

文章编号: 0253-2239(2006)02-0244-5

# 物光参考光同光轴的体全息存储光学系统设计\*

曾吉勇 王民强 金国藩 何庆声 严瑛白

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要:** 将两块漫射板分别置于输入面的两侧,使物光和参考光同光轴,可以使体全息存储傅里叶变换光学系统更为紧凑。然而,在这种全息存储光学系统中,物光和参考光的总数值孔径较物光数值孔径大很多。分析这种体全息存储光学系统物光和参考光光路的设计要求和光学参量的确定;采用多重结构方法对物光正向光路、逆向光路和参考光光路同时优化设计,实现对物光光路二对物像共扼位置控制像差,并满足参考光光路的要求;给出前后组焦距分别为 33 mm 和 30 mm 的物光和参考光同光轴,前工作距为 30 mm,物光和参考光总数值孔径为 0.53 的体全息存储光学系统的设计结果。系统的波像差小于  $0.071\lambda$ ,达到衍射极限。

**关键词:** 光学设计; 傅里叶变换透镜; 多重结构优化; 体全息存储

中图分类号: TH740.2 文献标识码: A

## Design of Volume Holographic Storage Optical System with Common Optical Axis for Signal Beam and Reference Beam

Zeng Jiyong Wang Minqiang Jin Guofan He Qingsheng Yan Yingbai

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The volume holographic storage optical system can be simplified, using the common optical axis for signal beam and reference beam by locating two diffusers on both sides of the incident plane. However, in this kind of holographic storage optical system, the total numerical aperture for signal beam and reference beam is much larger than the numerical aperture for signal beam. The design requirement and optical parameter determination about signal optical path and reference optical path in this volume holographic storage optical system have been analyzed. In order to correct aberration in positive optical path and reverse optical path for the object beam, and meet the demand of reference beam at the same time, the multi-configuration method has been adopted to optimize the positive and reverse optical path of the object beam and the optical path of the reference beam. A holographic storage optical system with common optical axis for signal beam and reference beam achieving diffractive-limit has been designed. The focal lengths of the front and rear group lens are 33 mm and 30 mm, respectively, its front work distance is 30 mm, its back group lens has 30 mm focal length, its total numerical aperture for signal beam and reference beam is 0.53, and the wave aberration of the system is less than  $0.071\lambda$ .

**Key words:** optical design; Fourier-transform lens; optimization with multi-configurations; volume holographic storage

## 1 引 言

作为三维存储技术的体全息存储<sup>[1~5]</sup>,由于具有存储密度大、数据传输速率高和读出时间短等优点,已成为存储技术研究的重点。在体全息存储系统中通常采用傅里叶变换(FT)光学系统存取数据<sup>[6,7]</sup>。为了使系统结构紧凑和高密度存储信息,

要求傅里叶变换镜头具有较短的焦距;为了提高存储密度,采用较大尺寸的空间光调制器(SLM)作为物面,这就要求傅里叶变换镜头具有较大的视场角。具有较短焦距和较大视场角的傅里叶变换镜头通常采用非对称的 5 片以上球面透镜结构形式<sup>[7,8]</sup>。为了简化体全息存储光学系统结构,可以将两块散射

\* 国家 973 计划(G1999033001)资助课题。

作者简介: 曾吉勇(1964~),男,江西永丰人,副教授,清华大学精密测量技术与仪器国家重点实验室博士后,主要从事体全息存储物镜和折衍混合光学系统的研究。E-mail: zengjiyong7@163.com

收稿日期: 2005-02-05; 收到修改稿日期: 2005-05-08

板分别置于输入面的两侧,使物光和参考光同光轴<sup>[8]</sup>。这种物光参考光同光轴的全息存储光学系

傅里叶变换镜头对衍射光成像的特点,决定了镜头满足以下设计要求<sup>[9]</sup>:1) 对两对物像共轭位置控制像差。第一对物像共轭位置:物在无穷远,光阑在前焦面上,像在后焦面上。第二对物像共轭位置:物在前焦面,光阑在后焦面上,像在无穷远处。2) 平行于光轴出射的主光线满足正弦条件。3) 消除各种单色像差,达到衍射受限,全视场内波像差小于  $0.25\lambda$ 。

分析了物光参考光同光轴的体全息存储傅里叶变换光学系统的设计要求和光学参量的确定;采用多重结构(Multi-configuration)方法<sup>[10]</sup>对物光正向光路和逆向光路以及参考光光路同时进行优化,实现对物光光路两对物像共轭位置控制像差,并满足参考光光路的要求;给出了达到衍射受限的前后组焦距分别为 33 mm 和 30 mm 的物光和参考光同光轴的大孔径全息存储光学系统的设计结果。

## 2 全息存储光学系统物光光路

### 2.1 设计要求

输入面空间光调制器的像素尺寸  $13.2\ \mu\text{m}$ ,像元数  $1280 \times 768$ ,对角线长  $\Phi_0 = 19.71\ \text{mm}$ 。输出面 CMOS 的像素尺寸  $12\ \mu\text{m}$ ,像元数  $1280 \times 768$ ,对角线长  $\Phi_1 = 17.91\ \text{mm}$ 。工作波长  $0.532\ \mu\text{m}$ 。

#### 2.1.1 焦距及其公差

要保证输入面空间光调制器和输出面 CMOS 像素的一一对应关系,傅里叶变换光学系统中前组镜头焦距  $f_I$  与后组镜头焦距  $f_{II}$  之比应等于空间光调制器面的对角线与 CMOS 面的对角线长度之比  $f_I/f_{II} = \Phi_0/\Phi_1 = 1.1$ ,设计中前组镜头焦距  $f_I$  取 33 mm,则对应的后组焦距  $f_{II}$  为 30 mm。可见前

统,其物光和参考光的总数值孔径较物光的数值孔径大得多,因而设计难度较大。

要保证空间光调制器面和 CMOS 面像素元的一一对应关系,制作出的前组镜头焦距  $f_I$  和后组镜头焦距  $f_{II}$  与设计值不能有很大的偏离。设  $L_I$  为输入面的物高,  $L_{II}$  为输出面的像高,则有  $L_{II} = (f_{II}/f_I)L_I$ 。假设由于后组镜头焦距  $f_{II}$  偏离设计值  $\Delta f_{II}$ ,引起像高  $L_{II}$  偏离设计值  $\Delta L_{II}$ ,则有  $\Delta L_{II} = (L_I/f_I)\Delta f_{II}$ 。为保证空间光调制器面和 CMOS 面像素元的一一对应关系,  $\Delta L_{II}$  应小于 0.3 个像素。对于  $f_I = 33\ \text{mm}$ 、 $f_{II} = 30\ \text{mm}$ 、像元数为  $1280 \times 768$  的全息存储系统,  $\Delta f_{II}$  应小于  $0.0133\ \text{mm}$ ,后组镜头焦距的相对偏差,  $\Delta f_{II}/f_{II} \leq 0.044\%$ 。

#### 2.1.2 畸变

为保证空间光调制器面和 CMOS 面像素的一一对应关系,系统在全视场内的绝对畸变应小于 0.3 个像素<sup>[6]</sup>。对于像元数为  $1280 \times 768$  的全息存储系统,在全视场内的相对畸变绝对值应小于  $0.04\%$ 。

## 2.2 光学参量的确定

### 2.2.1 频谱面光阑大小

傅里叶变换镜头对衍射光成像,在前组镜头前焦面上的空间光调制器可以视为周期光栅,设空间光调制器的像元尺寸为  $\delta_{\text{SLM}}$ ,则光栅常量为  $\delta_{\text{SLM}}$ ,平行相干光照明光栅后发生衍射,前组镜头对衍射光成像。设一级衍射光的衍射角为  $\theta_1$ ,相干光波长为  $\lambda$ ,则有  $\sin \theta_1 = \lambda/\delta_{\text{SLM}}$ 。为了让一级衍射光通过,镜头的物方数值孔径  $NA \geq \sin \theta_1 = \lambda/\delta_{\text{SLM}}$ ,存储面光阑大小  $\phi_s = 2(NA)f_I \geq \frac{2\lambda}{\delta_{\text{SLM}}}f_I$ 。

### 2.2.2 物光正向光路光学参量

图1所示,正向光路光学参量包括半视场角  $\theta_I$ ,像方数值孔径  $NA_I$ ,光圈数  $F_{\text{NOI}}$ 。有  $\theta_I =$

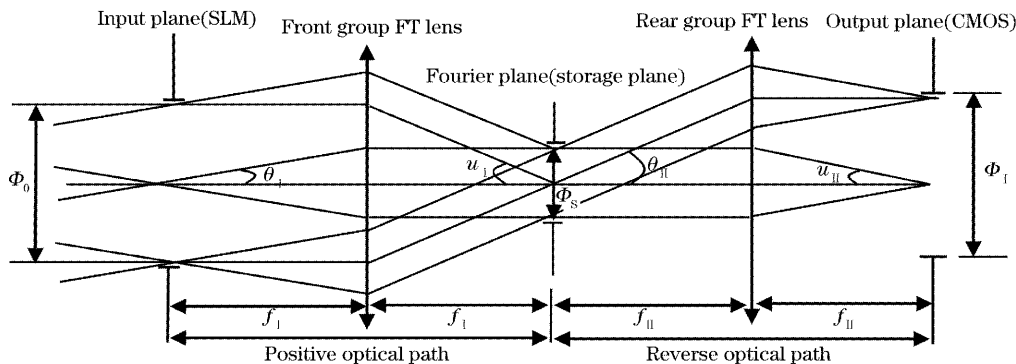


图1 体全息存储傅里叶变换光学系统

Fig. 1 Volume holographic storage Fourier transform (FT) optical system. SLM: spatial light modulator

$$\arcsin\left(\frac{\phi_s}{2f_I}\right), NA_I = \sin u_I = \frac{\phi_o}{2f_I}, F_{NOI} = \frac{f_I}{\phi_o}.$$

2.2.3 物光逆向光路光学参量

图 1 所示, 逆向光路光学参量包括半视场角  $\theta_{II}$ , 像方数值孔径  $NA_{II}$ , 光圈数  $F_{NOII}$ 。有  $\theta_{II} = \arcsin\left(\frac{\phi_I}{2f_{II}}\right), NA_{II} = \sin u_{II} = \frac{\phi_s}{2f_{II}}, F_{NOII} = \frac{f_{II}}{\phi_s}$ 。

表 1 列出了前组、后组镜头物光正向光路和逆向光路的光学参量。从前组镜头正向光路光学参量可见傅里叶变换镜头为一较大孔径小视场系统; 从前组镜头逆向光路光学参量可见该镜头为一小孔径中等视场系统。

表 1 物光正向、逆向光路的光学参量

Table 1 Optical parameter of positive and reverse optical path for object beam ( $f_I = 33 \text{ mm}, f_{II} = 30 \text{ mm}, \phi_s = 3 \text{ mm}$ )

Front group			Front group		
Positive	Optical	Path	Reverse	Optical	Path
$F/\#$	$\theta/(\circ)$	NA	$F/\#$	$\theta/(\circ)$	NA
1.7	2.6	0.29	11	16.9	0.0455
Rear group			Rear group		
Positive	Optical	Path	Reverse	Optical	Path
$F/\#$	$\theta/(\circ)$	NA	$F/\#$	$\theta/(\circ)$	NA
10	17	0.05	1.67	2.86	0.3

3 全息存储光学系统参考光光路

参考光由与空间光调制器在同一平面的漫射板 (Diffuser) 提供 (如图 2 所示), 两块漫射板分别置于空间光调制器的两侧, 来自漫射板的漫射光经过傅里叶变换镜头在频谱面上作为参考光。这时参考光和物光同光轴, 傅里叶变换全息存储镜头设计时除考虑物光光路设计要求外还要考虑参考光光路的设计要求。

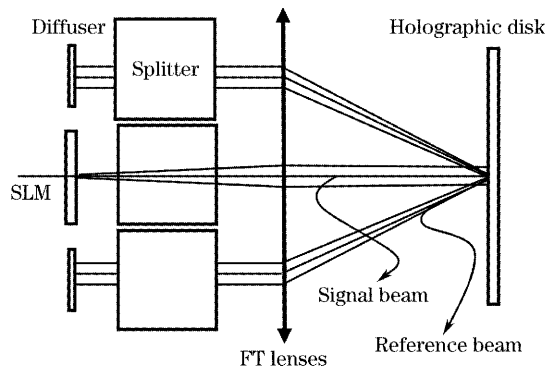


图 2 物光参考光同光轴

Fig. 2 Common optical axis for signal beam and reference beam. SLM: spatial light modulator, FT: Fourier transform

3.1 漫射板尺寸

设计中分束器的尺寸为  $2H \times d_2$ , 散射板到分束器的距离  $d_1$ , 与傅里叶变换镜头光轴小于  $\theta_i$  的漫射光进入傅里叶变换镜头作为参考光 (图 3 所示)。

$$\theta_r = \arcsin(\sin \theta_i/n), \quad (1)$$

其中  $n$  为分束器的折射率。

$$\Delta y = y_1 + y_2 = d_1 \tan \theta_i + d_2 \tan \theta_r, \quad (2)$$

散射板的长度为  $2R_d$

$$R_d = H - \Delta y. \quad (3)$$

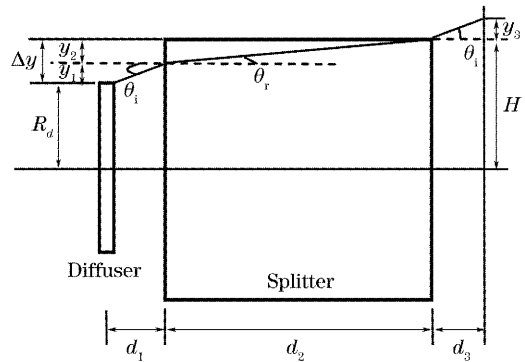


图 3 漫射板和镜头通光孔径尺寸的研究

Fig. 3 Determining diffuser size and lens aperture

3.2 镜头通光孔径

傅里叶变换镜头不仅要让空间光调制器面的衍射光通过, 而且要让该面两侧漫射板的漫射光通过。如图 3 所示,  $d_3$  为分束器到镜头的距离。

$$y_3 = d_3 \tan \theta_i, \quad (4)$$

镜头半通光孔径

$$D = 2(3H + y_3). \quad (5)$$

在设计中分束器为 BK7 玻璃,  $n = 1.5168$ ,  $d_1 = 6 \text{ mm}, d_2 = 20 \text{ mm}, d_3 = 4 \text{ mm}, 2H = 13 \text{ mm}, \theta_i = 5^\circ$ 。由 (1) 式 ~ (3) 式得到漫射板长度为 9 mm, 由 (5) 式得到镜头的通光孔径为 40 mm。参考光与物光同光轴的全息存储光学系统较参考光与物光不同光轴的常规全息存储光学系统, 镜头的通光孔径增大了近一倍。

4 全息存储傅里叶变换光学系统的多重结构优化

为了减少杂光, 在输入面和频谱面设置光阑, 这样第一对物像共轭位置相当于物在无穷远, 孔径光阑在前焦面, 出瞳在无穷远, 成像在频谱面上, 第一对物像共轭位置对应于图 1 中的正向光路; 第二对物像共轭位置相当于物在前焦面上, 孔径光阑在后焦面上, 入瞳在无穷远。图 1 中, 同样的一组镜头用

于作傅里叶变换(位置 2),也用于作逆傅里叶变换(位置 4,  $f_I = f_{II}$ ),镜头作逆傅里叶变换时其结构为作傅里叶变换时结构的翻转。图 1 中,傅里叶变换镜头的逆向光路中物在无穷远,孔径光阑在频谱面上,成像在输出面。第二对物像共轭位置控制像差同图 1 中镜头的逆向光路控制像差是等效的。

傅里叶变换镜头设计时要对物光的正向光路和逆向光路同时校正像差,同时要保证参考光路大数值孔径要求,为此采用三重结构的透镜建模和优化方法<sup>[10]</sup>。第一重结构为物光正向光路,第二重结构为物光逆向光路,第三重结构为参考光光路。在这三重结构中分别设定各自的相对孔径、视场角和优化目标函数,第二重结构的镜头参量取自第一重结构,第三重结构镜头参量取自前二重结构,建立以频谱面对称的全息存储光学系统。从而实现对同一组镜头的物光正向光路、逆向光路和参考光路的同时优化,使同一组镜头对物光光路的两对物像共轭位置控制像差,并保证参考光光路大数值孔径的设计要求。

由于焦距相差不大,前组镜头和后组镜头可以视为以频谱面对称放置,前组镜头和后组镜头的像差将部分抵消。全息存储光学系统只需分别对前组、后组镜头建立三重结构进行优化。具体步骤如下:首先采用三重结构建模和优化方法对前组镜头物光的正向、逆向光路和参考光光路进行优化设计;

然后缩放到后组镜头的焦距要求,再对后组镜头物光的正向、逆向光路和参考光光路进行优化设计;最后将前组镜头和后组镜头合并建立傅里叶变换全息存储光学系统。

## 5 设计实例

设计了全息存储傅里叶变换光学系统。物光前后组光学参量详见表 1。该系统由焦距为 33 mm 的前组镜头和焦距为 30 mm 的后组镜头组成,如图 4、图 5 所示。前、后组镜头均由 6 片球面透镜组成,BS 为分束器。透镜 1、2、3、4 组成了一个柯克(Cooke)三片型的演变形式,将柯克三片型中的后一片正透镜拆分为两个正透镜(透镜 3、透镜 4),以满足物光前组正向光路和后组逆向光路较大数值孔径(分别为 0.29 和 0.3),而物光前组逆向光路和后组正向光路中等视场角(分别为  $33.8^\circ$  和  $34^\circ$ )的要求。为了进一步校正场曲,引入了透镜 5、6,其作用相当于一个弯月厚透镜。光学系统的成像质量详见表 2,前组正向光路的波像差小于  $0.077\lambda$ ,像点的最大均方根半径为  $0.79 \mu\text{m}$ ;后组正向光路的波像差小于  $0.068\lambda$ ,像点的最大均方根半径为  $1.34 \mu\text{m}$ ;全息存储系统的波像差小于  $0.071\lambda$ ,像点的最大均方根半径为  $2.05 \mu\text{m}$ ,畸变小于  $0.0013\%$ 。

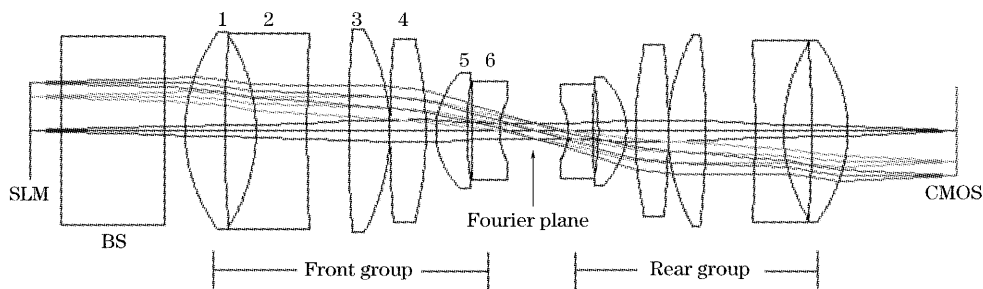


图 4 全息存储傅里叶变换光学系统物光光路

Fig. 4 Signal optical path of the holographic storage Fourier transform optical system. SLM: spatial light modulator, BS: beam splitter

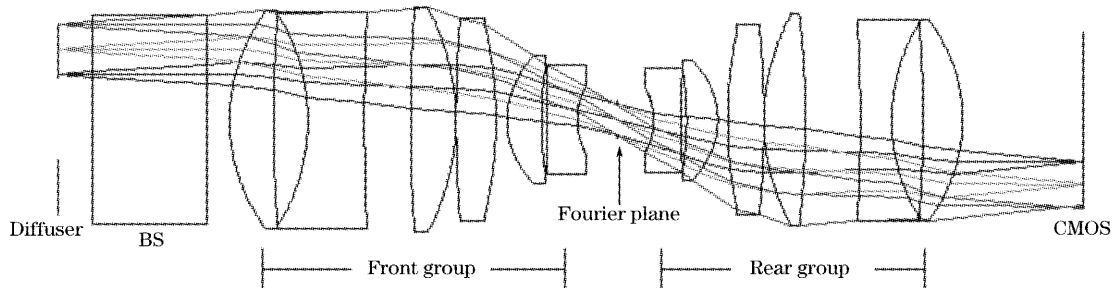


图 5 全息存储傅里叶变换光学系统参考光光路

Fig. 5 Reference optical path of the holographic storage Fourier transform optical system. BS: beam splitter

表 2 全息存储光学系统的成像质量

Table 2 Image quality of the holographic storage optical system

Front group positive optical path ( $f_I=33$ mm)		Rear group positive optical path ( $f_{II}=30$ mm)	
Distance between SLM and front group lens	30 mm	Distance between storage plane and rear group lens	6.4 mm
Distance between front group lens and storage plane	7 mm	Distance between rear group lens and CMOS	21.1 mm
Max. RMS OPD	0.01 $\lambda$	Max. RMS OPD	0.011 $\lambda$
Max. RMS spot radius	0.79 $\mu$ m	Max. RMS spot radius	1.34 $\mu$ m
FT Optical system (Total track; 179.7 mm)			
Signal optical path		Reference optical path	
Object space NA	0.0455	Object space NA	0.0875
Real image height	9 mm	Image space NA	0.53
Max. distortion	0.0013%	Object height	17.5 mm
Max. RMS OPD	0.024 $\lambda$	Spot size on Fourier plane	5.9 mm
Max. RMS spot radius	2.05 $\mu$ m		

## 6 结 论

分析了体全息存储傅里叶变换光学系统物光光路中前组、后组焦距及其公差和光学系统畸变的要求,讨论了物光光路中前后组正向、逆向光路光学参数的确定;分析了参考光光路设计;采用多重结构方法对物光的正向、逆向光路和参考光光路同时优化,实现了对物光光路两对物像共扼位置控制像差,并满足参考光大数值孔径的要求;给出了达到衍射受限的前后组焦距分别为 33 mm 和 30 mm 的全息存储光学系统的设计结果。

### 参 考 文 献

- 1 D. Psaltis, G. W. Burr. Holographic data storage [J]. *Computer*, 1998, **31**(2): 52~60
- 2 Li Xiaochun, He Qingsheng, Jin Guofan *et al.*. Volume holographic storage and retrieval of 1000 digital images in lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(6): 722~725 (in Chinese)  
李晓春,何庆声,金国藩等. 1000 幅数字图像的晶体体全息存储与恢复[J]. *光学学报*, 1998, **18**(6): 722~725
- 3 Ouyang Chuan, He Qingsheng, Wang Fengtao *et al.*. Volume holographic correlation system with large capacity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1095~1098 (in Chinese)  
欧阳川,何庆声,王凤涛等. 大容量体全息相关系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1095~1098
- 4 Shao Bing, He Shurong, Wu Minxian *et al.*. Matching and relationship between input and output signals in VHDSS [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 645~649 (in Chinese)  
邵冰,何树荣,邬敏贤等. 体全息存储系统输入输出信号匹配关系研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 645~649
- 5 Ren Liyong, Liu Liren, Liu Dean. Effect of microcosmic optical parameters of doubly doped LiNbO<sub>3</sub> on diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 941~945 (in Chinese)  
任立勇,刘立人,刘德安. 双掺杂 LiNbO<sub>3</sub> 微观光学参量对衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 941~945
- 6 J. Ashley, M. P. Bernal, G. W. Buor *et al.*. Holographic data storage [J]. *IBM J. Res. Develop.*, 2000, **44**(3): 341~368
- 7 G. Erdei, J. Fodor, P. Kallo *et al.*. Design of high numerical aperture Fourier objectives for holographic memory card writing/reading equipment [J]. *Proc. SPIE*, 2000, **4093**: 464~473
- 8 Sergei Orlov, Ray Snyder, Matthew C. Bashaw. Optical relay for pixel-based holographic storage and retrieval [P]. US Patent 6108110, 2000
- 9 Wang Zhijiang. *Optical Technology Handbook* [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 1178~1183 (in Chinese)  
王之江. *光学技术手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1178~1183
- 10 ZEMAX *Optical Design Program User's Guide* [M]. San Diego: ZEMAX Development Corporation, 2004. 435~440