

指示光源衍射所引起的位置敏感探测器 附加定位误差探讨

袁红星 贺安之 李振华 王志兴

(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

摘 要 介绍位置敏感探测器工作原理, 分析了其自动取光斑重心的定位机理。概括了位置敏感探测器的各种工作方式, 指出了在许多位置敏感探测器的应用场合, 光源衍射不可避免, 并从理论上分析了因衍射而造成的对位置敏感探测器定位的影响, 为估算由此造成的定位误差提供了理论依据, 同时对工程应用也有一定的参考价值。

关键词 衍射, 位置敏感探测器, 光斑定位, 定位误差。

1 引 言

位置敏感探测器是一种基于横向光电效应的光电位置敏感传感器。由于其具有很高的灵敏度和良好的瞬态响应特性以及紧凑的结构、简单的处理电路而倍受工程界的青睐, 在面型重构、形位误差检测、动态定位、振动描述、实时跟踪等诸多领域获得了广泛应用^[1-3]。自从 1930 年肖特基发现了横向光电效应^[4]后, 许多有关人士对这种效应及其应用潜力作了深入的探讨。Wallmark 利用内部载流子传输理论基本解释了横向光电效应^[5]; 后来 Moore 等则利用表面复合理论(surface recombination)有效地解释了横向光电效应^[6]; 而系统地解释并建立起横向光电效应方程的是 Lucovsky^[7], 他从电流连续性方程出发, 导出了著名的 Lucovsky 方程, 奠定了位置敏感探测器的理论基础; Noorlag 在他的博士论文^[8]中以双面分流型位置敏感探测器为例导出了位置敏感探测器自动取光斑重心的定位公式。此后, 位置敏感探测器在许多领域获得了非常广泛的应用。

位置敏感探测器在应用中大致有三种方式。第一种是将非相干光源如红外发光管安置在待测目标上, 由成像镜头将目标光点成像到位置敏感探测器敏感面上, 从而解算出目标位置的变化; 第二种情形是以相干光源如半导体激光二极管发出的光线作为基准, 而将目标的位置信号调制为位置敏感探测器的位置移动, 从而解算出目标位置信息; 第三种则是将目标的位置或方向信号调制为漫射屏上的光斑移动, 再由成像镜头将屏上光斑成像到位置敏感探测器敏感面上, 在此方式中仍然采用相干光源。

在后两种方式中, 均采用了相干光源如半导体激光二极管, 为保证光束质量而不得不附加一定的光阑, 因而衍射现象将十分明显而且不可避免; 位置敏感探测器敏感面上接收到的

光斑也因此实际上是一组以艾里光斑为中心的衍射环, 然而位置敏感探测器的敏感面有限, 故总有一部分衍射环跨出了位置敏感探测器的敏感面之外, 从而最终影响位置敏感探测器的定位精度。本文旨在定量揭示这种影响。为估算由此造成的定位误差提供理论依据, 同时对工程应用也有一定的参考价值。

2 位置敏感探测器的工作原理及其光斑定位机理

位置敏感探测器实际上是一块大面积 PN 结, 其中 P 型层重掺杂, N 型层轻掺杂。和一般 PN 结一样由于载流子扩散在结区建立起一个与结面垂直的自建内电场。但由于 P⁺ 层为重掺杂, 载流子浓度大, 故电导率高, 因此在入射点所形成的光生载流子在自建电场的作用下, 其中空穴进入 P⁺ 层, 并迅速扩散开来, 成为等电位区; 而 N 区由于轻掺杂, 电导率低, 进入 N 区的电子不易扩散, 仍集中在入射点附近, 从而具有相对较低的低电位, 因此形成一个平行于结面的横向电场。以一维位置敏感探测器为例, 当入射光信号照射到敏感面上某点时, 由于横向电场的作用, 使得光生载流子形成向两端流动的电流 I_1 和 I_2 , 它们之和等于总电流 I_0 。如果位置敏感探测器的面电阻是均匀的, 且其阻值 R_1 和 R_2 远大于负载电阻 R_L , 则阻值 R_1 和 R_2 仅取决于光点的位置, 即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{L-x}{L+x}, \quad (1)$$

经适当演算, 上式可化为

$$\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{x}{L}. \quad (2)$$

由此可见, 由电流 I_1 和 I_2 即可得出光点位置信息。二维位置敏感探测器工作原理与一维位置敏感探测器类似。

当然上面所述只是定性阐述了位置敏感探测器的工作原理, 并且只有将光斑视为一尺度无限小的几何点时才成立。在实际应用中光斑总有一定的大小, 而且形状各异, 强度呈现空间分布, 所以严格说来, 应由 Lucovskey 方程(3)解算:

$$\nabla^2 \varphi - \left(\frac{\rho_p C}{W_p}\right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \left(\frac{\rho_p J_d}{W_p}\right) \left[\exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right) - 1\right] = \left(\frac{\rho_p q}{W_p}\right) f_s(r, t), \quad (3)$$

式中 C 为势垒电容, $\varphi(r, t)$ 为时刻 t 位置 r 处的电势, W_p 代表 P 区厚度, ρ_p 代表 P 区电阻率, $f_s(r, t)$ 代表信号光在 t 时刻位置 r 处的电子空穴对发生函数, J_d 为反向饱和电流密度, q 为电荷,

$$q/kT = 40 V^{-1} (300 K),$$

对于反偏状态下的位置敏感探测器, φ 为负值指数项, 接近于零, 而使得方程(3)得以线性化:

$$\nabla^2 \varphi - \left(\frac{\rho_p C}{W_p}\right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\rho_p J_d}{W_p} = - \left(\frac{\rho_p q}{W_p}\right) f_s(r, t). \quad (4)$$

从方程(4)可以看出, 右端 $-\left(\frac{\rho_p q}{W_p}\right) f_s(r, t)$ 为信号光产生的强迫项, 而左端项 $\frac{\rho_p J_d}{W_p}$ 则代表了外加偏置、漏电流和背景光的影响。对双面分流型位置敏感探测器的边界条件下, Noorlag 给出了由(3)简化后的方程(4)的解:

$$\varphi(x, y) = \frac{q\rho_p}{\pi^2 W_p} \iint_{\Omega} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x_0}{l} \sin \frac{m\pi x}{l} \cos \frac{n\pi y_0}{l} \cos \frac{n\pi y}{l}}{m^2 + n^2} J_s(x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (5)$$

式中积分区域 Ω 为光斑覆盖范围与位置敏感探测器敏感面的交集, 其中 $J_s(x_0, y_0)$ 为光斑覆盖范围内光电流密度, 与光照度成正比, (x_0, y_0) 为上述交集内的活动坐标。设 I_s 为总光电流, 与总光强成正比。则可计算出两电极上取得的电流:

$$I_{1s} = \frac{W_p}{\rho_p} \int_0^l \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=0} dy = I_s \left(1 - \frac{x_{Gs}}{l}\right), \quad (6)$$

$$I_{2s} = I_s \frac{x_{Gs}}{l}, \quad (7)$$

其中

$$x_{Gs} = \frac{\iint x_0 J_s(x_0, y_0) dx_0 dy_0}{\iint J_s(x_0, y_0) dx_0 dy_0}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 电极电流所反映的位置坐标正是光斑的光强重心, 而且在一定的光强范围内, 只要光强空间分布不变, 坐标位置与光强大小无关。但倘若某种因素导致光斑光强重新分布, 都会或多或少地影响位置敏感探测器的定位精度; 下面将要分析的衍射现象尽管没有破坏光斑原有的中心对称性, 但衍射后相对原光斑有所弥散, 导致能量在更大的范围内分配, 故而由于位置敏感探测器的不均匀性以及敏感面的有限大小无法收集全部能量而引起位置误差。本文将忽略位置敏感探测器的不均匀性而集中精力讨论位置敏感探测器收集能量的不完备所导致的误差。

3 相干光源在位置敏感探测器靶面上的衍射光强分布及简化描述

在前言中曾提到位置敏感探测器有几种工作方式, 其中第二种是以加光阑的相干光源如半导体激光管来直接反映目标位置或方向的变化, 并以光杠杆放大的方式最终转化为位置敏感探测器靶面上光斑的移动, 如图 1 所示。



Fig. 1 PSD working with coherent light source

但正如前面所分析的, 此时由于衍射的作用, 位置敏感探测器靶面上所接受到的除了艾里光斑外, 还有一级、二级、三级乃至更多级的衍射环的部分或全部。在许多应用场合, 光源与位置敏感探测器靶面之间的距离 l_0 与光阑孔径 $D = 2R$ 及位置敏感探测器尺度 L 相比很大, 故此时光阑对光源的衍射可视为夫朗和费衍射。设光阑处的坐标系为 $x_0 y_0$, 位置敏感探测器处的坐标系为 $x_1 y_1$, 则位置敏感探测器处光强分布为

$$I(\rho) = [c(\pi R^2) \frac{J_1(2\pi R\xi)}{\pi R\xi}]^2 = I_0 [\frac{J_1(2\pi R\xi)}{\pi R\xi}]^2 = I_0 [\frac{2J_1(u)}{u}]^2, \quad (9)$$

式中 R 为光阑半径, c 为一特定常数, ξ 为与位置敏感探测器靶面坐标系矢径 r 相关的量:

$$\xi = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda l_0} = \frac{r}{\lambda l_0} = \frac{\sin \theta}{\lambda}, \quad (10)$$

$$u = 2\pi R\xi, \quad I_0 = c(\pi R^2),$$

式中 J_1 为第一类贝塞耳函数, θ 为艾里光斑边缘对光阑中心之张角。可见, 当艾里光斑向位置敏感探测器靶面边缘移动时, 高级次衍射环将有部分或全部跨出位置敏感探测器靶面如图 2 所示, 而由(8)式不难看出, 这种趋势必将导致位置敏感探测器定位的误差, 下面来具体分析这种影响。在分析之前, 先将衍射强度分布的特点列于表 1。

由(8)式可知, 光斑坐标的计算需对光斑覆盖的面积与位置敏感探测器敏感面的交集进行面积分。而反映衍射光强分布的公式(9)包含了较为复杂的第一类贝塞耳函数, 这必将引起积分的困难。为了避开这种困难, 并根据位置敏感探测器自动取光强重心的特点, 可以将衍射分布视为如图 3 所示的光强集中在各级条纹强度极大值圆处的无宽度且具有均匀能量线分布的一圈圈圆环(中央零级条纹可视为集中了 83.78% 能量的几何点), 圆环的角半径及能量百分比参见表 1。从表中可以看出, 零级、一级、二级、三级亮环共占总能量的约 95%, 而其它级次在一定的 l_0 范围内将超出位置敏感探测器敏感面, 不参与光斑坐标的确定。

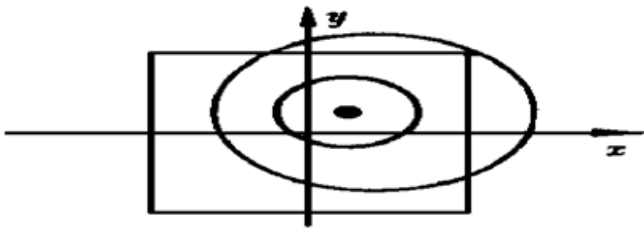


Fig. 2 Surface integral over diffraction fringes



Fig. 3 Simplified model of diffraction fringe

Table 1. Distribution of diffraction fringe

fringe order	u	$\theta(R = 1 \text{ mm})/(\text{''})$	energy distribution/%
Airy disk	0	0	83.78
1st order min	3.83	138	0
1st order max	5.15	186	7.22
2nd order min	7.02	252	0
2nd order max	8.41	303	2.77
3rd order min	10.17	367	0
3rd order max	11.60	418	1.62
4th order min	13.32	480	0

为了讨论方便, 有必要先将 l_0 划分为一系列区间, 在不同的区间考虑衍射的影响。不难设想, l_0 较小时, 由于衍射角半径一定, 衍射环将绝大部分进入位置敏感探测器靶面, 相对影响较小; 随着 l_0 的增大, 进入位置敏感探测器靶面的衍射环将越来越少, 将关注只有四个、三个、两个乃至一个衍射亮纹(包括零级光斑) 进入位置敏感探测器靶面的临界距离 $l_{\max 3}$ 、 $l_{\max 2}$ 、 $l_{\max 1}$ 、 $l_{\max 0}$ 上的影响; 当 $l_0 = l_{\max 0}$, 艾里光斑将充满位置敏感探测器靶面, 此时位置敏感探测器对光阑的张角等于艾里光斑的角半径, 位置敏感探测器已无法对移动的光斑定位。现

以日本滨松公司生产的 S1880 型位置敏感探测器为例由(11) 式分别推导出临界距离 $l_{\max 3}$ 、 $l_{\max 2}$ 、 $l_{\max 1}$ 、 $l_{\max 0}$ ，该位置敏感探测器敏感面大小 D 为 $12 \times 12 \text{ mm}^2$ 。为明确起见，将计算结果列于表 2。

$$l_{\max \lambda} = \frac{D}{2 \tan \theta_i} \approx \frac{D}{2\theta_i} \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (11)$$

Table 2 Critical distance for S1880 PSD

$\theta_i / (^\circ)$	480	367	252	138
$l_{\max i} / \text{m}$	2.58	3.37	4.91	8.97

4 衍射对位置敏感探测器定位的影响分析

现就临界距离 $l_{\max 3}$ 上因衍射所引起的定位误差进行讨论，其它距离上的情况与此类似。为了保证一定的精度，零级亮纹应始终处于位置敏感探测器靶面上，这就限制了光斑移动范围，不难计算此时有效敏感面仅为位置敏感探测器中央约 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 的区域。记艾里光斑中心坐标为 (x_0, y_0) ，此即为位置坐标的真值，若只有艾里光斑作用则由(8) 式计算出的光斑位置即为 (x_0, y_0) ；而由(8) 式不难看出，当有多个独立的光斑同时作用于位置敏感探测器时，求等效坐标位置 (x', y') 时与组合质量块求等效质心时类似，是各个光斑单独作用时的以光强为权重的坐标位置 (x_i, y_i) 的加权平均，设各级条纹光强相对值分别为 $I_i (i = 0, 1, 2, 3)$ ，则有(12) 式成立：

$$x' = \frac{\sum I_i x_i}{\sum I_j} \quad (12a)$$

$$y' = \frac{\sum I_i y_i}{\sum I_j} \quad (12b)$$

对于临界距离 $l_{\max 3}$ 的情况只要分析一级衍射环在位置敏感探测器上的等效坐标 (x_1, y_1) ，

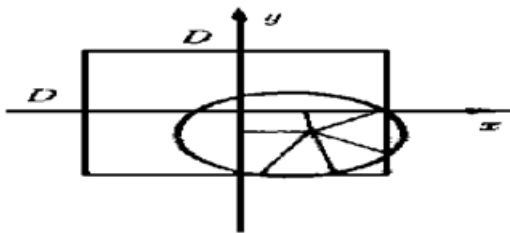


Fig. 4 Center of mass of several arcs

则综合等效坐标位置 (x', y') 可根据(12) 式计算。所以现在要解算出不同中心位置 (x_0, y_0) 处的等效坐标 (x_1, y_1) 。此种情形相当于对图 4 中由 $D \times D$ 大小的正方形限定的具有均匀质量分布的半径为第一衍射环极大

值圆 $r_{\max 1} (r_{\max 1} < \frac{D}{2})$ 的几部分圆弧求质心坐标。设第一

暗纹半径为 $r_{\min 1}$ ，则位置敏感探测器有效敏感面相应地只有 $(D - 2r_{\min 1})$ ，则第一衍射环极大值圆的方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_{\max 1}^2. \quad (13)$$

从表 1 不难计算出， $r_{\max 1} = 4.57 \text{ mm}$ 、 $r_{\min 1} = 3.28 \text{ mm}$ ，从而第一衍射环上参与积分运算的圆弧有几部分(衍射环中心在坐标轴上时除外)。故下面分两种情况进行讨论：当衍射环沿坐标轴时的等效位置和相应位置误差及衍射环中心不在坐标轴上时的等效位置和响应位置误差。

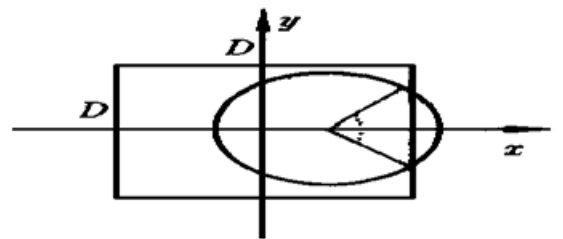


Fig. 5 Center of mass of an arc

4.1 衍射环中心在坐标轴上移动的情形

先以衍射环中心在 x 轴上移动的情形进行讨论，此时参与积分运算的只有一部分圆弧，

如图 5 所示, 因光强均匀分布于整个衍射环上, 故 $J_s(x_0, y_0) = \frac{1}{2}\pi r_{\max 1}$ 。

$$x_1 = \frac{\int_s x J_s(x_0, y_0) dx_0 dy_0}{\int_s J_s(x_0, y_0) dx_0 dy_0} = x_0 + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos \theta}{2\pi r_{\max 1}} r_{\max 1} d\theta =$$

$$\begin{cases} x_0 & (|x_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ x_0 \pm \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |x_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |x_0| < D/2 - r_{\min 1}), \end{cases} \quad (14a)$$

$x_0 > 0$ 取负, 否则取正,

$$y_1 = 0. \quad (14b)$$

根据(12)式可计算得到中央亮斑与一级衍射环共同作用时的等效位置坐标:

$$x' = \frac{I_0}{I_0 + I_1} x_0 + \frac{I_1}{I_0 + I_1} x_1 =$$

$$\begin{cases} x_0, & (|x_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ x_0 \pm \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |x_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |x_0| < (D/2 - r_{\min 1}), \end{cases}$$

$x_0 > 0$ 取负, 否则取正,

(15a)

$$y' = 0. \quad (15b)$$

所以定位误差为

$$|\Delta x| = \begin{cases} 0 & (|x_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |x_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |x_0| < (D/2 - r_{\min 1}), \end{cases} \quad (16a)$$

$$|\Delta y| = 0. \quad (16b)$$

同理, 衍射环中心在 y 轴上移动时, 相应的等效位置坐标及位置误差为

$$x' = 0, \quad (17a)$$

$$y' = \begin{cases} y_0 & (|y_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ y_0 \pm \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |y_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |y_0| < (D/2 - r_{\min 1}), \end{cases} \quad (17b)$$

$y_0 > 0$ 取负, 否则取正.

$$|\Delta x| = 0, \quad (18a)$$

$$|\Delta y| = \begin{cases} 0 & (|y_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |y_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |y_0| < (D/2 - r_{\min 1}). \end{cases} \quad (18b)$$

4.2 衍射环中心不在坐标轴上移动的情形

衍射环中心不在坐标轴上移动时, 参与积分运算的将有几部分圆弧组成, 参看图 4。同样因光强均匀分布于整个衍射环上, 故 $J_s(x_0, y_0) = \frac{1}{2}\pi r_{\max 1}$, 相应的等效位置坐标为

$$x_1 = x_0 + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\cos \theta}{2\pi r_{\max 1}} r_{\max 1} d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} \frac{\cos \theta}{2\pi r_{\max 1}} r_{\max 1} d\theta =$$

$$\begin{cases} x_0 & (|x_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ x_0 \pm \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |x_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |x_0| < (D/2 - r_{\min 1})), \end{cases} \quad (19a)$$

$x_0 > 0$ 取负, 否则取正,

$$y_1 = y_0 + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{r_{\max 1} \sin \theta}{2\pi r_{\max 1}} r_{\max 1} d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} \frac{r_{\max 1} \sin \theta}{2\pi r_{\max 1}} r_{\max 1} d\theta =$$

$$\begin{cases} y_0 & (|y_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ y_0 \pm \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |y_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |y_0| < (D/2 - r_{\min 1})), \end{cases} \quad (19b)$$

$y_0 > 0$ 取负, 否则取正.

可见尽管参与积分的圆弧有几部分, 但所得结果形式上与衍射环中心在坐标轴上的情况类似, 事实上, 这是对称性所带来的必然结果。类似地, 相应等效位置坐标及位置误差一定与 (15a)、(17b) 及 (16a)、(18b) 相同。综上所述, 整个位置敏感探测器敏感面上位置误差形式如下:

$$|\Delta x| = \begin{cases} 0 & (|x_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |x_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |x_0| < (D/2 - r_{\min 1})), \\ \text{不用} & (D/2 - r_{\min 1} < |x_0| < D/2), \end{cases} \quad (20a)$$

$$|\Delta y| = \begin{cases} 0 & (|y_0| < D/2 - r_{\max 1}), \\ \frac{I_1}{I_0 + I_1} \frac{\sqrt{r_{\max 1}^2 - (D/2 - |y_0|)^2}}{\pi} & (D/2 - r_{\max 1} < |y_0| < (D/2 - r_{\min 1})), \\ \text{不用} & (D/2 - r_{\min 1} < |y_0| < D/2). \end{cases} \quad (20b)$$

以日本滨松公司生产的 S1880 型 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 二维位置敏感探测器为例, 由 (20a) 和 (20b) 式的计算结果可以绘出在 $l_{\max 3} = 2.58 \text{ m}$ 距离上, 整个位置敏感探测器有效敏感面 ($D - 2r_{\min 1}$) 内的理论误差面型, 如图 6 所示, 其中 x 、 y 坐标为位置敏感探测器尺度, 单位为 mm。



Fig. 6 Theoretical error distribution on the sensitive area of PSD caused by diffraction. (a) Error profile in x direction, (b) Error profile in y direction

5 实 验

为验证上述理论计算, 本工作设计了如下实验, 实验装置如图 7 所示。为了得出因衍射造成的误差, 而将位置敏感探测器架在二维移动平台上, 其移动的实际距离可由两正交方向

上的螺旋千分尺读出, 位置敏感探测器的读数由与之相连的微机采样得到。采样值与千分尺相应读数之差即为光源衍射引起的附加位置误差。激光器和位置敏感探测器的相对位置按上面计算的临界距离 $l_{\max 3} = 2.58 \text{ m}$ 布置。实验中所采用的位置敏感探测器及信号处理电路为日本滨松公司生产的 S1880 型 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 二维位置敏感探测器及相应的配套电路, 激光器为 3 mW 半导体激光器。图 8 为实际测出有效敏感面 ($D - 2r_{\text{nl}}$) 内的误差面型, 其中 x 、 y 坐标为位置敏感探测器尺度, 单位为 mm , 纵向坐标为对应位置的位置误差, 单位为 μm 。对比图 6 和图 8, 如排除位置敏感探测器本身的不均匀性及其他偶然因素所造成的局部差异, 理论值和实际值基本吻合, 从而进一步证实了衍射所造成的位置敏感探测器误差在长距测量中不可忽视, 它与其他因素造成的误差相比非常明显。

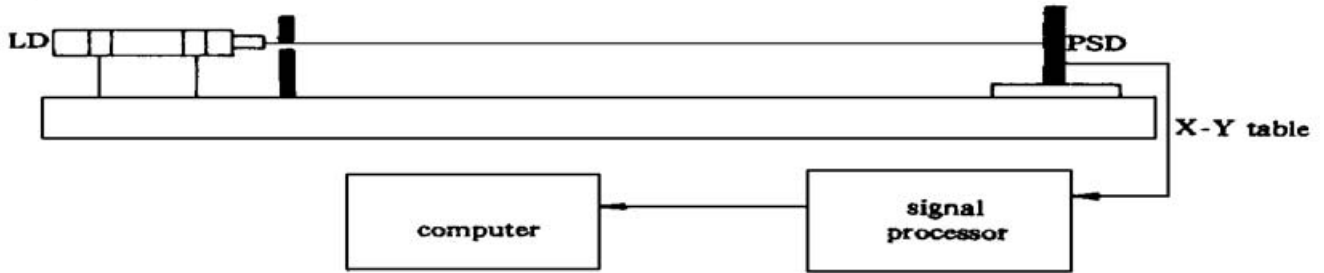


Fig. 7 Experimental set-up for study of the position error caused by diffraction

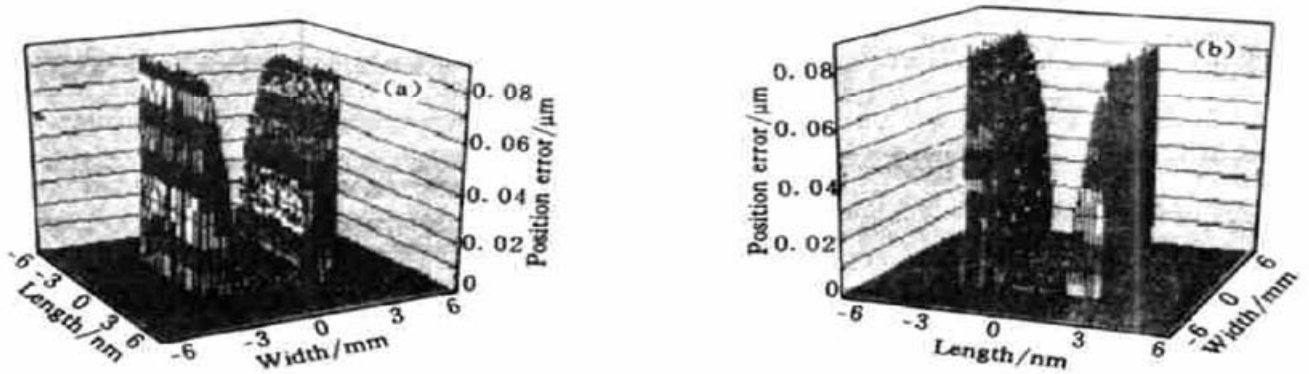


Fig. 8 Experimental error distribution on the sensitive area of PSD caused by diffraction. (a) Error profile in x direction, (b) Error profile in y direction

结论 由表 1 可知, $\frac{I_1}{I_0} = \frac{7.22}{83.78} = 0.086$, 另外根据表 1, 不难计算出, $r_{\max 1} = 4.57 \text{ mm}$ 、 $r_{\min 1} = 3.28 \text{ mm}$, 从而位置敏感探测器上最大理论误差

$$|\Delta x| = \frac{0.086}{1 + 0.086} \frac{\sqrt{4.57^2 - [12/2 - (12/2 - 3.28)]^2}}{3.1416} \approx 0.08 \text{ mm}, \quad (21a)$$

$$|\Delta y| = \frac{0.086}{1 + 0.086} \frac{\sqrt{4.57^2 - [12/2 - (12/2 - 3.28)]^2}}{3.1416} \approx 0.08 \text{ mm}. \quad (21b)$$

可见, 在长距测量中因指示光源不可避免的衍射所带来的定位误差与位置敏感探测器固有精度(微米量级)相比不可忽视。另外, 在推导上述公式时都将艾里光斑下限制在位置敏感探测器敏感面内, 倘若艾里光斑也有部分越过位置敏感探测器敏感面, 则所带来的定位误差必将更加可观。所以, 测量时若采用上面提到的方式 2, 为了保证测量的精度, 距离 l_0 越小越好。限于篇幅, 本文只就临界距离 $l_{\max 3}$ 的情况进行了讨论, 其它情况可进行类似探讨。

参 考 文 献

- [1] Hausler G, Schneider G. Testing optics by experimental ray tracing with a lateral effect photodiode. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24) : 5160~ 5164
- [2] Lu A, Yuan H, Qian C *et al.*. Brief introduction of straightness curvature measurement system for straight tube using tangent method and error analysis. *Proc. SPIE*, 1996, **2899** : 180~ 185
- [3] 丁海曙, 王广志, 黄欣等. 用位置敏感探测器传感器实现多点运动轨迹的二维和三维实时检测. 清华大学学报, 1992, **32**(4) : 79~ 85
- [4] Schottky W H. Uber den entstehungsort der photoelektronen in Kupfer-Kupferoxydulphotozeiten. *Phys. Z. Leizig.*, 1930, **31**(4) : 913~ 925
- [5] Wallmark J T. A new semiconductor photocell using lateral photoeffect. *Proc. IRE*, 1957, **45** : 474~ 483
- [6] Moore A R, Webster W M. The effective surface recombination of a germanium surface with a floating barrier. *Proc. IRE*, 1955, **43** : 427~ 435
- [7] Lucovsky G. Photo-effects in non-uniformly irradiated P-N junctions. *J. Appl. Phys.*, 1960, **31**(6) : 1088~ 1095
- [8] Noorlag D J W. Lateral-photoeffect position-sensitive detectors. (dissertation) Delft, Netherlands: Delft University, 1982, 70~ 78

Additional Position Error of PSD Caused by Diffraction of Light Source

Yuan Hongxing He Anzhi Li Zhenhua Wang Zhixing

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

(Received 10 July 1998; revised 26 October 1998)

Abstract The principle of position sensitive detector (PSD) is introduced, and automatic determination of the center of the intensity of light spot is analyzed. Various working modes are also outlined. As a main probeam, the unavoidable diffraction of light source in many applications is pointed out. Theoretical analysis of position error caused by diffraction is presented accordingly, which makes it possible to evaluate such additional position error quantitatively and guide the application of PSD.

Key words diffraction, PSD, spot location, position error.