

DOI:10.16136/j.joel.2023.04.0376

一种基于频域 OCT 测量眼镜镜片折射率的方法

葛世圣¹, 胡志雄², 段亮成², 邓志超^{1*}, 叶青¹

(1. 南开大学 物理科学学院 弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071; 2. 中国计量科学研究院 医学计量中心, 北京 102200)

摘要: 折射率 (refractive index, RI) 是眼镜镜片的重要参数, 影响眼镜镜片的厚度和舒适程度。RI 的精确测量, 能够为屈光不正患者选择合适的镜片提供指导。本文提出了一种利用频域光学相干层析 (optical coherence tomography, OCT) 系统测量成型眼镜镜片 RI 的方法。利用放置镜片前后两次干涉的图样和简单的数据分析计算即可得到待测成型镜片的 RI。介绍了使用这种方法的工作原理以及装置, 首先对一个 K9 玻璃材质透镜 RI 进行测量, 结果为 1.507 (1310 nm), 相对误差不超过 2%, 以此验证了该方法的合理性、可行性。随后利用此方法对一只成型眼镜镜片进行了测量, 得到其 RI 为 1.554 (1310 nm), 测量结果的扩展不确定度为 0.008 6 ($k=2$)。该方法属于非接触测量, 不会对成型镜片造成损坏, 操作简便, 测量相对误差较低, 可基本满足对于成型眼镜镜片 RI 的测定精度要求。

关键词: 光学相干层析 (OCT); 无损测量; 眼镜镜片; 折射率 (RI)

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)04-0429-05

A method of measuring refractive index of spectacle lens based on frequency domain OCT

GE Shisheng¹, HU Zhixiong², DUAN Liangcheng², DENG Zhichao^{1*}, YE Qing¹

(1. Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physical Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Medical Metrology Center, Chinese Academy of Metrology, Beijing 102200, China)

Abstract: Refractive index (RI) is an important parameter of spectacle lens, which affects the thickness and comfort of spectacle lens. The accurate measurement of RI provides guidance for patients with ametropia to choose appropriate spectacle lens. This paper presents a method for measuring the RI of formed spectacle lens by frequency domain optical coherence tomography (OCT) system. Based on the optical path matching method, the RI can be obtained by the pattern of two interferences before and after placing the spectacle lens, combined with simple data analysis and calculation. This paper also introduces the working principle and device of this method. Firstly, the RI of a K9 concave lens is measured, and the result is 1.507 at 1310 nm. The relative error is less than 2%, which verifies the rationality and feasibility of this method. Then, the RI of spectacle lens is measured by this method, and its RI is 1.554 at 1310 nm. The expanded uncertainty of the measurement result is calculated as 0.008 6 ($k=2$). This method is a non-contact measurement, which will not damage the lens. It also has the advantages of simple operation and low relative error. It can meet the requirements for the accuracy of spectacle lens RI.

Key words: optical coherence tomography (OCT); nondestructive testing; spectacle lens; refractive index (RI)

* E-mail: dengzhichao@nankai.edu.cn

收稿日期: 2022-05-20 修订日期: 2022-07-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2401401) 和南开大学 2022 年自制实验教学仪器设备项目 (22NKZZYQ08) 资助项目

0 引言

折射率(refractive index, RI)表征眼镜镜片材料特性的重要光学参数。在相同屈光度的情况下,RI较高的镜片边缘更薄、质量更轻。为了佩戴的美观和舒适,1.5RI的镜片通常用于0—400度的眼镜,1.6RI的镜片通常用于400—600度的眼镜。高RI聚合材料的发展^[1,2]给与眼镜镜片更加多样的选择。然而,高RI的镜片往往带来更高昂的费用。因此,准确测定镜片的RI不仅有利于为近视患者选择更为合适的镜片,也有利于为客户在配镜时提供重要辅助,给出合理的价值判断依据。

目前测量镜片RI的方法大致分为3类:第一类是依据曲率半径和屈光度参数反推镜片RI^[3,4],这种方法首先在曲率的测试过程中需要接触测量,然后面对镀膜镜片也会产生较大误差。欧阳鑒等人^[5]利用已知RI的胶辅助处理解决了接触测量曲率的问题,但又引入了胶的RI是否精确的二次问题。第二类是利用光的折射性质,例如采用最小偏向角方法进行测量^[6],阿贝折射仪临界角法以及V形棱镜法^[7]等,这些方法通常需要将样品加工成特殊形状,不能对成型镜片进行快速无损检测。第三类方法是基于菲涅尔公式,利用反射比计算RI^[8,9],这种方法受到镜片镀膜的影响,也会降低RI的准确度^[10]。因此,研究一种适合成型镜片的简便、无损、快速的RI测量方法十分必要。

光学相干层析技术(optical coherence tomography, OCT)利用光的相干性,能够对样品内部的光程信息进行测量,在生物组织成像领域有着广泛的应用^[11,12]。而频域OCT进行测量时只需要进行单次探测,即可得到样品同一位置各个表面的干涉信息,具有很高的测量速度。本课题组此前利用频域OCT系统已经对生物组织的RI测量进行了一定的实验研究^[13,14]。本次研究将频域OCT方法应用于眼镜镜片RI的快速检测。首先给出频域OCT系统测量镜片RI的推导公式,再测量K9玻璃的RI作为仪器准确性的验证,最后测量了一只成型眼镜镜片的RI,并给出了该频域OCT在镜片折射率测量过程中的误差分析。

1 理论基础

1.1 频域OCT系统原理及装置

频域OCT系统的测量方法本质上是基于光谱干涉,装置如图1所示。采用相干度较低的光作为光源,利用光纤进行光的传输,经过耦合器分光,一

束进入参考臂并被反射镜反射,另一束进入样品臂照射到样品上发生背反射或散射。这两束光会再次经过耦合器发生干涉后到达光谱探测器,对探测到的干涉信号的功率谱密度进行傅里叶变换,即可得到深度信息^[13,14],其中干涉较强的地方即对应了样品的前后表面以及样品臂反射镜的位置。

本次使用的OCT测量系统是Novacam Technologies, Inc.公司生产的Microcam3D系统。该仪器使用波长1310 nm、带宽60—90 nm、最大输出功率为20 mW的近红外光进行测量,轴向分辨率(空气中)为8.4—12.6 μm 。系统采用波长655 nm、最大输出功率为5 mW的激光作为指示光对光路进行标识。本次实验中探测物镜的可用工作范围是4 mm。

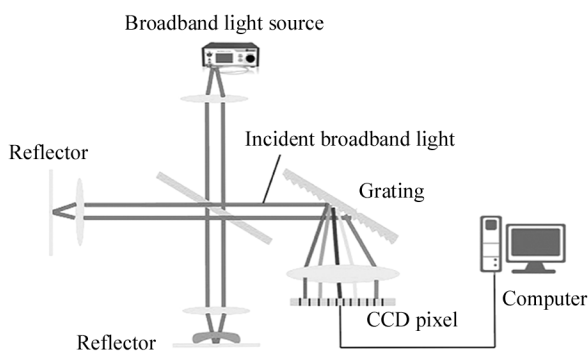


图1 频域OCT系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency domain OCT system

1.2 折射率测量原理

图2是利用频域OCT系统测量镜片RI的示意图。首先在样品臂放一个反射镜,通过峰值的位置可得到反射镜位置 N_1 ,然后将待测镜片放在反射镜上,此时图上出现3个峰,分别对应图2中 N_2 、 N_3 、 N_4 表面的位置。其中 N_2 对应样品的前表面位置, N_3 对应样品的后表面位置, N_4 对应放置样品后反射镜的位置。

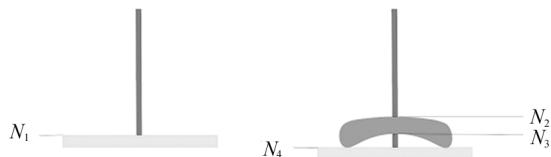


图2 测量镜片折射率原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of measuring spectacle lens RI

根据两次测量样品臂光程相等可以列出下列方程:

$$N_3 - N_2 = nd, \quad (1)$$

$$N_4 - N_1 = (n-1)d. \quad (2)$$

根据式(1)、(2)可以得到样品折射率 n 和样品

厚度 d 的表达式:

$$d = N_1 - N_2 + N_3 - N_4, \tag{3}$$

$$n = \frac{N_3 - N_2}{N_1 - N_2 + N_3 - N_4}。 \tag{4}$$

2 实验测量结果与分析

本文利用该 OCT 系统,对于一片索雷博 GCL-010301 型号的 K9 平凹透镜进行测量,用于验证该方法的准确性。此外还对一组眼镜镜片进行了测量,相同操作进行了 7 次。图 3 即为本次实验中测量

样品的实物图。图 4 是 K9 平凹透镜的干涉测量信息图。测量结果如表 1 所示,为了验证 RI 测量的准确性,需要知道在 1 310 nm 波长下的 RI,利用柯西经验公式进行计算:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}。 \tag{5}$$

根据参考文献 [15], $A = 1.50805$, $B = 2588.92498$, $C = 1.92102 \times 10^8$, 将波长 $\lambda = 1310$ nm 代入可以算出 K9 透镜的 RI 约为 1.510。实验中,K9 透镜 RI 平均值约为 1.507,与参考文献

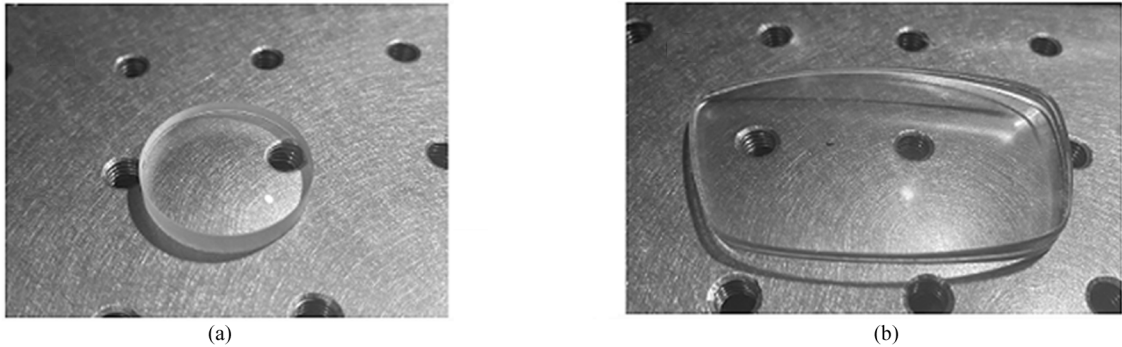


图 3 (a) K9 透镜; (b) 眼镜镜片

Fig. 3 (a) K9 lens, (b) spectacle lens

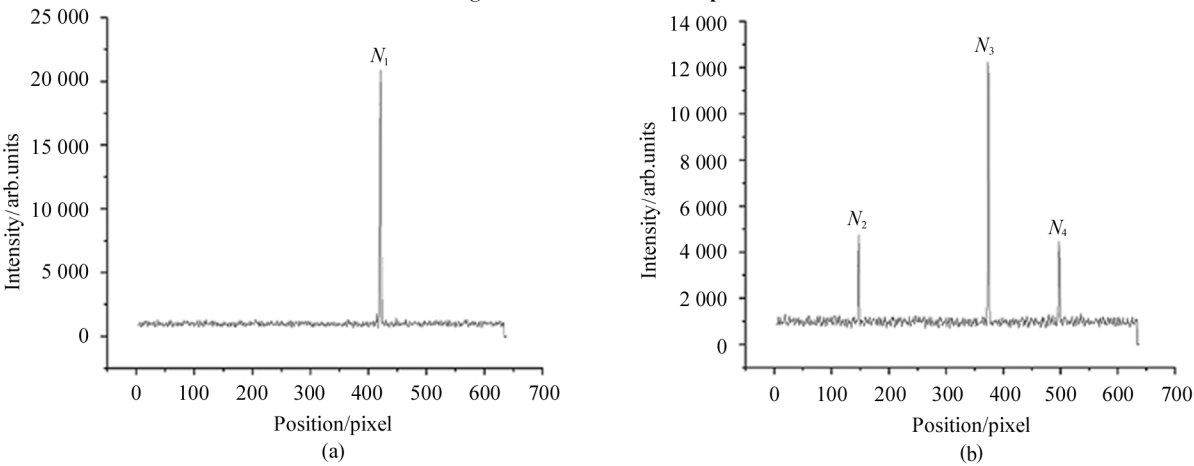


图 4 K9 透镜(a) 放置前和(b) 放置后的干涉峰位置图

Fig. 4 Interference peak position diagram (a) before and (b) after placement of K9 lens

符合很好。

表 1 K9 透镜折射率测量结果

Tab. 1 Measurement results of K9 lens RI

	N_1	N_2	N_3	N_4	RI
1	420	146	372	469	1.507
2	422	148	374	498	1.507
3	493	219	444	569	1.510
4	409	134	361	485	1.503
5	468	194	419	544	1.510
6	452	177	403	528	1.507
7	401	126	353	477	1.503

利用同样的实验方式,得到眼镜镜片的干涉信息图,如图 5 所示,并依此计算出眼镜镜片的 RI,如表 2 所示,平均为 1.554,不同实验次数之间数值变化很小。可见这种方法测量得到的 RI 准确,可以满足对于镜片主流材料 RI 的判别。同时在测量的过程中不会损坏镜片,且完成一次测量仅需几秒钟的时间,方便实现自动化,得到的数据也只需要简单的计算便可得出待测样品的 RI,基本满足了对于眼镜镜片 RI 简便、迅速、无损测量的要求。

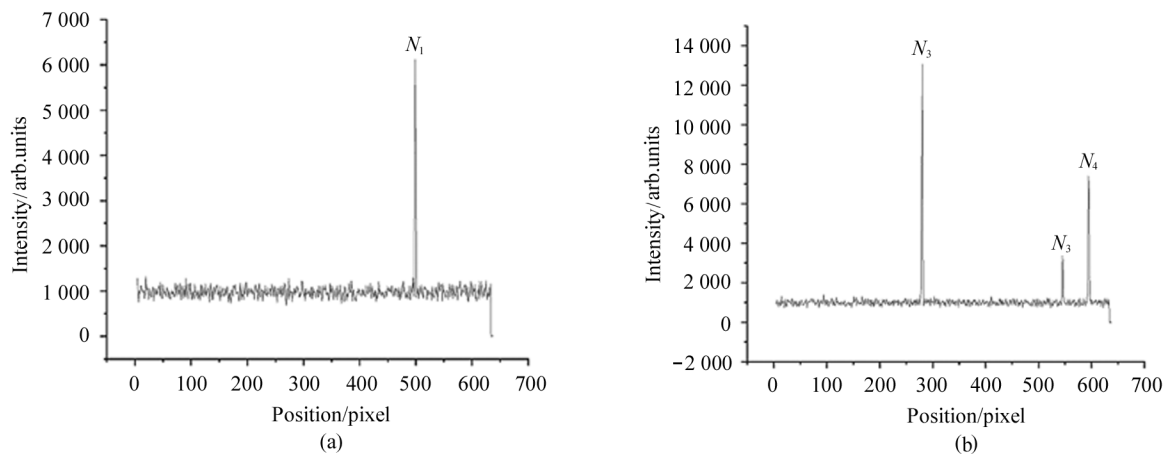


图5 眼镜镜片(a)放置前和(b)放置后的干涉峰位置图

Fig. 5 Interference peak position diagram (a) before and (b) after placement of spectacle lens

表2 眼镜镜片折射率测量结果

Tab. 2 Measurement results of spectacle glasses RI

	N_1	N_2	N_3	N_4	RI
1	498	279	544	593	1.559
2	375	126	381	466	1.555
3	371	131	386	462	1.555
4	373	158	413	463	1.546
5	369	173	428	460	1.555
6	336	131	384	426	1.552
7	339	132	390	431	1.554

3 不确定度分析

利用频域 OCT 系统测量眼镜镜片 RI 时,需要准确地测量出其厚度和反射镜相对位置的改变所对应的光程值,因此样品 RI 测量不确定度主要取决于频域 OCT 系统的轴向分辨率。其他影响 RI 测量不确定度的因素还有测量重复性误差、OCT 系统误差、镜片测量位置偏差引入的误差、温湿度不稳定等。其中测量重复性误差与频域 OCT 系统轴向分辨率引入的误差属于同一类误差,取其计算结果中较大者即可。其他影响因素互不相关且相互独立。样品镜片 RI 测量的不确定度分析具体计算过程如下。

1) 测量重复性误差带来的不确定度分量 u_1 。本实验测量次数为 $n=7$ 次,使用贝塞尔公式法计算其实验标准偏差:

$$s(a_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \approx 0.0040, \quad (6)$$

式中, a_k 为任意一次测量值, $s(a_k)$ 为其对应的单次测量实验标准偏差。如果采用多次测量取算术平均值,则其引入的 RI 测量标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s(a_k)}{\sqrt{n}} = \frac{0.0041}{\sqrt{7}} \approx 0.0015. \quad (7)$$

2) 频域 OCT 系统轴向分辨率引入的不确定度分量 u_2 。设备标称的轴向分辨率(空气中)为 $8.4-12.6 \mu\text{m}$,取其最大值 $12.6 \mu\text{m}$ 。系统 CCD 有效像素数量为 512 pixel,系统在空气中等效成像深度为 4 mm,每个像素对应的长度约为 $8 \mu\text{m}$ 。基于更保守的不确定度评估考虑,将轴向分辨率对应 2 个有效像素。因此,由于系统轴向分辨率导致的长度测量相对误差为 $2/512 \approx 0.39\%$,RI 测量的相对误差预计也在这个水平。结合实际测量得到的样品镜片 RI 数值,可以估算出 OCT 系统轴向分辨率引入的不确定度分量为:

$$u_2 = 1.554 \times \left(\frac{2}{512}\right) \sqrt{3} \approx 0.0035. \quad (8)$$

3) 频域 OCT 系统误差引入的不确定度分量 u_3 。可以根据 K9 玻璃样品的测量结果进行估计,K9 玻璃的标准 RI 为 1.510,采用本系统进行测量的 RI 数值为 1.507,按照矩形均匀分布,取其误差结果为半区间宽度,则 OCT 系统误差引入的 RI 测量不确定度分量为:

$$u_3 = 0.003 \sqrt{3} \approx 0.0017. \quad (9)$$

4) 镜片测量位置误差引入的不确定度分量 u_4 。镜片测量位置误差可以根据实际测试经验估计,在多次实验测试中,每次测量位置调整之间的误差对最终厚度测量像素值影响不大于 1 pixel。采用类似 u_2 的不确定度评估方法,可以计算出其不确定度分量 $u_4=0.0018$;

5) 测量时的实验室环境比较稳定,而且测量过程时间很短,一般只需要几分钟,由于温湿度变化导致的影响基本可以忽略不计。

u_1 与 u_2 的不确定度来源属于同一类,两者取其大即可,根据计算结果,这里只考虑 u_2 。由于各个不

确定度分量之间互不相关,最终可以得到镜片折射率测量的合成标准不确定度为:

$$u_c \sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.0043. \quad (10)$$

扩展不确定度为: $U = 0.0086 (k = 2)$ 。

4 结 论

频域 OCT 的方法只需对样品进行前后两次干涉信息的测量,即可得到镜片的 RI 信息,具有速度快、操作方便、非接触的优势。当今眼镜镜片的中心厚度一般不超过 2 mm, RI 通常小于 2, 因此光在其中的光程不超过 4 mm, 符合大部分频域 OCT 装置探头的探测深度,这一点由本次对 K9 透镜和成型眼镜镜片 RI 的实验给出了很好的证明。本研究的理论和实验同样证明了该方法的测量不确定度小于 0.01, 满足实际应用的需求。若要得到更高精度的检测结果,可以通过提高光谱仪光谱分辨率减小系统误差来实现。当前商用的频域 OCT 装置为了用于生物组织,光源通常采用近红外光。为了更好地得到镜片在可见光的 RI, 可以有针对性地对频域 OCT 系统进行修改,来满足眼镜镜片 RI 专用检测装置的需求。

参考文献:

- [1] JHA G S, SESHADRI G, MOHAN A, et al. Development of high refractive index plastics [J]. e-Polymers, 2007, 7(1):20.
- [2] HIGASHIHARA T, UEDA M. Recent progress in high refractive index polymers [J]. Macromolecules, 2015, 48(7):1915-1929.
- [3] CUI X C, ZHANG Y, ZHANG H Y. A nondestructive method for measuring refractive index of spectacle lens [J]. China Glasses Science-Technology Magazine, 2008(3):78-79.
崔喜才, 张勇, 张红岩. 非破坏测量眼镜片折射率的一种方法[J]. 中国眼睛科技杂志, 2008(3):78-79.
- [4] LIU L H, CAI W Y. A new method for nondestructive measurement of refractive index of resin lens of fixed glasses [J]. Standard & Quality of Light Industry, 2013(6):49-50.
刘良合, 蔡文苑. 一种无损测量定配眼镜树脂镜片折射率的新方法[J]. 轻工标准与质量, 2013(6):49-50.
- [5] OUYANGLIU, ZHANG S J, HUANG H L, et al. Study on non-destructive refractive index measurement of ophthalmic lens [J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2021, 49(3):1-6.
欧阳鑫, 张松金, 黄鸿亮, 等. 树脂镜片的无损折射率测量研究[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2021, 49(3):1-6.
- [6] MENG Q H, XIANG Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11):2114-2119.
- [7] TANG X J, CHEN X, CHEN Y, et al. Study on measuring refractive index of hard resin Lens based on V-prism method [J]. Glass Enamel & Ophthalmic Optics, 2021, 49(3):7-11.
唐小军, 陈晓, 陈颖, 等. 基于 V 棱镜法测量树脂镜片折射率的研究[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2021, 49(3):7-11.
- [8] HOU R. Non-destructive method of measuring the refractive index of spectacle lenses based on Gauss-Newton iterative method [J]. Shanghai Measurement and Testing, 2015, 42(6):28-30+33.
侯蕊. 基于高斯牛顿迭代法的无损检测眼镜镜片折射率方法[J]. 上海计量测试, 2015, 42(6):28-30+33.
- [9] HOU R, GUAN X, JIANG T C. Non-destructive method for measuring refractive index of spectacle lenses [J]. Optical Technique, 2017, 43(2):118-121.
侯蕊, 关昕, 蒋同春. 一种无损检测眼镜镜片折射率的方法[J]. 光学技术, 2017, 43(2):118-121.
- [10] TURANI Z, FATEMIZADEH E, XU Q, et al. Refractive index correction in optical coherence tomography images of multilayer tissues [J]. Journal of Biomedical Optics, 2018, 23(7):070501.
- [11] ZAYTSEV S M, SVENSKAYA Y I, LENGERT E V, et al. Optimized skin optical clearing for optical coherence tomography monitoring of encapsulated drug delivery through the hair follicles [J]. Journal of Biophotonics, 2020, 13(4):e201960020.
- [12] RODRI GUEZ F J, STAURENGHI G, GALE R. The role of OCT-A in retinal disease management [J]. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 2018, 256:2019-2026.
- [13] WANG X Y, ZHANG C P, ZHANG L S, et al. A simple method for refractive index measurement of bio-tissue [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(9):976-978.
王新宇, 张春平, 张连顺, 等. 生物组织折射率测量的一种简便方法[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(9):976-978.
- [14] YE Q, LI F X, LIU Y, et al. Refractive index measurement of bio-tissue based on Fourier domain optical coherence tomography [J]. Journal Optoelectronics • Laser, 2009, 20(1):126-129.
叶青, 李福新, 刘宇, 等. 基于频域 OCT 的生物组织折射率测量研究[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(1):126-129.
- [15] YU S Q, HUANG X J. Determination of dispersion relation of corrugated glass K9 prism [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(24):216-218.
俞胜清, 黄晓俊. 冕牌玻璃 K9 棱镜色散关系的测定[J]. 科技创新导报, 2011(24):216-218.

作者简介:

邓志超 (1987—), 男, 博士, 实验师, 主要从事光电技术应用研究。