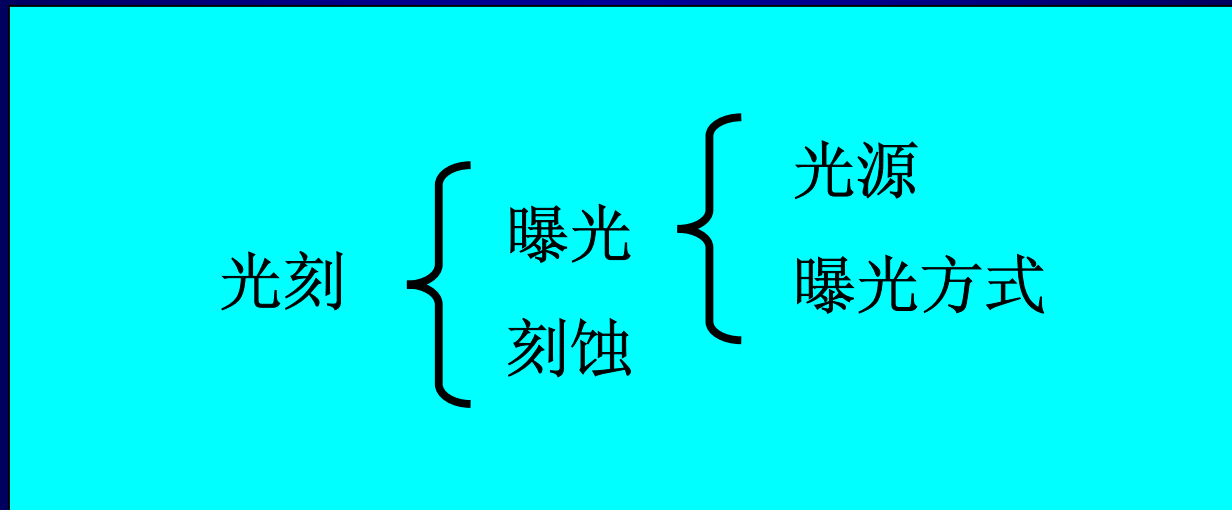


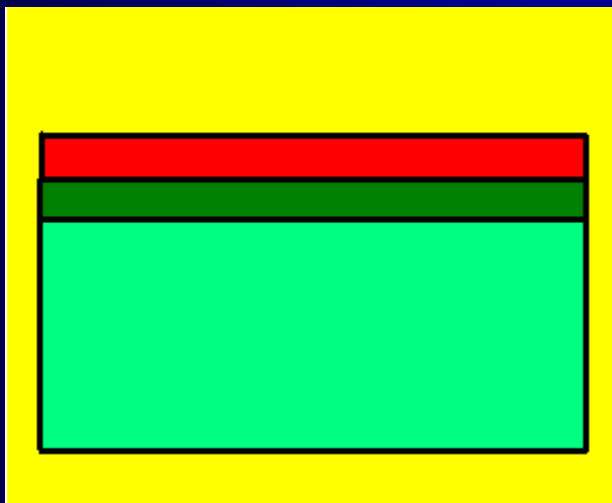
第7章 光学光刻

7.1 光刻概述

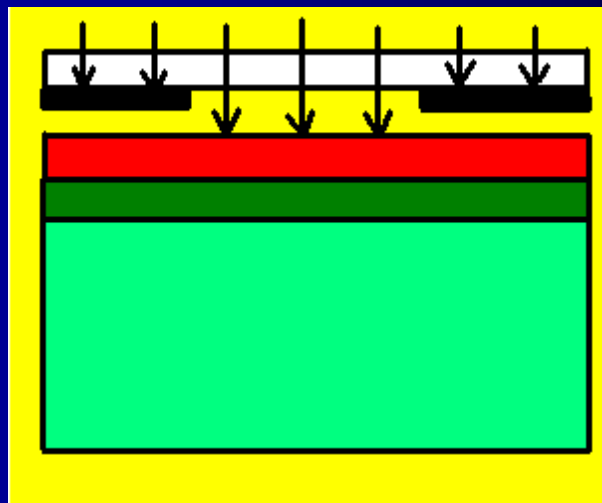


评价光刻工艺可用三项主要的标准：分辨率、对准精度和
生产效率。

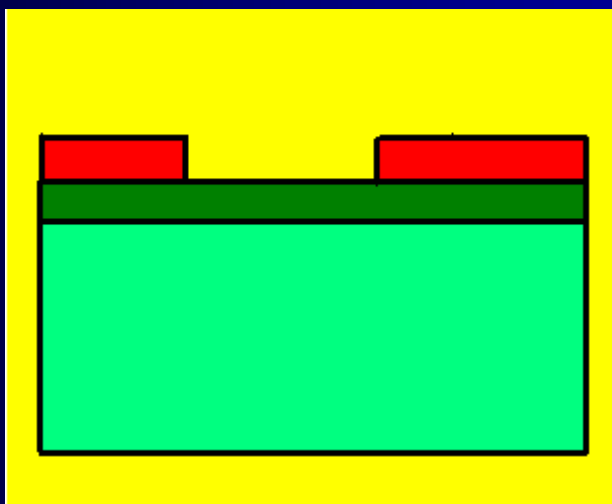
光刻工艺流程



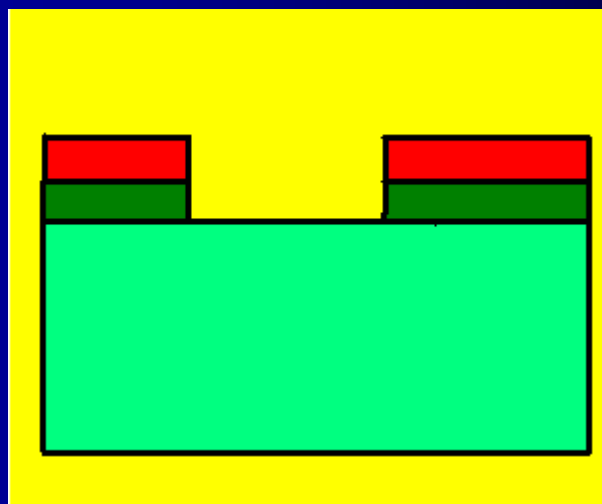
涂光刻胶（正）



选择曝光



显影（第1次图形转移）



刻蚀（第2次图形转移）

光源

紫外光 (UV) { g 线: 436 nm
i 线: 365 nm

深紫外光 (DUV) { KrF 准分子激光: 248 nm
ArF 准分子激光: 193 nm

极紫外光 (EUV), 10 ~ 15 nm

X 射线, 0.2 ~ 4 nm

电子束

离子束

曝光方式

有掩模方式

接触式

非接触式

接近式

投影式

反射

折射

全场投影

步进投影

扫描步进投影

无掩模方式

(聚焦扫描方式)

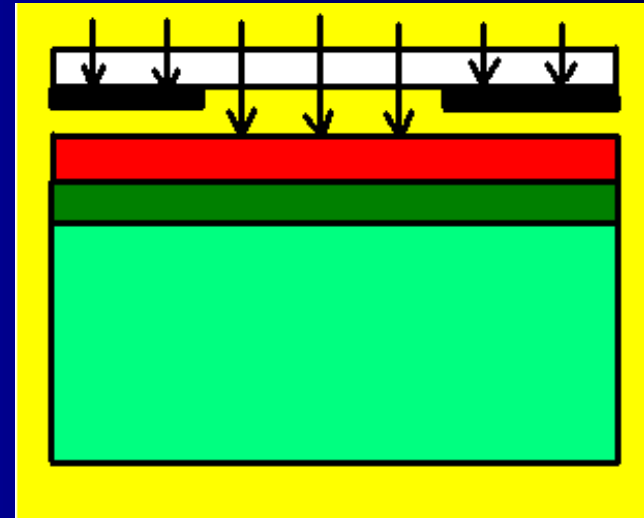
矢量扫描

光栅扫描

混合扫描

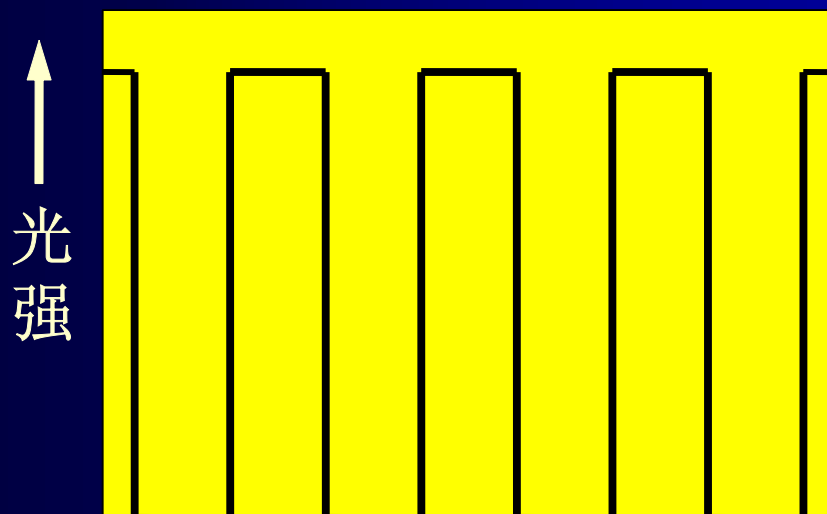
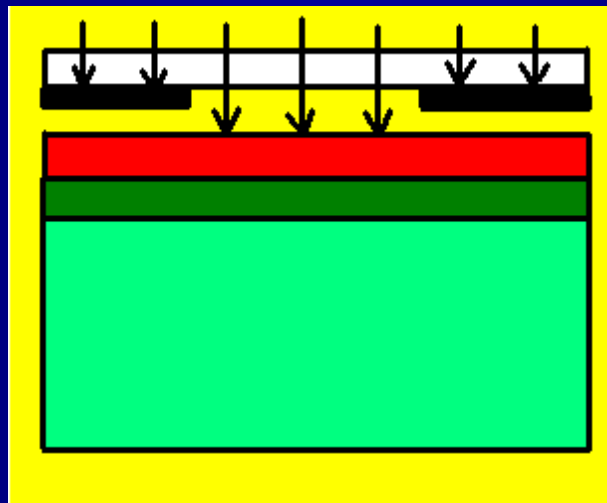
7.2 衍射

当一个光学系统中的所有尺寸，如光源、反射器、透镜、掩模版上的特征尺寸等，都远大于曝光波长时，可以将光作为在光学元件间直线运动的粒子来处理。



但是当掩模版上的特征尺寸接近曝光波长时，就应该把光的传输作为电磁波来处理，必须考虑衍射和干涉。由于衍射的作用，掩模版透光区下方的光强减弱，非透光区下方的光强增加，从而影响光刻的分辩率。

7.3 调制传输函数和光学曝光



无衍射效应

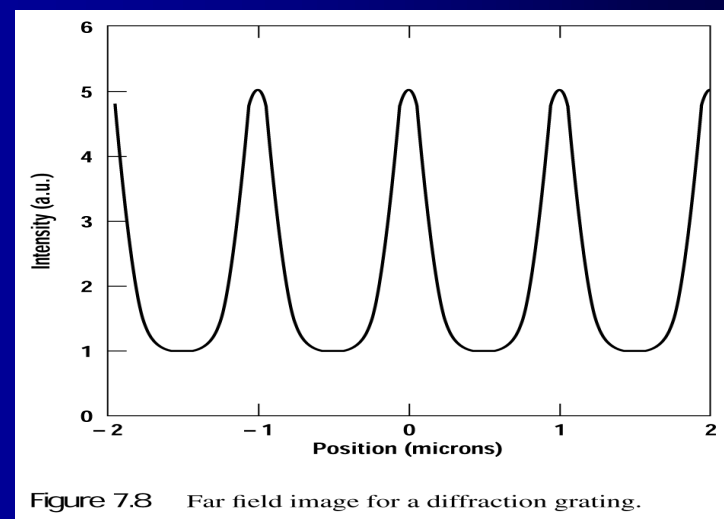


Figure 7.8 Far field image for a diffraction grating.

有衍射效应

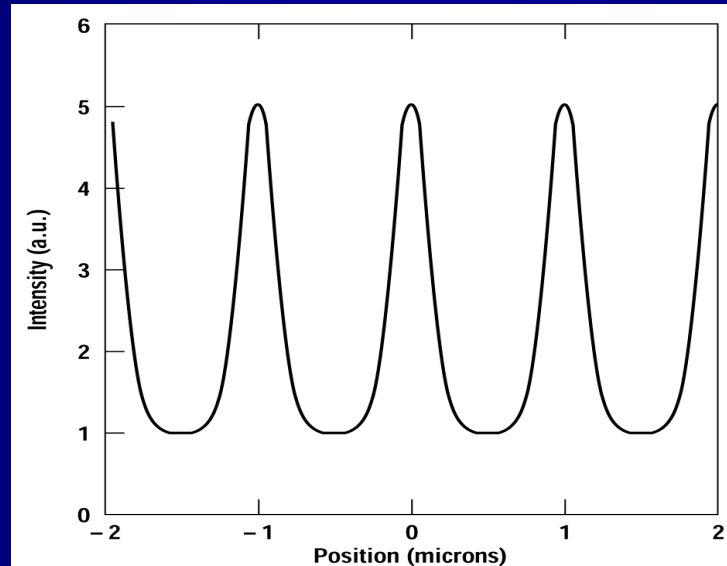


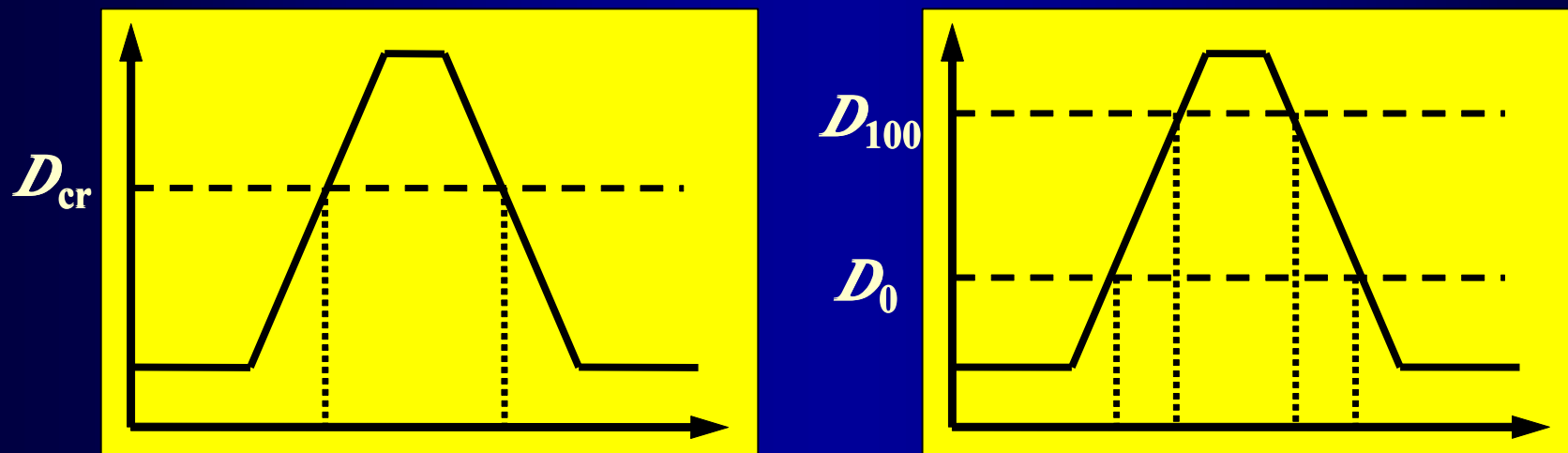
Figure 7.8 Far field image for a diffraction grating.

定义图形的调制传输函数 **MTF** 为

$$\text{MTF} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

当无衍射效应时，**MTF = 1**；当有衍射效应时，**MTF < 1**。
光栅的周期（或图形的尺寸）越小，则 **MTF** 越小；光的波长越短，则 **MTF** 越大。

图形的分辨率还要受光刻胶对光强的响应特性的影响。



对于理想的光刻胶，当光强不到临界光强 D_{cr} 时完全不发生反应，当光强超过 D_{cr} 时完全反应，衍射只造成线宽和间距的少量变化。但在实际光刻胶中，当光强不到 D_0 时不发生反应，当光强介于 D_0 和 D_{100} 之间时发生部分反应，当光强超过 D_{100} 时才完全反应，使线条边缘出现模糊区。在通常的光刻胶中，当 $MTF < 0.5$ 时，图形不再能被复制。

7.4 光源系统

对光源系统的要求

- 1、有适当的波长。波长越短，可曝光的特征尺寸就越小；
- 2、有足够的能量。能量越大，曝光时间就越短；
- 3、曝光能量必须均匀地分布在曝光区。

常用的**紫外光**光源是高压弧光灯（高压汞灯），高压汞灯有许多尖锐的光谱线，经过滤光后使用其中的**g线（436 nm）**或**i线（365 nm）**。

由于衍射效应是光学曝光技术中限制分辨率的主要因素，所以要提高分辨率就应使用波长更短的光源如**深紫外光**。实际使用的深紫外光有**KrF 准分子激光（248 nm）**、**ArF 准分子激光（193 nm）**和**F₂ 准分子激光（157 nm）**等。

深紫外光的曝光方式与紫外光基本相同，但需注意两点，

1、光刻胶

2、掩模与透镜材料

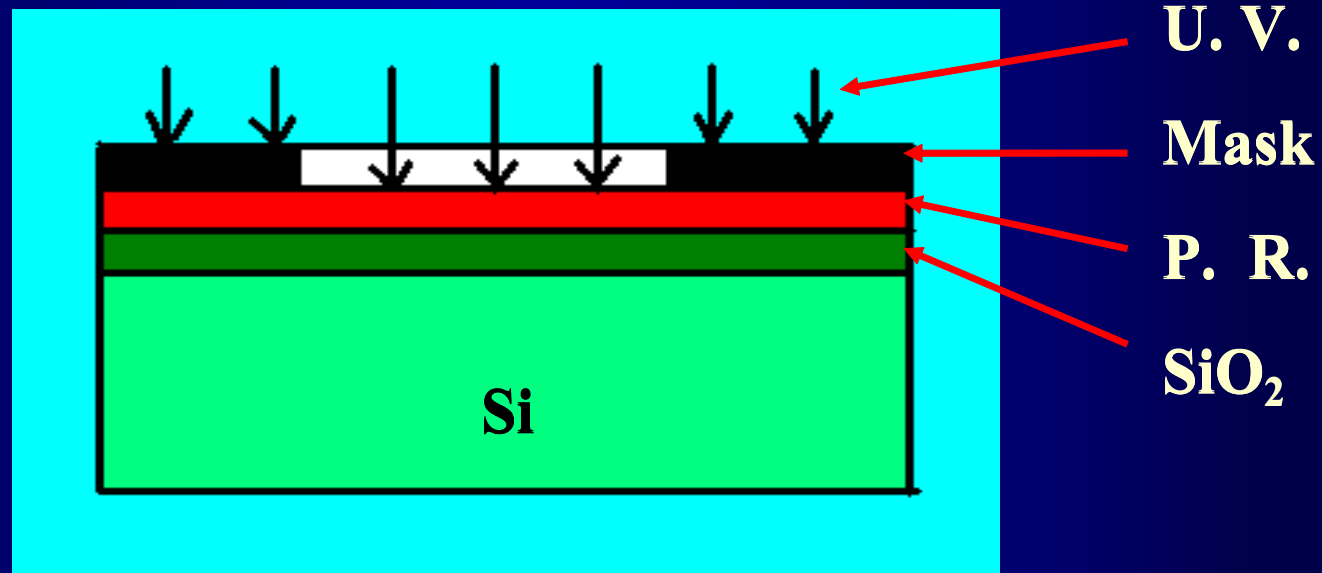
248 nm 波长的光子能量为 **4.9 eV**，**193 nm** 波长的光子能量为 **6.3 eV**，而纯净石英的禁带宽度约为 **8 eV**。波长越短，掩模与透镜材料对光能的吸收就严重，造成曝光效率降低和掩模与透镜发热。

各种光学曝光光源的使用情况

1985年以前，几乎所有光刻机都采用 **g 线 (436 nm)** 光源，当时的最小线宽为 **1 μm** 以上。**1985**年以后开始出现少量 **i 线 (365 nm)** 光刻机，相应的最小线宽为 **0.5 μm** 左右。从**1990**年开始出现 **DVU** 光刻机，相应的最小线宽为 **0.25 μm** 左右。从**1992**年起 **i 线**光刻机的数量开始超过 **g 线**光刻机。截止到 **1998**年，**g 线**、**i 线**和 **DVU** 光刻机的销售台数比例约为 **1: 4: 2**。

7.5 接触式与接近式光刻机

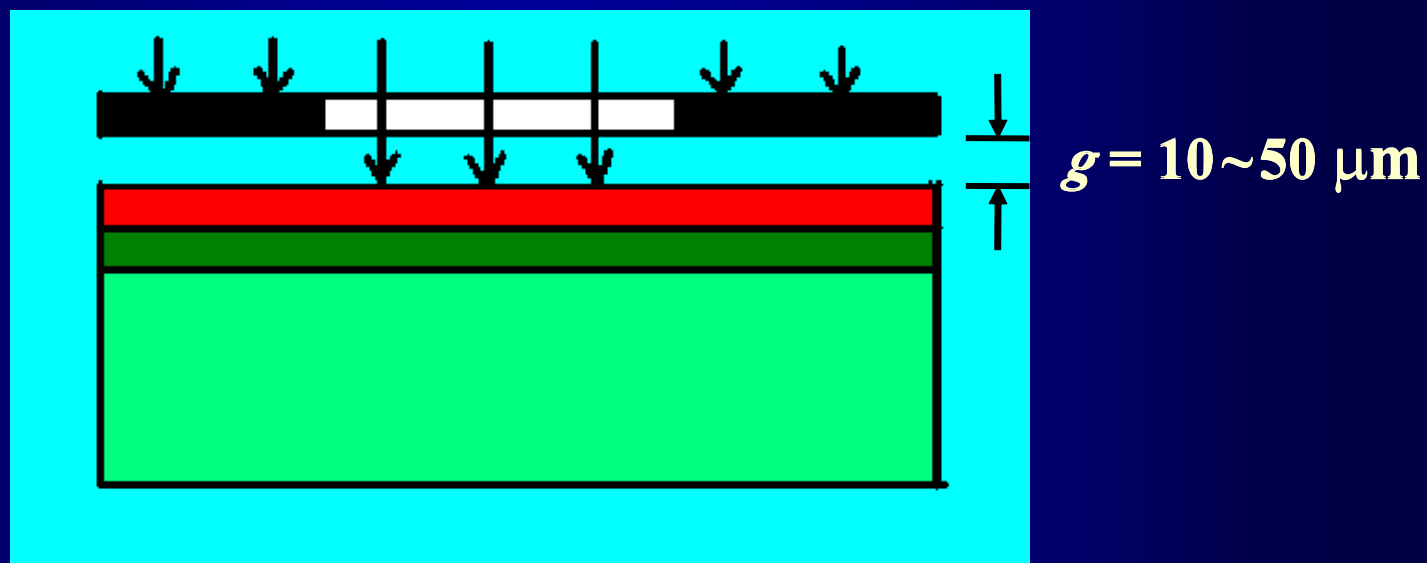
一、接触式光刻机



优点：设备简单；理论上 **MTF** 可达到 **1**，因此分辨率比较高，约 **0.5 μm**。

缺点：掩模版寿命短（**10 ~ 20** 次），硅片上图形缺陷多，光刻成品率低。

二、接近式光刻机



优点：掩模寿命长（可提高**10**倍以上），图形缺陷少。

缺点：衍射效应严重，使分辨率下降。

最小可分辨的线宽为

$$W_{\min} = \sqrt{k\lambda g} \approx \sqrt{\lambda g}$$

式中， k 是与光刻胶处理工艺有关的常数，通常接近于**1**。

例：当 $\lambda = 0.436\mu\text{m}$ (g线)， $g = 20\mu\text{m}$ 时， $W_{\min} = 2.95\mu\text{m}$

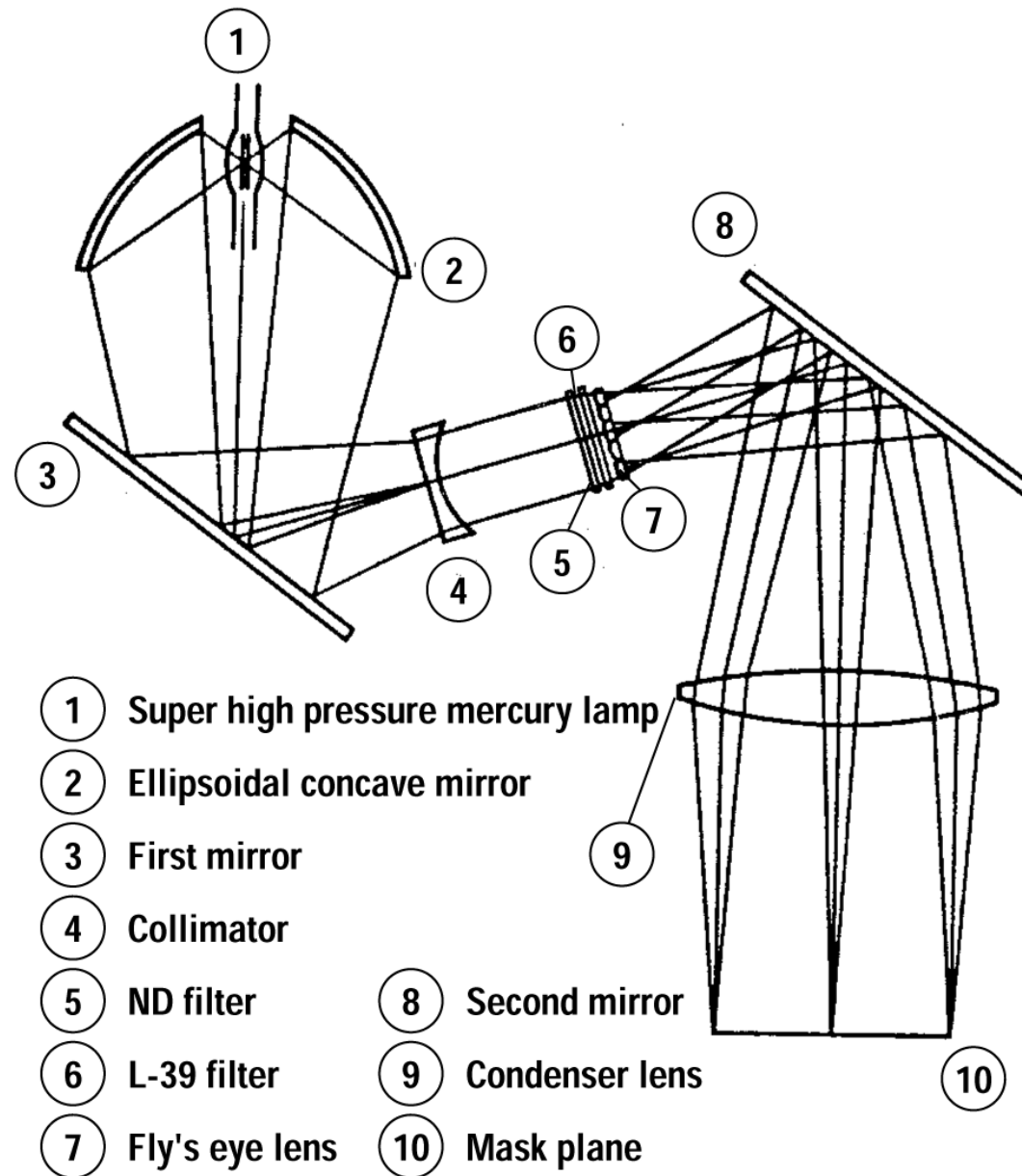
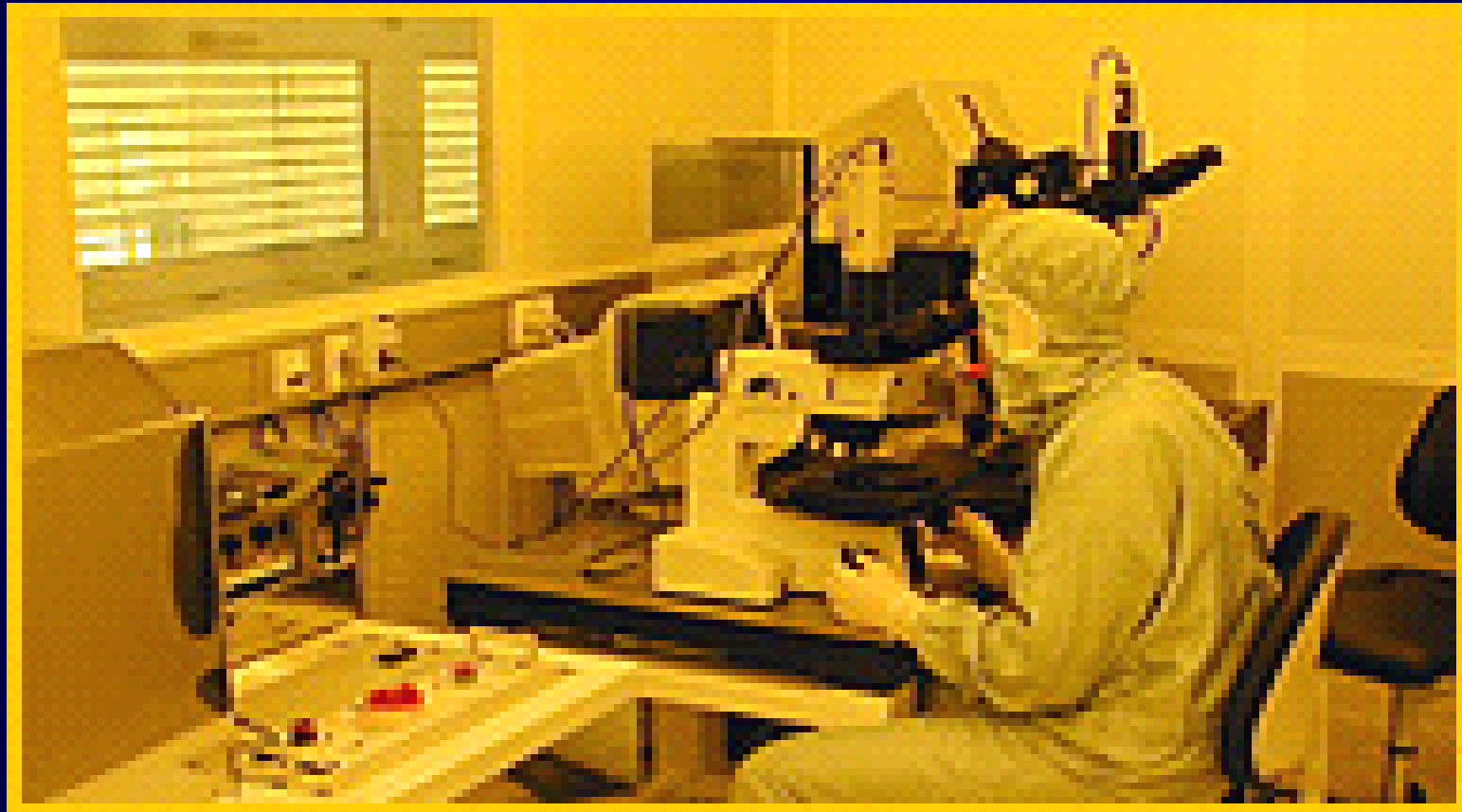


Figure 7.12 Schematic of a typical source assembly for a contact/proximity printer (after Jain).



7.6 投影式光刻机

一、分辨率与焦深

投影式光刻机的分辨率由雷利第一公式给出，即

$$W_{\min} = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

式中， k_1 是与光刻胶的光强响应特性有关的常数，约为**0.75**。
 NA 为镜头的数值孔径，

$$NA = n \sin \alpha$$

n 为折射率， α 为半接收角。 NA 的典型值是**0.16**到**0.8**。

增大 NA 可以提高分辨率，但受到焦深的限制。

焦深代表当硅片沿光路方向移动时能保持良好聚焦的移动距离。投影式光刻机的焦深由雷利第二公式给出，即

$$\sigma = \frac{\lambda}{NA^2}$$

分辨率与焦深对波长和数值孔径有相互矛盾的要求，需要折中考虑。增加 NA 线性地提高分辨率，平方关系地减小焦深，所以一般选取较小的 NA 。为了提高分辨率，可以缩短波长。

例：设 $NA = 0.16$,

则当 $\lambda = 436\text{nm}$ (UV, g线) 时,

$$W_{\min} = 2.04\mu\text{m}, \quad \sigma = 17.03\mu\text{m},$$

而当 $\lambda = 193\text{nm}$ (DUV) 时,

$$W_{\min} = 0.90\mu\text{m}, \quad \sigma = 7.54\mu\text{m}$$

二、1:1 扫描反射投影光刻机

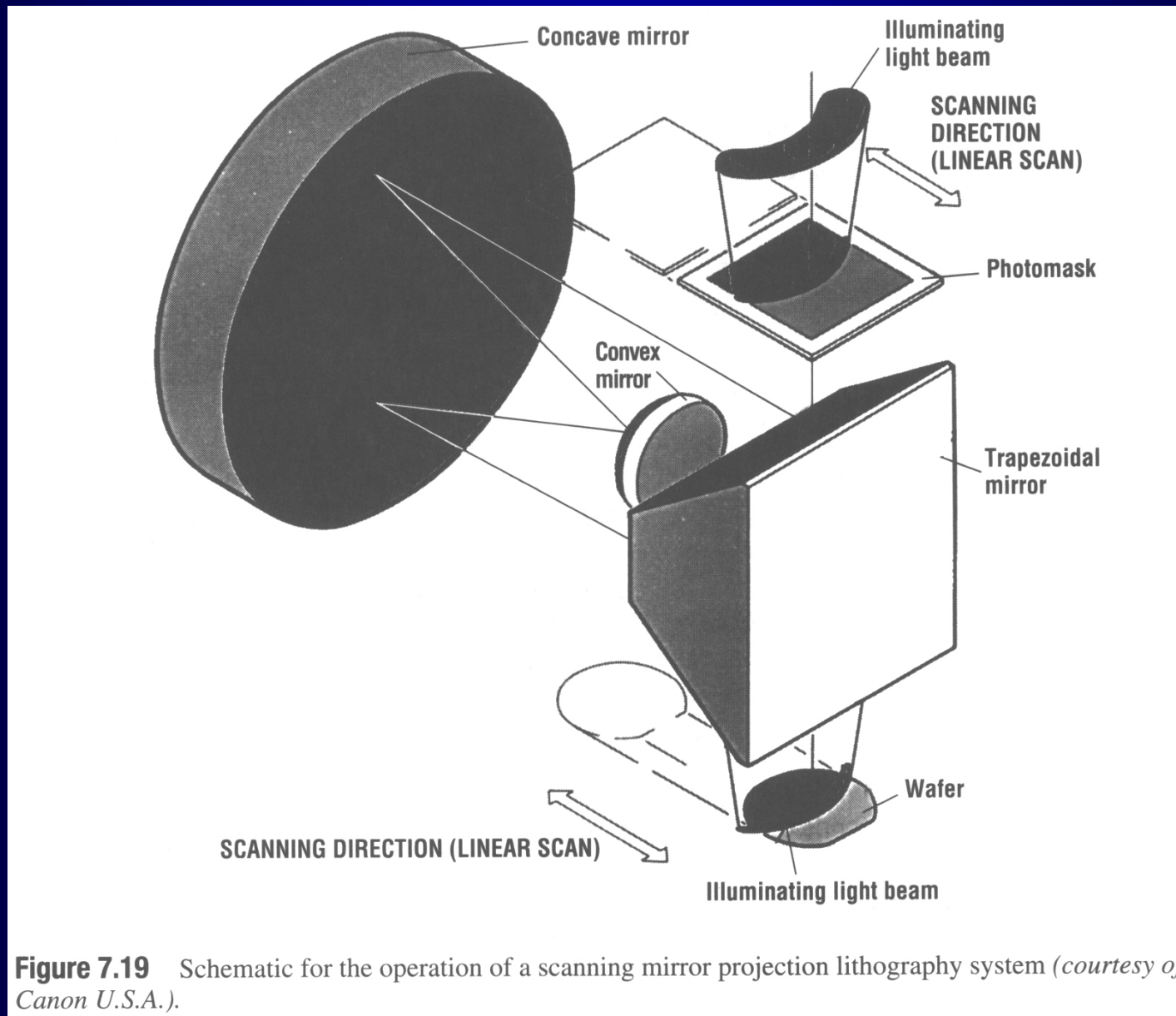
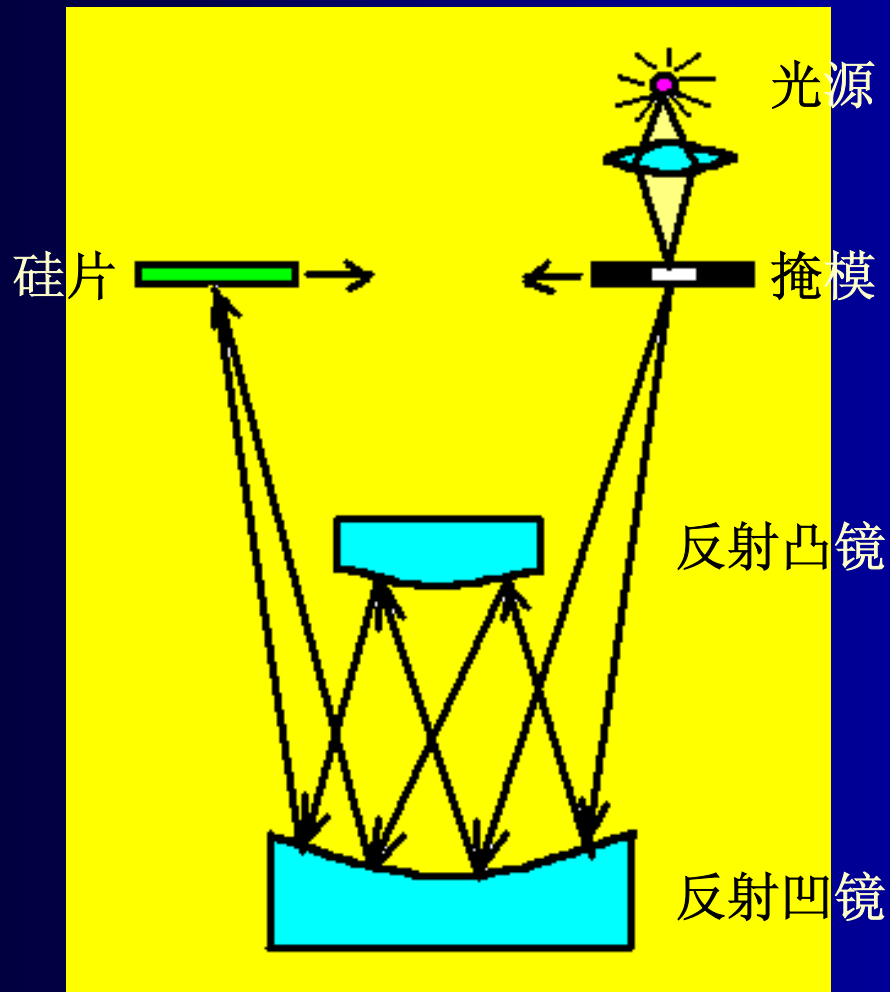


Figure 7.19 Schematic for the operation of a scanning mirror projection lithography system (*courtesy of Canon U.S.A.*).



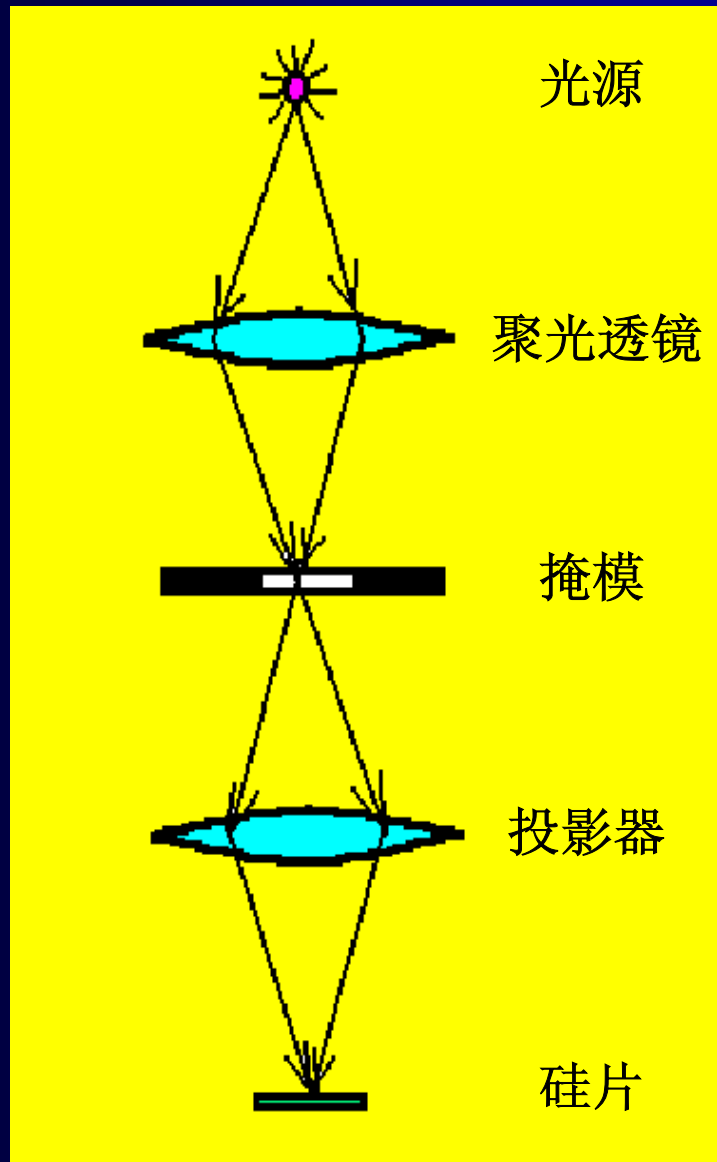
优点

- 1、掩模寿命长，图形缺陷少。
- 2、无色散，可以使用连续波长光源，无驻波效应。无折射系统中的象差、弥散等的影响。
- 3、曝光效率高。

缺点

数值孔径 NA 太小是限制分辨率的主要因素。

三、分步重复缩小投影光刻机



随着线宽的减小和晶片直径的增大，分辨率与焦深的矛盾、线宽与视场的矛盾越来越严重。为解决这些问题，开发出了分步重复缩小投影曝光机（**Direct Step on the Wafer**，简称 **DSW, Stepper**）。早期采用 **10:1** 缩小，现在更常用 **5:1** 或 **4:1**。

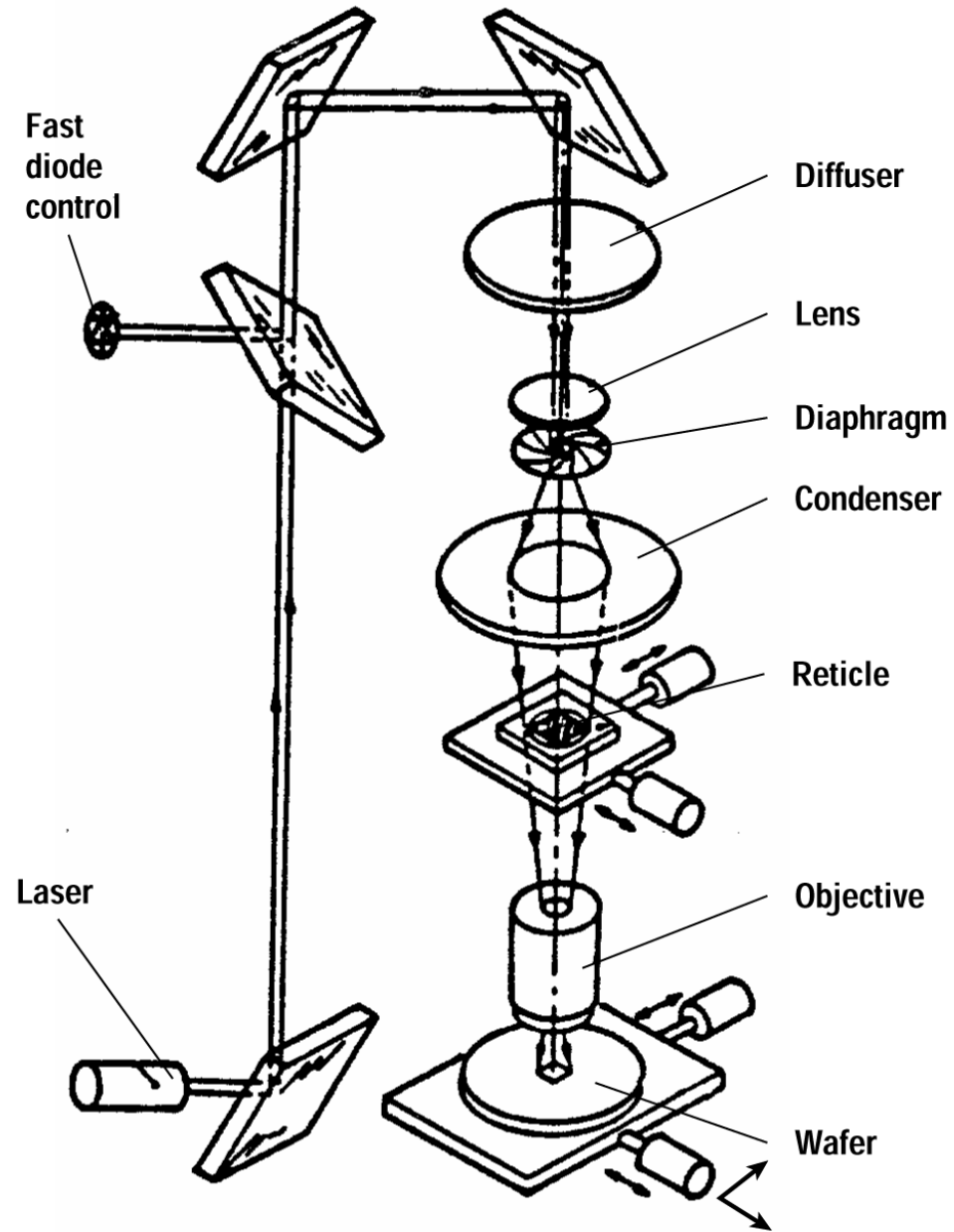


Figure 7.14 Optical train for an excimer laser stepper (after Jain).

优点

- 1、掩模版寿命长，图形缺陷少；
- 2、可以使用高数值孔径的透镜来提高分辨率，通过分步聚焦来解决焦深问题，可以在大晶片上获得高分辨率的图形；
- 3、由于掩模尺寸远大于芯片尺寸，使掩模制造简单，可减少掩模上的缺陷对芯片成品率的影响。

缺点

- 1、曝光效率低；
- 2、设备复杂、昂贵。

当芯片的面积继续增大时，例如 **4G DRAM** 的面积已达到 **32×32 mm²**，线宽为 **0.13 μm**，已达到视场的极限。于是又出现了步进扫描投影曝光机，当然设备就更加复杂和昂贵了。

7.7 先进掩模概念

一、保护薄膜

分步重复缩小投影虽然可以减少小缺陷的影响，但大缺陷的影响更严重，因为它可以被复制到每一个小视场中。

解决的办法是给步进机的掩模版蒙上一层保护薄膜，并使薄膜离开掩模版表面约 **1 cm**。这样可使任何落在薄膜上的颗粒保持在光学系统的聚焦平面之外。

另一种用于接触式光刻机的保护薄膜直接涂在掩模版上，它可以使接触式光刻在保持高分辨率优点的同时，提高掩模版的使用寿命，减少芯片上的缺陷。

二、抗反射膜

光线在掩模版和透镜表面的部分反射会使光能受到损失。有些光线经多次反射后会打到硅片上，使图形质量受到影响。为了减小这个问题，一种新掩模技术采用在掩模版靠近镜头的一面加上 **10%** 的抗反射剂。

三、相移掩模技术

由公式

$$W_{\min} = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{NA^2}$$

可知，由于 NA 对焦深的作用更大，所以通常希望采用较小的 NA 值。一般将 NA 值取为 **0.16** 到 **0.6**。当 k_1 为 **0.75** 时，有

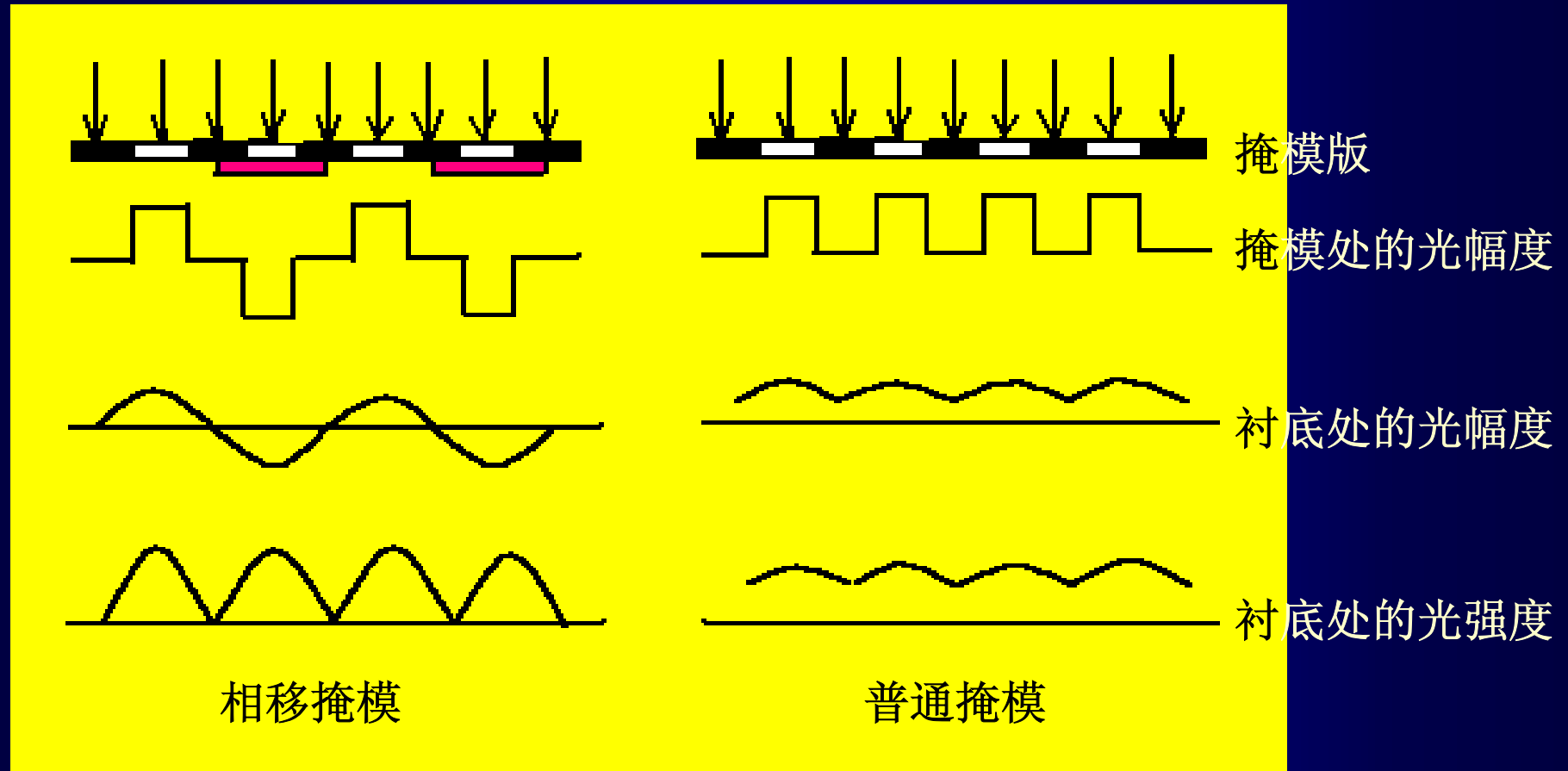
$$W_{\min} = (4.7 \sim 1.2) \lambda$$

上式在一段时期内被认为是光学曝光法的分辨率极限。若要进一步减小线宽，只能采用波长更短的光源，例如 **X** 射线。

对光刻胶和镜头等的改进只能稍微减小 k_1 值。而相移掩模技术等超分辨率技术的发明使 k_1 突破性地下降了一半以上，从而使分辨率极限进入了亚波长范围，使 i 线和深紫外光的分辨率分别达到了 $0.35 \mu\text{m}$ 和 $0.18 \mu\text{m}$ ，并且已分别应用于 64 M DRAM 和 256 M DRAM 的生产中。同时也使 X 射线光刻机的使用比原来预期的大大推迟。

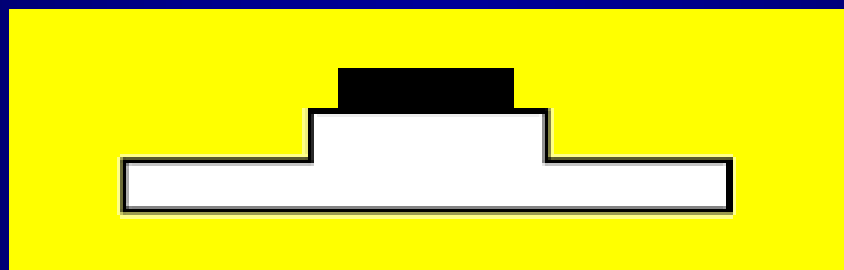
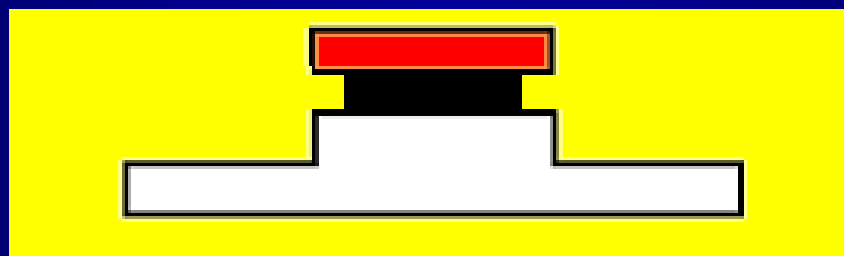
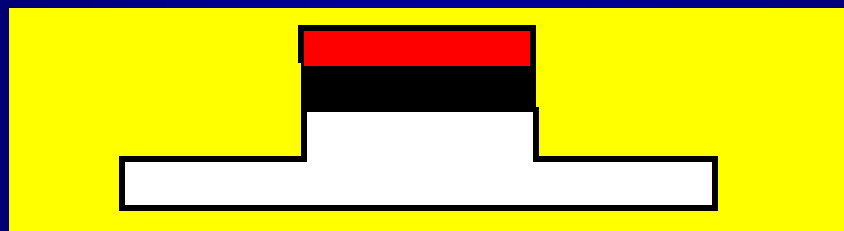
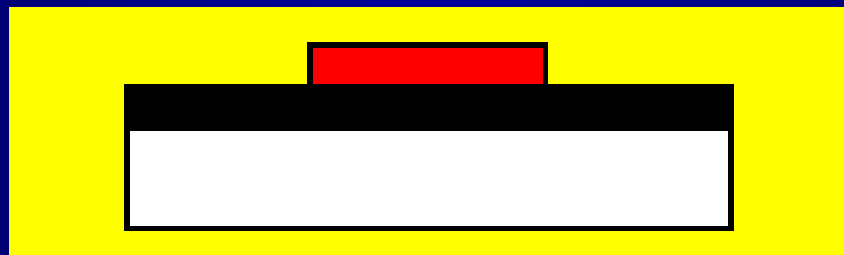
除相移掩模技术外，超分辨率技术还包括光学邻近效应修正技术和双层及多层光刻胶技术等。

相移掩模技术的关键是在掩模的透光区相间地涂上相移层，并使用相干光源。这使透过相邻透光区的光线具有相反的相位，从而使其衍射部分因干涉作用而相互抵消。



相移掩模技术对制版技术提出了新的要求，如相移材料的选择、制备与加工，制版软件中对相移层图形的设计等。

边缘相移掩模技术



四、光学邻近效应修正技术

把掩模设想为一个曝光矩阵 M ，由许多 **0** 和 **1** 的像素组成，**0** 代表透明区，**1** 代表不透明区。当用这块掩模对硅片曝光后，在硅片表面可以得到一个包含相同数目像素的图形矩阵 W 。在理想情况下，这两个矩阵应该相同。但是在实际情况下，由于曝光工艺会造成硅片表面图形的畸变，从而影响图形矩阵 W 。可以建立一个矩阵 S 来表示从矩阵 M 到矩阵 W 的变化，即

$$W = SM$$

矩阵 S 中包含了光学系统的所有信息。理想的 S 是一个单位矩阵，但实际上它包含了反映图形畸变的非对角元素。

所谓光学邻近效应修正（**OPC**）就是求出矩阵 S 的逆矩阵 S^{-1} ，用来对原来的掩模进行修正，得到新掩模的曝光矩阵为

$$M_1 = S^{-1}M$$

用新掩模对硅片曝光后得到的图形矩阵为

$$W_1 = SM_1 = SS^{-1}M = M$$

于是在硅片上得到了与原来掩模完全相同的图形。

矩阵 S^{-1} 是很大的，可能包含 10^{10} 个以上的像素，但也是一个很稀疏的矩阵。如果结合应用多层部分吸收材料，可以得到更精细的 **OPC** 掩模版，但价格也十分昂贵。

7.8 表面反射和驻波

一、表面反射

穿过光刻胶的光会从硅片表面反射出来，从而改变光刻胶吸收的光能，特别是硅片表面的金属层会反射较多的光。

硅片表面倾斜的台阶侧面会将光反射到非曝光区。

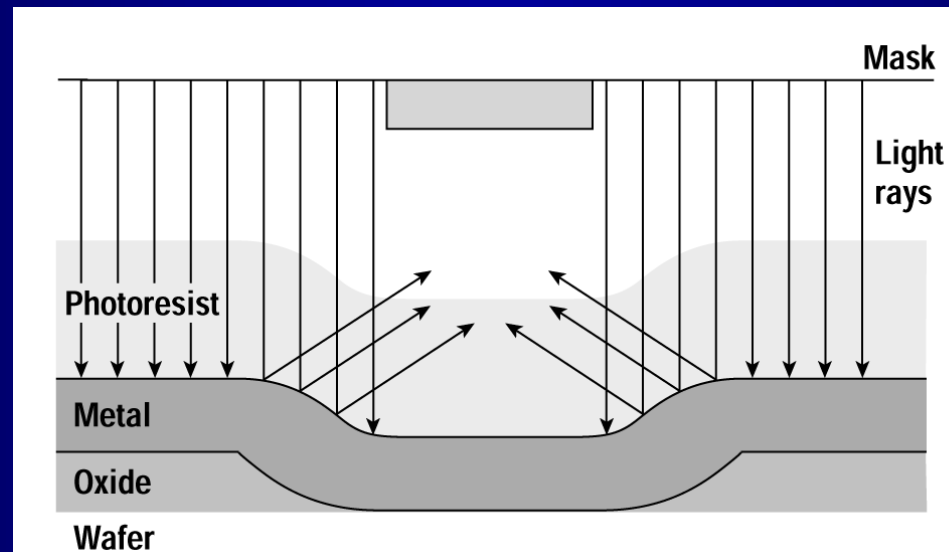


Figure 7.24 Light from the exposed regions can be reflected by wafer topology and be absorbed in the resist in nominally unexposed regions.

解决办法

- 1、改变淀积参数以控制薄膜的反射率；
- 2、使表面平坦化；
- 3、在光刻胶下加一层抗反射膜

二、驻波

驻波是由入射光和反射光之间的干涉造成的。驻波的波节与波腹之间的间隔为 $\lambda/4n = 0.16\lambda$ 。对 $\lambda = 200 \sim 400 \text{ nm}$ 的紫外光，此间隔为 $32 \sim 64 \text{ nm}$ ，小于光刻胶厚度。胶中不同的光强分布，将导致不同的显影速率，给线宽的控制带来困难。

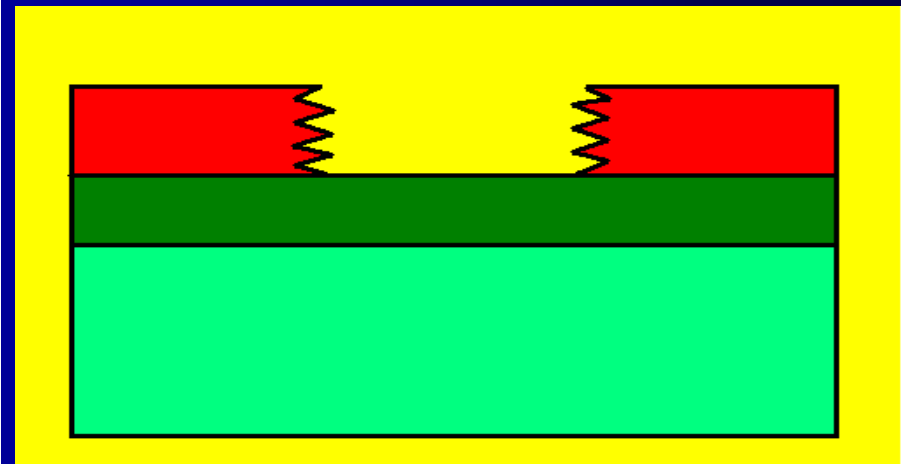
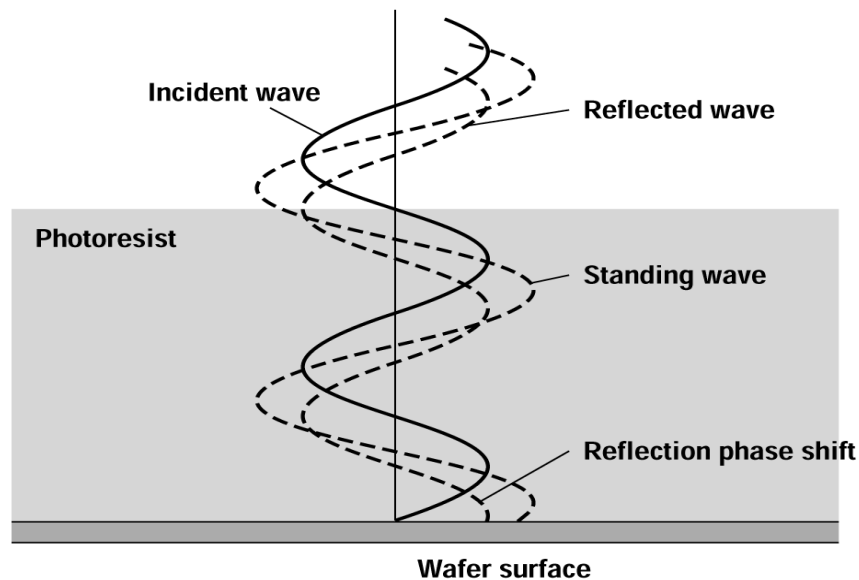


Figure 7.27 The formation of standing waves in the resist.

7.9 对准

大规模集成电路制造对光刻对准的规定是，对准误差应该不大于特征尺寸的 $1/4$ 到 $1/3$ 。

为了便于对准，在掩模上必须设置专门的对准标记。通过比较硅片表面的反射光和透过掩模返回的光来实现对准。

在步进光刻机上通常有自动对准系统。为了提高对准效率，可以先作一次人工对准。

掩模的热膨胀也会产生对准误差。为避免 8 英寸掩模产生 $0.1\ \mu\text{m}$ 的膨胀，掩模的温度变化必须控制在 0.75°C 左右。

7.10 小结

限制光学曝光方式的分辨率的主要因素是衍射效应。最早使用的接触式光刻机，分辨率可到 $1\ \mu\text{m}$ 以下，但容易损伤掩模和硅片。解决的办法是使用接近式光刻机，但要影响分辨率。介绍了具有亚微米分辨率的投影曝光系统。为了解决分辨率和焦深之间的矛盾，可以采用分步重复的方式。最后介绍了通过改进掩模制作提高分辨率的方法，即相移掩模技术和光学邻近效应修正技术。

随着光刻技术的不断发展，光学曝光的分辨率已进入亚波长范围。现在利用 $193\ \text{nm}$ 光源及 OPC 技术，已获得 $0.13\ \mu\text{m}$ 的线宽，预期可达到 $0.10\ \mu\text{m}$ ，甚至达到 $0.07\ \mu\text{m}$ 。

光学曝光的各种曝光方式及其利弊小结

接触式

- 优点：设备简单，分辨率较高
- 缺点：掩模版与晶片易损伤，成品率低

非接触式

- 接近式
 - 优点：掩模版寿命长，成本低
 - 缺点：衍射效应严重，影响分辨率

- 全反射
 - 优点：无像差，无驻波效应影响
 - 缺点：数值孔径小，分辨率低

- 投影式
 - 优点：数值孔径大，分辨率高，对硅片平整度要求低，掩模制造方便
 - 缺点：曝光效率低，设备昂贵

习 题

4、8 (参考例 7.1)、

补充题

在投影式曝光技术中，分辨率与焦深之间存在什么矛盾？
如何协调这个矛盾？分步重复曝光有什么优点？