

投影光刻机光学系统的总体设计

王之江 邹海兴

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文从投影光刻机的图形传递要求出发,导出投影光刻机各主要光学系统的具体要求,并讨论这些参数确定的局限性。

关键词: 扫描投影光刻机; 光学系统。

一、问题的提出

光学投影式光刻机是当今微电子制造技术中最重要、使用最广泛的光刻设备,这类光刻机可以分为两大类型,一类是扫描投影光刻机,用以制造 $2\sim 3\mu\text{m}$ 线条的集成电路;另一类为分步重复光刻机用于生产 $1\mu\text{m}$ 线条的集成电路。这两类光刻机是未来十年中微电子工业的关键设备。因此,深入研究这类光刻机的总体设计问题,会有助于迅速提高我国研制投影光刻机的技术水平,促进微电子工业的发展。

光刻机的总体设计是指根据光刻机的主要技术指标或功能来确定构成光刻机主要光学系统的参数,比如数值孔径、放大率和传递函数等。确定给出这些光学参数的重要原则,这些原则应有充分的理论根据及实践结果。构成光刻机的主要光学系统有投影光学系统、照明光学系统和观察光学系统。下面就这些系统进行讨论。

二、图形传递与投影光学系统参数的确定

光刻机的基本功能是将掩模图形无失真地按一定放大倍数(包括放大与缩小)转印到硅片上去,形成集成电路所需的光刻图形。因此,可以将光刻机理解为图形传递的工具。对集成电路来讲,指的是周期矩形图形的传递。对单一图形而言,指的是矩形黑白线条的边缘对比传递(斜率)与方角传递。

一个光学系统成像,物、像光强分布可用下式来表示

$$E(x, y) = O(x, y) \otimes I(x, y), \quad (1)$$

其中, $O(x, y)$ 代表物光强分布, $I(x, y)$ 代表光学系统点扩散函数,则 $E(x, y)$ 代表像的光强分布,“ \otimes ”表示卷积。

通常用(1)式的傅里叶变换式讨论问题比较方便,即

$$FT[E(x, y)] = FT[O(x, y)] \times FT[I(x, y)], \quad (2)$$

对光刻机而言,遇到的图形,大多是矩形图案。如图1所示。为了讨论方便起见,取一

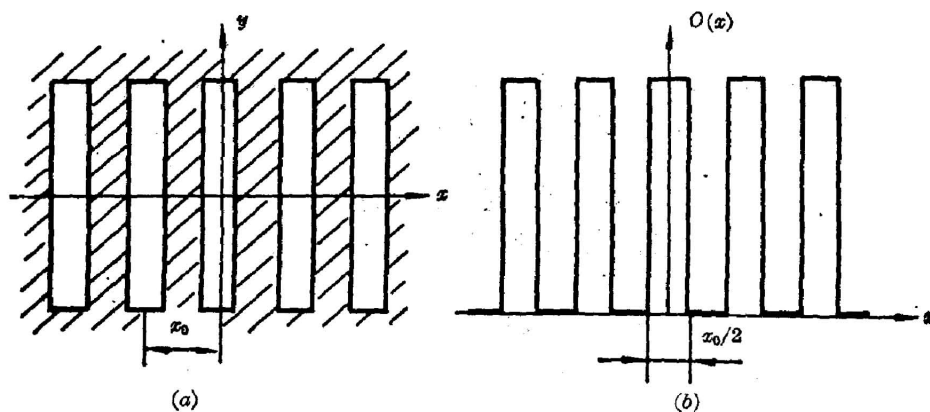


Fig. 1 Mask pattern

(a) Cyclic rectangle pattern; (b) rectangle intensity distribution

维物函数 $O(x)$ 来代替二维物函数 $O(x, y)$ 。 $O(x)$ 可表示为下述卷积式

$$O(x) = \mathcal{F}(x) \otimes \text{Peigne}(x/x_0), \quad (8)$$

式中, $\mathcal{F}(x)$ 为孤立函数, 即表示单一矩形光强分布, $\text{Peigne}(x/x_0)$ 为周期脉冲函数, 亦称梳状函数, 可表示为 $\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta[(x/x_0) - n]$ 。(3) 式的傅里叶变换式为

$$FT[O(x)] = FT[\mathcal{F}(x)] \times FT[\text{comb}(x)]. \quad (4)$$

设孤立函数 $\mathcal{F}(x)$ 的归一化矩形函数为

$$f(x) = \text{rect} \frac{x}{x_0/2} = \begin{cases} 1, & |x| \leq (x_0/4) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$FT[f(x)] = \int_{-x_0/4}^{x_0/4} \exp(-i2\pi\nu x) dx = \frac{x_0}{2} \text{sinc}\left(\pi\nu \frac{x_0}{2}\right), \quad (6)$$

由于梳状函数 $\text{comb}(x/x_0)$ 的傅里叶变换仍为梳状函数, 即

$$FT[\text{comb}(x/x_0)] = x_0 \text{comb}(x_0\nu). \quad (7)$$

则(4)式变为

$$FT[O(x)] = \frac{x_0^2}{2} \text{sinc}\left(\pi\nu \frac{x_0}{2}\right) \text{comb}(x_0\nu). \quad (8)$$

(8) 式示于图 2。

光学系统传递性能常用调制传递函数(MTF)来表示, 即 $FT[I(x, y)] = MTF(\nu, \omega)$ 。对于非相干光照明, 无像差系统的调制传递函数表示为^[9]

$$M(\nu) = \frac{2}{\pi} (\phi - \cos \phi \sin \phi), \quad (9)$$

式中, $\cos \phi = (\nu/\nu_{\max})$, $\nu_{\max} = (2NA/\lambda)$, 变量 $\nu = 0 \sim (1/x_0) \sim \nu_{\max}$ 为线对宽度。于是(9)式可改写为

$$M(\nu) = \frac{2}{\pi} [\cos^{-1}(\nu/\nu_{\max}) - (\nu/\nu_{\max}) \sqrt{1 - (\nu/\nu_{\max})^2}]. \quad (10)$$

光学系统的调制传递函数图示于图 3。示出相干照明, 非相干照明和部分相干照明三种情况下的传递函数。由图 3 可知, 采用相干光和部分相干光照明有利于提高中、低频区的

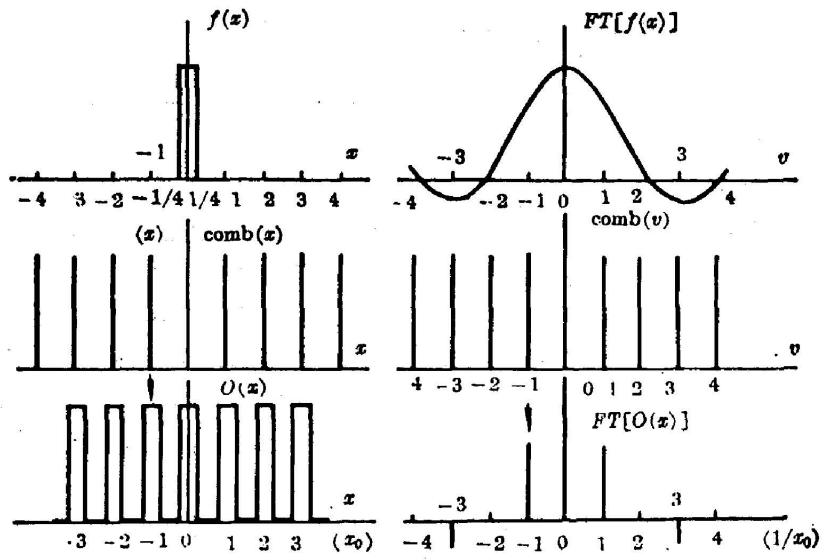


Fig. 2 Cyclic rectangle intensity distribution and its Fourier transfer

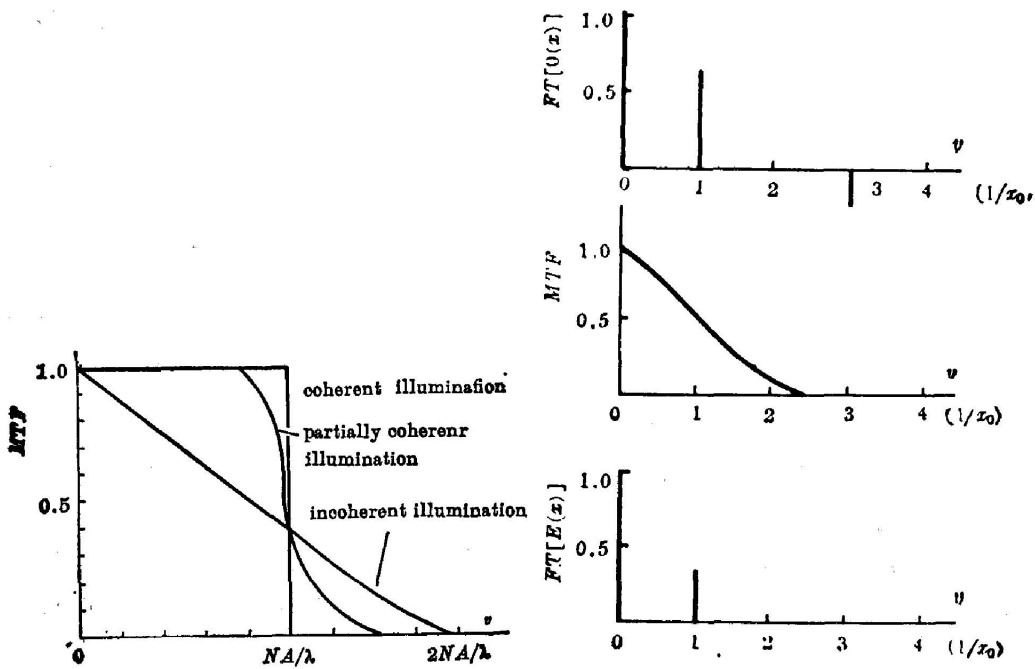


Fig. 3 Optical modulation transfer function (MTE)

Fig. 4 Object and image frequency spectrum

频率传递特性,即可提高线条轮廓线的边缘陡度。

由(2)、(8)和(10)式可求出像的频谱

$$FT[H(x)] = \frac{\omega_0^2}{\sigma} \operatorname{sinc}\left(\pi\nu \frac{x_0}{2}\right) \operatorname{comb}(x_0\nu) \\ \times [\cos^{-1}(\nu/\nu_{\max}) - (\nu/\nu_{\max})\sqrt{1 - (\nu/\nu_{\max})^2}]. \quad (11)$$

(11)式示于图 4。

为使像频谱保留 ± 1 级,并使频率为 $(1/x_0)$ 处通过光学系统后有足够的数值,使周期矩形线条得到较好的传递。一般认为应使频率为 $(1/x_0)$ 的传递函数达到 0.5。按照 Broers 的观点^[3],对频率为 $(1/x_0)$ 的调制传递函数应为 0.6。这两者并不矛盾,因为对于理想光学系统正弦波调制传递函数为 0.5 时,方波的调制传递函数可达到 0.6。并且,采用部分相干照明时的调制传递函数值可以比非相干照明时调制传递函数为 0.5 时高,如图 6 所示。由(9)式可知,当 $(1/x_0)$ 的调制传递函数为 0.5,则截止频率 $\nu_{\max} = 2.47(1/x_0)$ 。因此,光刻机中,光刻线宽与光学分辨线宽是两个不同概念,为了保持图形精确传递,光学系统对所刻线条的调制传递函数要求不是 0,而是 0.5。

设光学系统数值孔径为 NA , 照明光波长为 λ , 则光刻线宽为

$$l_1 = 0.62(\lambda/NA). \quad (12)$$

对于矩形图形的方角传递,作者已有讨论^[4]。一个光学系统的数值孔径为 NA , 则方角变为半圆角,其圆角半径 R 为

$$R = 0.7(\lambda/NA). \quad (13)$$

令方头线端刚好变为半圆头作为光学系统参数判据,则光刻线宽应为

$$l_2 = 1.4(\lambda/NA). \quad (14)$$

由(12)、(14)式可见,方角传递要求比线条传递对光学系统要求更大的数值孔径 NA 。对光刻机而言,满足线条边缘传递作为光学系统参数判据,而方角传递作为参考。

三、相干度对成像的影响与照明系统参数的确定

照明系统的相干度对投影光学系统的系统分辨率和线条边缘的陡度两方面有影响。从部分相干理论^[5]可知,两物点 P_1 和 P_2 在像面上的瑞利分辨极限 $(P_1P_2)_{\text{limit}}$ 为

$$(P_1P_2)_{\text{limit}} = L(\sigma) \frac{\lambda}{NA}, \quad (15)$$

式中系数 $L(\sigma)$ 与相干度 $\sigma = (NA_{\text{照明}}/NA_{\text{收集}})$ 有关。计算结果示于图 5^[5]。从图 5 可知,当 $\sigma < 1$ 时,瑞利分辨长度略有增加。

由图 3 可知,相干照明,特别是部分相干照明,对改善线条边缘过渡区特性有明显影响。图 6 为扫描投影光刻机 Micralign 100 系列实测调制传递函数曲线。部分相干照明下,小于 400 line pair/mm 时,调制传递函数比非相干照明有明显提高。实验表明,在不太削弱照明光强的情况下, $\sigma = 0.7$ 作为投影光刻机照明光学系统相干度要求是合适的。当 $\sigma \leq 0.3$ 时,如 GCA4800 投影光刻机所采用的照明系统,光刻图形的两侧及方角区产生特有的衍射环,对光刻造成不利影响。

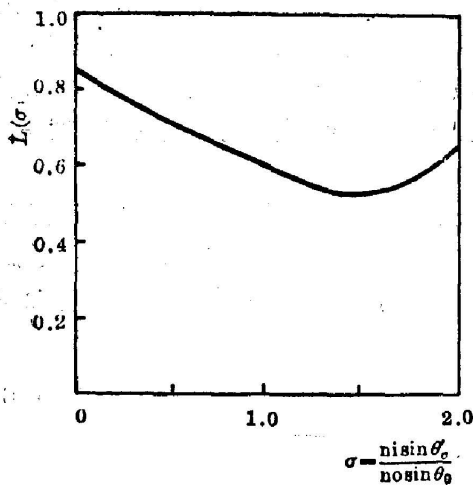


Fig. 5

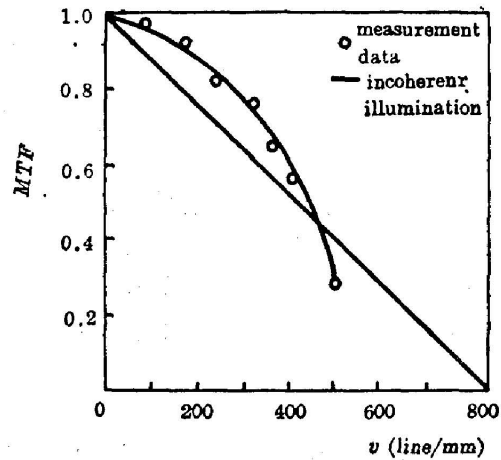


Fig. 6 MTF of the projection aligner Micralign

照明系统另一个重要指标是照明区的光强分布均匀性。这是由光刻线宽及线宽控制精度来决定的。一般认为线宽控制精度在最小线宽的 $\pm 10\%$ 是合适的^[7]。因为这一误差是与其他影响线宽控制的光刻工艺因素,如硅片匀胶厚度变化,显影控制(温度、浓度及显影时间)等所引起的线宽控制误差为同一数量级^[8]。由于曝光不均匀引起线宽变化的因素也很多,如光刻胶种类,胶厚,投影光学系统成像质量及光刻线宽等。以光刻正胶 AZ1350J 为例,正确曝光量中心值为 38 mJ/cm^2 , $\gamma=3$, 令光刻胶线条边缘陡度为 45° , 线宽控制精度在 $\pm 10\%$, 则照明不均匀性最大充差计算值见表 1。

Table 1 The requirements of illumination uniformity

Line width (μm)	Resist thickness (μm)	the requirement of uniformity of illumination
3	1.5	7.8($\pm\%$)
2	1.5	5.2($\pm\%$)
1	1.5	3.9($\pm\%$)
	1.0	2.5($\pm\%$)

在扫描投影光刻机($NA=0.11$)上实测结果为,对 $3 \mu\text{m}$ 线条,线宽控制精度 $\pm 10\%$, 则照明均匀性要求为 $\pm 5\%$ 。这一结果比计算值严, 其原因为光刻机光刻线条边缘质量较差。

四、套刻精度与对准观察光学系统参数的确定

光刻机不但要精确传递同一掩模上的图形,而且需要不同掩模图形互套。这是光刻机有别于精缩机等制版设备的地方。一般而言,不同掩模上相关图形的套刻误差应小于线宽的 $1/3$ 到 $1/4$ 。例如,光刻线宽 $2 \mu\text{m}$, 则套刻充差为 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$, 一般定义在 2σ 范围内。

光刻图形的套刻误差是多因素的综合结果,既有光刻机本身对准机构精度和对准误差,又有光刻工艺,掺杂工艺和热处理等因素有关,并最终反映到套刻误差中去。工艺过程引起的误差是与光刻机无关的,可归纳为(1)掩模制作误差;(2)硅片热处理引起图案线条位移;(3)光刻时,光刻胶层图案线条位移;(4)光学系统畸变;(5)光刻与掩模制作温度差造成套刻误差。

套刻误差中,与光刻机有关的是对准误差,其中包括鉴别器(如人眼、电视、电荷耦合器件和光电探测器等)的对准误差及对准机构误差。一般扫描投影光刻机仍用人眼目视对准。假定掩模不做任何特殊对准标记,而用图案本身图形对准,则精度为 $1'$ 。 Δx 为对准允差(μm),则观察光学系统的放大倍数 β 为

$$\beta = \frac{75}{\Delta x} \quad (16)$$

一般 Δx 取小于 $0.3 \mu\text{m}$,故 β 一般为250倍左右即可。

对电视对准,电荷耦合器件对准等自动对准方式,应根据线数及 Δx 来确定显微镜的放大倍数。

为使对准机构与对准精度相匹配,对准机构步距及稳定性允差为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

五、结 束 语

从上述讨论,可得到如下结果:投影光学系统的数值孔径,应使所刻最小线条的调制传递函数值等于或大于0.5。照明光学系统数值孔径应使照明相干设 $\sigma=0.7$ 。照明均匀性充差应根据光刻最小线宽而定。观察光学系统的数值孔径应大于投影光学系统,放大倍数应为250倍左右。

作者对孙保定、杨良民和李植森等同志的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman; *«Introduction to Fourier Optics»*, (McGraw-Hill, 1968), 23.
- [2] J. Roussel; *Solid State Technol.*, 1978, **21**, No. 5 (May), 67~71.
- [3] Alec N. Broess; *IEEE Trans. Electr. Devices*, 1981, **ED-28**, No. 11 (Nov), 1268~1278.
- [4] 邹海兴; *«光学学报»*, 1986, **6**, No. 11 (Nov).
- [5] M. Born, E. Wolf; *«Principle of Optics»*, (Pergamon Press, Oxford, 3rd, 1965), 522.
- [6] Holger Moritz; *IEEE Trans. Electr. Devices*, 1979, **ED-21**, No. 4 (Apr), 705~710.
- [7] R. K. Watts; *Solid State Technol.*, 1981, **24**, No. 5 (May), 99~105.
- [8] D. J. Elliott; *«Integrated Circuit Fabrication Technology»*, (McGraw-Hill, 1982), 184.

General consideration of optical system in the projection aligner

WANG ZHIJIANG AND ZOU HAIXING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 6 May 1986; revised 30 June 1986)

Abstract

The specific parameters of main optical system are deduced from the requirement of pattern transfer for the projection aligner. The limit of these parameters is discussed.

Key Words: scan projection aligner; optical system.

'86 全国光学测试学术交流会在南京举行

受中国光学学会委托,由南京光学仪器学会、江苏省激光学会、南京计量测试学会联合举办的'86 全国光学测试学术交流会于 1986 年 10 月 15 日至 19 日在南京召开。来自全国 19 个省、市、自治区 88 个单位的 213 名代表参加了这次会议。

这次会议深受国内光学测试界同行们的关注,会议共收到论文 214 篇,大会录用 187 篇。这些报告大致可分为以下几个方面:(1)各种干涉仪的研究及应用;(2)干涉图形的数据处理技术;(3)光学传递函数的应用及标准化问题;(4)特种光学零件及光学材料测试方法与技术;(5)测试仪器、光度色度及红外、光纤等。

大会由南京光学仪器学会副理事长陈进榜副教授主持,南京光学仪器学会理事长丁玉生高级工程师致开幕词。会议特邀光干涉理论与技术专家顾去吾教授作题为“光干涉及其发展趋势”的学术报告,顾教授对干涉术发展趋势的精辟分析以及在干涉学上一些新概念,例如“运动干涉图”的论述,引起与会代表很大的兴趣;大会还邀请天文光学专家潘君骅教授作题为“从天文光学进展看光学检验的重要性”的报告,潘教授全面评述了天文光学工艺中几种主要检验方法的利弊,并从当代国际上 6 架典型的大口径天文望远镜的精度要求出发,评述了现代光学检验两个明显的特点:即对精度要求更加苛刻及必须实时检测。说明学科发展对光学测试工作者提出了更高的要求。

会议用两天半时间分五个会场宣讲了 180 篇论文。这些报告涉及光学测试领域的各个方面,具有一定的深度和广度;理论研究提出了一些新概念,新思想;应用技术取得了新的进展,获得一些新成果,许多报告博得与会者的好评。

(下转第 170 页)