

Futuro de la industria de los semiconductores

G. Dan Hutcheson y Jerry D. Hutcheson

Tal vez estén contados los días de desarrollo vertiginoso, pero puede que el resultado sea una mayor variedad

La capacidad de almacenar y procesar información de mil maneras ha sido esencial para el progreso de la humanidad. Desde las remotas incisiones en arcilla de las tablillas sumerias hasta la imprenta de Gutenberg, el sistema decimal de Dewey y los semiconductores, el almacenamiento de la información ha constituido el catalizador de sistemas legales, políticos y sociales de complejidad creciente. También la ciencia moderna está estrechamente vinculada al procesamiento de la información, con el cual mantiene cierta simbiosis. Los avances científicos han permitido almacenar, extraer y procesar cada vez más información, gracias a cuyo bagaje se han producido nuevos progresos.

La fuerza motriz de este empeño decisivo, la que abrió una nueva era en los últimos decenios, fue la electrónica de semiconductores. Los circuitos integrados originaron no sólo ordenadores personales que han transformado el mundo empresarial, sino también sistemas de control para el mejor funcionamiento de las máquinas y sistemas de ayuda médica que salvan vidas humanas. De paso han hecho brotar industrias que cifran sus ingresos en billones de pesetas y dan trabajo a millones de personas. Estas y otras muchas ventajas derivan, en

G. DAN HUTCHESON y JERRY D. HUTCHESON han consagrado su vida profesional al progreso de la fabricación de semiconductores. Jerry, físico de formación, trabajó desde 1959 en RCA, Motorola y otras empresas. En 1976 fundó la compañía consultora VLSI Research, Inc. Su interés se centra en las interacciones de la técnica y la economía en la fabricación de semiconductores. Su hijo Dan es economista. En 1981 desarrolló el primer modelo de simulación basado en costos del proceso de fabricación para orientar a las empresas en la elección del equipo necesario.

buena parte, de la capacidad de integrar cada vez más transistores en una pastilla, a unos costes en continuo descenso.

Esa capacidad, que no tiene precedentes en ningún otro sector industrial, se halla tan arraigada en el de los semiconductores que se toma como una auténtica ley. No obstante, de vez en cuando se expresan temores de que los obstáculos técnicos y económicos lleguen pronto a frenar la evolución. Son muchas las veces que los expertos han vaticinado el inminente fin del espectáculo, pero la creatividad y el ingenio de otros colegas han echado por tierra sus predicciones.

En este momento, cuando el coste de construir una nueva planta de semiconductores roza el billón de pesetas y la densidad de transistores se aproxima a los límites teóricos impuestos por las técnicas utilizadas, muchos se preguntan qué va a hacer esta industria cuando finalmente tropiece con barreras de veras insalvables.

En 1964, a los seis años de la invención del circuito integrado, Gordon Moore observó que el número de transistores que podían integrarse en una pastilla se duplicaba a un ritmo anual. Moore, uno de los fundadores de Intel Corporation en 1968, predijo con acierto que esa tasa se mantendría en el futuro inmediato, lo que ha venido a llamarse ley de Moore y ha tenido importantes consecuencias.

Dado que la densidad doble no implicaba mayor inversión, el coste por transistor se reducía a la mitad en cada tanda de duplicación. Al multiplicar por dos los transistores, una pastilla de memoria puede almacenar el doble de datos. Con mayores niveles de integración se puede aunar un mayor número de funciones en la pastilla; una disposición espacial comprimida de los componentes, de los transistores por ejemplo, facilita una interacción más celer. Los usuarios

han podido así obtener por el mismo dinero una potencia informática acrecentada, lo que ha estimulado tanto las ventas de microcircuitos como la demanda de potencias de procesamiento crecientes.

Para asombro de muchos expertos, incluso del propio Moore, la integración continuó creciendo a un ritmo sorprendente. Cierto es que, al final de los setenta, se había desacelerado el paso; el número de transistores se duplicaba cada dieciocho meses. Pero desde entonces el ritmo se ha mantenido y hoy en día existen en el mercado circuitos integrados con más de seis millones de transistores y componentes electrónicos de 0,35 micrometros de dimensión transversal. Se espera que se vendan pronto pastillas con diez o más millones de transistores y de 0,25 e incluso de 0,16 micrometros.

No vaya a creerse que ha sido fácil llegar hasta los microcircuitos actuales; los fabricantes han tenido que superar, en una carrera erizada de obstáculos, notables limitaciones en sus equipos y procesos de producción. Ninguno de estos problemas resultó ser la temida barrera final cuya superación exigiera costes tan elevados como para detener o por lo menos frenar el avance de la técnica y, por tanto, el desarrollo de este sector industrial. Los sucesivos impedimentos, empero, han sido cada vez más imponentes por razones ligadas a las técnicas en que se funda la fabricación de semiconductores.

Se construye un microcircuito creando e interconectando transistores sobre una lámina de silicio para formar sistemas electrónicos complejos. El proceso de fabricación consta de una serie de etapas, o capas de máscara, en las que se depositan sobre el silicio películas de diversos materiales —algunos de ellos fotosensibles— y se exponen luego a la luz. Tras la deposición y el

1. MAQUETA DE CIRCUITOS. Registra el diseño de una pastilla. Las distintas capas de la pastilla se muestran en colores diferentes. La imagen ilustra parte de los planos del futuro microprocesador Power PC 620 de Motorola.

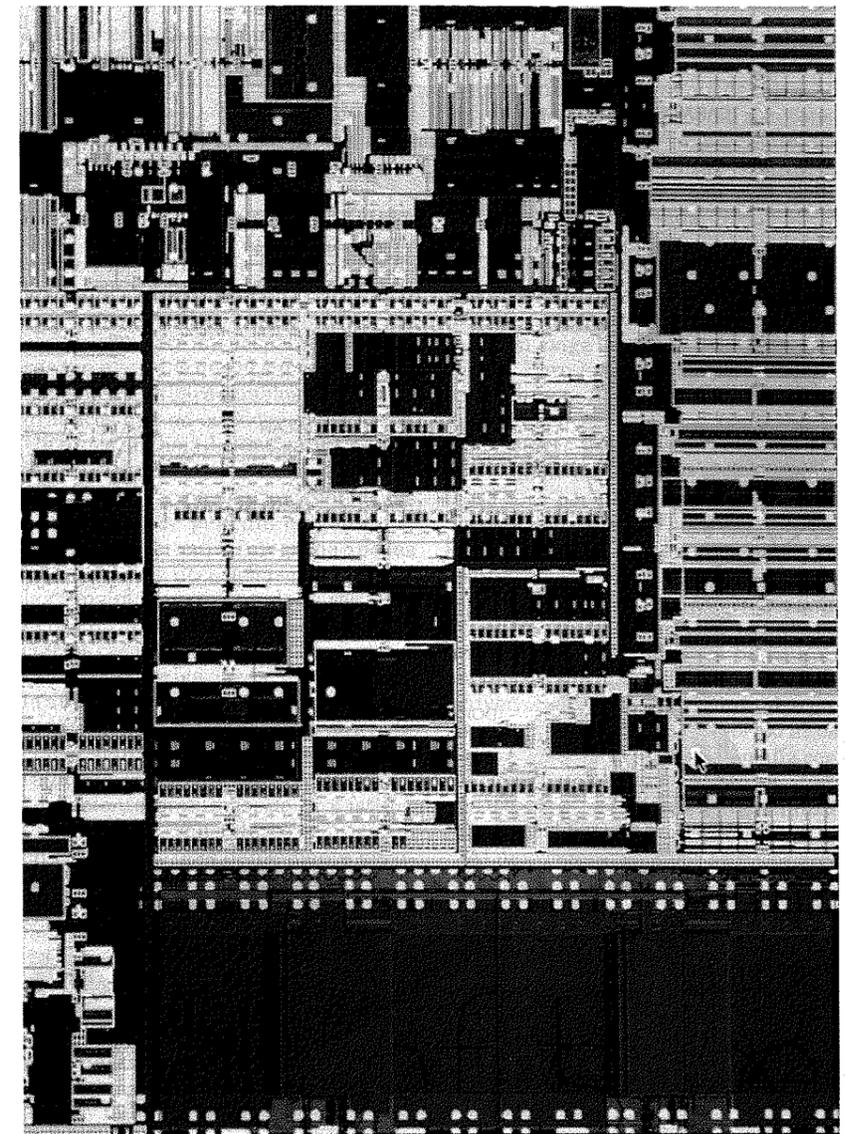
tratamiento litográfico, se procesan dichas capas para "grabar" los patrones que, en alineación exacta y combinados con los de las capas sucesivas, producen los transistores y sus conexiones. Suelen obtenerse 200 o más pastillas a la vez sobre un delgado disco u oblea de silicio.

En el primer juego de capas de máscara, se depositan películas aislantes de óxido para formar los transistores. A continuación se extiende sobre esas películas un revestimiento fotosensible. Mediante una máquina posicionadora por pasos, similar a una ampliadora fotográfica, se expone ese polímero fotosensible. La máquina posicionadora emplea un retículo o máscara para proyectar un patrón sobre el polímero fotosensible. Una vez expuesto, el polímero se revela, perfilándose así los espacios —ventanas de contacto— donde se interconectan las diferentes capas conductoras. Un agente grabador ataca entonces la película de óxido al objeto de que puedan establecerse los contactos eléctricos con los transistores. Se elimina el polímero fotosensible.

Más juegos de capas de máscara, con etapas de deposición, litografía y ataque muy similares, crean las películas conductoras de metal o polisilicio necesarias para enlazar los transistores. La fabricación de una pastilla requiere unas 19 capas en total.

La física subyacente a estos procesos fabriles induce a imaginar posibles obstáculos que se opondrían a un progreso continuo. En primer lugar, el relacionado con el límite de resolución de Rayleigh, así llamado en honor del premio Nobel John William Strutt, tercer barón de Rayleigh. En virtud de ese límite, el tamaño de las características más pequeñas que puede distinguir un sistema óptico de apertura circular es proporcional a la longitud de onda de la fuente luminosa dividida por el diámetro de la abertura del objetivo. En otras palabras, cuanto más corta sea la longitud de onda y mayor la abertura, más fina será la resolución.

Dicho límite constituye una ley fundamental de este sector industrial, puesto que sirve para determinar el tamaño mínimo de los transistores materializables en una pastilla. En la litografía de los circuitos integrados la

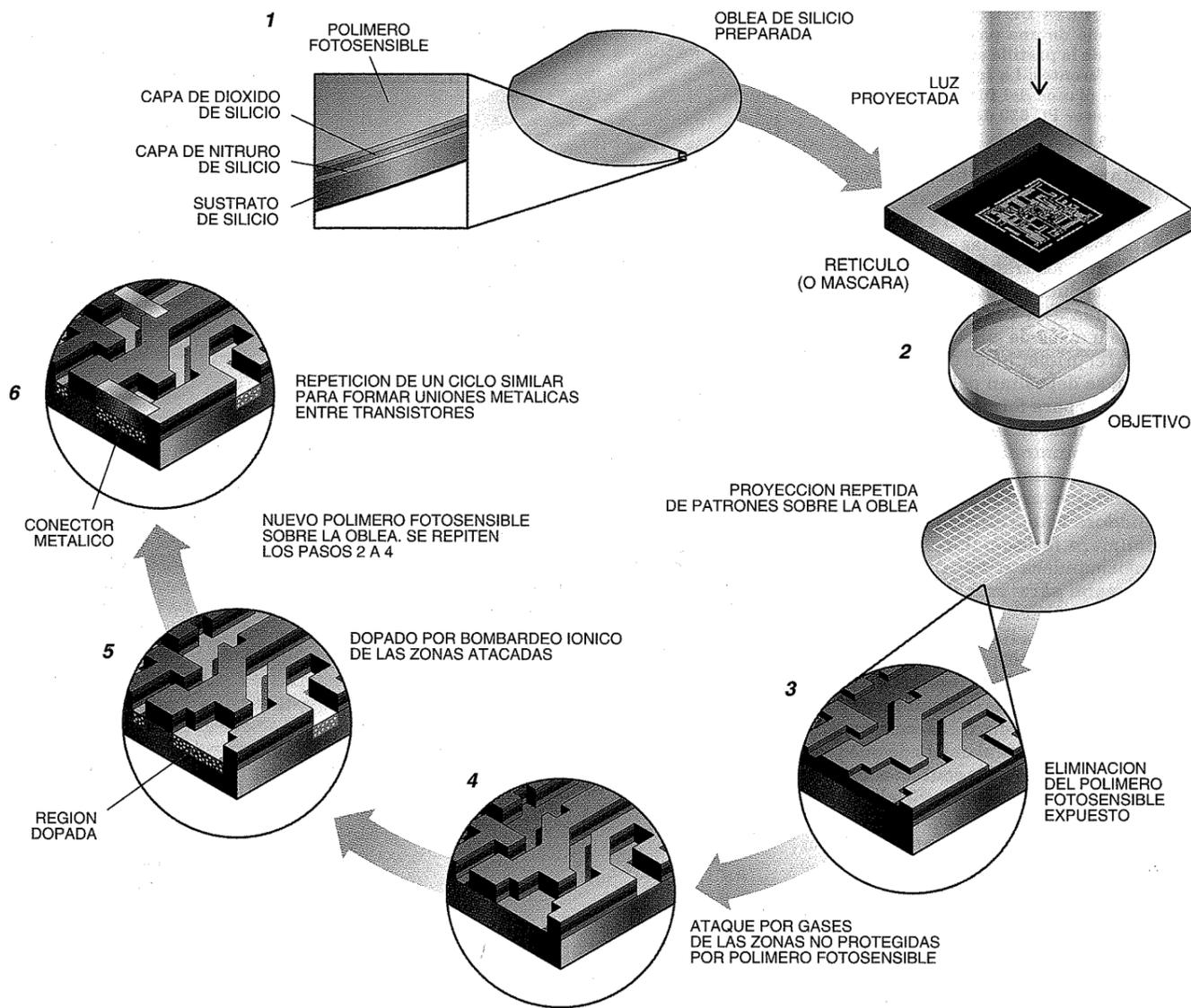


fente de luz al uso es la lámpara de mercurio. Sus rayas espectrales más útiles para estos fines se producen a los 436 y 365 nanómetros, las llamadas rayas *g* e *i* del mercurio. La primera de ellas es visible para el ojo humano y la última apenas sobrepasa la visibilidad en el ultravioleta. Las aberturas numéricas varían desde un extremo bajo cercano a 0,28 micrometros para lentes industriales corrientes hasta un valor de unos 0,65 para las de herramientas litográficas de punta. Considerando estos valores junto con otros aspectos derivados de las demandas de la fabricación en masa, se obtiene una resolución límite en torno a 0,54 micrometros para lentes de raya *g* y de 0,48 para las de raya *i*.

Hasta mediados de los ochenta se aceptó como límite práctico el funcionamiento en la raya *g*. Pero uno tras

otro se fueron allanando los obstáculos que impedían el funcionamiento en la raya *i*. Ocurrió de una manera que ilustra las complejas relaciones existentes entre economía y técnica en esta industria. No sólo se salvaron las barreras de orden técnico, sino que resultó que algunas otras no eran sino simples consecuencias del nivel de riesgo tolerado por la empresa. Esta historia tiene mucho que ver con la actual situación del sector, próxima a los límites prácticos del funcionamiento en la raya *i*.

Una de las dificultades para el funcionamiento en la raya *i* estribaba en que casi todos los vidrios de las lentes son opacos a esas frecuencias, lo que obligaba a utilizar el cuarzo. Aunque las lentes de cuarzo eran realizables, se aducía que sería difícil comprobar la alineación de configuraciones que



2. LAS PASTILLAS SE FABRICAN en ciclos de etapas repetidas hasta veinte veces. De una oblea de silicio con recubrimiento fotosensible se obtienen muchas pastillas a la vez (1). En cada ciclo se proyecta repetidamente un patrón distinto en la oblea (2), formándose una pastilla en cada posición de la ima-

gen. El recubrimiento fotosensible se elimina (3); se atacan con gases las zonas expuestas a la luz (4). Dichas zonas se bombardean con iones ("dopado"), creando transistores (5). Estos se conectan luego al añadir capas de metal y de aislante en sucesivos ciclos (6).

no son visibles. Además sólo un setenta por ciento de la radiación en raya *i* atraviesa el cuarzo; el resto calienta la lente, con la posible distorsión consiguiente de la imagen.

Y no acababan ahí los problemas. El límite de Rayleigh fija también el intervalo dentro del cual se mantiene enfocado el patrón proyectado por la lente. La restricción de la profundidad de enfoque, llamada profundidad de campo, va en contra de los límites de resolución; a mejor resolución, menor profundidad de campo. La profundidad de campo de las lentes aludidas es de unos 0,52 micrometros en las mejores lentes de raya *g* y de 0,50 en las de

raya *i*. Profundidades tan exiguas exigen que la superficie de la oblea sea extremadamente plana, mucho más de lo que hace pocos años podía conseguirse a lo largo de la diagonal de una pastilla grande con el mejor equipo disponible.

Para superar tales inconvenientes se idearon soluciones nuevas; por ejemplo, métodos de acabado que aseguraban superficies perfectamente planas. Mediante ajustes finos de los bordes de los patrones del retículo se pudo desplazar de fase la radiación de raya *i* entrante. Se lograba así una definición más nítida de los bordes y, por tanto, dimensiones menores, con lo que

se soslayaba el límite de Rayleigh. Uno de los últimos retoques consistió en aceptar un valor más bajo de la constante de proporcionalidad, que guarda relación con el grado de contraste de la imagen proyectada sobre la oblea durante la litografía. Para el funcionamiento en raya *i* los fabricantes se armaron de coraje y aceptaron una constante de proporcionalidad inferior a la que hasta entonces se había considerado práctica. Esto implicaba unos márgenes más reducidos durante la fabricación y exigía controles más rígidos sobre los procesos de litografía, deposición y ataque para que el número de pastillas aceptables por

oblea (el rendimiento) se mantuviese elevado. Gracias a tales innovaciones, hoy es pura rutina manejar dimensiones de 0,35 micrometros en raya *i*.

Lo que realmente se discutía en este último caso era la pérdida de contraste que el fabricante estaba dispuesto a tolerar. Con un contraste perfecto, la imagen creada en el polímero fotosensible es nítida. Lo mismo que tantas otras limitaciones del sector, la relación de contraste parecía una barrera técnica cuando en realidad entrañaba una decisión arriesgada. Se comprobó que con una menor relación de contraste no disminuían los rendimientos, siempre que en otras partes del proceso se aplicasen controles más estrictos.

Es difícil predecir cuándo se agotará, si es que ello ocurre, esta vena de mejoras creativas. No obstante, antes de topar con auténticas barreras técnicas se dejará sentir la repercusión económica de esa aproximación a las mismas. Sabido es que los costes implicados en la consecución de niveles más elevados de prestaciones de la pastilla crecen con gran rapidez conforme nos acercamos a los límites de determinada técnica de fabricación, sobrepasados luego. Los costes en aumento podrían arrastrar los precios hasta más allá de lo que los compradores estarían dispuestos a tolerar, provocando el estancamiento del mercado antes de tropezar con las barreras técnicas.

Pero cuando por fin se asienta una nueva técnica de fabricación, los costes de las pastillas comienzan a descender. En ese momento la industria ha pasado de una curva coste-prestaciones asociada a la técnica antigua a otra curva propia del nuevo proceso. En efecto, el salto de una técnica a otra hace que la curva de costes descienda y aleja más los límites técnicos. Cuando tal cosa sucede se pueden conseguir niveles de prestaciones más altos sin elevar los costes, lo cual mueve a los compradores a sustituir sus viejos equipos. Lo sabe muy bien la industria electrónica, donde los productos suelen quedarse anticuados antes de su total desgaste.

Los principios hasta aquí expuestos se aplican a toda clase de pastillas, pero las de memoria son las que cubren un mayor volumen de negocio y, por varios conceptos, son las más representativas. En veinticinco años el precio de un megabyte de memoria de semiconductores ha descendido desde 70 millones a menos de 5000 pesetas. Pero en el mismo período el costo de construir una fábrica para producir las pastillas se ha elevado

desde menos de 500 millones hasta los 150.000 millones de pesetas, con lo que sólo unas pocas firmas muy importantes pueden abordar esta actividad. La imparabable ascensión de estos costes, sobre todo disparada por los gastos que implica superar barreras técnicas cada vez más formidables, obliga de nuevo a centrar la atención en los límites de la industria de los semiconductores.

No es probable que sufra un parón a corto plazo. Pero nos acercamos a barreras tan elevadas que el superarlas probablemente exigirá cambios mucho más drásticos que en ocasiones anteriores. Un breve análisis de los obstáculos permitirá comprender las razones.

En su mayor parte provienen de las estructuras de película delgada que componen el circuito integrado o de las fuentes de luz necesarias para formar las finísimas pistas conductoras, o de la propia anchura de dichas pistas. En ciertos casos se relacionan con la constante dieléctrica de la película aislante. La constante dieléctrica nos indica la capacidad que posee una película aislante para evitar corrientes de fuga entre las pistas conductoras, sumamente próximas, de la pastilla. Cuantos más transistores se integren en la pastilla, más densamente agrupadas estarán estas pistas, con lo que aumentará la diafonía entre ellas.

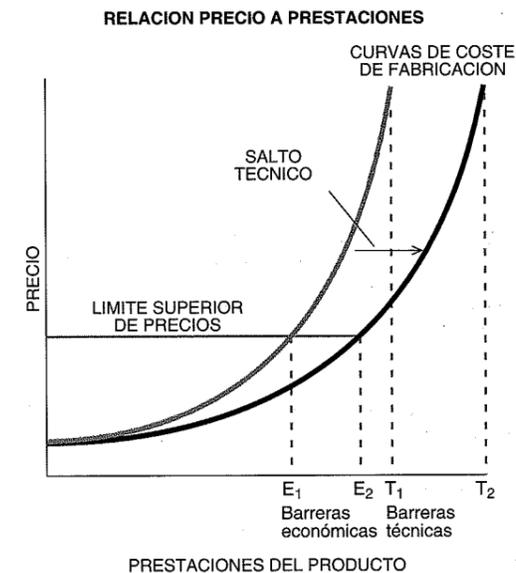
Para evitarlo podría reducirse el valor de la constante dieléctrica, lo que haría más impermeable a la diafonía el aislante. Pero esto, a su vez, origina una doble búsqueda: por un lado, de materiales nuevos de más baja constante dieléctrica y, por otro, de nuevas estructuras pelliculares capaces de reducir todavía más la constante dieléctrica total. Se está investigando la posibilidad de sembrar la película aislante con diminutos huecos para aprovechar la bajísima constante dieléctrica del aire o del vacío.

En otros lugares de la pastilla se necesitan materiales con la propiedad opuesta: una elevada constante dieléctrica. La mayoría de los circuitos integrados requieren condensadores. En una memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM) cada bit se almacena en un condensador, dispositivo capaz de retener la carga eléctrica. (Un condensador cargado repre-

senta el 1 binario; uno descargado, el 0.) Lo normal es que la capacitancia disponible en la pastilla se quede corta. La capacitancia es proporcional a la constante dieléctrica; por consiguiente, las DRAM y otras pastillas similares requieren materiales con una constante dieléctrica elevada.

La búsqueda de nuevas fuentes de luz para litografía es asimismo impresionante. La mayor finura de resolución exige longitudes de onda más cortas. Pero la luz de mercurio al uso emite muy poca energía en longitudes de onda inferiores a los 365 nanómetros de raya *i*. Los láseres excímeros descienden hasta unos 193 nanómetros, pero por debajo de esa longitud de onda generan muy poca energía. En los últimos años se ha aplicado la litografía por láser excímero para fabricar pastillas de aplicación especial, de grandes prestaciones, en pequeños lotes. Para longitudes de onda aún más cortas las fuentes de rayos X constituyen el último recurso. Sin embargo, los resultados producidos por 20 años de investigación sobre la litografía con rayos X sólo han sido modestos y no existen en el mercado pastillas fabricadas por tal procedimiento.

Al aparecer obstáculos técnicos cre-



FUENTE: VLSI Research, Inc.

3. UNA CURVA DE COSTES caracteriza un sistema de fabricación determinado. En las barreras técnicas T_1 y T_2 una pequeñísima mejora de prestaciones requiere un enorme aumento de coste. Pero mucho antes se tropieza con las barreras económicas, E_1 y E_2 , en la intersección de las curvas con la línea que representa los precios máximos tolerados por los usuarios. Los saltos técnicos hacen descender la curva a la posición de color más oscuro. Entonces mejoran las prestaciones y las barreras pasan a ser E_2 y T_2 .

¿Cuánto rinde el dinero?

Durante sesenta años la mayoría de las empresas se sirvieron del mismo modelo para registrar los rendimientos financieros de sus inversiones en equipos, investigación, gestión de mercados y todos los demás conceptos. Desarrollado por Donaldson Brown de Du Pont en el umbral de la primera guerra mundial, la primera empresa en aplicarlo fue General Motors en su esfuerzo por sobrepasar a Ford Motor Company como líder del mercado de automóviles.

Desde su adopción universal, el modelo en cuestión, llamado de rendimiento de la inversión, o ROI (*return on investment*), ha mantenido su vali-

muchos— que en absoluto son lineales. Desde un punto de vista económico, el carácter no lineal distingue a la industria de los semiconductores de cualquier otra gran industria; no sólo eso: también hace inadecuados todos los demás modelos.

Las inversiones en equipos e investigación que periódicamente necesita este sector son bastante grandes y crecen exponencialmente. Además, como en toda empresa, las inversiones en estos conceptos y otros análogos deben generar un beneficio saneado. Pero hoy día las firmas de semiconductores carecen de medios para determinar con precisión qué

parte de su rendimiento financiero procede de sus inversiones en equipo, lo que les plantea un grave problema. Desde hace años venimos trabajando en métodos descriptivos del sector que tengan en cuenta los elementos no lineales, con miras a modificar el modelo ROI.

En el modelo clásico se acude a inversiones de capital adicionales cuando la capacidad real de un fabricante no alcanza la capacidad prevista (entendida ésta como la capacidad que la empresa cree necesaria para satisfacer la demanda en un futuro inmediato). Estas diferencias suelen deberse al envejecimiento del equipo y a la pérdida de personal experto. En el sector de los semiconductores no sólo hay que anticiparse constantemente a los aumentos de capacidad, sino que también se deben prever y planificar los grandes avances en la propia técnica de fabricación.

Para dar cuenta de este efecto de frenado técnico, empezamos por considerar la relación del efectivo generado en cualquier año determinado con las inversiones en nuevas técnicas del año anterior. En este contexto entendemos por nuevas técnicas los nuevos equipos de fabricación y la investigación y desarrollo. El efectivo generado durante el

año es el beneficio bruto resultado de las operaciones, incluyendo el dinero destinado a la reinversión en investigación y desarrollo.

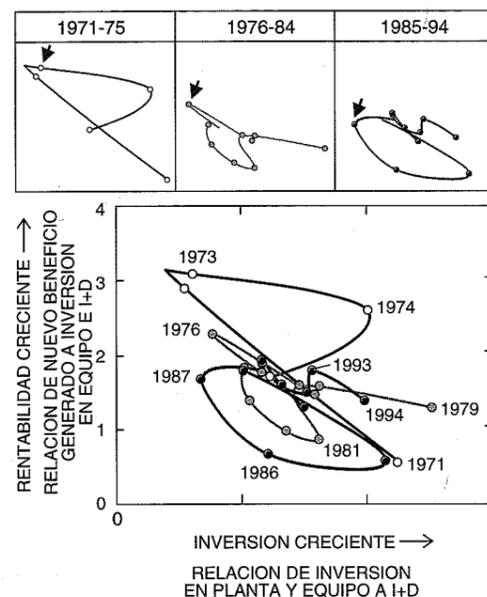
Esta relación nos indica el incremento de beneficios por incremento de inversión con un año de desfase. Constituye un exponente real del grado de rentabilidad que alcanza una compañía gracias a sus inversiones en técnicas cada vez más costosas. El ROI, por el contrario, mide los beneficios incrementales durante el año procedentes de todas las inversiones, no solamente de las del año anterior.

Hasta aquí no hemos hecho más que incluir en las nuevas técnicas el equipo de fabricación incorporado y la investigación y desarrollo. Pero el efecto del frenado técnico se hace más acentuado cuando se separan estas dos categorías y se dilucidan los flujos y reflujos entre ellas. Una manera de conseguirlo es calcular año tras año la razón entre estas dos inversiones y después representarla en función de la relación antes mencionada entre efectivo generado en el año y las inversiones en nuevas técnicas del año anterior, como ilustra el adjunto diagrama o carta de fase para la compañía Intel.

Conectando los puntos marcados en el diagrama se trazan bucles correspondientes a ciclos de unos seis años. En cada uno de ellos, Intel pasa desde un período de operaciones no rentables causadas por fuertes inversiones de capital hasta otro período en el que se consiguen grandes beneficios derivados de inversiones de capital mucho más ligeras. En el gráfico se ve que Intel entra ahora en otro período de fuerte inversión de capital. Otras empresas de semiconductores (y asimiladas) recorren ciclos parecidos, si bien varían de una a otra los períodos de rentabilidad y de fuertes inversiones.

La parte inferior de cada bucle es más baja que la del bucle precedente. Esto quizá sea la información más interesante que ofrece la ilustración: significa que los beneficios de Intel, con relación a los gastos que los han generado, descienden en cada ciclo sucesivo. Al mostrar el ciclo completo entre las inversiones en técnica y su rentabilidad, la carta de fase es un poderoso instrumento para observar y gestionar los ciclos de inversión peculiares de esta singular y dinámica industria.

—G.D.H. y J.D.H



LA CARTA DE FASE muestra la relación entre beneficios e inversiones en nuevas técnicas a lo largo de distintas épocas de Intel. Uniendo los puntos señalados se trazan bucles que representan ciclos de alrededor de seis años (en diferentes colores). En cada ciclo se pasa de un período de escasa rentabilidad con fuertes inversiones a otro de muy buenos rendimientos en efectivo a partir de inversiones mucho menores. Las flechas verdes señalan el año de cada ciclo en que Intel obtuvo mayores ganancias y gastó menos en equipo.

de las industrias con índices de crecimiento y de avance técnico relativamente pequeños. Los autores no tienen noticia de que el modelo se haya comportado bien en el sector de los semiconductores, en el que hay numerosos índices de variación—prestaciones del producto y coste del equipo de fabricación, entre otros

este efecto de frenado técnico, empezamos por considerar la relación del efectivo generado en cualquier año determinado con las inversiones en nuevas técnicas del año anterior. En este contexto entendemos por nuevas técnicas los nuevos equipos de fabricación y la investigación y desarrollo. El efectivo generado durante el

cen también las barreras económicas, usualmente manifestadas en elevaciones de coste de los equipos, sobre todo de litografía. Las mejoras del equipo litográfico adquieren especial importancia porque determinan las dimensiones mínimas que pueden materializarse en una pastilla. Aunque esta posible dimensión mínima se haya ido achicando un 14 por ciento anual desde los inicios del gremio, el precio del equipo ha subido cada año un 28 por ciento.

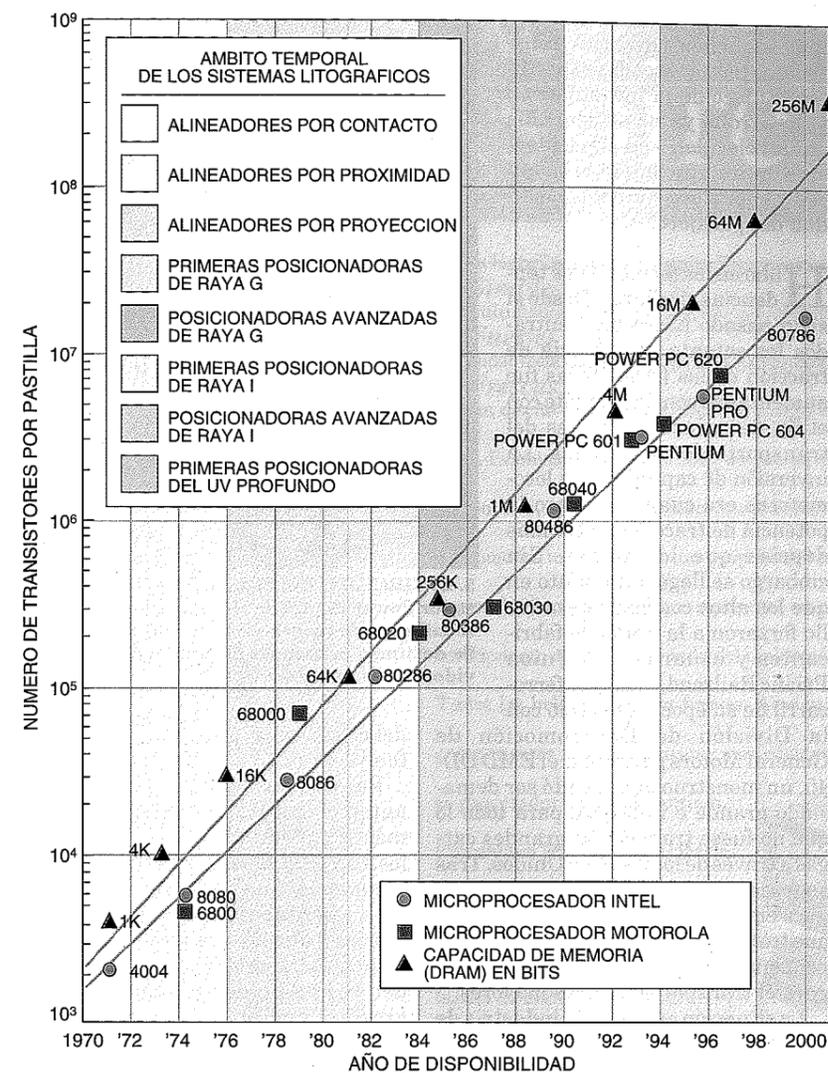
Al principio el coste se decuplicaba con cada nueva generación de equipo litográfico. De entonces acá se ha logrado reducir un aumento tan fuerte a una simple duplicación de precios entre una generación y otra de alineadores de posición. Otros tipos de equipos utilizados en la fabricación de semiconductores han conocido un comportamiento similar.

Esta es la razón de que los costes generales de la creación de fábricas de semiconductores hayan crecido a la mitad del ritmo predicho por Moore, duplicándose cada tres años. Intel se gasta el equivalente de más de 140.000 millones de pesetas en cada nueva planta que abre en EE.UU.; Samsung y Siemens construyen factorías que costarán cerca de 180.000 millones y Motorola proyecta una planta que podría llegar a los 300.000 millones. Aunque pueden construirse fábricas más pequeñas por menos dinero, su rendimiento es menor.

Estos enormes costes de las fábricas confirman que nos aproximamos a barreras técnicas imponentes. Sin embargo, nos parece infundado el temor de que sean insalvables y fueren a un parón del sector. Lo que sí puede suceder es que los precios de los semiconductores aumenten y se desacelere el ritmo de cambio.

Ello además tendría algún precedente. Entre 1985 y 1988 el coste por bit de memoria creció un 279 por ciento sin consecuencias catastróficas; antes bien, 1988 fue uno de los mejores años en la industria de semiconductores. Cuando el coste por bit inicie una subida incesante, probablemente sobrevendrá una transformación industrial que altere los modelos de empresa.

En la práctica, toda industria que perdure algunos decenios habrá pasado por tales transformaciones. Pese a su carácter singular, la industria de los semiconductores se rige también por los principios económicos de la oferta y la demanda. Podemos, pues, acudir a la historia de sectores más antiguos, como la aviación, los ferrocarriles y la automoción, para buscar episodios ilustrativos de lo que cabe esperar.



FUENTE: VLSI Research, Inc.; Integrated Circuit Engineering Corporation

4. LAS DENSIDADES DE TRANSISTORES en los circuitos integrados han crecido exponencialmente, como indica la gráfica logarítmica. Para sostener tal ritmo se han utilizado en la fabricación sucesivos sistemas litográficos que proyectan en las obleas los patrones de circuitos. La mayor regularidad y simplicidad del diseño han conseguido elevar las densidades de las pastillas de memoria.

Como en los semiconductores, los comienzos de la industria aeronáutica fueron muy rápidos. En menos de cuarenta años se pasó del monoplano de los hermanos Wright al Clipper de Pan Am y a las Flying Fortress y Superfortress. También el sector atendió primeramente a los mercados militares antes de dedicarse a la aviación comercial. La industria aeronáutica sostuvo su crecimiento disminuyendo los costes por pasajero y kilómetro recorrido, a la par que reducía los tiempos de vuelo. Los dos objetivos son equiparables a los tenaces esfuerzos por aumentar la densidad de transistores en una pastilla y mejorar así las prestaciones, reduciendo además los costes.

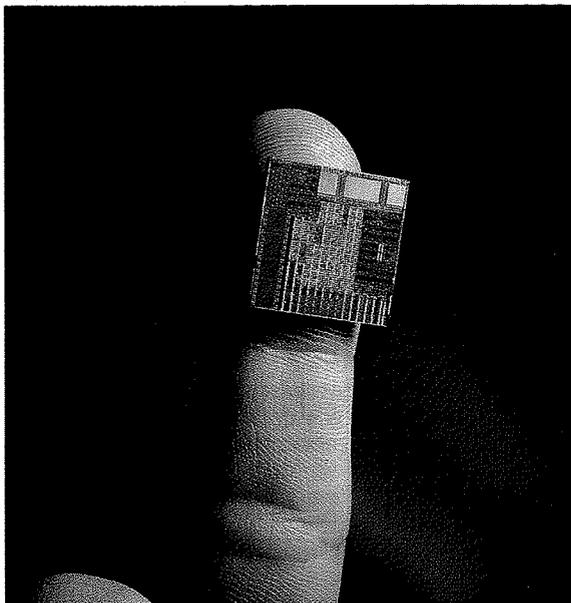
La aviación progresó durante decenios concentrando su investigación y desarrollo en aumentar la capacidad de pasajeros y la velocidad. Finalmente se llegó a un máximo de capacidad con el Boeing 747 y a un tope de velocidad con el Concorde. El 747 tuvo un gran éxito, pero sus numerosas plazas sólo se llenaban en las rutas más largas. El Concorde, por su parte, vio limitada su utilización por la contaminación acústica que creaba. Pero ambos representaron un límite, en el sentido de que la técnica no permitía en condiciones realistas obtener velocidades y capacidades mayores. Pese a ello la aviación no cayó en barrena, sino que entró en una segunda fase en

la cual se diseñaron aviones más pequeños y diversos, contruidos para mercados específicos. El foco de la investigación y desarrollo ya no se centraba en la velocidad y la capacidad, sino en un funcionamiento eficaz y silencioso y en la comodidad del pasajero.

Hubo en los ferrocarriles tendencias similares. Desde el siglo pasado hasta bien entrados los setenta la potencia de tracción de las locomotoras fue aumentando continuamente con el fin de reducir los costes del transporte de mercancías. La inversión de capital en las locomotoras era cuantiosa, pero la potencia de tracción crecía más deprisa que los costes. Sin embargo se llegó a un punto en que los altos costes de desarrollo forzaron a la unión de fabricantes y usuarios. La Union Pacific Railroad, el mayor ferrocarril de su época, se asoció con la División de Electromoción de General Motors para crear el EMD DD-40, un monstruo que resultó ser demasiado grande e inflexible para todo lo que no fuese transportar grandes cargas a través de los Estados Unidos. Tras su fracaso, la industria ferroviaria volvió a emplear máquinas más pequeñas que trabajasen por separado con cargas pequeñas y fueran capaces de acoplarse para el transporte de otras mayores.

La situación actual de la industria de semiconductores no difiere mucho de la reseñada a propósito de las empresas ferroviarias antes del EMD DD-40. Cuesta tanto el desarrollo de nuevas factorías para las futuras generaciones de pastillas de memoria que las empresas han empezado a aliarse en diferentes grupos, cada uno de los cuales atacará a su manera el tremendo problema de la fabricación económica de pastillas de elevadísima densidad.

De la fabricación de automóviles pueden también extraerse lecciones. En los años veinte Henry Ford fue construyendo factorías cada vez más eficientes, hasta culminar en la planta gigantesca de Rouge, donde empezó a fabricarse el modelo A en 1928. Partíase allí del propio mineral de hierro para producir casi todas las piezas del coche. Pero el sector automovilístico había cambiado ya y el esfuerzo de Ford por reducir los costes de fabricación mediante la construcción de factorías mayores y de mejor rendimiento hubo que pagarlo sacrificando la diversidad de productos. Como decía el chiste, podía comprarse un coche Ford



5. EL CIRCUITO INTEGRADO, o dado, del microprocesador Power PC 620 de Motorola contiene cerca de siete millones de transistores. Se encapsula en cerámica. Se destina a estaciones de trabajo de ordenador y servidores de ficheros.

del color que se quisiera, siempre que fuera negro.

Las tendencias en la fabricación de automóviles se orientaron a ofrecer más facilidades, prestaciones y modelos. Alfred E. Sloan, de General Motors, se dio cuenta de que el rendimiento ya no aumentaba con el tamaño de la fábrica y que las grandes plantas eran buenas para producir grandes series del mismo producto. Por tanto, disgregó la empresa en divisiones con mercados claramente definidos y fábricas especializadas que las respaldasen. Los clientes prefirieron la mayor variedad de diseños resultante y General Motors empezó muy pronto a ganar mercado a costa de Ford.

El desarrollo de los microcircuitos sigue pasos semejantes. Intel diversificó en más de 30 variedades su oferta del microprocesador 486, mientras que a principios de los ochenta sólo ofrecía tres versiones del 8086 y nada más que dos del 8088. Las pastillas de memoria dinámica siguen esa pauta diversificadora. Toshiba, por ejemplo, posee actualmente quince veces más configuraciones DRAM de cuatro megabit que las de 64 kilobit que tenía en 1984.

En su fase inicial todas las industrias señaladas, desde las ferroviarias a las de semiconductores, se han esforzado por mejorar prestaciones y reducir costos. Las tres industrias del transporte, considerablemente más maduras, han pasado a una segunda fase en la que se persigue el refina-

miento y la diversidad de productos, de modo similar a lo que empieza a verse en la fabricación de microcircuitos. Las empresas aplican ahora la técnica a potenciar las líneas de productos más que a reducir los costes de fabricación. Hay que destacar que estas industrias han prosperado pese a la subida de los costes.

Puede no faltar mucho para que la industria de los semiconductores toque techo. El ritmo de la integración de transistores declinará y los costes de fabricación empezarán a dispararse. Pero como sugiere la experiencia de la aviación, el ferrocarril y el automóvil, los semiconductores pueden prosperar aunque encuentren nuevas barreras económicas y técnicas, en gran medida infranqueables. En una industria más madura, el desarrollo provendrá de productos refinados con una diversificación mayor.

El almacenamiento de la información, y las funciones sociales que de él dependen, continuarán su avance. En realidad, moderar el ritmo del progreso en los semiconductores podría acarrear inesperadas ventajas, como la de dar tiempo a los programas y arquitecturas informáticas para que asimilen los grandes saltos en prestaciones de los microcircuitos. También en la industria de los semiconductores la veteranía puede ser un grado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- IS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING EQUIPMENT STILL AFFORDABLE? Jerry D. Hutcheson y D. Dan Hutcheson en *Proceedings of the 1993 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, septiembre de 1993.
- SIA 1994 NATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS. Semiconductor Industry Association, 1994.
- LITHOGRAPHY AND THE FUTURE OF MOORE'S LAW. Gordon E. Moore en *SPIE Proceedings on Electron-Beam, X-Ray, EUV, and Ion Beam Lithographies for Manufacturing*, vol. 2437; febrero de 1995.
- HACIA EL "CERO COMA UNO". Gary Stix en *Investigación y Ciencia*, n.º 223, págs. 70-75, abril de 1995.
- AFFORDABILITY CONCERNS IN ADVANCED SEMICONDUCTOR MANUFACTURING: THE NATURE OF INDUSTRIAL LINKAGE. Donald A. Hicks y Steven Brown en *Proceedings of the 1995 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, septiembre de 1995.