

文章编号: 0253-2239(2005)11-1501-5

一维位置敏感探测器位置准确度和线性度的改进*

唐九耀¹ 张晓华²

(¹ 浙江大学物理系, 杭州 310027
² 宁波工程学院基础部, 宁波 315016)

摘要: 在常规的条状一维位置敏感探测器(PSD)中,光敏区和位置电阻区是结合在一起的,器件的欧姆接触电极难以做得比较理想,因此器件的位置准确度和线性度也受到了不利的影 响。而在梳状一维位置敏感探测器中,光敏区和位置电阻区被分成了梳齿区和梳脊区两部分,并且位置电阻区被设计成很窄的长条,即使掺杂浓度比较高,位置电阻也能做得相当大。这样条状一维位置敏感探测器接触电极上的缺陷就可消除。用两种不同的一维位置敏感探测器所测量的位置特性曲线证实了理论分析的正确性。测量结果还表明,梳状一维位置敏感探测器的位置准确度和线性度比条状一维位置敏感探测器有了显著的提高,梳状一维位置敏感探测器的平均位置误差从条状一维位置敏感探测器的 55 μm 减小到了 26 μm ,梳状一维位置敏感探测器的均方根非线性度从条状一维位置敏感探测器的 0.94% 减小到了 0.09%。

关键词: 探测器; 位置敏感探测器; 横向光电效应; 梳状一维位置敏感探测器; 条状一维位置敏感探测器
中图分类号: TN364+.1 文献标识码: A

Improvement of the Position Accuracy and Linearity in One-Dimensional Position Sensitive Detector

Tang Jiuyao¹ Zhang Xiaohua²

(¹ Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027
² Department of Basic Courses, Ningbo Engineering Institute, Ningbo 315016)

Abstract: In a conventional, strip-type one-dimensional (1-D) position sensitive detector (PSD) the sensitive area and the position resistance area are combined together, the ohmic contact structure of the device is handicapped, so its accuracy and linearity is affected adversely. The sensitive area and position resistance area in a comb-type 1-D PSD are separated to become the comb teeth and comb ridge area respectively, moreover the position resistance area is made very narrow, even if the doping concentration is rather high, the position resistance can also be made quite large, so that the restriction that is imposed on the contact structure previously can be lifted. The position characteristic curve measured on two different kinds of 1-D PSDs verified authors' theoretical analysis, and showed that the accuracy and linearity of the comb-type 1-D PSD has been increased markedly; the average position error of the comb-type 1-D PSD is reduced to 26 μm from 55 μm of the strip-type 1-D PSD, and the RMS nonlinearity of the comb-type 1-D PSD is reduced to 0.09 % from 0.94 % of the strip-type 1-D PSD.

Key words: detectors; position sensitive detector; lateral photoeffect; comb-type one-dimensional position sensitive detector; strip-type one-dimensional position sensitive detector

1 引 言

当半导体的 p-n 结或肖特基(Schottky)结受到非均匀光照射时,除了在结的两边存在纵向光电效

应外,结平面内还存在光电势的降落以及由此而产生的光电流。这种现象通常称之为横向光电效应(lateral photoeffect),是由 Schottky^[1]在 1930 年首

* 浙江省科技计划(001101420)资助课题。

作者简介: 唐九耀(1947~),男,浙江宁波人,博士,副教授,主要从事半导体物理和半导体光电器件方面的研究。

E-mail: phyjyt@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-01-20; 收到修改稿日期: 2005-04-01

先发现的,但在当时并未引起太大的注意,直到1957年Wallmark^[2]关于横向光电效应的研究工作发表后才引起了人们的重视。1960年, Lucovsky^[3]推导出了描述 p-n 结横向光电效应的偏微分方程。20 世纪 70 年代末, Woltring 等^[4,5]应用这一效应研制出了位置敏感探测器(位置敏感探测器: position sensitive detector)。

位置敏感探测器并没有使用扫描或阵列式的探测技术,而是通过探测器边缘的一些接触电极输出位置信号。这种非寻址的位置探测器的缺点是难以同时探测多个入射光斑,而它的优点则是探测器的结构以及信号处理电路比较简单,模拟位置信号可以连续输出而不存在测量盲区,对入射光束的聚焦要求不高。

正是由于这些特点,目前位置敏感探测器在位置测量、目标跟踪、机器人视觉以及飞行器对接等许多方面都得到了广泛的应用^[6];许多作者也从材料、工艺、测试以及器件物理等方面对其进行了深入的研究^[7,8]。本文将在器件结构分析的基础上阐述一种新的梳状一维位置敏感探测器的工作机理,并与常规条状一维位置敏感探测器相比较,指出了梳状一维位置敏感探测器在改进位置准确度和线性度方面的优点。这两种器件的测量结果与本文的理论分析完全一致。

2 条状一维位置敏感探测器的结构

条状一维位置敏感探测器的结构如图 1(a)所示,通常以 n⁻ 硅材料为基片,在表面掺硼,在背面扩磷,形成 p-i-n 结而构成。掺硼的 p 层边缘上有两个电极用来收集光电流,而扩磷的 n⁺ 层的一个电极则用来加反向偏压。器件表面的几何结构如图 1(b)所示。当一束光入射到器件表面 x 处时,由于横向光电效应,将在两电极上产生光电流 I_1 和 I_2 。如果器件的反向饱和电流和表面漏电流比光电流小得多,并且 p 层的掺杂又是均匀的,则可以认为 p 层中的光电流大小 I_1 和 I_2 近似与 x 点至每一电极的电阻成反比。假如以位置敏感探测器光敏面的中心为坐标原点,可以证明入射光斑的位置 x 与光电流 I_1 和 I_2 之间存在以下关系:

$$x = \frac{L_0}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}, \quad (1)$$

其中 L_0 是位置敏感探测器光敏面的长度。

位置敏感探测器 作为位置测量的传感器,噪声的大小是标志其性能的重要参量。理论和实验均已

证明,位置敏感探测器 p 层位置电阻的热噪声是器件的主要噪声来源,并且噪声的功率与相关电阻的大小成反比,即

$$i_{Nj}^2 = \frac{4kT\Delta f}{R}, \quad (2)$$

其中 k 是玻尔兹曼常量, T 是绝对温度, R 是位置敏感探测器的位置电阻,而 Δf 是电路的有效带宽。

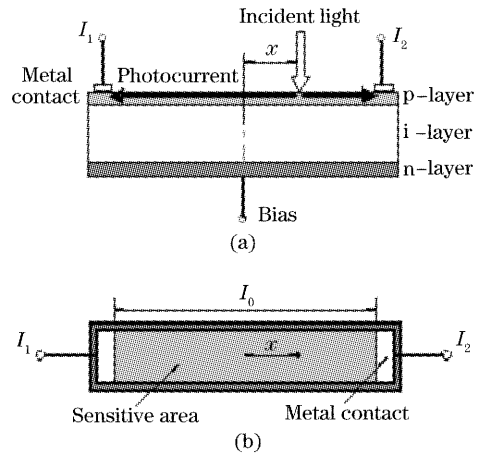


图 1 条状一维位置敏感探测器的结构示意图
Fig. 1 Schematic layout of a conventional, strip-type one-dimensional position sensitive detector

因此,为了抑制位置敏感探测器中的热噪声,位置电阻必须足够大,通常在 50~200 kΩ 之间。如果条状一维位置敏感探测器光敏面的长度在 15 mm 以下,宽度为 1 mm, p-n 结深在 1 μm 左右,则不难算出 p 层的掺杂浓度仅为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在这样的掺杂浓度下,很难在 p 层上形成一个良好的欧姆接触,也很难在 n 型衬底上形成一个能有效地产生光电效应的 p⁺-n 结。在条状一维位置敏感探测器的设计中,通常采用两种办法来克服这一困难。

1) 欧姆接触区和 p-n 结区以不同浓度掺杂,并通过一个重叠区域把两部分连结起来,如图 2 所示。这样可以形成良好的欧姆接触,但在光敏区和引线

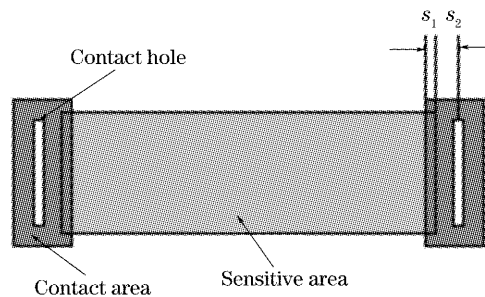


图 2 条状一维位置敏感探测器的欧姆接触结构(a)
Fig. 2 Ohmic contact structure (a) of a strip-type one-dimensional position sensitive detector

孔之间引入了两个电阻率不均匀的区域 S_1 和 S_2 ，这将造成位置敏感探测器的位置测量误差。

2) 欧姆接触区通过较高的掺杂浓度制作在 p-n 结区内,如图 3 所示。这样欧姆接触可以形成,但在光敏区和引线孔之间还是引入了一个电阻率不均匀的区域 S_2 。

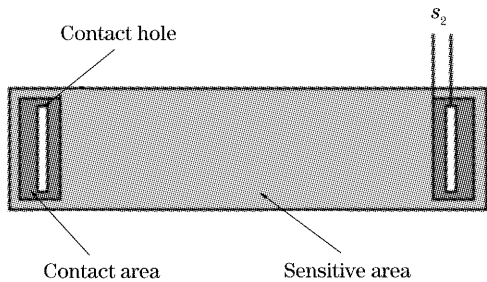


图 3 条状一维位置敏感探测器的欧姆接触结构 (b)
Fig. 3 Ohmic contact structure (b) of a strip-type one-dimensional position sensitive detector

3 梳状一维位置敏感探测器的设计

由上面的分析可见,欧姆接触虽然可以在条状一维位置敏感探测器的两种电极结构里形成,但同时也在光敏区(即位置电阻区)引入了电阻不均匀的区域。如果一维位置敏感探测器的光敏面比较长 (>15 mm),这些掺杂不均匀区域的影响还比较小。如果一维位置敏感探测器的光敏面比较短,这些掺杂不均匀的区域由于其掺杂浓度比位置电阻区高出 1~2 个数量级,就会对位置敏感探测器的位置准确度和线性度造成比较严重的影响。因此对一维位置敏感探测器而言,理想的电极结构应该是欧姆接触电极在位置电阻区里直接形成,中间没有掺杂不均匀的区域。梳状一维位置敏感探测器正是基于这样的思想而发展起来的,其光敏区和欧姆接触区的结构如图 4 所示。

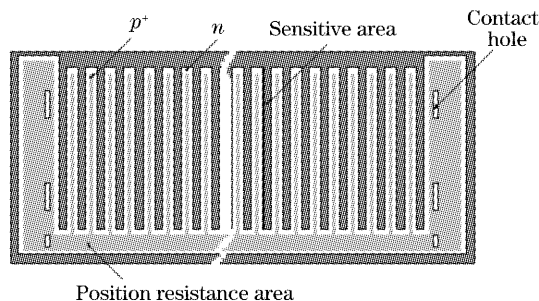


图 4 梳状一维位置敏感探测器的结构示意图
Fig. 4 Schematic layout of a comb-type one-dimensional position sensitive detector

梳状一维位置敏感探测器通常是在 n^- 硅片上掺入一梳子状 p^+ 层而构成。在条状一维位置敏感探测器中光敏区和位置电阻区是结合在一起的;而在梳状一维位置敏感探测器中,光敏区和位置电阻区被分成两部分,分别为梳齿区和梳脊区。并且位置电阻区(梳脊区)可以设计得很窄,比如可以比条状一维位置敏感探测器缩小 20 倍,这意味着梳脊区的掺杂浓度能从原来的水平提高 20 倍,而仍能保持原来的位置电阻大小不变。这样,欧姆接触就能够在位置电阻区内直接形成,而不会在其中引入掺杂不均匀的区域。

当一束光照射到位置敏感探测器的梳齿区时,将会在其中激发出电子-空穴对,并被 p-n 结的内建场分开,在一个或几个梳齿里产生光电流。由于横向光电效应的作用,光电流将沿着梳齿流入梳脊(位置电阻区)。每一个梳齿上的光电流将根据所在位置到两电极间电阻的大小分流成两部分,并沿着梳脊从两个大梳齿上的电极处输出。

可以证明条状一维位置敏感探测器的位置(1)式对梳状一维位置敏感探测器仍然成立。

假设一个入射光斑覆盖了位置敏感探测器光敏区的 n 个梳齿,每个梳齿的中心位置为 $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$,每个梳齿的光电流 i_j 流到梳脊区后被分为 i'_j 和 i''_j ,则有

$$x_1 = \frac{L_0}{2} \frac{i''_1 - i'_1}{i''_1 + i'_1}, \tag{3}$$

$$x_2 = \frac{L_0}{2} \frac{i''_2 - i'_2}{i''_2 + i'_2}, \tag{4}$$

.....

$$x_n = \frac{L_0}{2} \frac{i''_n - i'_n}{i''_n + i'_n}, \tag{5}$$

根据(1)式,“光斑位置” x 可由光电流 I_1 和 I_2 确定,由于

$$I_1 = i'_1 + i'_2 + \dots + i'_n, \tag{6}$$

$$I_2 = i''_1 + i''_2 + \dots + i''_n, \tag{7}$$

把(6)式和(7)式代入(1)式,并利用(3)式~(5)式,可以得到

$$x = \frac{L_0}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{L_0}{2} \frac{(i''_1 + i''_2 + \dots + i''_n) - (i'_1 + i'_2 + \dots + i'_n)}{(i''_1 + i''_2 + \dots + i''_n) + (i'_1 + i'_2 + \dots + i'_n)} = \frac{x_1 i_1 + x_2 i_2 + \dots + x_n i_n}{i_1 + i_2 + \dots + i_n}, \tag{8}$$

由(8)式可见,现在根据(1)式算得的光斑位置实际上是梳齿电流的重心位置,不再是光斑的重心位置。

然而当光斑直径比梳齿周期大得多时,这两种重心位置的差别将比位置敏感探测器的位置测量误差小得多。因此在满足上述条件的情况下,梳齿电流的重心位置可以视为光斑的重心位置,即(1)式对梳状一维位置敏感探测器仍然有效。

4 一维位置敏感探测器位置准确度和线性度的改进

现在考虑一维位置敏感探测器欧姆接触电极结构改进以后对器件位置测量准确度的影响。

设条状一维位置敏感探测器的长度(两电极引线孔之间的距离)为 l_0 , 两电极之间的电阻为 R , 入射光斑的坐标为 x , 从 x 到两电极之间的电阻分别为 R_1 和 R_2 , 则

$$\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\rho_0(l_0/2 + x - l_1) + \rho_1 l_1 - \rho_0(l_0/2 - x - l_1) - \rho_1 l_1}{\rho_0(l_0 - 2l_1) + 2\rho_1 l_1} = \frac{2\rho_0 x}{\rho_0 l_0 - 2l_1(\rho_0 - \rho_1)} = \frac{2x/l_0}{1 - 2(l_1/l_0)(1 - \rho_1/\rho_0)}, \quad (9)$$

因此,

$$x = \frac{l_0}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \left[1 - 2 \frac{l_1}{l_0} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) \right] = x' \left[1 - \frac{2l_1}{l_0} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) \right], \quad (10)$$

其中 ρ_0 为位置电阻区的电阻率, ρ_1 为欧姆接触区的电阻率。对于欧姆接触区电极结构(a), $l_1 = s_1 + s_2$; 对于欧姆接触区电极结构(b), $l_1 = s_2$ 。 x' 为由位置敏感探测器位置(1)式所确定的入射光斑的位置。

设 α 为欧姆接触区宽度与位置敏感探测器长度之比, 即 $\alpha = 2l_1/l_0$, β 为欧姆接触区电阻率与位置电阻区电阻率之比, 即 $\beta = \rho_1/\rho_0$, 则(10)式可改写为

$$\Delta x = x' - x = x' \frac{2l_1}{l_0} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) = \alpha(1 - \beta)x', \quad (11)$$

即由欧姆接触区的非均匀掺杂所引入的位置敏感探测器的位置误差 Δx 是和 $\alpha, 1 - \beta$ 及 x' 成正比的。

为了验证上述理论的正确性,我们测量了条状一维位置敏感探测器和梳状一维位置敏感探测器的位置特性曲线。实验中所用的测量装置如图5所示。由LED发出的红光经聚焦后入射到位置敏感探测器的表面,光斑的直径约为0.8 mm。

首先调节入射光的强弱,使得位置敏感探测器每个电极的输出光电流随入射光斑位置的变化在 $0 \sim 1 \mu\text{A}$ 之间。位置敏感探测器输出的光电流经信号处

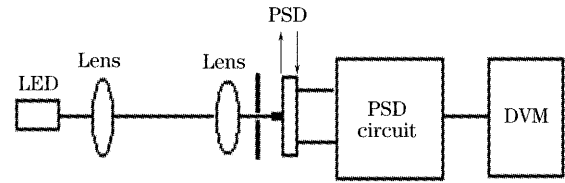


图5 一维位置敏感探测器位置测量装置

Fig.5 Schematic layout of one-dimensional position sensitive detector position measurement apparatus

理电路运算后就得到与入射光斑位置成正比的量 $(I_2 - I_1)/(I_2 + I_1)$, 这样就可由(1)式计算出入射光斑的位置坐标。测量中位置敏感探测器的位置移动误差约为 $2 \mu\text{m}$, 位置敏感探测器所加的反向偏压为 5 V , 两种不同的一维位置敏感探测器位置特性曲线的测量结果分别如图6和图7所示。

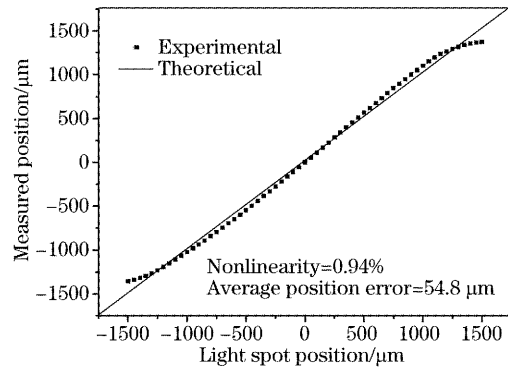


图6 条状一维位置敏感探测器的位置特性曲线

Fig.6 Position characteristic of a strip-type one-dimensional position sensitive detector

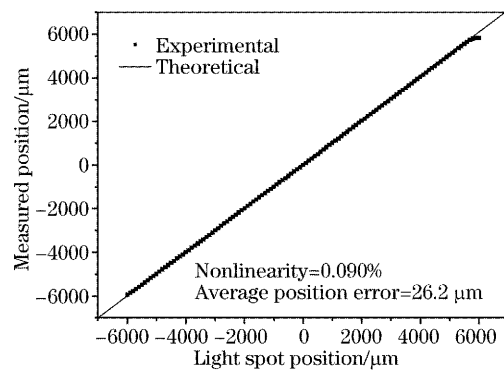


图7 梳状一维位置敏感探测器的位置特性曲线

Fig.7 Position characteristic of a comb-type one-dimensional position sensitive detector

图6是条状一维位置敏感探测器的位置特性曲线,位置测量的间隔为 $50 \mu\text{m}$ 。测量中所用的位置敏感探测器长度 $l_0 = 3 \text{ mm}$, 欧姆接触区宽度为 $2l_1 = 0.2 \text{ mm}$, 因此 $\alpha = 1/15$, 欧姆接触区电阻率与位置电阻区电阻率之比 $\beta = 1/100$ 。因此(11)式成为

$$\Delta x = x' - x = \frac{1}{15} \left(1 - \frac{1}{100}\right) x' \approx \frac{x'}{15}. \quad (12)$$

从图 6 可以看出,除去位置敏感探测器的两端, $|\Delta x|$ 确实随着 $|x'|$ 的增大而增大。当 $|x'|$ 在原点附近时, $|\Delta x|$ 很小;当 $|x'|$ 增大,但不超过 $1100 \mu\text{m}$ 时, $|\Delta x|$ 也随之增大,并且 $\Delta x/x'$ 也在 $1/15$ 左右。当 $|x'|$ 大于 $1100 \mu\text{m}$ 时, $|\Delta x|$ 不再随 $|x'|$ 线性增加,反而随着 $|x'|$ 的增加有了明显减小;在 $x' = \pm 1250 \mu\text{m}$ 附近, Δx 反而改变了符号,那是由于当 $|x'|$ 大于 $1100 \mu\text{m}$ 以后,部分入射光斑已经离开了光敏面,而照在金属电极上的缘故。

图 7 是梳状一维位置敏感探测器的位置特性曲线,位置测量间隔为 $100 \mu\text{m}$,测量中所用的位置敏感探测器长度为 12 mm 。可以看出梳状一维位置敏感探测器的位置特性曲线和理想的位置特性曲线符合得很好,只有在位置敏感探测器的两端各约 $400 \mu\text{m}$ 处,由于部分入射光斑照到了金属电极,而使 x' 偏离了理想的位置特性曲线。测量数据也表明梳状一维位置敏感探测器的位置准确度比条状一维位置敏感探测器有了很大的提高。当入射光斑落在位置敏感探测器的光敏面之内时,条状一维位置敏感探测器的平均位置测量误差为 $54.8 \mu\text{m}$ ($|x| \leq 1100 \mu\text{m}$),梳状一维位置敏感探测器的平均测量误差为 $26.2 \mu\text{m}$ ($|x| \leq 5600 \mu\text{m}$),比条状一维位置敏感探测器减少了一半以上。

位置敏感探测器的位置线性度是指在有效测量范围内,位置敏感探测器位置特性曲线对于其平均位置特性曲线的偏离。假如 x'_j 是光斑在 x_j 时位置敏感探测器的测量值, x'_{aj} 是光斑在 x_j 时用最小二乘法拟合的平均位置特性曲线所确定的测量值,则定义均方根误差 $(\delta/l_0) \times 100\%$ 为位置敏感探测器的线性度,其中

$$\delta = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x'_j - x'_{aj})^2 / (n-1)}, \quad (13)$$

根据上述定义,从测量结果中可以算出条状一维位置敏感探测器的线性度为 0.94% ,梳状一维位置敏感探测器的线性度为 0.09% ,几乎比条状一维位置敏感探测器提高了一个数量级。

5 结 论

梳状一维位置敏感探测器由于欧姆接触电极结构的改进,其位置测量的准确度和线性度比常规的条状一维位置敏感探测器有了很大的提高。根据条状一维位置敏感探测器的电极结构所提出的位置计算方法解释了这种结构位置敏感探测器所存在原理性误差,并且这种误差 Δx 和测量的位置 x' ,欧姆接触区宽度与位置敏感探测器长度之比 α 及欧姆接触区与位置电阻区的电阻率之比 β 有着直接的关系。在入射光斑不触及金属电极的情况下, $|x'|$ 越大, $|\Delta x|$ 越大;位置敏感探测器长度越小,欧姆接触区越宽, $|\Delta x|$ 越大;欧姆接触区与位置电阻区的掺杂浓度相差得越多, $|\Delta x|$ 也越大。而梳状一维位置敏感探测器正是做到了欧姆接触区与位置电阻区掺杂浓度的一致,才使这种误差不再存在。

参 考 文 献

- 1 W. Schottky. Ueber den entstehungsort der photoelektronen in kupfer-kupferoxydul-photozellen[J]. *Phys. Z., Leipzig*, 1930, **31**: 913~925
- 2 J. T. Wallmark. A new semiconductor photocell using lateral photoeffect[J]. *Proc. IRE*, 1957, **45**: 474~483
- 3 Geralo Lucovsky. Photoeffects in nonuniformly irradiated p-n junctions[J]. *J. Appl. Phys.*, 1960, **31**(6): 1088~1095
- 4 Herman J. Woltring. Single- and dual-axis lateral photodetectors of rectangular shape[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1975, **ED-22**: 581~590
- 5 R. B. Owen, M. L. Awcock. One and two dimensional position sensing semiconductor detectors[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1968, **NS-15**(3): 290~303
- 6 Zhao Yong, Zhang Bo, Liao Yanbiao *et al.*. Salinity measurement based on position sensitive detector and optical technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1379~1383 (in Chinese)
赵勇, 张博, 廖延彪等. 基于位置敏感器件的光学法盐度检测技术研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1379~1383
- 7 Tang Jiuyao, Lin Jinjun, Sun Xiaobin. Preparation of a pin-cushion type two-dimensional position sensitive detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): (in Chinese)
唐九耀, 林进军, 孙晓斌. 枕型二维位置敏感探测器的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 233~236
- 8 Mo Changtao, Chen Changzheng, Zhang Lili *et al.*. Study on background light compensation of photoelectric position sensitive detector[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 427~431 (in Chinese)
莫长涛, 陈长征, 张黎丽等. 光电位置敏感器件背景光补偿的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 427~431