

Chip se ha convertido en una palabra universal para describir lo que probablemente es una de las realizaciones más importantes de la humanidad. Esta realización ha dado lugar a una evolución o revolución económica, industrial y social. La introducción de la corriente eléctrica hace un siglo estableció una industria que modeló la electricidad en una red invisible cuya presencia de una forma u otra afecta la vida de los cinco mil millones de habitantes de nuestro planeta. Altérese esta red invisible y repercusiones económicas, sociales e industriales se sentirán en todos los segmentos de la sociedad. Esto es justamente lo que el "chip" o el circuito integrado (C.I.) ha producido en nuestra sociedad industrial.

Microelectrónica, la cien-



Valentín Rodríguez Rodríguez, Ph.D. del California Inst. of Tech. en Electrónica. Trabajó desde 1967 hasta 1970 en el Centro de Investigación de Fairchild sobre la tecnología MOS. Entre 1970 y 1984 ocupó cargos en National Sem., Thomson-EFCIS, y de nuevo Fairchild. En 1984 fue nombrado Presidente de MDS, filial americana de Matra, cargo que ocupó hasta 1986 cuando fundó Intercept Microelectronics. En 1987 ha creado Microelectrónica, S.A. que ubicará en España para fabricar ICs tipo ASIC.

Tecnologías de producción de circuitos integrados

Texto: Valentín Rodríguez

cia de producir miles de componentes electrónicos en una pastilla de silicio, es el fundamento de la tecnología moderna. Esta cambiando nuestra forma de trabajar, nuestra forma de vivir y nuestra forma de relacionarnos los unos con los otros, de tal manera que ni tan siquiera los arquitectos de esta transformación lo entienden completamente. Microelectrónica se ha llamado a la tecnología más singular que jamás ha confrontado la humanidad. (The Microelectronics Revolution Basil Blackwell, Oxford and MIT Press, Mass., 1980.)

El objeto de este artículo es de describir el desarrollo tecnológico de la producción de semiconductores, que nos ha conducido a lo que es literalmente un número infinito de aplicaciones para los C.I. o la Microelectrónica en general.

ORIGEN DE LA MICROELECTRONICA

El transistor y el C.I. son verdaderamente productos científicos. Hubiera sido imposible que alguien pudiera concebir en el garaje de su casa —como parece haber sido la costumbre en el "Silicon Valley"— un producto tan complejo y científico. Si no hubiera existido un programa extenso de investigación y desarrollo en el cual los participantes tenían plena libertad para explorar sus ideas e intereses científicos, ni el transistor, ni el C.I. formarían parte de nuestra vida moderna. Este acoplo de la ciencia pura con un desarrollo tecnológico vital es una desviación importantísima de cómo los descubrimientos técnicos se habían realizado en el pasado.

La primera estructura electrónica de estado sólido fue un detector rectificador conocido por el nombre de "Cat's Whisker" introducido en 1874 por Ferdinand Braun. Este detector fue reemplazado por el tubo de vacío con propiedades más reproducibles y un proce-

dimiento de fabricación mejor controlado. Después de la segunda guerra mundial se inventó el transistor como resultado directo de la investigación dirigida hacia la sustitución del tubo de vacío por amplificadores de estado sólido. Sin embargo, se tuvo que esperar hasta el final de los años cincuenta, para que los componentes de semiconductores superaran los tubos de vacío como caballos de batalla en los sistemas electrónicos.

El auge fenomenal que la Microelectrónica ha experimentado se basa en un hecho singular, el silicio que es el segundo elemento más abundante en el planeta, se oxida fácilmente y de forma controlable, dando como resultado una capa protectora sobre este material. Este óxido, cuya composición química es SiO_2 , es la piedra angular de la Microelectrónica: si él no hubiera existido, el desarrollo de la Microelectrónica probablemente hubiera ocurrido, pero de forma completamente diferente. Es suficiente analizar el desarrollo tecnológico del arsenio de galio como evidencia de lo dicho anteriormente.

Shockley tuvo la intuición de estimar que el silicio era mejor elemento que el germanio para procesar transistores de unión. Así se creo el fundamento de lo que hoy es la industria de semiconductores. El proceso Planar, patentado por J. Hoernie de Fairchild Semiconductor, que utiliza el óxido de silicio como máscara de protección contra impurezas en la fabricación y aislamiento de transistores en la oblea de silicio, proporcionó una tecnología de fabricación sólida para componentes electrónicos.

G. Moore predijo en los años cincuenta que el número de transistores en una pastilla de silicio se doblaría todos los años. Su predicción se ha cumplido y posiblemente superado. En 1950 se fabricaba un transistor en cada pastilla de silicio. Hoy

una pastilla puede contener hasta 1.000.000 de transistores. Para el año 2000 se espera poder fabricar cerca de 1.000.000.000 de componentes de una pastilla de silicio. Este avance tecnológico ha ocurrido en menos de cincuenta años y uno se puede preguntar a dónde llegaremos después del año 2000.

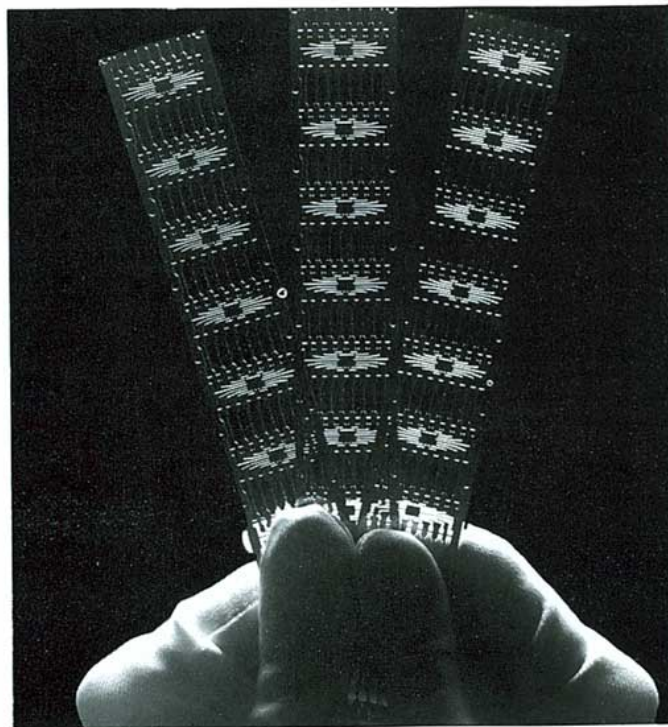
TECNICAS DE PRODUCCION

La Microelectrónica es uno de los principales usuarios de C.I. y como consecuencia el potencial del equipo de producción, de los procedimientos de análisis y control, y de las técnicas de producción ha progresado exponencialmente con el tiempo. En los comienzos de la fabricación de C.I., su producción fue afectada principalmente por el desconocimiento de los fenómenos básicos en semiconductores y por la falta de equipo de producción adecuado. Esta situación ha cambiado progresivamente en los últimos veinticinco años, sobre todo gracias al mismo desarrollo de la Microelectrónica. A continuación se describe brevemente la evolución de aquellos aspectos de la fabricación de C.I. que más han afectado el desarrollo de su producción.

CONTAMINACION IONICA

La contaminación iónica fue el fenómeno que más afectó y retrasó la tecnología MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) primordial para alcanzar altos niveles de integración. Una variante de esta tecnología, el CMOS (Complementary MOS), domina la producción de C.I. hoy día. Otra variante, el BICMOS (Bipolar-CMOS) dominará su fabricación en los años noventa.

Esta contaminación se manifiesta como una carga eléctrica a la interfase silicio-óxido pero que es móvil bajo la influencia de un campo eléctrico, sobre todo a tem-



“
Hoy día la
contaminación
es un problema
controlado pero
sobre el que hay
que permanecer
vigilantes.”

peraturas elevadas. Es difícil de controlar y de erradicar. Puede ser ocasionada por un número infinito de fuentes y todavía hoy se revela como uno de los factores más importantes en la fabricación de C.I. Generalmente su origen se achaca a la presencia de átomos de sodio ionizados que se propagan fácilmente al interior del SiO_2 . Las únicas soluciones a este problema son una limpieza esmerada en la sala de fabricación y técnicas de “gettering” a base de fósforo que tienden a invalidar su carga eléctrica. La contaminación iónica y de partículas son las razones fundamentales que han conducido a que la infraestructura de la sala de fabricación de obleas sea tan cara como el equipo de proceso. Hoy día la contaminación es un problema controlado pero sobre el que hay que permanecer vigilantes.

CONTROL AMBIENTAL

La mejora del medio ambiente requerido para fabricar C.I. complejos ha tenido que progresar al mismo ritmo que la Microelectrónica.

ca. Durante los primeros años después de la aparición del C.I., la contaminación (partículas o polvo) en el medio ambiente no se controló rigurosamente, pues la complejidad de C.I. era pequeña y existían otros problemas más críticos para obtener un buen rendimiento de fabricación y componentes plenamente funcionales. Sin embargo, poco a poco, a medida que el tamaño de las pastillas de silicio aumentaba con la complejidad de C.I., el control ambiental jugó un papel cada vez más importante hasta convertirse hoy día en la escala con la cual se mide el valor técnico de una sala de fabricación de obleas.

En los últimos veinticinco años se ha pasado paulatinamente de la fabricación de obleas casi al aire libre por clases de 10.000, 1.000, 100, 10 y 1 partícula por pie cúbico de aire. Como referencia se indica que el aire libre generalmente suele contener más de 1.000.000 de partículas con una dimensión de más o menos una micra por pie cúbico de aire. Anteriormente se indicó que esta obsesión con la limpieza general de todo lo que se utiliza en una sala de fabricación de obleas es responsable del 50% de su coste y terminará por eliminar completamente al ser humano del ciclo de producción de C.I.

Un edificio que contiene fabricación de obleas con un ambiente inferior a la clase 100 generalmente dispone de tres niveles, de los cuales uno es utilizado para la fabricación y los dos otros para la infraestructura de aire acondicionado. El nivel activo o de fabricación está situado en el medio. Por encima se encuentra el “plenum” de aire tratado que a través de filtros pasa verticalmente a la zona de fabricación, y es aspirado por el suelo para obtener un flujo de aire uniforme, sin turbulencias que puedan crear zonas de contaminación. En el sótano se encuentran ubica-

dos el prefiltro, el control de humedad y temperatura ambiental y los ventiladores para evitar el aire así tratado hacia el plenum. Todas aquellas maquinarias que pueden ocasionar vibraciones en la zona activa son aisladas e instaladas sobre amortiguadores. Es indudable que este tipo de instalación es cara e ineficaz, pues sólo una tercera parte apenas se utiliza como zona de producción. La tendencia actual que continuará hacia los años 2000, es la de reducir esta infraestructura con el desarrollo de sistemas ambientales que envuelven completamente el equipo y las obleas pero que excluyen al ser humano y los pasillos de circulación. Esta es una evolución lógica que deberá permitir un mejor control ambiental y una reducción de coste significativa.

Cuando el nivel ambiental es inferior a la clase 100, una de las principales fuentes de contaminación es el ser humano. Aunque todo el personal que trabaja en el interior de una sala de fabricación de obleas se viste con una indumentaria que lo cubre pies a cabeza, el mero hecho de aspirar y moverse puede introducir contaminación en el ambiente. Debido a ello y para evitar daño físico a las obleas, sistemas robóticos son con mucha frecuencia utilizados para el transporte automático de obleas. Además, el equipo moderno de producción por sí mismo imbrica cada vez más operaciones de proceso que se realizan automáticamente. Una vez más debe ser evidente que poco a poco el ser humano se limita a observar y controlar.

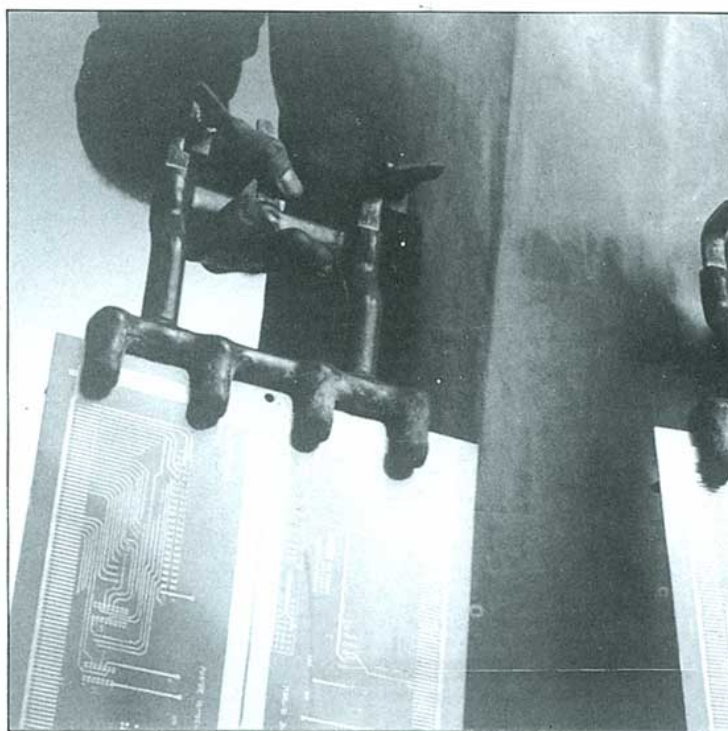
ALINEADORES DE MÁSCARAS

El progreso más importante en la fabricación de C.I. no proviene de la Electrónica sino de los sistemas ópticos utilizados para alinear las diferentes máscaras necesarias para fabricar un C.I. Es sobre todo la evolu-

ción de este equipo lo que permite concebir que en el año 2000 se puedan introducir cerca de 1.000.000.000 de componentes en una pastilla de silicio. Es también este equipo y su medio ambiente los que han situado la fabricación de C.I. complejos fuera del alcance de la pequeña industria.

Las primeras alineadoras posicionaban la oblea y la máscara en contacto directo. Estas máquinas al principio eran baratas —1.000.000 de pesetas— y tienen una cadencia de producción de unas cien exposiciones hora. Su limitación más importante es el contacto entre la oblea y la máscara que crea defectos en la oblea, en la máscara y, naturalmente, una reducción de rendimiento. La segunda generación fue la máquina de proyección. Como el nombre implica, las obleas no se colocan en contacto con las máscaras sino que la luz ultravioleta se proyecta a través de la máscara en la oblea. Estas máquinas eran caras —10.000.000 de pesetas— y tienen una cadencia de unas cincuenta exposiciones hora. Su limitación más importante es la exposición global de la oblea que limita las dimensiones mínimas a unas tres micras en producción.

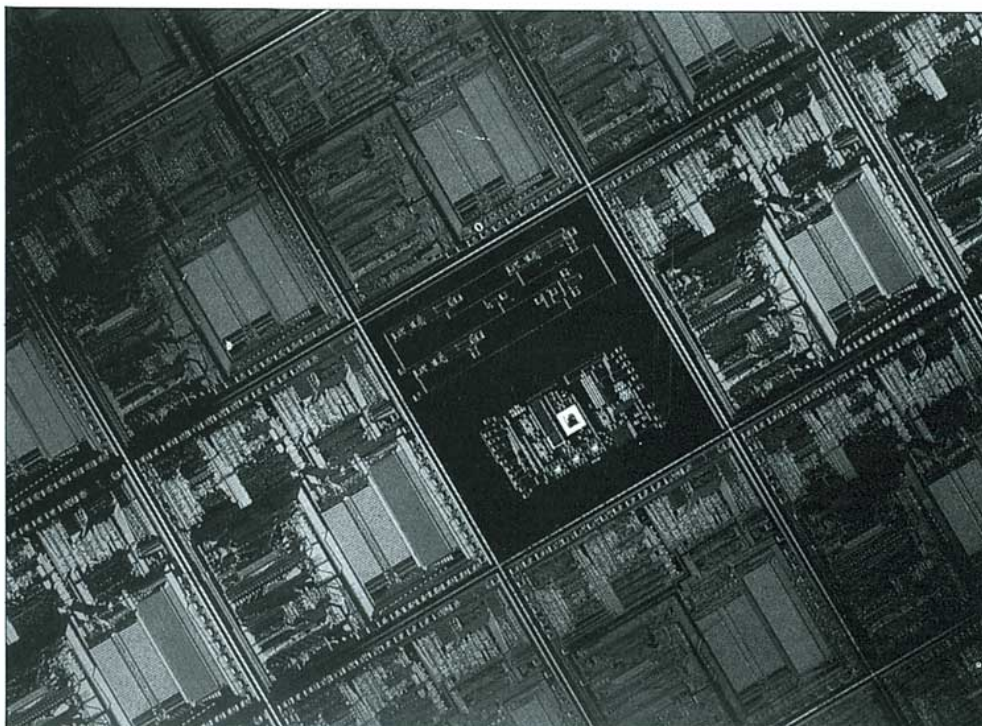
La tercera generación es el repetidor de obleas (Wafer Stepper), una variación radical de los principios utilizados en las otras dos generaciones. En lugar de una máscara se utiliza una retícula que contiene un circuito cinco o diez veces el tamaño de la estructura final. Luz ultravioleta pasa a través de la retícula enfocado en un circuito solamente de los contenidos en la oblea. Este procedimiento permite alinear cada circuito individualmente y ejercer un control dimensional más riguroso. Estas máquinas son muy caras —100.000.000 de pesetas— y tienen una cadencia de unas veinticinco exposiciones hora. Su principal limitación es la longi-



tud de onda de la fuente luminosa, que determina hasta que punto se pueden reducir las dimensiones reproducidas sobre las obleas. Estos alineadores se utilizan hoy día para la producción de productos con dimensiones inferiores a una micra.

La próxima generación puede ser el equipo de haz de electrones que se utiliza en la actualidad para la fabricación de máscaras. El haz de electrones permite la escritura directa en las obleas sin que sea necesario utilizar máscaras o retículas. Estas máquinas tienen una cadencia de cinco exposiciones hora y sus principales inconvenientes son el precio —500.000.000 de pesetas— y el mantenimiento del equipo. Es difícil concebir que el haz de electrones reemplace a los repetidores de obleas. Es más lógico anticipar que los fabricantes de repetidores desarrollarán fuentes luminosas con longitud de ondas capaces de procesar dimensiones inferiores a la media micra. Otra posibilidad muy excitante son las máquinas de rayos X que han progresado mucho desde hace unos

“
El progreso más importante en la fabricación de C.I. proviene de los sistemas ópticos de alineadores de máscaras.
”



meses, y que tienen un precio —100.000.000 de pesetas— y una cadencia de producción razonables.

Si ahora se calcula la inversión necesaria para fabricar C.I. en función de la generación de equipo para alinear máscaras, se puede deducir rápidamente que la industria de semiconductores requiere hoy día inversiones fabulosas. Es decir, mientras que con la primera generación 1.000.000 de pesetas son suficientes para realizar cien exposiciones hora, se necesitan 10.000.000.000 de pesetas para realizar lo mismo con el haz de electrones. A pesar de esto, la reducción de dimensiones que se obtiene en un transistor típico y la mejora en rendimiento que se produce al utilizar mejor equipo son tales, que el coste de fabricación de un transistor se ha reducido de un factor de 10.000 a través de las diferentes generaciones de equipo óptico.

DEFINICION DE MOTIVOS

Los procedimientos em-

pleados para grabar motivos en las obleas se ha alterado drásticamente desde los años cincuenta. Se ha pasado del grabado químico (Wet Etch) al grabado asistido por Plasma (Dry Etch).

No es suficiente el poder definir sobre una resina fotosensible, con alineadores de máscaras que cuestan más de 100.000.000 de pesetas, una línea de menos de un micra de anchura. Es necesario después transferir la imagen de la resina a la oblea con la menor variación de dimensión posible. Para conseguirlo ha sido necesario revolucionar la técnica de grabar con la introducción del equipo plasma que ha permitido, poco a poco, a través de varias generaciones, grabados casi anisótropos y, por consiguiente, una reducción sustancial del ataque lateral de los motivos geométricos. El desarrollo continua en este tema para poder grabar de una forma anisótropa dimensiones considerablemente inferiores a la micra. Se investiga la utilización de "Ion Milling" y "Reactive Ion Etching", la anisotropía

de diferentes tipos de reacciones químicas y la selectividad de ataque entre la resina fotosensible, el material que se graba y el silicio.

DEPOSICION DE CAPAS DELGADAS

Otra actividad que ha contribuido considerablemente al desarrollo de C.I. es la técnica de depósito de capas delgadas. Los primeros reactores CVD (Chemical Vapor Deposition) eran muy difíciles de utilizar y la propiedades de las capas delgadas no eran homogéneas o reproducibles. El equipo Nitrox de AMT. (Applied Materials Technology), utilizado para depositar silicio policristalino y nitruro de silicio (Si_3N_4), es un caso típico. Este es un reactor horizontal en el cual las obleas se colocan sobre una navicilla situada en la zona caliente del reactor. Para poder obtener una capa delgada cuya estequiometría es correcta y su espesor dentro de límites razonables, es necesario variar constantemente el gradiente de temperatura y la concentración de gases reactivos. Hoy, con la aparición del proceso LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition), los resultados son de una calidad excepcional con propiedades perfectamente controladas.

Uno de los aspectos críticos para el futuro, sobre el que se lleva a cabo una investigación importante, es el desarrollo de capas delgadas y de técnicas que permitan planarizar la superficie de la oblea cuando se utilizan varios niveles de metalización. Este tema es crítico para poder continuar a aumentar el nivel de integración de C.I. pues, en la mayoría de los casos, la dimensión de un diseño la determina el potencial de interconexión de la tecnología. La planarización del proceso no solamente permite mayor integración sino también mejor fiabilidad y rendimientos superiores.

“
La Industria de
semiconductores
requiere hoy día
inversiones
fabulosas.
”

OTRAS TECNOLOGIAS

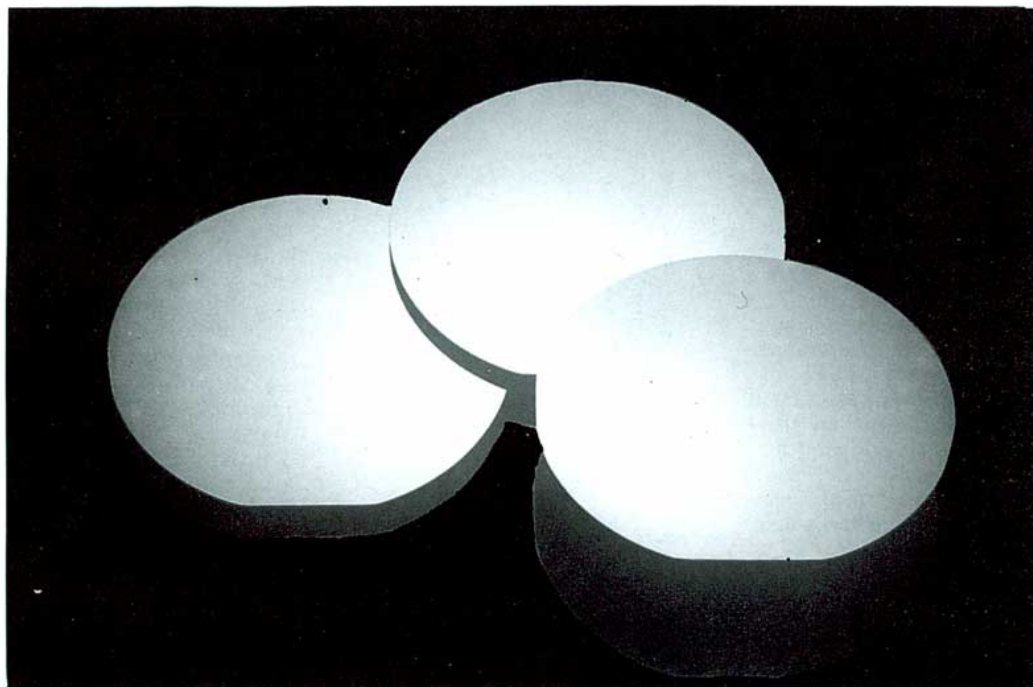
Para finalizar, pasando por alto la difusión de impurezas, la oxidación, la implantación iónica y la metalización, que también han avanzado considerablemente pero más a través del equipo que de la técnica de producción, se acentúa el hecho que la reducción de dimensiones de componentes implica una reducción de la temperatura a la cual se someten las obleas. Esta se ha rebajado de 1.200°C que se utilizó en los años cincuenta y sesenta a menos de 800°C hoy día.

Una descripción de mejoras realizadas en los temas de "Gettering", procedimientos de limpieza, fabricación de silicio cristalino, etc., llevaría demasiado espacio y no es posible abarcarlos en este artículo. Bastará con decir que también la mejora de estos procedimientos ha contribuido sustancialmente al avance de la microelectrónica.

Como se ha podido apreciar las tecnologías de producción de C.I. mezclan numerosas disciplinas, de la química orgánica a la física del estado sólido pasando por una multitud de especialidades. Es por ello que la Microelectrónica se ha llamado la tecnología más compleja que jamás ha confrontado la humanidad.

CONCLUSION

Como hemos visto la base tecnológica de la industria de semiconductores ha progresado dramáticamente desde su comienzo. Esta evolución se puede dividir en cinco fases correspondientes a distintos períodos de desarrollo. La primera fase, que comenzó en 1948 con el invento del transistor a contacto y continuó hasta los años cincuenta, se caracterizó por el desarrollo de la tecnología básica de semiconductores. La segunda fase comenzó con la introducción del C.I. a principios de los años sesenta. Durante esta fase, que se extendió



“
La
Microelectrónica
ha creado un
nuevo orden
económico y ha
transformado
nuestra sociedad.
”

hasta principios de los años setenta, el número de componentes en un C.I. aumentó hasta sobrepasar 100 estados lógicos, lo que se conoce como MSI (Medium Scale Integration). Esta progresión hacia altos niveles de integración indujo el desarrollo de numerosos productos. La tercera fase, que comenzó a principios de los años setenta, progresó rápidamente hacia la gran escala de integración conocida como LSI (Large Scale Integration) y con un número de puertas lógicas entre 100 y 1.000. Este nivel elevado de integración produjo una expansión dramática en aplicaciones y nuevos mercados para los semiconductores. A finales de los años setenta, la industria comenzó una cuarta fase conocida como VLSI (Very Large Scale Integration) en la que docenas de millares de transistores se procesaron en la misma pastilla de silicio. Finalmente, desde mediados de los años ochenta, la industria se ha lanzado en una nueva fase UHSI (Ultra High Scale integration), con cientos de miles de componentes fabricados en la misma pastilla de silicio. Este

aumento en el nivel de integración ha sido acompañado por un crecimiento exponencial en el desarrollo de productos y aplicaciones.

La Microelectrónica se sitúa al centro del desarrollo de la industria electrónica que incluye ordenadores, equipo de oficina, Telecomunicaciones, productos de consumo general, etc. El valor de este mercado es hoy día de veinticinco billones de pesetas y en 1990 superará cuarenta billones. La Electrónica se convertirá entonces en la industria más importante del mundo después del petróleo.

Microelectrónica, con su desarrollo tecnológico que ninguna otra industria ha podido igualar, ha creado un nuevo orden económico y transformado fundamentalmente nuestra sociedad. Así como la máquina a vapor y el motor eléctrico crearon una revolución industrial el permitir al hombre aplicar una fuerza física superior a sus posibilidades, la Microelectrónica ha creado la sociedad del conocimiento y de la Informática al extender el poder intelectual de la humanidad.