

文章编号:1001-5078(2024)11-1730-07

· 红外技术及应用 ·

基于自准直原理的折射率温度系数测量新方法

汤浩^{1,2}, 倪磊^{1,2,3}

(1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 天府新区创新研究院, 四川 成都 610299; 3. 喀什地区电子信息产业技术研究院, 新疆 喀什 844000)

摘要:在透射型光学系统设计中,常用的红外材料包括 ZnSe、BaF₂ 和 LiF 等。为了给光学设计者提供精确的折射率温度系数参数,本文提出了一种自准直原理的偏向角相对测量的新方法,并搭建了一套基于红外单点探测的折射率温度系数测量系统,分析了该方法的精度优势。通过该系统对 ZnSe 棱镜进行了实验,实验数据与 NASA(美国航天局)的 CHARMS 系统对比,相对误差在 1% 以内。这一系统解决了宽光谱、宽温域下条件下红外光学材料的折射率温度系数测量的实际问题,对红外光学系统的测量精度有了进一步提高。

关键词:红外材料;折射率温度系数;自准直法;偏向角

中图分类号:TN213;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.013

A new measurement method of refractive index temperature coefficient based on auto-collimation principle

TANG Hao^{1,2}, NI Lei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Tianfu Institute of Research and Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, China;

3. Institute of Electronics and Information Industry Technology of Kashi, Kashi 844000, China)

Abstract: Commonly used infrared materials in the design of transmissive optical systems include ZnSe, BaF₂ and LiF. In order to provide optical designers with accurate refractive index temperature coefficient parameters, a new method of relative measurement of the bias angle based on the auto-collimation method is proposed, and a refractive index temperature coefficient measurement system based on infrared single-point detection is constructed to analyze the accuracy advantage of the method. Experiments on ZnSe prisms are carried out by this system. And the experimental data are compared with the CHARMS system of NASA (National Aeronautics and Space Administration), and the relative error is within 1%. This system solves the practical problem of refractive index temperature coefficient measurement of infrared optical materials under wide spectral and temperature domain conditions, and further improves the measurement accuracy of infrared optical systems.

Keywords: infrared material; temperature coefficient; auto-collimation method; deflection angle

基金项目:四川省科技厅重点研发计划项目(No. 23ZDYF0471)资助。

作者简介:汤浩(1998-),男,硕士研究生,主要研究工作是低温真空环境下红外光学材料的折射率及其温度系数特性。E-mail:tanghao202301@163.com。

通讯作者:倪磊(1984-),男,博士,副教授,主要研究方向为超精密加工、红外目标识别与测试、航空航天结构件自适应无损检测、智能制造与数字孪生、人工智能与大数据分析。E-mail:sunshinedavy@qq.com。

收稿日期:2024-03-08;修订日期:2024-05-06

1 引言

随着太空望远镜、红外制导等技术的快速发展,对于高精度的红外光学仪器的设计与应用也得到了相应的促进作用,特别是低温光学系统^[1-5]。低温光学系统的研究对于红外材料的设计与应用具有重要意义,通过低温光学的研究,可以更好地了解材料的折射率随温度变化的规律,提高光学系统测量精度,并为其设计和应用提供重要的理论支持。如今,在常温下很多红外光学材料的折射率温度系数数据已经知道了,但部分光学仪器的工作环境具有较广泛的温度范围和波长范围。为了提高光学仪器的性能,制造出更加完美的系统,我们必须知道红外材料在宽温域和宽波长范围下的折射率温度系数。因此,获得红外材料的折射率温度系数是成功研制某些光学仪器的关键。

国外研究机构致力于开发高精度的折射率测量技术,以满足先进光学器件和传感器的需求。例如 NASA(美国航天局)研制了低温高精度折射率测量系统(CHARMS),该系统经过几次更新迭代后,在 2013 年已经能够测量温度范围为 20 ~ 300 K、波长范围为 0.5 ~ 5.6 μm 下的折射率、折射率温度系数及光谱温度系数。CHARMS 系统采用了最小偏向角法,折射率测量精度达到 1×10^{-5} ,是目前国际上综合性能最好的低温折射率测量系统之一^[6-7]。美国 M3 公司采用最小偏向角法设计了一套折射率测量系统,该系统能够测量常温下 0.12 ~ 14 μm 的红外材料衍射极限折射率,其标准不确定度达到 8×10^{-5} ,其装置采用一个与样品台同轴的机械臂实现与样品同轴转动,来达到最小偏向角的瞄准精度^[8-9]。国内研究人员致力于发现和设计新型材料,并对其折射率进行准确测量,这包括在红外光谱范围内的有机、无机和复合材料。例如北京理工大学姚虎等人提出了一种基于布鲁斯特定律的任意形状的玻璃的折射率测量方法,对一个棱镜和四个不同折射率或曲率半径的球面透镜样品进行了实验,并进行了误差分析^[10],该系统精度可达 1×10^{-4} 。国防科工委光学计量一级站研制了一台红外光学材料折射率温度系数测量装置,工作波长为 2 ~ 12 μm ,温度范围为 -50 ~ 150 $^{\circ}\text{C}$,其测量不确定度为 3%,并测量了锆的折射率温度系数^[11],是目前国内测

量精度较高的低温折射率温度系数测量系统。兰州空间技术物理研究所徐嶺茂等人采用傅里叶变换红外光谱仪低温测量系统测量了氟化钇薄膜在 80 ~ 300 K 温度下的折射率,利用 Cauchy 色散公式对折射率波长色散关系进行拟合,得到了氟化钇薄膜在低温下的折射率与波长及温度的关系表达式,最后与实测值比较,证明了氟化钇单层膜折射率计算表达式的准确性^[12]。台湾中山大学李成义等人提出基于全内反射(TIR)的技术用于测量透镜的折射率,该装置利用偏振相机可以获得反射光 s 和 p 的偏振态之间的相位差分布^[13],实验结果表明该系统的分辨率可达 4.8×10^{-4} 。国内外折射率测量研究都在不断发展,并涵盖了多个学科领域。随着技术的进步和对新材料和新技术需求的不断增长,折射率测量领域的研究将推动光学科学和应用领域的发展。

目前,常用的折射率测量方法为最小偏向角法和自准直法。自准直法相较于最小偏向角法操作更易实现,同时考虑到常规光学仪器测量的局限性以及建立低温测量能力的成本和难度,因此,本研究基于自准直原理,提出了一种新的测量方法(偏向角相对测量法),设计了相对测量的方法的实验平台,既满足了宽波长范围(1 ~ 11 μm)和宽温域(223 ~ 473 K),又保证了折射率温度系数测量精度,成功完成了硒化锌棱镜的折射率温度系数测量。

2 测量系统设计

2.1 测量原理

折射率温度系数也称热光系数,是指材料折射率随温度变化的系数,即:

$$\left(\frac{dn}{dT}\right) = \frac{\Delta n}{\Delta T} = \frac{n_2 - n_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中: ΔT 表示温度变化,单位为($^{\circ}\text{C}$); Δn 表示折射率变化; n_1 、 n_2 表示两个温度下的折射率; T_1 、 T_2 表示测量折射率时的两个温度,单位为($^{\circ}\text{C}$)。

测量折射率的方法有很多,如:最小偏向角法、自准直法、干涉法等^[14-16],但由于需要测量真空低温环境下的折射率,测量精度较高的最小偏向角法实现比较困难,并且在最小偏向角判定时也容易引起较大误差,而在其他方法中,自准直法是测量低温折射率比较合适的方法,其实验原理简单,操作方

便。其测量原理如图1所示。

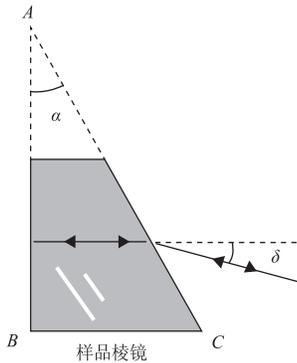


图1 自准直测量原理

Fig. 1 Auto-collimation theory of measurement

将样品棱镜加工成顶角为 α 的直角棱镜(直角面AB镀一层高反射膜),放置于高精密转台的中央,单色平行光入射到AC面后,经过折射垂直入射到AB面,然后反射光束按原路返回,由光学的几何性质可以得出其折射率计算公式:

$$n = \frac{\sin(\alpha + \delta)}{\sin\alpha} \quad (2)$$

式中, n 为折射率; α 为样品棱镜顶角,单位为度; δ 为测量的偏向角,单位为($^\circ$)。

目前国内外利用自准直原理测量折射率温度系数时采用的是偏向角的绝对测量法,该方法是通过测量温度变化后偏向角的绝对值,来计算折射率温度系数。而本文提出了偏向角的相对测量法:通过测量温度变化后偏向角的相对改变值,从而实现更精确更方便的计算折射率温度系数。先通过测角仪将棱镜顶角测得,再利用设计的测量系统分别测量常温下的偏向角和温度变化后的偏向角的相对改变量,最后利用公式(2)推导出公式(3),即可获得该样品棱镜在温度改变后的折射率:

$$n_T = \frac{\sin(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta)}{\sin\alpha} \quad (3)$$

式中, n_T 表示温度改变后的折射率; δ_0 表示常温下该样品常温下的初始偏向角度,单位为度; $\Delta\delta$ 表示温度变化后偏向角的改变量,单位为度。

通过温控仪控制加热棒功率改变样品棱镜的温度,利用精密转台和红外单点探测器测量出偏向角的改变量,代入公式(3)即可得到不同温度下的折射率,再对温度求导数,即可得折射率温度系数。根据公式(1)和(3)可推导出折射率温度系数的公式为:

$$\left(\frac{dn}{dT}\right) = \frac{\Delta n}{\Delta T} = \frac{\sin(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta) - \sin(\alpha + \delta_0)}{(T_2 - T_1)\sin\alpha} \quad (4)$$

式中, Δn 表示温度改变后的折射率差值。

2.2 偏向角的相对测量法和绝对测量法的测量精度分析与对比

目前国内外测量折射率温度系数使用的是偏向角绝对测量法(传统的自准直法),而此次提出了基于自准直原理的偏向角相对测量法,是因为国内普遍使用的高精密转台在整周旋转时的测量精度没有局部测量精度高,而偏向角相对测量法是测量偏向角的改变量(小角度),正是采用局部测量的方法测量,这种方法降低了折射率温度系数测量误差,同时提高了测量效率。下面针对自准直法的偏向角相对测量法和绝对测量法进行对比与分析。公式中所有参数定义如表1所示。

表1 参数定义

Tab. 1 Parameter delimiter

parameter	definition
β_0	Refractive index temperature coefficient true value
α	Top angle of sample prism
n_0, n_T	Refractive index before and after temperature change
ΔT	Temperature change
δ_0, δ_T	Deflection angle before and after temperature change
$\Delta\delta$	Change in angle of deflection
e_δ	Whole circumference rotation error
e	Localized error

由公式(4)可知在无误差引入的情况下,折射率温度系数真值应为:

$$\beta_0 = \frac{\Delta n}{\Delta T} = \frac{n_T - n_0}{\Delta T} = \frac{\sin(\alpha + \delta_T) - \sin(\alpha + \delta_0)}{\sin\alpha\Delta T} \quad (5)$$

2.2.1 偏向角绝对测量法的绝对误差

根据自准直法的偏向角绝对测量原理,测量初始偏向角时需进行整周旋转,引入整周旋转误差 e_δ ;在温度改变后在测量偏向角绝对改变量时又会进行一个整周旋转,此时又引入整周旋转误差 e_δ ,所以其温度系数计算公式为:

$$\beta = \frac{n_T - n_0}{\Delta T} = \frac{\sin(\alpha + \delta_T \pm e_\delta) - \sin(\alpha + \delta_0 \pm e_\delta)}{\sin\alpha\Delta T} \quad (6)$$

由于 \sin 函数为奇函数,根据误差最大化原则公式(6)化简为:

$$\beta = \frac{n_T - n_0}{\Delta T} = \frac{\sin(\alpha + \delta_T + e_\delta) - \sin(\alpha + \delta_0 - e_\delta)}{\sin\alpha\Delta T} \quad (7)$$

所以偏向角绝对测量法的绝对误差为:

$$(\beta - \beta_0)_{\text{abs}} = \frac{4\sin\frac{e_\delta}{2}\cos(\alpha + \delta_0 + \frac{\Delta\delta}{2})\cos(\frac{\Delta\delta + e_\delta}{2})}{\sin\alpha\Delta T} \quad (8)$$

所以偏向角相对测量法的绝对误差为:

$$(\beta' - \beta_0)_{\text{abs}} = \frac{2\cos(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta + \frac{e - e_\delta}{2})\sin\frac{e - e_\delta}{2} + 2\cos(\alpha + \delta_0 - \frac{e_\delta}{2})\sin\frac{e_\delta}{2}}{\sin\alpha\Delta T} \quad (10)$$

2.2.3 对比两种方法的绝对测量精度

由公式(8)和(10)可算出:

$$\left| \frac{(\beta' - \beta_0)_{\text{abs}}}{(\beta - \beta_0)_{\text{abs}}} \right| = \left| 1 - \frac{\cos(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta - \frac{e_\delta}{2} + \frac{e}{2})\sin(\frac{e_\delta - e}{2})/\sin(\frac{e_\delta}{2}) + \cos(\alpha + \delta_T + \frac{e_\delta}{2})}{\cos(\alpha + \delta_0 - \frac{e_\delta}{2}) + \cos(\alpha + \delta_T + \frac{e_\delta}{2})} \right| \quad (11)$$

由棱镜顶角和偏向角的几何关系得,所以:

$$\cos(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta - \frac{e_\delta}{2} + \frac{e}{2})\sin(\frac{e_\delta - e}{2})/\sin(\frac{e_\delta}{2}) < \cos(\alpha + \delta_0 - \frac{e_\delta}{2}) \quad (12)$$

所以:

$$\left| \frac{(\beta' - \beta_0)_{\text{abs}}}{(\beta - \beta_0)_{\text{abs}}} \right| < 1 \quad (13)$$

公式(13)从公式上推论出自准直原理的偏向角相对测量法测量折射率温度系数永远比绝对测量法精度要高。若转台局部误差 e 做到 $0.5''$,整周旋转 e_δ 误差取 $1'' \sim 30''$,随后利用 MATLAB 绘制公式(13)的比值曲线如图 2 所示。

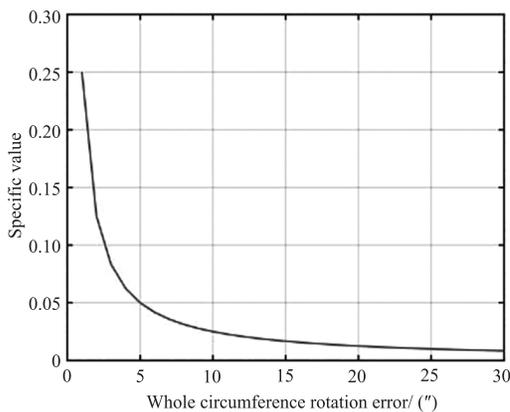


图2 两种方法绝对误差比值曲线

Fig.2 Absolute error ratio curves of the two methods

由图 2 分析可知,在测量折射率温度系数时,偏

2.2.2 偏向角相对测量法的绝对误差

根据偏向角相对测量原理,测量初始偏向角时跟绝对测量法的误差相同,而在升温后,转台只需进行局部小角度测量,从而引入局部误差 e ,同理其温度系数计算公式化简为:

$$\beta' = \frac{n'_T - n'_0}{\Delta T} = \frac{\sin(\alpha + \delta_0 + \Delta\delta - e_\delta + e) - \sin(\alpha + \delta_0 - e_\delta)}{\sin\alpha\Delta T} \quad (9)$$

向角的相对测量法始终比绝对测量法的测量精度高,随着整周旋转误差的增大,两种方法的绝对误差比值越来越小,所以使用自准直原理的偏向角相对测量法对折射率温度系数误差影响更小。

3 测量方案与系统搭建

折射率温度系数测量仪主要由三大部分组成,分别为准直光源系统、温控测角系统、探测系统,测量系统原理如图 3 所示,实物图如图 4 所示。

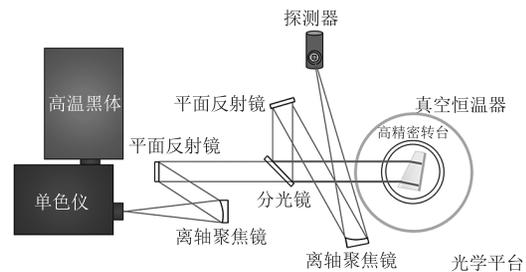


图3 测量系统原理图

Fig.3 The schematic diagram of test system

首先高温黑体辐射出红外光源,光源进入单色仪,通过单色仪光栅进行分光,以设定的波长射出;其次通过一个离轴聚焦镜和一个平面反射镜将发散的光源变

为准直光;然后该准直光透过分光镜后打在棱镜上,通过调整样品棱镜角度,使反射光按原路返回到分光镜上;最后经过分光镜的反射后射入另外一个平面反射镜和离轴聚焦镜,使准直光源聚焦于探测器光敏面上。

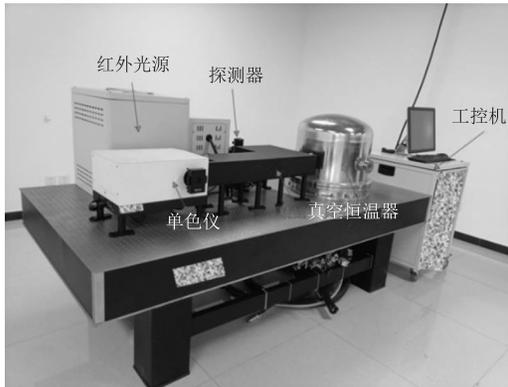


图 4 测量系统实物图

Fig. 4 Experimental setup for refractive index temperature coefficient measurement

准直光源系统由高温黑体、单色仪、两个平面反射镜、两个离轴聚焦镜和一个分光镜组成,主要实现分离出 $1 \sim 11 \mu\text{m}$ 的单色光,并且对光进行准直、分光 and 瞄准。高温黑体采用卓立汉光的 HT1700 型号,可在设置为 $500 \sim 1700 \text{ }^\circ\text{C}$,通过高温加热内部碳化硅材料发射热辐射源,覆盖光谱从可见光一直到远红外。

温控测角系统由高精度转台和一套真空恒温器组成,本文选用自行研制的高精密转台,编码器测角精度优于 $3''$,瞄准精度为 $0.5''$,其主要为了承载样品和测量样品偏向角的改变量,真空恒温器主要为保障样品棱镜测试过程中的控温及真空环境,以保证样品温度稳定性。温控仪采用 Lakeshore301,最小分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

探测系统由红外单点探测器和锁相放大器组成,红外单点探测器是基于碲镉汞材料的光电敏感器件,用于接收红外经过样品棱镜后的微弱光信号,再利用锁相放大器转化为特定输出的电压信号。探测器采用 DMCT(x)-De 系列碲镉汞探测器(探测范围: $2 \sim 22 \mu\text{m}$) 和 DPbS 系列常温型硫化铅探测器(探测范围: $0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$)。

测试前需对测试样品进行加工,在其光路进入的直角边镀一层高反射膜,之后这一面定义为反射面。将样品棱镜放置于样品仓内,先在室温下通过控制精密转台,通过反射面进行光斑瞄准,记录此时转台读数与温度,然后再旋转至折射面

进行光斑瞄准,再次记录转台读数与温度,通过两次转台读数计算出初始偏向角,然后设置新的温度点,在折射面进行光斑瞄准,记录转台读数与温度,计算出偏向角的改变量。再带入式(4)就可算出折射率温度系数。

4 实验结果与分析

本文测量样品材料为 ZnSe 棱镜,加工成顶角为 20 mm 的直角棱镜,并对 $50 \times 50 \text{ mm}$ 的垂直平面进行镀高反射膜处理,样品棱镜如图 5 所示。

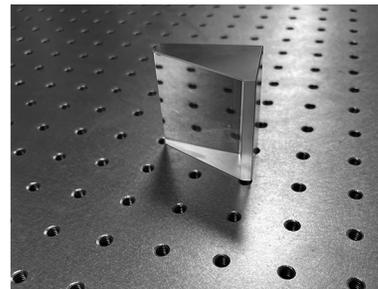


图 5 样品棱镜

Fig. 5 Sample prism

本次折射率温度系数测量实验温度范围为 $-50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$,将该温度范围分为 13 个温度点进行验证样品棱镜温度是否能稳定(温度传感器示值变化不超过 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,并且长达 10 min 以上才判断为温度稳定),实验结果如图 6 所示。

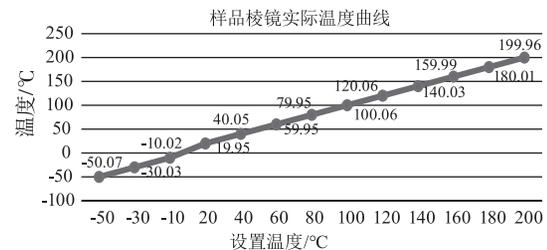


图 6 样品棱镜实际温度曲线

Fig. 6 Sample prism actual temperature profile

在实验中,样品棱镜温度可以达到 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,通过温控仪控制加热棒进行加热来稳定至 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$,并且在 $-50.07 \text{ }^\circ\text{C}$ 稳定了半个小时以上。实验结果表明全温度范围内样品实际温度与设置温度的温差最大为 $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$,满足温度稳定性要求。

此次实验测量 ZnSe 的折射率温度系数的测量结果如表 2 所示。

在 NASA 所发表的文献中具有 ZnSe 的高精度折射率温度系数数据可用来对比,但该数据只有温度范围为 $-253 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ 、波长范围为 $0.5 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 的折射率温度系数,部分数据如表 3 所示^[17]。

表2 ZnSe 折射率温度系数测量结果

Tab.2 Measurement result of temperature coefficient of refractive index of ZnSe

wavelength/ μm	-50 °C	-30 °C	-10 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C
1	7.18	7.22	7.55	7.58	7.66	7.66	7.76	8.02	8.07	8.12	8.18	8.21	8.41
2	6.17	6.23	6.45	6.65	6.75	6.81	6.92	7.06	7.14	7.19	7.24	7.27	7.35
6	6.19	6.24	6.23	6.56	6.33	6.51	6.50	6.63	6.75	6.81	6.88	6.96	6.99
11	5.99	6.04	6.06	6.11	6.15	6.42	6.50	6.57	6.65	6.72	6.79	6.86	6.94

表3 NASA 测量的 ZnSe 折射率温度系数

Tab.3 Temperature coefficient of refractive index of ZnSe measured by NASA

wavelength/ μm	-10 °C	20 °C	40 °C
1	7.18	7.38	7.59
2	6.28	6.44	6.59

从实验结果可知,该系统控温精度达到 0.1 °C 以内,转台瞄准精度达到为 1"。美国 NASA 设计的 CHARMS 系统测量了 ZnSe 棱镜在 20 ~ 300 K 的折射率温度系数,通过数据对比分析可知此次实验与其测量的折射率温度系数一致性很好,数据对比相对误差为 0.99%,所以基于自准直原理的偏向角相对测量法方案合理可行,具有较好的运用前景。

5 结论

自准直法是折射率温度系数测量比较常见的方法,该方法不仅适用于常温和高温的折射率温度系数测量,也适用于低温折射率温度系数测量。通过 2.2 节对自准直法偏向角相对测量原理和绝对测量原理的分析发现,在测量折射率温度系数时,偏向角的相对测量法始终比绝对测量法的测量精度高。所以此次实验采用自准直法的偏向角相对测量的方法,提高了折射率温度系数的测量效率和精度。

本文提出了一种基于自准直原理的偏向角相对测量的新方法,搭建了折射率温度系数测量装置,达到宽温域(-50 ~ 200 °C)和宽波长范围(1 ~ 11 μm),并且测量了 ZnSe 棱镜的折射率温度系数,测量相对误差为 0.99%。这种测量方法的优势,在宽温域和宽波长范围的折射率温度系数测量具有较大的发展前景。

参考文献:

[1] Chen Yubo, Chen Le, Qu Changzheng, et al. Application

of infrared control and guidance technology in precise attack weapons[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(z2):35-38. (in Chinese)

陈玉波,陈乐,曲长征,等. 红外制导技术在精确打击武器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z2):35-38.

- [2] Lin Kuanting, Weng Qianchun, Kim Sunmi, et al. Development of a cryogenic passive-scattering-type near-field optical microscopy system[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2):1-7.
- [3] Anon. Researcher at university of Tokyo has published new data on electronics (development of a cryogenic passive-scattering-type near-field optical microscopy system) [J]. Electronics Newsweekly, 2023, 21(2):250-251.
- [4] Jiang Guoqiu, Zhang Qihang, Zhao, et al. Comprehensive measurement of the near-infrared refractive index of GaAs at cryogenic temperatures [J]. Optics Letters, 2023, 48(13):3507-3510.
- [5] Zhao Y, Li X, Zhang H, et al. Preliminary development of emissivity measurement system at low temperature based on radiometric method [J]. Cryogenics, 2023, 132(15):1-6.
- [6] Leviton D B, Frey B J. Design of a cryogenic high-accuracy absolute prism refractometer for infrared through far-ultraviolet optical materials [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4842(17):259-269.
- [7] Leviton D B, Frey B J, Heaney J B, et al. Temperature-dependent refractive index of Cleartran[®] ZnS to Cryogenic temperatures [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 2013, 8863(5):7.
- [8] Burnett J H, Kaplan S G, Stover E, et al. Refractive index measurements of Ge [J]. Infrared Sensors, Devices, and Applications, 2016, 9974(2):221-224.
- [9] John H Burnett, Eric C Benck, et al. Index of refraction of germanium [J]. Applied Optics, 2020, 48(8):3985-3991.
- [10] Hu Y, Lü J, Hao Q. Refractive index measurement of glass with arbitrary shape based on brewster's law and a focu-

- sing probe beam[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(7):2421.
- [11] Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping, et al. An equipment for measuring the temperature coefficient of refractive index of infrared materials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(3):54-56. (in Chinese)
王雷, 杨照金, 黎高平, 等. 红外光学材料折射率温度系数测量装置[J]. *应用光学*, 2005, 26(3):54-56.
- [12] Xu Lingmao, He Yanchun, Zheng Jun, et al. Infrared optical properties of YF_3 films at low temperature[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(4):5. (in Chinese)
徐嶺茂, 何延春, 郑军, 等. 氟化钇薄膜的低温红外光学性能[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(4):5.
- [13] Lee, Ju-Yi, et al. Measurement of the refractive index of lenses from the maximum phase difference of the total internal reflection with a polarization camera[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10):B106-B112.
- [14] Zhou Kaining, Xiao Ning, Chen Qi, et al. Comparing of three prism refractive index measuring methods[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2011, 30(4):22-25, 90. (in Chinese)
- 周凯宁, 肖宁, 陈祺等. 3种测量三棱镜折射率方法的对比[J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(4):22-25, 90.
- [15] Cheng Shuying, Zhang Ge, Huang Xiangjin, et al. Measurement of refractive indices of ZF5 glass by auto-collimation method[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2001, 29(3):14-15, 39. (in Chinese)
程树英, 张戈, 黄祥金, 等. 用自准直法测量 ZF5 玻璃的折射率[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2001, 29(3):14-15, 39.
- [16] Chen Lei, Wang Qing, Zhu Rihong, et al. Measure of the homogeneity of refractive index of the germanium crystal using IR interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2005, 32(3):404-406. (in Chinese)
陈磊, 王青, 朱日宏. 使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性[J]. *中国激光*, 2005, 32(3):404-406.
- [17] Leviton D B, Frey B J, Kvamme T. High accuracy, absolute, cryogenic refractive index measurements of infrared lens materials for JWST NIRCcam using CHARMS[C]// *Conference on Cryogenic Optical Systems and Instruments*, 2008:590400:1-12.