

文章编号: 0253-2239(2009)11-2984-05

# 基于无衍射光的光互连系统的对准偏差研究

王中宇 李 萌

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 以信噪比为性能指标,以相邻光通道之间的串扰和探测器前置放大器的热噪声作为系统噪声的来源,研究了基于无衍射光的光互连系统在不同对准偏差条件下的性能。研究表明,探测器阵列的尺寸参数可作为系统对准偏差容忍度和信噪比的优化参数。扩大探测器半径,减小探测器间距可以使系统包容更大的对准偏差,但为了保证一个可以接受的信噪比,探测器间距不应过小。此外,采用无衍射光的光互连系统具有不受纵向对准偏差影响的优点。

**关键词** 光通信; 对准偏差; 信噪比; 串扰; 光电探测器

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.2984

## Misalignment Analysis of Optical Interconnects Based on Non-Diffracted Beams

Wang Zhongyu Li Meng

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrument Science & Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract** The performance of optical interconnects utilizing non-diffracted beams under different misalignment conditions was analyzed. The signal-to-noise ratio (SNR) was used as the performance index, and the integral optical crosstalk of adjacent channels and detector pre-amplifier thermal noise were treated as the main noise. The results show that the pitch and size of detectors can be used as optimization parameters for maximal misalignment tolerance and a high SNR. Increasing of detector radius and decreasing of spacing between detectors can tolerate greater misalignment, but the spacing cannot be too small in order to achieve an acceptable SNR. Moreover, optical interconnects using non-diffracting beams has the advantage that it is not affected by longitudinal misalignment.

**Key words** optical communications; misalignment; signal-to-noise ratio; crosstalk; photodetectors

### 1 引 言

在电气互连领域中,速度和容量的提高受到了金属导线电感和电容的限制<sup>[1,2]</sup>。在基于并行光通道的多层板高速计算系统中,自由空间光互连已显示出其巨大的优势。这种优势包括高互连效率、大规模并行处理能力、高带宽以及高传输速率。此外,光学互连以光作为信息传输载体,无电磁干扰现象<sup>[3]</sup>。实际上,光互连系统中的准直高斯光束依然具有一定发散角和相对较大的光束半径,它限制了并行光互连系统通道密度的进一步提高<sup>[4]</sup>。

无衍射光的概念于 1987 年被首次提出,相对于高斯光束,它具有相对较小的光束半径和理论值为零的发散角<sup>[5,6]</sup>。1994 年,吕百达<sup>[7]</sup>针对无衍射光

的概念和产生方法进行了实验研究和理论分析,并做了相关概念的评注。基于无衍射光束的光互连系统已经显示出一定的优势。2000 年, Yu 等<sup>[8]</sup>使用无衍射光束构建了一个光互连系统,光斑直径为 95  $\mu\text{m}$ ,光束之间的间距为 250  $\mu\text{m}$ 。如果使用高斯光束构建相同距离的光互连系统,则光束之间的间距至少为 700  $\mu\text{m}$ 。同时,由于使用无衍射光,省去了对高斯光束的准直系统和接收端的聚焦系统,只增加了体积相对较小的无衍射光发生装置,简化了系统结构。

对准偏差的存在使得理想状况下本应相互对准的激光器阵列和探测器阵列并未对准,从而存在一定的偏差。光互连系统对对准偏差的耐受程度,往

收稿日期: 2008-12-08; 收到修改稿日期: 2009-03-06

基金项目: 航天科技创新基金(2006-2007)资助项目。

作者简介: 王中宇(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光电测试方面的研究。E-mail: mewan@buaa.edu.cn

往往以容忍力为标志<sup>[9,10]</sup>。研究表明,合理地优化激光器阵列和探测器阵列的尺寸参数,可以有效地提高光互连系统对对准偏差的容忍力,减小其对系统的负面影响<sup>[11,12]</sup>。文献[13]针对基于高斯光束的光互连系统中的对准偏差,以信噪比作为性能评价指标,对一定对准偏差条件下探测器阵列的参数选择进行了分析。有研究表明,在基于无衍射光的光互连系统中,可通过探测器阵列参数的合理配置来优化系统的信噪比<sup>[14]</sup>。本文首先介绍了基于无衍射光的光互连系统中存在的几种对准偏差及其影响方式,讨论了信噪比与探测器间距、探测器尺寸以及对准偏差的关系,分析了一定对准偏差条件下系统的性能,并探讨了不同的探测器阵列参数对对准偏差容忍力的影响。

### 2 基于无衍射光的光互连系统

如图 1 所示,基于无衍射光的光互连系统由激光器阵列、探测器阵列、光束控制元件组成。在理想状态下,激光器阵列中发出的任一光束的光束中心和探测器阵列中相应的探测器中心准确对齐,每个探测器所接收到的相应光束能量也达到最大化。如图 2 所示,由于相邻通道的光束之间存在着旁瓣重叠,每个探测器不但接收其对应通道的光束能量,也接收相邻通道的光束能量。

在实际的无衍射光互连系统中,由于安装的精确性、器件受热变形等因素的存在,激光器阵列和探测器阵列并不严格地对准,而是存在一定地偏差,即对准偏差。对准偏差可分为三种情况:纵向偏差、径向偏差以及角度偏差,如图 3 所示。由无衍射光的传输性质可知,无衍射光的径向光强分布不随纵向的传输距离而改变<sup>[15]</sup>。因此,纵向偏差对无衍射光

互连系统的影响可以忽略。本文主要考虑径向偏差和角度偏差。其中,径向偏差使得每条通道的光束与相应探测器未对准,光束传播的中心线与探测器轴线平行但并不重合,而是错开了一个距离。相对于严格对准的情况,此时的有用光能量减少了。在存在角度偏差的情况下,光束传播的中心线与探测器轴线并不平行,而是存在一个夹角,这个夹角的存在不但减弱了探测器接收到的有用光能量,而且还造成了探测器平面上的光斑由圆形变为椭圆形。

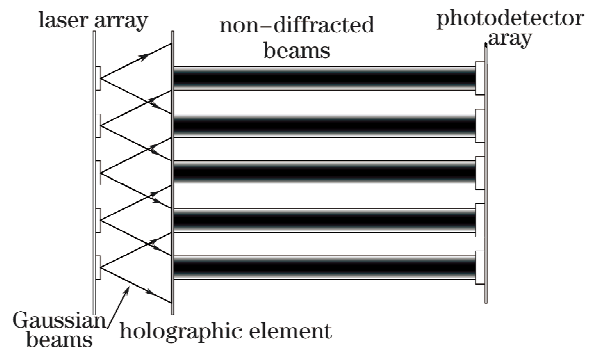


图 1 基于无衍射光的光互连系统示意图  
Fig. 1 Schematic diagram for optical interconnects based on non-diffracted beams

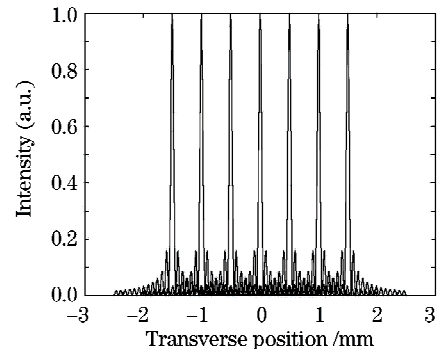


图 2 无衍射光阵列光强分布  
Fig. 2 Intensity distribution of non-diffracted beams

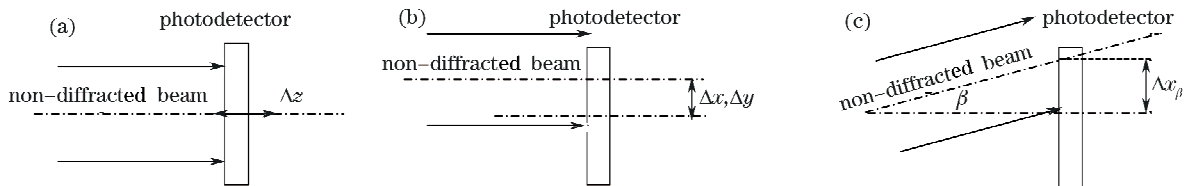


图 3 基于无衍射光的光互连系统的三种对准偏差。(a)纵向偏差;(b)径向偏差;(c)角度偏差  
Fig. 3 Different misalignments in optical interconnects based on non-diffracted beams, (a) longitudinal misalignment; (b) transverse misalignment; (c) angular misalignment

### 3 一定对准偏差条件下的信噪比分析

如图 4 所示,激光器阵列和探测器阵列中的各元件间距是相同的,设间距为  $d_s$ ,探测器的半径为  $d$ 。

设相邻通道的串扰为  $C$ ,无衍射光的光强分布为  $I(x, y, z)$ , 则有

$$I(x, y, z) = AJ_0^2(\alpha \sqrt{x^2 + y^2}), \quad (1)$$

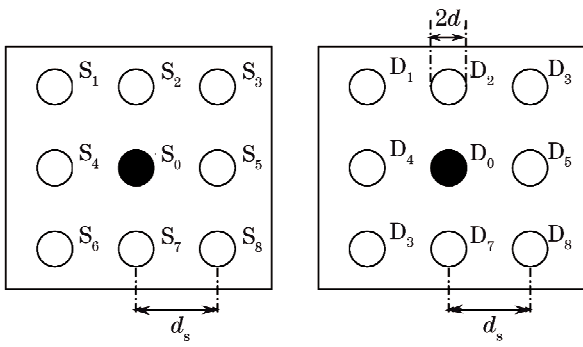


图 4 光源阵列和探测器阵列的示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of source and photodetector arrays

其中  $\alpha$  为径向波数, 它和无衍射光束的中心光斑宽度  $\omega$  相关,  $\omega = 3\pi/(2\alpha)$ ;  $x, y$  为探测器平面的坐标;  $A$  为归一化的能量常数。从而得到串扰为

$$C = \iint_{D_{1-8}} I dx dy = 4 \iint_{D_1} I dx dy + 4 \iint_{D_2} I dx dy =$$

$$4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{(d_s+x)^2 + (d_s-y)^2}] \times$$

$$dx dy + 4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{x^2 + (d_s-y)^2}] dx dy. \quad (2)$$

将探测器对应的无衍射光的中心光束作为有用信号, 因此探测器  $D_0$  所接收到的归一化的有用信号为

$$S = A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2(\alpha \sqrt{x^2 + y^2}) dx dy. \quad (3)$$

由于激光器阵列和探测器阵列中各元件的排列都是中心对称的, 在  $x$  方向上的径向偏差和任意方向上相同大小的径向偏差对系统的影响是相同的。因此有串扰

$$C_{\Delta xy} = \iint_{D_{1-8}} I_{\Delta xy}(x, y, z) dx dy = 4 \iint_{D_1} I_{\Delta xy}(x, y, z) dx dy + 4 \iint_{D_2} I_{\Delta xy}(x, y, z) dx dy =$$

$$4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{(d_s+x-\Delta x)^2 + (d_s-y+\Delta y)^2}] dx dy +$$

$$4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{(x-\Delta x)^2 + (d_s-y+\Delta y)^2}] dx dy, \quad (4)$$

存在径向偏差的条件下, 探测器接收的有用信号为

$$S_{\Delta xy} = A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{(x-\Delta x)^2 + (y-\Delta y)^2}] dx dy, \quad (5)$$

存在大小为  $\beta$  的角度偏差时, 可得互扰为

$$C_{\beta} = \iint_{D_{1-8}} I_{\beta}(x, y, z) dx dy = 4 \iint_{D_1} I_{\beta}(x, y, z) dx dy + 4 \iint_{D_2} I_{\beta}(x, y, z) dx dy =$$

$$4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{\cos^2 \beta (d_s+x-\Delta x_{\beta})^2 + (d_s-y)^2}] dx dy +$$

$$4A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{\cos^2 \beta (x-\Delta x_{\beta})^2 + (d_s-y)^2}] dx dy, \quad (6)$$

其中  $\Delta x_{\beta} = L \tan \beta$ ,  $L$  是光互连系统的互连距离, 即激光器阵列和探测器阵列之间的距离。

此时有用信号  $S_{\beta}$  为

$$S_{\beta} = A \int_{-d}^d \int_{-\sqrt{(d^2-x^2)}}^{\sqrt{(d^2-x^2)}} J_0^2[\alpha \sqrt{\cos^2 \beta (x-\Delta x_{\beta})^2 + y^2}] dx dy. \quad (7)$$

信噪比 SNR 可用下式计算<sup>[16]</sup>:

$$R_{SN} = \frac{P_i S}{P_i C + P_{DN}}, \quad (8)$$

其中  $P_i$  是每个通道的光转换能量,  $P_{DN}$  是每个探测器前置放大器的热噪声.  $P_{DN}$  可表示为

$$P_{DN} = P_{NE} \sqrt{B}, \quad (9)$$

其中  $B$  是通道带宽, 由探测器的种类所决定;  $P_{NE}$  为等价噪声能量;  $S$  和  $C$  分别为有用信号和噪声(串扰)。通常情况下,  $P_{NE}, B, P_{DN}, P_i$  都为固定值。

### 4 计算机仿真分析

#### 4.1 径向偏差分析

设无衍射光的波长  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ , 中心光斑的宽度为  $120 \mu\text{m}$  ( $\alpha = 400 \text{ cm}^{-1}$ ), 光互连距离  $L = 10 \text{ mm}$ , 光转换能量  $P_i = 50 \mu\text{W}$ , 带宽  $B = 100 \text{ MHz}$ ,  $P_{NE} = 0.1 \text{ nW/Hz}^{1/2}$ 。

对准偏差为零的情况如图 5 所示, 当探测器半径  $d$  一定时, 接收到的有用信号是一定的, 增大探测器间距  $d_s$ , 可以减小串扰, 从而增大 SNR; 当探测器间距  $d_s$  不变时, 增大探测器半径  $d$ , 接收到的有用信号和相邻通道间的串扰都会增大, 最大的 SNR 出现在  $d$  的某一取值区间(而不是  $d$  的最大值)。当存在对准偏差时, SNR 需要由  $d_s, d$  以及对准偏差共同决定。

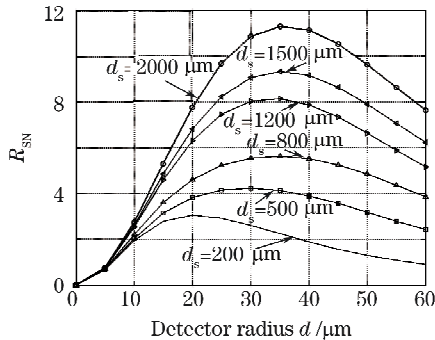


图 5 不同探测器间距时 SNR 与探测器半径的对应关系  
Fig. 5 SNR versus detector radius for different detector spacings

如图 6 所示, 其他情况相同时, 径向偏差越大, SNR 越小。当探测器间距  $d_s$  一定时, 探测器半径  $d$  越大, 系统对径向偏差的容忍力越强(将 SNR 的下降速度作为衡量容忍力强弱的标志, 下同)。但是, 在图 6 中还可观察到, 当径向偏差为零时, 最大的  $d$  并没有对应最大的 SNR, 这是因为最大 SNR 出现在  $d$  的某一取值区间内(见图 5)。如图 7 所示, 探测器半径  $d$  一定时, 系统对径向偏差的容忍力却随着探测器间距  $d_s$  的增大而减弱, 更大的  $d_s$  使得 SNR 对径向偏

差更为敏感。因此, 增大探测器间距可以增大 SNR, 但是不能增大系统对径向偏差的容忍力。

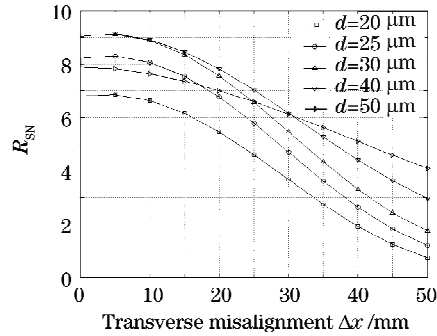


图 6 不同探测器半径时, SNR 与径向偏差的对应关系 ( $d_s = 1.5 \text{ mm}$ )

Fig. 6 SNR versus transverse misalignment for different detector radii ( $d_s = 1.5 \text{ mm}$ )

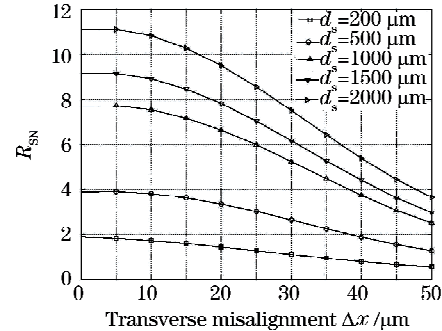


图 7 不同探测器间距时, SNR 与径向偏差的对应关系 ( $d = 35 \mu\text{m}$ )

Fig. 7 SNR versus transverse misalignment for different detector spacings ( $d = 35 \mu\text{m}$ )

#### 4.2 角度偏差分析

如图 8 所示, 当其他情况相同时, 角度偏差的存在使得系统的 SNR 下降。在探测器间距  $d_s$  一定时, 增大探测器半径  $d$ , 会增大系统对角度偏差的容忍力。当探测器半径  $d$  一定时, 角度偏差和探测器间

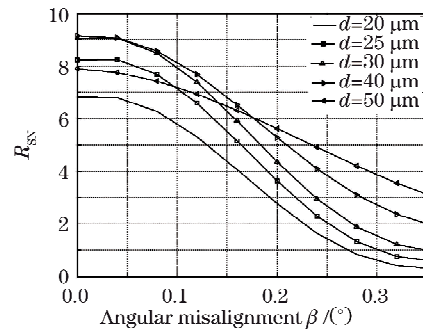


图 8 不同探测器半径时, SNR 与角度偏差的对应关系 ( $d_s = 1.5 \text{ mm}$ )

Fig. 8 SNR versus angular misalignment for different detector radii ( $d_s = 1.5 \text{ mm}$ )

距  $d_s$  对系统的影响如图 9 所示。 $d_s$  越大,系统对角度偏差的容忍力越小。

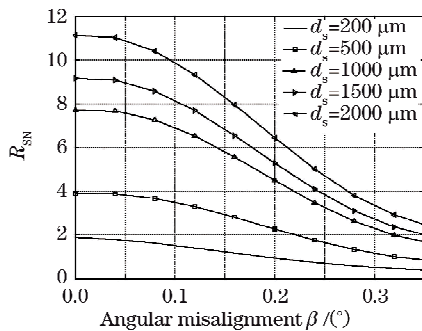


图 9 不同探测器间距时,SNR 与角度偏差的对应关系( $d=35 \mu\text{m}$ )

Fig. 9 SNR versus angular misalignment for different detector spacings ( $d=35 \mu\text{m}$ )

由此可见,无论是对于出现径向偏差还是角度偏差的情况,增大探测器半径  $d$  都可以使系统获得对偏差更大的容忍力,而增大探测器间距  $d_s$  会减小这种容忍力。此外,当存在角度偏差时,互连距离  $L$  也会对系统的性能产生影响。由图 10 所示,当存在相同的角度偏差量时,随着互连距离  $L$  的增加,SNR 会下降。这是由于接收光斑在探测器阵列端的径向偏差量  $\Delta x_\beta = L \tan \beta$ ,  $L$  增大会引起  $\Delta x_\beta$  增大,从而加大了角度偏差对 SNR 的影响。 $L$  越大,系统对角度偏差越敏感。

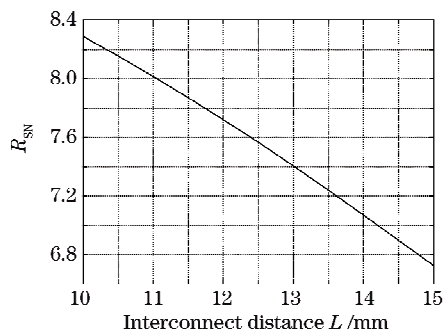


图 10 角度偏差为  $0.1^\circ$  时,SNR 与互连距离  $L$  的对应关系( $d=35 \mu\text{m}$ ,  $d_s=1.5 \text{mm}$ )

Fig. 10 SNR versus interconnect distance with angular misalignment of  $0.1^\circ$  ( $d=35 \mu\text{m}$ ,  $d_s=1.5 \text{mm}$ )

## 5 结 论

将 SNR 作为性能评价指标,分析了不同类型的对准偏差对基于无衍射光的光互连系统的影响。由于纵向误差对该系统的影响可以忽略,分析的重点是径向偏差和角度偏差。它们对系统影响的相同点在于:都使无衍射光束的中心偏移了相应探测器的中心。探测器半径越大,系统对对准偏差的容忍力

越强,但最大的探测器半径不一定对应最大的 SNR;探测器间距越大,系统的容忍力越弱,最大的探测器间距对应最大的 SNR。它们对系统影响的区别在于:角度偏差除了使得无衍射光束的中心偏移了相应探测器的中心之外,还造成了探测器平面接收光斑的变形,使其由圆形变为椭圆形,因而还引起了该平面上光强分布的变化;在存在角度偏差时,互连距离越长,角度偏差对系统的影响越大。而径向偏差对系统的影响则与互连距离无关。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Yadin, M. Orenstein, Parallel optical interconnects over multimode waveguides using mutually coherent channels and direct detection[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(10): 3126~3131
- 2 Y. Tissot, G. A. Russell, K. J. Symington *et al.*. Optimization of reconfigurable optically interconnected systems for parallel computing[J]. *J. Parallel Distr. Com.*, 2006, **66**(2): 238~247
- 3 Ni Wei, Wu Xingkun. Soft-lithography-based inter-chip optical interconnection circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 813~818
- 倪 玮, 吴兴坤. 基于软光刻的片间光学互连线路[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 813~818
- 4 N. Al-Ababneh, M. Testorf. Analysis of free space optical interconnects based on non-diffracting beams [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**(1): 393~400
- 5 J. Durnin, Jr. J. J. Miceli, J. H. Eberly. Diffraction-free beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 6 J. Durnin. Exact solutions for nondiffracting beams[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4): 651~654
- 7 Lü Baida. Comment on diffraction-free beams and related concepts[J]. *Appl. Laser*, 1994, **14**(6): 273~280
- 吕百达. 对无衍射光束和相关概念的评注[J]. *应用激光*, 1994, **14**(6): 273~280
- 8 C. Yu, M. R. Wang, A. J. Varela *et al.*. High-density non-diffracting beam array for optical interconnection [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**(1): 369~376
- 9 H. Sasiki, K. Shinzoaki, T. Kamiloh. Reduced alignment accuracy requirement using focused gaussian beams for free-space optical interconnection[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(8): 2240~2249
- 10 A. K. Ghosh. Misalignment tolerant packaging of optical interconnection based systems using multiple photodetectors[C]. *SPIE*, 2001, **4417**: 190~195
- 11 A. G. Kirk, D. V. Plant, M. H. Ayliffe *et al.*. Design rules for highly parallel free-space optical interconnects[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2003, **9**(2): 531~547
- 12 A. K. Ghosh. Effects of misalignments in packaging of array-based[C]. *SPIE*, 2003, **5202**: 276~286
- 13 N. Al-Ababneh. Misalignment analysis of lensless free-space optical interconnects[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(6): 065401
- 14 R. P. MacDonald, S. A. Boothroyd, T. Okamoto *et al.*. Interboard optical data distribution by besell beam shadowing[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **122**: 169~177
- 15 Li Meng, Zhang Duo, Wang Zhongyu *et al.*. Diffraction mode of axicon for tilted spherical wave beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 773~778
- 李 萌, 张 朵, 王中宇 等. 圆锥透镜对倾斜球面波光束的衍射模式[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 773~778
- 16 M. A. Neifeld, R. K. Kostuk. Error correction for free-space optical interconnects; space-time resource optimization[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(2): 296~307