

对称式人眼安全激光测距仪光学系统的设计

柳丽群^{1,2} 吴泉英¹ 范君柳¹ 徐文³

¹ 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009
² 苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006
³ 苏州亿帝电子科技有限公司, 江苏 苏州 215006

摘要 给出 1.57 μm 人眼安全激光测距仪的光学设计方法, 根据薄透镜系统的初级像差理论, 使用 PW 法确定测距仪光学系统的初始结构, 进而利用 Zemax 软件设计出一种对称式测距光学系统并对其进行优化。该光学系统结构简单, 加工组装方便, 成本低, 且能满足测距仪对其光学系统的发射部分和接收部分的性能要求。

关键词 光学设计; 人眼安全激光; 测距仪; PW 法; 对称式光学系统

中图分类号 TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.062201

Symmetric Optical System Design of Eye-Safe Laser Range Finder

Liu Liqun^{1,2} Wu Quanying¹ Fan Junliu¹ Xu Wen³

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China

² Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

³ Suzhou YIDI Electronic Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract We introduce a design method of the 1.57 μm eye-safe laser range-finder's optical system. It utilizes the PW method according to the primary aberration theory of thin lens system to determine the initial structure of the range-finder's optical system. A symmetric structure of range-finder's optical system is designed by the Zemax software. After optimization, the symmetric optical system not only has the simple structure, convenient processing and assembly and low cost, but also satisfies the requirements of the performance of the range-finder's emitting and receiving parts.

Key words optical design; eye-safe laser; range finder; PW method; symmetric optical system

OCIS codes 220.3620; 280.3400; 110.3000

1 引言

脉冲式激光测距仪在军事、通信、气象研究和人造卫星研究等领域都有广泛的应用^[1], 其原理是通过计算由激光器发射的脉冲激光经过目标反射一次的往返时间 t 来确定目标距离 L ^[2], $L = ct/2$, 其中光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。脉冲式激光测距仪主要由光学系统、门控电路、时钟脉冲振荡器及计数器组成^[3], 其中光学系统包括发射系统和接收系统。其工作过程为: 当测距仪对准目标后, 激光器发射激光, 该激光经发射光学系统准直而压缩其发散角; 经目标漫发射后, 其中按原路返回的部分激光被接收光学系统接收并会聚到探测器的光敏面上^[1~3]。本文主要研究测距仪光学系统的设计。采用 PW 法确定初始结构, 利用 Zemax 软件完成设计优化, 得到了满足要求的测距仪光学系统结构。

收稿日期: 2013-01-02; **收到修改稿日期**: 2013-03-02; **网络出版日期**: 2013-05-28

基金项目: 江苏省六大人才高峰项目和苏州市重点实验室项目(SZS201202)资助课题。

作者简介: 柳丽群(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学仪器和光学设计等方面的研究。E-mail: liqun563@yahoo.cn

导师简介: 吴泉英(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事光学设计与图像信息处理等方面的研究。

E-mail: wqycyh@sina.cn(通信联系人)

2 测距仪光学系统的设计方法

2.1 激光光源的选择

目前广泛使用的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光测距仪容易带来人眼损伤甚至致盲的危险,因此各国竞相研制新的人眼安全激光设备^[4]。研究表明:波长 $1.5\sim 1.6 \mu\text{m}$ 的激光在辐射人眼时大部分会被晶状体吸收,只有小部分到达视网膜,对人眼损伤低,因此这一波段内的激光被称为人眼安全激光^[5]。本文设计的测距仪采用 $1.57 \mu\text{m}$ 人眼安全激光作为光源,该激光是利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q Nd:YAG 激光抽运的 KTP-OPO^[6,7] 激光器产生的,其结构如图 1 所示。

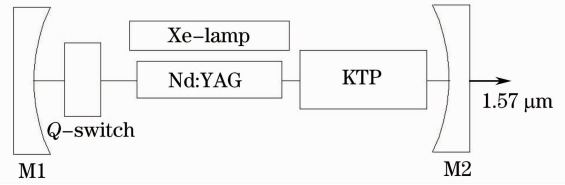


图 1 $1.57 \mu\text{m}$ 人眼安全激光的产生过程

Fig. 1 Schematic diagram of generating the $1.57 \mu\text{m}$ eye-safe laser

2.2 光学系统发射部分和接收部分结构的确定

发射部分设计的目标是将光束发散角为 5 mrad 的 $1.57 \mu\text{m}$ 激光压缩到 1 mrad 以下,由于光源本身的发散角就比较小,因此先考虑接收部分的设计。由于在设计接收部分时需要考虑使该结构对反射光束有很好的会聚作用,使得接收面能量尽可能集中,因此该系统必须能够很好地校正光束各类像差,如球差、彗差、像散以及垂轴色差等;同时考虑到测距仪要求加工、组装方便等特点,所以本文采用一个单透镜在前和一组双胶合透镜在后的组合结构作为测距仪的接收部分^[8]。出于成本和整体结构的考虑,发射部分也采用此结构。

3 用 PW 法确定测距仪光学系统接收部分的初始结构参数

先从设计接收部分出发确定该光学系统的结构,再通过 Zemax 软件逆光路设计发射部分,根据发射部分的要求做进一步的调整,从而完成整体设计。

根据光学系统的初级像差理论^[9],在规化条件下,对于薄透镜组,光学系统的内部参数只和基本像差参量 P^∞ 、 W^∞ 及 C_1 有关,其中 P^∞ 、 W^∞ 为系统的单色像差参量, C_1 为系统的色差参量。设第一近轴光线对每个折射面的入射角为 u_i ,介质的折射率为 n_i ,每个单透镜的光焦度为 φ_i ,单透镜玻璃的阿贝数为 v_i ,其中下标 i 为折射面序号。它们的具体公式是

$$\begin{cases} P^\infty = \sum \left[\frac{\Delta u_i}{\Delta \frac{1}{n_i}} \right]^2 \Delta \frac{u_i}{n_i} \\ W^\infty = \sum \left[\frac{\Delta u_i}{\Delta \frac{1}{n_i}} \right] \Delta \frac{u_i}{n_i} \\ C_1 = \sum \frac{\varphi_i}{v_i} \end{cases} \quad (1)$$

本测距仪的光学系统的接收部分采用单透镜在、前双胶合在后的结构,取归一化条件 $f' = h = 1, u_1 = 0, u_6 = 1$,且令空气中的折射率 $n_1 = n_3 = n_6 = 1$ 。

根据(1)式可得单透镜的 P 、 W 表示式:

$$\begin{cases} P_1^\infty = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{n_2}\right)} \left[u_2^2 (u_3 - u_1) \left(\frac{2}{n_2} + 1 \right) - u_2 (u_3^2 - u_1^2) \left(\frac{1}{n_2} + 2 \right) - (u_3^2 - u_1^2) \right] \\ W_1^\infty = \frac{1}{1 - \frac{1}{n_2}} \left[(u_3 - u_1) - u_2 (u_3 - u_1) \left(1 + \frac{1}{n_2} \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

对于双胶合透镜,将 P 、 W 表示成形状系数阿贝不变量 Q 的表达式,根据阿贝不变量的定义有^[10]

$$Q = n_4 \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{l_4} \right) = n_5 \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{l_4'} \right), \quad (3)$$

式中 l_4 、 l_4' 为胶合面处物方和像方截距。

利用 $h=1$ 及近轴光路计算公式则有^[10]

$$Q = n_4(\rho_4 - u_4) = n_5(\rho_4 - u_5), \quad (4)$$

式中 ρ_4 表示透镜胶合面的曲率。

由(4)式得

$$Q = \frac{u_5 - u_4}{n_5 - n_4} n_4 n_5. \quad (5)$$

利用(1)、(5)式得到用 Q 表示的双胶合透镜的 P 、 W 表达式：

$$\begin{cases} P_2^\infty = AQ^2 + BQ + C \\ W_2^\infty = KQ + L \end{cases}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} A = 2\left(\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_5}\right)\varphi_2 + \left(\frac{2}{n_2} + 1\right)(1 - u_3) \\ B = \frac{3\varphi_2}{n_4 - 1} - 2u_3\varphi_2 - \frac{3}{n_5 - 1}(u_3 + \varphi_2)^2 + \frac{2(n_5 + 2)}{n_5 - 1}(u_3 + \varphi_2) - \frac{2n_5 + 1}{n_5 - 1} \\ C = \frac{n_4}{(n_4 - 1)^2}[\varphi_2^3 + (1 - n_4)u_3\varphi_2^2] - \frac{n_5 + 1}{(n_5 - 1)^2}[(u_3 + \varphi_2)^3 - (n_5 + 2)(u_3 + \varphi_2)^2 + (2n_5 + 1)(u_3 + \varphi_2) - n_5] \\ K = \left(\frac{1}{n_4} - \frac{1}{n_5}\right)\varphi_2 + \left(1 + \frac{1}{n_5}\right)(1 - u_3) \\ L = \frac{\varphi_2^2}{n_4 - 1} - u_3\varphi_2 - \frac{1}{n_5 - 1}(u_3 + \varphi_2)^2 + \frac{n_5 + 1}{n_5 - 1}(u_3 + \varphi_2) - \frac{n_5}{n_5 - 1} \end{cases} \quad (7)$$

先将该单透镜和双胶合透镜看成密接透镜组，即间隔 $d=1$ mm，则由(1)、(6)式可得该测距仪光学系统接收部分的 P 、 W 表达式为

$$\begin{cases} P^\infty = P_1^\infty + P_2^\infty \\ W^\infty = W_1^\infty + W_2^\infty \end{cases}. \quad (8)$$

利用近轴光路计算公式 $n'u' - nu = \frac{n' - n}{r}h$ ，可得归一化条件下每个面的曲率：

$$\begin{cases} \rho_1 = \frac{n_2 u_2}{n_2 - 1} \\ \rho_2 = \frac{n_3 u_3 - n_2 u_2}{n_3 - n_2} \\ \rho_3 = \frac{n_4 u_4 - n_3 u_3}{n_4 - n_3} = Q + \frac{n_4}{n_4 - 1}\varphi_2 + u_3 \\ \rho_4 = \frac{n_5 u_5 - n_4 u_4}{n_5 - n_4} = Q + \varphi_2 + u_3 \\ \rho_5 = \frac{n_6 u_6 - n_5 u_5}{n_6 - n_5} = Q + \frac{n_5}{n_5 - 1}\varphi_2 + u_3 \end{cases} \quad (9)$$

本测距仪光学系统使用的是常规玻璃 K9 和 F2，因为 K9 的化学稳定性比 F2 好，所以将 K9 置前，波长为 $1.57 \mu\text{m}$ 时，K9 和 F2 的折射率和阿贝数分别为(1.516800, 64.167336)和(1.620040, 36.366491)。

至此有 $n_1 = n_3 = n_6 = 1, n_2 = n_4 = 1.516800, n_5 = 1.620040, u_1 = 0, u_6 = 1, v_1 = v_2 = 64.167336, v_3 = 36.366491$ ，取 $u_3 = \varphi_1 = 0.45$ ，由归一化条件知 $\varphi_2 + \varphi_3 = 1 - \varphi_1 = 0.55$ 。

令

$$\begin{cases} P^\infty = 0 \\ W^\infty = 0 \\ C_1 = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

可得 $Q = -4.322882, u_2 = 0.165206, \varphi_2 = 1.858107$ 。

将以上数据代入(9)式，可得各个面的曲率：

$$\begin{cases} \rho_1 = 0.484877 \\ \rho_2 = -0.385866 \\ \rho_3 = 1.580633 \\ \rho_4 = -2.014775 \\ \rho_5 = 0.094939 \end{cases} \quad (11)$$

本测距仪的焦距 $f=79.9$ mm,则可得该透镜组的实际曲率半径:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{f}{\rho_1} = 164.784 \text{ mm} \\ r_2 = \frac{f}{\rho_2} = -207.067 \text{ mm} \\ r_3 = \frac{f}{\rho_3} = 50.549 \text{ mm} \\ r_4 = \frac{f}{\rho_4} = -39.657 \text{ mm} \\ r_5 = \frac{f}{\rho_5} = 841.594 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

PW 法确定初始结构时将透镜看成薄透镜,而实际透镜是有厚度的,本光学系统通光孔径 $D=36$ mm,由压圈固定,查阅相关文献[9]并通过计算,得到三块透镜的中心厚度分别为 $d_1=5.181$ mm, $d_2=6.915$ mm, $d_3=12.483$ mm,边缘厚度分别为 $t_1=3.208$ mm, $t_2=1.234$, $t_3=7.850$ mm。

4 测距仪光学系统的确定

4.1 优化前后的比较

根据前面得到的接收部分光学系统的初始结构,已知波长 $1.57 \mu\text{m}$,全视场 $12'$,入瞳直径 36 mm,利用 Zemax 软件设计优化,并将优化的结果套光学校板后,结合实际加工对透镜的厚度做进一步优化,从而完成设计。

图 2 为优化前后的结构比较,对应的结构参数如表 1 所示。将各曲面的曲率及厚度设为变量,以系统的焦距、口径作为约束条件,用 Zemax 软件设计并优化。由图 2 和表 1 可知经优化后各曲面的半径及厚度都发生了变化,其结果即是在此条件下的局部最优解。

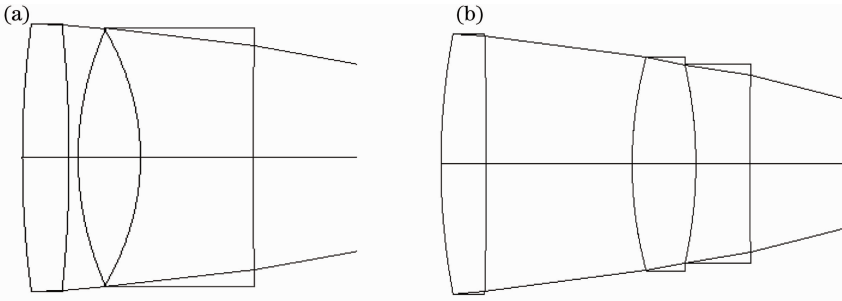


图 2 接收部分光学系统结构示意图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 2 Configuration of the receiving optical system. (a) Before optimization; (b) after optimization

表 1 接收部分光学系统结构参数

Table 1 Structure parameter of the receiving optical system

| Surface | Before optimization | | | After optimization | | |
|---------|---------------------|---------------|-------|--------------------|---------------|-------|
| | Radius /mm | Thickness /mm | Glass | Radius /mm | Thickness /mm | Glass |
| 1 | 164.784 | 5.181 | K9 | 88.875 | 7.01 | K9 |
| 2 | -207.067 | 1 | | -608.99 | 22.00 | |
| 3 | 50.549 | 6.915 | K9 | 51.816 | 9.80 | K9 |
| 4 | -39.657 | 12.483 | F2 | -57.895 | 8.20 | F2 |
| 5 | 841.594 | 65.393 | | 529.615 | 53.44 | |

4.2 接收部分成像质量的评价

以下从点列图、调制传递函数(MTF)、能量收集面的半径尺寸以及波像差四个方面对所设计测距仪接收部分的成像质量进行评价。

图3为点列图,图中的艾里斑半径为 $4.291\ \mu\text{m}$ 。由图可知接收光学系统各个视场弥散斑的均方根(RMS)半径都小于 $3\ \mu\text{m}$,因此该系统能够较好地聚焦经目标漫反射发出的光。

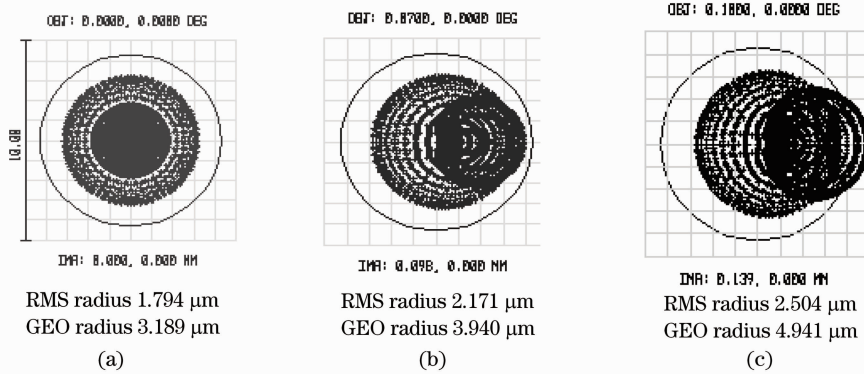


图3 接收部分光学系统的点列图

Fig. 3 Spot diagrams of the receiving optical system

图4给出接收部分光学系统的MTF。由图4可知在空间频率为 $100\ \text{cycles/mm}$ 时,中心视场、 0.7 带视场以及 1.0 带视场的MTF值均集中在 $0.45\sim 0.50$ 之间,且曲线密集、接近衍射极限。由图5所示能量分布情况可知,在距接收面中心半径为 $7\ \mu\text{m}$ 处的能量即已达到总能量的 90% ,且曲线接近衍射极限。

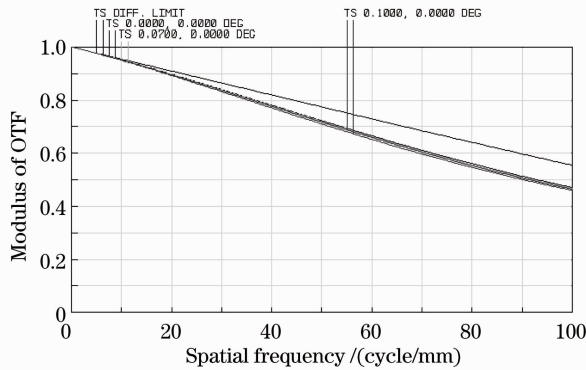


图4 接收部分光学系统的调制传递函数 MTF

Fig. 4 MTF of the receiving optical system

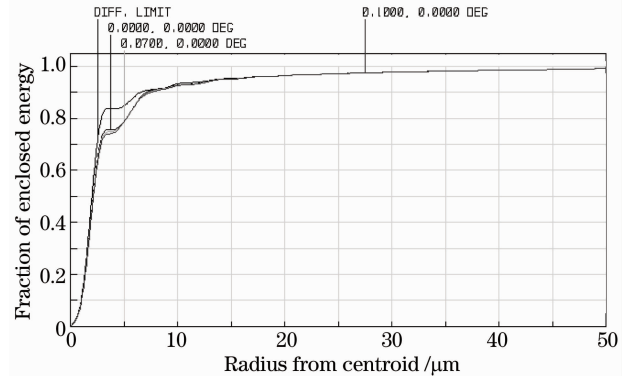


图5 接收部分光学系统包围圆能量

Fig. 5 Diffraction encircled energy of the receiving optical system

图6为接收部分光学系统波像差三维分布。由图6可知波前函数的峰谷值即最大波像差为 $0.2007\ \lambda$ (λ 为光波长),符合瑞利判据^[9]:最大波像差小于 $\lambda/4$,则实际光学系统的质量与理想光学系统没有显著差别。

此外,通过在接收部分加滤光片保证只有 $1.57\ \mu\text{m}$ 波长的光通过,消除了杂散光。

4.3 发射部分的设计

由于本文所设计的测距仪发射部分与接收部分是完全对称的,即发射部分采用的是一组双胶合透镜在前和一个单透镜在后的组合结构,所以利用接收部分的结构参数,结合Zemax软件将光路逆向设计即可得到发射部分。由Zemax软件计算出光源经发射部分出射的光线

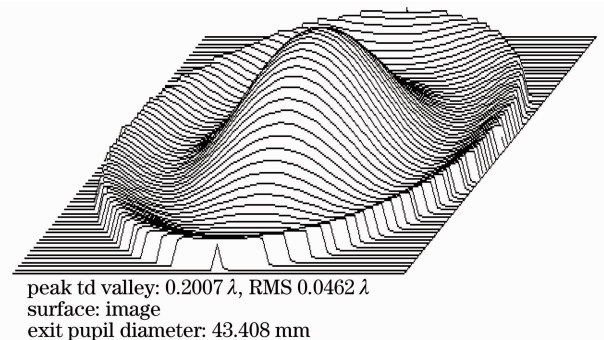


图6 接收部分光学系统波像差三维分布

Fig. 6 Wavefront-aberration map of the receiving optical system

与光轴的夹角即发散角约 0.14 mrad, 满足将发散角为 5 mrad 的 $1.57\ \mu\text{m}$ 激光压缩到 1 mrad 以下的要求, 且对球差也能很好地校正, 达到了该测距仪对发射部分的要求。

综上, 该测距仪光学系统的设计合理, 满足测距仪的性能要求。

5 结 论

根据 PW 法计算出测距仪光学系统接收部分的初始结构参数, 运用 Zemax 软件设计出一种对称式人眼安全激光测距仪的光学系统并对其进行了优化。经验证, 该光学系统既满足发射部分对光束准直的要求, 又能保证接收部分对目标漫反射光的聚焦作用, 且这种对称式结构使得该人眼安全激光测距仪结构简单、加工组装方便、成本低, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liu Liying. The Development of High Power Pulsed Semiconductor Laser Light [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006
刘丽莹. 高功率脉冲半导体激光光源的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2006
- 2 Hefei University of Technology (ed.). Metrology [M]. Beijing: People's Education Press, 1979. 237~242
合肥工业大学 主编. 测量学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 237~242
- 3 A. D. Nizhenskii, V. B. Volkonskii, I. N. Zhukinskii *et al.*. Phase-type laser range finder [J]. *Measurement Techniques*, 1984, **27**(2): 127~129
- 4 Shi Shunsen, Jin Feng, Zhai Gang *et al.*. Diode-pumped OPO eye-safe laser at $1.57\ \mu\text{m}$ [C]. The Proceedings of the 15th National Infrared Science and Technology Exchanges and National Optoelectronic Technology Symposium, 2001. 543~545
时顺森, 金 锋, 翟 刚 等. 二极管泵浦人眼安全 $1.57\ \mu\text{m}$ OPO 激光器[C]. 第十五届全国红外科学技术交流会暨全国光电技术学术交流会议论文集, 2001. 543~545
- 5 Liu Yuan, Chen Weibiao. The development and application of the eye-safe lasers [C]. The Proceedings of Infrared and Remote Sensing Academy of 2007 Annual Conference of Shanghai, 2007. 1~5
刘 源, 陈卫标. 人眼安全激光器的发展及应用[C]. 上海市红外与遥感学会 2007 年学术年会论文集, 2007. 1~5
- 6 Zhong Kai, Wang Yuye, Xu Degang *et al.*. Efficient compound-cavity eye-safe KTP-OPO at $1.57\ \mu\text{m}$ pumped by an electro-optic Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, **26**(6): 064210
- 7 R. Dabu, A. Stratan, C. Fenic *et al.*. Eye-safe singly resonant KTP parametric oscillator pumped inside a Nd:YAG laser cavity [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(3): 455~459
- 8 Chi Zeyang, Chen Wenjian. Applied Optics and the Basis of Optical Design [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. 316~318
迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008. 316~318
- 9 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 343~360, 509~520
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 343~360, 509~520
- 10 Li Xiaotong. Geometrical Optics and Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 7~9
李晓彤. 几何光学和光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997. 7~9