سمینار درس تئوری و تکنولوژی ساخت قطعات نیمه هادی

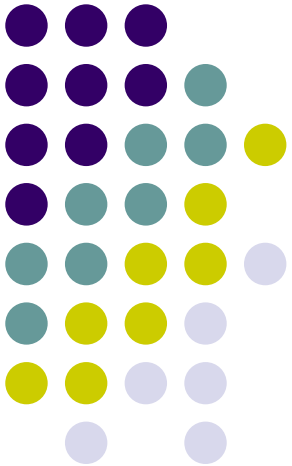
بررسی انواع روشهای لیتوگرافی

استاد مربوطه: دکتر محمد نژاد

بهار ۱۳۹۳

لیتوگرافی

- معرفی انواع روشهای لیتوگرافی
- اتاق تمیز
- تولید ماسک
- انواع رزیست
- ...

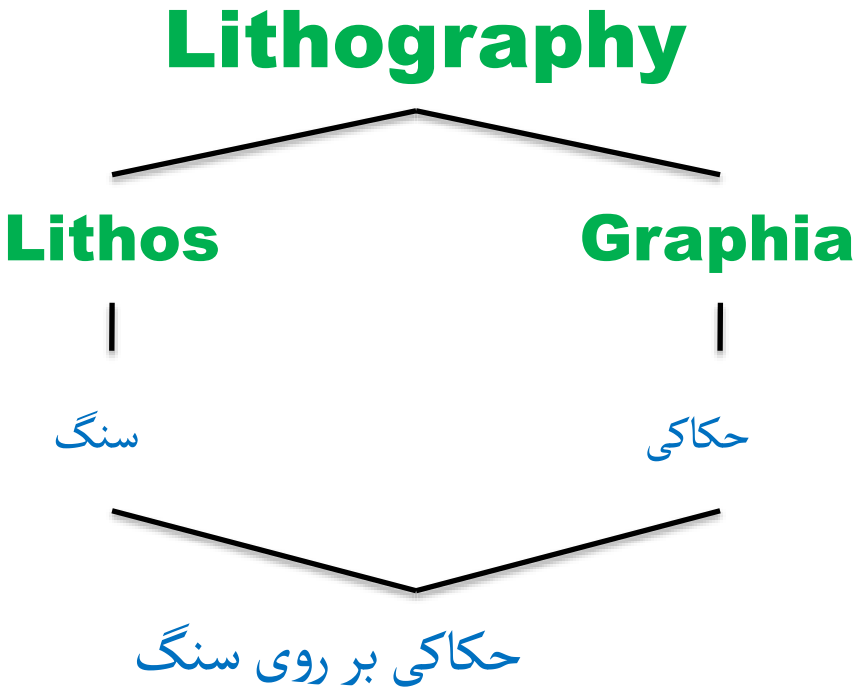


فهرست

- اساس لیتوگرافی
- روش های لیتوگرافی
- اتاق تمیز
- لیتوگرافی نوری
- ماسک
- فوتورزیست
- انتقال الگو
- لیتوگرافی الکترونی
- لیتوگرافی اشعه ایکس
- لیتوگرافی یونی
- مقایسه تکنیک های لیتوگرافی

اساس لیتوگرافی

- لیتوگرافی در لغت :



اساس لیتوگرافی

- لیتوگرافی در اصطلاح :

به فرایند انتقال الگوهای هندسی ماسک ها، بر روی لایه نازکی از ماده حساس به نور (Resist) که سطح ویفر نیمه هادی را پوشانده است، لیتوگرافی می گویند

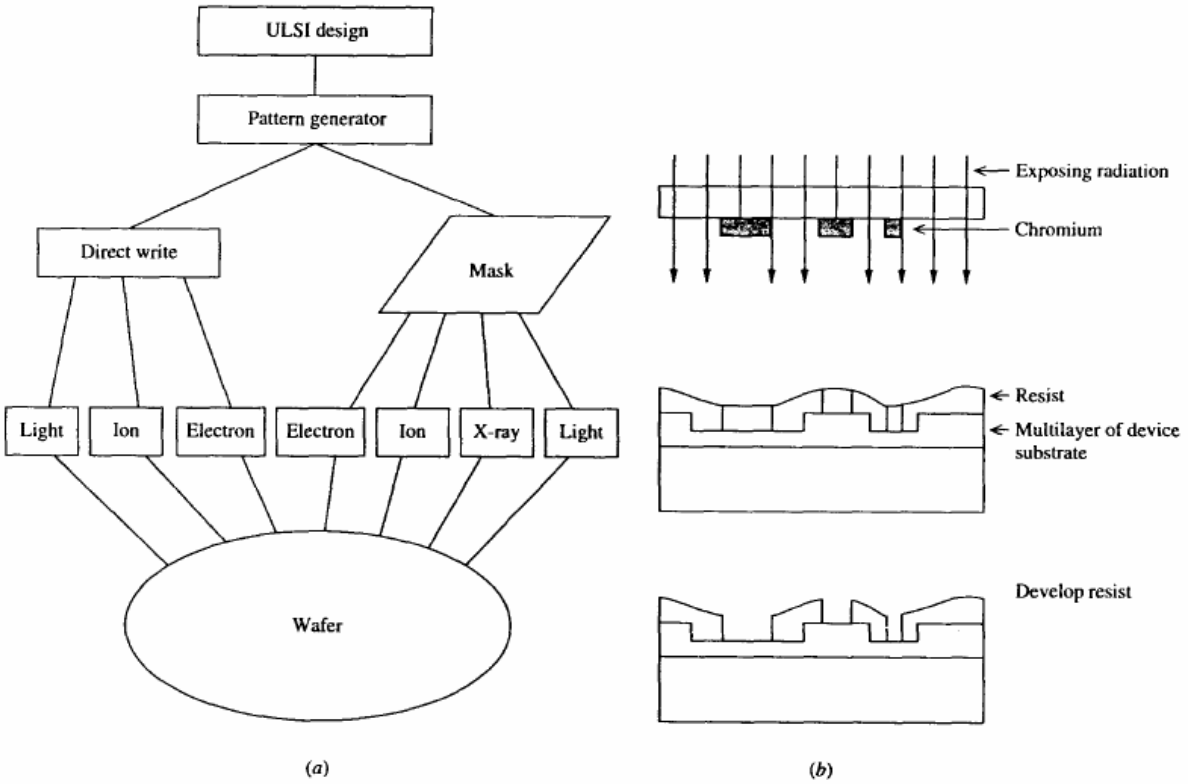
- کاربردهای لیتوگرافی :

۱- پیاده سازی الگوها بر روی فلز برای برقراری ارتباطات

۲- انتخاب ناحیه هایی که اکسید آنها باید خورده شود تا نفوذ ناخالصی در آن نواحی انجام شود

۳- ....

اساس لیتوگرافی



اساس لیتوگرافی

- عوامل تعیین کننده عملکرد لیتوگرافی

Resolution → وضوح

Registration → ثبت کردن ؟

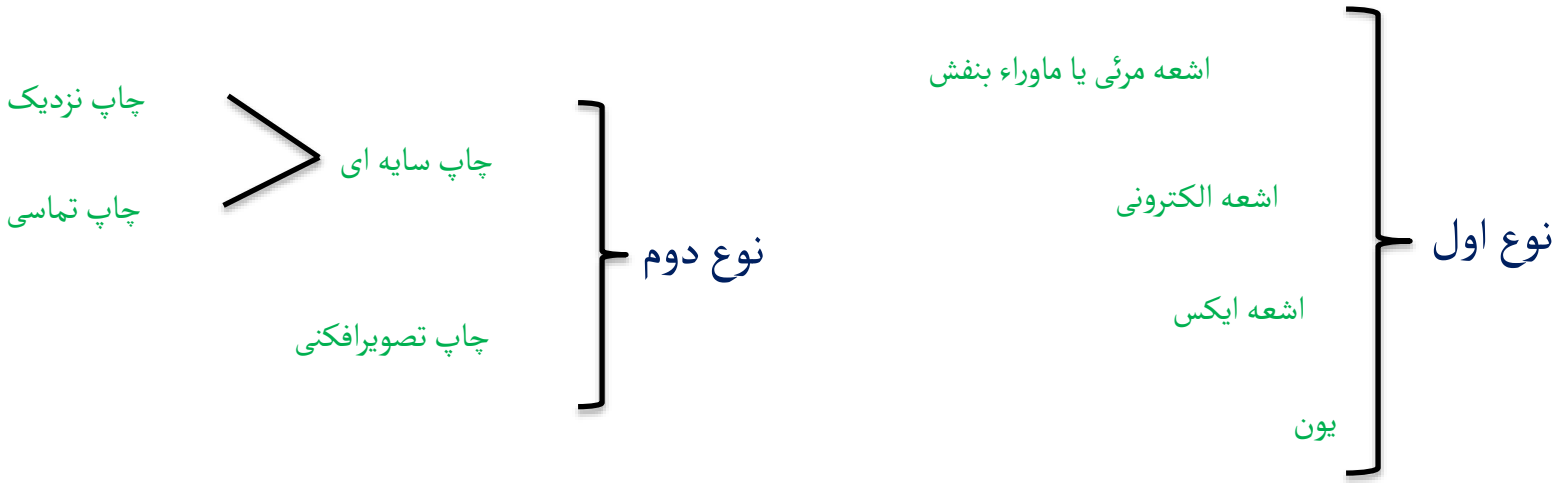
Throughput → خروجی ؟

اساس لیتوگرافی

- *Resolution*: حداقل ابعاد طرحی که می تواند با دقت بالا بر روی فیلم رزیست روی ویفر نیمه هادی منتقل شود، *Resolution* تعریف می شود.
- *Registeration*: میزان صحت الگو ها در ماسک های پی در پی که می تواند ردیف شده یا پوشیده شده باشند، نسبت به الگو های تعریف شده بر روی همان ویفر، *Registeration* تعریف می شود.
- *Throughput*:تعداد ویفر هایی که می تواند در مدت یک ساعت و برای یک ماسک داده شده، در معرض لیتوگرافی قرار بگیرند را *Throughput* می گویند که بنابراین میزانی برای راندمان لیتوگرافی می باشد.

روش های لیتوگرافی

- دو نوع تقسیم بندی برای لیتوگرافی وجود دارد :

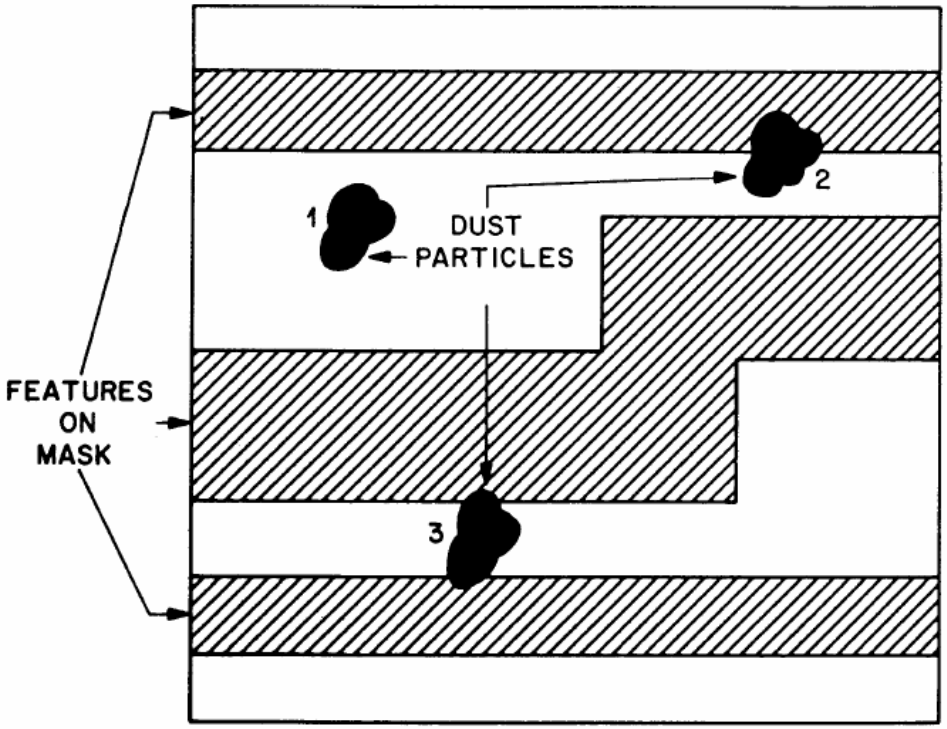


اتاق تمیز

- یکی از امکانات مورد نیاز برای ساخت مدارات مجتمع، بویژه در زمان لیتوگرافی، اتاق تمیز است.
- ذره های نشسته بر روی ویفرهای نیمه هادی و ماسک های لیتوگرافی، می تواند سبب مشکل در قطعه گردند.
- در اتاق تمیز مقدار کل ذرات بر واحد حجم، و همچنین دما، رطوبت، فشار و بسیاری عوامل دیگر، باید به شدت کنترل شود.
- یک اتاق کلاس X، معمولاً مکانی تعریف می شود که تعداد ذرات غبار X (به قطر 0.5um و یا بزرگتر) در حجم فوت مکعب داشته باشد.

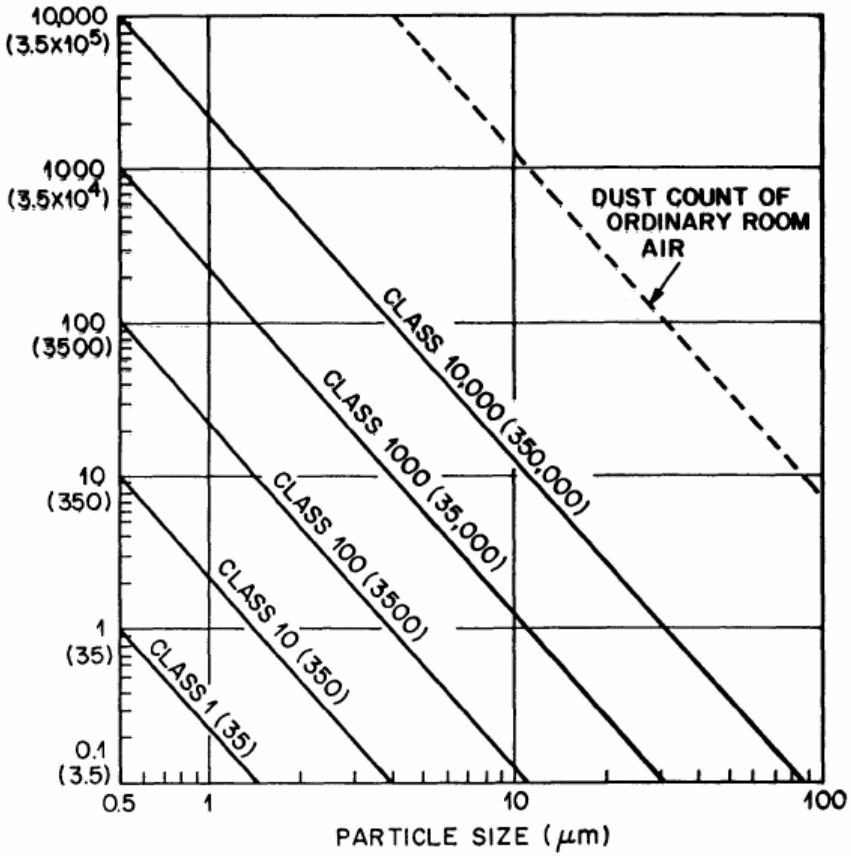
اتاق تمیز

- شکل زیر، نقش مخرب ذرات را در فرایند لیتوگرافی نشان می دهد



اتاق تمیز

- وقتی اندازه ذرات کوچکتر شوند، تعداد ذرات زیاد می شود.



لیتوگرافی نوری

- اکثریت غریب به اتفاق تجهیزات لیتوگرافی برای ساخت مدارات مجتمع، تجهیزات نوری با استفاده از نور ماورا بنفش (λ=0.2um تا λ=0.4um) یا ماورای بنفش عمیق هستند.
- دو روش پایه ای نوری وجود دارد:

  چاپ سایه ای

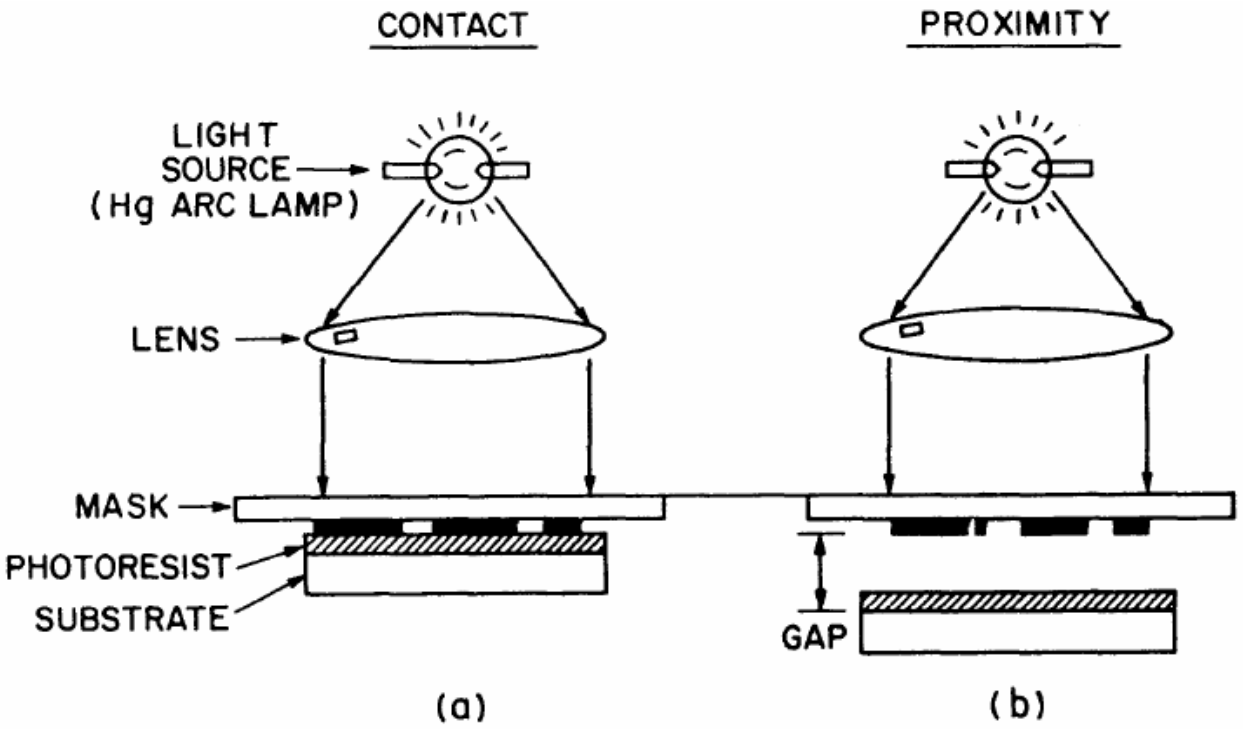
  چاپ تصویرافکنی
- چاپ سایه ای، خود به دو روش دارد:

  چاپ تماسی

  چاپ نزدیک

لیتوگرافی نوری

- در شکل زیر نمای ساده ای از دو روش چاپ سایه ای را مشاهده می کنیم.



لیتوگرافی نوری

چاپ تماسی

- در این روش یک ماسک نوری با فشاری در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۳ اتمسفر روی یک ویفر که با رزیست پوشانده شده است، فشرده می شود و تحت تابش نور با طول موج محدود ۴۰۰ نانومتر قرار می گیرد.
- با این روش می توان وضوح خوبی بدست آورد ولی به دلیل عدم یکنواختی اتصال با ویفر، وضوح در سطح، متغیر می باشد.
- یک روش برای بهبود اتصال، استفاده از یک ماسک قابل انعطاف نازک (در حدود ۰/۲ میلیمتر) می باشد.
- نشستن ذرات غبار بر روی ویفر یا لکه دار شدن ماسک به دلیل استفاده از روش تماسی موجب صدمه دائمی به ماسک و معیوب ساختن ویفر می شود.
- طرح هایی با اندازه ۰/۲۵ میکرومتر، در رزیست ۱/۸میکرومتر از جنس PMMAدر اثر تابش نور با طول موج ۲۰۰ تا ۲۶۰ نانومتر ایجاد می شوند. ماسک های مورد استفاده برای چنین طول موج هایی از جنس کوارتز یا اکسید آلمینیوم می باشند. زیرا ماسک های پروسیلیکات که متداول هستند، طول موج های زیر ۳۰۰ نانومتر را شدیدا جذب می کنند.

لیتوگرافی نوری

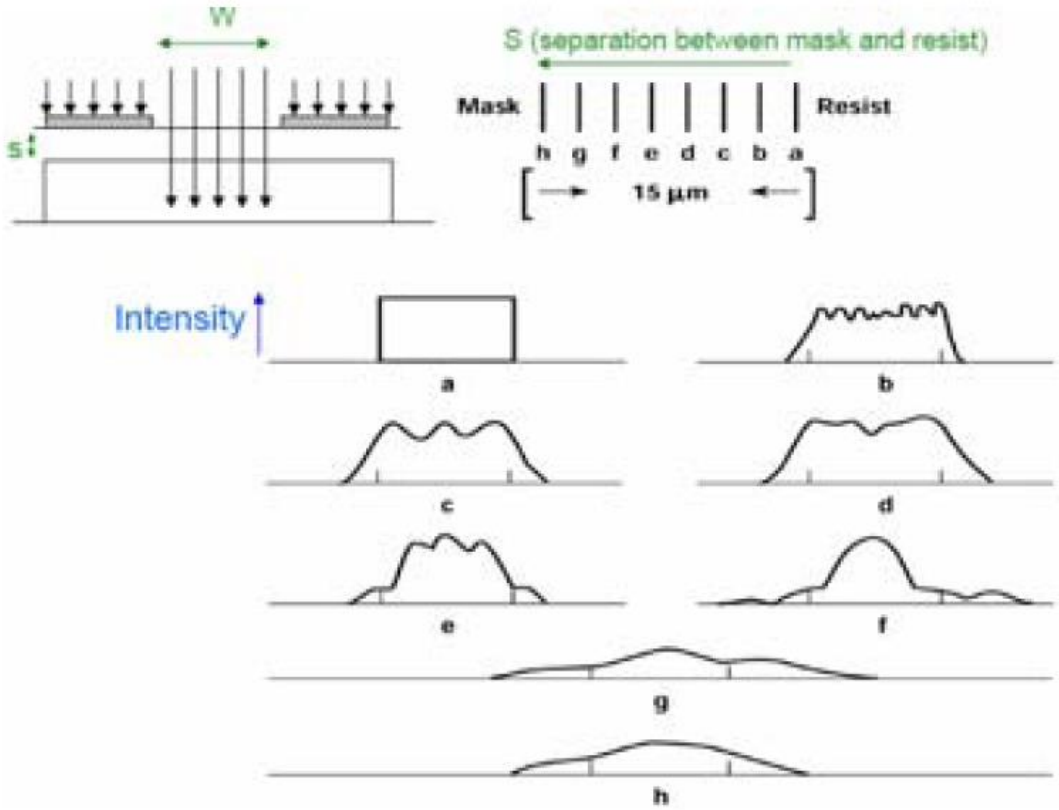
چاپ نزدیک

- مزیت این روش چاپ، عدم تماس ماسک و ویفر می باشد. به همین علت طول عمر ماسک ها در این روش بیشتر از روش قبل است.
- به طور معمول فاصله ویفر تا ماسک در حدود ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر است.
- وضوح حاصل، به خوبی روش های چاپ اتصالی و چاپ تصویر افکنی نیست. فاصله کوچک بین ماسک و ویفر (معمولا ۱۰ تا ۵۰ میکرون)، باعث ایجاد انکسار نور در لبه های شکل شده و دقت آن را محدود (بین ۲ تا ۵۰ میکرون) می کند.
- حداقل پهنای خطی که می تواند چاپ شود، l_m، در چاپ سایه از رابطه زیر بدست می آید:

$$l_m = (\lambda g)^{1/2}$$

لیتوگرافی نوری

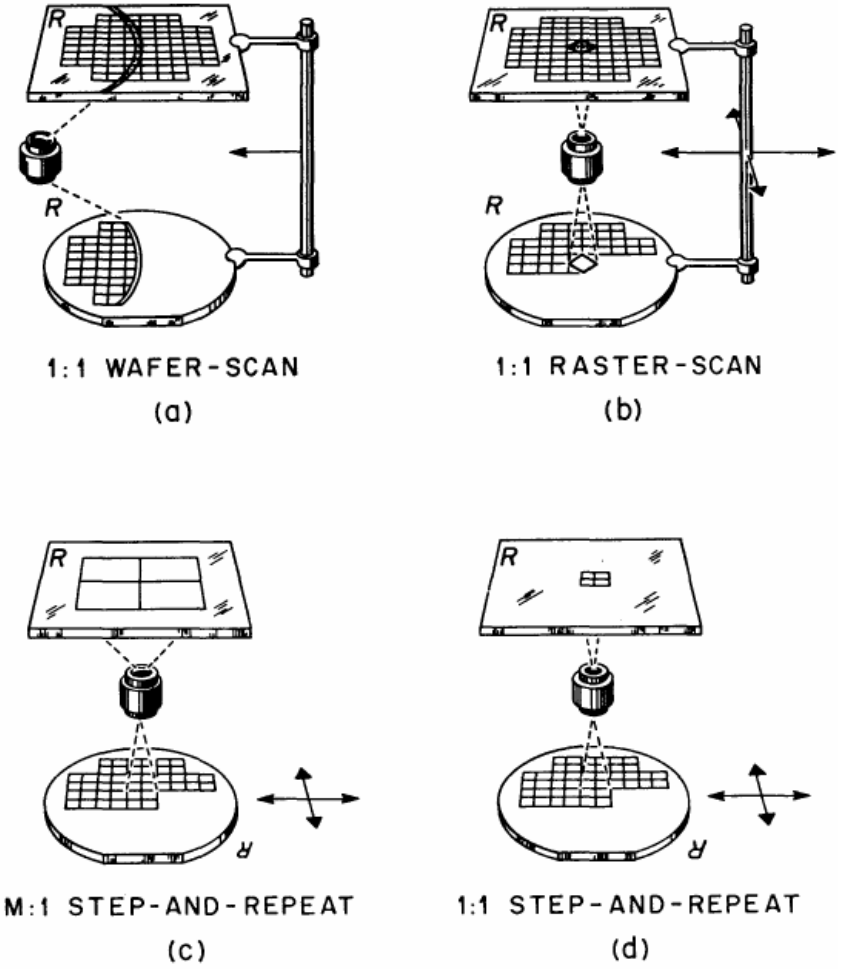
- در شکل زیر رابطه بین فاصله ماسک تا ویفر و انکسار نور در ویفر را مشاهده می کنیم:



لیتوگرافی نوری

- به منظور حل مشکلات چاپ سایه ای، ابزار چاپ تصویرافکنی گسترش یافتند تا تصویر الگوهای روی ماسک، با فاصله چندین سانتیمتری، بر روی ویفر پوشیده شده از رزیست، تصویر گردد.
- در این روش، ماسک با فاصله چند سانتیمتری از ویفر قرار می گیرد. بین ماسک و ویفر یک عدسی قرار می گیرد که تصویر ماسک را بر روی ویفر منعکس می کند.
- در این روش، می توان از نور ماوراء بنفش معمولی (طول موج کم) و یا ماوراء بنفش عمیق (طول موج بیشتر) برای وضوح بیشتر استفاده کرد.
- عمل تصویر کردن الگوهای روی ماسک بر روی ویفر به چند روش انجام می شود که در تصویر صفحه بعد نشان داده شده است.

لیتوگرافی نوری



لیتوگرافی نوری

- وضوح یک سیستم تصویرافکنی توسط رابطه زیر بدست می آید:

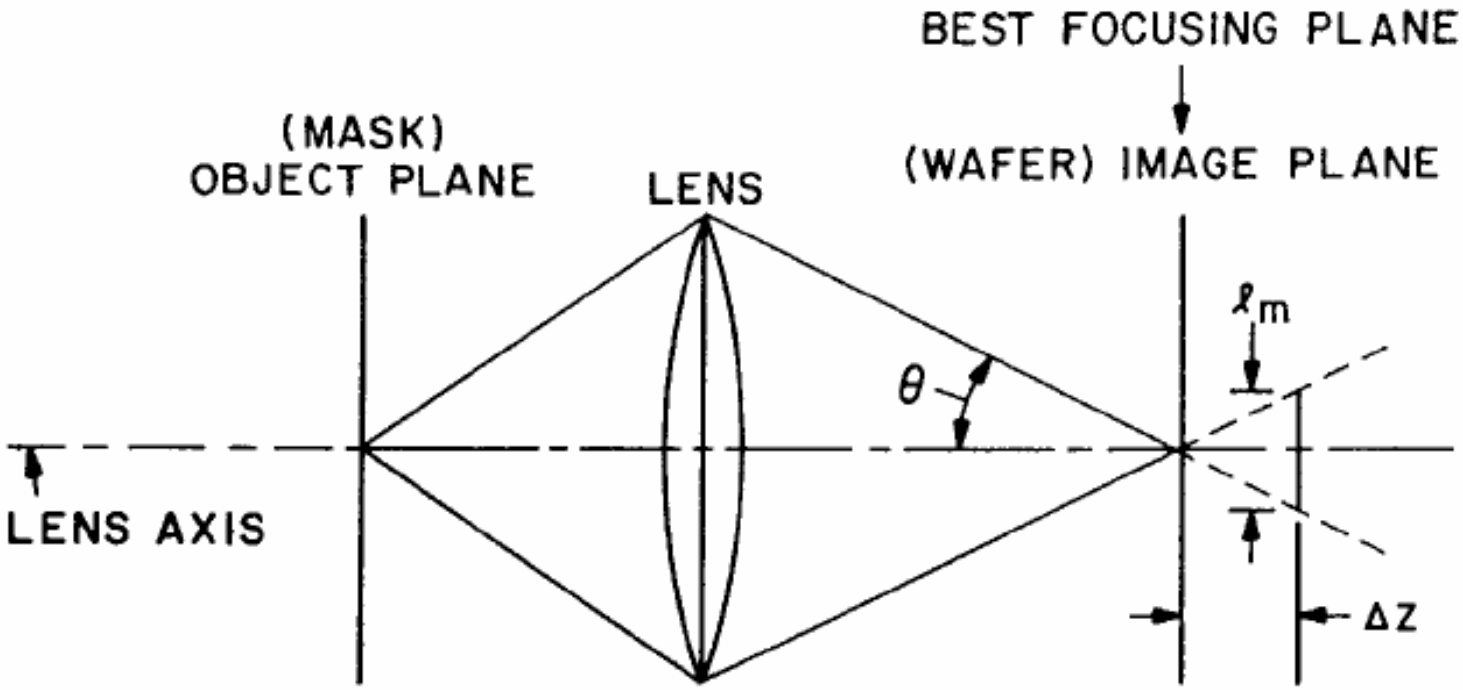
$$l_m = \lambda / NA$$
$$NA = n\sin\theta$$

- همچنین عمق فاصله کانونی، Δz، می تواند به صورت زیر بیان شود.

$$\Delta z = \pm l_m / 2\tan\theta \cong \pm l_m / 2\sin\theta = \pm n\lambda / [2(NA)^2]$$

لیتوگرافی نوری

- یک سیستم نوری ساده را در شکل زیر مشاهده می کنیم:



ماسک

- برای VLSI (>$۱۰^{۵}$ قطعه \ آی سی) و ULSI (>$۱۰^{۷}$ قطعه \ آی سی)، الگوها با استفاده از سیستمهای طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) تولید می شوند.
- خروجی CAD های دیجیتالی، یک تولیدکننده الگو قرار دارد که الگوها را به طور مستقیم بر روی ماسک های حساس به نور منتقل می کند.
- ماسک ها معمولا از شیشه پوشیده با یک ماده سخت مثل کروم یا اکسید آهن ساخته می شوند.
- تعداد نقص های ماسک ها، اثر زیادی بر روی بازدهی مدارهای مجتمع دارد.

$$\text{بازدهی مدارهای مجتمع} = \frac{\text{تعداد چیپ های سالم برروی یک ویفر}}{\text{تعداد کل چیپ های روی همان ویفر}}$$

ماسک

- به عنوان یک تقریب مرتبه اول برای بازدهی ماسک داریم:

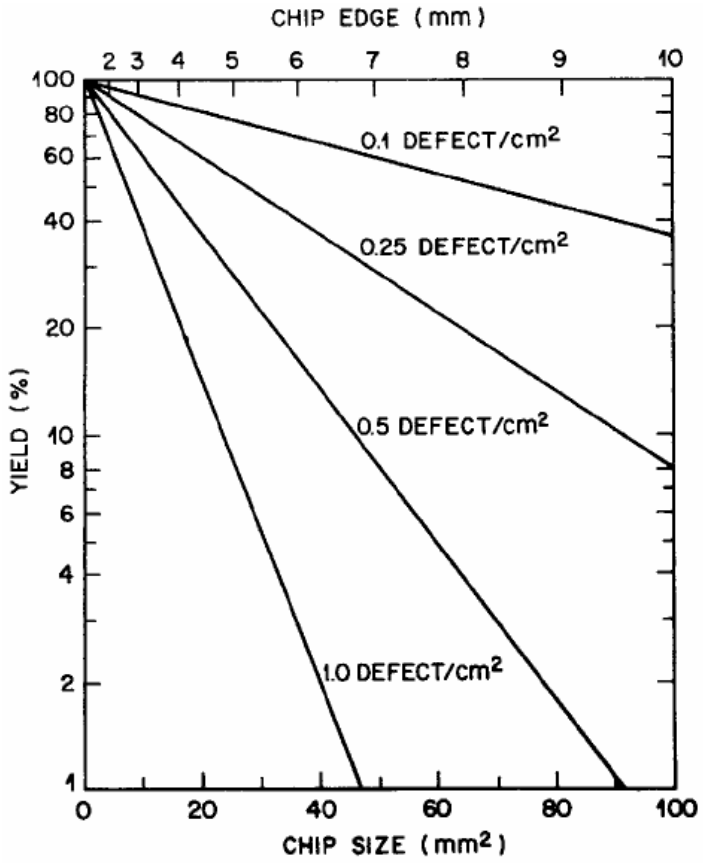
$$Y \cong \exp\{-DA\}$$

که Y بازدهی، D تعداد نقص های مخرب بر واحد سطح و A مساحت یک چیپ است. اگر D برای تمام مراحل ماسک گذاری (N)، یکسان باقی بماند، داریم:

$$Y \cong \exp\{-NDA\}$$

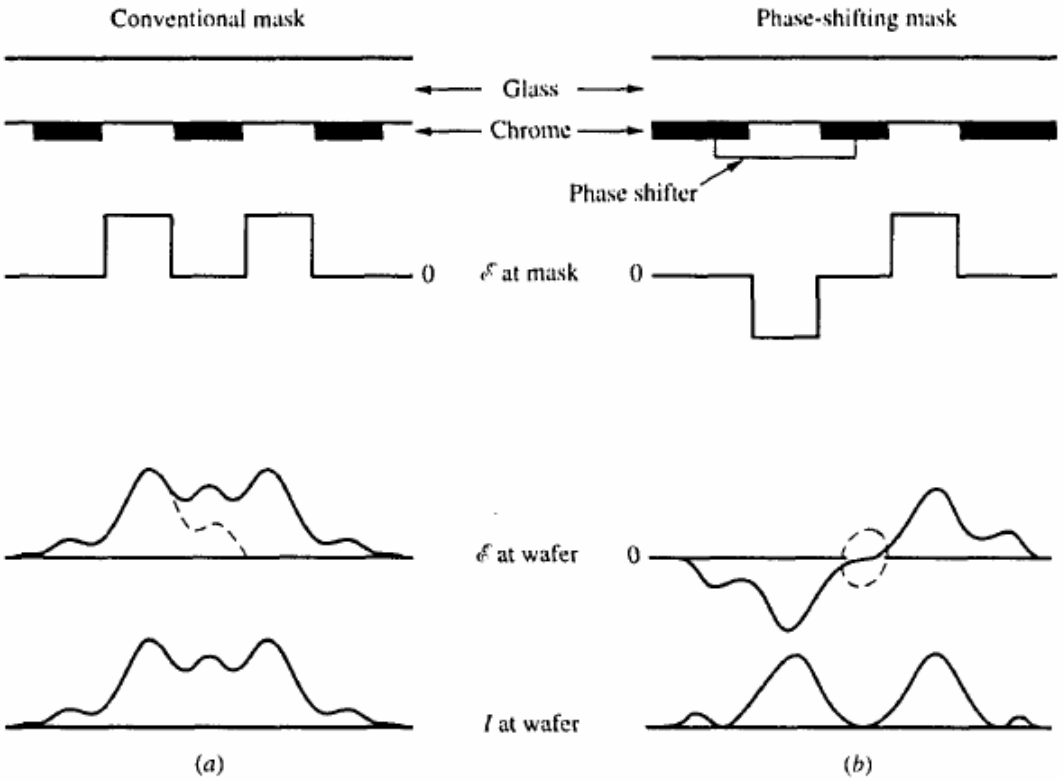
ماسک

- شکل زیر، بازده محدود یک عدد ماسک را برای یک فرایند لیتوگرافی ۱۰ مرحله ای را به صورت تابعی از اندازه چیپ برای مقادیر گوناگون چگالی نقص ها نشان می دهد.



ماسک

- **ماسک جابجایی فاز** به منظور کاهش مشکلات ناشی از طول موج یا عمق فاصله کانونی به کار می رود. مفهوم پایه ای ماسک جابجایی فاز در شکل زیر نشان داده شده است.



فوتورزیست

- فوتورزیست یک ترکیب حساس به نور است.
- فوتورزیست دارای دو نوع مثبت و منفی می باشد.
- فوتورزیست نوع مثبت، با قرار گرفتن در معرض نور، در حلال، قابل حل می شود.
- فوتورزیست نوع منفی، با قرار گرفتن در معرض نور، در برابر حلال مقاوم تر می شود.
- ترکیبات فوتورزیست مثبت: ماده حساس به نور، رزین، حلال آلی.
- ترکیبات فوتورزیست منفی: ماده حساس به نور، پلیمر.

فوتورزیست

- قبل از گذاشتن فوتورزیست مثبت در معرض نور، ترکیب حساس به نور آن، در حلال، حل نمی شود. پس از تابش، ترکیب حساس به نور در قسمت هایی از الگو که در معرض نور قرار گرفته است، انرژی را جذب می کند و ساختار شیمیایی اش تغییر می کند و تبدیل به یک ماده قابل حل می شود. پس از تکمیل فرایند، مناطقی که در معرض نور قرار گرفته بودند، حذف می شوند.

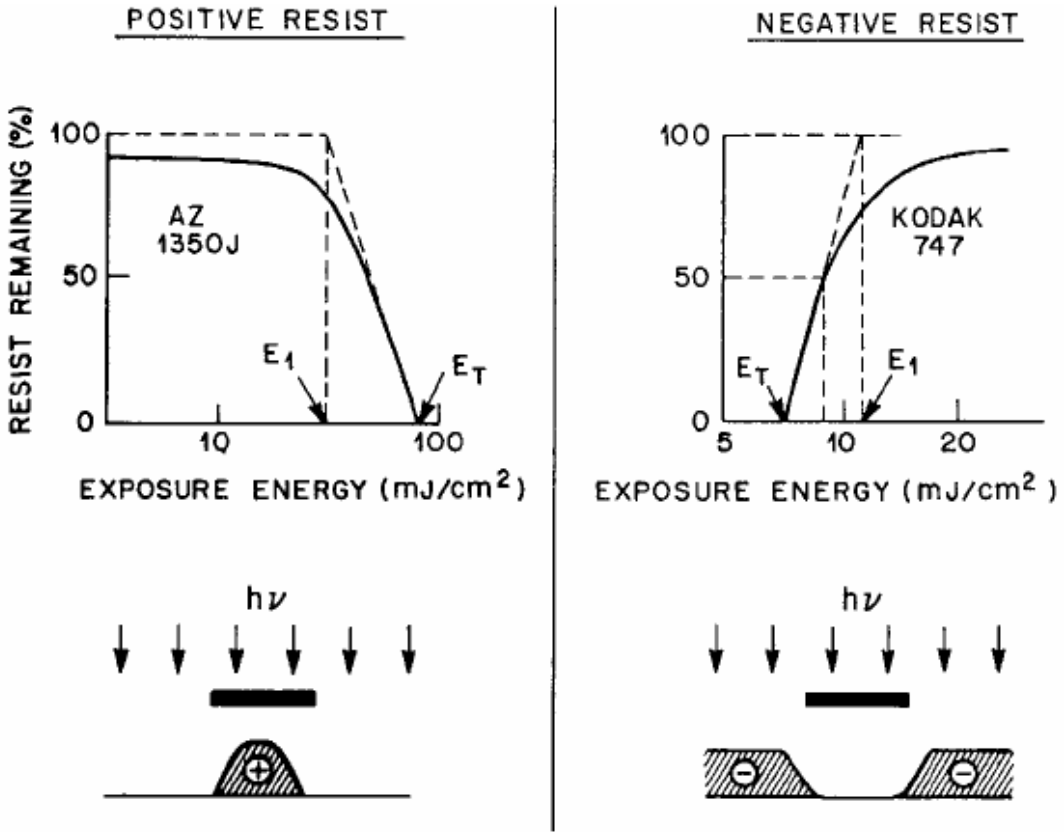
- در فوتورزیست منفی، ماده حساس به نور، انرژی تشعشعی را جذب می کند و به انرژی شیمیایی تبدیل می کند تا یک واکنش زنجیره ای آغاز شود، که در نتیجه آن ملکول های پلیمر با هم اتصال عرضی پیدا می کنند. پلیمر حاصل، جرم ملوکولی زیادی دارد و بنابراین در حلال غیر قابل حل می شود. پس از تکمیل فرایند، بخش هایی که در معرض نور قرار نگرفته اند، برداشته می شوند.

فوتورزیست

- در فوتورزیست منفی، ذرات فعال که در هنگام تابش نور ایجاد می شوند ممکن است با اکسیژن واکنش انجام داده و نتوانند ملکول های پلیمر را به هم ارتباط دهند، از این رو معمولاً این رزیست ها در محیط حاوی نیتروژن تحت تابش قرار می گیرند.
- یکی از اشکالات بزرگ فوتورزیست منفی این است که، حلال را جذب می کند و متورم می شود، بنابراین وضوح رزیست منفی محدود می باشد.
- در یک انرژی آستانه ای، E_t، رزیست به طور کامل قابل حل می شود. بنابراین E_t معادل حساسیت فوتورزیست می باشد.
- γ، نسبت کنتراست است که به صورت زیر بدست می آید. $\gamma = \left[Ln\frac{E_t}{E_1}\right]^{-1}$
- γ بزرگتر، سرعت انحلال بیشتر رزیست را با افزایش انرژی نور تابیده شده نشان می دهد.

فوتورزیست

- شکل زیر، منحنی پاسخ نوردهی معمولی را برای رزیست مثبت و منفی نشان می دهد.



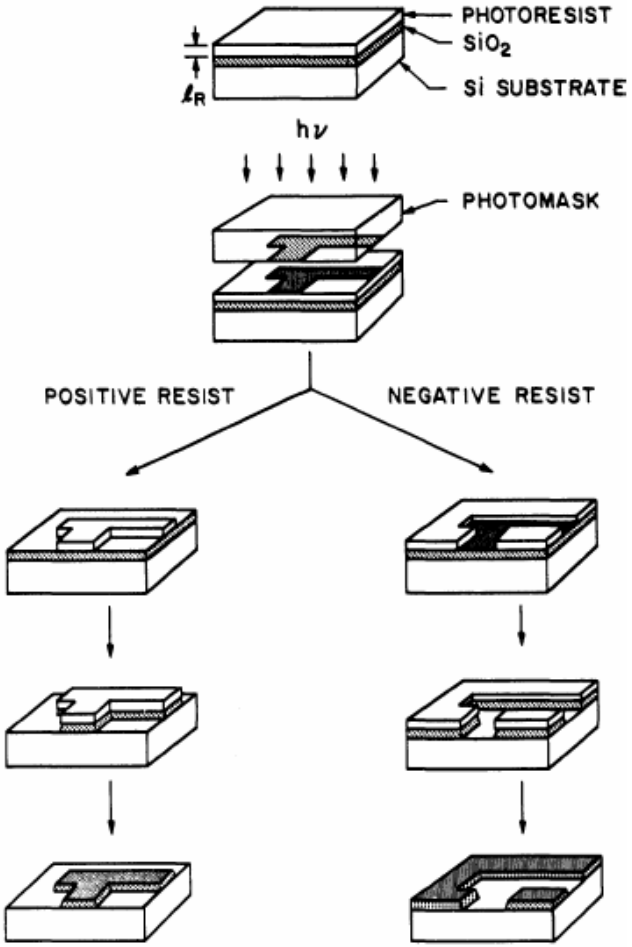
فوتورزیست

- جدول زیر هم لیست برخی از رزیست هایی که در VLSI استفاده می شود، آورده است.

Lithography	Name	Type	Sensitivity	γ
Optical	Kodak 747	Negative	9 mJ/cm^2	1.9
	AZ-1350J	Positive	90 mJ/cm^2	1.4
	PR102	Positive	140 mJ/cm^2	1.9
e-beam	COP	Negative	0.3 μC/cm^2	0.45
	GeSe	Negative	80 μC/cm^2	3.5
	PBS	Positive	1 μC/cm^2	0.35
	PMMA	Positive	50 μC/cm^2	1.0
X-ray	COP	Negative	175 mJ/cm^2	0.45
	DCOPA	Negative	10 mJ/cm^2	0.65
	PBS	Positive	95 mJ/cm^2	0.5
	PMMA	Positive	1000 mJ/cm^2	1.0

انتقال الگو

- در شکل زیر مراحل انتقال الگو از روی ماسک بر روی ویفر نشان داده شده است.



انتقال الگو

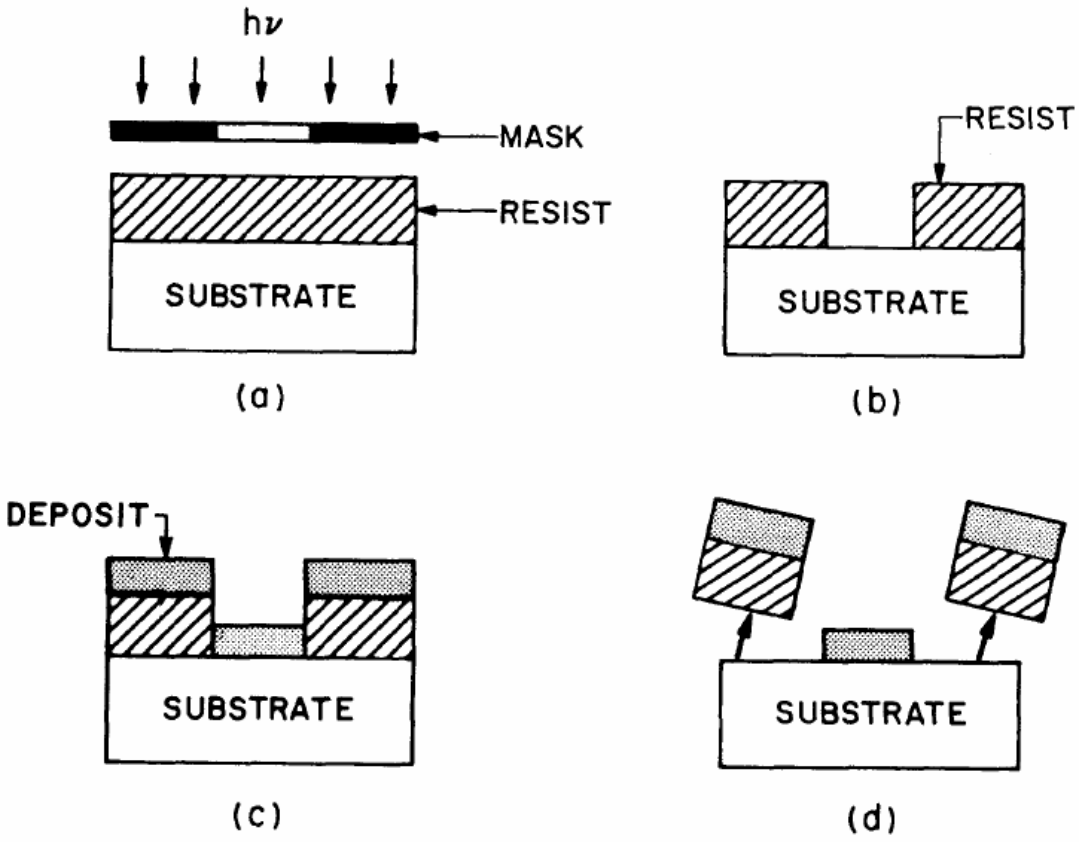
- ویفر در یک اتاق تمیز قرار می گیرد که با یک نور زرد روشن می شود. زیرا فوتورزیست به طول موج های بزرگتر از 0.5um حساس نیست.
- ویفر در یک فضای دوک مانند خلاء نگه داشته می شود.
- به طور تقریبی یک سانتی متر مکعب از مایع رزیست در مرکز ویفر قرار داده می شود و سپس ویفر برای مدت حدود ۳۰ ثانیه می چرخد.
- ضخامت حاصل فیلم رزیست، 1_R، به طور مستقیم با گرانروی ماده رزیست و به طور معکوس با سرعت چرخش رابطه دارد.
- برای سرعت چرخش در رنج ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ RPM، ضخامتی در حدود ۰/۵ تا ۱ میکرون می تواند بدست آید.
- سپس ویفر قبل از قرار گرفتن در معرض نور، برای زدودن حلال ها و اصلاح چسبندگی ها پخته می شود (۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد).

انتقال الگو

- قبل از تابش UV و یا UV عمیق در سیستم لیتوگرافی نوری، ویفر نسبت به ماسک هم تراز می گردد.
- برای رزیست مثبت، بخش هایی که در معرض نور قرار گرفته در حلال، قابل حل می شوند. سپس ویفر شسته شده، خشک شده، و در محیط بسته ای قرار می گیرد تا لایه عایق در معرض نور قرار گرفته، جدا شود، اما به رزیست آسیبی نمی رساند. سرانجام رزیست برداشته شده و تصویر (الگو) عایق زیر آن می ماند که همان تصویر قسمت های تیره روی ماسک است. برای فوتورزسیت منفی، قسمت هایی که نور خورده، غیر قابل حل می شود و سرانجام الگوی عایق، معکوس تصویر قسمت های تیره روی ماسک می باشد.
- تصویر عایق، می تواند به عنوان ماسک مراحل بعد به کار رود. برای مثال در قسمت های انتخاب شده، می توان عمل Dope را توسط کاشت یون انجام داد.

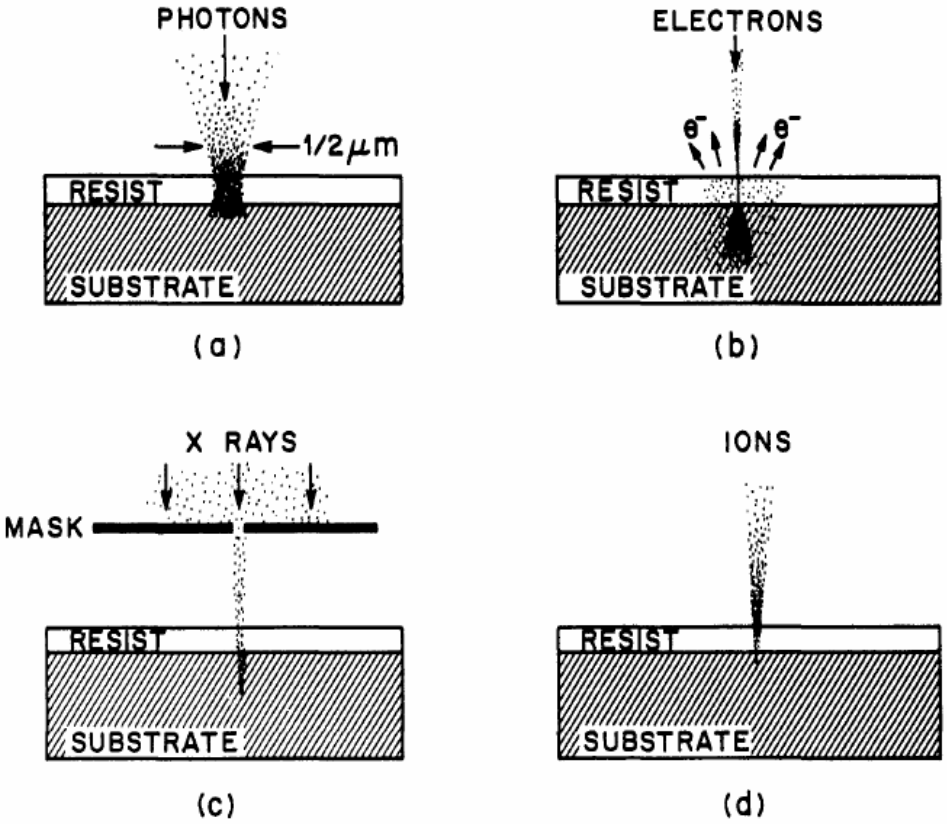
انتقال الگو

- شکل زیر تکنیک lift-off را نشان می دهد.



لیتوگرافی الکترونی

- اگرچه لیتوگرافی به روش نوری عمومی ترین روش لیتوگرافی می باشد، با این حال تکنیک های لیتوگرافی دیگری وجود دارد که در شکل زیر نشان داده شده است.



لیتوگرافی الکترونی

- لیتوگرافی الکترونی به خاطر طول موج کوچک الکترون، وضوح بالایی را ارائه می دهد (کوچکتر ۰/۱ نانومتر در ۱۰ تا ۵۰ کیلوالکترون ولت).
- وضوح سیستم لیتوگرافی الکترونی توسط انکسار محدود نمی شود، اما به وسیله پراکندگی الکترون در رزیست (شکل صفحه بعد) و با انحرافات مختلف اپتیک الکترونی محدود می شود.
- مزایای لیتوگرافی الکترونی:

۱) تولید اشکال هندسی میکرون و زیر میکرون

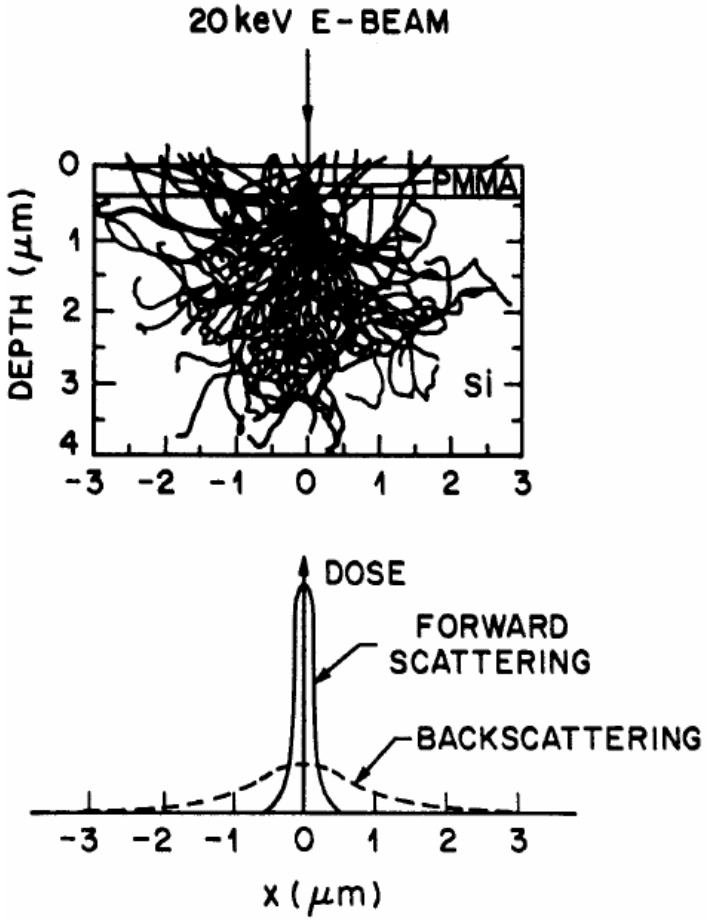
۲) عملکرد خودکار خوب و عملکرد کنترل شده با دقت بالا

۳) عمق فاصله کانونی زیاد

۴) الگونشانی مستقیم بدون ماسک

لیتوگرافی الکترونی

- در شکل زیر پراکندگی الکترون در زیرلایه را مشاهده می کنیم:



لیتوگرافی الکترونی

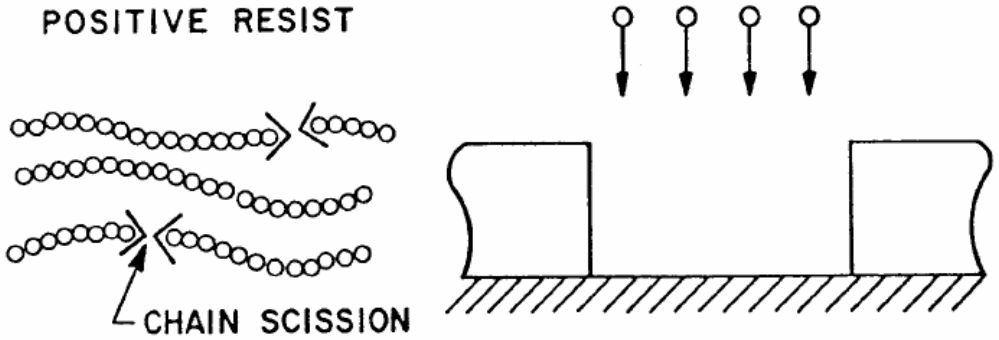
- بزرگترین عیب لیتوگرافی الکترونی بازده پایین آن است (نزدیک به ۵ ویفر بر ساعت در وضوح کمتر از ۰/۱ میکرون). بنابراین لیتوگرافی الکترونی عمدتاً در تولید ماسک های نوری استفاده می شود و در وضعیت هایی که تعداد کمی از مدارهای مرسوم مورد نیاز است.
- دو راه اصلی برای جاروب کردن پرتو الکترونی وجود دارد. جاروب محل تصویر و جاروب برداری
- در روش جاروب محل تصویر، الگوها توسط پرتو الکترونی حک می شوند که در این حالت پرتو الکترونی با یک الگوی منظم جابه جا می شود. پرتو به صورت متوالی بر روی کل ناحیه جاروب می شود و مکان هایی که نیاز به تابش ندارد را هم پوشش می دهد.
- برعکس در روش جاروب برداری، پرتو الکترونی فقط به طرح های مورد نیاز الگو هدایت شده و از طرحی به طرح دیگر حرکت می کند.
- بنابراین در سیستم جاروب برداری، زمان کمتری احتیاج است.

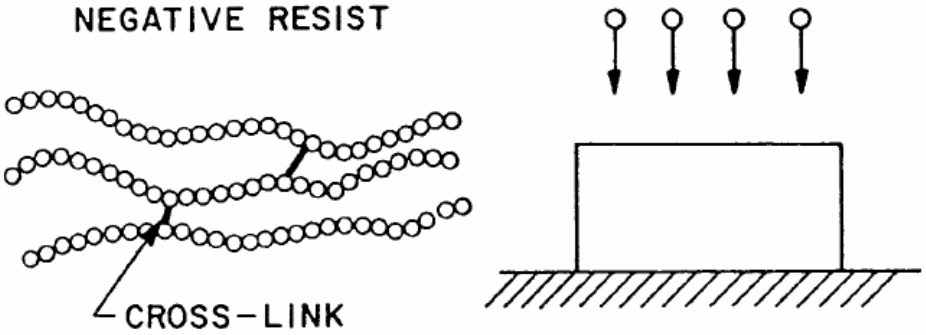
لیتوگرافی الکترونی

- رزیست های لیتوگرافی الکترونی از جنس پلیمر هستند.
- برای یک رزیست الکترونی مثبت، فعل و انفعال الکترون های پلیمر باعث بریدگی زنجیره شده و در نتیجه باندهای شیمیایی شکسته می شوند.
- مناطقی که تحت تابش پرتو الکترونی قرار گرفته اند، در حلال، که به مواد با وزن ملکولی کم حمله می کنند، حل می شوند.
- رزیست های الکترونی مثبت متداول، پالی (متیل متاکریلات) ، به اختصار PMMA و پالی (بوتن۱ سولفون)، به اختصار PBS هستند.
- رزیست های الکترونی مثبت معمولا دارای وضوح ۰/۱ میکرومتر یا بهتر هستند.
- زمانی که الکترون ها به یک رزیست الکترونی منفی اصابت می کنند، پیوند های پلیمر اتصال عرضی پیدا می کنند.
- پالی (glycidyl methacrylate-co-ethyl-acrylate)، به اختصار COP، متداول ترین رزیست الکترونی منفی به شمار می آید.
- شبیه یک فوتورزیست منفی، COP در طی فرایند توسعه برجسته می ماند و وضوح آن در حدود ۱ میکرون محدود می شود.

لیتوگرافی الکترونی

- در شکل زیر، ایجاد اتصال عرضی و شکسته شدن پیوندها را با تابش الکترون به زیرلایه برای رزیست های منفی و مثبت مشاهده می کنیم:





لیتوگرافی اشعه ایکس

- لیتوگرافی اشعه ایکس به روش چاپ نزدیک انجام می شود.
- طول موج اشعه ایکس (۰/۴ تا ۵ نانومتر) بسیار کمتر از نور ماورای بنفش (۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر) است. بنابراین اثرات پراکندگی کاهش یافته و می توانیم به وضوح بالاتر دست یابیم.
- لیتوگرافی اشعه ایکس بازده بیشتری نسبت به لیتوگرافی پرتو الکترونی دارد زیرا در این روش توانایی در معرض قراردادن به صورت موازی وجود دارد.
- با این حال با احتساب محدودیت اندازه منبع اشعه ایکس و محدودیت ناشی از فاصله ماسک تا ویفر، یک اثر سایه-روشن بوجود می آید که وضوح را در لبه های شکل کاهش می دهد.
- تیرگی سایه-روشن، δ، در لبه رزیست تصویر به صورت زیر بدست می آید.

$$\delta = ag/L$$

در این رابطه a قطر دایره منبع اشعه ایکس، g فاصله شکاف (فاصله ماسک تا ویفر) و L فاصله منبع تا ماسک اشعه ایکس است.

لیتوگرافی اشعه ایکس

- تصویر افکنده شده ماسک، به صورت افقی به اندازه d جابجا می شود، که به آن محوطه دید گفته می شود.

$$d=rg/L$$

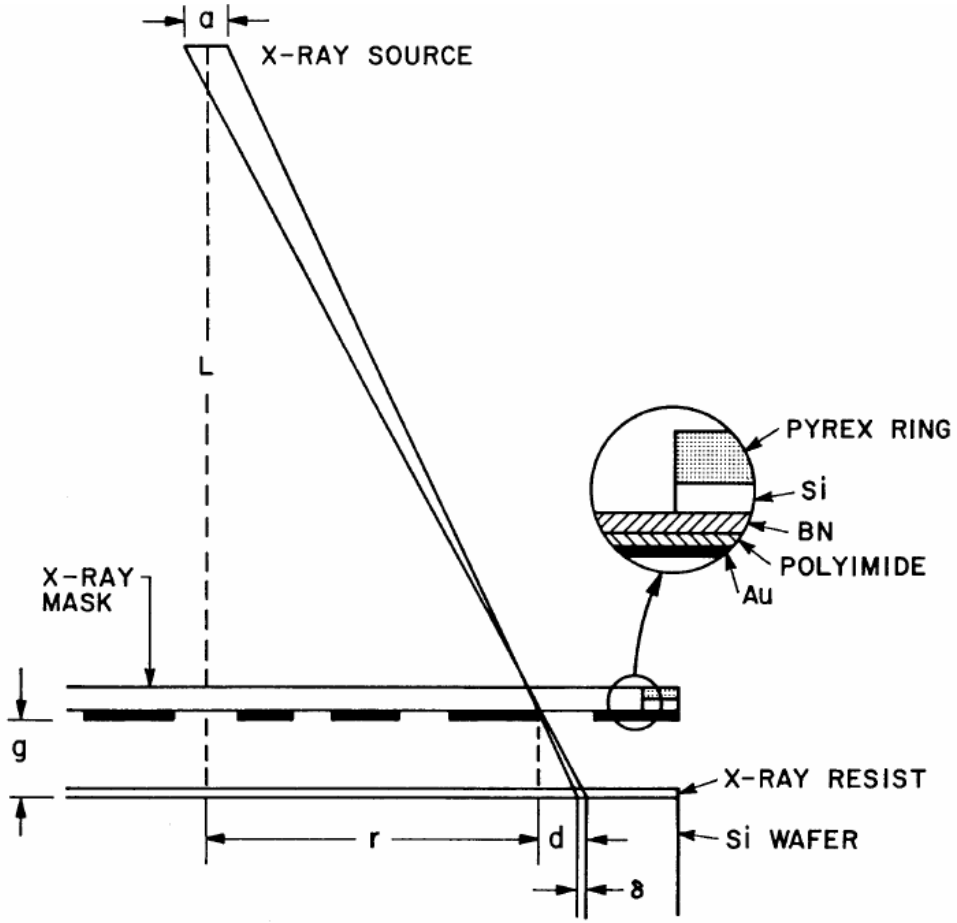
r فاصله شعاعی از مرکز ویفر است.

این خطای محوطه دید باید در طی فایند ساخت ماسک جبران شود.

- رزیست های پرتو الکترونی می توانند در لیتوگرافی اشعه ایکس استفاده شوند، زیرا زمانی که یک فوتون اشعه ایکس به نمونه مورد نظر پرتاب می شود، نتیجه آن صدور الکترون است. یکی از بهترین رزیست های اشعه ایکس، DCOPA (dichloropropyl acrylate and glycidyl methacrylate-co-ethyl acrylate) است که نسبتاً دارای مقدار آستانه کمی است ($\sim 10mJ/cm^2$).

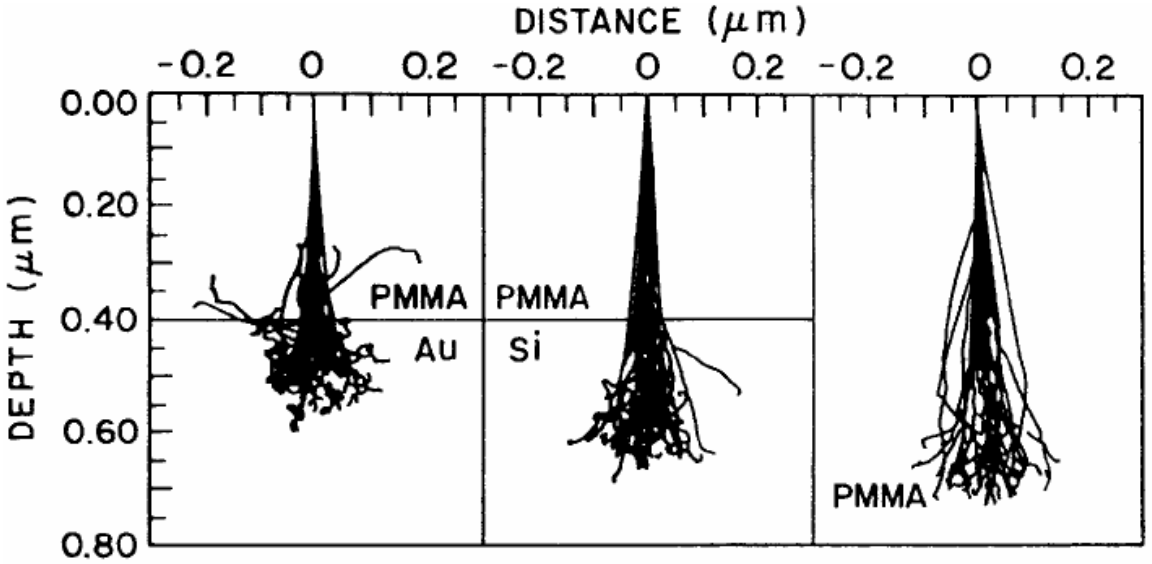
لیتوگرافی اشعه ایکس

- اثرات هندسی در لیتوگرافی اشعه ایکس همراه با ساختار ماسک اشعه ایکس



لیتوگرافی یونی

- لیتوگرافی یونی می تواند به وضوحی بالاتر از تکنیک های لیتوگرافی نوری، اشعه ایکس، یا پرتو الکترونی دست یابد، زیرا یون ها متحمل هیچگونه انکسار نمی شوند و پراکندگی بسیار کمتری نسبت به الکترون ها دارند. همانطور که نشان داده شده است، پراکندگی پرتو یونی در عمق 0.4um فقط 0.1um است.

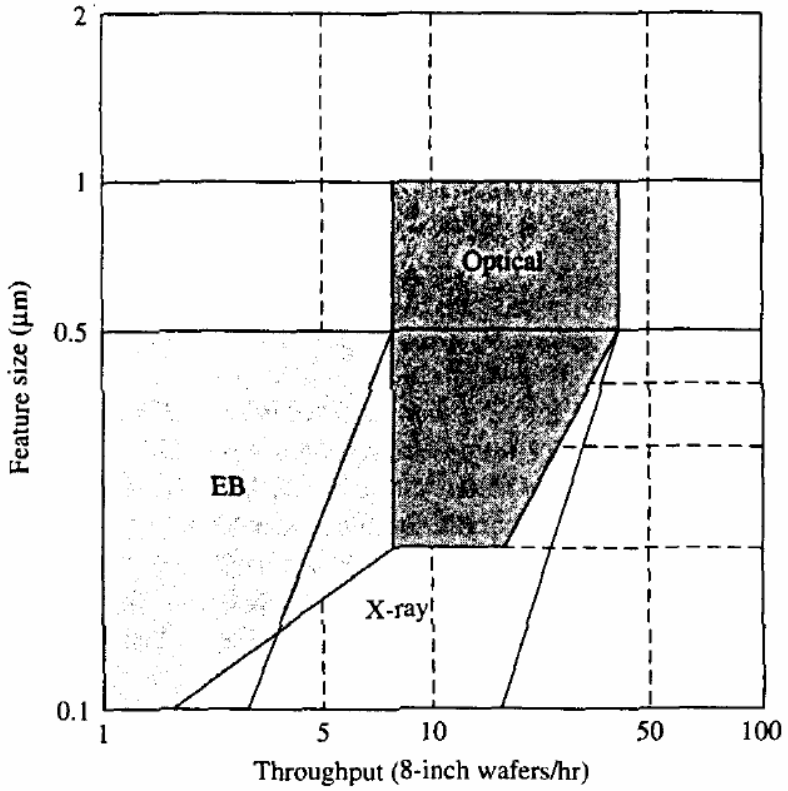


لیتوگرافی یونی

- رزیست ها به یون ها حساس ترند تا به الکترون ها.
- اما یک پرتو یونی معمولا بزرگتر از یک پرتو الکترونی است و بنابراین بر روی وضوح تاثیر مخالف دارد.
- مهمترین کاربرد لیتوگرافی یونی در اصلاح ماسک ها برای لیتوگرافی های نوری و اشعه ایکس است.

مقایسه تکنیک های لیتوگرافی

- لیتوگرافی نوری، جریان اصلی تکنولوژی است و می تواند توسط بعضی از رزیست هایی که به صورت تجاری در دسترس هستند، پاسخگوی دقت هایی در حد 0.1um یا کمتر باشد. ولی عموما استفاده از لیتوگرافی نوری برای طراحی های با دقت کمتر از 0.1um، به خاطر محدودیت در وضوح، مشکل است.
- برای ساختارهای کوچکتر از زیر میکرومتر، دو انتخاب چاپ مستقیم با پرتو الکترونی یا لیتوگرافی اشعه ایکس باقی می ماند. ولی به هرحال ساخت ماسک اشعه ایکس خوب، مشکل است و راندمان لیتوگرافی الکترونی پایین می باشد.
- بازده با معکوس مربع طول minimum feature متناسب است یعنی $\propto l_m^{-2}$

مقایسه تکنیک های لیتوگرافی

- شکل زیر تخمینی از وضوح بدست آمده توسط تکنیک های مختلف لیتوگرافی را نشان می دهد. خطوط مرزی هر تکنولوژی کاملا تیره شده است.