

مدارهای مجتمع

طراحی و ساخت یک تراشه

محمدعلی شفیعیان - پاییز ۱۳۹۶

میکروالکترونیک و مدارهای مجتمع

- در مدارهای مجتمع، بعضی از قطعات مانند ترانزیستورها، مقاومت ها و هادی ها را می توان از یک نیمه هادی مانند سیلیکون ساخت.
- این ایده بسطی از هنر مربوط به حالت جامد برای ساخت یک مدار کامل در یک قطعه نازک سیلیکون به جای نصب قطعات مجزای ساخته شده از تکه های سیلیکونی جدا در همان مدار می باشد.
- روی یک ورقه نازک (ویفر) سیلیکونی می توان به طور همزمان ترانزیستورهای زیادی ساخت. این ترانزیستورها را می توان با فرآیند فلزپوشانی (metallization) به هم متصل نمود.

واژه‌های به کار رفته در ساخت تراشه

- سیلیکون: نام تجاری سیلیسم است.
- Ingot: حجم های ساخته شده سیلیکونی را Ingot (به معنی شمش) می گویند (البته فقط محدود به سیلیکون نمی شود).
- Wafer: به معنی لایه دایره ای شکل. در ادامه منظور از کلمه Wafer قرص های برش داده شده Ingot ها است.
- Photo Resist: ماده ای که در ساخت این محصولات استفاده می شود که مشابه ماده ظهور عکس است.

مراحل ساخت یک تراشه پردازنده (۱)

- ۱- به دست آوردن شن خالص
- ۲- پاک سازی و نمو
- ۳- Ignote بزرگ
- ۴- Ignote برش
- ۵- تمیز کردن ویفرها
- ۶- استفاده از Photo Resist
- ۷- قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش
- ۸- بیشتر قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش
- ۹- شستشوی Photo Resist

مراحل ساخت یک تراشه پردازنده (۲)

۱۰- حک کردن

۱۱- حکاکی

۱۲- به کار بردن دوباره Photo Resist

۱۳- برآمیختن یونی

۱۴- پاک کردن دوباره Photo Resist

۱۵- یک ترانزیستور

۱۶- فلزکاری ویفر

۱۷- مقررشدن یونها

۱۸- پاک کردن مواد اضافی

مراحل ساخت یک تراشه پردازنده (۳)

۱۹- روکشی

۲۰- تست نوع ویفر

۲۱- برش ویفرها

۲۲- دور انداختن die های خراب

۲۳- به وجود آمدن یک die

۲۴- ساخت یک پردازنده کامل

۲۵- یک CPU تمام شده

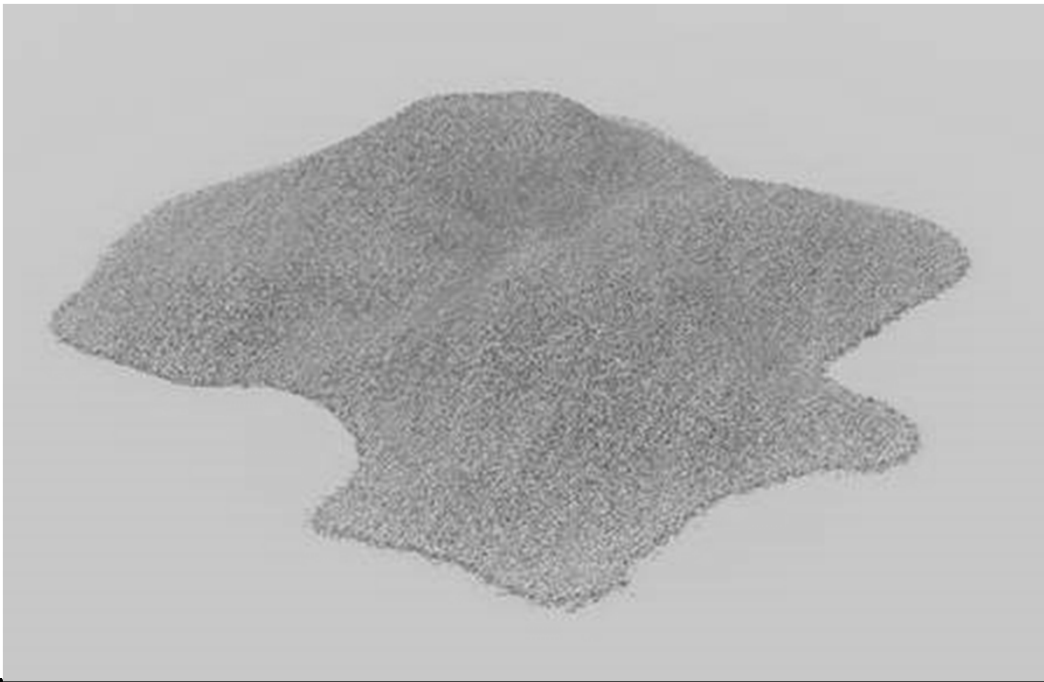
۲۶- تست CPU

۲۷- بسته بندی CPU

به دست آوردن شن خالص

Sand

۲۵٪ از شن را سیلیکون تشکیل می‌دهد. که بعد از اکسیژن فراوان‌ترین عنصر در پوسته زمین است؛ به‌ویژه شن مقدار زیادی سیلیکون به صورت سیلیکون دی‌اکسید SiO_2 در خود دارد که عنصر اصلی برای ساخت اجسام نیمه‌رسانا است.



پاک سازی و نمو

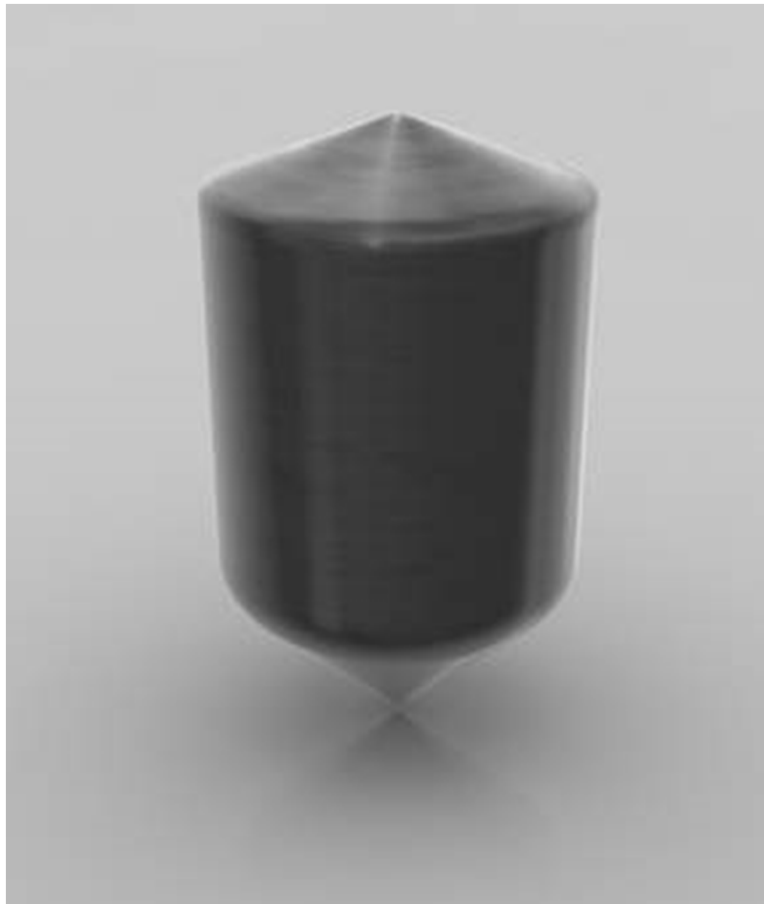
Melted Silicon



بعد از بدست آوردن شن خالص و جدا کردن سیلیکون از آن مواد اضافی از آن جدا می شوند و سیلسکون خالص بدست می آید که چند قدم با محصول نیمه رسانا که به آن Electronic Grade Silicon می گویند فاصله دارد. نتیجه ی پاک سازی ماده این است که فقط ممکن است ۱ اتم از میان بیلیون ها اتم، غیر سیلیکونی باشد. بعد از مرحله ی پاک سازی، سیلیکون وارد مرحله ی گداختن می شود. در این تصویر می توانید ببینید که چطور یک کریستال از سیلسکون تصفیه شده و گداخته به وجود می آید. محصول به دست آمده آن مونو کریستالی به نام Ignot (شمش) است.

Ingnot بزرگ

Mono-Crystal Silicon Ingnot

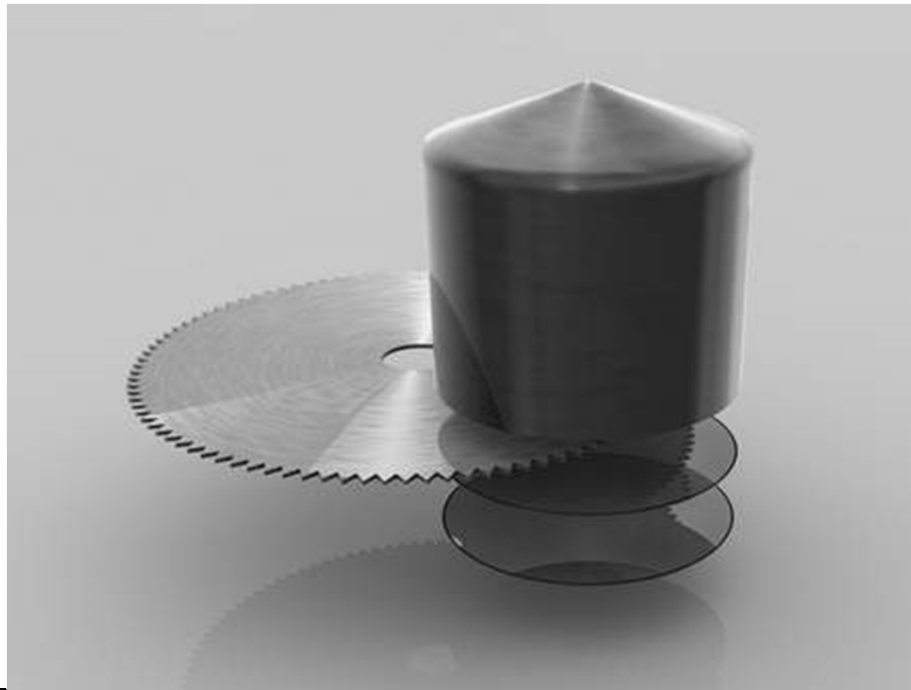


یک Ingnot مونو کریستال از
Electronic Grade Silicon ساخته
می‌شد. وزن هر Ingnot حدود ۱۰۰
کیلوگرم (۲۲۰ پوند) و خلوص
سیلیکون ۹۹/۹۹۹ درصد است.

برش Ingot

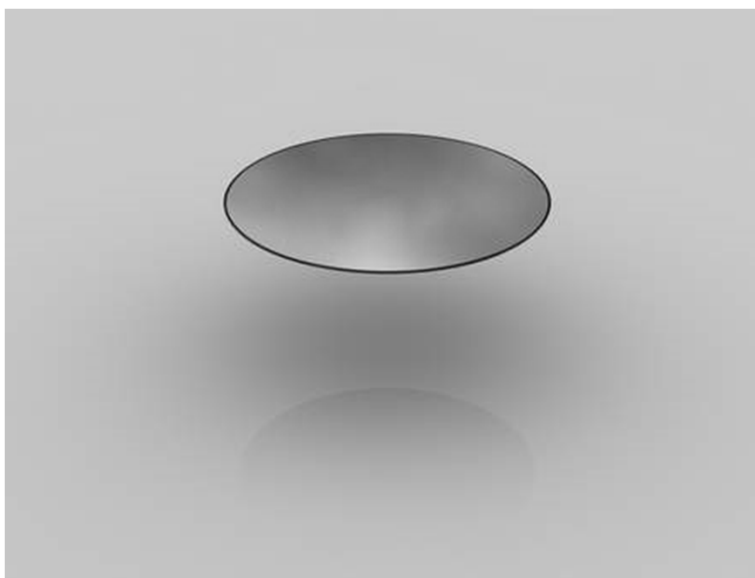
Ingot Slicing

Ingot وارد مرحله برش می شود که در آن جا به دیسک های سیلیکونی تبدیل می گردد که به آن ها Wafer (قرص) می گویند و خیلی باریک بریده شده اند. بعضی از Ingot ها از ۵ فوت هم بلندتر هستند. بسته به ویفرهای تولیدی قطرهای مختلفی هم دارند. امروزه CPU ها از ویفرهای ۳۰۰ میلیمتری ساخته می شوند.



تمیز کردن ویفرها

Wafer



پس از انجام برش، ویفرها براق می شوند تا هیچ خدشهای نماند. سطح آن آینه‌ای و صیقلی است. شرکت Intel خودش Ingot ها و ویفرها را تهیه نمی‌کند. در عوض ویفرهای آماده را از شرکت‌های دیگر خریداری می‌کند. شرکت Intel برای فرآیند 45 mm High Metal\K از ویفرهایی با قطر ۳۰۰ میلیمتر (۱۲ اینچ) استفاده می‌کند. اولین بار وقتی که Intel شروع به ساخت تراشه‌ها کرد، جریان‌های الکتریکی بر روی ویفرهای ۵۰ میلیمتری (۲ اینچی) ایجاد کرد. امروزه Intel از ویفرهای ۳۰۰ میلیمتری که نتیجه‌ی آن کمتر شدن قیمت است استفاده می‌کند.

به کارگیری Photo Resist

Applying Photo Resist



مایع آبی رنگ که در در شکل می بینید، یک Photo Resist است که مشابه آن هایی است که در فیلم های عکاسی استفاده می شود. در این مرحله ویفر شروع به چرخیدن می کند که باعث می شود که لایه آغشته شده خیلی باریک و صیقلی شود.

قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش (۱)

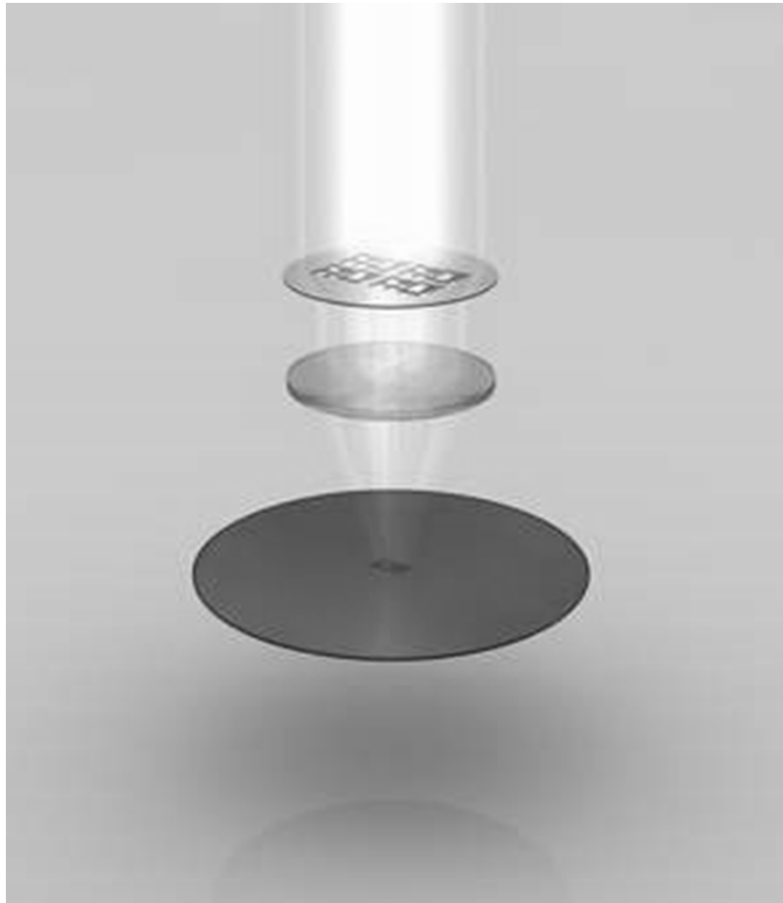
Exposure (1)

در این مرحله، Photo Resist در معرض اشعه ماورا بنفش قرار می گیرد. واکنش شیمیایی که با UV رخ می دهد مشابه همان اتفاقی است که به هنگام فشار دادن دکمه بر روی فیلم خام در دوربین می افتد.

قسمت های مقاوم بر روی ویفر بعد از اینکه در معرض اشعه UV قرار گرفتند به صورت محلول در می آیند. مرحله ی تاباندن پرتو با استفاده از پوشش هایی که مثل نقش و نگار هستند تمام می شود. وقتی از اشعه UV استفاده می شود، پوششی با طرح های مختلف بر روی آن به وجود می آید. ساخت یک CPU نیازمند تکرار این فرآیند است تا اینکه چند لایه بر روی هم به وجود آید.

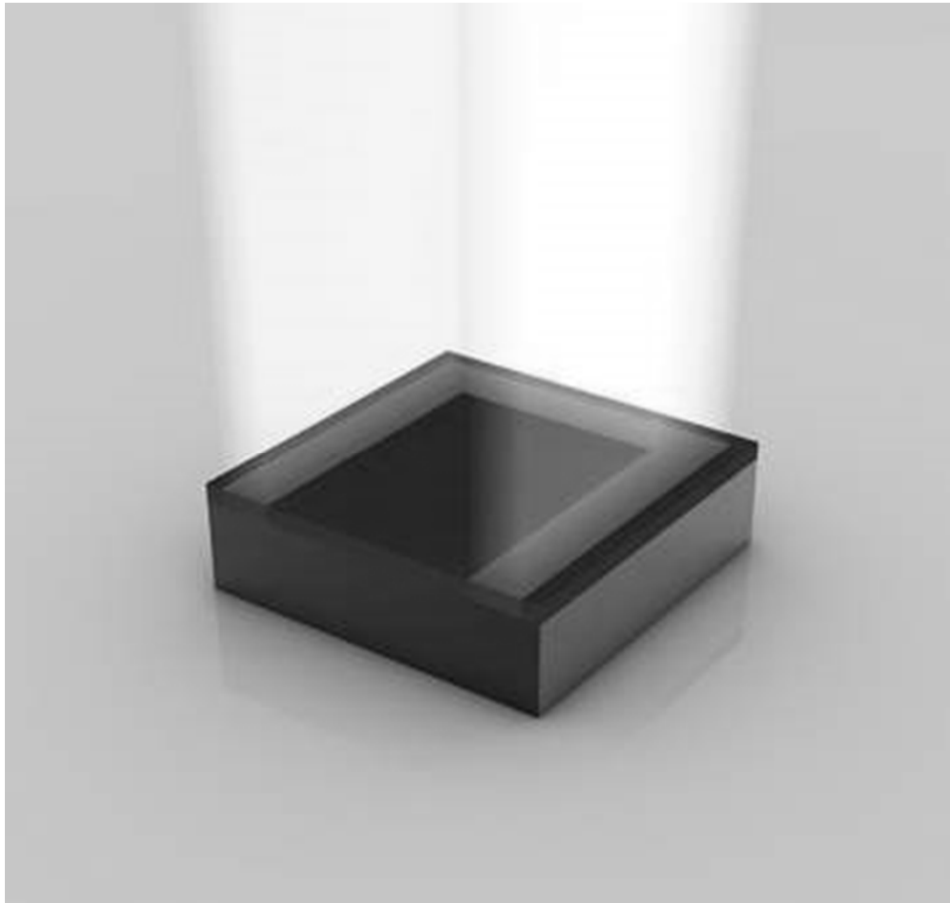
قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش (۲)

Exposure (2)



یک لنز نیز باعث کاهش نقش‌های روی پوشش می‌شود و آنها را به یک نقطه کانونی جمع کند. نتیجه‌ی آن بر روی ویفر این است که ۴ بار کوچکتر و طولی‌تر نسبت به نقش و نگارهای روی پوشش است.

بیشتر قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش Exposure

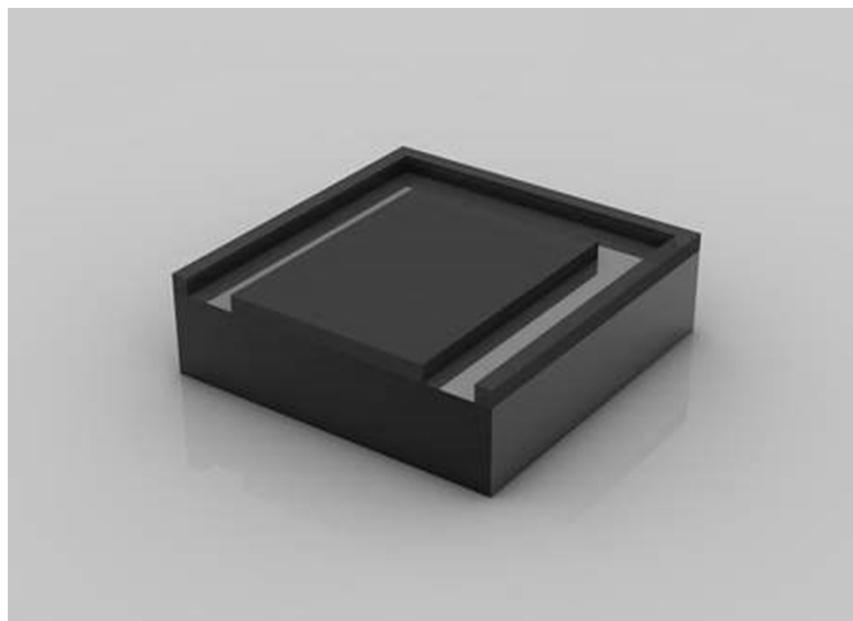


اگرچه معمولاً بیش از صدها ترانزیستور روی یک ویفر ساخته می‌شوند آ در اینجا و از این پس بر روی یک قطعه کوچک از ریزپردازنده در مقیاس یک ترانزیستور تمرکز شده است. یک ترانزیستور مثل سویچ عمل می‌کند، که جریان الکتریکی را در یک چیپ کامپیوتری کنترل می‌کند. محققان Intel ترانزیستور ها را خیلی کوچک ساخته‌اند که ادعا کرده‌اند حدود ۳۰ میلیون از آنها می‌توانند در سر یک سوزن جا شوند.

شستشوی Photo Resist

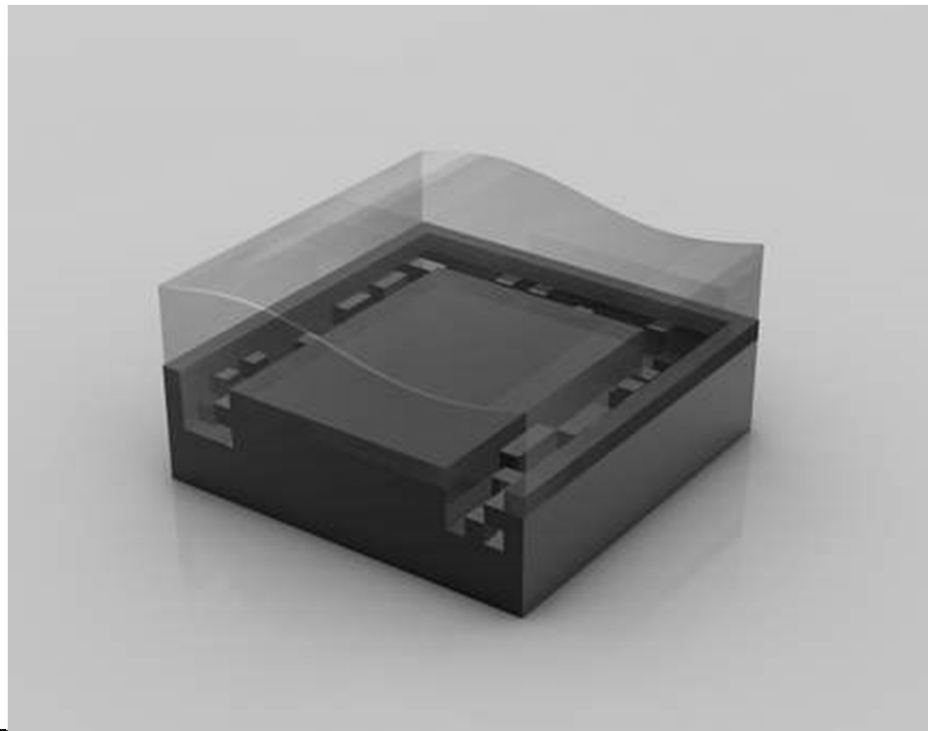
Washing off Photo Resist

بعد از تاباندن اشعه UV، تمام Photo Resist ها توسط یک حلال پاک می‌شوند. این کار باعث آشکار شدن الگوی طرح‌های Photo Resist که توسط آن پوشش ساخته شده بود، می‌شود. ترانزیستورها و رابط‌ها و اتصالات الکتریکی از همین جا شروع می‌شوند.



حک کردن Etching

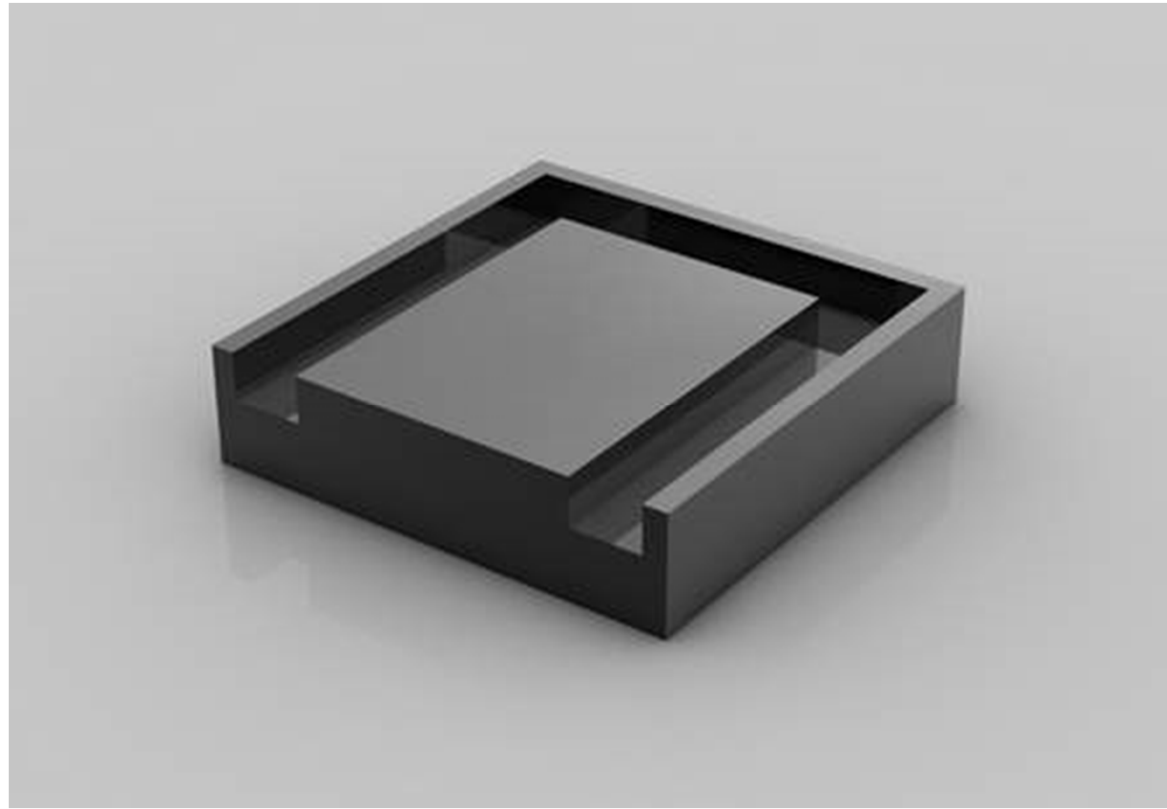
لایه Photo Resist باعث حفاظت از ویفر می شود و نباید روی آن خطی بیفتد. حال قسمت هایی که بر روی آن ها اشعه تابیده شده است، با مواد شیمیایی حکاکی می شوند.



حکاکی

Removing Photo Resist

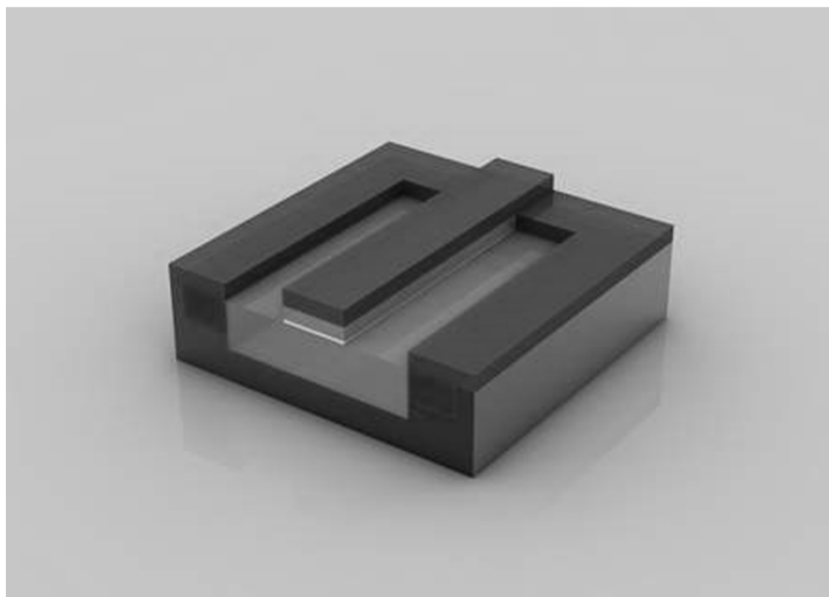
- بعد از حکاکی Photo Resist پاک شده و اشکال روی آن نمایان می شوند.



به کارگیری بیشتر Photo Resist

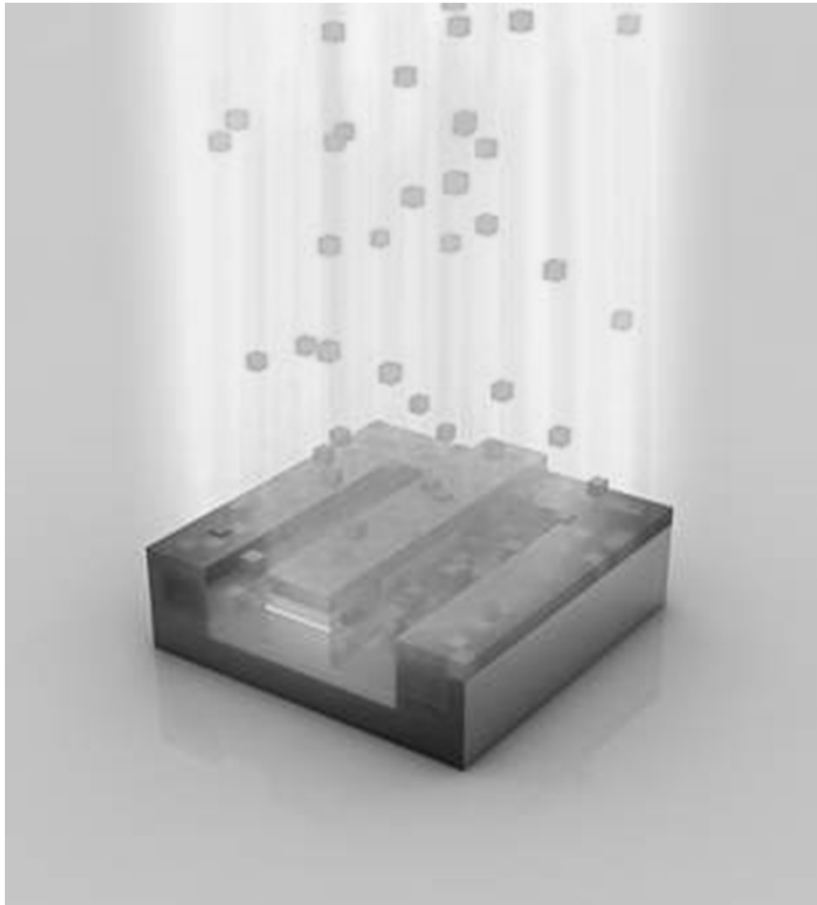
Applying Photo Resist

در این مرحله، Photo Resist (ماده آبی) بیشتری به کار گرفته می شود و سپس دوباره اشعه UV به آن تابانده می شود. ماده اشعه دیده دوباره شسته شده و قبل از مرحله بعدی که به آن برآمیختن یونی (ion dropping) می گویند. در این مرحله ذرات یونی به ویفر تابانده می شوند که به سیلیکون امکان تغییر خاصیت شیمیایی را می دهد تا CPU بتواند کنترل شارش الکتریکی را داشته باشد.



بر آمیختن یونی

Ion Implantation

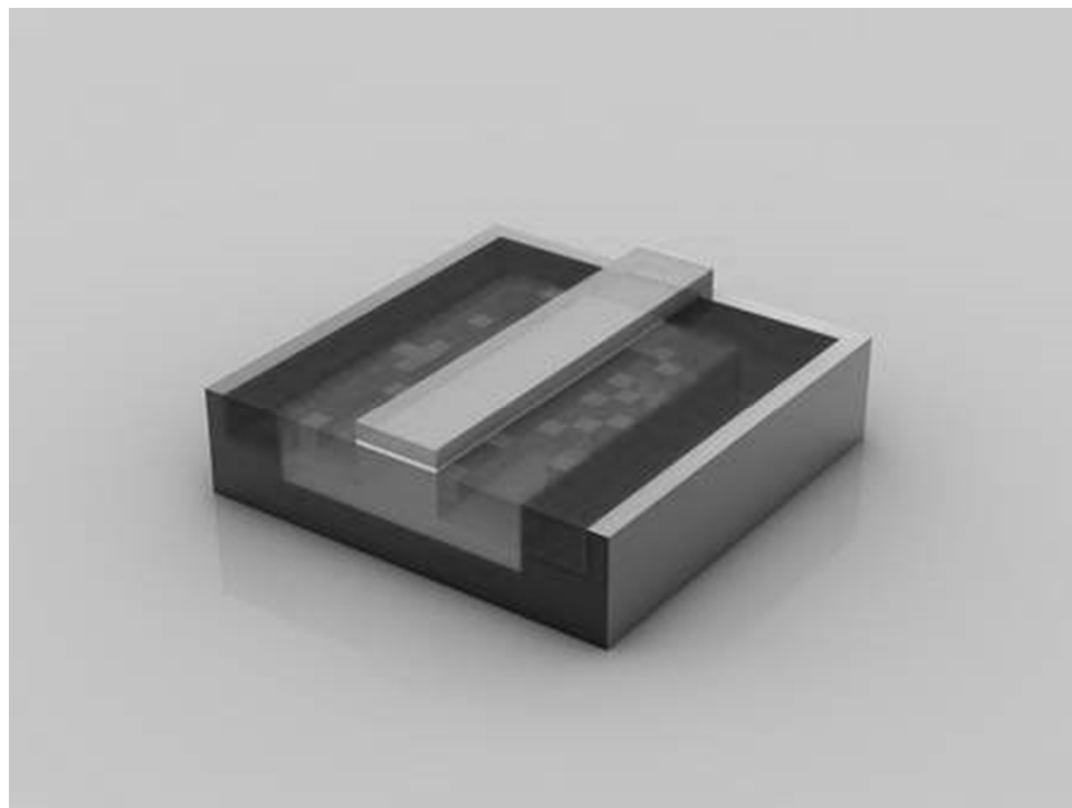


در طی پروسه‌ای که به آن القای یونی می‌گویند (یک حالت از پروسه برآمیختن یونی است) محلی که ویفر سیلیکونی دارد با یون بمباران می‌شود. یون‌های القا شده در سیلیکون باعث می‌شود که سیلسکون در آن مناطق رفتار الکتریکی متفاوتی داشته باشد. یون‌ها به سمت سطح ویفر رانده می‌شوند تا به ولتاژ بالا برسند. در میدان الکتریکی آن سرعت یون‌ها به ۳۰۰.۰۰۰ کیلومتر در ساعت (۱۸۵۰۰۰ mph) هم می‌رسد.

پاک کردن دوباره Photo Resist

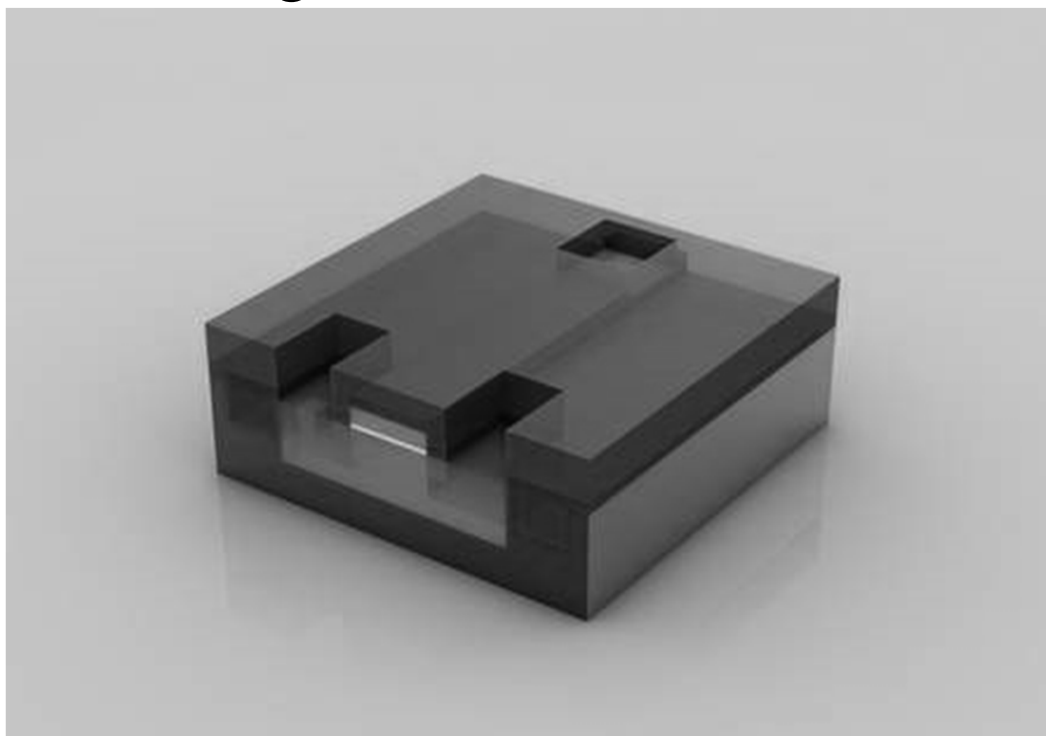
Removing Photo Resist

بعد از القای یونی، photo Resist پاک شده و ماده‌ای که ریخته می‌شود (قسمت سبز رنگ) اتم‌های بیگانه به آن اضافه می‌کنند.



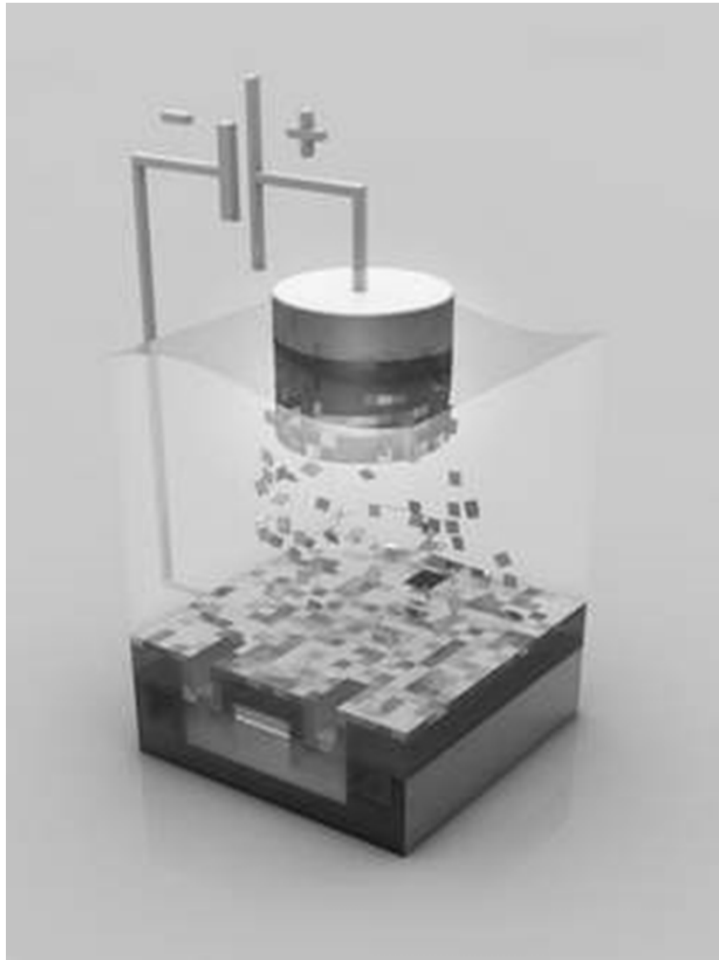
یک ترانزیستور Ready Transistor

- آماده شدن یک ترانزیستور نزدیک است. سه سوراخ بر روی لایه عایق (بنفش) نهاده می شود. این سه سوراخ با مس پر می شوند که رسانا برای اتصال به دیگر ترانزیستورها می باشند.



فلزکاری و یفر

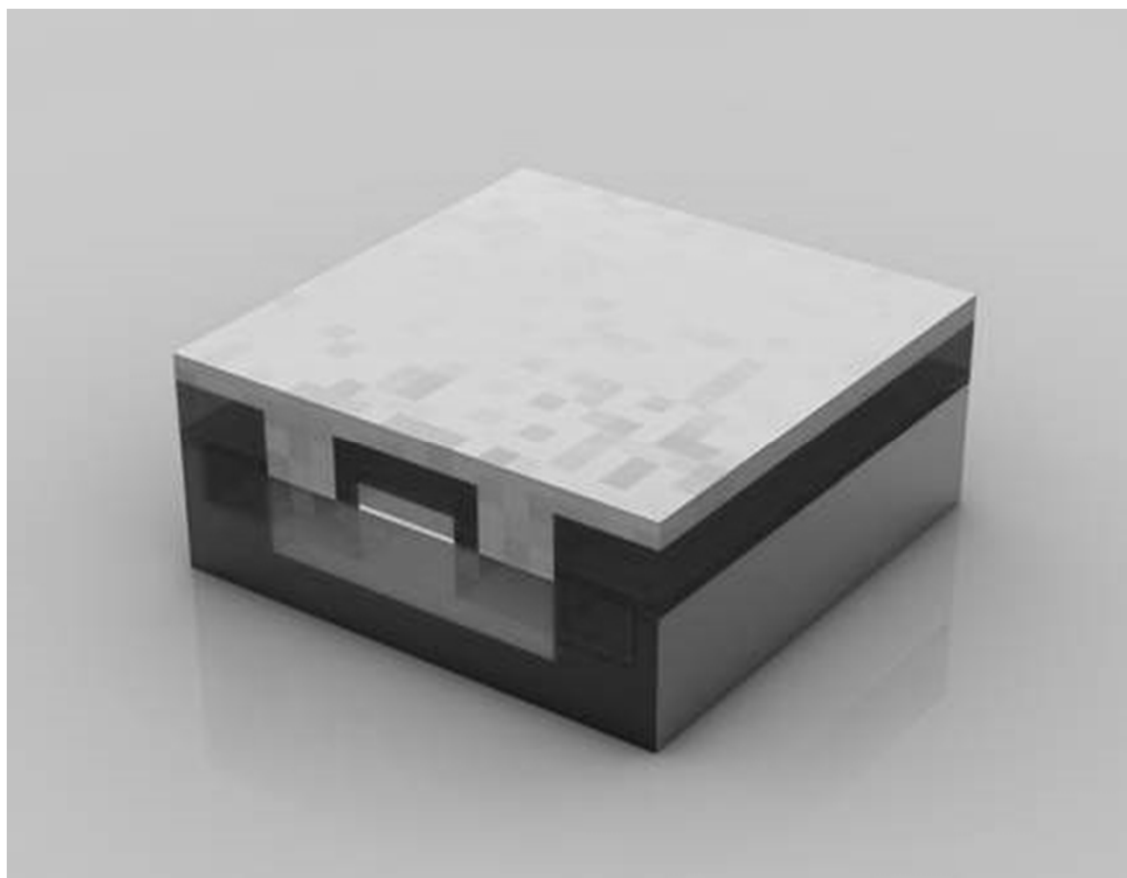
Electroplating



در این مرحله، ویفرها در یک محلول سولفات مس گذاشته می‌شوند. یون‌های مس بر روی ترانزیستور ته‌نشین می‌شوند که به آن فلزکاری می‌گویند. یون‌های مس از سمت مثبت (آند) به سمت منفی آن (کاتد) حرکت می‌کنند.

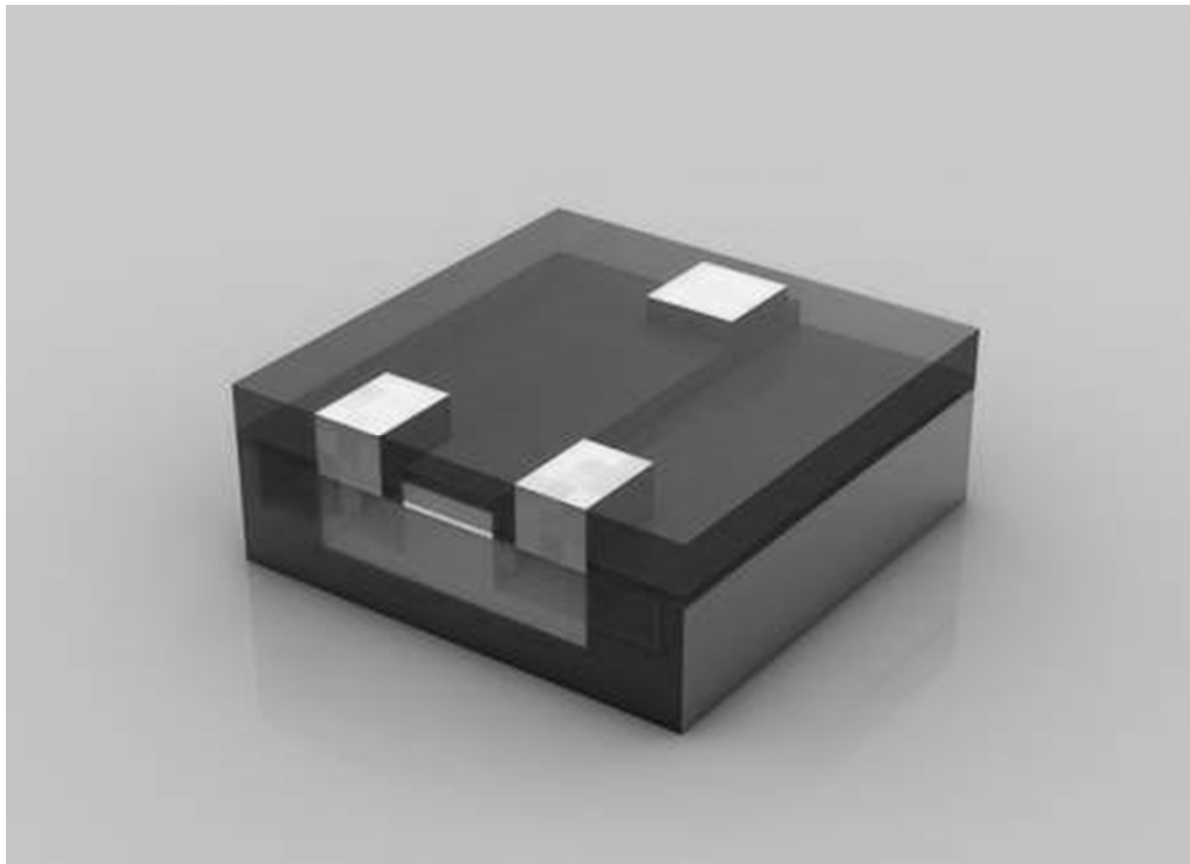
مقرر شدن یون ها After Electroplating

یون های مس به صورت یک لایه نازک بر روی سطح ویفر مستقر می شوند.



پاک کردن مواد اضافی Polishing

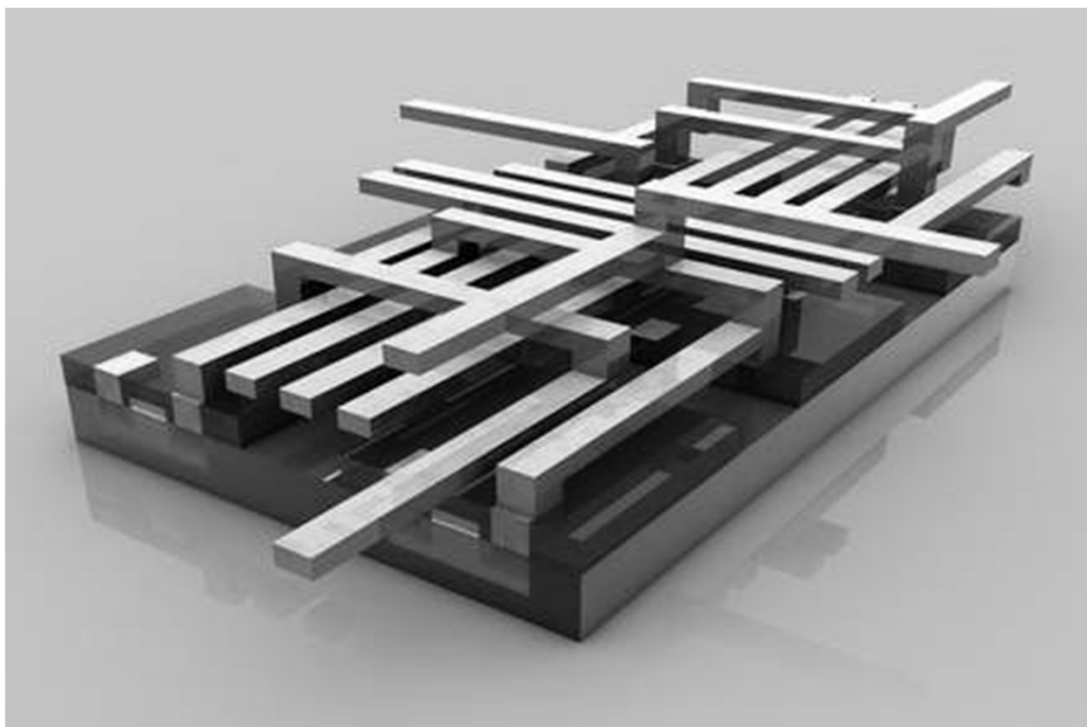
مواد اضافی از روی لایه ی نازک مس پاک می شود.



روکشی

Metal Layers

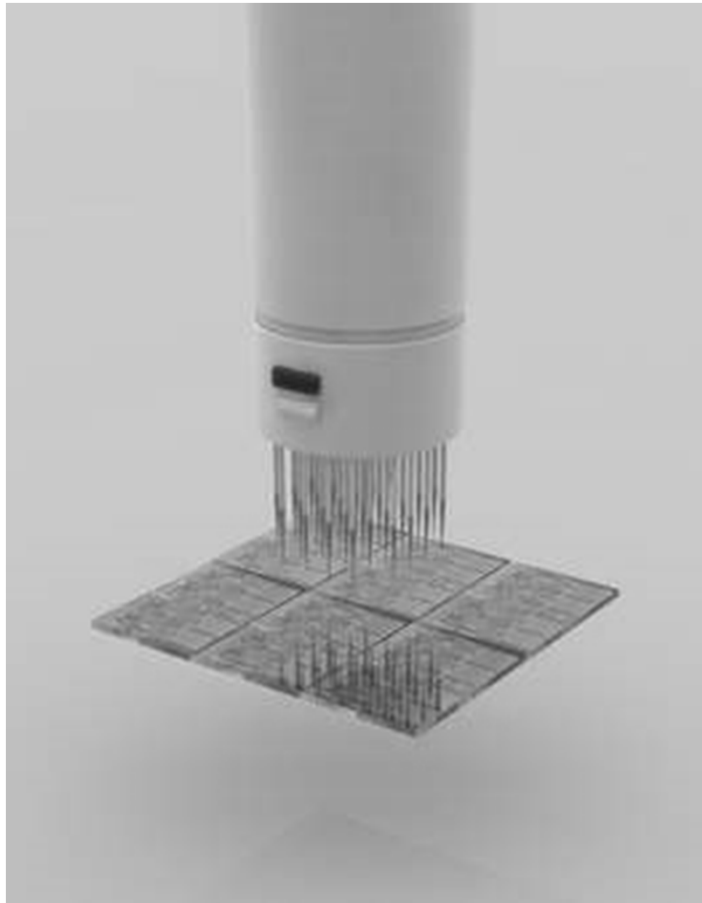
لایه‌های مختلف فلزی برای اتصال بین ترانزیستورهای مختلف ساخته شده‌اند. چگونگی وصل کردن این لایه‌ها به هم توسط مهندسان و تیم‌هایی طراحی می‌شود که طرح اصلی پردازنده تولیدی به این قسمت مربوط می‌شود (مثلاً پردازنده Intel Core i7 تولید می‌شود).



در حالی که تراشه‌های کامپیوتر به نظر صاف می‌آیند آنها حدوداً ۲۰ لایه از اجزای مختلف ترکیب کننده برق دارند. اگر با یک ذره بین به تراشه نگاه کنید یک شبکه پیچیده از مدارها و ترانزیستورها که مثل وسیله‌ای که از آینده آمده است می‌ماند، را می‌بینید.

تست نوع ویفر

Wafer Sort Test



این بخش از ویفر آماده شده، وارد نخستین تست عملکردی می‌شود. در این مرحله الگوهای تست بر روی تک تک تراشه‌ها انجام می‌شود و جواب‌های گرفته شده را با جواب درست (که قبلاً داده شده) مقایسه می‌شود.

برش ویفرها

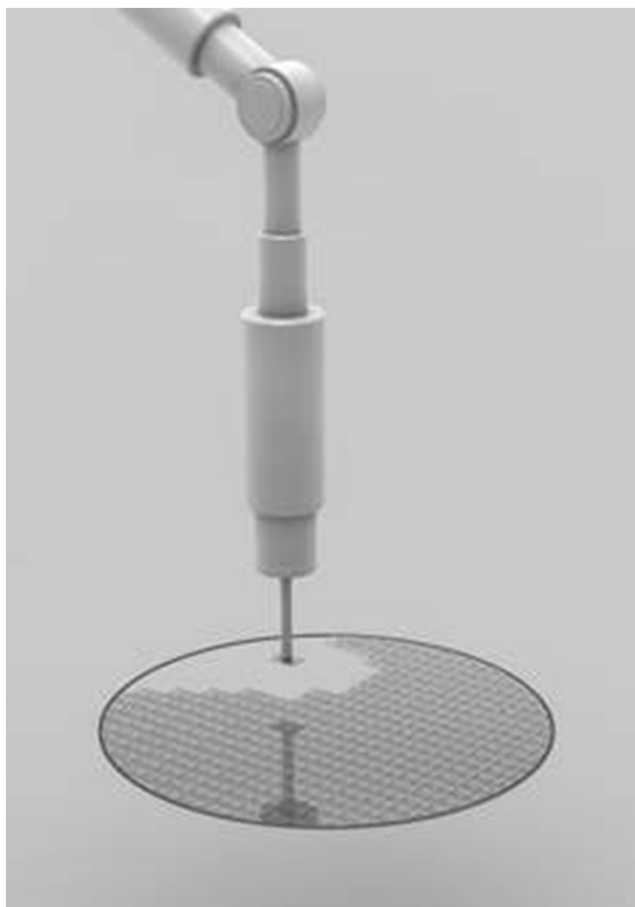
Wafer Slicing

بعد از تست که معلوم شد آیا ویفرها از نظر پردازش سالم هستند یا نه آنها به قطعات کوچکتر تبدیل می شوند که به آنها Die می گویند.



دور انداختن die های خراب

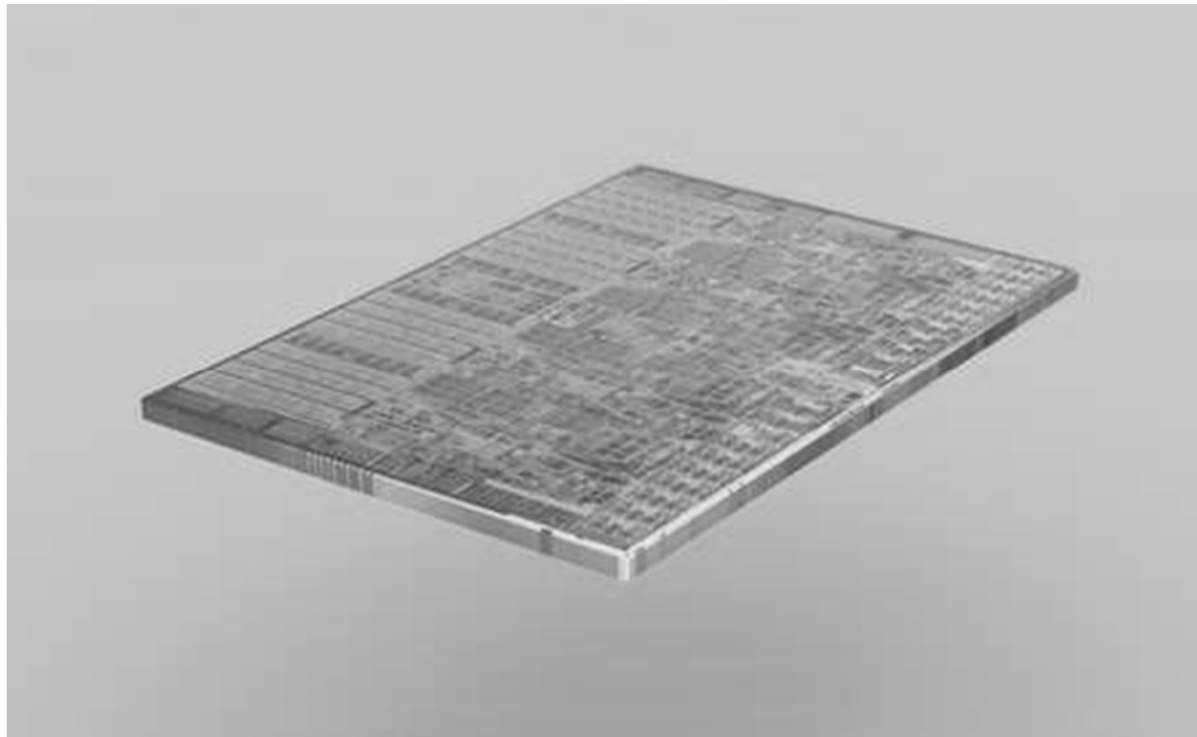
Discarding Faulty Dies



die هایی که از تست سربلند آمدند به مرحله بعد (بسته بندی) راه پیدا می کنند. die های خراب دور انداخته می شوند. سالها پیش، Intel از die های خراب CPU، دسته کلید درست می کرد.

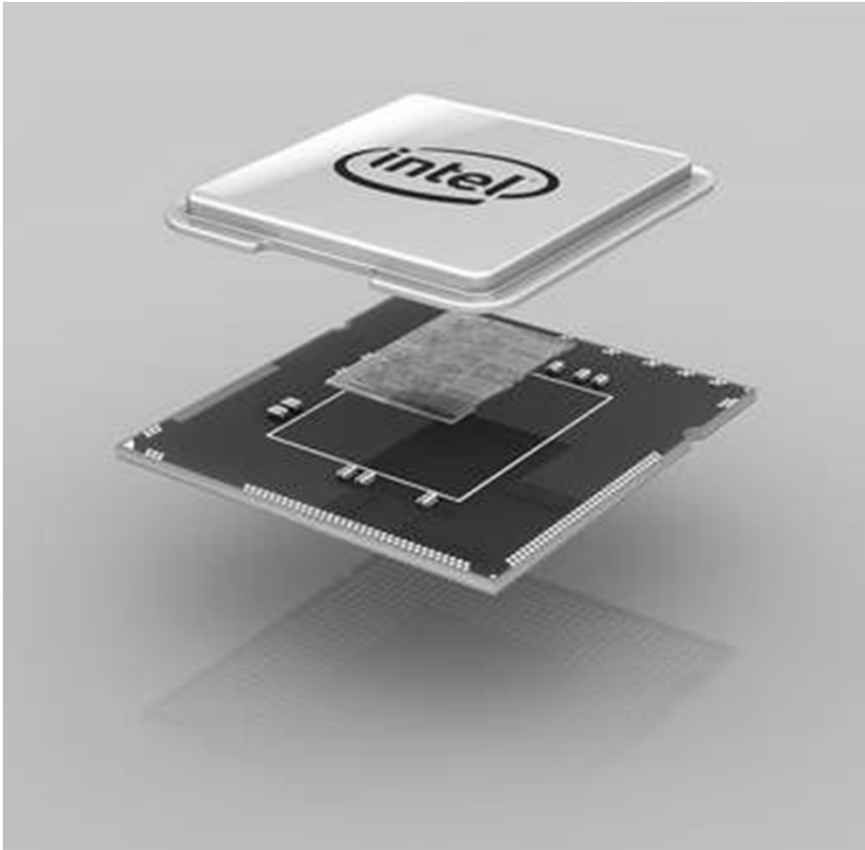
به وجود آمدن یک die Individual Die

این یک die به تنهایی است که در مرحله پیش جدا شده است. این die که در تصویر می بینید یک die از Intel Core i7 است.



ساخت یک پردازنده کامل

Packaging



زیرلایه (Substrate)، die و خنک‌کننده کنار هم گذاشته می‌شوند تا یک پردازنده کامل را تشکیل دهند. زیرلایه سبز رنگ پردازنده از رابط الکتریکی و مکانیکی برای تعامل با کل سیستم PC ساخته شده است. خنک‌کننده خاکستری رنگ، یک رابط گرمایی است که کار آن خنک کردن است. که باعث خنک کردن پردازنده در هنگام کار می‌شود.

یک CPU تمام شده Processor

یک ریز پردازنده پیچیده‌ترین محصول تولید شده در زمین است. در حقیقت ۱۰۰ ها مرحله طول می‌کشد تا ریزپردازنده‌ها در تمیزترین محیط (microprocessor fab) ساخته شوند، اما فقط مهم‌ترین مراحل آن در اینجا بیان شده است.



تست CPU

Class Testing

در آخرین مرحله، تست پردازنده‌ها برای مشخصات آن‌ها انجام می‌شود.
(در کنار تست، مشخصات اتلاف توان و بیشینه فرکانس نیز تست می‌شوند)



بسته‌بندی CPU Binning

برپایه نتایج تست کلاس، پردازنده‌های با قابلیت‌های یکسان در یک سینی حامل قرار داده می‌شوند. این مرحله به نام Binning شناخته می‌شود. نام این فرآیند ممکن است برای خیلی از کسانی که Tom's Hardware را مطالعه می‌کنند آشنا باشد.



عمل Binning بالاترین فرکانس عملی یک پردازنده را معین می‌کند. سپس پردازنده‌های دسته‌بندی‌شده تفکیک می‌شوند و با توجه به خصوصیات تک‌تک آنها به فروش می‌رسند.

ارسال به فروشگاه

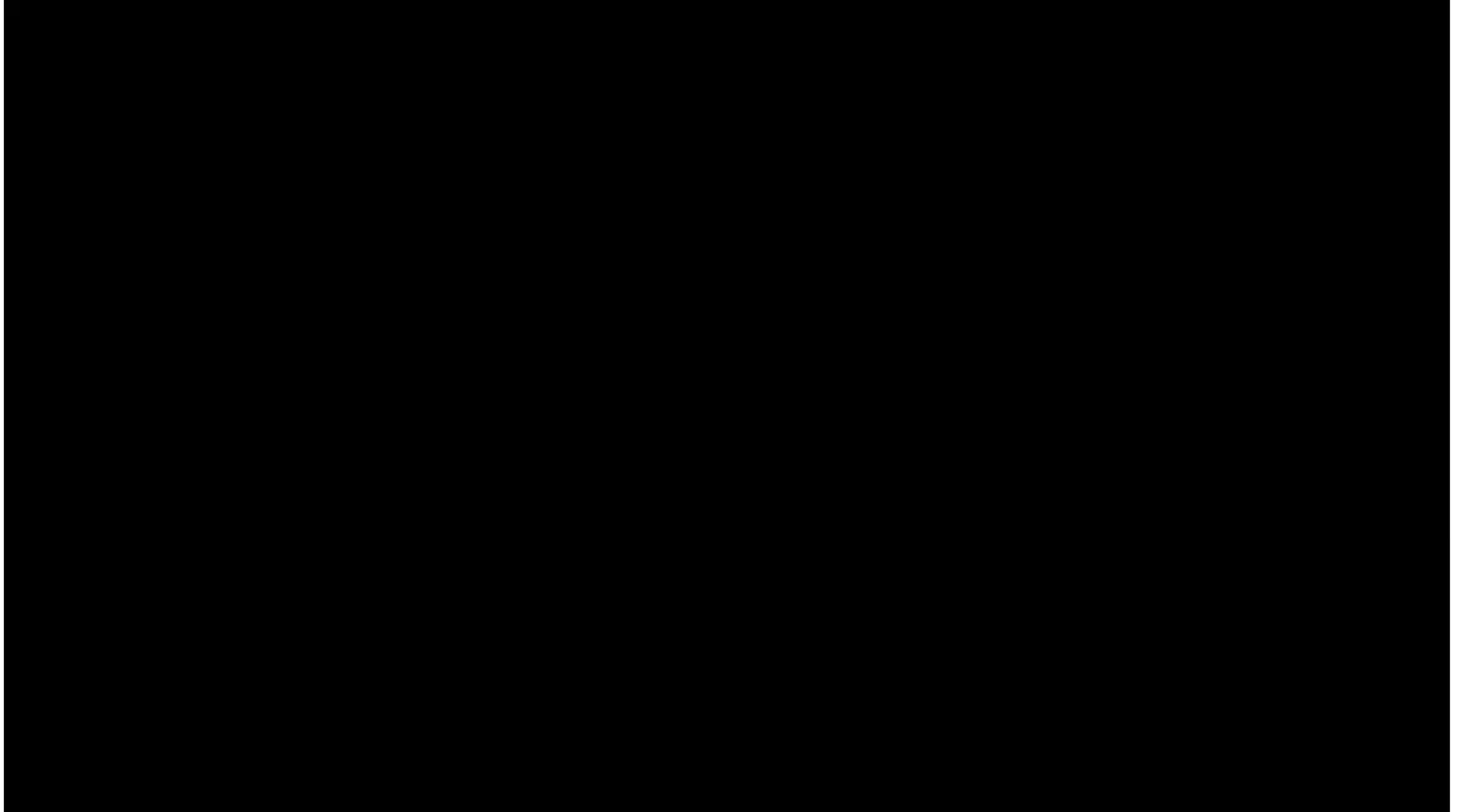
Retail Package

پردازنده ی تولید شده و تست شده (که در تصویر، Intel Core i7 نشان داده شده است) برای تولیدکنندگان سیستم در همان سینی ها و برای خرده فروشی ها در جعبه فرستاده می شود.



از شن تا تراشه

چگونگی ساخت ویفر سیلیکونی



چگونگی ساخت یک ریزپردازنده

چگونگی ساخت یک تراشه



فرآیند ساخت تراشه



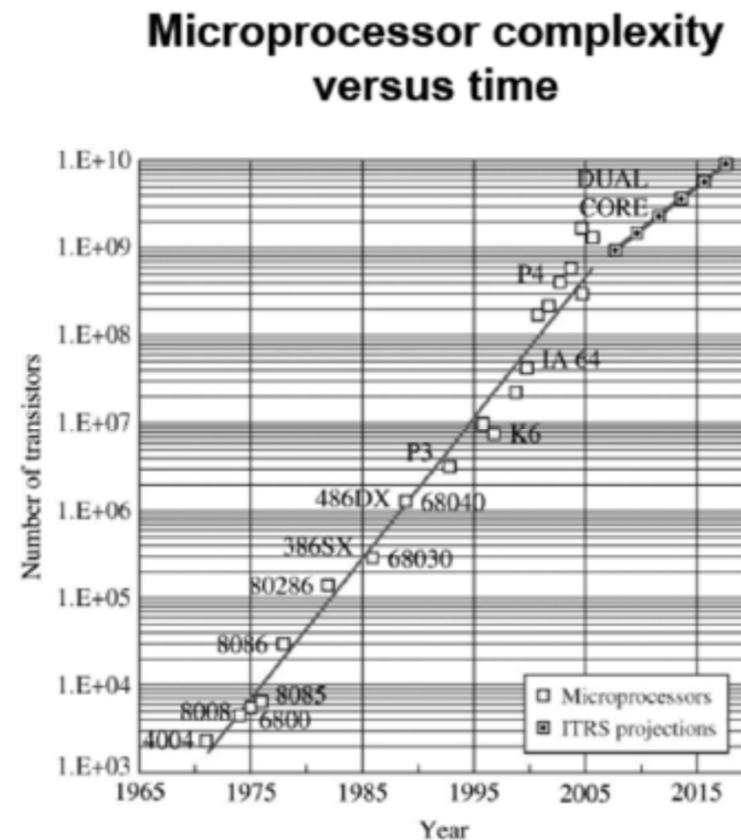
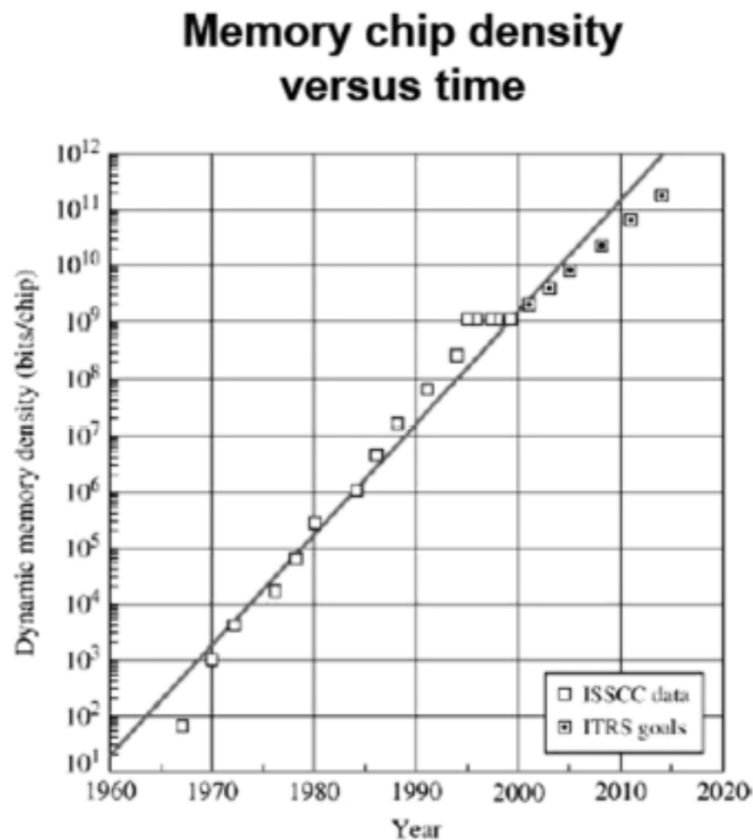
چگالی ترانزیستورها در تراشه

- در ابتدا فقط چند گیت یا سلول حافظه ساخته شده و با هم بسته‌بندی می‌شدند. مدارهای مجتمع اولیه را مدارهای با مقیاس کم (SSI) می‌نامیدند.
- با گذشت زمان، بسته‌بندی قطعات بیشتر و بیشتری روی همان تراشه امکان‌پذیر شد.
- این رشد چگالی، یکی از روندهای قابل توجه فن‌آوری است که تا به حال به ثبت رسیده است.
- این امر منجر به شکل‌گیری قانونی به نام قانون مور شد که توسط گوردن مور، کمک مؤسس اینتل در سال ۱۹۶۵ مطرح شد.

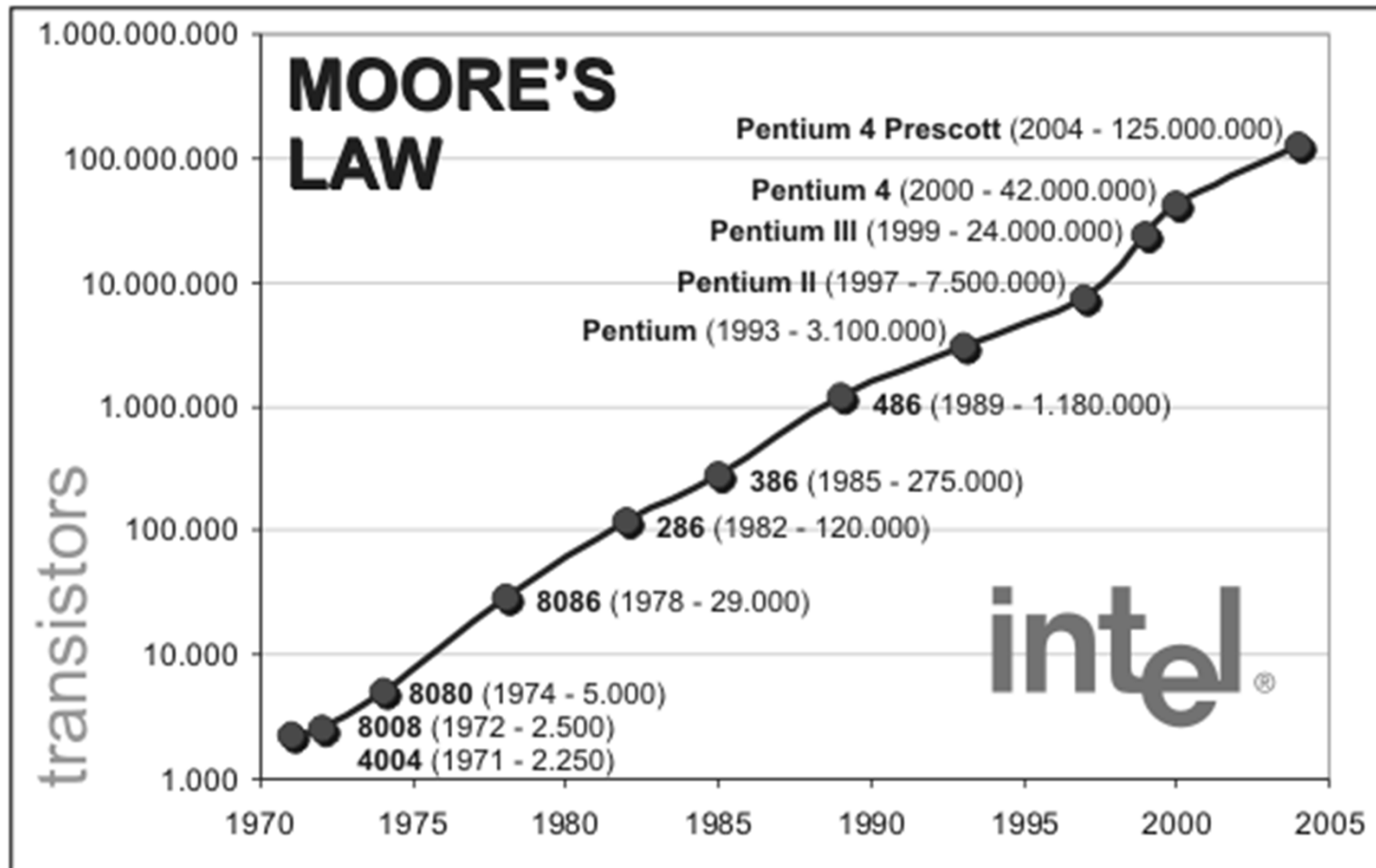


قانون مور (۱)

- قانون مور: تعداد ترانزیستورهایی که می‌توان روی یک تراشه قرار داد، هر سال دو برابر می‌شود.



قانون مور (٢)



دست آوردهای قانون مور (۱)

- قیمت یک تراشه در طول دوره رشد ناگهانی در چگالی آن، تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. به این معنی که بهای منطق کامپیوتر و مدار حافظه با سرعت قابل توجهی کاهش یافته است.
- چون اجزای منطقی و حافظه در بیشتر تراشه‌های چگال‌تر، نزدیک‌تر به هم قرار می‌گیرند، طول مسیر الکتریکی کوتاه می‌شود و سرعت عملیات بالا می‌رود.
- کامپیوتر کوچک‌تر می‌شود و می‌توان آن را به راحتی در محیط‌های مختلف قرار داد.

دست آوردهای قانون مور (۲)

- توان مصرفی و ملزومات خنک‌کنندگی کاهش می‌یابد.
- اتصالات درون مدار مجتمع، قابل اطمینان‌تر از اتصالات لحیمی است. با مدارات بیشتر روی هر تراشه، اتصالات بین تراشه‌ها کمتر می‌شود.

The only way
to do great
work
is to love what
you do.

- Steve Jobs