

# 图形发生器光学系统设计

杨广泽

**摘要：**本文简要介绍图形发生器的工作特点，光学系统的结构原理及设计考虑，精缩镜头的参数确定，基本结构和演变，设计结果和成象质量。

## 一、图形发生器的工作特点及使用要求

图形发生器是目前国内外大规模集成电路主要制版设备。用图形发生器制初缩版，是把电路图形分解成成千上万个矩形图形，每次缩小十倍只使一个矩形成象曝光，经过千万次曝光就可拼接成一张完整的图。这里用的是可见光（下面还谈到感光干版及光源）。一般这样制出的图形是十倍掩模尺寸，还需精缩一次，这种曝光制版设备叫图形发生器。

该图形发生器在设计时是考虑了双重用途，其中有两路系统组成，一路是以长宽可变的矩形光孔为物通过物镜成象到干版上，另一路是以各种选定常用物图案通过同一物镜成象于版面。再借助于镜头相对于平台上干版的运动和多次曝光，快速形成为DSW和所用的原版集成电路图案，在这种用途时一般不要求图案的线宽达 $2\mu\text{m}$ ，在设计时希望能一机两用，使第二光路还可兼作精缩机的用途，因此对该物镜提出了较高的要求。功能在 $\phi 10\text{mm}$ 范围能照出 $2\mu\text{m}$ 宽的边缘平整的线条。并力求象面照度均匀，为了保证拼接精度，要求镜头的畸变必须小于万分之三。

## 二、光学系统的原理及设计考虑

图形发生器的光学系统结构原理如图1。固定图形光路通过同一个精缩镜头，投影到干版上，两路的转交由一块可移动反射镜完成。反射镜移出光路使固定图形工作，移入光路使可变矩形光路工作。在可变矩形光路中的光源通过聚光镜12形成一次中间象，然后再经过聚光镜8将二次象落在精缩镜头的入瞳面上并充满入瞳。在第一象面位置处装有可变光栏11，用来改变有效光源面积的大小，在入瞳面上的光源象也随着改变。从而形成部分相干照明，相干度可调。

设计聚光镜8时，为使光源面上的每一点都铺满整个物面7，要求灯丝面的轴上点经过聚

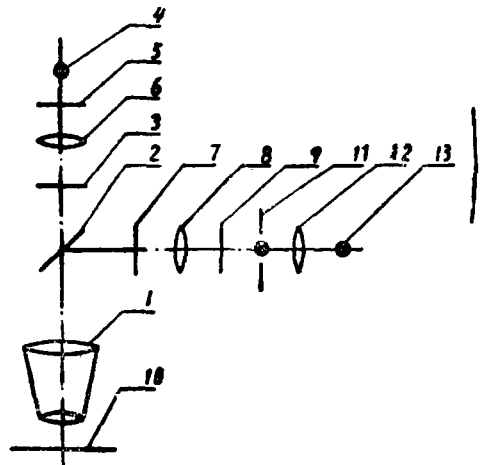


图1 1—精缩镜头；2—可移动反射镜；3—固定图形；4、13—频闪氙灯；5、9—滤光片；6、8、12—聚光镜；7—可变矩形图形；10—照相平台；11—可变光栏

光镜 8 后铺满整个物面 7，灯丝面上轴外任何一点的主光线经过聚光镜 8 后，通过物面的中心，该轴外点的整个光束也要求铺满整个物面 7。也就是说，设计聚光镜 8 的光阑是取在物面 7 上。

使用要求在线视场 $\phi 10\text{mm}$ 之内，制做出边缘平整的黑白线宽  $2\ \mu\text{m}$  的线条。设计者要考虑到，不仅轴上有良好的成象质量，轴外子午及弧矢也同样要有良好的象质。这就是说要求是平象场，并且力求象面照面均匀。为了得到均匀照明精缩镜头设计时最大视场也不允许阑光。

工作波长的选取决定感光干版的光谱灵敏度和光源的光谱特性。图形发生器所用的感光干版和频闪氙灯的光谱分布曲线如图 2、图 3 所示。

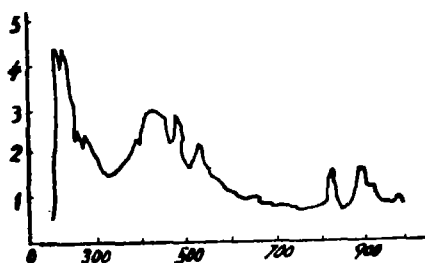


图 2

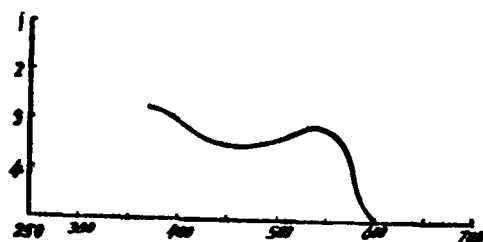


图 3

目前精缩镜头所用的超微粒干版分辨率都很高，美国用于大规模集成电路新型胶分辨可达  $0.1\ \mu\text{m}$  量级。图形发生器用美国 Kodak 感光干版。感光范围  $370\text{nm}\sim 600\text{nm}$  之间，有两个峰值，第一个峰值从  $370\text{nm}\sim 410\text{nm}$ ，主峰在  $370\text{nm}$ ，第二个峰值从  $520\text{nm}\sim 560\text{nm}$ ，主峰在  $546.1\text{nm}$ ，第一个峰在近紫外区，从照明光源的光谱分布可见，此波长不是峰值。又由于目前所用药膜的颗粒度和厚度对短波散射有着严重影响。工作波长如果取在短波处，衬度要显著降低。因此校正单色象差的波长取在 e 线即  $\lambda = 546.1\text{nm}$ 。频闪氙灯的光谱分布在  $546.1\text{nm}$  处有一高峰，峰值在  $520\text{nm}\sim 550\text{nm}$ 。这样使得感光干版与光源得到了较好匹配。

波段宽的选取即考虑到感光能量的需要，感光干版和光源的光谱分布的匹配，又要照顾到校正色差的可能，波段宽选为  $57\text{nm}$ ，波长从  $503\text{nm}\sim 560\text{nm}$ 。滤光片的选择应与镜头设计的波宽相匹配。在短波端采用 JB<sub>2</sub> 滤掉  $500\text{nm}$  以下的波长，长波处因国内很难找到合适的滤光片来满足我们的使用要求，故采用 K<sub>2</sub> 玻璃镀膜的办法滤掉  $560\text{nm}$  以上的波段，实践证明效果是良好的。

### 三、精缩镜头的参数确定

前面有的参数已经确定，如缩小倍数，线视场，主波长及波段宽，下面主要确定数值孔径  $NA$ ，即相对孔径  $D/f'$  值，共轭距  $L$  和焦距  $f'$ 。用光学传递函数来评价光学系统成象质量已经普遍地被应用。光学传递函数包括调制对比传递函数  $MTF$  和位相传递函数  $PTF$ 。 $MTF$  表征亮度为正弦波形的各种频率经光学系统后对比度的衰减。正因为  $MTF$  和对比度密切相关，它直接反映了光学系统传递各种不同频率目标的特性，客观地反映了系统成象性能。

精缩镜头对比传递函数  $MTF$  应取多少值作为评价指标才合适。据国外文献报导，当

$MTF \geq 0.4$ 时, 在实验室条件下可得边缘清晰的线条。当 $MTF \geq 0.45-0.50$ 时可以实用。如果光学系统在整个视场内波差 $OPD \leq 1/4$ 波长, 如图3所示。可以用归化频率接近于 $f_r/f_{r_{lim}} \leq 0.4$ , 即 $MTF = 0.4$ 。理想系统的 $MTF = 0.5$ 。物镜的极限分辨率 $f_{r_{lim}}$ 可以用下式计算:

$$f_{r_{lim}} = 2NA/\lambda \tag{1}$$

数值孔径的确定是根据要求制作 $2\mu\text{m}$ 的线条, 则要求光学系统的空间频率 $f_r = 250$ 对线/mm。当 $MTF \geq 0.4$ , 这时光学系统的极限空间频率为 $f_{r_{lim}} = 625$ 对线/mm。当 $\lambda = 0.0005461\text{mm}$ 代入(1)式得:  $NA = 0.171$ 。当取理想系统的 $MTF = 0.6$ 时, 存在 $OPD \leq 1/4$ 波长时的 $MTF = 0.5$ , 此时 $f_r/f_{r_{lim}} \leq 0.3$ 。经计算可求出 $NA \geq 0.2275$ , 考虑到加工使用等条件的影响让 $MTF > 0.5$ , 本设计取 $NA = 0.2525$ , 则相对孔径 $D/f' = 1/1.8$ 。根据整机结构安排共轭距 $L$ 定为 $600\text{mm}$ , 有了共轭距和倍率 $M$ , 焦距可用下式算出:

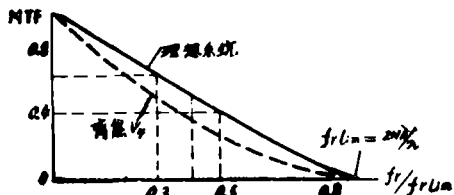


图4 无象差系统及离焦 $\lambda/4$ 时的 $MTF$

$$f' = -LM/(1-M)^2 \tag{2}$$

已知 $M = -1/10$ ,  $L = 600\text{mm}$ , 代入(2)式求得焦距 $f' = 49.587\text{mm}$ 。由于结构型式的选择不同, 对焦距 $f'$ 数值有所影响, 应以共轭距 $L$ 为准。

#### 四、精缩镜头的基本结构和演变

根据指标要求, 镜头近大相对孔径, 中视场高质量, 我们应考虑采用双高斯复杂化的结构型式, 这是因为双高斯具有近对称型的结构型式, 对校正垂轴象差(倍率色差, 彗差和畸变)容易, 越是大视场越要考虑用对称型的结构。所以要复杂化是因为典型的双高斯存在难以克服的轴外高级负球差和高级正象散。在不失镜片与光阑对称的结构安排前提下, 双高斯型的复杂化可能的途径有很多, 下面介绍一种成功的设计例子。其结构如图5所示。

(1) 为了扩大线视场和增加像面的工作距离, 在双高斯型的前方加一负片构成望远型。此片产生负球差和负象散。

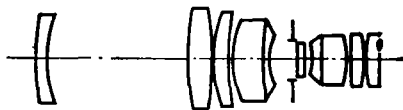


图5 光学结构

整个系统高级负球差主要在第9面和第12面产生, 同时轴外光束在这里又有较大的入射角, 而使之产生很大的轴外高级负球差。

(2) 提高玻璃的折射率, 使得能产生同样的光焦度, 但有较大的半径。半径大, 高级球差减少了。厚透镜折射率的提高使 $d$ (透镜厚度)适当减小些, 对轴外高级象差的校正是有利的。分离前后两块薄透镜, 并对它们适当弯曲, 不仅可以校正一部分高级球差, 而且可使高级正象散减小。

(3) 把光阑间的空气间隔拉大, 对校正高级负球差有利, 但加大了正象散。为了克服这一矛盾, 将双高斯型的前后两部分拉开, 让光阑两边的小半径接近光阑同心的位置, 在靠近光阑处引进一担负很小的负光焦度薄透镜, 它产生一定值的负 $S_{III}$ , 由此可实现拉大光阑处的空气间隔, 解决轴外高级负球差与高级正象散的矛盾问题。

(4) 为了校正轴外高级负球差让第5、第7块透镜的 $n$ 值, 高于第4、第8块透镜的 $n$ 值,

它可增大第9面、第12面的半径。再适当的匹配分离薄透镜的光焦变，对轴上球差及轴外球差的平衡是有利的。

绝大部分变数对多种象差起程度不同的作用，为校正高级轴外负球差和高级正象散这个主要矛盾的同时，往往要改动多个变量，经多次平衡才能奏效。由于结构型式的确定，二级光谱量的存在远不能满足高性能精缩镜头的质量要求，为此第一片及光栏处的第6片采用TF<sub>4</sub>玻璃。使二级光谱得到了校正满足了需求。

## 五、设计结果和成像质量

基于上述思路确定了最佳的结构参数，经电子计算机计算实际光线，得到象差曲线图6，二级光谱为0.005mm，引起弥散盘直径为0.00125mm，最大畸变小于十万分之七，相当

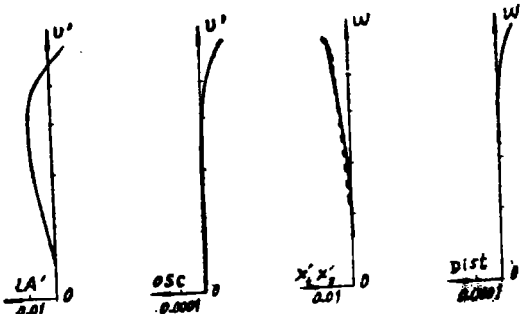


图6.a 象差曲线

于0.35 $\mu$ m。图7表示当空间频率250对线/mm时，视场与传递函数关系曲线。从图7可见：轴上到0.85视场以内 $MTF > 0.6$ ，全视场 $MTF > 0.58$ ，镜头装配后在共轭距离上检查，整个视场目视分辨 $\geq 800$ 对线/mm。用英国引进的传递函数装置对镜头进行了实测，与设计结果吻合。对初步实拍的干版在400倍显微镜下观察可分辨0.6~0.7 $\mu$ m。黑白线宽2 $\mu$ m的线条边缘平整，镜头的质量是理想的。

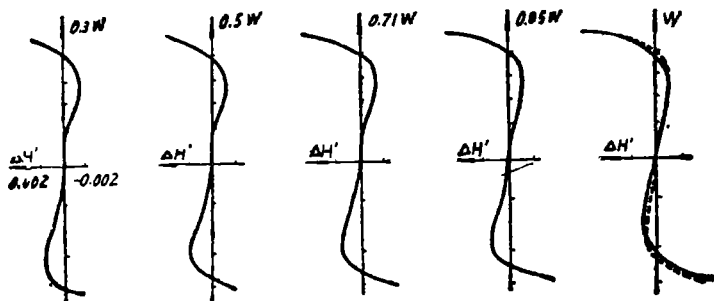


图6 b 象差曲线

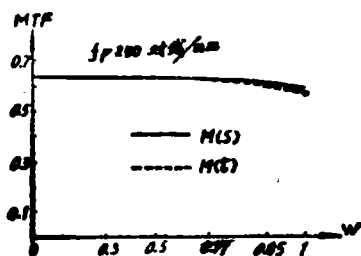


图7 视场W和MTF关系曲线

## 六、加工的几点考虑

精缩镜头是一种高精度的镜头，为了达到设计要求必须掌握以下几个环节。

(1) 用实测玻璃进行复算。选玻璃分两步，先对同一牌号不同炉号的玻璃用V形棱镜折射仪测得数据提供设计者粗选。测试精度一般可达 $\pm 2.5 \times 10^{-6}$ 。将被选中的玻璃再用大型精密测角仪精测，测试精度可达 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 。设计者可以从两次实测数据的规律判断是否有误。精缩镜头对实测玻璃的精度要求是 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。然后配样板，样板的精度要求为曲率半径的万分之三。加工前对样板必须进行实测。

(2) 合理的给出玻璃冷加工的公差，在加工中严加控制，公差中最严的要求如下：

透镜的厚度  $\Delta d = 0.003$

面形光圈  $N = 0.5$

面形局部光圈数  $\Delta N = 0.05$

空气间隔  $\Delta d_{\text{空}} = 0.005$

偏心差  $\Delta C = 0.003$

(3) 待加工后再对零件的半径透镜的厚度实测，并反馈给设计者，将几台的实测数据精心搭配，然后用这些数据和实测玻璃值一起重新用电子计算机校正空气间隔，以达到设计性能，提供装校师傅做为新的装配依据。精缩镜头对偏心差要求很严，装配中要加控制。

(4) 在装配过程中，设计、检验装配密切结合，一般都需要反复几次才能找出最佳状态。实践证明以上四步是必要的。当然机械公差的制定、对心、滚边、包边以及装配的技术水平、工艺的合理性等都很重要，本文在此不加叙述。

此项工作得到了翁志成同志的很多指导，并用他在M-160机上所编制的镜头设计软件包进行了白光传函计算，作者对此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 王之江，照象物镜设计——以一个大孔径照象系列设计为例，《光学设计文集》，国防工业出版社，1964，135~146。
- [2] 林大键，微缩镜头的一般介绍，《光学设计文集》，科学出版社，1976，1—14。
- [3] M. John. Buzowa. etc, Optical Systems for Direct Projection on Photoresists, Ultra-Microminiaturization Precision Photography for Electronic Circuitry, the Society of Photographic Scientists and Engineers, 1968, 42—58.
- [4] Edited by Woodlief Thomas, Jr, Spse Handbook of photographic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 1973, 367—358.

## Design of the Optical System for Pattern Generator

Yang Guangze

### Abstract

This paper briefly introduces the working characters of pattern generator, considerations of the structure principle and design of the optical system, including parameter determination, basic structure and image quality of precision reduction lenses.