

文章编号: 0253-2239(2007)11-2064-6

角位置敏感探测器及其有限元分析

丁海峰 黄梅珍 李振庆

(上海交通大学 物理系光学工程研究所, 上海 200240)

摘要: 介绍了一种基于半导体横向光电效应的角位置敏感探测器的结构设计,采用有限元方法对该角位置敏感探测器的输出特性:线性度、角度精度及响应灵敏度,进行了模拟计算,在较大的角度范围内(如 90°)进行测量,得到了很高的线性精度(小于 0.04%)和角度测量精度(约 20)。分析讨论了材料电学参量及模型结构参量等因素对其测角精度的影响,通过优化选取材料及结构参量,可以使线性度(小于 0.01%)及精度(小于 1)更高,能够用于高精度的角度测量。

关键词: 角位置敏感探测器; 结构设计; 有限元; 输出特性

中图分类号: TN364⁺.1 文献标识码: A

Angular Position Sensitive Detector and Finite-Element Analysis

Ding Haifeng Huang Meizhen Li Zhenqing

(Institute of Optical Engineering, Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: The structure design of angular position sensitive detector (APD) utilizing semiconductor's lateral photo electric effect is introduced. A finite-element method (FEM) is adopted to analyze and calculate the output characteristics of APD, such as linearity, angular precision and response sensitivity. Based on FEM simulation, this APD design can achieve high linearity ($<0.04\%$) and high precision (~ 20) for angular measurement in the range of 90° . At last, the factors that influence the precision of measuring angle including electric parameters of material and model structure parameters, such as resistance and electrode, are analyzed. By optimizing material and structure, the APD can achieve higher linearity ($<0.01\%$) and angle resolution (< 1) and be used in angular measurement with high resolution.

Key words: angular position sensitive detector; structure design; finite-element method; output characteristic

1 引 言

位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD),是一种基于半导体横向光电效应的光电器件。相对于离散探测元件如电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)及象限探测器,位置测量精度高、响应快速及处理电路简单^[1],自从问世以来便被广泛应用于光电检测、传感和高能粒子探测等方面,具体应用于检测位移、形变、角度及位置等等。随着位置敏感探测器的广泛应用,旨在提高其位置输出线性的研究受到重视,文献[2,3]采用人工神经网络

等算法通过软件方法对位置敏感探测器进行非线性校正,文献[4]提出了位置敏感探测器的有限元分析计算模型,文献[5,6]对一维、二维枕形位置敏感探测器器件结构与输出特性关系进行了研究,得到了满意的结果。

虽然传统的机械测角控制已经比较成熟,并可以获得较高的测角精度,但往往以功耗大,体积大,成本高等为代价,大大限制了其普及应用;尽管传统的一维及二维方形位置敏感探测器在测角方面已经取得了一些应用,但是其相对烦杂的处理电路及较

作者简介:丁海峰(1982-),男,山东人,硕士研究生,主要从事光检测及科学分析仪器等方面的研究。

E-mail: dhf19822@163.com

导师简介:黄梅珍(1966-),女,福建,副教授,硕士生导师,主要从事光电器件与应用技术、光谱分析与仪器技术以及生物医学光学等方面的研究。E-mail: mzhuang@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-27; 收到修改稿日期: 2007-03-20

小的测角范围,仍然成为限制其普及应用的一个重要因素^[7]。本文介绍了一种新型的环形结构角度位置探测器的结构设计工作原理。角度位置探测器对入射光斑或粒子的角度敏感,并且可以克服测量角度范围小的问题,可望应用于大范围、高精度的角度传感和定向测量等。采用有限元方法对该角位置敏感探测器的输出特性进行了模拟计算,并对影响其测角精度的因素如器件材料电学参量(电阻率)及模型结构参量等因素进行了分析和讨论。

2 二维环形角位置敏感探测器的结构设计及工作原理

角位置敏感探测器实际是一种二维环形结构的

位置敏感探测器,是基于半导体横向光电效应工作的光电器件。器件截面如图 1(a)所示。

在高阻硅单晶片(n 层)的两面,通过扩散和离子注入分别形成高掺杂的 p 区和 n⁺ 区。当入射光入射到 p 型扩散区(光敏区)上时,便会产生光生载流子。在反向驱动电压作用下,载流子便会通过欧姆接触电极输出。对于一维情况,若 p 型扩散区电阻率均匀,则输出电流的大小与入射点到两电极的距离成反比。器件俯视图如图 1(b)所示,由环形的 p 扩散区及欧姆接触电极区构成,其中 C₁, C₂, C₃, C₄ 为绝缘边界, n 为边界曲线的法矢量, w 为欧姆接触电极宽度。可以通过改变模型扇形张角 (0° < 360°) 及半径 r, 来改变模型结构^[8]。

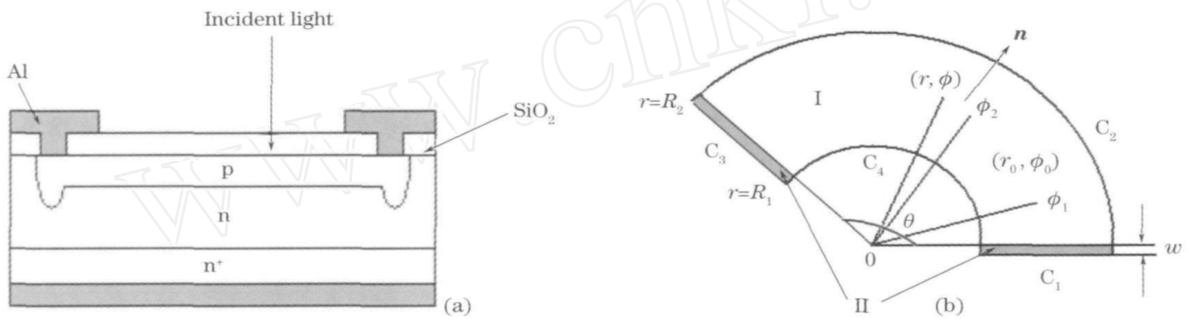


图 1 角位置敏感探测器截面图(a), 结构模型(b)

Fig. 1 Cross section (a), structure model (b) of angular position sensitive detector

描述 p-n 结横向光电效应的(Lucovsky)方程, 稳态形式如下:

$$\nabla^2 V_p = - \frac{J_p}{p W_p}, \tag{1}$$

在柱坐标系下形式变为:

$$\frac{\partial^2 V_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_p}{\partial \phi^2} = - \frac{J_p}{p W_p}.$$

式中 V_p 是 p-n 结电位; J_p 是光生电流密度与 p-n 结反向饱和电流密度之和, 是通过 p 型扩散区总的电流密度; p 是 p 型扩散区电导率; W_p 是 p 型扩散区厚度。

边界条件:

$$\begin{cases} \text{在 } \phi = 0 \text{ 与 } \phi = \theta \text{ 处} & V_p = 0 \text{ 或常量;} \\ \text{在 } r = R_1 \text{ 与 } r = R_2 \text{ 处} & n \cdot \nabla V_p = 0. \end{cases} \tag{2}$$

3 角位置敏感探测器的有限元模型

位置敏感探测器可等效为具有一定形状与材料参量的电介质板, 当用光照射位置敏感探测器光敏

面时, 相当于在电介质板上光照位置施加一等效电流源或电压源。根据模型及材料参量将模型划分成几个区域, 区域之间及边界满足一定的边界约束条件, 具体地将求解区域划分为一系列单元, 单元之间仅靠节点连接, 将连续分布的电场离散成 V₁, V₂, ..., V_n 等各节点电势, 单元内部点的电势由节点电势通过选定的函数关系插值表示, 将变分问题转换为多元函数求极值的问题, 在确定的边界和外加条件下, 可以求出场分布并进一步计算位置敏感探测器的输出位置^[4]。

采用 Ansys 软件步骤如下:

- 1) 根据模型参量及材料参量建立模型。
- 2) 在模型上划分出一系列单元与节点 [如图 2(a)所示]。
- 3) 在模型上施加载荷(恒压源或恒流源)与边界条件。
- 4) 求解计算出模型中场的分布 [如图 2(b)所示]。

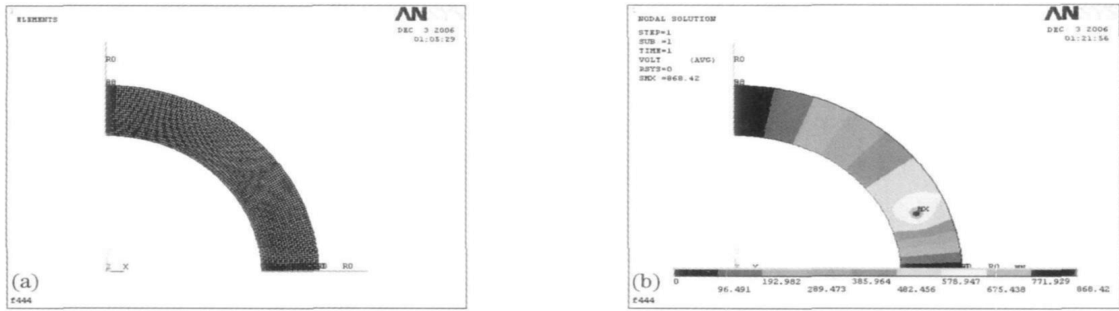


图 2 模型网格图(a),电势分布图(b)

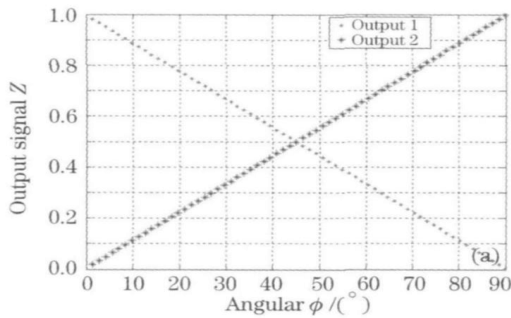
Fig.2 Diagram of the grid (a), the electric potential contour (b) for the model

4 计算结果与分析

4.1 计算结果

载荷位置(光照位置)随 ϕ 变化时(r 不变), 归一化输出信号 Z 随角度 ϕ 的变化关系, 如图 3(a) 所示。其中 $Z_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$, $Z_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2}$ 。 V_1 与 V_2 为欧姆接触电极电势。从图中可以看出输出的归一化信号与角度之间存在较高的线性关系。

载荷位置随 r 变化时(ϕ 不变), 归一化输出信



号 Z 随半径 r 的变化关系如图 3(b) 所示。

输出的归一化信号 Z 并不随半径 r 变化, 输出基本为一常量。

综上可得, 输出的归一化信号与角度之间存在较高的线性关系。实验中通过计算模拟, 若采用扇形张角为 90° 的器件模型, 进行全段测量, 线性度可达到 0.035% , 平均精度近 20 , 而通过优化选取材料及模型结构参量, 线性度及精度可以达到更高。

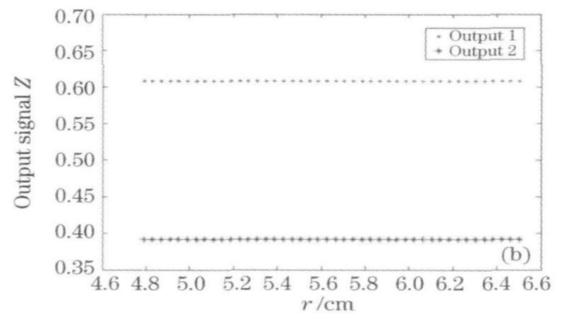


图 3 输出信号 Z 随角度 ϕ (a), 输出信号 Z 随半径 r (b) 的变化关系

Fig.3 Output signal Z versus angle ϕ (a), radius r (b)

4.2 评价指标

输出响应灵敏度 K 通过输出的归一化信号 Z 与角度 ϕ 的最小二乘拟合得到: $Z = K\phi + b$, 即为拟合的斜率, 其值越大, 输出信号灵敏度越高。

最小二乘误差范数 N :

$$N_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_{[i]})^2}$$

其值越小, 表明拟合的线性度越高。式中 ϕ_i 为实际角度值, $\phi_{[i]}$ 为拟合计算值。

交互验证的平均位置精度(平均偏差) P :

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\phi_i - \phi_{[i]}|$$

即表征平均偏差的大小, 其值越小精度越高。

交互验证的最大偏差 \max :

$$\max = \max(|\phi_i - \phi_{[i]}|);$$

即角度值最大偏差的绝对值, 其值越小离散度越小。

交互验证是指从半径 $r = 6.02$ cm 处测得随角度 ϕ ($\phi_1 \sim \phi_2$) 变化的点的输出信号 (ϕ_i, Z_i) , 以此数据点的位置坐标与输出作最小二乘拟合 ($\phi_i = k Z_i + b$), 然后回归计算相同角度范围(如 $0.3516^\circ \sim 5.2734^\circ$ 等)内原半径处 ($r = 6.02$ cm) 和其它半径处(如 $r = 5.00$ cm 等)点的位置坐标 $(\phi_{[i]} = k Z_i + b)$, 并与实际角度值 (ϕ_i) 比较。

4.3 测量精度与模型位置之间的关系

为了比较模型在不同角度范围 ($\phi_1 \sim \phi_2$) 及径向位置 (r) 处测角精度的差别, 将模型张角为 90° , 径

向边缘 $R_1 = 4.75 \text{ cm}$, $R_2 = 6.50 \text{ cm}$, 光敏区电阻率为 $500 \text{ } \cdot \text{m}$, 负载电阻为 $0.1 \text{ } \cdot \text{m}$, 理想欧姆接触电极 (电极为理想导线) 不同位置处测角精度的比较列

于表 1。由于模型的对称性, 取角度范围 ($\phi_1 \sim \phi_2$) 为 $0 \sim 45^\circ$ 中的五个区间段来考察。

表 1 模型不同位置处测角精度比较

Table 1 Comparison on angular measurement in different regions

Range of angle $\phi_1 \sim \phi_2 / (^\circ)$	Radius r / cm	$P / (^\circ)$	$\max / (^\circ)$	$\times 10^{-4}$	K
0.3516 ~ 5.2734	4.75	266.7	624.3	959	0.0111
	5.00	243.8	567.3		
	5.39	165.1	420.6		
	5.86	65.2	248.6		
	6.02	45.7	267.5		
	6.18	54.9	303.6		
	6.50	72.4	359.0		
10.5468 ~ 15.4686	4.75	45.6	67.4	7.56	0.0111
	5.00	42.2	62.2		
	5.39	27.3	38.9		
	5.86	5.4	7.8		
	6.02	0.6	1.2		
	6.18	4.2	7.7		
	6.50	7.7	12.8		
20.3905 ~ 25.3123	4.75	8.2	12.2	7.50	0.0110
	5.00	7.8	11.4		
	5.39	4.7	8.0		
	5.86	1.1	2.1		
	6.02	0.6	1.2		
	6.18	0.7	1.7		
	6.50	1.3	2.6		
30.2342 ~ 35.1560	4.75	1.7	2.9	5.63	0.0110
	5.00	1.7	2.8		
	5.37	1.1	2.3		
	5.86	0.7	1.6		
	6.02	0.4	1.2		
	6.18	0.8	1.4		
	6.50	1.0	1.8		
40.0778 ~ 44.9997	4.75	0.7	1.7	5.45	0.0110
	5.00	0.7	1.2		
	5.39	0.6	1.4		
	5.86	0.5	1.3		
	6.02	0.4	0.9		
	6.18	0.6	1.7		
	6.50	0.6	1.9		

从表 1 可以发现, 靠近模型环带边缘 ($\phi = 0$, $R_1 = 4.75 \text{ cm}$, $R_2 = 6.50 \text{ cm}$) 的区域, 测量的位置误差加大, 精度低。尤其是在边缘欧姆接触电极附近 (小于 5°) 畸变严重, 线性度较差。然而在离接触电极较远的区域 (大于 20°), 不仅位置精度得到了很大提高, 而且径向位置误差分布也得到了很大改善。如选取 $40^\circ \sim 45^\circ$ 的区域, 线性度可达 0.01% , 精度

在 1 左右。但灵敏度没有什么变化。

4.4 电极尺寸对测量精度的影响

模型张角为 90° , 径向边缘 $R_1 = 4.75 \text{ cm}$, $R_2 = 6.50 \text{ cm}$, 光敏区电阻率为 $500 \text{ } \cdot \text{m}$, 负载电阻为 $0.1 \text{ } \cdot \text{m}$, 欧姆接触电极区电阻率为 $0.05 \text{ } \cdot \text{m}$, 角度范围 ($\phi_1 \sim \phi_2$) 为 $0.3516^\circ \sim 17.5780^\circ$, 不同电极尺寸时, 测角精度的比较见表 2。

表 2 不同电极尺寸情况下测角精度比较

Table 2 Comparison on angular measurement with different width of electrodes

Width of electrodes $w / \mu\text{m}$	Radius r / cm	$P / (^\circ)$	$\alpha_{\text{max}} / (^\circ)$	$\beta / 10^{-4}$	K
10	4.75	1032.0	2664.5	2021	0.0110
	5.00	982.1	2555.8		
	6.02	89.8	208.2		
50	4.75	219.1	566.7	434	0.0111
	5.00	208.6	543.1		
	6.02	19.3	45.2		
100	4.75	110.6	285.6	219	0.0111
	5.00	105.1	273.3		
	6.02	9.7	23.1		
500	4.75	22.2	57.2	46	0.0111
	5.00	21.1	55.0		
	6.02	2.1	4.6		
1000	4.75	11.0	29.2	25	0.0111
	5.00	10.6	27.7		
	6.02	1.1	2.6		
5000	4.75	2.3	5.4	9.59	0.0111
	5.00	2.1	5.3		
	6.02	0.4	1.1		

从表 2 可以看出欧姆接触电极尺寸的影响对位置精度的影响相当大,接触电极宽度从 $10 \mu\text{m}$ 增加到 $5000 \mu\text{m}$,位置精度提高了近 1000 倍。或者说接触电极宽度增大,线性度提高,位置误差减小,但灵敏度仍没有什么变化,这与最小二乘误差范数反映的相一致。

4.5 器件张角及电阻率对测角精度的影响

为了比较器件不同的张角 $(^\circ)$ 模型及光敏区电阻率(负载仍为 0.1Ω ,欧姆接触电极为理想电极)对测角精度的影响,表 3 给出了测角精度随器件张角及光敏区电阻率的变化关系。各个模型加载位置在模型中间对称线 $(\phi = \pi/2)$ 附近上下约 $17^\circ (\phi_1 \sim \phi_2)$ 范围内。采用不同电阻率(20, 500, 10000)半径 $r = 6.02 \text{ cm}$ 处的数据进行拟合,回归验证计算对应相同电阻率,半径 $r = 5.00 \text{ cm}$ 处点的位置误差。

从表 3 可以发现在 $< 90^\circ$ 范围内,测角精度及线性度都比较差。在 $> 90^\circ$ 范围内,精度及线性度都有很大的改善。原因可能是器件模型的边缘效应导致。小角度模型测量的角度区域距离边缘较近,而大角度模型测量的角度区域距离边缘较远,边缘效应影响相对较弱。而电阻率的影响也随着器件模

型张角 θ 的增大,对测角精度的影响变的显著。在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内,减小电阻率可以显著的提高测量精度。另外随着器件模型张角 θ 的变化,灵敏度呈现出与 θ 成反比例变化的关系(如图 4 所示),而电阻率大小基本对灵敏度没有什么影响。通过比较分析可以看出,虽然器件模型张角 θ 较小时,灵敏度高,但位置精度差,分析其原因可能因为模型张角小,虽然输出信号灵敏度高,但边缘效应引起的畸变严重,线性度下降,导致精度不高。

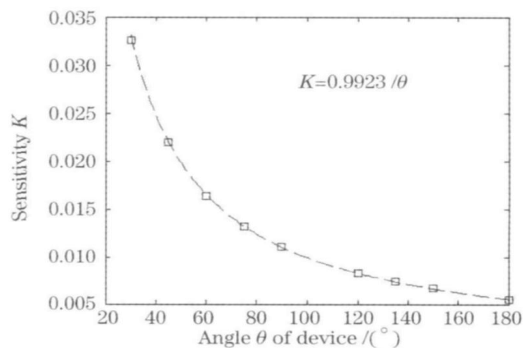
图 4 灵敏度 K 随模型张角 θ 的变化关系Fig. 4 Diagram of sensitivity K versus model angle

表 3 测角精度随器件张角及感光层电阻率的变化关系

Table 3 Comparison on angular measurement with different angle and resistivity of photosensitive layer

Angle of device / θ	Range of angle $\phi_1 - \phi_2 / (^\circ)$	Resistivity of sensitive region / ($\Omega \cdot m$)	$P / (^\circ)$	$\sigma_{max} / (^\circ)$	$\sigma / 10^{-4}$	K
30	6.3281 ~ 23.5545	20	407.2	867.9	5526	0.0326
		500	201.3	876.2	5372	
		10000	193.8	899.8	5349	
45	14.0624 ~ 31.2888	20	92.5	203.5	91	0.0220
		500	14.8	32.3	14	
		10000	12.8	30.7	87	
60	21.0936 ~ 38.3200	20	246.4	795.1	6320	0.0164
		500	236.0	833.4	6306	
		10000	235.4	835.3	6323	
75	29.1795 ~ 46.4059	20	6.8	14.9	6.67	0.0132
		500	1.1	3.1	8.24	
		1000	8.8	24.6	188	
90	35.5076 ~ 52.7340	20	1.9	4.5	2.26	0.0111
		500	0.6	1.3	9.93	
		10000	12.2	29.1	210	
120	51.3278 ~ 68.5542	20	0.1	0.3	0.77	0.0083
		500	0.8	2.2	16	
		10000	20.7	56.6	396	
150	66.7964 ~ 84.0228	20	0.1	0.1	1.31	0.0067
		500	1.2	2.8	30	
		10000	27.5	70.6	700	
180	81.5619 ~ 98.7884	20	0.1	0.2	1.61	0.0055
		500	1.4	4.0	36	
		10000	28.5	102.1	750	

5 结 论

通过有限元方法对其输出特性的模拟分析,验证了角位置敏感探测器具有较高的角度敏感响应特性及位置精度,通过不同模型结构(模型张角,欧姆接触电极尺寸)及材料参量(电阻率)的比较分析,选择合适的结构模型及材料参量可以有效地提高测量精度。由于边缘畸变严重,为了提高测量精度,在实际应用中还应根据需要选择尽量远离接触电极的区域。

参 考 文 献

- 1 Dongyan Chen, Bin Lin, Yuqing Chen. Fabrication and characterization of two-dimensional pin-cushion position sensitive detectors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 2(7): 426 ~ 427
- 2 Mo Changtao, Chen Changzheng, Zhang Lili *et al.*. Nerve network algorithm of non-linear correction of a two-dimension PSD[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(4): 342 ~ 344 (in Chinese)
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[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(4): 342 ~ 344
- 3 Sun Jinghua, Sang Enfang, Mo Changtao *et al.*. Conjugate gradient optimum algorithm of non-linear correction for one-dimension PSD[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 481 ~ 483

(in Chinese)

- 孙晶华,桑恩方,莫长涛等. 一维 PSD 非线性修正的共轭梯度算法[J]. *光学技术*, 2004, 30(4): 481 ~ 483
- 4 Mei-zhen Huang, Rum-jie Shen, Yu-xing Wang *et al.*. Linearity analysis for position sensitive detectors using finite element method [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2006, 556: 445 ~ 450
- 5 Tang Jiuyao, Zhang Xiaohua. Improvement of the position accuracy and linearity in one-dimensional position sensitive detector[J]. *Acta Optic Sinica*, 2005, 25(11): 1501 ~ 1505 (in Chinese)
唐九耀,张晓华. 一维位置敏感探测器位置准确度和线性度的改进[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1501 ~ 1505
- 6 Tang Jiuyao, Lin Jinjun, Sun Xiaobin. Preparation of a pin-cushion two-dimensional position sensitive detector [J]. *Acta Optic Sinica*, 2005, 25(2): 233 ~ 236 (in Chinese)
唐九耀,林进军,孙晓斌. 枕形二维位置敏感探测器的研制[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 233 ~ 236
- 7 Zhang Boheng, Bian Chuanping, Li Luyao *et al.*. The application of PSD in precisely locating the rotated angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(4): 505 ~ 507 (in Chinese)
张伯珩,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[J]. *光子学报*, 2001, 30(4): 505 ~ 507
- 8 Y. Z. Xing, C. P. W. Boeder. A new angular-position detector utilizing the lateral photoeffect in Si[J]. *Sensors and Actuators*, 1985, 7: 153 ~ 166