

# Microchips en vertical

Los ingenieros han hallado la forma de comprimir mayor potencia de cómputo en los microcircuitos: construirlos no sólo a lo ancho, sino también a lo alto

Thomas H. Lee

La ciudad de San Francisco se extiende sobre unos 120 kilómetros cuadrados, el doble, aproximadamente, de la superficie de la isla de Manhattan. Pero la producción económica de Manhattan deja chiquita a la de San Francisco. Una de las principales razones de tal disparidad es que las oficinas de California, un territorio sísmicamente activo, propenden a dispersar a su personal y sus instalaciones casi a ras de suelo, mientras que en Nueva York las sedes de las empresas se apilan verticalmente, hacia el cielo. Al edificar a lo alto en lugar de a lo ancho los promotores no sólo incrementan el valor de sus terrenos, sino también la capacidad de trabajo de la ciudad en su conjunto.

Una estrategia similar, aplicada al mundo microscópico de los microcircuitos electrónicos, podría rejuvenecer a una industria de semiconductores que está mostrando síntomas de senectud desde hace algún tiempo. Resulta sorprendente que de los más de cien mil billones de transistores que, según Gordon E. Moore (uno de

los fundadores de Intel), han sido fabricados hasta la fecha, prácticamente todos se hayan construido "a ras del suelo", es decir, directamente sobre las superficies de cristales de silicio. La población de transistores por microcircuito se ha ido duplicando con una regularidad asombrosa ("ley de Moore" le llaman a eso en el ramo) mediante la ampliación de la superficie de los chips y la reducción creciente del tamaño de cada transistor. Pero, por así decirlo, se construyen solamente galerías comerciales, no rascacielos.

La situación no tardará en cambiar. Para empezar, los físicos nos dicen que la ley de Moore llegará a su fin cuando las puertas que controlan el flujo de información dentro del microcircuito lleguen a ser de sólo la longitud de onda de un electrón (en el silicio, del orden de 10 nanómetros); los transistores dejarán entonces de funcionar como tales. Por otra parte, en el camino que media entre los dispositivos actuales punteros y dicho límite fundamental se atisban muchos y amedrentadores obstáculos de naturaleza técnica. La

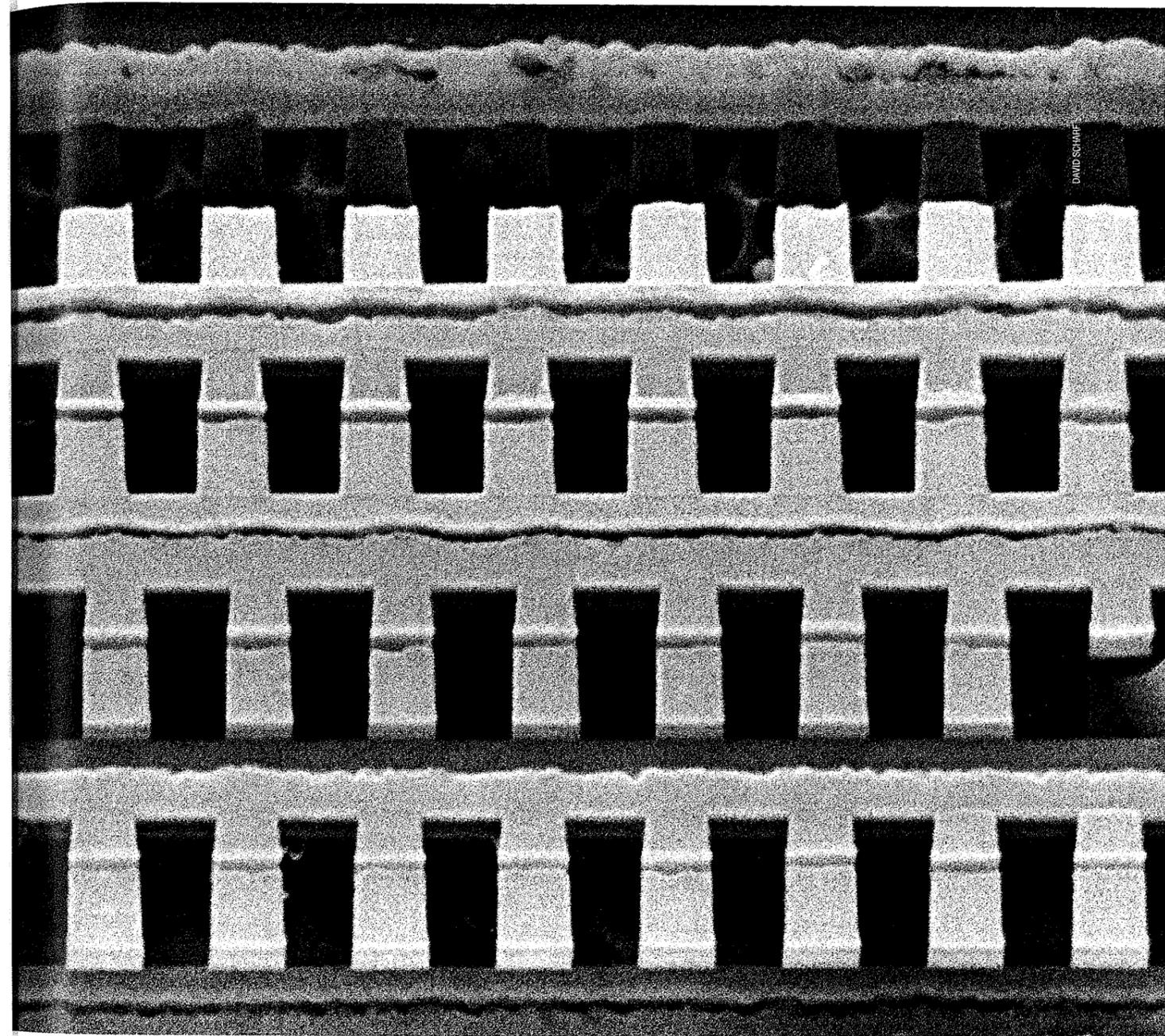
trayectoria del progreso ha empezado ya a declinar.

Por suerte, unos ingenieros hemos hallado recientemente una vía para esquivar algunos de tales obstáculos, dar a la ley de Moore alientos renovados e incluso acelerar la generación de mayor capacidad de cómputo a menor costo. Hemos demostrado que se pueden hacer microcircuitos verticales con las mismas fábricas de semiconductores de hoy, los mismos materiales para los chips y procedimientos de elaboración parecidos.

Unos microcircuitos "tridimensionales" —podría llamarlos "estereocircuitos" o "estereochips"— han sido puestos a la venta por Matrix Semiconductor, empresa fundada en 1998 por el autor con P. Michael Farmwald, científico informático, y Mark C. Johnson, experto en el diseño de microcircuitos. En la primera mitad de 2002 llegaron al mercado unos circuitos de memoria tridimensionales, los primeros ejemplares de una nueva generación de chips densos y económicos de la que se espera que haga que los medios de grabación digital resulten lo bastante económicos y prácticos como para reemplazar a la película fotográfica y las cintas de sonido. Hemos creado también, en los laboratorios de la Universidad de Stanford y de Matrix, prototipos de aparatos que incorporan circuitos lógicos verticales. Parece haber buenas razones para pensar que, incluso tratándose de microprocesadores, el techo es el cielo.

## Las lindes de Planilandia

En nuestros días, los microcircuitos más avanzados no son estrictamente bidimensionales. Así, por ejemplo, el procesador Pentium 4 de Intel consta de siete capas de conexión, incrustadas en configuraciones de material aislante. Empero, las regiones semiconductoras activas



1. APILADAS VERTICALMENTE, estas células de memoria puede almacenar ocho bits de información en la misma superficie que normalmente se asigna a un solo bit. Con estos microchips tridimensionales se pretende reducir el coste de la memoria digital.

yacen sólo en el estrato base de silicio puro.

La industria ha ido hasta ahora arreglándose para cumplir la ley de Moore; en gran medida lo ha logrado perfeccionando el manejo de la oblea de silicio. Las ciencias de materiales han inventado métodos para crear cristales de silicio gigantes, de 30 centímetros de diámetro, que contienen menos de una parte de impurezas en mil millones. Los robots disparan en las "salas limpias" dosis cuidadosamente calibradas de ciertos iones sobre las obleas reba-

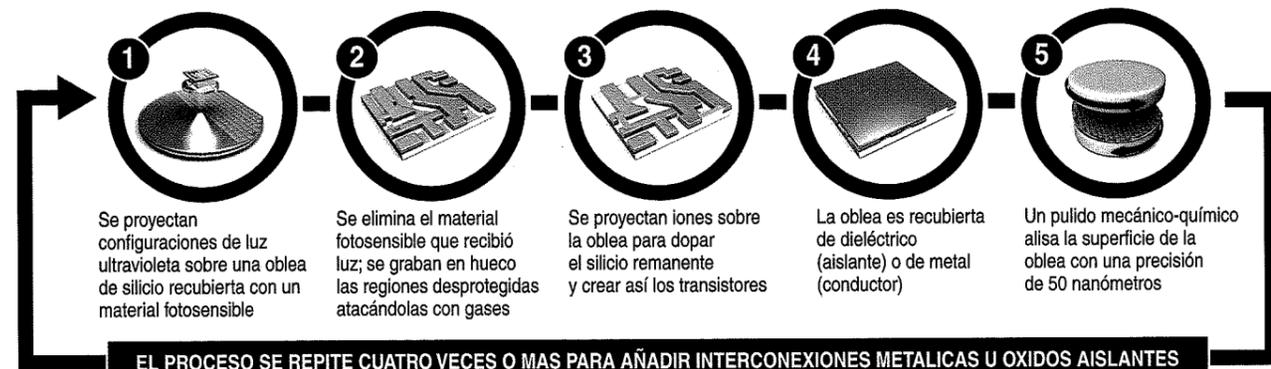
nadas de ese cristal. Las regiones que se convertirán en transistores gracias a esa activación iónica están definidas por la fotolitografía, que inscribe con luz y ácidos las correspondientes configuraciones sobre la oblea (véase el recuadro "En tres dimensiones: el mismo utillaje, pasos distintos"). Para apiñar cada vez más transistores en una oblea es necesario utilizar luz de una longitud de onda cada vez más corta. Se han reem-

plazado las lámparas de vapor de mercurio por láseres excímeros que emiten en el ultravioleta profundo e inscriben elementos de 130 nanómetros; así se pueden poner más de mil millones de transistores en un chip. Nuevos perfeccionamientos deberían rebajar hasta 65 nanómetros el límite y llegar, tal vez, a los 16.000 millones de transistores.

Pero a partir de tal punto la senda puede ser muy escabrosa. Están

## En tres dimensiones: el mismo utillaje, pasos distintos

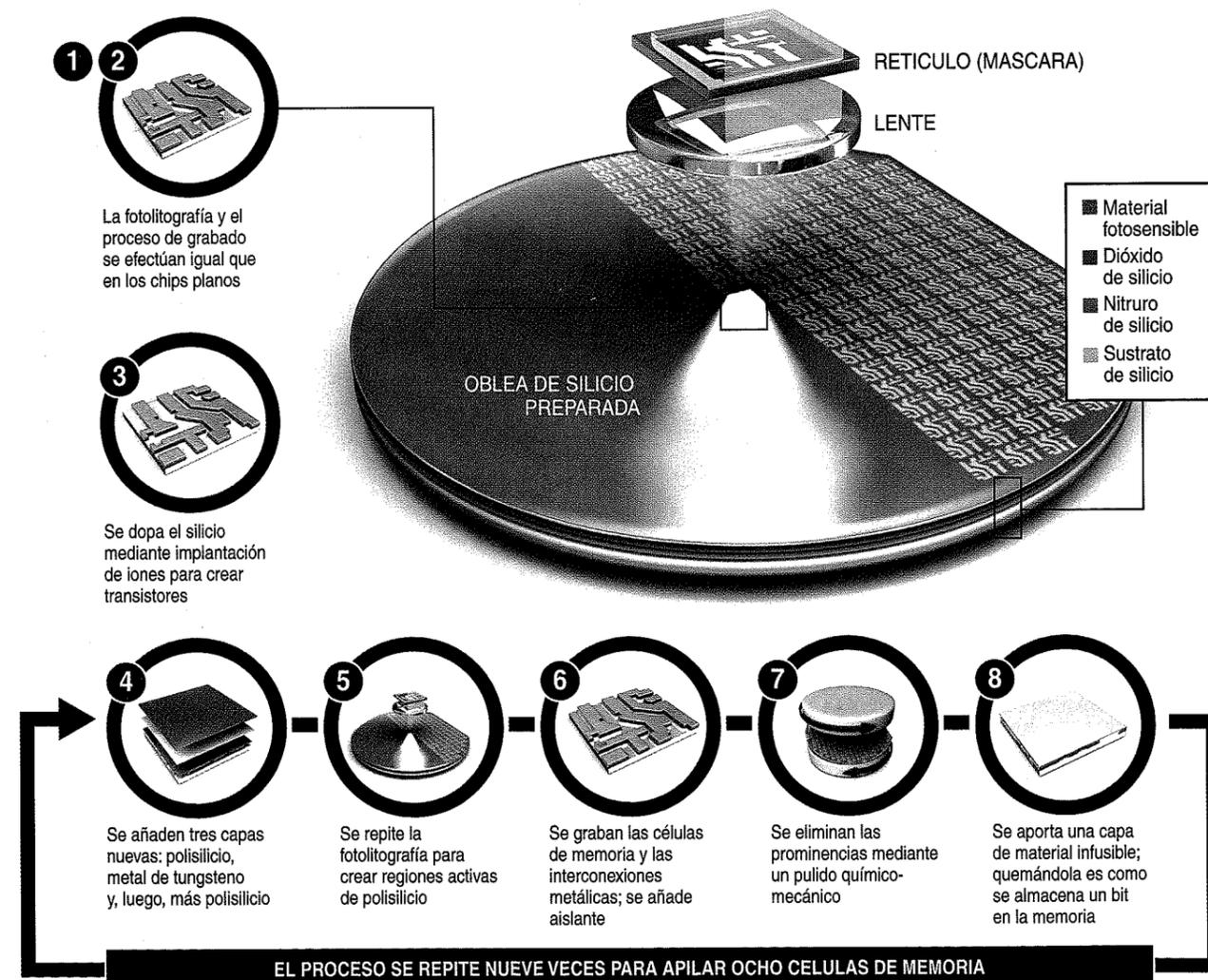
### FABRICACION DE UN CHIP BIDIMENSIONAL



EL PROCESO SE REPITE CUATRO VECES O MAS PARA AÑADIR INTERCONEXIONES METALICAS U OXIDOS AISLANTES

### FABRICACION DE UN CHIP TRIDIMENSIONAL

Nuevas etapas crean, con los mismos materiales y utillaje, microcircuitos tridimensionales con muchos transistores de polisilicio apilados verticalmente



empezando ahora a funcionar en el laboratorio sistemas litográficos que utilizan luz del ultravioleta extremo, aunque plantean todavía muchos e importantes problemas.

Si la historia sirve de guía, es probable que se logren eliminar tales estorbos; el incentivo económico es enorme. Pero como aumenta el número de obstáculos, el ritmo de progresión puede verse considerablemente frenado. La "guía" oficial que publica la SIA (Asociación de Industrias de Semiconductores) estima que la superficie de los chips crecerá de un 4 a un 5 por ciento anual; históricamente ese crecimiento ha rondado el 15 por ciento anual. La reducción periódica de un 30 por ciento del tamaño del elemento mínimo va a producirse ahora cada tres años en lugar de cada dos. Pero incluso a este paso más tranquilo son muy grandes las probabilidades de que la ley de Moore tropiece con los límites fundamentales entre 2010 y 2020.

Hay un factor importante que se ha mantenido más o menos constante: el precio del suelo de semi-

conductor, entre 4 y 5 mil millones de euros por hectárea. ¿Por qué no han tomado los promotores de ese suelo la decisión, aparentemente obvia, de edificar hacia lo alto? La razón más sencilla es que los transistores son más rápidos y más fiables cuando se construyen a partir de los átomos perfectamente alineados de una oblea cortada de un solo cristal de silicio.

En cuanto se recubre esa oblea semiconductor con óxido aislante o hilo metálico no hay forma conocida de recuperar la regularidad cristalina que está debajo. Vendría a ser como atinar con el motivo de un suelo entarimado después de haberlo cubierto con una alfombra. El silicio depositado sobre una superficie no cristalina tiende a quedar completamente desordenado, en estado amorfo. Sometido a un tratamiento térmico adecuado se logra que forme diminutas islas ("gránulos") de material monocristalino, pero en las fronteras entre los gránulos las ordenadas hileras de átomos chocan bruscamente y forman cualquier ángulo entre sí. Los

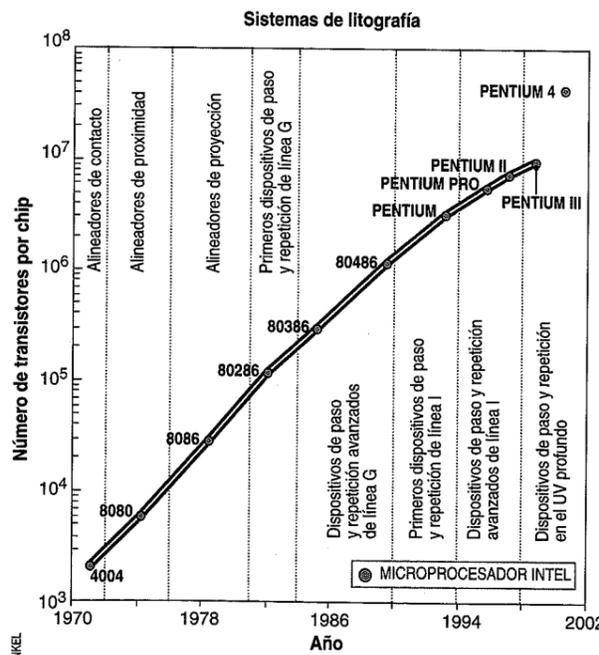
contaminantes pueden acumularse en estas barreras y cortocircuitar cualquier transistor o célula de memoria situada en medio. Durante muchos años, los dispositivos basados en silicio amorfo o en polisilicio (abreviatura de silicio policristalino) han sido tan malos, que nadie había pensado seriamente en utilizarlos para cosa alguna, como no fuese para las células fotovoltaicas.

En los primeros años ochenta, sin embargo, un prematuro temor a que la ley de Moore estuviera próxima a dejar de cumplirse sirvió de acicate para una serie de tentativas de fabricar microcircuitos tridimensionales, chips donde los transistores no se extendieran horizontalmente, como puentes, sino que levantarán torres de silicio. En Stanford, James F. Gibbons y otros se valieron de haces de láser para mejorar la calidad de las películas de silicio depositadas sobre sustratos no silíceos. Otros trataron de apilar, unos sobre otros, chips bidimensionales ordinarios. Lamentablemente, el primer método era demasiado lento y el segundo

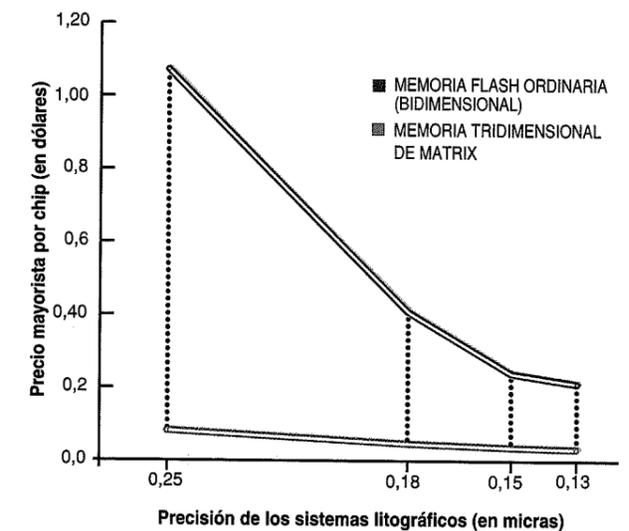
### Avances en la fabricación de chips rebajan el coste unitario

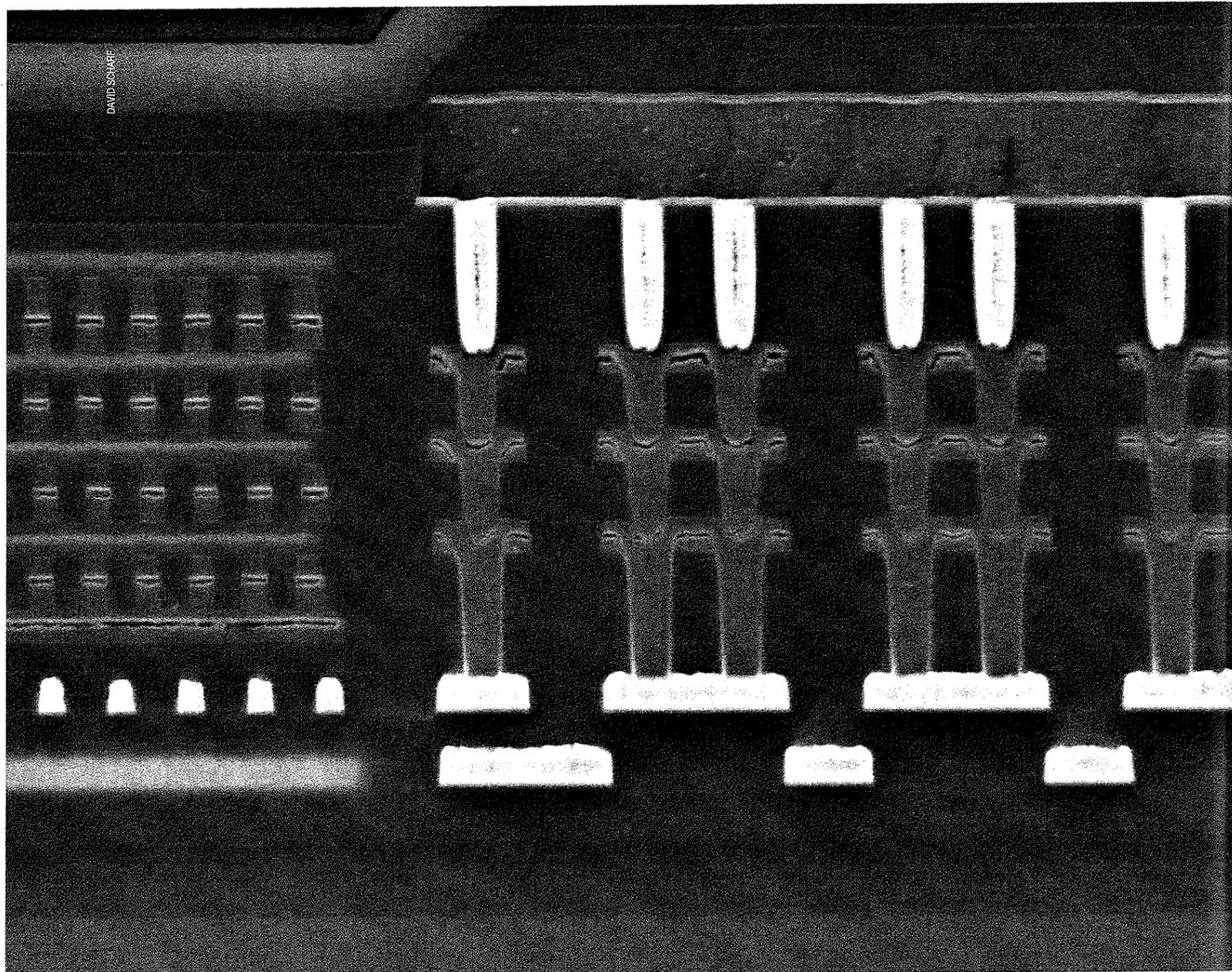
La ley de Moore dice que la complejidad de los microchips se multiplica por un mismo factor cada año, pero ese progreso perdió velocidad en torno a 1990, mientras se hacía por

inventar sistemas fotolitográficos que grabaran en el silicio estructuras cada vez más pequeñas (arriba). Aunque las modificaciones estructurales multiplicaron el tamaño y el número de puertas en el Pentium 4, es probable que la ley de Moore se frene más todavía cuando los sistemas fotolitográficos pasen de la luz ultravioleta a los rayos X, mucho más difíciles de enfocar. Sin embargo, aumentando la complejidad vertical de los circuitos se puede conseguir la misma capacidad de cómputo a un costo mucho más reducido (abajo).



FUENTES: VLSI Research, Inc.; Integrated Circuit Engineering Corporation; Intel. Gráfico elaborado a partir de la información disponible en marzo de 2002





**2. LAS CAPAS DE POLISILICIO** que forman la colmena de células de memoria (izquierda) están interconectadas mediante "vías" (columnas de la derecha), las cuales, a su vez, se hallan interconectadas por hilos de tungsteno (estructuras brillantes).

demasiado caro para que resultasen económicamente competitivos. La fabricación tradicional de microcircuitos siguió por la misma vía de antes y los ingenieros dejaron de pensar en los circuitos verticales.

**Nuevos usos para viejas herramientas**

En 1997, Farmwald y yo empezamos a explorar nuevamente la posibilidad de construir chips tridimensionales; nos percatamos de la existencia de dos técnicas clave, ya desarrolladas con otros fines, que ofrecían la posibilidad de que tales estereocircuitos fuesen, por vez pri-

mera, verdaderamente prácticos. Una de ellas era un procedimiento para depositar polisilicio de modo tal que cada islote de silicio monocristalino fuese lo bastante grande como para albergar un gran número de células de memoria o de transistores. La segunda, no menos importante, consistía en un procedimiento para alisar cada capa de nuevo material de suerte que la torre no creciera torcida sobre el chip.

Hemos de agradecer a la industria de las pantallas planas el primero de esos avances. Logró construir millones de transistores a partir de una película delgada extendida sobre un

sustrato grande y amorfo (el vidrio, en su caso; otros materiales, en el nuestro). Los transistores de película delgada pueblan hoy las pantallas de los ordenadores portátiles. Parte del secreto consiste en depositar el silicio a unos 400 °C en forma de una película extraordinariamente lisa (pero no cristalina, sino amorfa), y a continuación hornear uniformemente la lámina entera durante unos pocos minutos a más de 500 °C. De este modo la película de silicio amorfo se convierte en una de silicio policristalino, con regiones cristalinas regulares de una micra de diámetro o más. Aunque los paneles de las pantallas de cristal líquido requieren un solo estrato de transistores, las mismas máquinas que hacen esos paneles pueden fabricar también dispositivos con múltiples capas.

El segundo avance fundamental, la pulimentación químico-mecánica, fue un fruto de los laboratorios de investigación de IBM de finales del decenio de 1980. Por entonces, los diseñadores de microcircuitos consideraban arriesgado depositar dos o tres capas de metal sobre la oblea de silicio porque cada estrato nuevo hacía que apareciesen más montículos y vallecillos que ponían difícil el mantener enfocadas las configuraciones fotolitográficas.

Con el fin de eliminar las irregularidades de cada capa, se adaptó al caso un ardid del que los fabricantes de lentes se valen para pulimentar espejos. La técnica básica se empleó ya en todos los procesadores Intel 80486: cada vez que se añade un nuevo estrato de silicio, de metal o de óxido aislante, la oblea se coloca boca abajo sobre una muñequilla. Seguidamente, se hacen girar en sentidos opuestos la muñequilla y la oblea, accionadas por unos vástagos, al tiempo que pasa entre ambas una lechada de abrasivos y reactivos químicos alcalinos. Al cabo de unos pocos minutos de pulimentación la oblea queda plana, con una tolerancia de 50 nanómetros, y convertida en un sustrato ideal para el procesamiento ulterior. Gracias a los perfeccionamientos del pulimentado químico-mecánico son corrientes los diseños de microcircuitos con siete u ocho capas de metal. Parece que el principal factor que pone el límite al número de estratos que se van añadiendo es la paciencia.

Basándonos directamente sobre estas dos técnicas bidimensionales, hemos construido circuitos tridi-

mensionales. Recubríamos obleas ordinarias de silicio con muchas capas sucesivas de polisilicio (amén de las capas metálicas y aislantes necesarias), puliendo tras cada etapa hasta que la superficie quedara bien plana. Aunque los electrones no se desplazan con tanta facilidad en el silicio policristalino como en el monocristalino, en los trabajos de investigación se han logrado producir transistores tridimensionales con una movilidad electrónica igual a un 90% al 95% de la que se tiene en los transistores bidimensionales.

La pila vertical de dispositivos ofrece una manera de esquivar los graves obstáculos que amenazan con hacer descarrilar a la ley de Moore. A medida que los chips de dos dimensiones siguen extendiéndose a modo de una galería comercial, cada vez resulta más difícil mantener la imagen litofotográfica enfocada en los bordes. Y los hilos, largos para la escala del dispositivo, que conectan en los microprocesadores tradicionales las secciones más alejadas, causan demoras que reducen el rendimiento y complican el diseño.

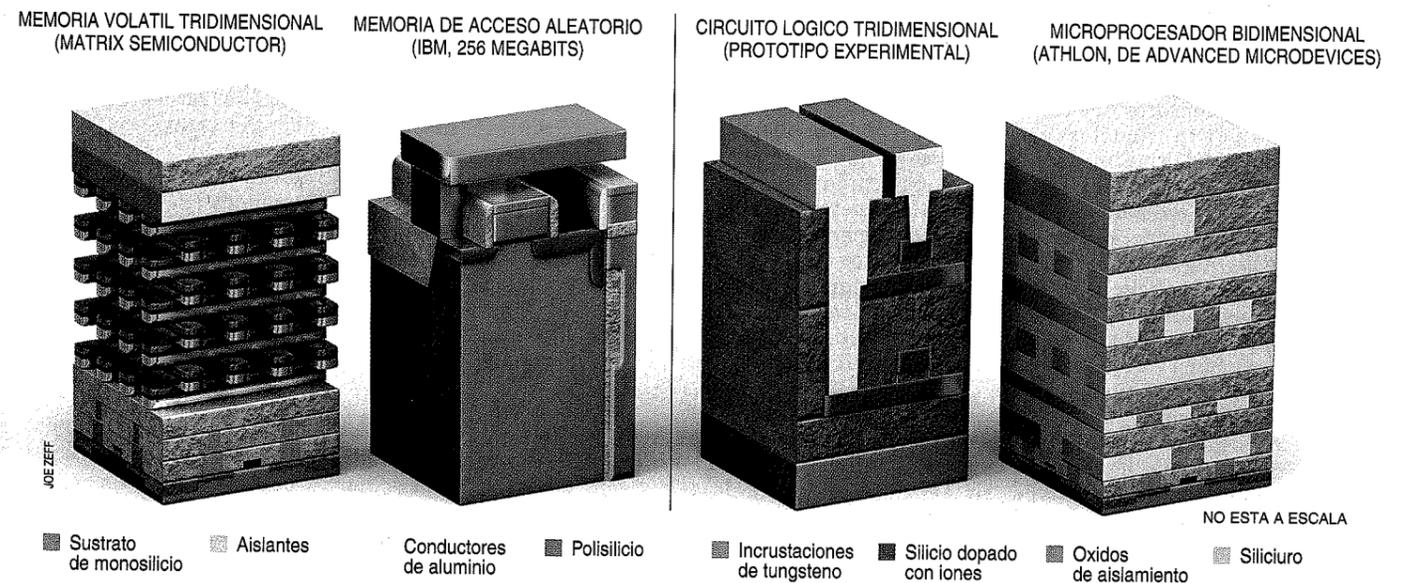
La incesante reducción de tamaño de los circuitos plantea otros problemas. Para los transistores es fundamental la fina capa aisladora que se extiende bajo el electrodo de control. En los microcircuitos de dos dimensiones más avanzados, esta

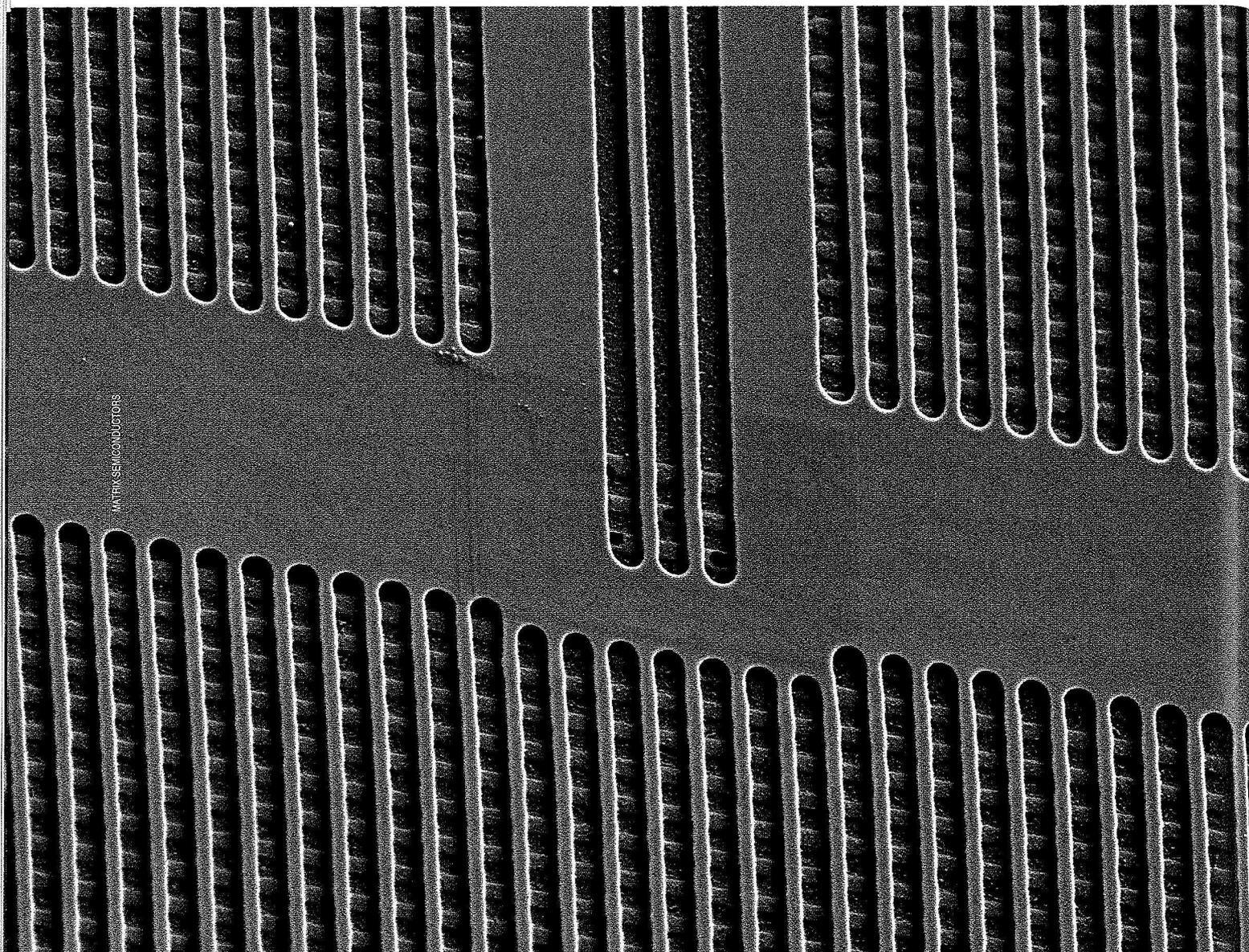
capa aislante de dióxido de silicio mide sólo tres nanómetros —alrededor de dos docenas de átomos— de espesor. De transistor a transistor, ese espesor no debe variar en más de uno o dos átomos. La industria afronta rutinariamente este problema porque es más fácil formar películas superfinas que excavar canales ultraestrecos. Pero tal vez no exista una manera práctica de lograr que estas películas aislantes sean todavía mucho más delgadas, porque el flujo de electrones debido al efecto túnel cuántico hace que vayan siendo peores aislantes a medida que adelgazan. Es verosímil que algún otro material tenga que reemplazar a no tardar al dióxido de silicio, pero está por ver cuál sería.

Han sido muchos los nuevos diseños de microcircuitos propuestos para abordar estos problemas. La mayoría se basa en sustituir por completo el silicio con diversos materiales exóticos: polímeros orgánicos, fullerenos de carbono, compuestos de cobre, materiales ferroeléctricos o aleaciones magnéticas. Ahora bien, el abandono del silicio entraña desperdiciar un tesoro de conocimientos fruto de más de 50 años de estudio y de una inversión de unos 100.000 millones de euros.

El proceso de diseño electrónico tridimensional, por el contrario, no recurre a nuevos átomos y saca partido

**3. LA ESTRUCTURA INTERNA** de los chips tridimensionales difiere llamativamente de la estructura de las memorias y microprocesadores tradicionales, que son planos. En los microcircuitos ordinarios, sean lógicos o de memoria, todos los transistores se encuentran confinados en una sola capa de silicio. En los microcircuitos tridimensionales, los transistores o las células de memoria se forman dentro de múltiples estratos de silicio.





MATRIX SEMICONDUCTORS

**4. EL ALMACENAMIENTO PERMANENTE** de bits en este chip tridimensional de memoria se produce cuando se destruyen sus infusibles (*puntos oscuros en el centro*), operación que establece una conexión entre las mitades de un circuito.

de las enormes inversiones realizadas por la industria en el instrumental de la pulimentación químico-mecánica y de la fabricación de películas delgadas. Por ser tan onerosa la producción y procesamiento de los lingotes de silicio ultrapuro, el costo del silicio es en gran medida proporcional a la superficie (y no al volumen) consumido. Así pues, la electrónica vertical puede reducir los costos de fabricación a la décima parte, o menos, en comparación con los chips tradicionales. Y conforme se vayan añadiendo más capas la densidad de los dispositivos tridimensionales debería crecer, al menos, con tanta rapidez como dice la ley de Moore.

#### **La fotografía digital y más**

**T**radicionalmente, los fabricantes de semiconductores han detectado y eliminado los fallos de un método nuevo produciendo chips de memoria antes de sacar microcircuitos más complejos, de tipo lógico por ejemplo. Las memorias son vastas formaciones de células de una gran sencillez; con ellas, pues, hay que darse menos maña y no son tantos los problemas.

Eso mismo es lo que ha hecho Matrix: presentar un chip de memoria tridimensional cuyas células forman torres de ocho pisos (véase la figura 3). A diferencia de las memorias RAM de los ordenadores personales, estas nuevas utilizan células

de memoria de extrema sencillez. Casi recuerdan más a una película fotográfica, indeleble una vez impresionada. La idea es que sean un medio económico para la fotografía y la grabación de sonido digitales. Este primer microchip de estructura vertical, con sus 512 millones de células de memoria, posee capacidad suficiente para almacenar más de una hora de sonido de alta calidad (mediante compresión de datos) y un par de cientos de fotografías (compuesta cada una, aproximadamente, por un millón de píxeles). Con el tiempo tal capacidad aumentará y el costo por unidad descenderá. Hemos demostrado ya que son factibles los dispositivos de 12 pisos de altura. Todo indica que los microcircuitos de 16 capas están perfectamente a nuestro alcance.

En el laboratorio hemos puesto en servicio circuitos tridimensionales

mucho más complejos: chips de RAM estática, puertas lógicas, hasta memorias EPROM borrables. Aunque se encuentran en los primeros estadios de desarrollo, estos bloques constructivos básicos son todo cuanto se requiere para remodelar en tres dimensiones un circuito plano cualquiera, se trate de memorias RAM dinámicas, memorias no volátiles, transceptores inalámbricos o microprocesadores. Puestos de pie, los transistores de estos circuitos podrán ser sumamente pequeños porque sus canales se harán con películas delgadas y serán diez veces más precisos que los canales definidos por la luz ultravioleta.

Como sucede con todos los avances de la ingeniería, en esta nueva técnica de fabricación hay también limitaciones y soluciones de compromiso. Una fracción de las células de memoria o de los transistores de un microcircuito vertical quedará a caballo sobre las fronteras que separan los granulos de polisilicio; seguramente fallarán. Tendremos que usar rutinas de detección y corrección de errores, como en los discos compactos de música, y también dar con procedimientos que desvíen las señales cuando se topen con sendas defectuosas. Los métodos de computación tolerantes de los fallos, aunque son bien conocidos, no se han incorporado a los propios microchips. En la mayoría de los contextos planos estas técnicas son demasiado farragosas e innecesarias; felizmente, gracias a las reducciones de costos que se consiguen con las tres dimensiones estos métodos de reparación van a ser económicamente factibles justo cuando empiezan a necesitarse.

También en la velocidad habrá algún tipo de transacción. Los modernos transistores de película delgada funcionan más o menos a la mitad de velocidad que los dispositivos monocristalinos, si bien la diferencia es menor cuando se comparan circuitos completos porque los componentes empaquetados en tres dimensiones requieren líneas de conexión claramente más cortas. Numerosos investigadores están buscando la forma de reducir todavía más la diferencia.

Aparte de estas consideraciones especiales, los estereochips han de afrontar esencialmente las mismas dificultades que la electrónica plana corriente; si ciertos problemas apareciesen antes sería, sencillamente, porque se habría acelerado la ley de Moore. El problema más agudo para los dispositivos espaciales densos puede ser el calor, debido a que, en

proporción, la superficie de disipación es menor. En un microprocesador moderno la densidad de potencia supera ya a la de los quemadores de una cocina típica. La ineficacia de las estrategias que se siguen hoy para disipar con la debida rapidez tan gran cantidad de calor —la reducción de las tensiones de funcionamiento o la activación selectiva de porciones de un circuito— quizá limite el rendimiento de los circuitos tridimensionales densos, a menos que se apliquen técnicas más avanzadas de enfriamiento. Por fortuna, los microrrefrigeradores logran ya retirar 200 watt por milímetro cuadrado con un consumo de sólo un watt. Así pues, las limitaciones térmicas no constituyen todavía un impedimento fundamental.

Cierto es que hay lugar para muchos perfeccionamientos. El cerebro humano, con su refrigeración líquida y unas dimensiones que superan considerablemente las de cualquier circuito tridimensional que pueda concebirse en nuestros días, disipa sólo unos 25 watt; un microprocesador Pentium 4 consume unos 80. Aunque no podemos descartar la posibilidad de que la incapacidad para resolver el problema del calentamiento pueda en última instancia imponer duras restricciones a lo que puedan hacer los circuitos tridimensionales, la historia lleva a pensar que los grandes incentivos económicos que están en juego harán que se dé con situaciones imaginativas.

Si se lograra que la vigencia de la ley de Moore se prolongara algunos años más de los previstos, las consecuencias serían de gran alcance. Durante 30 años los fabricantes de microcircuitos se han esforzado sin cesar en grabar estructuras cada vez más pequeñas en un solo plano. Parece inevitable que en el futuro la escala de los microcircuitos vaya siendo menor tanto horizontal como verticalmente. Las técnicas requeridas son a la vez posibles y prácticas, sin olvidar los beneficios, demasiado importantes para dejarlos de lado.

#### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MULTIPLE LAYERS OF CMOS INTEGRATED CIRCUITS USING RECRYSTALLIZED SILICON FILM, Victor W. C. Chan et al., en *IEEE Electron Device Letters*, vol. 22, n.º 2, páginas 77-79; febrero de 2001.

## BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

### MATEMATICA Y FORMAS OPTIMAS

STEFAN HILDEBRANDT Y ANTHONY TROMBA



Un volumen de 22 x 23,5 cm y 206 páginas, profusamente ilustrado en negro y en color.

#### SUMARIO

- Formas y figuras
- El gran esquema del mundo
- El legado de la ciencia antigua
- Conexiones mínimas. Enlaces rápidos
- Es un milagro y no lo es
- Pompas de jabón
- Diseño óptimo
- Dinámica y movimiento



Prensa Científica, S. A.