

文章编号: 0258-7025(2004)12-1513-05

基于直角棱镜的光纤光度传感器

肖韶荣^{1,2}, 陈进榜², 朱日宏², 高志山²

(¹ 南京信息工程大学电子工程系, 江苏 南京 210044; ² 南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 介绍了一种由两个相同直角棱镜构成的气室。利用其对光束摆动的不敏感性及对光束的反射特性, 来提高气室工作的稳定性和检测灵敏度; 分析了传感器中光束的传输特性, 给出了光束的传输方程、单波长和双波长情况下光度传感器的测量方程; 光束在气室内往返的次数 N 与过两个直角棱镜各自直角棱的对称面的间距 d 有关, 通过调节间距 d 可选择所需测量灵敏度。测试结果表明, 在低浓度测量时, 这种光度传感器的灵敏度为普通单程吸收池灵敏度的 N 倍; 在较高浓度时, 仅在 N 为较小的几个值时, 传感器的灵敏度与光束在气室内往返的次数 N 成正比, N 较大时, 光束在气室内往返的次数对传感器灵敏度的倍增作用减弱。基于直角棱镜的光纤光度传感器特别适合痕量物质的光度测量。

关键词 光纤光学; 光谱分析; 光度测量; 光纤传感器; 灵敏度

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Photometric Measurement Based on Rectangular Prism with Optical Fiber

XIAO Shao-rong^{1,2}, CHEN Jin-bang², ZHU Ri-hong², GAO Zhi-shan²

¹ Department of Electronic Engineering, Nanjing University of
Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

² School of Electronics & Optics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract An air chamber is introduced which is made of two rectangular prisms. Stability and sensitivity of the chamber are improved using the reflectivity character and senseless to tilting of light beam. Transmission characteristics of light beam are analyzed. Transmission equation of probing light beam and measurement equation of the system at both single-wavelength and dual-wavelength are put forward. The times N of light beam going back and forth in the chamber is determined by distance of between planes of symmetry through respective apexes of the prisms. The sensitivity may be chosen by means of adjusting the distance. The results of experiment indicate that the sensitivity of the photometric sensor is N times that of single-pass cell at lower concentration of material to be measured, and when concentration of material is higher, the sensitivity is proportional to the times of light beam going back and forth at the smaller N , and that the times of light beam going back and forth multiplying action on the sensitivity gets weaker at the greater N . The photometric sensor based on rectangular prism with optical fiber is suitable to measuring trace material.

Key words fiber optics; spectrum analysis; spectrophotometry; optical fiber sensor; sensitivity

1 引 言

光度分析式传感器以其特有的优点而得到普遍应用, 特别是光纤光度分析式传感器已应用到环境

实时监测和生物医学研究中^[1,2]。光度分析式传感器的灵敏度与探测光束和被测物的相互作用距离即探测光束在吸收池内的有效光程有关, 常需要调节

收稿日期: 2003-07-14; 收到修改稿日期: 2003-11-07

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(02KJB510006)资助项目。

作者简介: 肖韶荣(1958—), 男, 江西人, 南京信息工程大学教授, 硕士, 主要从事激光技术应用与信号处理方面的研究。

E-mail: sr_xiao@163.com

光程来满足不同灵敏度测量的需要。在实时监测技术中,光度传感器的取样吸收池一般置于气室内。典型的气室结构有 White^[3]型,Herriott^[4]型及各种改进型。White 基本型气室由两块或两块以上共轭凹面反射镜组成,光程可达数米至数百米,但对环境的要求很高,不适合实时测量;Herriott 型气室由两块共焦凹面反射镜构成,对环境的要求比 White 型低,但灵敏度较低。这些类型的气室,一旦确定了结构参数,探测光束在气室内的有效光程亦被确定,很难调节。直角棱镜常被用于增加光程,基于 D II-180°直角棱镜构成的采样气室的光程可以很便利地调节^[5]。本文主要介绍基于这种气室构造的光纤光度传感器的光输出特性,分析其检测灵敏度及其误差。

2 光纤光度传感器的测量原理

被测物对一定波长的光波具有明显的吸收作用。当探测光束的波长选择为被测物分子的吸收波长时,光通过被测物时发生衰减。由 Beer-Lambert 定律知,强度为 $I_0(\lambda)$ 的入射光经过与被测物相互作用长度为 l 的区域后,出射光强度 $I(\lambda)$ 为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\alpha l} \quad (1)$$

式中, α 为吸光系数, c 为被测物浓度。对一定波长的光波,吸光系数 α 为常数,测量出射光强度 $I(\lambda)$,即可确定被测物的浓度

$$c = -\frac{1}{\alpha l} \ln \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2)$$

在考虑散射的情况下,需用消光系数来描述光束与被测物的作用,出射光强 $I(\lambda)$ 表达为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-k(\lambda)l} \quad (3)$$

$k(\lambda) = \alpha c + \beta$, $k(\lambda)$ 为消光系数, β 为被测物的总体散射系数。在非强光情况下,仅考虑瑞利散射和米散射。为排除被测物的散射、界面反射及其他光传输损耗的影响,常采用双波长光度分析法测定被测物的浓度等有关参数。

3 传感器结构和工作原理

3.1 气室结构

图 1 为气室的结构原理图,相同直角棱镜 D_1 , D_2 的两个底面 F_1 , F_2 平行放置,构成气室。探测光束经输入光纤传送到准直装置,经压缩准直后成为细平行光束,垂直入射到直角棱镜 D_1 ,由 D_1 反射后,垂直入射到直角棱镜 D_2 ,又被 D_2 反射,再次垂

直入射到 D_1 ,如此在 D_1 , D_2 间多次往返,再由输出光纤输出。为讨论方便起见,把按图中所示方向传播的光束称为前向光束。应注意的是当 N 为偶数时,光束将在入射光束附近沿相反方向输出,不妨把此光束称为反向光束。

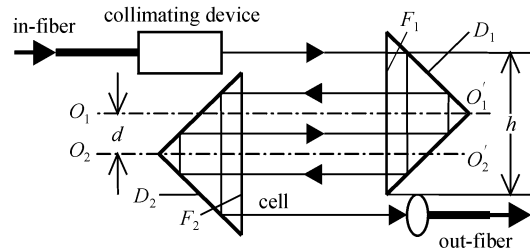


图 1 基于直角棱镜的光纤光度传感器气室结构图
Fig. 1 Air chamber construction of fiber photometric sensor on the basis of rectangular prism

3.2 传感器的光传输特性

探测光束在气室内往返的次数 N 与过直角棱镜 D_1 , D_2 各自直角棱的两对称面的间距 d 有关。在光束直径比间距 d 小时,由几何法可证明探测光束在气室内往返的次数 N 为

$$N = \text{int}\left(\frac{h}{d} + 1\right) + 1 \quad (4)$$

其中 h 为入射光束到直角棱镜 D_1 底部 45° 角棱边的距离。调节间距 d ,即可调节探测光束在气室内往返的次数 N 。

探测光束在气室内的有效光程为

$$L = Nl = \left[\text{int}\left(\frac{h}{d} + 1\right) + 1\right]l \quad (5)$$

其中 l 为直角棱镜 D_1 , D_2 的两个底面 F_1 , F_2 间的距离。吸收池置于气室时,出射光的强度 $I_t(\lambda)$ 为从气室输出的前向光束的强度 $I_f(\lambda)$ 与探测光束每次穿过界面 F_1 , F_2 和吸收池的界面反射光强度 $I_r(\lambda)$ 之和,可表达为

$$I_t(\lambda) = I_r(\lambda) + I_f(\lambda) \quad (6)$$

在光度分析中,被测物一般为液体溶液,吸收池的材料为石英玻璃,吸收池壁与液体界面的反射率可用石英玻璃-纯水界面的反射率估计,约为 0.0022,远小于吸收池壁与空气界面的反射率 R ,吸收池壁内侧界面的反射可不考虑。若不考虑直角棱镜和吸收池的材料吸收作用,池外空间为空气,其消光系数近似为零,仅需考虑吸收池内被测物与光的相互作用。

参考图 2 所示光束传输过程,仅考虑光束在相邻两次透过界面时由于反射形成的输出光束,入射

光束在 1 处穿过界面, 部分光在 2 处被反射, 回到 1 再次被反射并依次在 2, 3, 4, ... 处透过各界面, 最后随前向光束输出

$$I_f(\lambda) = I_0(\lambda)\tau_1^{2N} \cdot \tau^{2N-2} e^{-Nk(\lambda)l_0} \quad (7)$$

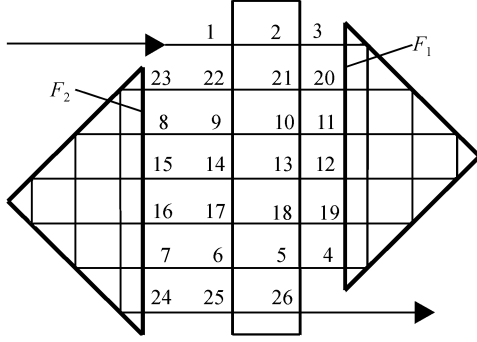


图 2 探测光束在气室内的传输

Fig. 2 Transmitted beam in the gas cell

各次反射光强度之和为

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda)Rr\tau_1^2(1+\tau^2) \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^{N-1}}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-Nk(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)R^2\tau_1 \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^N}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-(N+2)k(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)r^2\tau_1^2\tau \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^{N-1}}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-Nk(\lambda)l_0} \quad (7')$$

其中 τ_1 为吸收池壁与空气界面的透过率, l_0 为吸收池内空长度, r 和 τ 分别为气室壁与空气界面的反射率和透过率。传感器的输出光强为

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda)\tau_1^{2N} \cdot \tau^{2N-2} e^{-Nk(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)Rr\tau_1^2(1+\tau^2) \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^{N-1}}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-Nk(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)R^2\tau_1 \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^N}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-(N+2)k(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)r^2\tau_1^2\tau \frac{1-(\tau_1^2\tau^2)^{N-1}}{1-\tau_1^2\tau^2} e^{-Nk(\lambda)l_0} \quad (8)$$

选用石英材料制作的直角棱镜构造气室, $\tau \approx \tau_1$, $r \approx R$, 则(8)式可改写为

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda)\tau^{4N-2} e^{-Nk(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)r^2\tau^2(1+\tau^2) \frac{1-\tau^{4N-4}}{1-\tau^4} e^{-Nk(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)r^2\tau \frac{1-\tau^{4N}}{1-\tau^4} e^{-(N+2)k(\lambda)l_0} + I_0(\lambda)r^2\tau^3 \frac{1-\tau^{4N-4}}{1-\tau^4} e^{-Nk(\lambda)l_0} \quad (9)$$

其中

$$f(\tau, \lambda) = \tau^{4N-2} + r^2\tau^2(1+\tau^2) \frac{1-\tau^{4N-4}}{1-\tau^4} +$$

$$r^2\tau \frac{1-\tau^{4N}}{1-\tau^4} e^{-2k(\lambda)l_0} + r^2\tau^3 \frac{1-\tau^{4N-4}}{1-\tau^4} \quad (10)$$

式(9)为探测光束传输方程。在 $N=1$ 时, 因子 $f(\tau, \lambda) = \tau^2 + r^2\tau e^{-2k(\lambda)l_0}$, 这正是探测光束仅一次透过被测液体时的结果。

一般情况下, 对于石英材料, $n = 1.46$, $r \approx 0.035$, $\tau \approx 0.965$ 。若取 $N = 9$, $0.31513 \leq f(\tau, \lambda) \leq 0.32156$ 。

单波长测量时, 常用已知浓度的标准液作参比。若选择溶剂为参比样品, 由式(9), 两次测量的过程中, $I_0(\lambda)$ 保持不变时, 在参比样品情况下的输出光强为

$$I_c(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-Nk_r(\lambda)l_0} \cdot f_r(\tau, \lambda) \quad (11)$$

被测样品下的输出光强为

$$I_t(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-N[k_r(\lambda)+k(\lambda)]l_0} \cdot f(\tau, \lambda) \quad (12)$$

$$\ln \frac{I_t(\lambda)}{I_c(\lambda)} = -Nk(\lambda)l_0 + \ln \frac{f(\tau, \lambda)}{f_r(\tau, \lambda)} \quad (13)$$

令吸光度 $A = -\ln \frac{I_t(\lambda)}{I_c(\lambda)}$, $a = \ln \frac{f(\tau, \lambda)}{f_r(\tau, \lambda)}$, 式(13)改写为

$$A = Nk(\lambda)l_0 - a \quad (14)$$

式(14)为单波长光度传感器的测量方程。

对于双波长光度分析, 参考波长光束传输方程为

$$I_t(\lambda_r) = I_0(\lambda_r)e^{-Nk_r(\lambda_r)l_0} \cdot f(\tau, \lambda_r) \quad (15)$$

由(9), (15)两式可得

$$\ln \frac{I_t(\lambda)}{I_t(\lambda_r)} - \ln \frac{I_0(\lambda)}{I_0(\lambda_r)} = -N(\alpha - \alpha_r)cl_0 + \ln \frac{f(\tau, \lambda)}{f(\tau, \lambda_r)} \quad (16)$$

(16)式中已假定测量光与参考光散射系数近似相同, 吸光度差为

$$\Delta A = N(\alpha - \alpha_r)cl_0 - \ln \frac{f(\tau, \lambda)}{f(\tau, \lambda_r)} \quad (17)$$

式(17)为双波长光度传感器的测量方程。

对于痕量物体的测量, 被测物消光系数近似为零, 式(16), (17)中最后一项趋于零。

3.3 传感器灵敏度分析

传感器的灵敏度 S_n 定义为单位输入量的变化产生的输出量变化。此处的输入量是待测物浓度、消光系数或吸收系数等, 用吸光度和吸光度差 ΔA ^[6] 表示输出结果, 对于单波长测量

$$S_n = \left| \frac{dA}{dc} \right| \approx Nk_m(\lambda)l_0 \quad (18)$$

k_m 为单位浓度消光系数; 对双波长测量, 传感器的

灵敏度可表达为

$$S_{nr} = \left| \frac{d(\Delta A)}{dc} \right| \approx N(\alpha - \alpha_r)l_0 \quad (19)$$

传感器的灵敏度 S_n 或 S_{nr} 与探测光束穿过吸收池的次数成正比。对于光谱分析仪中的普通吸收池,探测光束仅穿过一次,因此由式(18),(19)可知基于直角棱镜的光度传感器灵敏度为普通吸收池的 N 倍。

4 实验结果与分析

测量装置如图 3 所示,被测物为高级英雄蓝黑墨水(Q/YQUA412),经 90 余日静置沉淀;吸收池长度 $l_0 = 5 \text{ cm}$,探测光波长 $\lambda = 0.650 \mu\text{m}$,吸收池内盛有 20 mL 的纯水,在 N 分别为 1,2,3,4,5 时,测得不同浓度样品的吸光度示于图 4 中。用最小二乘法对测量值进行线性回归分析,吸光度-浓度曲线为图 4 中对应直线。各直线的斜率即为 N 取不同值时传感器的灵敏度,见表 1。

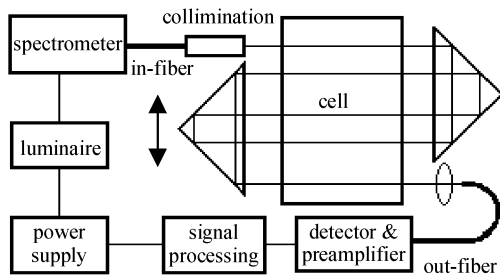


图 3 光度传感器实验装置

Fig. 3 Experiment setup on photometric system

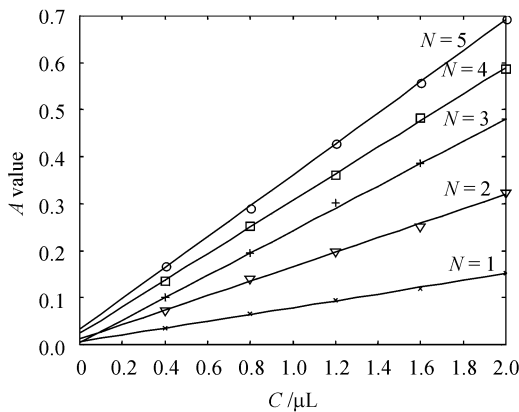


图 4 传感器吸光度-浓度特性曲线

Fig. 4 Dependence of absorbance on concentration of the sensor

表 1 不同 N 值时传感器的灵敏度

Table 1 Sensitivity of the sensor at different N

N	1	2	3	4	5
S_n	0.0721	0.1538	0.2380	0.2830	0.3292

从图 4 和表 1 可以看出,在浓度较低或 N 取值较小时,吸光度 A 与 N 近似成比例变化;浓度越高, N 越大,比例关系将不再成立。这正是因子 $f(\tau, \lambda)$ 受浓度 c 和 N 影响的结果。当 N 一定时,吸光度 A 随浓度 c 变化的关系,在低浓度时受微量进样器的取样精度影响较大。每次取样时,取样针管深入溶液中的长度不等,取样针管上的残余量难于保证一致,在浓度较低时,残余量的影响明显。取样时,应采用高精度的微量进样器取样,并使用限位装置,使残余量一致并最小。

注意到在拟合曲线中存在的交点。实验中,应用了前向光束和反向光束进行测量,由于直角棱镜的质量缺陷,前向光束和反向光束的光路损耗存在差异是引起此现象的重要原因。用存在明显质量缺陷的直角棱镜进行实验时,观察到这种差异更大。 $N = 1$ 时,探测光束直接通过吸收池,与常规分光光度计类似; $N = 2$ 时,气室仅使用了一个直角棱镜。

对于双波长测量,取测量波长为 $\lambda = 0.650 \mu\text{m}$,参考波长 $\lambda_r = 0.635 \mu\text{m}$ 。在 $N = 3$ 时,测得不同浓度下的吸光度差 ΔA 如图 5 所示。图 5 中的拟合曲线与式(17)的计算结果吻合。

对实验结果准确度的分析,除上述因素外,主要应考虑被测物的光化反应和装置的非理想性能的影响。例如,探测光束的平行度、波长精度与带宽、杂散光及光源的波动和信号处理系统的电子学噪声等。在实验中,对光源采取了恒光强技术,光强的变化在千分之一以内,可视为恒定。

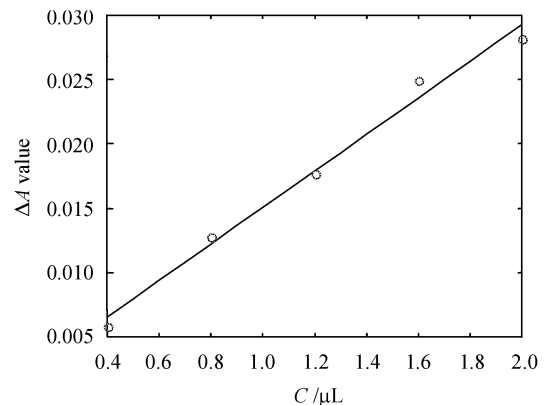


图 5 吸光度差与浓度的关系

Fig. 5 Dependence of absorbance difference on concentration

5 气室稳定性观测

对实验装置稳定性进行了观测,结果表明,若入

射光束不变,直角棱镜 D_1 不动, D_2 向上或向下平移 δ 时,在 N 不变的情况下,出射光束将向上或向下平移 $(N-1)\delta$ 。若入射光束不变,直角棱镜 D_2 不动, D_1 向上或向下平移 δ 时,在 N 不变的情况下,出射光束将向下或向上平移 $(N-1)\delta$ 。若直角棱镜 D_1, D_2 不动,入射光束向上或向下平移 δ ,出射光束亦向上或向下平移 δ 。若入射光束不变,直角棱镜 D_1, D_2 分别以各自的直角棱为轴逆时针或顺时针旋转一小角度时,出射光束的方向和位置几乎未变;若入射光束不变,直角棱镜 D_1 不动, D_2 以其底部棱为轴逆时针或顺时针旋转一小角度时,出射光束向下或向上平移;直角棱镜 D_2 不动, D_1 以其底部棱为轴逆时针或顺时针旋转一小角度时,出射光束向下或向上平移。两种情况的平移量均与倾角近似成正比。以上所述几种情况是 N 为奇数的结果,对于 N 为偶数的情况,观察到出射光束平移量的规律不变,仅是平移方向与前者相反。在所用聚光透镜 $f = 30 \text{ mm}$ 时,出射光束保持与聚光透镜光轴平行横向平移量小于 2 mm 时,输出光纤光输出功率与同轴情况下的光输出功率相对变化小于 1.5% 。当使用长焦距聚光透镜时,对同样大小的横向平移量,此相对变化减小。这是因为长焦距聚光透镜的曲率半径较大,进入输出光纤的光束在透镜两曲面和光纤端面上的入射角随光束横向平移量的变化相对较小。若直角棱镜的棱发生偏转,则出射光束与聚光透镜的光轴不平行,而不能进入输出光纤。

综上所述,入射光束、直角棱镜 D_1 和 D_2 产生一定平动或 D_1, D_2 绕棱边作小角度旋转时,对测量的影响较小,其影响程度与输出光纤前端的聚光透镜曲率半径有关;而直角棱的偏转对测量将产生很大影响,甚至使测量无法进行。因此,测量装置中应避免直角棱的偏转。

6 结 论

基于一对相同直角棱镜构成的采样气室用于分光光度分析,可显著提高检测灵敏度,并可便捷地实现灵敏度调节;在低浓度测量时,传感器的灵敏度与探测光束在吸收池内穿过的次数 N 近似成正比。由于直角棱镜在一定方向上对光束的摆动不敏感,故稳定性得到改善,有利于提高实时监测的长期可靠性。

致谢 南京信息工程大学科研处、设备处对本工作给予了大力支持和帮助,光纤器件由南京玻纤研究院三所制作,籍此一并向他们表示诚挚谢意。特别感谢大恒光电公司提供了优质的大孔径直角棱镜。

参 考 文 献

- 1 Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng *et al.*. Guided-Wave Optic Sensors: Principle and Technology [M]. Beijing: Science Press, 1998. 265~267
靳 伟,廖延彪,张志鹏等. 导波光传感器:原理与技术[M]. 北京:科学出版社,1998. 265~267
- 2 Sun Shenghe, Wang Tingyun, Xu Ying. Technology of Measurement and Sensing with Optical Fiber [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002. 251~255
孙圣和,王廷云,徐 影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002. 251~255
- 3 Liu Yingtong. Experiment facility of long optical paths atmosphere simulated store [J]. *Laser & Infrared*, 1999, **29** (4):216~217/220
刘英同. 长光程大气模拟仓实验装置[J]. 激光与红外, 1999, **29**(4):216~217/220
- 4 S. I. Ronald, J. J. F. McAndrew. Application of tunable diode laser absorption spectroscopy to trace moisture measurements in gases [J]. *Anal. Chem.*, 1994, **66**(15):2471~2479
- 5 Xiao Shaorong, Chen Jinbang, He Yong. Properties of Cell in Gas Sensor on Rectangular Prism [C]. *Proceeding of 9th Symposium on Optical Measurement*, 2001. 178
肖韶荣,陈进榜,何 勇. 一种气体传感器吸收池的光输出特性[C]. 第九届全国光学测试学术讨论会论文集, 2001. 178
- 6 Wang Zhijiang. Handbook of Optical Technology (Vol. 2) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994. 1054~1055
王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994. 1054~1055