

死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的研究

杨桂栓¹ 张志峰^{1*} 翟玉生¹ 王才东² 郭莹莹² 杨红军¹ 白煌煌¹ 王新杰²

(¹ 郑州轻工业学院技术物理系, 河南 郑州 450002; ² 郑州轻工业学院机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要 介绍了四象限探测器的工作原理及影响四象限探测系统精度的各种内外部因素,详细分析了四象限探测器死区对探测范围内探测灵敏度的影响。在探测范围内,对各个象限内高斯光斑接收的光功率进行计算,并用 Matlab 软件对归一化的目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系进行仿真,设计四象限探测系统的光路和电路,当死区宽度 $D=0.1$ mm 时,调整光斑半径 R 大小分别为 0.6 mm 和 0.4 mm 下进行测量。理论及实验结果表明,死区宽度相对光斑半径的比例越大,光斑偏移量随光斑中心的变化趋势越陡峭,探测器的灵敏度越高。

关键词 光学器件; 四象限探测器; 死区; 高斯光斑

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.062303

Study on Influence of Dead Zone on Detection Range and Sensitivity Four-Quadrant Detector

Yang Guishuan¹ Zhang Zhifeng¹ Zhai Yusheng¹ Wang Caidong² Guo Yingying²
Yang Hongjun¹ Bai Huanghuang¹ Wang Xinjie²

¹ Department of Technology and Physics, Zhengzhou University of Light Industry,
Zhengzhou, Henan 450002, China

² Mechanical and Electrical Engineering Institute, Zhengzhou University of Light Industry,
Zhengzhou, Henan 450002, China

Abstract This paper introduces the principle of four-quadrant detector and the various factors influencing its detection sensitivity. The influence of dead zone on detection sensitivity is analyzed in detail. The deviation of spot is simulated with Matlab software. The experimental system, including the circuit part and optical part, is designed. Light intensity of each quadrant of the detector is detected by the circuit part. When the width of the dead zone is 0.1 mm, the deviation of spot is measured for the light spot radii of 0.6 mm and 0.4 mm, respectively. The experimental and theoretical results show that the detection sensitivity increases with the size ratio of dead zone to spot increasing.

Key words optical devices; four-quadrant detector; dead zone; Gaussian spot

OCIS codes 230.5160; 040.5160; 200.2610

1 引言

四象限探测器是把 4 个性能完全相同的光电二极管按照 4 个象限的形式排列而成的光电探测器件,其结构简单,具有低噪声、高精度、高灵敏度、高宽带等优点。因此,四象限探测系统被广泛地应用于激光光电准直、光电追踪^[1]、光电定向、自由空间光通信^[2]、光电制导及精密机械加工(深孔直线度测量^[3]、钻孔定位^[4])等方面。

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-03-07; 网络出版日期: 2013-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61274012)、河南省科技厅攻关项目(122102210436,122102210435)、郑州轻工业学院校青年骨干教师培养计划(2011XGGJS004)、河南省高校科技创新团队项目(2012IRTSTHN013)、河南省创新型科技人才队伍建设工程、郑州市科技局科技攻关项目(121PPTGG362-4)和郑州轻工业学院博士科研基金资助课题。

作者简介: 杨桂栓(1990—),男,本科生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: yguishuan@126.com

通信联系人。E-mail: zhifengzhang76@gmail.com()

由于四象限探测器为高精度的探测器件,因此研究探测器随接收光强的响应规律^[1,5,6]及工作特性^[7],分析影响探测器正常工作及探测精度的干扰因素,对提高探测器的测量精度和工作稳定性具有重要的意义。影响四象限探测器探测精度的因素有多种。其定位算法有象限加减法和对角相减法,文献[1,8,9]对其进行了讨论分析,理论仿真证明对角相减法使探测器的探测灵敏度更高。在文献[2,8,10]对光斑大小对四象限探测器性能的影响进行了分析,结果表明随着光斑的增大,探测器的灵敏度降低,但探测器的线性范围增大。信号光光子噪声及外界的背景光对探测器的跟踪精度也有一定的影响,文献[2,11]对其进行了理论分析,并用实验验证了分析结果。另外,四象限探测器由于其结构的特点,探测器自身的热噪声、四象限结构不对称^[7]和死区宽度^[2,10,12]对探测精度也有一定的影响,对此,文献[13,14]对四象限的结构进行了改进或模仿四象限探测原理设计新型的光电探测系统,来避免探测器自身结构对其探测性能的影响。

对于传统的四象限探测器,死区对四象限探测器探测精度的影响在文献[2,10,12]中有一定的分析,其中文献[2]仅从死区减少了四象限的受光面积分析死区对探测精度的影响,文献[12]也是以死区减少四象限的受光面积而影响了探测器的能量探测率为基础,来分析死区对探测器各种性能的影响。但是在四象限探测系统实际应用中,探测器光敏面接收到的光斑其能量服从高斯分布,因此本文将从死区对四象限探测器接收到的光功率的影响进行详细推导计算,探讨死区宽度及其与光斑半径的比例对四象限探测器探测范围的影响,并进行相关的实验验证。

2 四象限探测器工作原理

四象限探测器是把4个性能完全相同的光电二极管按照4个象限排列,称为四象限光电二极管,它的基本结构如图1所示,象限间的间隔工艺上做得很窄称为死区,每个象限光照面上引出一根导线,基区引线为公共极。光斑照在探测器的4个象限光敏面上,被分成A、B、C、D四部分,对应的4个象限极产生的光电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 。当光斑在四象限探测器光敏面上移动时,各象限光照面积将发生变化,从而导致4个象限产生的光电流强度发生变化。由传统的加减算法可以计算出光斑在X方向(平行于死区的方向)和Y方向(光敏面内垂直于X方向)的位移,即

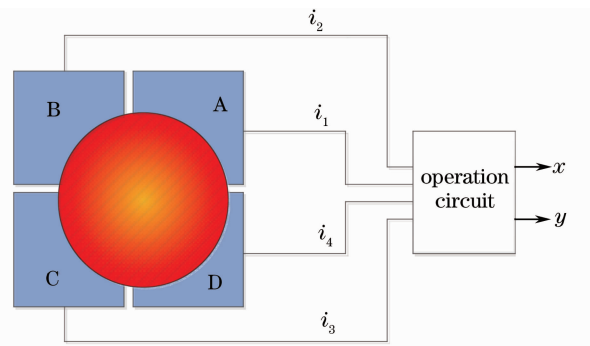


图1 四象限探测器工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of four-quadrant detector

$$x = k \frac{(i_1 + i_4) - (i_2 + i_3)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}, \quad (1)$$

$$y = k \frac{(i_1 + i_2) - (i_3 + i_4)}{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}, \quad (2)$$

式中 k 为位移关系系数,由实验标定结果得出。

四象限探测器每个象限上产生的光电流与其接收到的总光强成正比,各个象限上接收的总光强为光斑在其光敏面上光强的积分,即

$$i_n = \Psi \cdot \int_S I(r) ds, \quad n = 1, 2, 3, 4, \quad (3)$$

式中 S 为各个象限的光斑面积, Ψ 为四象限光敏面的光电转换效率, $I(r)$ 为光斑光强分布函数。

当接收光斑的光强服从基模高斯分布时,其光强分布函数为

$$I(r) = I_0 \exp \frac{-2r^2}{R^2}, \quad (4)$$

式中 I_0 为高斯光斑中心处的光强, R 为光斑尺寸, r 为距离光斑中心的距离^[15]。

由于对角相减法与象限加减法相比能够使探测器的探测灵敏度更高^[1,8,9],因此本文采用对角加减法来进行分析,此时,X方向和Y方向相对象限加减法的坐标系绕原点顺时针方向旋转 45° ,即有

$$x = k' \frac{i_1 - i_3}{i_1 + i_3}, \quad (5)$$

$$y = k' \frac{i_2 - i_4}{i_2 + i_4}, \quad (6)$$

式中 k' 为位移关系系数, 由实验标定结果得出。

由于四象限探测器具有对称结构, X 、 Y 方向的坐标算法一致, 因此以下内容仅对 X 方向进行分析探究。

3 死区对四象限探测器不同探测范围影响的理论分析

影响四象限探测器探测精度的因素有多种, 既有外部干扰因素, 又有内部因素, 通过优化电路设计和光路结构可以减少外部背景光、信号噪声、探测器热噪声等因素的干扰。从四象限探测器的结构上来分析, 死区是四个象限的隔离区, 探测器工作时由四个象限的光敏面吸收光能而感应产生光电流。光斑是连续的, 死区也接收了一部分的光能, 却不能感应产生光电流, 为了减少探测器对接收光斑能量的损失, 工艺上死区的宽度做得非常狭窄, 一般为几十微米。但在实际的探测系统中, 四象限探测器为高精度的探测器件, 探测精度达微米量级, 因此死区的宽度对探测器精度的影响是不容忽视的。下面在分析死区对四象限探测器影响的过程中, 假设系统已经过优化, 即不考虑其他外界干扰因素。

假设探测器接收到的为光强服从高斯分布的光斑, 光斑半径为 R , 四象限探测器的死区宽度为 D , 光斑中心在 X 方向上的偏移量为 x (世界坐标), 现对探测器各象限内接收到的光强进行积分, 根据光斑中心的位置可以分为两种情况, 即光斑中心位于死区内 ($0 < |X| < \frac{\sqrt{2}D}{2}$) 和光斑中心位于死区外部 ($\frac{\sqrt{2}D}{2} < |X| < R - \frac{\sqrt{2}D}{2}$), X 为光斑的图像坐标。

当 $0 < |X| < \frac{\sqrt{2}D}{2}$ 时, 如图 2 所示, 根据对角相减法只需计算一、三象限接收到的有效光强即可。利用微分圆环法对有效面积上的光强进行积分, 计算结果为

$$x = k' \left[\int_{(\sqrt{2}D/2)-X}^{X+(\sqrt{2}D/2)} 2r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{D-\sqrt{2}X}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X+(\sqrt{2}D/2)}^R 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2}X+D}{2r} - \arcsin \frac{D-\sqrt{2}X}{2r} \right) I(r) dr \right] \left[\int_{(\sqrt{2}D/2)-X}^{X+(\sqrt{2}D/2)} 2r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{D-\sqrt{2}X}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X+(\sqrt{2}D/2)}^R 2r \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\sqrt{2}X+D}{2r} - \arcsin \frac{D-\sqrt{2}X}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}. \quad (7)$$

当 $\frac{\sqrt{2}D}{2} < |X| < R - \frac{\sqrt{2}D}{2}$ 时, 如图 3 所示, 积分计算结果为

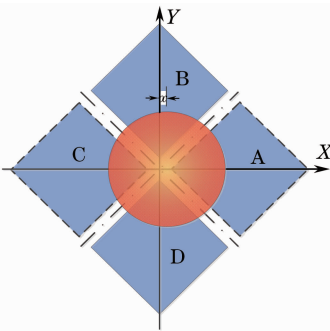


图 2 四象限探测器光斑能量分布图 ($0 < |X| < \frac{\sqrt{2}D}{2}$)

Fig. 2 Spot energy distribution of four-quadrant

detector ($0 < |X| < \frac{\sqrt{2}D}{2}$)

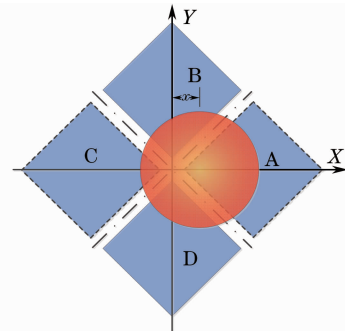


图 3 四象限探测器光斑能量分布图 ($\frac{\sqrt{2}D}{2} < |X| < R - \frac{\sqrt{2}D}{2}$)

Fig. 3 SpotEnergy distribution of four-quadrant detector

($\frac{\sqrt{2}D}{2} < |X| < R - \frac{\sqrt{2}D}{2}$)

$$\begin{aligned}
 x = k' & \left[\int_0^{(\sqrt{2}/2)X-D/2} 2\pi r + \int_{(\sqrt{2}/2)X-D/2}^{X-(\sqrt{2}D/2)} \left(2\pi - 4\arccos \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr + \right. \\
 & \int_{X-(\sqrt{2}D/2)}^{X+(\sqrt{2}D/2)} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X+(\sqrt{2}D/2)}^R 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2}X+D}{2r} + \arcsin \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr \left. \right] \\
 & \left[\int_0^{(\sqrt{2}/2)X-D/2} 2\pi r I(r) dr + \int_{(\sqrt{2}/2)X-D/2}^{X-(\sqrt{2}D/2)} \left(2\pi - 4\arccos \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr + \right. \\
 & \left. \int_{X-(\sqrt{2}D/2)}^{X+(\sqrt{2}D/2)} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X+(\sqrt{2}D/2)}^R 2r \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\sqrt{2}X+D}{2r} - \arcsin \frac{\sqrt{2}X-D}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

当 $|X| > R - \frac{\sqrt{2}D}{2}$ 时, 其中一个象限将不能接收到光斑, 超出测量范围。

综合(7)、(8)式, 用 Matlab 7.12.0 (R2011a) 进行理论仿真, 令 $k' = 1, I_0 = 1$, 设光斑半径为 0.5 mm, 对死区宽度为 $D = 0.1$ mm, 0.06 mm, 0 三种情况进行仿真, 得出归一化的目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系, 如图 4 所示。

当死区宽度 $D = 0.1$ mm 时, 对光斑半径 R 为 0.4 mm 和 0.6 mm 的情况进行仿真计算, 得出归一化的目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系, 如图 5 所示。

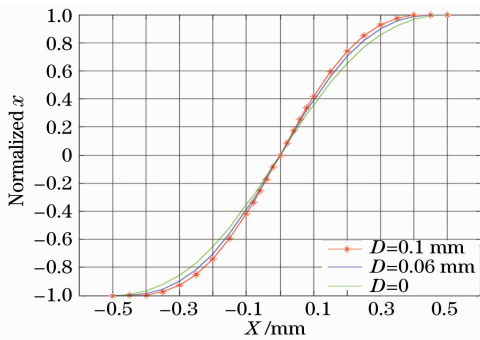


图 4 $R = 0.5$ mm 时, 归一化的目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系

Fig. 4 Relationship between normalized target spot displacement x and the spot center coordinate X ($R = 0.5$ mm)

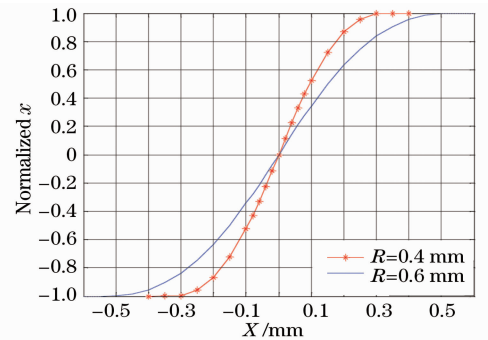


图 5 $D = 0.1$ mm 时, 归一化的目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系

Fig. 5 Relationship between normalized target spot displacement x and the spot center coordinate X ($D = 0.1$ mm)

4 理论仿真结果分析

由图 4 的仿真结果可知, 当光斑的半径一定时, 四象限探测器的死区宽度越大, 光斑偏移量随光斑中心的变化趋势越陡峭, 即探测器的灵敏度越高。又由图 5 可知, 四象限的死区宽度一定时, 光斑半径缩小, 探测范围变窄, 光斑偏移量随光斑中心的变化趋势也变得更加陡峭, 探测器的灵敏度同样提高。综合图 4 和图 5, 可以得出死区宽度相对光斑半径的比例越大, 光斑偏移量随光斑中心的变化趋势越陡峭, 探测器的灵敏度越高。

5 实验系统设计及结果

为方便对四象限探测器各种性能的研究, 本实验的光路及信号处理电路系统框图设计如图 6 所示。实验系统采用的是氦氖气体激光器, 通过一对光栅对光强进行衰减调节, 通过一组透镜来调节四象限探测器上接收光斑的大小。采用上海欧光 QP5.8-6-TO5 四象限探测器, 象限面为 1.20 mm \times 1.20 mm, 死区宽度为 100 μ m。为适应对不同坐标求解算法的要求, 本实验系统采集的信号数据为各个象限的光电流, 然后通过计算机进行运算求解光斑坐标。设计时采用四路模拟开关切换采集各象限的光电流, 通过一路运算放大器

进行放大,减少了电路元器件并消除了多通道运算放大器增益误差的影响。

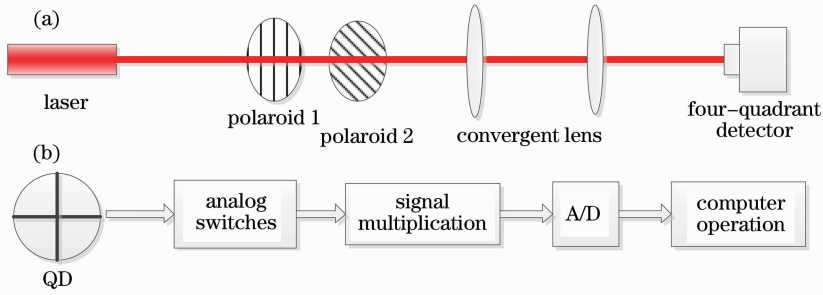


图6 系统设计框图。(a) 光路系统;(b) 信号处理电路系统

Fig. 6 Block diagram of experimental setup. (a) Optical part; (b) circuit part

在设计探究死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的实验时,主要从死区相对光斑半径的比例不同来进行实验探究,即当死区宽度 $D=0.1\text{ mm}$ 时,调整光斑半径 R 大小分别为 0.6 mm 和 0.4 mm 进行测量。

实验时,设探测器的死区交点(探测器中心)为原点,探测器固定在二维坐标螺旋测微台上(单方向精度为 0.01 mm)。首先调整探测器的安装方向,通过调节螺旋测微台,多次测量各个象限的电流值,找到光斑中心与坐标中心重合,并调整使光斑的移动方向与定义的 X 方向重合。系统调整完毕后,通过螺旋测微台的测量值和探测的电流计算值对探测器进行光斑偏移量的标定。最后通过改变光斑在探测器上的位置,对光斑中心位置进行测量,探测器的测量结果绘制目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 的变化关系图,如图7所示。由图7可知,死区宽度相对光斑半径的比例越大,光斑偏移量随光斑中心的变化趋势变得越陡,探测器的灵敏度越高。

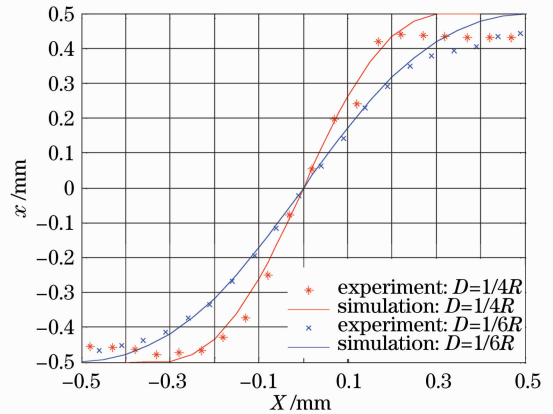


图7 $D=0.1\text{ mm}$ 时,目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X 变化的实验结果

Fig. 7 Relationship between target spot displacement x and spot center coordinate X obtained by experiment ($D=0.1\text{ mm}$)

6 结 论

综合理论分析及实验可以得出死区宽度相对光斑半径的比例越大,光斑偏移量随光斑中心的变化趋势越陡峭,探测器的灵敏度越高。但考虑到实际的探测系统时,死区宽度加大,则探测器接收光斑能量的效率降低,各象限得到的信号强度将变得微弱,尽管灵敏度较高,但探测误差将大大增加。因此,在探测系统设计时,应根据系统要达到的精度、信号处理电路的能力及系统成本对四象限探测器来进行选型,并选配合适的光路调节系统,降低外部干扰,增强系统的稳定性。

参 考 文 献

- 1 Feng Longling. Simple analysis of signal-processing skill for four-quadrant opto-electronic detective system[J]. *Optical Technique*, 1995, **21**(3): 12~17
冯龙龄. 浅析四象限光电探测系统中信号处理的技巧[J]. *光学技术*, 1995, **21**(3): 12~17
- 2 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034
韩成, 白兴宝, 杨华民等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2030~2034
- 3 Zhang Pengwei, Zhang Zhiquan, Xie Jinbing. Study on a straightness measurement method based on the four-quadrant detector for deep hole[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 745~748
张鹏伟, 张智诠, 谢劲冰. 一种基于四象限探测器的深孔直线度测量方法的研究[J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 745~748
- 4 Hyeon-Hwa Lee, Min-Yang Yang, Woo-Cheol Shin *et al.*. A compact high-precision optical sensor for three-dimensional

- tool-origin compensation[J]. *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, **12**(3): 543~549
- 5 Zhifeng Zhang, Qibo Feng, Zhan Gao *et al.*. A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(2): 252~255
- 6 Zhang Zhifeng, Kuang Cuifang, Chen Shiqian. Study of relation between facula and size of quadrant of quadrant detector [J]. *Measurement Technique*, 2005, (11): 29~31
张志峰, 匡萃方, 陈世谦. 像光斑和四象限探测器象限面积大小关系的理论研究[J]. 计量技术, 2005, (11): 29~31
- 7 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Feng Junyan *et al.*. Analyzing characteristic of the four-quadrant-detector applied to laser alignment[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 387~389
匡萃方, 冯其波, 冯俊艳 等. 四象限探测器用作激光准直的特性分析[J]. 光学技术, 2004, **30**(4): 387~389
- 8 Chen Lin. Studies processes in the result of QD detection[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2010, (4): 56~57
陈琳. 影响四象限探测器探测结果的若干因素的研究[J]. 仪器仪表用户, 2010, (4): 56~57
- 9 Xiang Hao, Cuifang Kuang, Yulong Ku *et al.*. A quadrant detector based laser alignment method with higher sensitivity [J]. *Optik*, 2012, **123**(24): 2238~2240
- 10 Sun feng, Huang Kairen, Zhang Xin *et al.*. Measurement of laser spot radius on quadrant photodiode[J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(1): 23~25
孙峰, 黄开仁, 张鑫 等. 四象限探测器光斑尺寸测量方法的研究[J]. 光学与光电技术, 2010, **8**(1): 23~25
- 11 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Liu Bin. Study on background light influences on four-quadrant detector[J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 493~495
匡萃方, 冯其波, 刘斌. 背景光对四象限探测器干扰的研究[J]. 激光与红外, 2004, **34**(6): 493~495
- 12 Ma Xiaoyu, Mu jie, Rao Changhui. Error analysis of four-quadrant-based tracking sensor when dead zone is inevitable[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(7): 072903
马晓燮, 母杰, 饶长辉. 死区对四象限跟踪传感器跟踪精度的影响[J]. 物理学报, 2012, **61**(7): 072903
- 13 Paul Edmond Rutten. High speed two-dimensional optical beam position detector[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(7): 073705
- 14 K. Bertilssona, E. Dubarica, G. Thungstroma *et al.*. Simulation of a low atmospheric-noise modified four-quadrant position sensitive detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, **466**(1): 183~187
- 15 Chen Yuqiang, Wang Jinghuan. *Laser Principle* (2nd ed.)[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2010. 107
陈钰清, 王静环. 激光原理(第二版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010. 107