

چیپ‌ها تا چه اندازه می‌توانند کوچک شوند؟

هومن سیاری

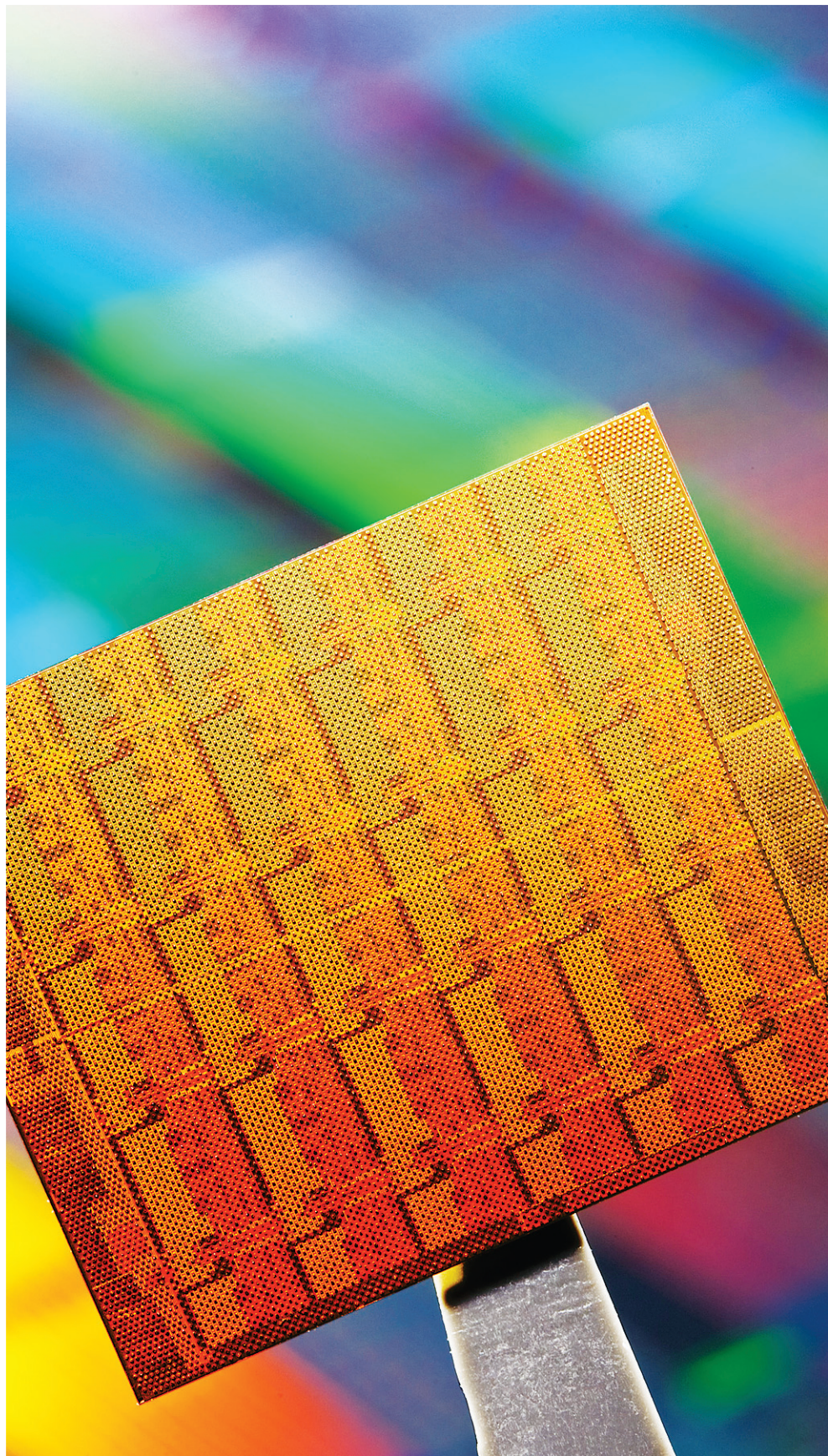
Sayyari@ComputerNews.ir

هفت نفر از نخبه‌ترین متخصصین شرکت اینتل به صف نشسته و آماده پاسخ‌گویی به گروهی از روزنامه‌نگاران اروپایی هستند که به روشنی تحت تاثیر آنها قرار گرفته‌اند! این هفت نفر بالاترین درجه فنی و مهندسی شرکت اینتل را دارند و همگی مدارک دکترا و انبوهی از اختراعات ثبت شده دارند که تاقچه خانه‌شان را با آنها پر کرده‌اند، جایی که اکثر افراد با مدارک «دوره تایپ کامپیوتری»، «آموزش ویندوز» و ... آنجا را پر کرده‌اند و به آن می‌بالند!

■ آقای گردون مور یکی از مدیران ارشد اینتل است که در سال ۱۹۶۵ یک پیش‌بینی افسانه‌ای کرد مبنی بر اینکه تعداد ترانزیستورهای هر پردازنده در هر ۲ سال دو برابر می‌شود.

سرانجام یکی از خبرنگاران به خود جرات داد و سوالی را مطرح کرد. او پرسید: آیا قانون مور مرده است؟ یکی دو نفر از متخصصین اینتل با نهایت ادب و با دهان بسته خندیدند و بقیه کمی خشمگین شدند! تقریباً همه متخصصین مشتاق بودند میکروفن را در دست بگیرند و خیلی رک به خبرنگار گستاخ پاسخ دهند. آنها یکی یکی پاسخ‌های کنایه‌آمیزی دادند. آقای تریوی فوسوم نروژی گفت: «تعداد افرادی که پایان قانون مور را پیش‌بینی می‌کنند، هر دو سال برابر می‌شوند!»

آقای کارل کمف آمریکایی هم چنین پاسخی داد: «اولین پردازنده ۳۳۰۰ ترانزیستور داشت و حالا ما پردازنده‌هایی داریم که ۲٫۳ میلیارد ترانزیستور دارند، این یعنی قانون مور و این کاری است که ما انجام می‌دهیم.» به راستی این کاری است که اینتل در ۳۰ سال اخیر



قانون مور چندین بار پیش‌بینی شده، اما هر بار ما نشان دادیم که پایان کار هنوز فرانسیده.» البته آنها بارها به پایان کار نزدیک شدند. هنگامی که اینتل در سال ۲۰۰۵ از فرآیند ساخت ۹۰ نانومتری به فرآیند ساخت ۶۵ نانومتری حرکت کرد، اتفاق بسیار عجیبی روی داد؛ در ابتدا ۶۵ نانومتر هیچ افزایش راندمانی نسبت به ۹۰ نانومتر نداشت. با وجود اینکه تعداد ترانزیستورها تقریباً دو برابر شده بود، اما هیچ افزایش راندمانی وجود نداشت چرا که انرژی زیادی از ترانزیستورها نشت می‌کرد.

ترانزیستورهای مدرن در واقع سوئیچی ساده هستند که زمانی که پایه Gate آنها به ولتاژ معینی می‌رسد جریان را بین پایه‌های Source و Drain عبور می‌دهند. در سال ۲۰۰۵ عایق Gate (عایق‌بندی پایه Gate) از جنس دی‌اکسید سیلیکون ساخته می‌شد. چون ترانزیستورها طی چند سال گذشته فشرده و فشرده‌تر شدند، طراحان مجبور بودند لایه نازک‌تری از دی‌اکسید سیلیکون را استفاده کنند تا جاییکه فقط یک لایه بسیار نازک در حد ضخامت چند اتم باقی ماند. وقتی پردازنده کار می‌کرد و گرم می‌شد و انبساط پیدا می‌کرد، جریان از این لایه نازک نشت می‌کرد، درست مثل چکه کردن آب و زمانیکه شما با چکه کردن صدها میلیون ترانزیستور مواجه باشید در واقع باید انتظار سیلی ویرانگر را داشته باشید.

اینتل مدت‌ها پیش از این که فرآیند ساخت ۶۵ نانومتری را عرضه کند، از این مشکل آگاه بود! دو سال قبل، شرکت راهکار خود برای مشکل نشتی گیت‌ها را ارائه کرده بود. راه‌حل این بود: گیت فلزی با K بالا (High-K metal Gate) که در آن K ثابت دی‌الکتریک است. در واقع این روش عبارت بود از جایگزینی دی‌اکسید سیلیسیم با عنصری با ثابت دی‌الکتریک بالا به نام دی‌اکسید هافنیم. عناصر با ثابت دی‌الکتریک بالا مثل دی‌اکسید هافنیم، دی‌اکسید زیرکونیم و دی‌اکسید تیتانیوم می‌توانند نسبت به دی‌اکسید سیلیسیم بار الکتریکی بسیار بالاتری را در خود نگه دارند. با این روش اسفنج‌های جدید می‌توانستند آب بسیار بیشتری را به خود جذب کنند و از چکه کردن آن جلوگیری کنند!

اما آیا مشکل حل شد؟ نه کاملاً. هافنیم با مواد پلی‌سیلیکون استفاده شده در الکتروود گیت خوب سازگار نبود و در نتیجه اینتل مجبور شد نوعی جدید از الکتروود فلزی را معرفی کند. این تحقیق بیش از ۵ سال به طول انجامید تا اینتل بتواند بهترین ترکیب برای مواد با K بالا و الکتروودهای فلزی را برای ترانزیستورها پیدا کند. این شرکت ۴ سال هم برای پیاده‌سازی عملی آن وقت صرف کرد و سرانجام



شکل ۱: پردازنده Intel Core i7

۳,۳ گیگاهرتز کار می‌کند، فقط ۲۶۳ میلی‌متر مربع را اشغال کرده و از فناوری ساخت ۴۵ نانومتری استفاده می‌کند. این در حالی است که در همین فضای محدود ۷۳۱ میلیون ترانزیستور را جای داده است. هر نانومتر یک میلیارد متر است و تفاوت هر نانومتر با متر مانند تفاوت توپ تنیس با کره زمین است.

همین هم بسیار شگفت‌انگیز است، اما اینتل پا را از این هم فراتر گذاشته و آخرین پردازنده‌هایش را با فناوری ساخت ۳۲ نانومتری می‌سازد. در حالیکه شما یکی از هسته‌های پردازنده فوق را ممکن است بتوانید با چشم غیر مسلح ببینید، اما برای دیدن یکی از ترانزیستورهای آن باید پردازنده فوق را به اندازه خانه‌تان بزرگ کنید! (با فرض اینکه خانه نقلی نداشته باشید!) کار کردن در این دقت چالشی بزرگ برای سازندگان پردازنده‌هاست. چون پردازنده‌ها هر ۲ سال تغییرات ساختاری عظیمی پیدا می‌کنند (تاقانون مور زنده بماند!) مهندسان و طراحان اینتل مجبورند مرتباً سطوح بالایی از نوغ و ابتکار را برای حفظ این روند نمایش دهند. آقای خوزه مایز می‌گوید: «به بن‌بست رسیدن

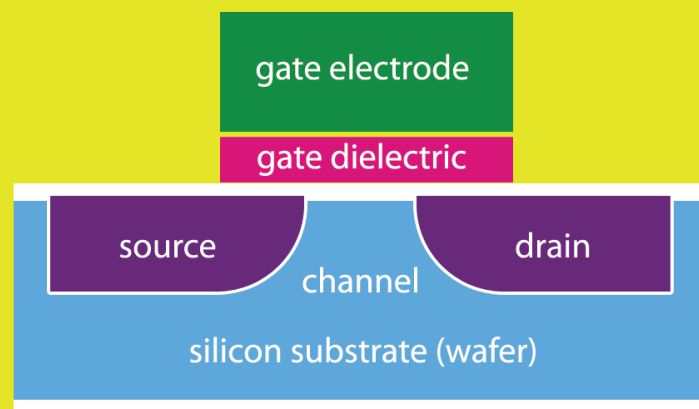
در حال انجام آن است. حالا اینتل دارد آماده می‌شود برای انتشار نسل بعدی تراشه‌ها قوانین فیزیک را نقض کند. تراشه‌ها آنچنان با ترانزیستورها پر می‌شوند که برای ساخت آنها به ناچار نیاز به استفاده از تجهیزاتی با دقت زیراتمی است.

اما وقتی با ترانزیستورهایی کوچک‌تر از یک ویروس کار می‌کنید، چقدر بیشتر می‌توانید ترانزیستور در تراشه جای دهید تا پیش‌بینی خبرنگاران درباره مرگ قانون مور درست از آب درنیاید؟ در این مقاله بررسی می‌کنیم که اینتل و دیگر تولیدکنندگان، چگونه بر مانع فنی بزرگی که بر سر راه فناوری تراشه‌های امروزی قرار دارد، فایق می‌آیند و همچنین مشکلاتی که برای فشرده‌تر کردن پردازنده‌های آینده تا حد ۲۲ نانومتر و کمتر وجود دارد را بررسی خواهیم کرد.

توصیف پیچیدگی کار

پیچیدگی پردازنده‌های مدرن بسیار فراتر از تصورات ماست. پردازنده Core i7-975 که از جدیدترین پردازنده‌های ۴ هسته‌ای اینتل است و در فرکانس

شکل ۲: ترانزیستور ساخته شده با سیلیکون



سیلیکون تاریک

اسمارت‌فون‌ها و سرورها باید مصرف برق مشخصی داشته باشند و ادامه فشرده‌سازی ترانزیستورها می‌تواند در آنها منجر به مشکلی گردد که آقای میلر از آن به عنوان «سیلیکون تاریک» نام می‌برد که عبارت است از اینکه چیپ‌ها برق کافی برای استفاده از مزایای این همه ترانزیستور را نخواهند داشت. اگر قدرت یک پردازنده ۴۵ نانومتری را ثابت در نظر بگیریم و بخواهیم که پردازنده در همان اندازه باقی بماند، با استفاده از فرآیند ساخت ۲۲ نانومتری فقط از یک‌چهارم سیلیکون آن استفاده می‌شود و با استفاده از فرآیند ساخت ۱۱ نانومتری فقط از یک‌دهم سیلیکون آن استفاده خواهد شد.

چون فلسفه کامپیوترها براساس پردازنده استوار است و هر کاری در کامپیوتر توسط آنها انجام می‌شود، پردازنده‌ها بسیار مستعد مشکل سیلیکون سیاه می‌گردند. اصولاً هر چیزی که به نوعی به هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری، محاسبات و ... مربوط می‌شود، برعهده پردازنده گذاشته شده و تجهیزات جانبی هیچ کمک قابل توجهی به پردازنده نمی‌کنند. پس راه حل چیست؟ آقای میلر اذعان دارد که شرکتش هنوز هیچ راه حلی برای این مشکل ندارد و البته محکوم به یافتن راه حلی هوشمندانه‌تر است: «ما باید روشی پیدا کنیم که در آن همه ترانزیستورها با هم روشن و خاموش نشوند و همیشه استفاده نشوند.» قسمتی از بخش تحقیقات شرکت ARM روی طراحی پردازنده‌هایی تحقیق می‌کند که با انرژی کمتر از حد نرمال کار می‌کنند. وقتی که ولتاژ کاهش می‌یابد، پردازنده کندتر کار خواهد کرد و خطاهایی

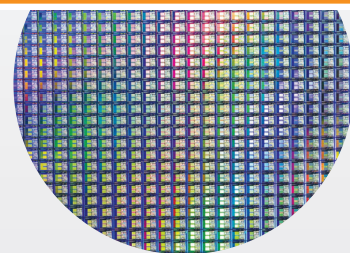
در حالیکه سازندگان مشکل ناشی ترانزیستورها را حل کرده بودند، مشکل جدیدی در مقابل آنها قرار گرفت: تعداد حیرت‌آور ترانزیستورها! قرار بود شمار بسیار زیادی از آنها در پردازنده‌های نسل جدید قرار بگیرد. با نقشه‌هایی که اینتل و رقبایش برای استفاده از فرآیند ساخت ۲۲ نانومتری در سال ۲۰۱۱ دارند، تعداد ترانزیستورها در پردازنده به صورت نمایی رشد خواهد کرد، برای مثال در یکی از پردازنده‌های نمونه که اینتل به صورت آزمایشی با فرآیند ساخت ۲۲ نانومتری تولید کرده، ۲٫۳ میلیارد ترانزیستور گنجانده شده است!

مایک میلر، مدیر بخش فناوری شرکت ARM می‌گوید: «چیپ‌ها از لحاظ فیزیکی کوچک‌تر نمی‌شوند، بلکه هر بار تعداد ترانزیستور بیشتری در آنها گنجانده می‌شود. این به معنای کوچک‌تر شدن ترانزیستورهاست و ترانزیستورهای کوچک‌تر با سرعت بیشتری بین حالت روشن و خاموش سوییچ می‌کنند و در نتیجه انرژی کمتری هم نیاز دارند. بنابراین تعداد ترانزیستورها بیشتر شده، سرعت آنها افزایش می‌یابد و مصرف انرژی آنها کمتر می‌گردد.» او همچنین اضافه کرد: «تکنه مهم این است که نرخ فشرده شدن ترانزیستورها از نرخ افزایش سرعت ترانزیستورها بیشتر است و این منجر به مشکل بزرگی می‌گردد. در این حالت برای سوییچ ترانزیستورها نیاز به انرژی بیشتری است که در نتیجه خاصیت مهم استفاده از انرژی کمتر برای سوییچ ترانزیستورها از بین می‌رود.»

آن را در سال ۲۰۰۷ در پردازنده‌های ۴۵ نانومتری به کار گرفت.

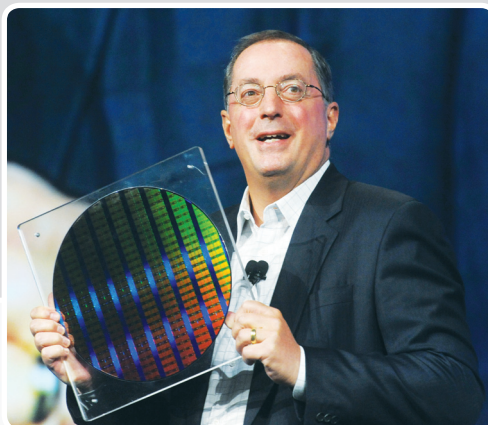
در ریزپردازنده‌های امروزی حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت پردازنده هدر می‌رود، در حالیکه بدون استفاده از عناصر با K بالا در پردازنده‌های ۴۵ نانومتری حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد توان پردازنده هدر می‌رفت. همین صرفه‌جویی در مصرف انرژی تأثیر شگرفی در راندمان نهایی پردازنده خواهد داشت.

ویفر چیست؟



ویفر لایه‌ای دایره‌ای شکل و بسیار نازک از جنس سیلیکون خالص است که به عنوان ماده اولیه و پایه طراحی چیپ‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سایر مواد لازم در و یا بر روی این لایه قرار می‌گیرند و چیپ مورد نظر با فعل و انفعالات شیمیایی خاص در شرایط بسیار ویژه ساخته می‌شود. روی هر ویفر تعداد زیادی چیپ تولید می‌شود که در نهایت با دقت بالایی از روی ویفر بریده می‌شوند.

شکل ۳: یک ویفر در دست آقای پل اتلینی از مدیران اینتل



شکل ۴: شمش سیلیکون



چرا ویفر پردازنده‌ها دایره‌ای است؟

همیشه این سوال مطرح است که با وجود اینکه صنعت ساخت پردازنده‌ها با دقت کمتر از نانومتر کار می‌کند، پس چرا چیپ‌های مربع شکل را روی ویفر دایره‌ای شکل می‌سازند و سپس از روی آن می‌برند؟! همانگونه که در شکل ۳ مشخص است، هسته‌هایی که در لبه ویفر دایره‌ای قرار دارند، ناقص بوده و قابل استفاده نیستند. پس چرا آنها از ویفرهای مربع شکل بهره نمی‌گیرند تا از تکتک میلی‌مترهای این ویفر بسیار گران قیمت استفاده کنند؟ دلیل این امر جالب است: طبیعت دوست دارد آنها را دایره‌ای بسازد! ویفر پردازنده‌ها از سیلیکون یا در واقع از ماسه مذاب

ماشین‌های EUV کرده است که مثل دوربین‌های بسیار گران قیمت هستند، اما هنوز هیچ تضمینی نیست که بتوانند دقت مورد نظر را تامین کنند. برای ساخت این دستگاه لازم است دقتی کوچک‌تر از نانومتر داشته باشید و این دقت فقط مربوط به یک پردازنده نیست که در محیط آزمایشگاهی ساخته شود بلکه مربوط به تولید میلیون‌ها پردازنده است که قرار است همه بدون مشکل کار کنند.

مدیر فنی ARM اعتقاد دارد که هنوز EUV راه بسیاری در پیش دارد تا بتوان ماشین‌های مبتنی بر آن را به کارخانه‌ها فرستاد.

نانومتر پایین تر

با وجود تمامی مطالب ذکر شده، تا کجا می‌توان فرآیند ساخت پردازنده‌ها را فشرده‌تر کرد؟ نقشه راهی که اینتل برای آینده خود ترسیم کرده، فقط تا سال ۲۰۱۳ منتشر شده است که به فرآیند ساخت ۱۶ نانومتری ختم می‌شود. البته با توجه به اینکه معمولاً اینتل هر دو سال فرآیند ساخت خود را پیشرفته‌تر می‌کند، می‌توان انتظار داشت که برنامه ۱۱ نانومتری را در سال ۲۰۱۵ داشته باشد.

البته مدیر فناوری ARM کمی محافظه‌کارتر است و اعتقاد دارد تا سال ۲۰۲۰ به فرآیند ساخت ۱۳ نانومتری می‌رسیم. او اعتقاد دارد رسیدن به دقت پایین‌تر از نانومتر برای ساخت ماشین‌های مورد نظر به زودی انجام نمی‌گیرد. با این حال آقای مایز می‌گوید: «اگر نمی‌دانید کاری را چطور انجام دهید، آن را غیرممکن نپندارید.» ■

۲۲ نانومتری که وعده آن در سال ۲۰۱۱ داده شده، مورد استفاده قرار بگیرد، اما برای استفاده در فرآیند ساخت ۱۶ نانومتری که وعده آن در سال ۲۰۱۳ داده شده باید به فکر راه دیگری بود.

راه حل جایگزین به EUV یا لیتوگرافی فوق عمیق با اشعه ماورای بنفش مشهور است که در آن از یک سری آینه‌های چندلایه که با دقت خاصی چیده شده‌اند برای ایجاد دقت بسیار بالا استفاده شده است. اینتل و رقبا پیش سالیان دراز روی این فناوری کار کرده‌اند تا بتوانند از آن در سال ۲۰۱۳ استفاده کنند.

آقای گوردون مور و همکارانش در شرکت اینتل، در سال ۱۹۹۷ با همکاری چند شرکت خصوصی و دولتی و با بودجه ۲۵۰ میلیون دلاری پروژه EUV را آغاز کردند. البته شرکت‌های همکار، مانند AMD و موتورولا خودشان غول‌های این صنعت بودند. آقای مور در آن سال گفت که آنها در طول ۴۰ سال گذشته با استفاده از روش‌های مبتنی بر نور اقدام به ساخت پردازنده‌ها کرده‌اند. او اضافه کرد: «ما از سیستم‌های نوری گوناگونی برای تاباندن تصویر الگوی مورد نظر بر روی ویفر استفاده می‌کردیم. مشکل ایناست که نمی‌توان تصویری کوچک‌تر از طول موج نور مورد استفاده برای تولید تصویر ساخت. واقعیت این است که به آخر نزدیک شده‌ایم و باید به دنبال راه‌حل دیگری بگردیم، تکنیک دیگری که از طول موج‌های بسیار کوتاه‌تری استفاده کند.»

۱۳ سال گذشته و اینتل و دیگر رقبا پیش هنوز منتظر هستند که EUV بتواند پردازنده‌های آینده را بسازد. اینتل به تنهایی صدها میلیون دلار خرج پروژه

خواهد داشت. شرکت ARM به دنبال یافتن راهی برای تشخیص این خطاها و برطرف کردن آن است تا به هدف خود برسد.

حتی اگر ARM تا حالا راه‌حل مناسبی پیدا نکرده باشد، اما آقای میلر مطمئن است که این موضوع در زمان دستیابی به فناوری ۲۲ نانومتری مشکلی ایجاد نخواهد کرد. در واقع فرآیند ساخت ۲۲ نانومتری تکاملی بزرگ است، نه لبه پرتگاه. او می‌گوید: «وقتی به افراد فرصت دهید درخشش خلاقیتشان را خواهید دید.»

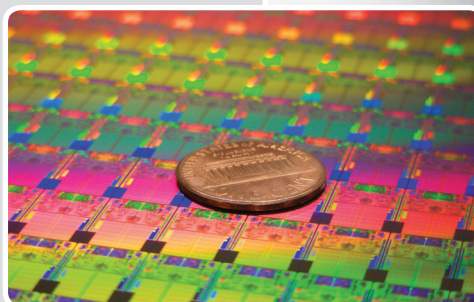
نور و پردازنده

حتی اگر محققین راهی برای رساندن برق به میلیارد‌ها ترانزیستور پردازنده‌های آینده پیدا کنند، باز هیچ تضمینی وجود ندارد که سازندگان بتوانند آن راهکارها را به صورت تجاری پیاده‌سازی کنند. چیپ‌های امروزی با استفاده از فرآیندی خاص ساخته می‌شوند و با اصطلاحاً پرینت می‌گردند که به آن DUV یا لیتوگرافی عمیق با اشعه ماورای بنفش می‌گویند. این روش امروزه با افزایش وحشتناک ترانزیستورها با محدودیت‌هایی جدی روبه‌رو شده است. سازندگان به جایی رسیده‌اند که قادر به پرینت خطوط نازک‌تر از این با استفاده از DUV نیستند، چرا که با کاهش اندازه فناوری ساخت پردازنده‌ها، خطوط مبهم‌تر و ناهموارتر پرینت می‌شوند و این منجر به عمل نکردن ترانزیستورها می‌گردد که این مشکل ناشی از انکسار نور در دقت بسیار بالاست. البته هنوز هم DUV می‌تواند برای استفاده در فرآیند ساخت

خالص ساخته می‌شود که درصد بالایی سیلیسیم به شکل دی‌اکسید سیلیسیم دارد. ماسه‌ها در ظرف بسیار بزرگ خمره‌مانندی ذوب شده و وقتی به درجه حرارت مناسب رسیدند، یک بلور خالص سیلیسیم در داخل آن چکانده می‌شود و سپس در اطراف آن دانه رشد بلور آغاز می‌شود. همانطور که رشد توده کریستالی ادامه می‌یابد، دانه اولیه را به آرامی دوران می‌دهند تا به تدریج به شکل شمشی سخت و کروی درآید.

هر شمش حدود ۱۰۰ کیلوگرم وزن دارد و میزان خلوص سیلیسیم آن در حدود ۹۹٫۹۹۹۹۹۹ درصد است. این شمش‌های سیلیکونی بزرگ سپس به شکل ورقه‌های نازک بریده می‌شوند که ضخامت هر یک حدود یک میلی‌متر است و به این ورقه‌ها ویفر می‌گویند. به این دلیل است که ویفرها دایره‌ای شکل هستند.

شکل ۵: برش ویفرها از شمش سیلیکون



شکل ۶: اندازه هر هسته در ویفر نسبت به یک سکه

