

# 激 光 定 位 干 涉 系 统

陈 国 勋

(中国科学院光电技术研究所)

## 提 要

本文介绍新近研制成功的作为电子束曝光用的激光定位干涉系统。文章介绍了光学系统,光路计算结果,并阐述了利用检偏器调节干涉条纹相位的新方法,其定位精度为 $\pm 0.04\mu\text{m}$ 。

## 一、前 言

电子束曝光是近代微电子技术中最引人注目的一项新技术。它用聚焦的或成形的电子束在硅片或掩模板上曝光以制作大规模、超大规模集成电路,或声表面波、磁泡、光集成等器件。但是由于电子束扫描范围只有几个毫米,大面积图形的制作是依靠激光定位工件台来完成的。此工件台由计算机控制在 $X$ - $Y$ 两个方向上运动,并有一激光干涉系统精确测定其位置坐标。由于图形拼接与套准的精度要求很高,同时电子束曝光必须在真空中进行,因此,此激光定位干涉系统不仅要具有高的分辨率与精度,而且要求能放入真空室中,这就要求此干涉系统一经装入密闭的真空室内,即能稳定可靠地在其中长期工作,不再需要作任何零部件的调整。对于上述两点要求,一般的干涉系统是难以胜任的。本文介绍作者设计的一种激光干涉系统,它较好地实现了上述要求。

## 二、激光定位干涉系统

图1为此激光定位干涉系统的光学系统图。为了便于了解,图2中绘出了部分光路的体视图。图1,2中各光学部件分别为:1—氦氖激光器,2—窗口玻璃,3—扩束望远镜,4—分光板,5— $45^\circ$ 棱镜,6—聚光镜,7—分划板,8—玻璃板,9—光电接收器,10— $90^\circ$ 棱镜,11—组合干涉分光镜,12—检偏器,13—长条直角反射镜,14—工件台。图3为此系统放在电子束曝光装置真空室中的情形(激光器,检偏器,光电接收器在真空箱外)。

本系统的工作原理为目前广泛应用的光电转换,条纹可逆计数的干涉测长方法。系统包括两个相同的干涉仪。干涉仪由两个光学元件——组合干涉分光镜与长条直角反射镜构成。组合干涉分光镜的构造如图2所示,它由5块玻璃平板胶合而成,中间是一块四方玻璃块(15),在其四周胶上4块玻璃块,向下的两块镀有检光膜的分光镜(18)与合光镜(19),向上的两块(16, 17)镀全反射膜构成一个直角反射镜。长条直角反射镜由两块平板玻璃(20, 21)胶合镀膜而成。当两个长条直角反射镜随工件台移动时,4个光电接收器(22)分别给出测

收稿日期: 1982年8月11日,收到修改稿日期: 1982年10月29日

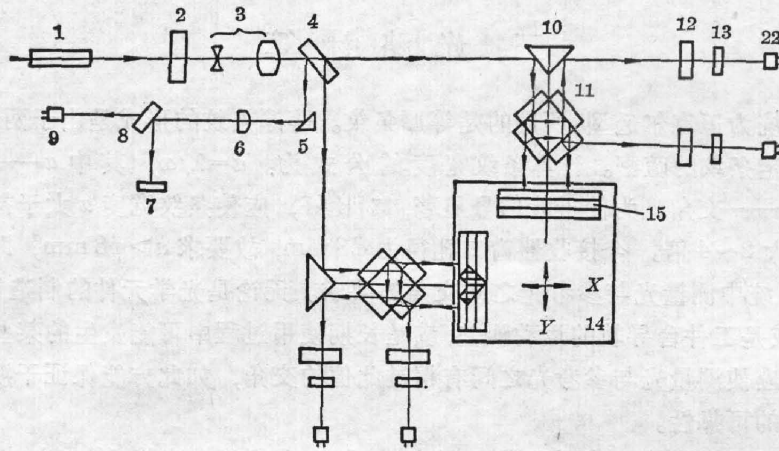


图1 光学系统

Fig. 1 The optical system

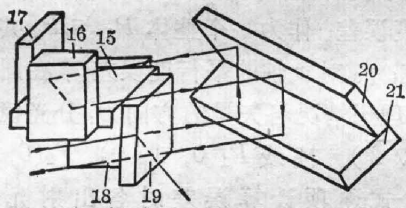
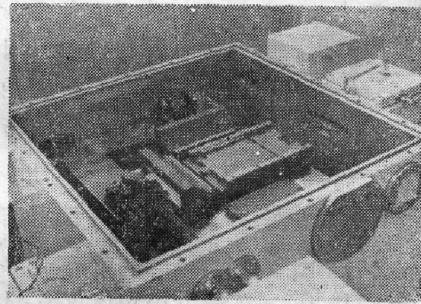


图2 部分光路体视图

Fig. 2 The stereogram of  
partial optical paths图3 安放在电子束曝光装置  
真空箱内的干涉仪Fig. 3 The interferometer mounted in  
the vacuum chamber of electron-beam  
exposure system

量  $X$ 、 $Y$  坐标的正弦、余弦信号。此信号经电子线路的放大、整形、细分、辨向、计数后，向计算机输送坐标位置代码，并用作伺服控制及数字显示。

本干涉系统的特点是：

(1) 独特的光路设计，干涉信号质量好且稳定。组合干涉分光镜与直角反射镜有不大的角度转动并不降低干涉信号的质量。

(2) 光学二倍频，提高了定位的灵敏度。其后采用简单的四倍频细分电路即可获得  $1/16$  波长 ( $0.04 \mu\text{m}$ ) 的分辨率。

(3) 利用偏振片的转动来获得精确的相位差  $90^\circ$  的正弦与余弦干涉信号，作细分及可逆计数辨向之用。

(4) 目视的对准系统，可以方便地校正激光器的位置，以保证测量的准确度。

### 三、光 路 计 算

本干涉系统为迈克尔逊型,所用的是等厚条纹。等厚条纹的形成是由于两相干光相交,其交角大小决定条纹的疏密。计算条纹宽度的公式为:  $a = \lambda / \omega$ , 其中  $a$ ——条纹宽度;  $\lambda$ ——波长;  $\omega$ ——交角。为使干涉信号显著,对比好,应使条纹宽度  $a$  大于接收器窗口孔径,一般要求大 2~4 倍。今接收器窗口孔径为  $\phi 3 \text{ mm}$ , 故要求  $a > \phi 6 \text{ mm}$ , 即相干光交角  $< 20''$ , 即本系统中测量光与参考光之间交角的要求。无论是光学元件的制造误差,或是装配调整误差,或是工件台导轨的运动误差,或是长期使用过程中可能发生的某些零部件位置的变动等都不应使测量光与参考光之间有超过此值的交角,如此方能保证干涉信号的高质量与长期工作的可靠性。

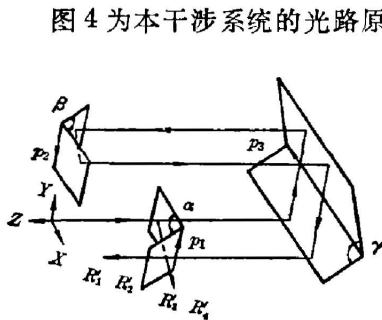


图 4 为本干涉系统的光路原理图。图中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为分光镜 18 与合光镜 19 之间、反射镜 16 与 17 之间、长条直角反射镜 20、21 之间的夹角(理论值均为  $90^\circ$ );  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  为它们形成的棱线;  $R$  为入射光,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  为 4 支出射光,  $R_1$ 、 $R_3$  为参考光,  $R_2$ 、 $R_4$  为测量光,  $R_1$  与  $R_2$  相干,  $R_3$  与  $R_4$  相干。

由图可知,本系统中可能使测量光与参考光之间产生交角的误差来源共有 7 项:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的角度误差;  $p_1$ 、 $p_2$  对  $y$  轴的平行度误差; 作为一个整体  $P_1$  与  $P_2$  共同对  $y$  轴的平行度误差;  $p_3$  对  $x$  轴的平行度误差。在图 3 中选取右手坐标系,理想情况各矢量的方向为:分光镜法线  $(1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$ , 合光镜法线  $(-1/\sqrt{2}, 0, 1/\sqrt{2})$ , 棱线  $P_1(0, 1, 0)$ ,  $P_2(0, -1, 0)$ ,  $P_3(-1, 0, 0)$ 。然后运用矩阵形式的矢量反射公式逐项计算误差时各出射光的方向:

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = [r]_K [r]_{K-1} \cdots [r]_1 \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix}, \text{ 其中: } [r] \text{ 为各面的反射作用矩阵; } \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \text{ 为入射光方向。}$$

单个反射面的作用矩阵为

$$[r] = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } N_x, N_y, N_z \text{ 为反射面法线的方向。}$$

$90^\circ$  直角反射镜的作用矩阵为:

$$[r] = \begin{bmatrix} 2p_z^2 - 1 & 2(p_x p_y + \varepsilon p_z) & 2(p_x p_z - \varepsilon p_y) \\ 2(p_x p_y - \varepsilon p_z) & 2p_y^2 - 1 & 2(p_y p_z + \varepsilon p_x) \\ 2(p_x p_z + \varepsilon p_y) & 2(p_y p_z - \varepsilon p_x) & 2p_z^2 - 1 \end{bmatrix},$$

其中  $p_x$ 、 $p_y$ 、 $p_z$  为反射镜棱线的方向,  $\varepsilon$  为反射镜直角误差。

计算结果列于下表。表中忽略了二阶小量。

表 各出射光方向计算值  
Table Calculated values of the direction for each exit ray

入 射 光 $R(0, 0, -1)$		出 射 光				结 论	干 涉 图
		$R'_1$	$R'_2$	$R'_3$	$R'_4$		
$\alpha$	$\Delta\alpha$	$(2\Delta\alpha, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 2\Delta\alpha)$	$(1, 0, 0)$	出现横向交角	
$\beta$	$\Delta\beta$	$(0, 0, 1)$	$(2\Delta\beta, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 2\Delta\beta)$	同 上	
$\alpha+\beta$	$\Delta\beta$	$(2\Delta\beta, 0, 1)$	$(2\Delta\beta, 0, 1)$	$(1, 0, 2\Delta\beta)$	$(1, 0, 2\Delta\beta)$	无 影响	均匀, 无干涉条纹
$\gamma$	$\Delta\gamma$	$(0, 0, 1)$	$(0, -4\Delta\gamma, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, -4\Delta\gamma, 0)$	出现竖向交角	
$P_1$	$\theta_x$	$(0, -2\theta_x, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, -\theta_x, 0)$	$(1, \theta_x, 0)$	同 上	
	$\theta_y$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	无 影响	均匀, 无干涉条纹
	$\theta_z$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, -\theta_z, 0)$	$(1, -\theta_z, 0)$	同 上	同 上
$P_2$	$\theta_x$	$(0, 0, 1)$	$(0, -2\theta_x, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, -2\theta_x, 0)$	出现竖向交角	
	$\theta_y$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	无 影响	均匀, 无干涉条纹
	$\theta_z$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	同 上	同 上
$P_1+P_2$	$\theta_x$	$(0, -2\theta_x, 1)$	$(0, -2\theta_x, 1)$	$(1, -\theta_x, 0)$	$(1, -\theta_x, 0)$	同 上	同 上
	$\theta_y$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	同 上	同 上
	$\theta_z$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, -\theta_z, 0)$	$(1, -\theta_z, 0)$	同 上	同 上
$P_3$	$\theta_x$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	同 上	同 上
	$\theta_y$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	同 上	同 上
	$\theta_z$	$(0, 0, 1)$	$(0, 0, 1)$	$(1, 0, 0)$	$(1, 0, 0)$	同 上	同 上

计算结果表明角  $\alpha$ 、 $\beta$  的误差  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  将使相干光产生横向交角, 出现垂直条纹, 但第三项计算表明如  $\alpha$ 、 $\beta$  角具有相同误差, 相干光却仍平行。角  $\gamma$  的误差  $\Delta\gamma$  将使相干光产生竖向交角, 出现水平条纹, 并且其影响程度较  $\alpha$ 、 $\beta$  的误差大一倍。棱线  $P_1$ 、 $P_2$  绕  $x$  轴的转动  $\theta_x$  也将使相干光产生竖向交角, 出现水平条纹。因此为了保证干涉信号的高质量, 必须控制好此五项误差。这在本系统中并不难做到, 因为只要在加工过程中控制好图 2 中四方玻璃块 15 的角度与尖塔差, 角  $\alpha$ 、 $\beta$  与棱线  $P_1$ 、 $P_2$  的精度就得到了保证; 控制好平板玻璃 20 的

直角度,角 $\gamma$ 的精度就得到了保证。以上诸项实际加工误差都在 $2''$ 以内。最后两项计算表明,作为一个整体的组合干涉分光镜与直角反射镜绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的转动不会破坏相干光方向的一致性,因而使装调及工件台导轨机械精度的要求大为降低,同时提高了长期工作的可靠性与稳定性。

需要说明的是上表给出的是以轴上矢量作为入射光 $R(0, 0, -1)$ 的计算结果,当入射光不在轴上时,计算结果是相同的,出射光之间的角度关系不变。

#### 四、光束错开的影响

本系统中组合干涉分光镜与直角反射镜的转动会造成相干光束的平行错开。如图5所示,当相干光不重合而平行错开时,则仅在重叠区发生干涉,同时条纹宽度变窄,因为波阵面不可能是理想的平面波。这也是本系统所不允许的。

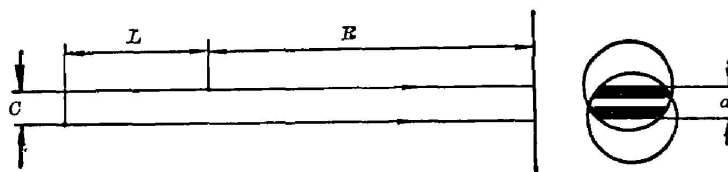


图5 光束平行错开

Fig. 5 Parallel shearing of the beams

计算光束错开的影响可采用下列近似公式:  $a = \lambda/c(R+L)$ , 其中 $a$ ——条纹宽度;  $\lambda$ ——波长;  $c$ ——光束错开量;  $R$ ——瞳与场之间的距离;  $L$ ——光程差。本系统中要求 $a > 6\text{mm}$ , 故有:  $c < \lambda/a(R+L) \approx (R+L) \cdot 10^{-4}$ 。本系统中瞳场间距离在 $10\text{m}$ 以上(它决定于激光束波阵面的曲率半径), 故光束允许错开量可达毫米数量级。因此本系统中组合干涉分光镜与直角反射镜可有数分至数十分的角度转动而不降低干涉信号的质量。

此外,本系统中入射光偏离轴线也会使测量光与参考光平行错开,同时还将引入定位误差。根据定位精度的要求,入射光偏离轴线的误差(光线准直误差)不得大于 $1'$ (此可借目视瞄准系统来保证)。此值对相干光束错开的影响不大。

#### 五、检偏器调相

在光电转换、条纹可逆计数的干涉测长系统中,由于加减计数的判别运动方向及细分的需要,干涉系统应能给出相位差 $90^\circ$ 的两组条纹以产生正弦与余弦的干涉信号。目前已有多种获得相位差的方法。本系统采用了一种新的调相方法——检偏器调相法。

本系统中反射面较多,入射的线偏振光经过多次反射后,因其 $S$ 分量与 $P$ 分量具有不同的相位跃变,出射的相干光为两个状态不同的椭圆偏振光,故本系统实为一椭圆偏振光干涉系统。设两束相干光的电矢量为:  $E_1(E_{x1} \exp i(\phi_{x1} - 2\pi L_1/\lambda), E_{y1} \exp i(\phi_{y1} - 2\pi L_1/\lambda))$ ,  $E_2(E_{x2} \exp i(\phi_{x2} - 2\pi L_2/\lambda), E_{y2} \exp i(\phi_{y2} - 2\pi L_2/\lambda))$ , 其中 $E_{x1}$ 、 $E_{y1}$ 、 $E_{x2}$ 、 $E_{y2}$ 为参考光



与测量光的电场分量;  $\phi_{x1}$ 、 $\phi_{y1}$ 、 $\phi_{x2}$ 、 $\phi_{y2}$  为其反射相位跃变;  $\Delta L = L_2 - L_1$  为光程差;  $\lambda$  为波长。

设检偏器透光轴与  $x$  轴成  $\theta$  角, 则检偏器后的干涉条纹光强之计算结果为<sup>[1,2]</sup>:

$$I = A + 2B \cos(\phi + 2\pi\Delta L/\lambda)。$$

式中

$$\begin{aligned} A &= \cos^2 \theta (E_{x1}^2 + E_{x2}^2) + \sin^2 \theta (E_{y1}^2 + E_{y2}^2) \\ &\quad + 2 \cos \theta \sin \theta [E_{x1}E_{y1} \cos(\phi_{x1} - \phi_{y1}) + E_{x2}E_{y2} \cos(\phi_{x2} - \phi_{y2})], \\ B^2 &= E_{x1}^2 E_{x2}^2 \cos^4 \theta + E_{y1}^2 E_{y2}^2 \sin^4 \theta + \cos^2 \theta \sin^2 \theta [E_{x1}^2 E_{y2}^2 + E_{x2}^2 E_{y1}^2 \\ &\quad + 4 E_{x1}E_{x2}E_{y1}E_{y2} \cos(\phi_{x1} - \phi_{y1}) \cos(\phi_{x2} - \phi_{y2})] \\ &\quad + 2 E_{x1}E_{y1} \cos \theta \sin \theta \cos(\phi_{x1} - \phi_{y1}) (E_{x2}^2 \cos^2 \theta + E_{y2}^2 \sin^2 \theta) \\ &\quad + 2 E_{x2}E_{y2} \cos \theta \sin \theta \cos(\phi_{x2} - \phi_{y2}) (E_{x1}^2 \cos^2 \theta + E_{y1}^2 \sin^2 \theta), \end{aligned}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{T_1 + T_2}{T_3 + T_4},$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } T_1 &= E_{x1}E_{x2} \cos^2 \theta \sin(\phi_{x1} - \phi_{x2}) + E_{y1}E_{y2} \sin^2 \theta \sin(\phi_{y1} - \phi_{y2}), \\ T_2 &= E_{x1}E_{y2} \cos \theta \sin \theta \sin(\phi_{x1} - \phi_{y2}) + E_{x2}E_{y1} \cos \theta \sin \theta \sin(\phi_{y1} - \phi_{y2}), \\ T_3 &= E_{x1}E_{x2} \cos^2 \theta \cos(\phi_{x1} - \phi_{x2}) + E_{y1}E_{y2} \sin^2 \theta \cos(\phi_{y1} - \phi_{y2}), \\ T_4 &= E_{x1}E_{y2} \cos \theta \sin \theta \cos(\phi_{x1} - \phi_{y2}) + E_{x2}E_{y1} \cos \theta \sin \theta \cos(\phi_{y1} - \phi_{x2}), \end{aligned}$$

$\phi$  即为干涉条纹的初相位。由上式知条纹初相位与  $\theta$  角有关。当转动检偏器使  $\theta$  角变化时, 条纹初相位可取  $(\phi_{x1} - \phi_{x2})$ 、 $(\phi_{y1} - \phi_{y2})$  或其它值。本系统正是利用这种原理使此两组干涉条纹之间产生精确的  $90^\circ$  相位差, 而此相位差是其后可逆计数与细分电路所必需的。

图 6 为转动检偏器后此两组干涉条纹经光电转换输入示波器上摄得的利萨如图照片。由照片可看出,  $90^\circ$  相位差具有足够的精确度。

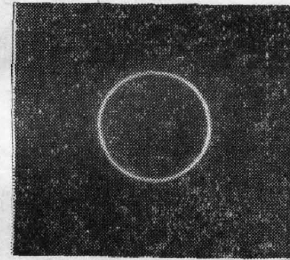


图 6 利萨如图

Fig. 6 The Lissajous pattern

## 六、结 语

本系统已经安装在一电子束曝光装置的真空密封室中连同一套四细分可逆计数电子线路进行工作。一年多来, 干涉图象始终保持与开始安装时相同。其定位精度经中国计量科学研究院检定为  $\pm 0.04 \mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] E. Hecht, A. Zajac; «Optics», (Addison-Wesley, Reading, Mass., 1979), 196~199.  
[2] M. Born, E. Wolf; «Principles of Optics», (Pergamon, Oxford, second revised edition, 1964), 544~545.

## **A laser interferometer for sample stage positioning**

CHEN GUOXUN

*(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica)*

(Received 11 August 1982, revised 29 October 1982)

### **Abstract**

A laser interferometer for sample stage positioning of electron beam lithography is developed. According to the characteristics of the electron beam lithography the optical arrangement and elements are specially considered. High resolution and stability are realized. The optical system of the interferometer, calculated results and the phase change method by polarizers are described. This interferometer setted in a vacuum chamber of a electron beam lithography system has been reliably working over one year. Repeatability of positioning is determined to be 0.04 micron.