

# 应用 Multisim 研究不同结构二维 PSD 的线性度

戚巽骏<sup>1,2</sup> 李侃<sup>3</sup> 林斌<sup>1</sup> 曹向群<sup>1</sup> 陈钰清<sup>1</sup>

(1 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 浙江大学国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

(2 安徽师范大学物理与电子信息学院, 芜湖 241000)

(3 浙江大学光电信息工程学系, 杭州 310027)

**摘要** 应用电路模拟软件 Multisim 对四边形结构、方形结构、直角形结构、双面结构位置敏感探测器的线性度进行仿真实验研究, 得到了相应的线性网格图, 并进行了分析. 综合比较这几种不同结构二维位置敏感探测器的线性度. 结果表明: 四边形电极结构位置敏感探测器的位置误差最大, 中央 40% 光敏区的位置误差约为 10.05%, 直角型电极结构位置敏感探测器, 双面型电极结构位置敏感探测器以及带电阻边框的方形电极结构位置敏感探测器在相应区域的位置误差的误差分别为 3.70%, 0.29%, 0.12%. 对计算结果与试验结果进行了比较, 表明该方法具有简单直观, 参量变化多样性, 结果可靠的优点.

**关键词** 位置敏感探测器; Multisim; 非线性; 位置误差

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

## 0 引言

位置敏感探测器 (Position Sensitive Detector, PSD)<sup>[1]</sup> 是一种基于半导体 PN 结横向光电效应的光电器件. 它能连续地检测入射光斑的重心位置, 特别适用于位置、位移、距离、角度以及可以间接转化为光斑位置或位移的其他物理量的非接触高精度快速测量<sup>[2~4]</sup>.

作为位置探测器件, PSD 的位置线性度是一个至关重要的性能指标. 二维 PSD 的结构是影响其线性度的重要因素. 本文首先对二维四边形结构 PSD, 方形结构 PSD, 直角形结构 PSD 和双面结构 PSD 分别建立相应的 RC 网络模型, 然后运用电路模拟软件 Multisim (加拿大 Electronics Workbench 公司推出的用于电子线路仿真的虚拟电子工作台软件) 进行仿真, 计算出四种不同阳极结构二维 PSD 的线性度, 比较它们的线性度和误差分布, 最后对 3 mm × 3 mm 四边形结构的 PSD 进行了实验测试, 并和模拟计算结果进行比较.

## 1 模型

从宏观角度看, 二维 PSD 器件光敏区等效为一个电阻和电容均匀分布的 RC 网络<sup>[5]</sup>, 如图 1. 在 PSD 光敏感面上加恒定光照, 稳态时, 等效于在光照位置有一个恒流源, 这一点即为光的实际入射位置 (x, y). 图 1 中:  $R_s$  是单位长度的面电阻, 起分配电流的作用;  $R_{sh}$  是单位长度的结电阻, 反映了 pn 结漏电流的大小;  $C$  是单位面积结电容, 忽略光生电流

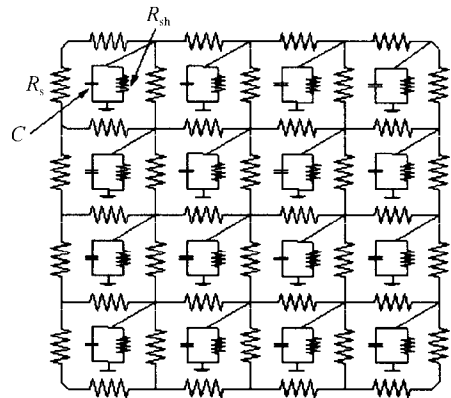


图 1 二维 PSD 光敏面的 RC 网络结构

Fig. 1 The RC structure of the two dimensional PSD

在结内的漂移时间, 结电容  $C$  与面电阻  $R_s$  决定了电流在 PSD 内的传输时间.

二维 PSD 根据电极结构不同分为多种类型, 其中四边形结构示意图, 双面型电极结构示意图, 直角型电极结构示意图和方形结构示意图分别如图 2 (a), (b), (c), (d).

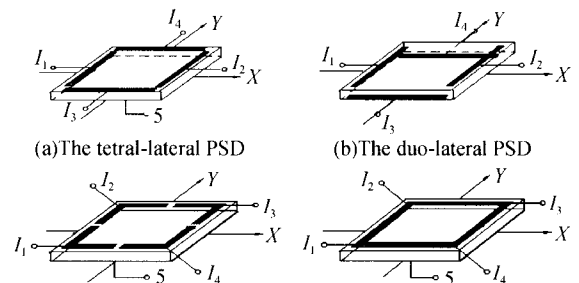


图 2 四种不同结构 PSD 的示意图

Fig. 2 Four structure types of two dimensional PSD

图 2 中,  $I_1, I_2, I_3, I_4$  表示从四个电极流出的光电流, 5 是公共电极, 提供反偏电压 (双面型 PSD 没

有公共电极). 如果以 PSD 光敏面中心为坐标原点, 光敏面边长为  $L$ , 则对四边形结构和双面型结构 PSD 计算公式为<sup>[6]</sup>

$$x = (L/2) [(I_2 - I_1)/(I_1 + I_2)] \quad (1)$$

$$y = (L/2) [(I_4 - I_3)/(I_3 + I_4)] \quad (2)$$

直角型电极结构和方形电极结构的 PSD 位置计算公式为

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

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

## 2 Multisim 仿真结果与讨论

本文模拟所用的 RC 网络的参量采用浙江大学自制的二维四边形  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  PSD 实际器件的参量, 具体如下: 面电阻  $R_s$  为  $400 \Omega$ , 单位长度节电阻  $R_{sh}$  为  $30 \text{ M}\Omega$ , 单位面积电容  $C$  为  $3 \text{ pF}$ , 电极电阻为  $1.5 \Omega$ , 为了突出 PSD 本身结构对线性度的影响, 不考虑负载电阻, 即令负载电阻为 0.

利用 Multisim 构造出四种不同 PSD 的 RC 模型, 由四个电极输出的电流  $I_1, I_2, I_3, I_4$  通过位置计算式(1)或者(2)得到位置的 计算值, 用  $\cdot$  表示; 实际光入射位置用虚线的交点表示. 为了便于比较, 对所有结果进行了归一化处理.

### 2.1 四边形电极结构

四边形结构 PSD 非线性网格图总体上呈现中央稀疏边缘密集的特点, 即使是中央区域位置误差也比较大, 整个网格图呈现一种枕性畸变, 如图 3(a), 四边形 PSD 只在有效区域很小的范围内呈现出线性

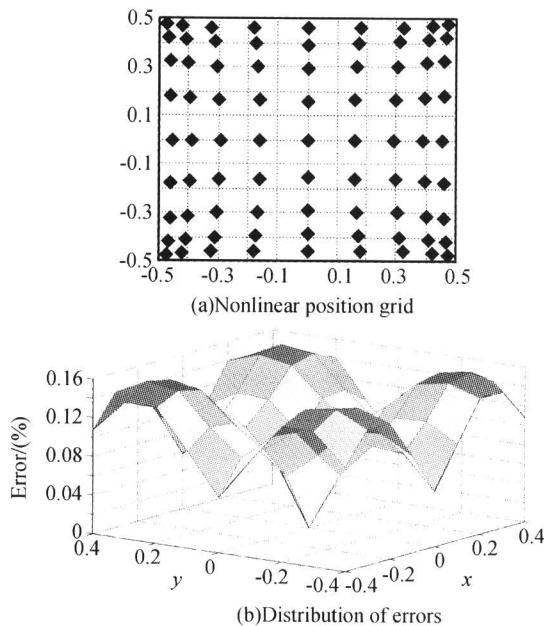


图3 四边形结构 PSD 的非线性网格及误差分布  
Fig.3 Nonlinear position grid and distribution of errors of the tetra-lateral PSD

度; 在光敏表面的边界处, 畸变越来越严重. A 区(以光敏面中心为原点, 以边长的 40% 为半径的一个圆覆盖的光敏面)<sup>[7]</sup> 平均位置误差约为 10.05%, B 区(以光敏面中心为原点, 以边长为 80% 的半径的一个圆覆盖的光敏面)<sup>[7]</sup> 平均位置误差约为 11.82%. 在光敏面(0.3, 0.3)(-0.3, 0.3)(-0.3, -0.3)(0.3, -0.3)处有最大误差为 15.62%, 如图 3(b).

### 2.2 双面型电极结构

双面结构 PSD 的结构特点是: 在光敏面和背面分别设两条直电极, 正面和背面的电极取向互相垂直, 由于两面都要承担分配电流的作用, 所以该结构没有公共电极.

双面结构 PSD 计算位置与实际入射位置基本重合, 几乎没有明显畸变, 线性度比较好, 如图 4(a). A 区平均位置误差约为 0.29%, B 区平均位置误差约为 0.80%. 在光敏面(0.4, 0.4)(-0.4, 0.4)(-0.4, -0.4)(0.4, -0.4)处有最大误差为 2.14%, 如图 4(b).

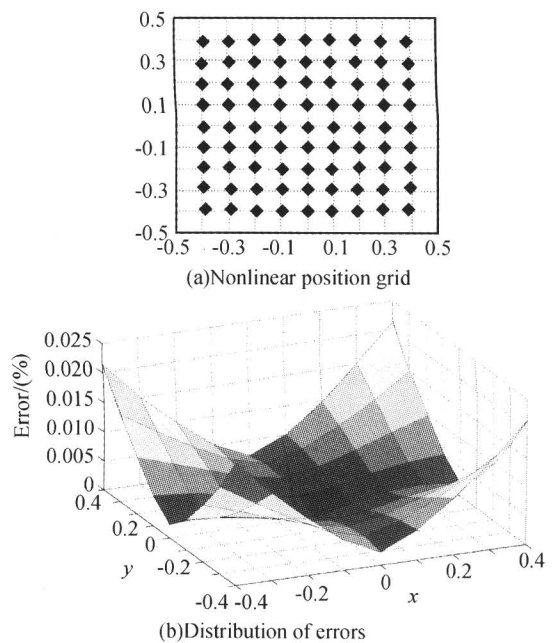


图4 双面型结构 PSD 的非线性网格及误差分布  
Fig.4 Nonlinear position grid and distribution of errors of the tetra-lateral PSD

### 2.3 直角型电极结构

直角形电极结构与四边形电极结构的区别仅在于电极的形状和位置设置, 光敏面的四周是四个直角形的铝电极.

与四边形结构的相比, 直角形结构中央区域的位置误差明显减小, 但边沿误差仍然较大, 线性度网格向四个角收拢. 沿对角线方向位置偏差较大, 非线性较严重, 如图 5(a). 直角形 PSD 比四边形 PSD 相对应的中心部分的线性度要好的多, 但是往边缘方向, 这种线性度不断降低. A 区平均位置误差约

为 3.70%，B 区最大误差约为 9.41%。在光敏面  $(-0.4, -0.2)(-0.4, 0.2)(0.4, -0.2)(0.4, 0.2)$   $(-0.2, 0.4)(0.2, 0.4)(-0.2, -0.4)(-0.2, -0.4)$  处有最大误差为 16.65%，如图 5(b)。

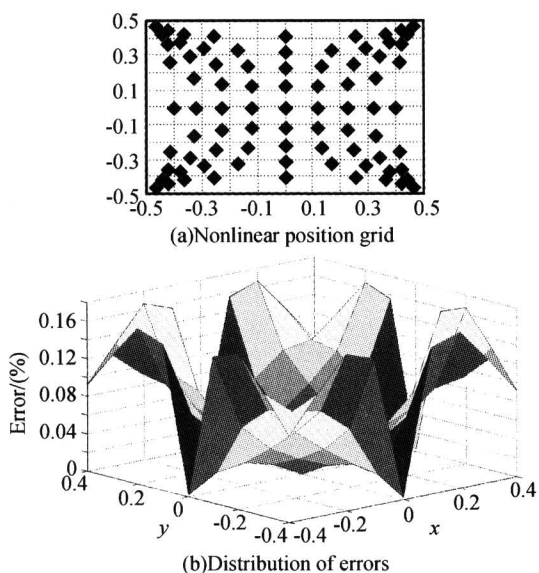


图 5 直角型结构 PSD 的非线性网格及误差分布  
Fig. 5 Nonlinear position grid and distribution of errors of the tetra-lateral PSD

### 2.4 方形电极结构

方形电极结构 PSD 在光敏面四周设有一个闭合的正方形电阻边框。

方形结构 PSD 的计算位置基本与实际入射位置重合，几乎没有畸变，线性度最好，如图 6(a)。A

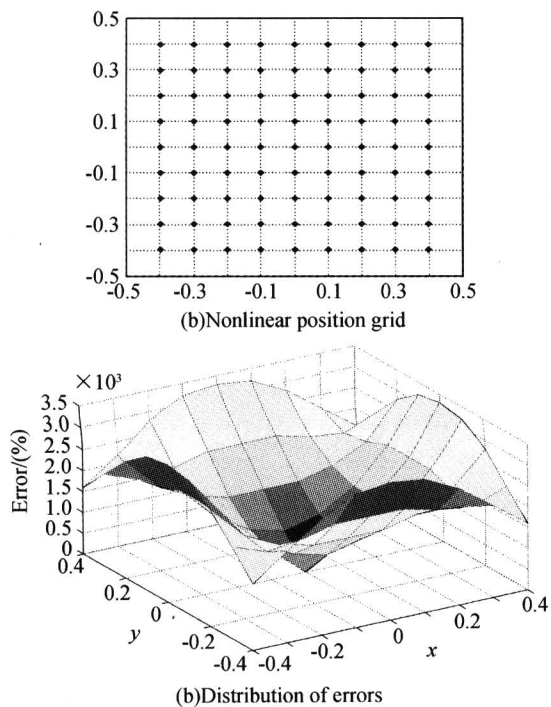


图 6 方形结构 PSD 的非线性网格及误差分布  
Fig. 6 Nonlinear position grid and distribution of errors of the tetra-lateral PSD

区平均位置误差约为 0.12%，B 区平均位置误差约为 0.24%。在光敏面  $(0.4, 0)(-0.4, 0)(0, -0.4)(0, 0.4)$  处有最大误差为 0.33%，如图 6(b)。

### 2.5 误差比较

为了便于比较，将四种不同结构的 PSD 在 A 区和 B 区的误差分布列成表格，如表 1。由表 1 知四边形的线性度最差，直角型次之，双面型又次之，方形最好。

表 1 四种不同结构 PSD 的误差分布表

	A 区平均误差	B 区平均误差	最大误差
四边形电极结构	10.05%	11.82%	15.62%
直角型电极结构	3.70%	9.41%	16.65%
双面型电极结构	0.29%	0.80%	2.14%
方形电极结构	0.12%	0.24%	0.33%

## 3 实验测试

为了验证上述计算结果，本文对浙江大学生产的二维四边形  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  PSD 进行了线性度测试，整个试验在超净实验室中进行，室温为  $20^\circ\text{C}$ 。测试系统如图 7。

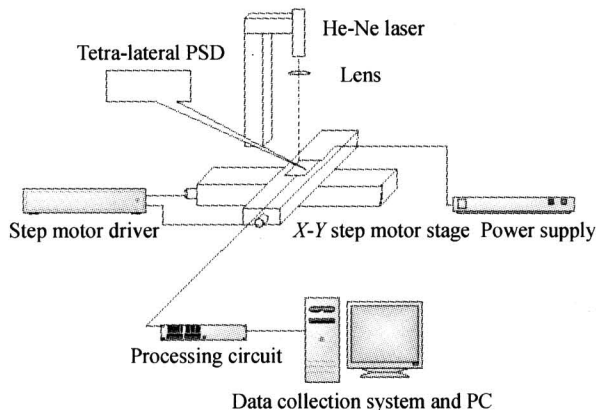


图 7 PSD 的非线性测试平台  
Fig. 7 Experimental set-up used for nonlinearity of PSD

其中二维步进电机系统采用北京卓立汉光仪器有限公司的 SC3 系统，准确度可以达到  $1.25\ \mu\text{m}$ ；光源是浙江大学生产的 He-Ne 激光器，功率为  $3\text{ mW}$ ，波长为  $633\text{ nm}$ ，光斑直径为  $100\ \mu\text{m}$ ；后续电路为自主开发的配套电路；数据采集系统是由中泰研创科技有限公司提供的数据采集卡。二维四边形  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  PSD 平行放置在二维步进平移工作台上，加  $5\text{V}$  的反偏电压。

控制步进电机工作台在  $x, y$  两个方向的每步移动距离为  $300\ \mu\text{m}$ ，由此采集的数据做出的网格

图,为了便于和计算结果比较,对试验结果也进行了归一化,如图 8,其中实线为实验测试值,虚线为计算值.

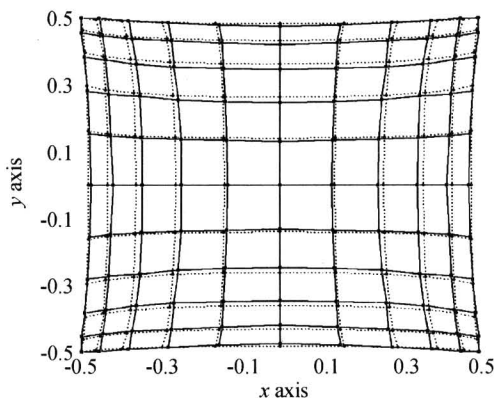


图 8 二维  $3 \times 3$  mm 四边形 PSD 的计算值和试验值  
Fig. 8 Calculation and testing results of the two dimensional  $3 \times 3$  mm tetra-lateral PSD

#### 4 结论

采用电路模拟软件 Multisim 研究了四种不同结构 PSD 的 RC 网络模型,分别得到相应模型的非线性度网格图和误差分布.

对仿真计算的结果与实验测试结果比较吻合较好.用 Multisim 来研究 PSD 的线性度简单直观,参量变化多样,结果可靠.从线性度的角度而言,在 A 区和 B 区的平均误差四边形的线性度最

差,直角型次之,双面型又次之,方形最好;而最大误差则是直角型最大,方形最小.

#### 参考文献

- 1 陈冬严,林斌,陈钰清.一维 PSD 瞬态响应特性的有限差分方法研究.光子学报,2004,33(10):1159~1161  
Chen D Y, Lin B, Chen Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(10):1159~1161
- 2 乐开端,曹建安,周翔,等.高准确度激光倾角测量技术研究.光子学报,2004,33(9):1108~1110  
Yue K D, Cao J A, Zhou X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(9):1108~1110
- 3 Schaefer P, Williams R D, Davis G K, et al. Accuracy of position detection using a position-sensitive detector. *Instrum and Meas*, 1998,47(4):914~919
- 4 张虎,章海军,张冬仙,等.液相型原子力显微镜的研制及其应用.光子学报,2004,33(10):1273~1276  
Zhang H, Zhang H J, Zhang D X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(10):1273~1276
- 5 Kalbitzer S, Stumpf W. A nomogram for design of position sensitive detectors. *Nuclear Instruments and Methods*, 1970,77:300~302
- 6 黄梅珍.位置敏感探测器的研[学位论文].杭州:浙江大学,2001.61~63  
Huang M Z. Study on Position Sensitive Detector (Academic dissertation). Hangzhou: Zhejiang University, 2001.61~63
- 7 The handbook of Position Sensitive Detector. HAMAMATSU PHOTONICS K. K. Solid State Division, Product Catalogue, 1991

### The Linearity Analysis of Different Two Dimensional Position Sensitive Detectors with Different Structure by Using Multisim

Qi Xunjun<sup>1,2</sup>, Li Kan<sup>3</sup>, Lin Bin<sup>1</sup>, Cao Xiangqun<sup>1</sup>, Chen Yuqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, National Research Center of Engineering & Technology for Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

<sup>2</sup> Physics & Electronic Information Department, Anhui Normal University, Wuhu 241000

<sup>3</sup> Department of optical engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2005-06-27

**Abstract** Four structure types of two dimensional position sensitive detectors have been studied. There are the tetra-lateral PSD, the modified tetra-lateral PSD, the duo-lateral PSD and the resistance bordered PSD. The RC models of these four structure type PSDs have been developed and the linearity of them are emulated by the soft of the Multisim. The linearity position grid and the errors graphics show that the average error in the 40% centric sensitive area of the tetra-lateral PSD, the modified tetra-lateral PSD, the duo-lateral PSD and the resistance bordered are 10.05%, 3.70%, 0.29% and 0.12% respectively. The result shows that the models can give a more exact analysis on different structure types of two dimensional position sensitive detectors than the analytic and numerical methods.

**Keywords** Position sensitive detector; Multisim; Non-linearity; Position error



**Qi Xunjun** was born in 1978 in Anhui Province. He received the B. S. degree from Physics and Electronic Information Department, Anhui Normal University in 2001. Now he is pursuing his Master's Degree in Optical Engineering Department, Information Science and Technology College, Zhejiang University. His research interests presently focus on optoelectronic detector design and optimization.