

文章编号: 0253-2239(2005)02-233-4

枕型二维位置敏感探测器的研制*

唐九耀^{1,2} 林进军² 孙晓斌²

(1 浙江大学 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)
(2 浙江大学物理系, 杭州 310027)

摘要: 证明了枕型二维位置敏感探测器设计的基本原理——Gear 定理, 并推导了适用于枕型二维位置敏感探测器的位置计算公式, 此外还提出了枕型二维位置敏感探测器的制作工艺和测试结果。采用集成电路工艺所研制的枕型二维位置敏感探测器(光敏面积为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$)表现出良好的光电特性, 当反偏为 5 V 时其暗电流约为 15 nA , 峰值时的光谱灵敏度超过了 0.6 A/W 。在所测量的 75% 光敏区域内, 均方根位置误差约为 0.135 mm , 而以均方根位置误差表示的非线性度在 1.1% 左右, 比四边形二维位置敏感探测器的位置线性度提高了近一个数量级。

关键词: 光学器件; 位置敏感探测器; 横向光电效应; 枕型二维位置敏感探测器

中图分类号: TN364⁺.1 文献标识码: A

Preparation of a Pin-Cushion Two-Dimensional Position Sensitive Detector

Tang Jiuyao^{1,2} Lin Jinjun² Sun Xiaobin²

(1 National Research Center of Engineering and Technology for Optical Instrumentation,
Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(2 Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: The basic design principle of a pin-cushion two-dimensional position sensitive detector (PSD)——Gear's theorem is testified, and the position formula of this type of PSD is derived. Moreover, presented in this paper are the fabrication process and device performance of the pin-cushion PSD. The pin-cushion PSD devices (sensitive area $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$) fabricated with IC technology show good optoelectronic properties, excellent position linearity and accuracy. The dark current is 15 nA when the reverse bias is 5 V . The peak sensitivity is over 0.6 A/W . Within 75% sensitive area, the measured RMS of position error is about 0.135 mm , and its nonlinearity characterized with RMS of position error is around 1.1% , almost improved by one order of magnitude compared with that of the tetralateral two-dimensional PSD.

Key words: optical devices; position sensitive detector; lateral photoeffect; pin-cushion two-dimensional PSD

1 引 言

位置敏感探测器 (Position sensitive detector, PSD) 是利用半导体横向光电效应而制成的位置传感器。与传统的象限探测器、CCD 器件相比, 具有位置分辨率高, 光敏面上不存在测量盲区, 测量结果和入射光强无关以及外围电路简单等优点, 因而正被广泛应用于位置测量、自动调焦、目标跟踪、机器

人视觉、飞行器对接等测试和控制系统中^[1~3]。

横向光电效应是指当半导体的 p-n 结或肖特基结受到非均匀光照时, 除了在结的两边产生纵向光电效应外, 在结平面上也产生了光生电势降落的现象。此现象最早由肖特基在 1930 年发现, 1957 年 Wallmark 深入研究了这一现象, 并引起人们的广泛关注, 直至 20 世纪 70 年代末, 由 Woltring 等人利

* 浙江省科技计划(001101420)资助课题。

作者简介: 唐九耀(1947.10~), 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工作。
E-mail: phyjyt@zju.edu.cn.

收稿日期: 2004-02-02; 收到修改稿日期: 2004-07-06

用横向光电效应研制成了位置敏感探测器^[4]。

二维位置敏感探测器通常可分为四边形结构位置敏感探测器和两面型结构位置敏感探测器。四边形位置敏感探测器的基本结构如图 1 所示。

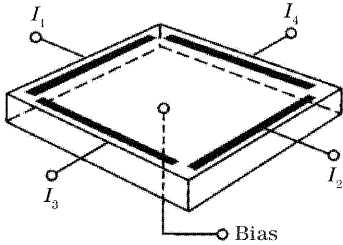


图 1 四边形二维位置敏感探测器的结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of the tetra-lateral two-dimensional PSD

四个扩展电极位于光敏面的四周,入射光斑所产生的光电流通过这四个电极输出。另有一个公共电极从 Si 片的背面引出,可用来给 p-n 结提供反向偏压。如果入射光斑坐标的原点取在光敏面的中心,而从四个电极输出的光电流分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 , 则入射光斑的位置坐标为

$$x = \frac{L}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}, \quad y = \frac{L}{2} \frac{I_4 - I_3}{I_3 + I_4}, \quad (1)$$

其中 L 为四边形位置敏感探测器光敏面的边长。

二面型位置敏感探测器的基本结构如图 2 所示,在这种结构的位置敏感探测器中,器件的正面和背面都带有电阻层,二对互相垂直的电极分别位于器件的两个面,而光电流则是在两个面上分别流向四个电极。因此,在这种结构的位置敏感探测器中没有公共的电极可以用来加反偏,其反偏须通过信号电极来实现。如果通过四个电极的光电流分别是 I_1, I_2, I_3, I_4 , 则入射光斑重心的坐标同样可由 (1) 式来求得。

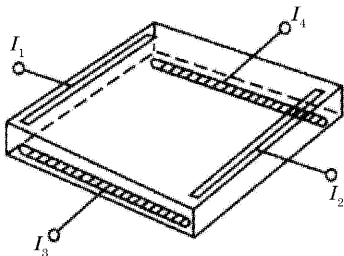


图 2 两面型二维位置敏感探测器的结构示意图
Fig. 2 Schematic structure of the duo-lateral two-dimensional PSD

四边形结构位置敏感探测器具有较小的暗电流和较高的光谱灵敏度,但由于四个电极互相靠得很近,容易产生边缘效应,位置线性度比较差。二面型

结构位置敏感探测器具有很好的位置线性度,但其暗电流比较大(可比四边型位置敏感探测器高出一个数量级)。四边型位置敏感探测器具有一个公共的电极可以用来加上足够大的反偏,而二面型位置敏感探测器没有一个公共的电极,其反偏电压是通过信号电极加上去的,因而必须把信号电流从反偏电压中分离出来,这样就增加了信号处理电路的复杂性。

因此,研制出一种具备以上两种位置敏感探测器优点的新器件是人们所希望的^[5,6]。

2 枕型二维位置敏感探测器的设计原理

枕型二维位置敏感探测器的设计原理是 Gear 定理^[7],它可以表述为:当线电流密度为 J 的均匀面电流流过方块电阻为 r 的无限大平板时,可以在平板中挖出一个半径为 α 的圆孔而使电流的分布在圆孔以外的区域不受影响,只要圆孔的边界线电阻满足

$$R = r/\alpha.$$

以圆孔的中心为原点,以电流密度 J 的方向为 x 轴,作出如图 3 所示的坐标系。再在圆孔的边界上取两点 A, B , 设它们和 $-x$ 轴的夹角分别为 θ 和 $\theta + d\theta$, 要使圆孔外的电流不因其存在而受到影响,只要使 A, B 两点间由电流密度 J 所引起的微分电势降 dV_x 和由边界电流 J 所引起的微分电势降 dV 相等。

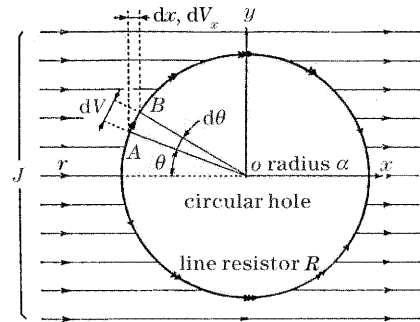


图 3 Gear 定理

Fig. 3 Gear's theorem

假设流过 A, B 两点的边界电流为

$$I_A = I(\theta), \quad I_B = I(\theta + d\theta),$$

则流向弧 AB 的面电流为 $\alpha d\theta \cdot \cos \theta \cdot J$, 根据弧 AB 上的基尔霍夫定理,有

$$I_B - I_A = I(\theta + d\theta) - I(\theta) = dI = J\alpha \cos \theta d\theta$$

$$\text{故, } I(\theta) = \int_0^\theta dI = \int_0^\theta J\alpha \cos \theta d\theta = J\alpha \sin \theta,$$

$$\text{因此, } dV = I(\theta) dR = JR\alpha^2 \sin \theta d\theta,$$

$$\text{而 } dV_x = Jr dx = Jr\alpha \sin \theta d\theta,$$

$$\text{由于 } dV = dV_x,$$

即 $JR\alpha^2 \sin \theta d\theta = Jr\alpha \sin \theta d\theta$,
故有

$$R = r/\alpha, \quad (2)$$

从 Gear 定理的证明可以看出, Gear 定理不仅对导电平板中的圆孔是成立的, 而且对部分圆孔也是成立的, 只要圆孔边界的线电阻满足 $R = r/\alpha$ 的关系, 因而对于一个四周用凹形圆弧所围成的导电平板, Gear 定理也是成立的。一个这样的导电平板就是由图 4 所示的由四段圆弧所围成的枕形结构。在硅集成电路工艺技术中, 圆弧形的边界电阻以及其所包围的表面电阻层都可通过选择性硼离子注入的方法得到, 硼离子注入工艺的均匀性及可控性使得 $R = r/\alpha$ 的关系不难实现。

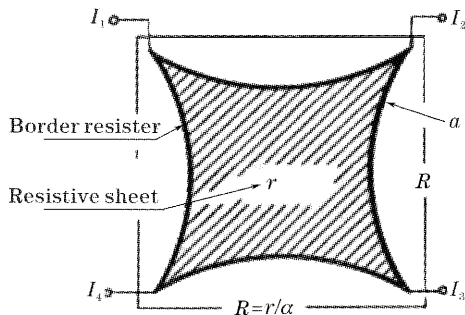


图 4 枕型二维位置敏感探测器结构示意图
Fig. 4 Schematic structure of the pin-cushion two-dimensional PSD

由此不难证明^[8], 如以位置敏感探测器光敏面

的中心为坐标原点, 则入射光斑重心的坐标为

$$\begin{cases} \frac{x}{d/2} = \frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \\ \frac{y}{d/2} = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 d 为枕型位置敏感探测器相邻两个顶点之间的距离。

3 枕型二维位置敏感探测器的工艺过程

我们采用了氧化、扩散、离子注入、光刻等半导体 IC 工艺技术来研制枕型二维位置敏感探测器, 其制作过程如图 5 所示。我们所用的基片是 $\langle 111 \rangle$ 晶向的 n -Si 片, 电阻率在 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。采用高阻的材料有利于提高位置敏感探测器的灵敏度以及降低器件的结电容。硅片经两面扩磷, 单面抛光后就完成了背电极的制作。再经高温氧化, 边界电阻区光刻, 腐蚀掉表面的 SiO_2 后就开出了边界电阻区离子注入的窗口。然后经能量为 80 keV 、剂量为 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的硼离子注入以及高温退火就可完成边界电阻区的掺杂。此后再光刻、腐蚀出光敏区离子注入窗口, 并经能量为 60 keV 、剂量为 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的硼离子注入以及退火就可完成边界电阻区的掺杂。在引线孔光刻、腐蚀出以后, 就可以真空蒸发 SiAl 薄膜(含 1% Si)。铝电极经光刻、腐蚀以及在 N_2, H_2 气氛中烧结后器件就可划片、测试、封装了。

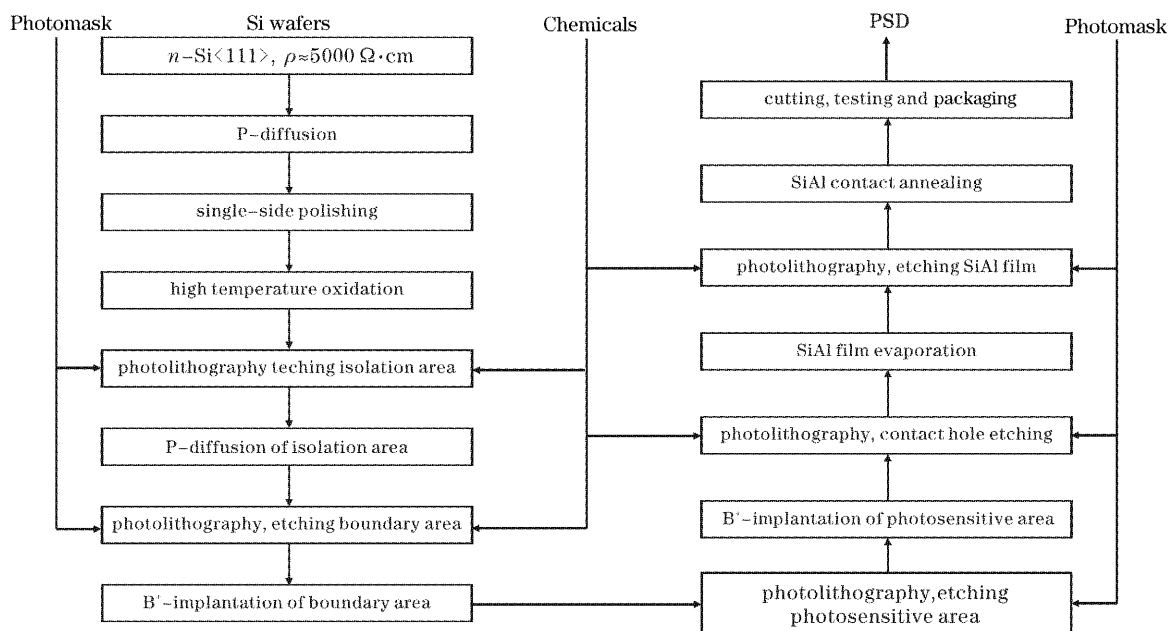


图 5 枕形二维位置敏感探测器工艺流程图
Fig. 5 Process flow chart of the pin-cushion two-dimensional PSD

4 枕型二维位置敏感探测器的特性测试

光电探测器的特性主要是由暗电流大小和灵敏度的高低决定的,我们研制的枕型二维位置敏感探测器(光敏面为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$),在反偏 5 V 时暗电流约为 15 nA ,反向击穿电压在 80 V 左右。图 6 为枕型二维位置敏感探测器的光谱灵敏度,由图 6 可见,器件的光谱响应范围在 $350\sim 1100\text{ nm}$,在波长 950 nm 附近,灵敏度达到极大,约为 0.62 A/W 。

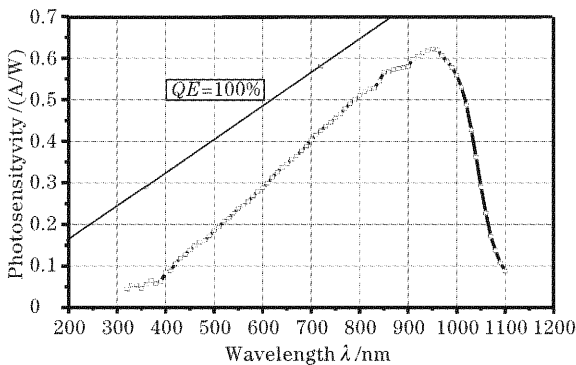


图 6 枕型二维位置敏感探测器的光谱灵敏度

Fig. 6 Spectral photoresponse of the pin-cushion two-dimensional PSD

为确定枕型二维位置敏感探测器的位置线性度,我们测量了其光敏面的位置网格图。测量时首先固定入射光斑的 y 坐标不变,使其在 x 方向扫描,每隔 $500\text{ }\mu\text{m}$ 测量一个位置。然后改变光斑的 y 坐标,间距也是 $500\text{ }\mu\text{m}$,再使其沿 x 方向扫描。这样,一共测量了 15×15 个点,然后用所测的光斑位置坐标作图,得到如图 7 所示的位置网格图。虽然在这个试样中,边界线电阻 $R=7\text{ k}\Omega/\text{cm}$,而 $r/\alpha=6\text{ k}\Omega/\text{cm}$,Gear 定理并没有完全满足,位置网格图的边缘仍有点向里凹,但仍可发现其位置线性度比

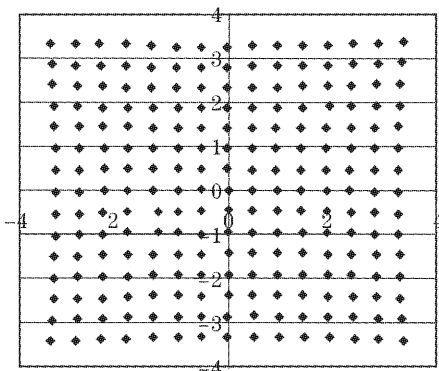


图 7 枕型二维位置敏感探测器的位置网格图

Fig. 7 Position linearity of the pin-cushion two-dimensional PSD

四边型二维位置敏感探测器有了很大提高。在所测量的 75% 光敏区域内,均方根位置误差约为 $\delta=0.135\text{ mm}$,而以均方根位置误差表示的非线性度在 1.1% 左右,比四边型二维位置敏感探测器的位置线性度提高了近一个数量级。

5 结 论

应用 Gear 定理所设计的枕型二维位置敏感探测器既具有四边型位置敏感探测器暗电流小,反偏容易的特点,又具有二面型位置敏感探测器线性度优良的长处,尽管其有效光敏面积有所减少,并且在制作上也更加困难。采用集成电路工艺技术所研制的枕型二维位置敏感探测器表现出良好的光电特性和测量准确度,其位置线性度可以比四边型位置敏感探测器提高一个数量级,达到了 1.1% 。今后我们将使枕型位置敏感探测器的电阻匹配关系(Gear 定理)得到更好的满足,进一步提高其位置测量的线性度和准确度,以满足高精度二维位置测量的需求。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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
- 3 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)
- 4 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
- 5 Wang Zhixing, Li Zhenhua, He Anzhi *et al.*. Additional position error of PSD caused by diffraction of light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 118~126 (in Chinese)
- 6 王志兴,李振华,贺安之等. 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[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 118~126
- 7 H. J. Woltring. Single and dual-axis lateral photodetectors of rectangular shape[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1975, ED-22: 581~590
- 8 K. Yamamoto, S. Yamaguchi, Y. Terada. New structure of two-dimensional position sensitive semiconductor detector and application[J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, NS-32(1): 438~442
- 9 A. Makynen, T. Ruotsalainen, T. Rahkonen *et al.*. CMOS-compatible position-sensitive devices (PSDs) based on photodetector arrays[J]. *Sensors and Actuators (A)*, 2003, **105**: 261~270
- 10 C. W. Gear. Graphics in a time sharing environment[C]. *Proc. for the Skytop Conf. on Computer Systems in Experimental Nuclear Phys.*, 1969, USAEC Conf-670301: 552~565
- 11 Tang Jiuyao. Structure and properties of two-dimensional pin-cushion PSD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6): 735~738 (in Chinese)
- 12 唐九耀. 枕型二维位置敏感探测器的结构和性能研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(6): 735~738