

四边型位置敏感探测器位置公式的改进

陶忠祥^{1,2} 单纯玉¹ 宋建中¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所图像研究室, 长春 130033)

(2 空军第二航空学院航空军械工程系, 长春 130022)

摘要 四边形位置敏感探测器(PSD)的传统位置计算公式不能正确反映实际光斑位置,存在严重的枕形失真,需要进行复杂的修正. 基于 Lucovsky 方程的解析解,提出了改进型的 PSD 计算公式,结果表明,采用改进型公式可以使用少量数据完成对 PSD 的非线性修正,极大地提高 PSD 中央大部区域的线性度. 对于 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的 PSD,在 60% 光敏面的区域内均方根误差小于 $3 \mu\text{m}$,非线性度小于 0.05%,该公式适用于所有的四边形 PSD,对于 PSD 的实际应用具有重要意义.

关键词 位置敏感探测器;位置误差;线性度;修正

中图分类号 TN15 **文献标识码** A

0 引言

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector,简称 PSD)是一种对入射光能量重心位置敏感的光电器件. 其工作原理是基于大面积 PN 结的横向光电效应. 该光电效应已由 Lucovsky 方程描述^[1]. 同 CCD 相比,PSD 具有连续测量入射光斑的位置且响应速度快等优点,因此其在精密测量、三维空间定位等领域应用比较广泛^[2,3]. PSD 可分为一维和二维两种类型. 二维 PSD 根据结构又可分为单面分流型、双面分流型和枕型等几种类型,其中单面分流型中的四边形 PSD 由于制作和结构简单、暗电流小、反偏电压施加容易、价格低等优点得到了广泛的应用,美中不足的是其枕形失真比较严重,限制了其应用范围. 目前提高四边形 PSD 线性度的方法主要是进行非线性修正^[4-7]或是通过建立模型对 PSD 位置计算公式进行改进^[8]. 前一种方法需要在实际条件下对 PSD 进行覆盖式扫描测量,以获得大量的数据进行非线性修正运算,不但实验工作量大,而且需要占用一定量的存储空间. 同一种型号的不同 PSD,若实际条件发生变化,都需要重新测量和修正. 后一种方法对同一型号的所有 PSD 具有适用性,是较为理想的一种方法. 本文从四边型 PSD 的电流分布规律出发,研究了其位置计算公式的改进.

1 PSD 的结构及工作原理

PSD 通常采用 PIN 三层结构,P 层是光敏面,在光敏面的边缘位置设置信号引出电极,底层 N 与反偏电极联在一起. 当非均匀光照射到光敏面上时,将在入射点和引出电极间产生横向电势. 根据电极

输出的电流和电极间距可计算出入射光能量重心的位置. 二维 PSD 结构如图 1.

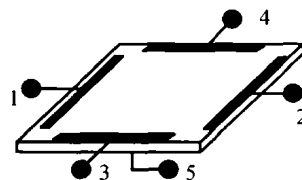


图 1 四边形 PSD 电极形状
Fig. 1 Structure of Tetra-lateral PSD

图 1 中,1、2、3、4 表示光电流引出电极,5 是反偏电极. 描述 PSD 的 Lucovsky 方程表示如下.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{r} \nabla \varphi \right) - \frac{J_s}{W_p} (e^{k\varphi} - 1) = -\frac{qf}{W_p} \quad (1)$$

式中, φ 是 PN 结电位, r 是 P 区电阻率, J_s 是 PN 结反向饱和电流密度值, W_p 表示 P 区厚度, f 表示单位时间单位面积被分离的光生电子空穴对数,实际上代表了光照强度. 对于四边型二维 PSD,其各个电极的光电流为

$$I_1 = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=-L/2} dy$$

$$I_2 = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{-1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=L/2} dy$$

$$I_3 = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=-L/2} dx$$

$$I_4 = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{-1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=L/2} dx$$

假设以 PSD 光敏面中心为坐标原点,电极间距为 L ,则对于四边型 PSD,其传统位置计算公式为

$$x = \frac{L}{2} \frac{(I_2 - I_1)}{(I_2 + I_1)}, y = \frac{L}{2} \frac{(I_4 - I_3)}{(I_4 + I_3)} \quad (2)$$

电极光电流的计算可以采用解析法^[9],然后根据式(2)计算出射光斑位置. 假设 PSD 的光敏面积为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$,光斑的扫描范围为 $X: [-0.4, 0.4]$, $Y: [-0.4, 0.4]$,扫描间隔为 0.1 cm ,由此得到的四

边型 PSD 的光斑计算位置如图 2.

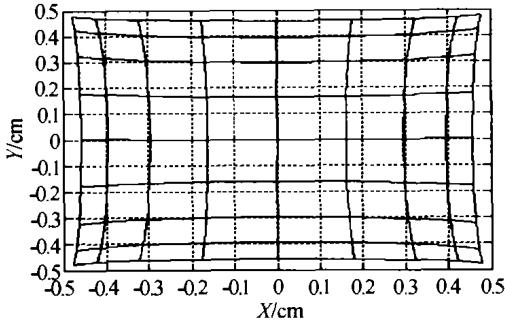


图 2 四边形 PSD 位置网格图
Fig. 2 Position map of tetra-lateral PSD

图 2 中虚线表示实际的光斑位置,实线表示根据式(2)计算得到的光斑位置. 从该图可以看出,计算光斑位置与实际光斑位置有误差,呈非线性枕型分布,这说明了式(2)不能准确反映实际光斑位置.

2 位置计算公式的改进

首先从 PSD 电极电流的变化来说明非线性成因. 选取不同的纵坐标,使光斑沿着 PSD 的水平方向扫描,计算出 $I_1 + I_2$ 、 $I_2 - I_1$ 、 $I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ 的值并画出曲线如图 3.

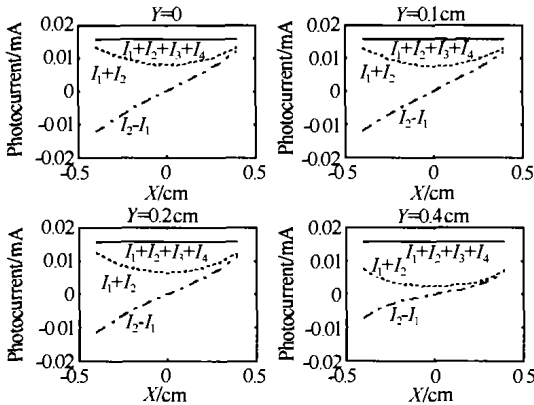


图 3 电流分布曲线
Fig. 3 Current distribution of tetra-lateral PSD

从图 3 可以看出,当光斑水平扫描时,与一维 PSD 不同的是, $I_2 - I_1$ 随位置改变而呈现非线性变化, $I_1 + I_2$ 也不恒定,它们都随纵坐标的变化而改变,这样按式(2)计算得到的光斑位置与实际光斑位置之间呈现非线性对应关系. 从图中还可以看出,无论光斑在任何位置,只要光强不变,四个电极光电流之和不变. 实际上,由于四边形 PSD 的电极结构特点,任何一点的 X 坐标或 Y 坐标不仅仅与对应的两个电极电流有关,而且与另外两个电极电流有关,这在式(2)中却没能反映. 为此,本文提出以下改进的位置计算公式.

$$x = \frac{L}{2} \frac{(I_2 - I_1 + K \frac{(I_2 - I_1)}{(I_2 + I_1)}(I_3 + I_4))}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (3)$$

$$y = \frac{L}{2} \frac{(I_4 - I_3 + K \frac{(I_4 - I_3)}{(I_4 + I_3)}(I_1 + I_2))}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (4)$$

式(3)、(4)与(2)的区别在于分母由恒定的总光电流代替,另外两个电极电流之和出现在分子中,其含义是将另外两个电极电流重新分配. 公式简化后为

$$x = \frac{L}{2} \frac{(I_2 - I_1)(I_1 + I_2) + K(I_2 - I_1)(I_3 + I_4)}{(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)(I_1 + I_2)} \quad (5)$$

$$y = \frac{L}{2} \frac{(I_4 - I_3)(I_3 + I_4) + K(I_4 - I_3)(I_1 + I_2)}{(I_1 + I_2 + I_3 + I_4)(I_3 + I_4)} \quad (6)$$

式中 K 的取值对位置计算结果有影响,当 $K = 1$ 时,上述公式演化成式(2).

以式(5)和(6)为计算公式,当 K 取不同的值时的光斑位置分布如图 4.

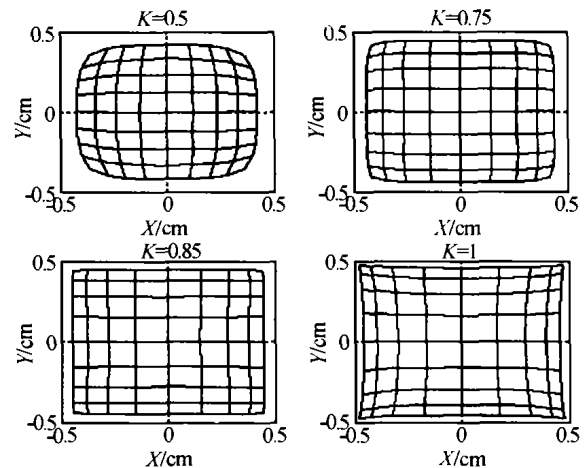


图 4 K 取不同值时四边形 PSD 位置网格图
Fig. 4 Position map of tetra-lateral PSD for different K

从图中可以看出,当 K 取不同值时,得到的位置网格图也不同. 当 K 由小变大时,位置网格图由桶型失真逐步过渡到枕型失真,因此,适当选择 K 值,可以使得 PSD 的中央区域枕形失真或桶形失真得到大幅改善. 图中当 K 取 0.75 时,PSD 除了四个边缘位置还存在桶形失真外,中间大部区域这种失真非常小. 同时还可以看出,当 K 取 0.75 时,光斑的计算位置和实际位置相比依然存在非线性误差,需要进一步修正. 但由于网格图基本由直线组成,这意味着只要根据 PSD 坐标轴线上的少量光斑位置数据就可完成大部区域的误差修正,因此可以通过一个统一的修正公式使 PSD 的中央区域实现良好的线性度. 计算表明 K 的取值与 PSD 大小没有关系.

如果采用多项式修正,设修正公式为

$$x' = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (7)$$

$$y' = ay^4 + by^3 + cy^2 + dy + e \quad (8)$$

式中 x 和 y 是根据式(5)、(6)且 K 取 0.75 时

得到的, x' 和 y' 是实际光斑位置坐标. 这样, 知道了任何一个坐标轴上的光斑位置数据就可以计算出各个系数值. 因此极少量的数据就可以完成 PSD 的非线性修正. 针对表面积为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的 PSD, 我们通过解析法求得沿 X 轴线的一组位置数据, 代入式 (7)、(8) 后可得到各个系数值. 修正后的 PSD 位置网格图如图 5.

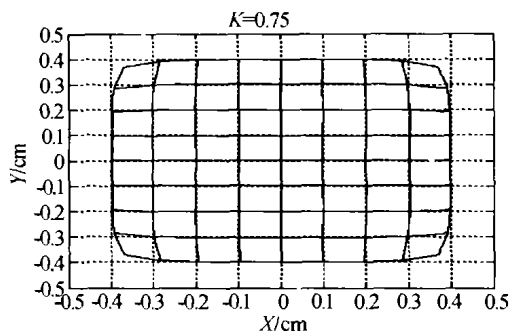


图 5 修正后的四边形 PSD 位置网格图
Fig. 5 The modified position map of tetra-lateral PSD

从图 5 可以看出, PSD 中央区域的线性度非常好, 仅仅在四个角位置的误差比较大. 在整个扫描区域内光斑位置均方根误差为 $13 \mu\text{m}$, 在 60% 的区域内光斑位置均方根误差小于 $3 \mu\text{m}$, 均方根非线性小于 0.05%.

3 实验结果

为了验证本文提出的改进公式的有效性, 我们选用日本滨松公司的 S1200 PSD 进行了实验. S1200 是典型的四边形 PSD, 其光敏面积为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$. 所用的激光器聚焦光斑小于 0.3 mm , 扫描范围为 $X: [-0.6 \text{ cm}, 0.6 \text{ cm}]$, $Y: [-0.6 \text{ cm}, 0.6 \text{ cm}]$, 扫描间隔为 0.1 cm . 电极电流由零输入电阻的放大器放大. 根据改进的式 (5)、(6), 在不同 K 值下计算入射光斑位置如图 6.

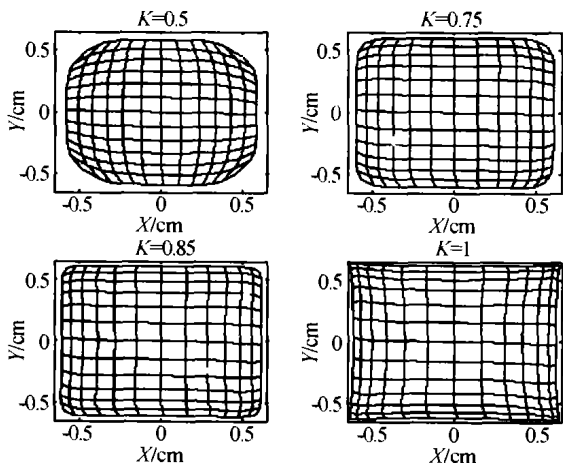


图 6 K 取不同值时 S1200 位置网格图
Fig. 6 Position map of S1200 for different K

当 K 取 0.75 时, 取沿 X 轴的 13 个光斑位置数据, 代入式 (7)、(8), 求得各系数值后对 S1200 进行

修正, 结果如图 7.

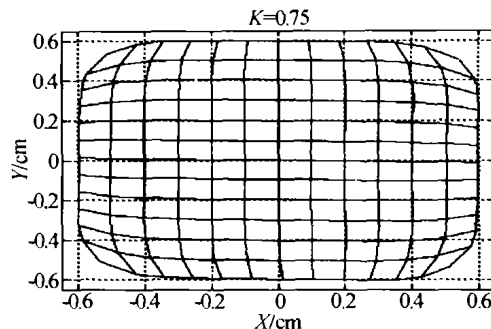


图 7 修正后的 S1200 位置网格图
Fig. 7 Modified position map of S1200

在 60% 的区域内, 采用传统式 (2) 计算得到的位置均方根误差为 $1366 \mu\text{m}$; 采用改进公式计算 ($K = 0.75$) 得到的位置均方根误差为 $820 \mu\text{m}$; 进一步修正后的均方根误差为 $44 \mu\text{m}$, 均方根非线性小于 0.56%. 从实验结果可以看出, 由于采用了改进后的位置计算式 (5) 和 (6), 使得只需要少量的先验位置数据便可完成对 S1200 的中央大部区域的位置修正, 线性度得到很大的改善, 从而验证了本方法的有效性. 由于存在激光多次反射造成的干扰光, 所以实验得到的误差和非线性要比理论值大许多.

4 结论

通常由于照射到 PSD 表面上的光斑有一定的面积, 当该光斑的某部分超出 PSD 感光面时, PSD 接收到光斑的能量重心发生变化, 由此将带来测量上的误差, 因此光斑面积决定了 PSD 的可用光敏面要小于实际的光敏面. 在 PSD 的应用中, 改善中央区域的线性度更具有实际意义. 本文提出的改进公式可以使得只需要对 PSD 进行少量的测量即可完成对 PSD 的非线性修正. 与文献 [8] 提出的改进公式相比, 本文提出的改进公式易于计算和硬件实现, 易于对 PSD 实现修正, 线性区域大且线性度更好.

参考文献

- 1 Lucovsky G. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions. *Journal of Applied Physics*, 1960, **31** (6): 1088 ~ 1095
- 2 唐九耀. 枕型二维位敏探测器的结构和性能研究. *光子学报*, 2001, **30** (6): 735 ~ 738
Tang J Y. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30** (6): 735 ~ 738
- 3 张伯衍, 边川平, 李露瑶, 等. 光电位置传感器在转角精密定位中的应用. *光子学报*, 2001, **30** (4): 505 ~ 507
Zhang B Y, Bian C P, Li L Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30** (4): 505 ~ 507
- 4 汪晓东, 叶美盈. 二维光电位置敏感器件的非线性修正. *光学技术*, 2002, **28** (2): 174 ~ 177
Wang X D, Ye M Y. *Optical Technique*, 2002, **28** (2): 174 ~ 177

- 5 袁红星,王志兴,贺安之. PSD 非线性修正的算法研究. 仪器仪表学报, 1999, **20**(3): 271 ~ 274
Yuan H X, Wang Z X, He A Z. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, **20**(3): 271 ~ 274
- 6 黄梅珍,林斌,唐九耀,等. 提高四边形电极结构二维 PSD 线性度的研究. 仪器仪表学报, 2002, **23**(3): 268 ~ 270
Huang M Z, Lin B, Tang J Y, et al. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, **23**(3): 268 ~ 270
- 7 莫长涛,陈长征,张黎丽,等. 二维 PSD 非线性修正的神经网络算法的研究. 光电子·激光, 2003, **14**(4): 342 ~ 344
Mo C T, Chen C Z, Zhang L L, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(4): 342 ~ 344
- 8 Gnanvo K, Wu Z Y, Labouret A. The current-position response of a-Si:H thin film position sensitive detector and the R_{load} , R_{TCO} effects on it. *Solid-State Electronics*, 2000, **44**: 1191 ~ 1195
- 9 黄梅珍,林斌,唐九耀,等. 不同阳极结构二维 PSD 的电流-位置输出特性. 光电子·激光, 2001, **12**(8): 795 ~ 798
Huang M Z, Lin B, Tang J Y, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(8): 795 ~ 798

Modification of Position Calculating Equations of Tetra-lateral Position Sensitive Detectors

Tao Zhongxiang^{1,2}, Shan Chunyu¹, Song Jianzhong¹

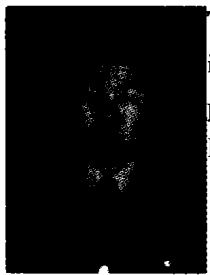
¹ Lab of Image Processing, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

² Department of Ordnance, the Second Aeronautical College of the Air Force, Changchun 130022

Received date: 2004-02-17

Abstract For tetra-lateral position sensitive detectors (PSD), the calculated positions obtained with the conventional equations of position calculation do not correspond to the real spot positions, and have serious pincushion distortion. A modified equation is proposed in terms of the analytical solutions of Lucovsky equation. According to the results, the correction of the PSD can be easily achieved and the linearity can also be greatly improved in most of the central active area by the modified equation. In the 60% of the active area of $1 \times 1 \text{ cm}^2$ PSD, the position root mean square (rms) error was less than $3 \mu\text{m}$, the position non-linearity was less than 0.05%. This modified equation can be fit for all tetra-lateral PSDs.

Keywords PSD; Position error; Linearity; Correction



Tao Zhongxiang was born in 1970, in Heilongjiang Province, China. He received the MS degree in Electronics from the Airforce College of Engineering in 1996. In 2002 he became an vice professor. Now he is a pursuing the Ph. D. degree in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, and is engaged in research on fire control and photoelectric detection.