

مدارهای مجتمع

طراحی و ساخت یک تراشه

محمدعلی شفیعیان

<http://shafieian-education.ir>

میکروالکترونیک و مدارهای مجتمع

- در مدارهای مجتمع، بعضی از قطعات مانند ترانزیستورها، مقاومت‌ها و هادی‌ها را می‌توان از یک نیمه‌هادی مانند سیلیکون ساخت.
- این ایده بسطی از هنر مربوط به حالت جامد برای ساخت یک مدار کامل در یک قطعه نازک سیلیکون به‌جای نصب قطعات مجزای ساخته شده از تکه‌های سیلیکونی جدا در همان مدار می‌باشد.
- روی یک ورقه نازک (ویفر) سیلیکونی می‌توان به‌طور همزمان ترانزیستورهای زیادی ساخت. این ترانزیستورها را می‌توان با فرآیند فلزپوشانی (metallization) به هم متصل نمود.

واژه‌های به کار رفته در ساخت تراشه

- **سیلیکون:** نام تجاری سیلیسم است.
- **Ingot:** حجم‌های ساخته شده سیلیکونی را Ingot (به معنی شمش) می‌گویند (البته فقط محدود به سیلیکون نمی‌شود).
- **Wafer:** به معنی لایه دایره‌ای شکل. در ادامه منظور از کلمه Wafer قرص‌های برش داده شده Ingot‌ها است.
- **Photo Resist:** ماده‌ای که در ساخت این محصولات استفاده می‌شود که مشابه ماده ظهور عکس است.

3

مراحل ساخت یک تراشه پردازنده (۱)

- ۱- به دست آوردن شن خالص
- ۲- پاک سازی و نمو
- ۳- Ingot بزرگ
- ۴- برش Ingot
- 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

4

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

5

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

6

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.



7

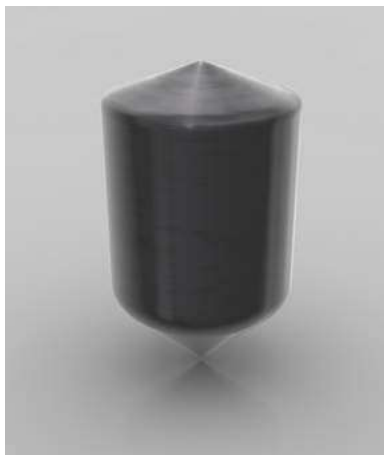
پاک‌سازی و نمو Melted Silicon



بعد از بدست آوردن شن خالص و جدا کردن سیلیکون از آن مواد اضافی از آن جدا می‌شوند و سیلیکون خالص بدست می‌آید که چند قدم با محصول نیمه‌رسانا که به آن Electronic Grade Silicon می‌گویند فاصله دارد. نتیجه پاک‌سازی ماده این است که فقط ممکن است ۱ اتم از میان بیلیون‌ها اتم، غیر سیلیکونی باشد. بعد از مرحله ی پاک‌سازی، سیلیکون وارد مرحله گداختن می‌شود. در این تصویر می‌توانید ببینید که چطور یک کریستال از سیلیکون تصفیه شده و گداخته به‌وجود می‌آید. محصول به‌دست آمده آن مونو کریستالی به نام Ignot (شمش) است.

8

Ingnot بزرگ Mono-Crystal Silicon Ingnot



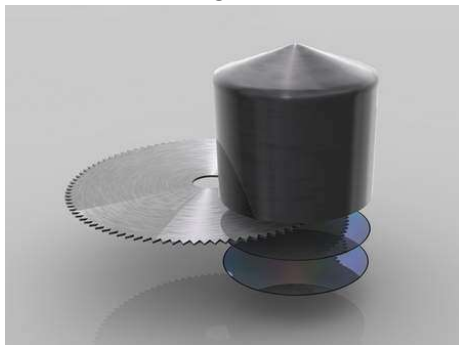
یک Ingnot مونوکریستال از
Electronic Grade Silicon ساخته
می‌شود.

وزن هر Ingnot حدود ۱۰۰ کیلوگرم
(۲۲۰ پوند) و خلوص سیلیکون
۹۹/۹۹ درصد است.

9

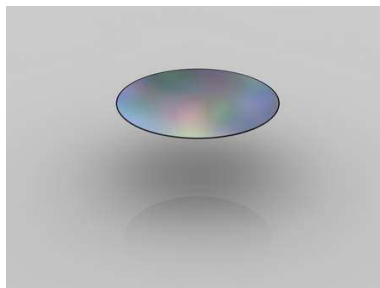
برش Ingnot Ingnot Slicing

Ingnot وارد مرحله برش می‌شود که در آن‌جا به دیسک‌های سیلیکونی تبدیل می‌گردد
که به آن‌ها Wafer (قرص) می‌گویند و خیلی باریک بریده شده‌اند. بعضی از Ingnot
ها از ۵ فوت هم بلندتر هستند. ویفرهای تولیدی قطرهای مختلفی دارند. امروزه
CPUها از ویفرهای ۳۰۰ میلیمتری ساخته می‌شوند.



10

تمیز کردن ویفرها Wafer



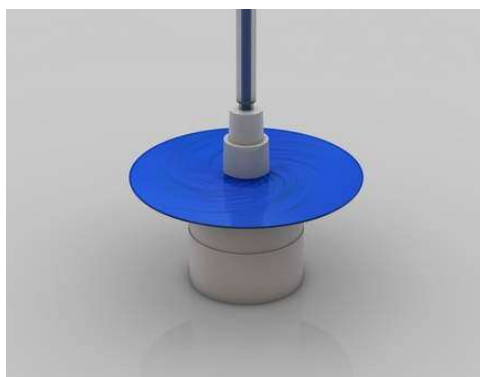
پس از انجام برش، ویفرها براق می شوند تا هیچ خدشهای نماند. سطح آن آینه‌ای و صیقلی است. شرکت Intel خودش Ingots و ویفرها را تهیه نمی‌کند؛ در عوض ویفرهای آماده را از شرکت‌های دیگر خریداری می‌کند.

شرکت Intel برای فرآیند 45 mm High-K\Metal 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 استفاده می‌کند که نتیجه آن کمتر شدن قیمت است.

11

به کارگیری Photo Resist Applying Photo Resist



مایع آبی‌رنگ که در در شکل می‌بینید، یک Photo Resist است که مشابه آن‌هایی است که در فیلم‌های عکاسی استفاده می‌شود.

در این مرحله ویفر شروع به چرخیدن می‌کند که باعث می‌شود که لایه آغشته شده خیلی باریک و صیقلی شود.

12

قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش (۱) Exposure (1)

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

قسمت‌های مقاوم بر روی ویفر بعد از اینکه در معرض اشعه UV قرار گرفتند به صورت محلول در می‌آیند. مرحله‌ی تاباندن پرتو با استفاده از پوشش‌هایی که مثل نقش و نگار هستند تمام می‌شود. وقتی از اشعه UV استفاده می‌شود، پوششی با طرح‌های مختلف بر روی آن به وجود می‌آید. ساخت یک CPU نیازمند تکرار این فرآیند است تا اینکه چند لایه بر روی هم به وجود آید.

13

قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش (۲) Exposure (2)

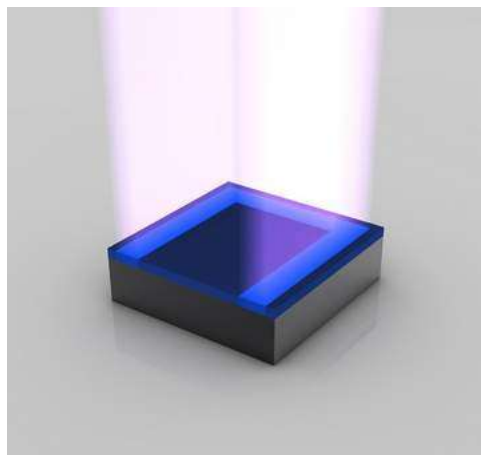


یک لنز نیز باعث کاهش نقش‌های روی پوشش می‌شود و آنها را به یک نقطه کانونی جمع کند.

نتیجه آن بر روی ویفر این است که ۴ بار کوچکتر و طولی‌تر نسبت به نقش و نگارهای روی پوشش است.

14

بیشتر قرار دادن در برابر اشعه ماورا بنفش Exposure



اگرچه معمولاً بیش از صدها ترانزیستور روی یک ویفر ساخته می‌شوند. در اینجا و از این پس بر رویی یک قطعه کوچک از ریزپردازنده در مقیاس یک ترانزیستور تمرکز شده است.

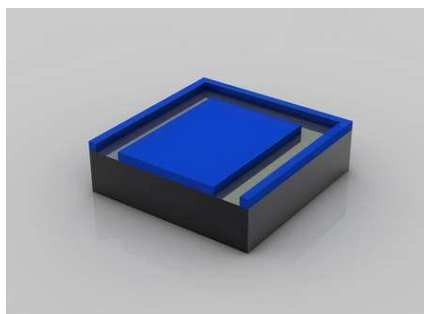
یک ترانزیستور مثل سوئیچ عمل می‌کند، که جریان الکتریکی را در یک چیپ کامپیوتری کنترل می‌کند.

محققان Intel ترانزیستورها را خیلی کوچک ساخته‌اند که ادعا کرده‌اند حدود ۳۰ میلیون از آنها می‌توانند در سر یک سوزن جا شوند.

15

شستشوی Photo Resist Washing off Photo Resist

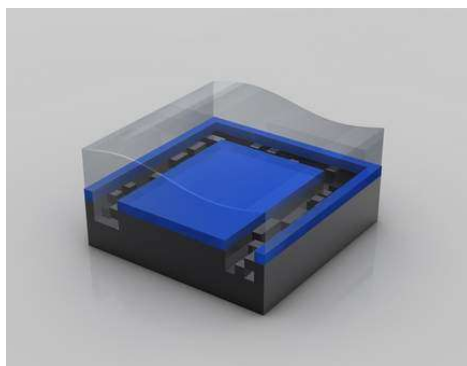
بعد از تاباندن اشعه UV، تمام Photo Resist ها توسط یک حلال پاک می‌شوند. این کار باعث آشکار شدن الگوی طرح‌های Photo Resist که توسط آن پوشش ساخته شده بود، می‌شود. ترانزیستورها و رابط‌ها و اتصالات الکتریکی از همین جا شروع می‌شوند.



16

حک کردن Etching

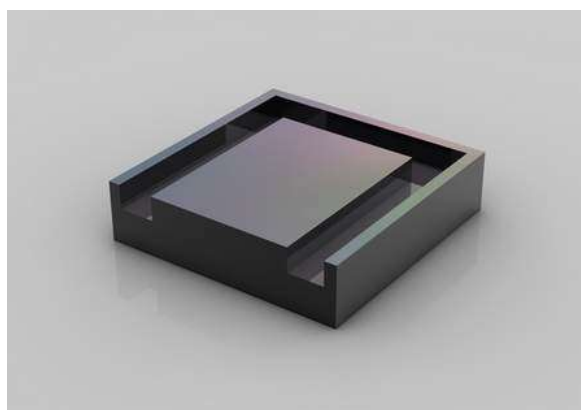
لایه Photo Resist باعث حفاظت از ویفر می شود و نباید روی آن خطی بیفتد. حال قسمت هایی که بر روی آن ها اشعه تابیده شده است، با مواد شیمیایی حکاکی می شوند.



17

حکاکی Removing Photo Resist

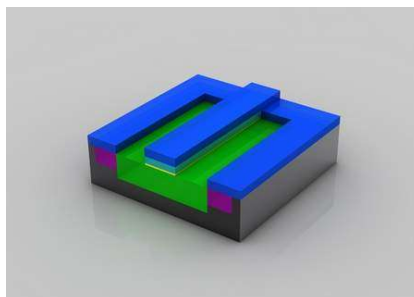
- بعد از حکاکی Photo Resist پاک شده و اشکال روی آن نمایان می شوند.



18

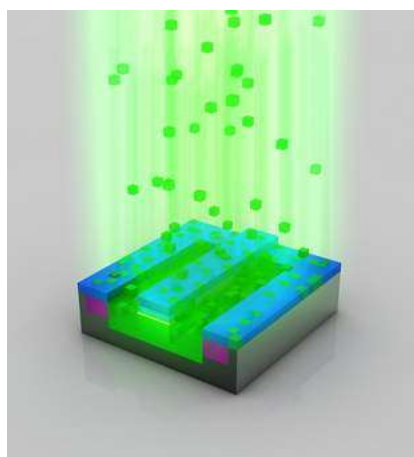
به کارگیری بیشتر Photo Resist Applying Photo Resist

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.



19

برآمیختن یونی Ion Implantation



در طی پروسه ای که به آن القای یونی می گویند (یک حالت از پروسه برآمیختن یونی است) محلی که ویفر سیلیکونی دارد با یون بمباران می شود.

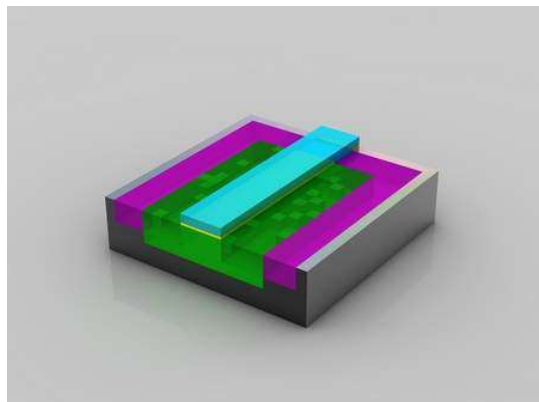
یون های القا شده در سیلیکون باعث می شود که سیلسکون در آن مناطق رفتار الکتریکی متفاوتی داشته باشد. یون ها به سمت سطح ویفر رانده می شوند تا به ولتاژ بالا برسند.

در میدان الکتریکی آن سرعت یون ها به ۳۰۰.۰۰۰ کیلومتر در ساعت (۱۸۵۰۰۰ mph) هم می رسد.

20

پاک کردن دوباره Photo Resist Removing Photo Resist

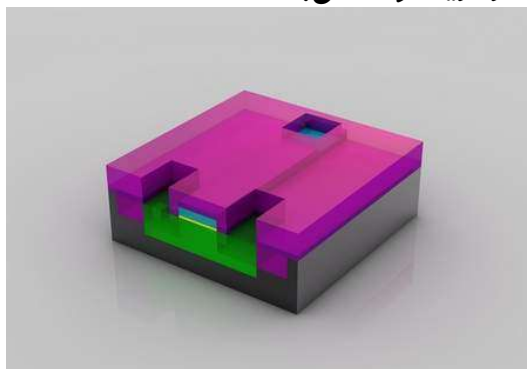
بعد از القای یونی، photo Resist پاک شده و ماده‌ای که ریخته می‌شود (قسمت سبز رنگ) اتم‌های بیگانه به آن اضافه می‌کنند.



21

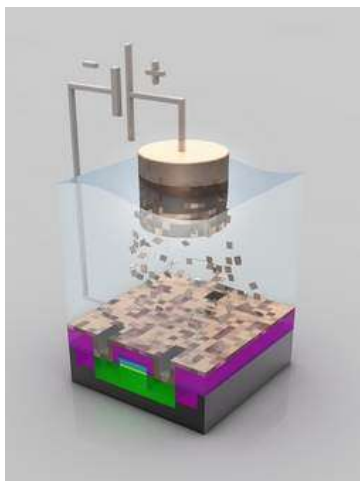
یک ترانزیستور Ready Transistor

آماده شدن یک ترانزیستور نزدیک است. سه سوراخ بر روی لایه عایق (بنفش) نهاده می‌شود. این سه سوراخ با مس پر می‌شوند که رسانا برای اتصال به دیگر ترانزیستورها می‌باشند.



22

فلزکاری ویفر Electroplating

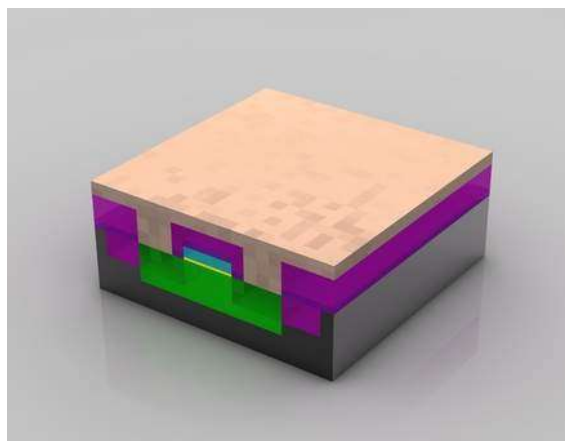


در این مرحله، ویفرها در یک محلول سولفات مس گذاشته می‌شوند. یون‌های مس بر روی ترانزیستور ته‌نشین می‌شوند که به آن فلزکاری می‌گویند. یون‌های مس از سمت مثبت (آند) به سمت منفی آن (کاتد) حرکت می‌کنند.

23

مقرر شدن یون‌ها After Electroplating

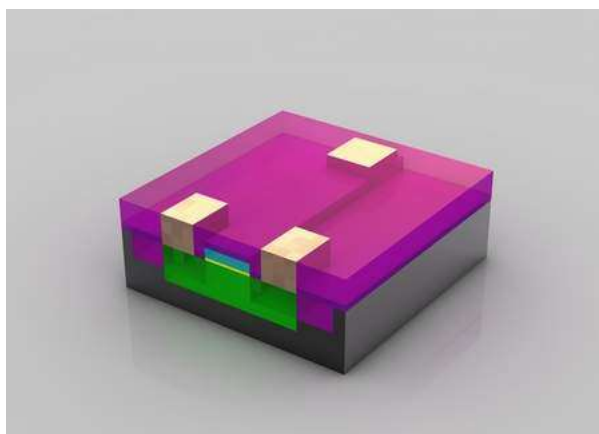
یون‌های مس به صورت یک لایه نازک بر روی سطح ویفر مستقر می‌شوند.



24

پاک کردن مواد اضافی Polishing

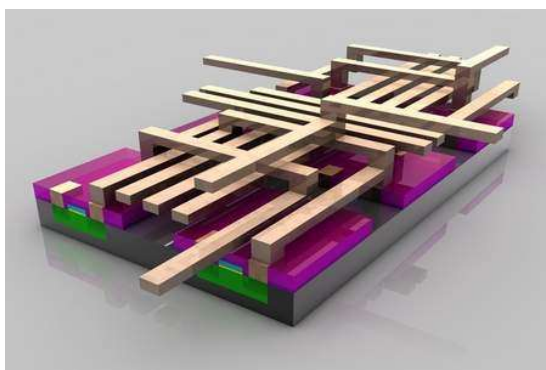
مواد اضافی از روی لایه ی نازک مس پاک می شود.



25

روکشی Metal Layers

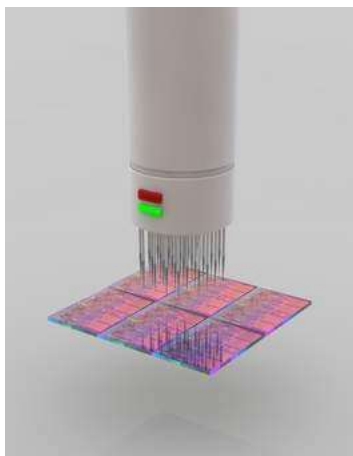
لایه های مختلف فلزی برای اتصال بین ترانزیستورهای مختلف ساخته شده اند. چگونگی وصل کردن این لایه ها به هم توسط مهندسان و تیم هایی طراحی می شود که طرح اصلی پردازنده تولیدی به این قسمت مربوط می شود (مثلا پردازنده Intel Core i7 تولید می شود).



درحالی که تراشه های کامپیوتر به نظر صاف می آیند 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 وسیله ای که از آینده آمده است می ماند، را می بینید.

26

تست نوع ویفر Wafer Sort Test

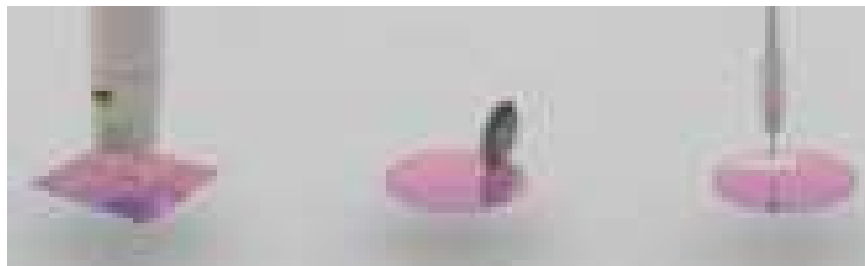


این بخش از ویفر آماده شده، وارد نخستین تست عملکردی می‌شود. در این مرحله الگوهای تست بر روی تک تک تراشه‌ها انجام می‌شود و جواب‌های گرفته شده را با جواب درست (که قبلاً داده شده) مقایسه می‌شود.

27

برش ویفرها Wafer Slicing

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



28

دور انداختن die های خراب Discarding Faulty Dies

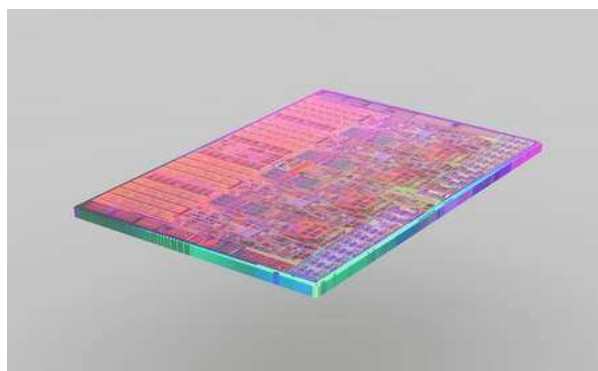


die هایی که از تست سربلند آمدند به مرحله بعد (بسته بندی) راه پیدا می کنند. die های خراب دور انداخته می شوند. سال ها پیش، Intel از die های خراب CPU، دسته کلید درست می کرد.

29

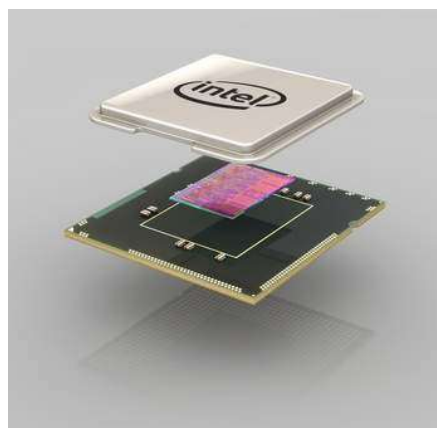
به وجود آمدن یک die Individual Die

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.



30

ساخت یک پردازنده کامل Packaging



زیرلایه (Substrate)، die و خنک کننده کنار هم گذاشته می شوند 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.

خنک کننده خاکستری رنگ، یک رابط گرمایی است که کار آن خنک کردن است. که باعث خنک کردن پردازنده در هنگام کار می شود.

31

یک CPU تمام شده Processor

یک ریز پردازنده پیچیده ترین محصول تولید شده در زمین است. در حقیقت ۱۰۰ ها مرحله طول می کشد تا ریزپردازنده ها در تمیزترین محیط (microprocessor fab) ساخته شوند، اما فقط مهم ترین مراحل آن در اینجا بیان شده است.



32

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)



33

بسته‌بندی CPU Binning

بر پایه 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.

34

ارسال به فروشگاه Retail Package

پردازنده تولید شده و تست شده (که در تصویر، Intel Core i7 نشان داده شده است) برای تولیدکنندگان سیستم در همان سینی‌ها و برای خرده‌فروشی‌ها در جعبه فرستاده می‌شود.

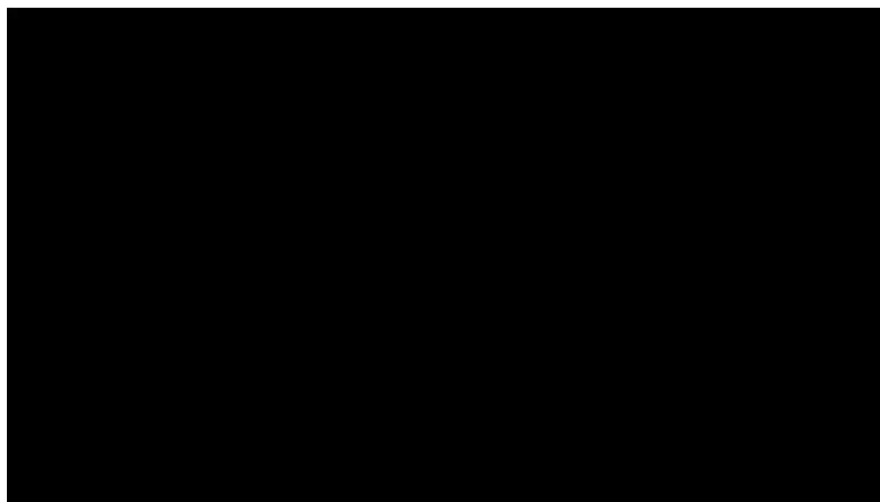


35

از شن تا تراشه

36

چگونگی ساخت ویفر سیلیکونی



37

چگونگی ساخت یک ریزپردازنده



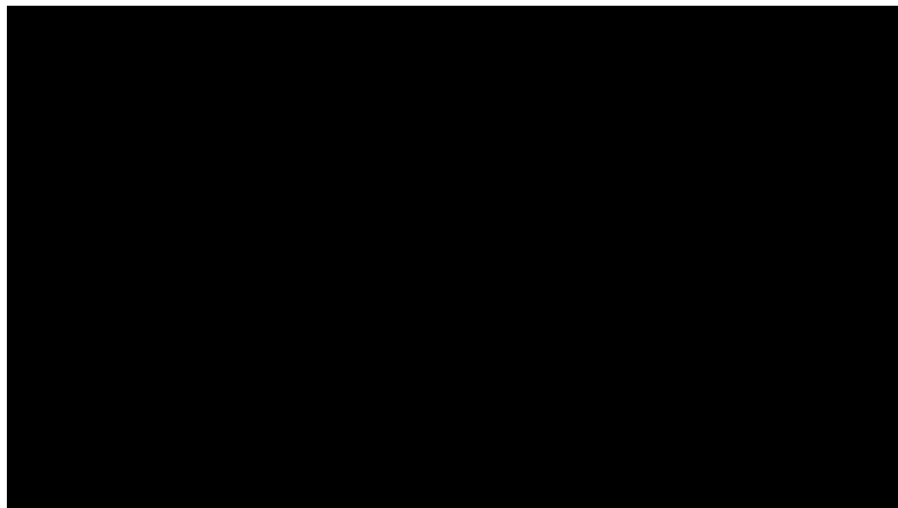
38

چگونگی ساخت یک تراشه



39

فرآیند ساخت تراشه



40

چگالی ترانزیستورها در تراشه

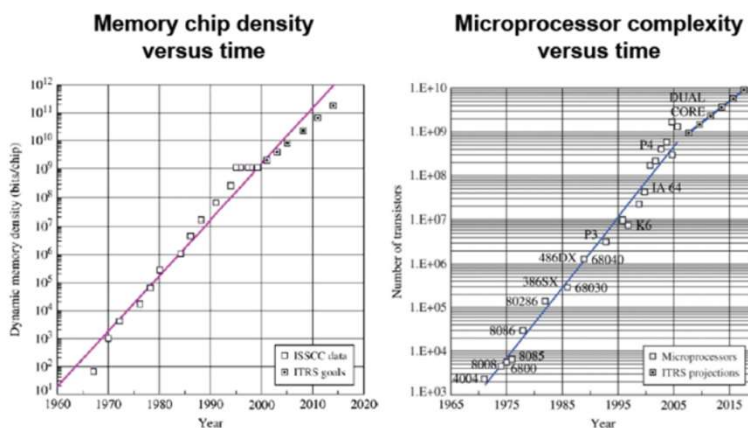
- در ابتدا فقط چند گیت یا سلول حافظه ساخته شده و با هم بسته‌بندی می‌شدند. مدارهای مجتمع اولیه را مدارهای با مقیاس کم (SSI) می‌نامیدند.
- با گذشت زمان، بسته‌بندی قطعات بیشتر و بیشتری روی همان تراشه امکان پذیر شد.
- این رشد چگالی، یکی از روندهای قابل توجه فن‌آوری است که تا به حال به ثبت رسیده است.
- این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



41

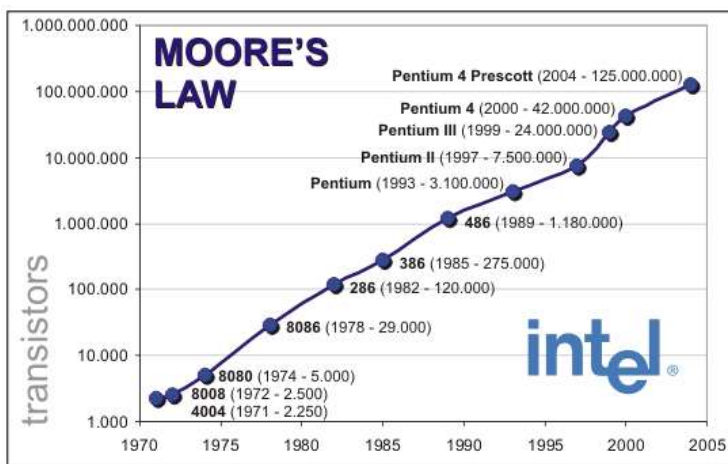
قانون مور (۱)

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



42

قانون مور (۲)



43

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.

44

دست آوردهای قانون مور (۲)

- توان مصرفی و ملزومات خنک کنندگی کاهش می یابد.
- اتصالات درون مدار مجتمع، قابل اطمینان تر از اتصالات لحیمی است. با مدارات بیشتر روی هر تراشه، اتصالات بین تراشه ها کمتر می شود.

45

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

- Steve Jobs

6/10/2021

46

برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد این درس می‌توانید به وب سایت
آموزشی در لینک زیر مراجعه نمایید

<http://shafieian-education.ir>