas, que son las de *metalización y protección*.

2.6.- RESÚMEN DEL PROCESO

La siguiente es una descripción altamente simplificada del proceso de la fabricación de un circuito microelectrónico semiconductor, mejor conocido como chip.

La fabricación de un circuito microelectrónico comienza con una oblea de silicio apropiadamente dopada. La superficie de esta es lijada, pulida al espejo y sujeta a procesos químicos para remover cualquier imperfección de la superficie.

En el siguiente paso, una delgada capa de la superficie de la oblea es convertida a dióxido de silicio. Esta capa, de 1 micra de espesor o menos, está destinada a servir de barrera a los dopantes en el proceso de difusión de los mismos sobre la superficie, es decir, impedir que los dopantes penetren en el silicio. Esta capa de dióxido de silicio puede ser formada de muchas maneras, pero es usualmente hecha mediante la exposición de la superficie de silicio a un vapor de agua en una temperatura de aproximadamente 1,100°C por un lapso de una a dos horas. Los detalles del procedimiento determinan la calidad y el espesor de la película de óxido.

El siguiente paso es aplicar al óxido, un barniz fotosensitivo llamado resist, el cual una vez que es expuesto a la luz y al revelado, se convierte en una película la cual se adhiere al material soporte (óxido) y resiste (de allí su nombre) la acción química. Donde no es expuesto a la luz, se deslava en el revelador. Tal Resist es llamado “resist negativo”; un resist positivo es aquél que se deslava donde fue expuesto y se fija donde no fue expuesto.

Para cada paso del proceso de difusión, se requiere una máscara o placa fotográfica apropiada. Para este propósito se hace un dibujo a escala, a veces hasta 500 veces el tamaño que va a tener en el chip, de aquellas áreas en el óxido que formarán los “hoyos” o cavidades que serán grabadas ya sea para difusión de aluminio o para deposición de aluminio – el aluminio es el material conductor que forma las conexiones metálicas entre un elemento y otro del chip-. El dibujo es entonces reducido al tamaño que tendrá el chip en una placa fotográfica. Esta placa comprende la mascarilla a través de la cual el resist es expuesto a la luz y revelado. Como resultado, el resist es removido y la película de óxido queda al descubierto en aquellas áreas de la oblea de silicio donde la difusión del dopante tomará lugar.

La oblea es entonces sumergida en un removedor químico el cual elimina el óxido y expone el silicio, después de lo cual el resist es completamente removido también.

El producto hasta aquí es la oblea con el silicio con las partes que se desean dopar al descubierto. Listas para el dopaje.

La oblea es ahora colocada en un horno a gran temperatura, generalmente entre los 1000 y 1300°C, y expuesta a una corriente de gas conteniendo átomos del dopante que serán difundidos en el silicio para formar el material *n* o el material *p*, según el dopante que se esté utilizando en este paso.

La profundidad de la difusión, así como la concentración de los átomos de dopado en función de la profundidad, están controladas por los detalles del proceso a alta temperatura. De esta manera, se obtiene un dopado controlado de un área deseada de la oblea de silicio. En algunos procesos no se utiliza la corriente de gas, sino que la oblea es sometida a un bombardeo de iones de los materiales dopantes, esta tecnología es conocida como implantación de iones (Ion Implantation)

El proceso puede ser repetido tantas veces como sea necesario, eliminando la vieja máscara de óxido, formando una nueva película de óxido, aplicando una nueva capa de resist, imprimiendo la nueva placa fotolitográfica y grabando (recordemos que en este paso, *grabando* significa desprender o eliminar un material, en este caso: el óxido) las cavidades en la misma para la siguiente difusión requerida, etc. Todos los componentes del circuito así como las barreras aislantes entre una capa y otra pueden ser difundidas en la oblea siguiendo este procedimiento.

Debido a que en la oblea existe un gran número de chips, cada chip recibe la impresión de las respectivas placas fotográficas del patrón, dibujo ó diseño del circuito usado en la fabricación. Cada paso es repetido para formar un arreglo cuadrulado de imágenes idénticas en toda la oblea. Este procedimiento es conocido como una operación “step-and-repeat”: reducir y repetir. De aquí el nombre de los enormes equipos que realizan esta función: **STEPPERS**.

Para completar el circuito, los componentes son interconectados, en lo que se llama capa de metalización, por conductores de aluminio evaporado al alto vacío. En los puntos donde se harán los contactos metálicos se produce una película completa de óxido y se graban las respectivas cavidades de esos puntos. Una película gruesa de aluminio es depositada sobre toda la oblea por evaporación al vacío y el fotoresist es removido. Este aluminio pasa a través de las cavidades formadas en el óxido para hacer contacto con los componentes difundidos. A continuación, la oblea se hornea a una temperatura de 600°C para permitir que el aluminio se mezcle en el silicio.

Una vez que la oblea está terminada, ésta es cortada y separada en circuitos ó chips individuales llamados “dados”, los cuales son tomados por un brazo robot y colocados en un encapsulado, se le sueldan sus puntos de contacto con las terminales con las cuales enviarán o recibirán señales eléctricas del exterior y son sellados en una solución epóxica o de cerámica. , empaquetados y, finalmente, enviados al cliente. Aquí finaliza la parte correspondiente al resumen.

2.7.- Metalización

Después que se ha completado la estructura en el silicio, se graban unas aberturas o ventanas en la capa de óxido, sobre el silicio, para los contactos metálicos.

Se usa una “metalización” con aluminio como la capa de interconexión sobre el circuito integrado, creándose los contactos óhmicos para los dispositivos formados en el silicio y conectándolos a los puntos de conexión con el exterior en las orillas del chip. Se utiliza aluminio debido a:

- a).- Que se adhiere bastante bien tanto al silicio como al dióxido de silicio.
- b).- Que puede ser fácilmente depositado al vacío (ya que tiene un punto de ebullición bajo), y,
- c).- Que tiene una alta conductividad.

Además del aluminio puro, se utilizan aleaciones de aluminio para formar interconexiones del circuito integrado por diferentes razones relacionadas con el desempeño del mismo. Por ejemplo, se agregan pequeñas cantidades de cobre para reducir la potencialidad de efectos por electromigración, donde una corriente aplicada al dispositivo induce un transporte de la masa del metal (de allí su nombre: una corriente mueve al metal). También, se agregan algunas cantidades pequeñas de silicio en el proceso de metalización para reducir la formación de “picos” que ocurren en las cavidades de contactos, en algunos casos se utiliza Titanio para este mismo propósito.

Las capas de aluminio son depositadas al vacío sobre la oblea por alguno de los siguientes métodos:

- 1.- Evaporación relámpago.
- 2.- Evaporación de filamento (tungsteno u otro).
- 3.- Evaporación por haz de electrones.
- 4.- Evaporación por inducción.

2.7.1.- Contactos óhmicos

La especificación básica para las películas conductoras utilizadas en las interconexiones es que deben formar buenos contactos óhmicos con los componentes difundidos u otras películas metálicas depositadas en la superficie de la oblea. Un buen contacto óhmico muestra una relación lineal entre corriente y tensión e introduce una cantidad despreciable de resistencia serie.

En la fabricación de circuitos integrados convencionales, la aleación y las interconexiones de aluminio con el silicio son las últimas etapas del proceso planar. Normalmente se lleva a cabo mediante un corto tratamiento térmico en una atmósfera inerte, típicamente alrededor de 10 minutos a 500-600 °C.

La interconexión metálica de componentes que utilizan dos metales activos distintos puede ser un problema crítico en el proceso de interconexión. En la interfaz de dos metales diferentes pueden formarse compuestos intermetálicos y óxidos parásitos. Un ejemplo típico son los compuestos intermetálicos oro-aluminio que se forman entre las bases de unión de aluminio y los cables de oro que pueden usarse para conectar la pastilla o chip a las terminales del encapsulado.

Una vez que se han realizado los contactos óhmicos, el aluminio es nuevamente evaporado sobre toda la oblea y removido por fotograbado, de tal manera que el patrón deseado de conductor para las interconexiones quede en la superficie.

2.7.2.- Pasivación Post-metálica

En ocasiones es de desear la formación de un revestimiento dieléctrico protector sobre la superficie del circuito integrado una vez que se le han formado las interconexiones metálicas. Esto se puede llevar a cabo por deposición pirolítica de SiO₂ o de silicio cristalino, normalmente denominado *vidrio-s*. Esta pasivación requiere etapas adicionales de proceso, pero en contrapartida proporciona protección superficial para las interconexiones, además que esto permite la utilización de metalizaciones en multicapa, lo que a su vez simplifica grandemente la distribución del circuito.

2.8.- Comprobación y Ensamblado.

2.8.1.- Comprobación

Mientras el chip (en esta fase se le llama: dado) aún se encuentra en la oblea de silicio pero ya terminado, con su última capa de metalización, se prueban todos los circuitos integrados individualmente. Esto se realiza con un equipo sofisticado de alta tecnología que utiliza una llamadas *agujas de microprueba* (microprobes). Una máquina probadora típica tiene hasta 20 puntas de prueba, que pueden ser individualmente situadas con una precisión mayor de 25 micras (0.025 mm) y descendidas hasta hacer contacto eléctrico con las superficies de contacto del circuito integrado. En una placa de un circuito común puede haber 12 terminales de contacto, y una vez que las puntas de prueba han sido dispuestas para el primer circuito, deben ser elevadas (eje z), desplazándose sucesivamente sobre la oblea (en el eje xy) para que las micropuntas de prueba hagan contacto con el siguiente circuito. Es evidente que estas máquinas de comprobación se encuentran en la categoría de equipo de alta precisión.

Las pruebas llevadas a cabo en la comprobación son principalmente de tipo general. Se efectúan una pocas mediciones en corriente alterna (c.a.), pero las pruebas de velocidad de conmutación y de alta frecuencia están limitadas por la capacidad e inductancia asociadas a la construcción de la punta de prueba y a las conexiones entre ésta y los puntos de contacto del circuito. Pese a las limitaciones, es posible la selección de buenos circuitos con una probabilidad de aproximadamente el 80%. Todos los circuitos que no alcanzan los niveles exigidos son automáticamente marcados con una mancha de tinta (roja o negra), de forma que puedan ser fácilmente identificados y rechazados (después de que se ha cortado la oblea en dados o chips individuales).

2.8.2.- Separación de los chips (corte de la oblea)

A continuación, la oblea debe ser dividida en circuitos integrados individuales. El método más común es el de *marcado y ruptura*, cuyo proceso es muy similar al del corte del cristal. Por medio de una punta muy fina de diamante se marcan líneas a lo largo de la oblea en ambas direcciones, entre los chips, y a continuación se hace presión sobre ellos para lograr su separación

Existe otro procedimiento en el cual, los chips son cortados mediante una sierra de diamante. Una vez que se encuentran separados unos de otros en “*dados*”, un brazo robot toma al chip individual y lo coloca sobre una plancha, la cual fue impregnada de un pegamento o adhesivo para permitir que el dado quede fijo. Al momento de estar tomando el dado de la oblea, el brazo-robot utiliza una cámara de visión para detectar si el dado tiene el punto rojo que identifica al chip como inútil. Si lo tiene, el dado es desechado. En caso contrario, es colocado en el receptáculo con adhesivo, para continuar con el proceso de empaquetado.

Fijado el chip o dado a la cápsula, se pueden efectuar las conexiones eléctricas desde las terminales de contacto del dado a las terminales del encapsulado final, que le servirán de conexión con el exterior. Las superficies de las patillas o terminales del encapsulado se encuentran recubiertas con un baño de oro. El método más comúnmente empleado es el de unión por termocompresión. En el proceso llamado *de unión por esfera* se usa hilo de oro de unas 25 micras (0.025mm) de diámetro.

Este proceso se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1.- Dicho hilo de oro se suministra por conducto de una aguja capilar y se aplica una diminuta llama de hidrógeno, con lo que se funde, quedando formada una pequeña esfera en su extremo. La cápsula, con el chip montado, se calienta a unos 300 °C, luego se baja la aguja capilar hasta que el extremo del hilo queda situado sobre uno de los contactos del chip.
- 2.- Al aplicar una presión adecuada, la esfera de oro se aplana, y la combinación de la presión y la temperatura hace que el oro quede soldado al contacto del circuito.
- 3.- Acto seguido, se eleva la aguja capilar a lo largo del hilo y se desplaza horizontalmente hasta que queda situada sobre una de las terminales del bloque, bajándola a continuación para soldar el hilo de oro a dicha terminal (previamente bañada en oro).
- 4.- Después de esta segunda soldadura, la aguja capilar es elevada nuevamente “cortándose” el hilo por acción de la llama, que produce una nueva esfera en el extremo del hilo, quedando éste dispuesto para repetir el proceso de la próxima conexión.

En algunos procesos se utiliza hilo de aluminio en vez de hilo de oro, debido a una reacción intermetálica llamada *plaga púrpura* que se da entre el oro y el aluminio.

Las últimas investigaciones sobre esta tecnología tienden a la obtención de todas las conexiones de la placa o dado en una sola operación.

Una vez finalizadas las conexiones, el conjunto se halla listo para su conclusión. El chip montado en su empaquetado es sometido a un moldeado o encapsulado para permitir un cierre hermético y proteger al integrado de condiciones químicas o físicas del exterior. Normalmente, se lleva a cabo, con los chips ya sellados, una prueba de “fugas” para comprobar que no admiten nada de aire.

El último paso de la fabricación es la prueba final, en la que se efectúa una serie de pruebas eléctricas con objeto de determinar si el funcionamiento del circuito se encuentra dentro de las especificaciones requeridas. La naturaleza de las pruebas dependerá del tipo de integrado, pero por lo general son la combinación de pruebas en *c.a.* y en *c.c.* (corriente alterna y corriente directa), así como de la actuación funcional del circuito completo.

2.9.- CONSIDERACIONES SOBRE EL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN

Como se puede observar en este texto, a lo largo de todo el proceso existe una gran cantidad de etapas en la fabricación de un circuito integrado. En la mayoría de estos pasos existe alguna pérdida. Tales disminuciones en el rendimiento aparecen a cada paso del proceso, pero principalmente en los de eliminación selectiva del óxido y de difusión por una diversidad de motivos, tales como:

- 1.- Imperfecciones o defectos en el silicio original.
- 2.- Limpieza incorrecta o deficiente de las obleas.
- 3.- Una aplicación desigual del resist.
- 4.- A la presencia de polvo e impurezas indeseables que contaminan las áreas de difusión.
- 5.- A un control imperfecto de los procesos de grabado (corrosión).
- 6.- Rompimiento ó fractura de la oblea.

Aunque las pérdidas en cada operación son pequeñas –alrededor de 1 ó 2%-, existe tal cantidad de operaciones en cadena, que después de haber sido marcada la oblea con el punto de tinta roja y seleccionado las placas aceptables, dicho rendimiento puede llegar a ser muy bajo, de tan sólo 25-40% dependiendo del tipo de circuito. Posteriormente, los chips pueden ser dañados durante el montaje y, finalmente, se tendrán nuevas pérdidas a causa de los chips rechazados por no satisfacer las especificaciones mínimas deseadas. Con todo lo anterior, se puede comprender por qué el rendimiento total de una oblea puede llegar a ser tan bajo

(hasta de un 20-30% de la cantidad total de chips en la oblea). A este rendimiento, en inglés, se le conoce como el YIELD de la oblea.

Aunque de acuerdo con este dato obtenido, es bajo el rendimiento de la oblea, con las nuevas tecnologías y procesos, se ha logrado mejorar el rendimiento de la misma hasta llegar a un 80-90% en algunos procesos, y se está en busca de llegar a un yield de 95%.

En este punto del proceso de fabricación, el integrado es empaquetado en su presentación final y se encuentra listo para ser enviado a la siguiente fase, que bien puede ser un integrador de sistemas o para ser adquirido por un cliente o usuario final.

Hasta aquí el capítulo II. Como se habrá visto, a lo largo del mismo, se encuentran los conceptos básicos para el conocimiento y la comprensión de un proceso de fabricación genérico de un chip, que si bien es largo y complicado por la cantidad de tecnologías involucradas, es un camino que ha sido recorrido durante muchos años (desde 1959) por diversas compañías, y es a través de la experiencia que se ha ganado con los años de trabajo, gracias a elementos fortuitos y dados por mera casualidad, pero también al esfuerzo de investigación de muchas personas, es que hoy podemos disfrutar de un dispositivo tan versátil y sofisticado como lo es un chip, llámese microprocesador, memoria, DSP, o ASIC.

Aunque en nuestro país nos encontramos en pañales en la fabricación de estos dispositivos, también es cierto que existen ya serios esfuerzos por acortar esta distancia tecnológica que nos separa de los países desarrolladores de microcircuitos. En la medida que más personas se involucren, o al menos interesen en estas tecnologías, le será al país más rápido el llegar a fabricarlos y no solo a utilizarlos como nos ocurre ahora. Pero para esto aún nos faltan unos años de esfuerzo tanto de empresarios como investigadores.

2.10.- REFERENCIAS

1. MICROELECTRONICS, PRINCIPLES & DESIGN TECHNIQUES
FOGIEL, MAX
RESEARCH AND EDUCATION ASOCIATION
TK 7874 F6
2. MICROELECTRONICS, PROCESING & DEVICE DESIGN
COLCHASER, ROY A.
JOHN WILEY & SONS, INC.
1980
TK 7874 C63
3. DEVICE ELECTRONICS FOR INTEGRATED CIRCUITS
SMULLER, RICHARD
JOHN WILEY & SONS
1985
TK 7871 85
4. THE SCIENCE & ENGINEERING OF MICROELECTRONICS FABRICATION
CAMPBELL, STEPHEN A.
OXFORD UNIVERSITY PRESS
1996
TK 7871.85 C25
5. COMPUTER BASICS
UNDERSTANDING COMPUTERS VOLUME
TIME-LIFE BOOKS
1985
QA 76.C556
6. THE TRANSISTOR
ELECTRONIC ENGINEERING TIMES MAGAZINE
25th. ANNIVERSARY EDITION, ISSUE 978
CMP PUBLICATIONS
OCTUBRE 30 DE 1997
7. CIRCUITOS INTEGRADOS,
CURSO BÁSICO PARA INGENIEROS Y TECNICOS.
HIBBERD, ROBERT C.
TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED
SEMICONDUCTORS DIVISION
PUBLICACIONES MARCOMBO
1983 TK 7874 H52

8. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRONICA
VOLUMEN II, SECCION 8
FINK, DONALD G.
MC GRAW-HILL, 1994
TK 7825 M35
9. MSIL CORPORATION
PÁGINA EN INTERNET:
<http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL>
10. APPLE CORPORATION
PÁGINA EN INTERNET:
www.apple.com

CAPÍTULO III

GUIÓN DE LA UNIDAD AUDIOVISUAL

***PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN
MICROPROCESADOR***

GUION DE LA UNIDAD AUDIOVISUAL

TIEMPO TOTAL: 30:27 minutos

Imagen	Tiempo En minutos segundos	Narración. (entrecomillado)
1	0:03	“ La Universidad Autónoma de Baja California.”
2	0:03	“ Y la Escuela de Ingeniería Ensenada.”
3	0:02	“ Presentan.”
4	0:05	“ Proceso de Fabricación de un Microprocesador.”
5	0:04	“ Realizado por: Santiago Alvarez.”
6	0:15	“ Justificación: Este video se realiza con el fin de contribuir a disminuir la ausencia de material que muestre, de una manera audiovisual, el proceso mediante el cual se fabrica un microprocesador.”
7	0:15	“ Alcances: - Se espera que este video sea utilizado como un material de referencia y de información sobre un proceso genérico con el cual se fabrica un chip. - A cada paso de dicho proceso existen adicionalmente diversos métodos y procedimientos que, por el alcance en tiempo de este video, sólo serán mencionados.”
8	0:15	“ Objetivos: - Que el alumno conozca, en forma genérica, el proceso que sigue en su fabricación un circuito integrado, desde su estado en la naturaleza hasta su presentación como producto terminado. - Contribuir al contenido curricular de las materias <i>Circuitos Digitales I y II</i> , entre otras.”
9	0:15	“ Microprocesador: Un microprocesador consiste en uno ó más dispositivos de integración a alta escala que realizan la función de <i>Unidad Central de Proceso</i> (CPU). Es un dispositivo que realiza operaciones aritméticas, lógicas y de control, las cuales son generalmente incorporadas en un solo circuito integrado.”
10	0:16	“ Definición de Micra: Es una unidad de medida para una longitud de 1 por diez a la menos seis metros (1×10^{-6} m.), es decir una millonésima de metro. Un cabello humano promedio tiene un espesor de 100 micras y una pista de aluminio en un integrado es de 0.25 micras.”
11	0:03	“ Fabricación del Circuito Integrado.”
12	0:04	“ Extracción y Preparación del Material.”
13	4:40	“ El proceso inicia con la extracción del material de su estado natural. El silicio se encuentra en la naturaleza en forma de sílice, también llamado dióxido de

	silicio. El silicio es un material semiconductor de color gris claro. Algunas de sus presentaciones en la naturaleza son en forma de arena común de playa u otros depósitos minerales tierra adentro, generalmente ricos en cuarzita. Los puntos oscuros que se observan en los granos de arena son los que forman la sílice. Su nombre proviene del griego sílex, el cual es una roca de color gris oscuro o negro. Forma el 28% de la corteza terrestre y es el segundo elemento más común en la tierra solo después del oxígeno. Una de las razones por las que se utiliza silicio para la fabricación de chips, es la facilidad con la que la superficie de un cristal de silicio es oxidada para formar un óxido químicamente estable: El dióxido de silicio. Este es muy resistente a la acción corrosiva de la mayoría de los ácidos y solventes comunes. Sin embargo, y afortunadamente, el ácido fluorhídrico ataca la capa de dióxido, pero no desprende al silicio. De esta manera los átomos dopantes podrán penetrar las regiones del silicio expuesto pero no aquellas cubiertas por el dióxido. Esta es una de las características más importantes de este material semiconductor. Gracias a esto, se pueden dopar regiones localizadas del semiconductor ya sea como <i>tipo-n</i> o como <i>tipo-p</i> en una superficie del sustrato de silicio con dimensiones de tan solo unas décimas de micra La habilidad de dopar, selectivamente, pequeñas regiones de silicio es la base de la tecnología de semiconductores en nuestros días y es una de las principales razones por las cuales el silicio reemplazó al germanio como el material semiconductor más comúnmente usado. Pero aún más importante es, que con una tecnología tan controlada, se puede obtener un semiconductor de excelente calidad ó un aislante, como lo es el dióxido de silicio. . El silicio es extraído de grandes depósitos de cuarzita y de otros minerales ricos en sílice. Estos depósitos tienen la ventaja de estar al aire libre, por lo que es relativamente fácil su explotación. Para poder extraer el material útil, estos depósitos tienen que ser minados para granular las rocas agatizadas ricas en silicio. Cuando el material es extraído de su estado natural, la pureza del mismo es de un 30 ó 40%.
--	---

		Posteriormente, el material es transportado a fundiciones con grandes hornos eléctricos en donde es mezclado con carbón, coque o pedazos de madera, enseguida es calentado a altas temperaturas hasta su fusión o derretimiento (a dos mil grados Centígrados), obteniéndose un material que es el silicio líquido, el cual, una vez enfriado, es pulverizado y enviado a la siguiente fase del proceso. Hasta aquí, el silicio tiene una pureza del 98%. Aún así con ésta pureza, el silicio aún no es útil para su aplicación en la fabricación de circuitos integrados. Existen dos requerimientos básicos en la preparación del silicio para los componentes de estado sólido. La primera es una pureza extraordinariamente elevada, con un nivel de impurezas no deseadas inferior a 1 parte en 10 elevada a la décima potencia, es decir, una parte en una mil millonésima, un 99% seguido de 9 nueves. La segunda es que, para que una unión <i>p-n</i> funcione en la forma adecuada, el silicio debe de tener una estructura cristalina regular, y para ello debe de ser convertido a lo que se le denomina <i>forma monocristalina</i>. Esto último se verá en el proceso de Czochralski. {Pronunciación: zocraski} El siguiente paso es purificar ese material pulverizado. Para ello se le transforma en un compuesto tal como un haluro (en algunos casos con tetracloruro de silicio), el cual se purifica a lo largo de repetidas destilaciones. Posteriormente, el haluro purificado se transforma de nuevo en silicio por medio de reducciones al hidrógeno. Este es pulverizado nuevamente, el cual es calentado a 300°C produciendo triclorosilano Enseguida, se destila el triclorosilano a temperatura ambiente y reducido al hidrógeno. El silicio resultante es depositado en un tubo calentado eléctricamente, y una vez que se deja enfriar, es despegado en formar de pedazos. El resultado de estos procesos químicos de transformaciones y destilaciones sucesivas es la separación y remoción de impurezas, dejando un material de silicio policristalino, químicamente puro.”
14	0:02	“ Técnica de Czochralski.”
15	3:04	“ Una vez que el silicio policristalino se encuentra con el grado de pureza adecuado, este es colocado en un crisol de cuarzo, se le agrega una cantidad de

	material dopante, ya sea fósforo para producir silicio <i>tipo-n</i> o boro para producir silicio <i>tipo-p</i> Para lograr una concentración de dopante común de 10^{15} átomos por centímetro cúbico, se le agregan 0.1 miligramos del dopante por cada kilogramo de silicio. Este material es derretido y mantenido a una temperatura justo arriba del punto de fusión, alrededor de 1420 grados centígrados, mediante calentamiento inducido, en una atmósfera inerte que generalmente es gas argón. Para esto, se utilizan bobinas resistivas calefactoras de grafito, como las que poseen las planchas, o por inducción, usando ondas de radio frecuencia. A continuación, un cristal semilla de alta calidad con la orientación cristalina deseada es colocado en la punta de una flecha, y girando a una vuelta por segundo, es bajada lentamente e introducida en la mezcla fundida. Una vez que la semilla ha sido introducida en la mezcla, inicia la extracción de la varilla, siendo elevada lentamente, -en algunos procesos este paso dura de 24 a 30 horas, a una velocidad de 1 pulgada por hora-, mientras continúa girando. Es aquí donde el derretimiento y re-enfriamiento del silicio en la interface con la semilla, permite que se forme el cristal, siguiendo exactamente la estructura cristalina de la semilla introducida, a la cual se le va adhiriendo material, En un proceso de crecimiento del cristal. En esta parte del proceso, el silicio pasa de su estado policristalino a un estado monocristalino. Una vez que el lingote alcanza su longitud terminal se deja enfriar a temperatura ambiente. Los equipos donde se lleva a cabo este proceso se llaman <i>Pullers de Czochralski</i>, pues lo que hacen es jalar hacia arriba el lingote de silicio. Los diámetros de los cristales se han incrementado de unas pocas pulgadas en los años sesenta, hasta llegar a 30 ó 40 centímetros en nuestros días. La longitud del lingote es dependiente de un suministro continuo de silicio fundido. En los años sesenta, se lograron lingotes con una longitud de unos treinta centímetros, mientras que actualmente se han logrado lingotes de hasta 2 metros. Esto se ha logrado con el uso de crisoles dobles. Una vez que se tiene el lingote, este es pulido en su superficie y cortado en sus extremos dejándolos planos, esto se lleva a cabo con una sierra con hoja de diamante. Ya que se tiene el lingote pulido y cortado, es necesario obtener su plano
--	--

		cristalográfico, es decir, como el lingote es redondo en su diámetro se necesita conocer la orientación de los cristales, para esto se utilizan técnicas de rayos x. Una vez que ha ocurrido lo anterior, el lingote es cortado en uno sus lados, paralelamente al eje de crecimiento, a esto se le llama “plano”, y es la razón por la cual las obleas parecen estar chatas de un lado y no completamente circulares. Esta será una referencia para las siguientes fases del proceso.”
16	0:03	“ Corte y Preparación de la Oblea.”
17	1:25	“ Después que se produce el plano en el lingote, éste es cortado en rodajas o rebanadas, llamadas obleas, con un grosor de 5 a 10 milímetros, con una sierra de hoja de diamante. Las obleas cortadas son ahora sujetas a un proceso de preparación para eliminarles todo el rizo de la superficie. En el primer paso la oblea es lapeada mecánicamente. Durante este proceso se usan diferentes grados de compuestos de lapeado para producir obleas con superficies sucesivamente más suaves Para el lapeado, se les aplica a través de una tolva una solución abrasiva de polvo de alúmina y agua. La placa, o “plato”, sobre la que están las obleas, que gira independientemente en un sentido, está sobre un portador orbitando en sentido contrario, con lo cual se crea una rotación de 4-vías. Como producto se obtiene una oblea pulida al espejo. La siguiente fase para producir superficies de alta calidad para la impresión, es un proceso de grabado químico del silicio, para remover cualquier daño que haya sido introducido o dejado por el paso anterior. Los equipos en los que se lleva a cabo esta limpieza química son tanques de ultrasonido llamados <i>bigdeepers</i>. Una vez que la oblea ha pasado por la solución disolvente, es pasada por agua, y posteriormente por agua destilada. Hasta aquí la oblea ya esta lista para ser enviada a la siguiente fase del proceso, generalmente a un fabricante de circuitos integrados.”

18	0:03	“ Etapa de Diseño”
19	1:55	“ En esta etapa, el fabricante de chips integra un equipo de ingenieros en diseño de circuitos para que lleven a cabo un diseño óptimo de las funciones a realizar por el chip. Aquí podemos ver a un grupo de técnicos especializados, revisando una lámina conteniendo el patrón o dibujo a imprimir. Este dibujo tiene que ser reducido a un tamaño de la uña de un dedo e impreso en una mascarilla La máscara o mascarilla es una especie de negativo de uno de los pasos por los que pasará el futuro chip durante el proceso fotolitográfico. Este personal altamente entrenado y con experiencia, utiliza software CAD para realizar el diseño del circuito. Dicho software es el VHDL. En estas imágenes se puede apreciar como es impreso un circuito integrado con todos sus componentes como son transistores, resistencias, pistas de unión, etcétera. VHDL es un acrónimo en inglés de Lenguaje de Descripción de Hardware para circuitos integrados de muy alta velocidad. VHDL es un lenguaje de programación que ha sido diseñado y optimizado para describir el comportamiento de circuitos y sistemas digitales. Este programa puede describir, a un increíble nivel de detalle, el comportamiento de componentes electrónicos, que van desde simples compuertas lógicas hasta microprocesadores completos y chips de aplicaciones específicas. Se puede expresar el diseño, ó parte de este, como un diagrama esquemático, ya sea a nivel tarjeta o puramente funcional, usando descripciones VHDL. La captura de la funcionalidad de un circuito integrado en diagrama esquemático es exactamente como se hace con el programa <i>Draft</i> del OrCAD®. La máscara se imprime en una placa fotográfica de vidrio cubierta parcialmente con cromo. Una vez que se encuentra hecha la máscara, se revisa con un microscopio para ver que no tenga defectos.”
20	0:03	“ Etapa de la Impresión Litográfica.”
21	7:38	“ Una vez que se tienen las máscaras con el patrón de las diferentes fases por las que deberá atravesar el chip en su elaboración, inicia uno de los procesos más delicados de la fabricación. En las operaciones siguientes se trabajará con un material fotosensitivo llamado

	fotoreisit, por esta razón se debe trabajar bajo luz amarilla, la cual no daña a este material. Las obleas son manejadas en cartuchos para cuidar al máximo su superficie. Este proceso es altamente controlado usando equipo de computo tanto para el manejo de las obleas como para el control del proceso. En algunos procesos este paso se lleva a cabo en instalaciones muy automatizadas en las que son robots los que se encargan de manipular las obleas en la mayor parte del proceso fotográfico. Hasta aquí, la oblea se encuentra totalmente limpia y sin desperfectos químicos o físicos. El primer paso es crear, o <i>crecer</i>, en la oblea una capa de dióxido de silicio. Para esto, en cargas de cien unidades, se introducen las obleas en un horno a mil grados centígrados, en el que el silicio se combina con el oxígeno para formar la capa de dióxido. A continuación, la superficie de la oblea es cubierta con un revestimiento fotosensible conocido como <i>fotoreisist</i> o <i>resist</i>. La oblea es colocada debajo de un exposímetro automático llamado Stepper, el cual contiene la máscara del patrón que será impresionado sobre la oblea. Enseguida, ésta es expuesta a la luz ultravioleta. Posteriormente la oblea pasa al proceso de fotograbado, en donde por medio de solventes se elimina la capa de resist que fue atacado con luz ultravioleta. Esto en el caso de utilizarse resist positivo. A continuación, la oblea pasa por el proceso de grabado, el óxido no protegido por el resist es eliminado por la acción corrosiva del ácido fluorhídrico. Estos pasos del proceso se repiten tantas veces como sean necesarios hasta completar el circuito. Dependiendo del número de placas a imprimir, será el número de veces por las que pasará la oblea por el proceso fotolitográfico Un circuito integrado que ha pasado varias veces por el proceso de crecimiento, impresión y grabado se ve a través de un microscopio como si fuera una ciudad,
--	--

	en la que los edificios son los componentes y las pistas que enlazan a un componente con otro son las calles. La manipulación de las obleas es llevada a cabo en instalaciones llamadas “cuartos limpios <i>clase 10</i>”, en donde se aceptan únicamente 10 partículas por cada pie cúbico. Como comparación, el aire que respiramos contiene aproximadamente 10 mil partículas. Las obleas son revisadas. Las obleas son colocadas nuevamente en el horno para el crecimiento de la siguiente capa de dióxido. Esta capa es de unas cuantas micras de espesor, mientras el espesor de la oblea es de 250 a 300 micras. Se le aplica una nueva capa de resist. Se impresiona de la siguiente máscara con luz ultravioleta Cuando se trata de máscaras adicionales a la primera, tiene que alinearse la nueva plantilla con la anterior. Esto se logra mediante ajustes micrométricos en los ejes x-y. Las partes de la capa de dióxido de silicio que no están cubiertas por fotoresist, son eliminadas por ataque químico, Cuando la oblea ha terminado un ciclo de grabado, ésta queda húmeda por los químicos disolventes o el agua purificada. Uno de los métodos para secar las obleas es colocándolas en hornos de centrifugado Las partes de la oblea que no están cubiertas de óxido son bombardeadas con átomos de polisilicio contaminado por el dopante deseado, ya sea boro o fósforo. Estos átomos llamados dopantes quedan prendidos en la rejilla de cristal del silicio. Éstos se depositan o implantan en capas de pocas micras de la superficie de la oblea, modificando sus características de conductividad eléctrica. Si era silicio tipo n, ahora es tipo p, o viceversa. En la imagen se observa un horno de difusión, en el cual la oblea es sometida a una corriente de gas con la impureza deseada, o en el caso de ser la última capa,
--	---

		a una corriente de aluminio evaporado para crearle la capa de metalización. Una vez que se han realizado los procesos de impresión y de grabado, la oblea es revisada al microscopio electrónico. En la imagen se puede observar unas pistas de conductores. Estas pistas están cubiertas de material fotoresist. La longitud que marca la referencia es de una micra. Una pista promedio en un proceso actual es de 0.25 micras. El formato de cada capa de máscara aplicada a la oblea de silicio debe alinearse adecuadamente con los anteriores. Esta alineación se realiza por medio de ajustes micrométricos bidireccionales. Este proceso requiere la ayuda de un microscopio. La resolución de operación de fotoenmascaramiento puede medirse por la anchura mínima de línea necesaria para discriminar dos líneas paralelas separadas por esa línea. Cuando el chip ha sido terminado, es revisado minuciosamente al microscopio. En cada fase de la fabricación de los chips se realizan controles y revisiones. Por ejemplo se pueden comprobar los ajustes exactos y las dimensiones previstas del circuito.”
22	0:03	“ El Transistor y el Proceso Planar.”
23	4:09	“ Casi todos, si no es que todos los dispositivos con los que cuenta actualmente el hombre para hacer su vida más placentera, tienen que ver con la electrónica: teléfonos, televisores, automóviles, cafeteras, computadoras, etcétera. Pero todos estos dispositivos que han influido en la sociedad actual están controlados por un microprocesador. Hagamos un viaje relámpago al interior de uno. Los microprocesadores funcionan en base a un lenguaje digital interno el cual es binario formado por unos y ceros. En estas imágenes se puede observar, por simulación, como se mueven los electrones dentro del material semiconductor. Las esferas en arreglo cristalino son los átomos de silicio y las esferas pequeñas son los electrones

	El Transistor fue inventado en el 47, y es la base de las computadoras actuales. Su operación esta en función de unos y ceros, los cuales internamente representan estados de encendido y apagado. Uno y cero, son una representación numérica del comportamiento electrónico interno, uno significa conducción y cero significa apagado. Los transistores son como los apagadores de tu cuarto: se encienden y apagan, pero a una velocidad de millones de veces por segundo. Los electrones viajan a través del material semiconductor a la velocidad de la luz. En la imagen podemos apreciar de una manera rápida el funcionamiento del transistor. Éste está formado por una fuente, una compuerta y un drenador. La compuerta tiene un punto metálico de contacto para servir de elemento mecánico para la función de encendido apagado. Es como si fuera tu mano en el apagador de tu cuarto. El silicio es el material base, el cual permite o no el paso de electrones del surtidor hacia el drenador. Mientras no exista un voltaje en la compuerta, no habrá un flujo de electrones. Al aplicarle un voltaje positivo a la compuerta, este provocará que los huecos en el silicio se alejen, permitiendo el paso de los electrones del surtidor hacia el drenador a través del sustrato, creándose una corriente. Esta simulación con personas permite visualizar este comportamiento. El recorte que presentamos en la siguiente simulación, tiene una arista de una centésima de milímetro. A una temperatura de mil grados centígrados, se oxida la superficie del silicio y por encima se le aplica una capa de material fotosensitivo llamado resist. - A través de la máscara, se impresiona la capa fotográfica y a continuación se revela y se elimina la laca, quedando solamente la parte no impresionada. - En los lugares donde se eliminó la laca es posible desprender la capa de óxido por efecto corrosivo. - Este principio de estructuración laminar se sigue aplicando en las fases siguientes. - Primero, una capa conductora de electricidad y luego otra de laca fotosensitiva que se impresiona a través de la máscara, se hace el revelado y separan las partes impresionadas de las otras. - Una operación importante es el bombardeo del material con átomos de boro o fósforo, a fin de imprimirle características de transistor. - Finalmente, se realizan los agujeros de contacto por los que pasarán los
--	--

		enlaces eléctricos de aluminio entre las capas de los chips. - El resultado de estas complicadas operaciones es una minúscula placa en la que no se puede apreciar su contenido a simple vista: es un transistor.”
24	0:03	“ Etapa de Prueba.”
25	1:30	“ La oblea debe pasar repetitivamente por los pasos respectivos del proceso fotolitográfico: oxidación, aplicación de barniz, impresión de la máscara respectiva en el exposímetro, y el proceso de grabado. Estos pasos se repiten constantemente, y dependen del numero de niveles metalizados que contenga un chip. Actualmente se trabajan con 5 ó 6 niveles de metalización. Una vez que el chip ha sido terminado pasará a la etapa de prueba eléctrica. Mientras la oblea de silicio se encuentra aún completa, se prueban todos los chips individualmente. Esto se realiza con unas llamadas <i>agujas de microprueba</i>. Una máquina probadora típica tiene hasta 20 puntas de prueba, que pueden ser situadas con una precisión mayor de 25 micras y descendidas hasta hacer contacto eléctrico con las superficies de contacto del chip. Pese a las limitaciones, es posible la selección de buenos circuitos con una probabilidad de aproximadamente el 80%. Todos los circuitos que no alcanzan los niveles exigidos son automáticamente marcados con una mancha de tinta, roja o negra, de forma que puedan ser fácilmente identificados y rechazados.”
26	0:03	“ Etapa de Corte y Montaje”
27	1:30	“ Después de aproximadamente 300 fases de trabajo, una sierra con hoja de diamante de aproximadamente 7 micras de espesor, corta la oblea en dados, separando los chips. Los chips defectuosos están marcados con una mancha de tinta. Un <i>brazo robot</i> reconoce los dados que están marcados y selecciona únicamente los que están en perfectas condiciones. Toma al chip individual y lo coloca sobre una plancha, la cual fue impregnada de un pegamento o adhesivo para permitir que el dado quede fijo. Se le efectúan las conexiones eléctricas de las terminales de contacto del dado a las terminales del encapsulado final, que le servirán de enlace con el exterior. Las superficies de las patillas o terminales del encapsulado se encuentran recubiertas con un baño de oro.

		Para esta conexión se usa hilo de oro de unas 25 micras de diámetro. Las últimas investigaciones sobre esta tecnología tienden a la obtención de todas las conexiones de la placa o dado en una sola operación. El chip montado en su empaquetado es sometido a un moldeado o encapsulado para permitir un cierre hermético y proteger al integrado de condiciones químicas o físicas del exterior. A continuación se le aplican una serie de pruebas finales tanto físicas como eléctricas. A través del microscopio electrónico reticulado se pueden ver las partes del microcircuito que se encuentran en tensión y que se diferencian claramente de las conexiones que cambian constantemente.”
28	0:03	“ FIN.”
29	0:04	“ Se recomienda contestar el cuestionario que aparece en el manual del video.”
30	0:04	“ Todos los nombres de los productos que aparecen en el video son marca registrada de sus respectivas compañías.”
31	0:18	Agradecimientos.

REFERENCIAS

1. MICROELECTRONICS, PRINCIPLES & DESIGN TECHNIQUES
FOGIEL, MAX
RESEARCH AND EDUCATION ASOCIATION
TK 7874 F6
2. MICROELECTRONICS, PROCESING & DEVICE DESIGN
COLCHASER, ROY A.
JOHN WILEY & SONS, INC.
1980
TK 7874 C63
3. DEVICE ELECTRONICS FOR INTEGRATED CIRCUITS
SMULLER, RICHARD
JOHN WILEY & SONS
1985
TK 7871 85
4. THE SCIENCE & ENGINEERING OF MICROELECTRONICS FABRICATION
CAMPBELL, STEPHEN A.
OXFORD UNIVERSITY PRESS
1996
TK 7871.85 C25
5. COMPUTER BASICS
UNDERSTANDING COMPUTERS VOLUME
TIME-LIFE BOOKS
1985
QA 76.C556
6. THE TRANSISTOR
ELECTRONIC ENGINEERING TIMES MAGAZINE
25th. ANNIVERSARY EDITION, ISSUE 978
CMP PUBLICATIONS
OCTUBRE 30 DE 1997
7. CIRCUITOS INTEGRADOS,
CURSO BÁSICO PARA INGENIEROS Y TECNICOS.
HIBBERD, ROBERT C.
TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED
SEMICONDUCTORS DIVISION
PUBLICACIONES MARCOMBO
1983
TK 7874 H52

8. MANUAL DE INGENIERIA ELECTRONICA
VOLUMEN II, SECCION 8
FINK, DONALD G.
MC GRAW-HILL, 1994
TK 7825 M35
9. ELECTRONICA TEORIA DE CIRCUITOS
BOYLESTEAD, ROBERT
PRENTICE-HALL HISPANOAMERICA S.A.
1983, TERCERA EDICION
10. ENCYCLOPEDIA OF COMPUTER SCIENCES
EDITED BY ANTHONY RALSTON & EDWIN D. REILLY
THIRD EDITION, 1995
11. VIDEO "THE JOURNEY"
INTEL CORPORATION
©1996
12. VIDEO "SEED TO SEMICONDUCTOR"
MOTOROLA CORPORATION
©1986
13. VIDEO "SERIE 4-1 EN ELECTRONICA"
@ BIBLIOTECA DE LA UNIDAD ENSENADA
©1994
14. VIDEO DE LA "SERIE TRANSTEL"
CONACYT, MEXICO D.F.
15. IMÁGENES GENERADAS POR COMPUTADORA
En PowerPoint.

CAPÍTULO IV

ANEXOS

Anexo 1UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
UNIDAD ENSENADA**CUESTIONARIO DE EVALUACION DEL CONTENIDO DEL VIDEO:
PROCESO DE FABRICACION DE UN MICROPROCESADOR**

Nombre Del Alumno: _____ Materia _____ Fecha _____

- 1.-¿Cuál es la longitud de una micra?
- 2.-¿Cómo definirías microprocesador?
- 3.-¿Cuál es la presentación del silicio en la naturaleza?
- 4.-¿Porqué se utiliza silicio para la fabricación de chips?
- 5.-¿Qué ácido corroe al dióxido de silicio?
- 6.-¿Qué grado de pureza se requiere para que el silicio sea útil para fabricar chips?
- 7.-¿En qué parte del proceso se convierte el silicio policristalino en monocristalino?
- 8.- Describe el proceso de Czochralski.
- 9.-¿Qué dopantes se utiliza para obtener silicio tipo n?
- 10.-¿Qué dopantes se utiliza para obtener silicio tipo p?
- 11.-¿Qué dimensiones (longitud y diámetro) de lingotes se obtiene en la actualidad?
- 12.-¿Porqué se le realiza un “plano” al lingote de silicio?
- 13.-¿Con qué tipo de equipo se corta el lingote en obleas?
- 14.-¿Qué solución se utiliza como abrasivo para lapear las obleas?
- 15.-¿Qué son los BigDeepers?
- 16.-¿Cuál es la función de una máscara o mascarilla durante el proceso litográfico?
- 17.-¿Qué significa VHDL?
- 18.-¿Para qué se utiliza VHDL?
- 19.-¿Porqué durante el proceso litográfico se trabaja en ambientes con luz amarilla?
- 20.-¿Qué insumos se necesitan para iniciar el proceso litográfico?
- 21.-¿Cuál es la función de un Stepper en el proceso litográfico?
- 22.-¿Qué es un cuarto limpio clase 10 y para qué se utiliza?
- 23.-¿Cuál es el espesor promedio de una oblea?
- 24.-¿Qué representan los dígitos binarios 1 y 0 en el funcionamiento interno de un chip?
- 25.-¿Cómo funciona básicamente un transistor?
- 26.-¿Cómo se prueban los chips?
- 27.-¿Cuál es el objetivo de marcar con una tinta los chips defectuosos?
- 28.-¿Qué material se usa para conectar los chips con las terminales de sus encapsulados?
- 29.-¿Podrías describir el proceso planar?
- 30.-¿En qué tipo de equipo se podrían ver los cambios de voltaje o tensión en un chip?

Gracias por contestar. Este cuestionario es una autoevaluación. En caso de obtener un puntaje menor a 20, se recomienda ver el video con pausas y hacer anotaciones. Para poder conocer más sobre el tema se recomienda leer el manual del video.

Anexo 2*Temas de Interés: Lecturas Selectas y Direcciones en Internet*

Introducción:

Debido a que se considera que la información contenida por los siguientes artículos de revista, así como por las direcciones en internet abajo listadas, puede ser de interés para el lector de este manual, es que se incluyen como lecturas (o *accesos*, en el caso de internet) recomendables.

1.- Revista: Solid State Technology

Artículo: Roadmap to the Future.

Enero de 1998, pp. 73

Descripción Breve: Las nuevas tecnologías previstas para fin de siglo y hasta el año 2010. Se revisan fundamentalmente los problemas físicos de la litografía.

2.- Revista: Scientific American

Artículo: Trends in Semiconductor Manufacturing. "Toward Point One".

Febrero de 1995, pp. 90

Descripción Breve: La búsqueda de la miniaturización. Se aborda el problema de la litografía para lograr dispositivos cada vez más pequeños. Imagen del interior de un Stepper. Tecnologías alternativas.

3.- Revista: Scientific American.

Artículo: Technology and Economics in the Semiconductor Industry.

Enero de 1996, pp.54

Descripción Breve: Análisis de las implicaciones económicas de empaquetar cada vez más transistores en un chip. Ley de Moore. Imagen del proceso de fabricación. Análisis del precio contra desempeño de los circuitos integrados. Análisis del ROI (return-on-investment).

4.- Revista: Scientific American

Artículo: News and Analysis: "The Big Shrink"

Diciembre de 1997, pp 15

Descripción Breve: Análisis de las nuevas tecnologías en Steppers de luz ultravioleta extrema. Litografía EUV (Extreme UltraViolet).

5.- Revista: IEEE Spectrum.

Artículo: Solid State

Enero de 1998, pp 23

Descripción Breve: Las nuevas tecnologías previstas para fin de siglo y principios del 2000. Se revisa la metalización por cobre en vez de aluminio. El proceso DAMASCO. La tecnología *CMOS 7S* de IBM.

Direcciones en internet:

- 6.- Dirección : <http://egg.tokyoweb.or.jp/MSIL/>
Descripción: Contiene información sobre el proceso de obtención de la oblea. Inicia en el crecimiento de silicio y finaliza con las obleas preparadas.
- 7.- Dirección : <http://magnet.fsu.edu/chips>
Descripción: Contiene información e imágenes de chips de varias compañías.
- 8.- Dirección : <http://infopad.eecs.berkeley.edu/CIC/> ***
Descripción: Contiene información y noticias sobre los cambios en compañías de microprocesadores. En [/cpu_history.html](#) se encuentra un documento con la historia de casi todos, si no es que todos, los microprocesadores que han existido. Se recomienda: [/news/](#) y [/summary/local/](#)
- 9.- Dirección : <http://developer.intel.com/technology/>
Descripción: Contiene información sobre la tecnología MMX de Intel. Se hace una revisión de cómo funciona el Código MMX.
- 10.- Dirección : <http://wombat.doc.ic.ac.uk/foldoc/>
Descripción: Diccionario de computación FOLDOC *on-line*.
- 11.- Dirección : <http://micro.magnet.fsu.edu/chipshot.html>
Descripción: Contiene información e imágenes de chips de varias compañías.
- 12.- Dirección : http://ieee.cincinnati.fuse.net/reiman/10_1996.html
Descripción: Contiene información sobre el origen y desarrollo del C.I..

*** Altamente recomendable

En las siguiente sección se presentan los anexos 3,4,5 y 6.

 TEXAS INSTRUMENTS		THE WORLD LEADER IN DIGITAL SIGNAL PROCESSING SOLUTIONS				
				Search	Feedback	
Investor Relations Company Info	Products/Services	Employment	The Digital Future	Asia, Europe, Japan	TI&ME: Your Customized Page	

History of Innovation

DALLAS, Texas

May 10, 1954

Silicon Transistors In Production

A revolutionary new electronic product--long predicted and awaited--became a reality today with the announcement by Texas Instruments Incorporated of the start of commercial production on silicon transistors. By using silicon instead of germanium, the initial commercial silicon transistor immediately raises power outputs and doubles operating temperatures!

The potential application of this entirely new transistor is so great that major electronics firms have been conducting silicon experiments for some time. Texas Instruments--a leading germanium transistor manufacturer--is the first to succeed in placing the new silicon transistor into commercial production.

Until now, the greatest disadvantages of transistors have been their performance variation with temperature change and their low power outputs. All previous production units have used germanium, a rare and expensive but more easily worked material.

Silicon -- next to oxygen the earth's most common element--long has been known to possess superior temperature stability and power handling characteristics. But up until now, the difficulties of purifying, "growing" a single larger crystal, and fabricating silicon transistors have kept them laboratory devices, unreproducible on a production-line basis.

Texas Instruments--and many other leading electronics firms -- have been producing transistors made from germanium for over a year. Two months ago, the company began production of a simple single crystal silicon semiconductor device -- a silicon alloyed junction diode used for rectification--experience with which led to placing the silicon triode transistor into production.

The first production silicon transistor is of "grown junction" construction -- as distinguished from alloyed junction or point contact construction also used in transistor manufacture. In grown junction transistors, the contact between semiconductor materials of dissimilar crystal, instead of being made mechanically.

Texas Instruments -- a leading transistor manufacturer -- also specializes in grown junction construction for its germanium transistor, on the basis that this design provides superior electrical and mechanical characteristics.

The silicon transistor is a direct outgrowth of the work of TI's Materials and Components Research Section, headed by Dr. Gordon K. Teal, assistant vice president. The details of the new development were presented in two technical papers by Texas Instruments scientists.

A paper by Drs. Willis A. Adcock, Morton E. Jones and Messrs. Jay W. Thornhill, Edmund D. Jackson -- all of whom collaborated in the development -- was presented to a technical journal for publication. Dr. Teal, who directed the research, presented another paper on the development before the National Conference on Airborne Electronics of the I. R. E. in Dayton, Ohio on Monday, May 10.

The amplification ability of germanium transistors varies greatly as temperatures rise above room level. Heat dissipation in complex commercial and military electronic equipment is a major problem...and one which has so far limited the application of germanium transistors. The new silicon transistors operate with little change up to 150 Centigrade (302 Fahrenheit), well above the temperature of boiling water.

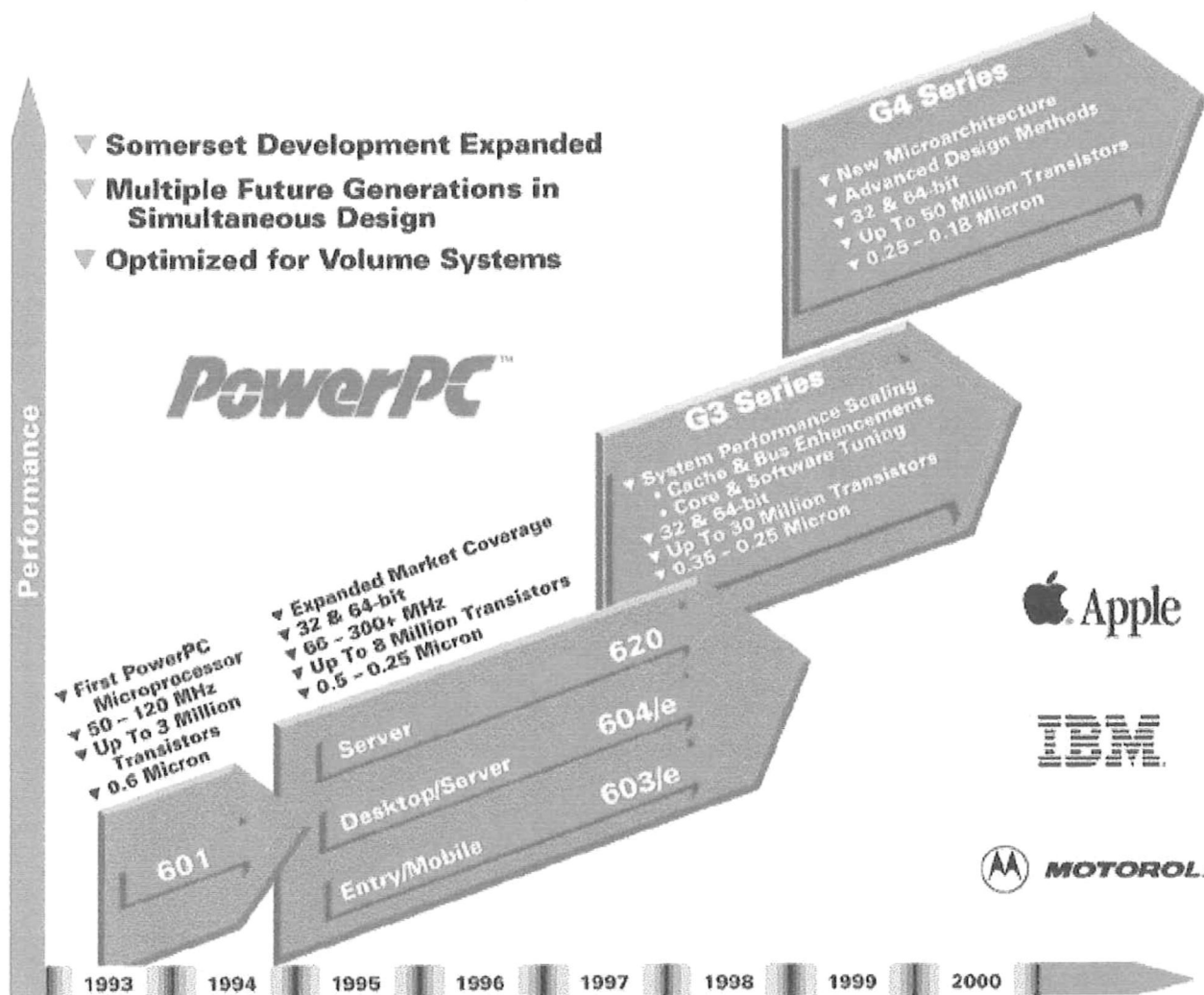
Development and commercial availability of a silicon transistor thus radically broadens the heretofore limited field of application for transistors. Even with the former handicaps of low power output and high temperature sensitivity, the substitution of transistors for vacuum tubes has been making great headway because of advantages in size, power consumption, and reliability. Hearing aides have been the largest single user, with the combination of a wide range of commercial and military applications coming close behind.

Texas Instruments announced that the new silicon transistors are already in small, but growing, volume production and that units are immediately available on a limited quantity basis to insure the widest possible distribution. The silicon transistors are ready for field application and are equipped with glass-to-metal hermetic seals. Price is to be announced.



► Semiconductors

PowerPC™ Microprocessor Roadmap



PDF Version of the PowerPC Roadmap [149K](#)

Development Expansion

We have experienced rapid growth at Somerset and have increased design resources by 50 percent. In fact, we will be moving to a new, larger facility later this summer in order to accommodate our growth. In addition, we have reorganized Somerset to deliver the G3 and G4 Series most effectively. Not all PowerPC microprocessors are developed in Somerset. Both IBM and Motorola have recently created sizable PowerPC development facilities over the past year. IBM has a large PowerPC design group in Burlington, VT. In addition, IBM has incorporated PowerPC into its Austin speed research lab and its Austin development center. Motorola has a significant PowerPC development effort in its Austin Oak Hill facility.

Multiple Simultaneous Designs

The entire microprocessor design and development cycle takes years. To offer the most flexible and powerful product lines with the fastest times to market, we have more than one generation of microprocessors in development, each at a different level of completion. Each generation includes multiple products and technologies.

The original 601 was a straightforward merging of existing IBM and Motorola technologies in order to bring the PowerPC to market quickly. We formed the Somerset center from scratch as a startup to do the first full generation of designs - 603, 604, 620 - and all of these projects were initiated simultaneously. As these designs have reached completion, the Somerset efforts have evolved from a ramp mode into a mature, long-term development operation. Over the past year, we have expanded and organized efforts to develop multiple future generations concurrently.

Optimized for Volume Systems

We have designed the PowerPC architecture to be used in the broadest possible range of applications. PowerPC microprocessors were designed to address all market segments from massively parallel to mobile and entry-level. The architecture is scalable and our designs are frequently ready for the volume desktop market at introduction.

G3 Series

This is the next generation of PowerPC products. We anticipate that systems based on G3 products will be commercially available by mid-1997.

G4 Series

We anticipate systems based on G4 products will be available beginning in 1999 and will offer industry-leading performance in volume systems.

FAQs

Q1. What is a Series?

A1. A series is a related set of processor projects. Each Series includes several processor projects in a related technical strategy.

Q2. What does the G mean in G3 and G4 Series?

A2. "G" refers to generation and is not a trademark, brand or product name. G3 and G4 are marketing references to Generations of microprocessor projects.

Q3. What is the difference between G3 and the current set of PowerPC chips?

A3. The foundation of the new products includes a new process technology, new levels of silicon integration and new cache memory designs.

Q4. What is the difference between the G3 Series and the G4 Series?

A4. The foundation of the G4 products includes a new microarchitecture, with substantial enhancements in superscalability and functional unit architecture, in addition to new process technology.

Q5. Will the G3 products obsolete the 6xx products? Will the G4 products obsolete the G3

products?

A5. No. In the life cycle of a PowerPC microprocessor generation, many different combinations of features and price points emerge. These have useful lives of many years. For example, the initial PowerPC microprocessor, represented by the PowerPC 601, which began shipping in 1993, has shipped in volume long after the 603, 603e and 604 microprocessors were introduced and began shipping. We anticipate that the current generation of products will be used in systems by our customers long after the G3 products are available. The same will apply to the G3 products when the G4 generation of products begins shipment.

Q6. How do you measure performance for the G3 and G4 Series?

A6. The scale depicts system-level performance on most measures of performance, including SPEC, Mac OS and Windows NT application suites and transactions per second.

Q7. What software will the G3 and G4 products run?

A7. We anticipate the next generations of PowerPC products will run all the software which can run today on the 6xx product lines, including operating systems, tools, applications and firmware.

Q8. What are your plans for after the G4 Series?

A8. We are working on what we call Project 2K. No details available today.

Motorola offers internet information as a service to its customers. Motorola reserves the right to make changes without further notice to any product or information herein.

Home	Sales & Support	Comments & Questions	Site Navigator	Search
----------------------	-------------------------------------	--	--------------------------------	------------------------

© Copyright 1994,1997 Motorola, Inc. All rights reserved.
[Please Read Our Copyright and Disclaimer Notice](#)

last update: 03Feb1997

Original Document

Intel Delivers the Next Level of Computing with the New Pentium® II Processor

New Capabilities and Performance Bring Visual Computing to Business

NEW YORK, May 7, 1997 -- Intel Corporation today introduced the Pentium® II processor, which combines innovative and proven technologies to bring new levels of performance and visual computing capabilities to business desktop and workstation users. The Pentium II processor, introduced at speeds of 300-, 266- and 233-MHz, combines the advanced technologies of the Pentium® Pro processor with the capabilities of Intel's MMX™ media enhancement technology. This combination gives corporate users the power to drive enterprise computing, delivers enhanced capabilities to small businesses, and brings the fastest Intel processor ever to workstations.

"With the expansion of visual computing into business, the performance of both processors and PCs must increase more than ever before," said Paul S. Otellini, executive vice president at Intel. "Among new uses, we envision the PC routinely translating all types of raw data into rich 3D models in seconds, helping users better assimilate the information at hand. Interactive business transactions will combine video, realistic graphics and audio to educate or demonstrate new products or services to potential customers.

"To meet those demands, PCs will need to deliver on three key elements of microprocessor performance: floating point, multimedia and integer," Otellini added. "The Pentium II processor delivers superior performance on all three."

The 266- and 233-MHz Pentium II processors are available today in desktop systems from more than a dozen leading computer manufacturers. The 300-MHz processor will be available in workstations in Q3.

Technology Advancements to Meet Three Vectors of Performance

The Pentium II processor combines high performance technological advancements to improve floating point, multimedia and integer performance. They are:

- The innovative Dual Independent Bus architecture, first implemented in the Pentium Pro processor, which addresses the bandwidth limitations of previous-generation processor architectures.
- MMX technology, which has been added to the Pentium II processor to enhance performance for audio, video and graphics applications as well as to speed up data encryption and compression.
- Dynamic Execution technology, which extends the raw performance of the processor by allowing more data to be processed in parallel in a given period of time.
- The Single Edge Contact (S.E.C.) cartridge, which is the delivery vehicle for these technologies, enabling the broad availability of Pentium II processors and providing headroom for future, higher performance processors.

Dual Independent Bus Architecture for Faster Performance

The Pentium II processor bus architecture addresses processor-to-memory bus bandwidth limitations, offering up to three times the performance bandwidth of the single-bus, "socket 7" generation processors, such as the Pentium processor. This translates into overall faster system performance.

Two buses make up the Dual Independent Bus architecture: the L2 cache bus and the processor-to-main-memory system bus. The speed of the dedicated L2 cache bus on the Pentium II

processor scales with the speed of the processor. The cache bus on the 300-MHz processor, for instance, runs at 150 MHz, more than twice as fast as the L2 cache on a Pentium processor, which runs at a fixed 66 MHz. The processor-to-main-memory system bus enables simultaneous parallel transactions instead of single, sequential transactions of previous generation processors, further increasing performance.

S.E.C. Cartridge Technology

With the Pentium II processor, Intel is introducing the Single Edge Contact cartridge, an innovative packaging technology to replace older Pin Grid Array (PGA) technology. With this new packaging technology, the components are mounted on a substrate and completely enclosed in a plastic and metal cartridge, forming the processor.

The S.E.C. cartridge will allow Intel to continue to deliver higher performance processors in high volume at mainstream PC price points.

Like the Pentium Pro processor, the Pentium II processor has a closely coupled L2 cache design, which helps the processor achieve higher performance. In the Pentium II processor, the L2 cache is comprised of industry-sourced Burst SRAMs.

Bringing MMX Technology to Business

Since its introduction in January, Intel's MMX media enhancement technology has brought performance benefits to millions of home users around the world. Intel is working with a number of independent software vendors (ISVs) to bring MMX technology-enhanced applications to the business world. The types of applications that will benefit over time from MMX technology performance include scanning, image manipulation, video conferencing, Internet browsers and plug-ins, video editing and playback, printing, faxing, compression, encryption and office suites.

Product Features, Price and Availability

The Pentium II processor core, with 7.5 million transistors, is based on Intel's advanced P6 architecture and is manufactured on .35-micron process technology. The 266- and 233-MHz speeds, with 512 KB L2 cache are available now. Pricing in 1,000 unit quantities is \$775 and \$636 for the 266- and 233-MHz parts, respectively. The 300-MHz processor for workstations is priced at \$1,981 in 1,000 unit quantities.

Intel continues to provide the industry with different levels of system integration. For computer manufacturers, Intel offers computing building blocks including processors, chipsets and motherboards. For the reseller channel, Intel provides individually boxed Pentium II processors and motherboards available through its Boxed Processor program. Intel's LANDesk® Client Manager software is also bundled with the boxed motherboards to enable advanced client manageability in support of Intel's Wired for Management initiative, aimed to reduce the total cost of business computing.

Pentium II processor-based systems offer Intel's highest performance when running the Windows* NT and Windows 95 operating systems. The 300-MHz processor has a SPECint95 rating of 11.6 and a SPECfp95 rating of 7.20. The 266-MHz processor has a SPECint95 rating 10.8 and a SPECfp95 rating of 6.89. The ratings for the 233-MHz processor are 9.49 and 6.43 for SPECint95 and SPECfp95, respectively.

Intel, the world's largest chip maker, is also a leading manufacturer of personal computer, networking, and communications products. Additional information is available at <http://www.intel.com>.

Original Document

IBM breaks the 1000 MHz microprocessor barrier

On February 4, IBM researchers announced they have demonstrated the world's first experimental CMOS microprocessor that can operate at one billion cycles per second (1000 MHz or 1 GHz). Today's fastest processors typically operate at speeds less than 300 MHz.

The processor was designed at IBM's Austin Research Lab, which was established in 1995 to focus on advanced circuit design, as well as new design techniques and tools for high performance microprocessors.

"With this demonstration, we believe it is possible to design 1000 MHz products," said Mark Dean, IBM Fellow and director of the Austin Research Lab. "Equally significant is the fact that we've developed the tools and insight that will be necessary to push this technology to even greater performance levels."

Designed by a highly focused team of 15 engineers, the processor achieves clock speeds of up to 1100 MHz. The 1000 MHz chip contains one million transistors and was developed using IBM's existing 0.25-micron CMOS 6X technology. The microarchitecture, circuits and testing techniques resulting from this project will eventually be applied to microprocessors using IBM's recently introduced CMOS 7S "copper chip" technology.

Novel architecture and circuit design

"Circuit and architecture innovations, including the merging of some functions and performing others in parallel, enabled us to reach the 1000 MHz milestone quickly and efficiently," said Sang Dhong, the Austin-based IBM engineer who led the development effort.

Among the team's achievements were:

- A multifunctional unit, which combines addition and rotation operations into a single circuit, and an innovative cache design, that combines the address calculation with the array access function.
- A dynamic circuit approach that greatly reduced the number of stages through which signals must propagate.
- Innovative clocking methods that further reduce the chip's cycle time and overcome the challenge of generating and distributing a timing signal -- or clock -- with a high degree of precision.
- A new testing technique that enables the tester to operate at a fraction of the speed of the processor core.

The 1000 MHz chips were fabricated at IBM's Advanced Semiconductor Technology Center in East Fishkill, NY and tested at the T.J. Watson Research Center in Yorktown Heights, NY.

A paper detailing the achievement will be presented February 6 at the annual IEEE International Solid State Circuit Conference in San Francisco. IBM is also presenting two related microprocessor papers at the conference. One describes a commercial multi-threaded RISC processor demonstrating IBM's ability to use innovative microarchitecture technology in a commercial application. The other describes IBM's first use of copper technology on a product level design with the PowerPC 750 microprocessor.

IBM Research is staffed by approximately 2,800 researchers working at laboratories in the United States, Switzerland, Japan, Israel and China. Major areas of research include computer systems, applications and solutions, systems technology, physical sciences, mathematical sciences, storage and communications.