

文章编号 1004-924X(2018)02-0300-07

## 角度位置自动识别的红外折射率测量

刘永兴<sup>1,3</sup>, 戴世勋<sup>1,3\*</sup>, 张培晴<sup>1,3</sup>, 吴越豪<sup>1,3</sup>, 胡向平<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 湖北新华光信息材料有限公司, 湖北 襄阳 441000;

3. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:**为准确快速获得块体硫系玻璃红外波段的折射率, 搭建了基于类准直测量法的折射率测量系统。该系统采用液氮制冷的碲镉汞探测器和特殊的光路实现了光强信息的高分辨采集, 使用高分辨数据采集卡将角度信息数字化, 利用精密步进电机传动控制系统实现了光强信号与位置信号的同步记录。开发的测量软件可自动判别光强峰位信息, 自动计算获得待测样品的折射率。对比测试  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 、 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 、 $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  商用硫系玻璃在  $3.39\ \mu\text{m}$  和  $4.8\ \mu\text{m}$  处的折射率。实验结果表明, 该装置系统测量折射率的标准偏差为  $10^{-3}$ , 测量不确定度为 0.002 9, 可快速、准确测量块体材料红外波段的折射率。

**关键词:** 红外光学材料; 硫系玻璃; 折射率测量; 自准直法

中图分类号: TN216 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182602.0300

## Measurement of infrared refractive index based on angle location automatic recognition

LIU Yong-xing<sup>1,3</sup>, DAI Shi-xun<sup>1,3\*</sup>, ZHANG Pei-qing<sup>1,3</sup>, WU Yue-hao<sup>1,3</sup>, HU Xiang-ping<sup>2</sup>

(1. *Laboratory of Infrared Materials and Devices, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

2. *Hu Bei New Hua Guang Information Matreials CO., Ltd., Xiangyang 441000, China;*

3. *Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: daishi.xun@nbu.edu.cn*

**Abstract:** In order to determine the refractive index of bulk glasses in the infrared band, a refractive index measurement system based on the optical auto-collimation principle is proposed. We use a liquid-nitrogen-cooled mercury telluride detector and a special optical architecture to collect high-resolution light intensity information. The angle information is converted to digital information by a data acquisition card. A precision stepper motor drive control system is used to synchronize the light intensity signal and the position signal. The software automatically determines the peak position of the light intensity, and automatically calculates the refractive index of the sample. The refractive indices of the  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ ,  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ ,  $\text{As}_2\text{S}_3$  and  $\text{As}_2\text{Se}_3$  commercial chalcogenide glasses were measured at  $3.39\ \mu\text{m}$  and  $4.8\ \mu\text{m}$ .

收稿日期: 2017-06-27; 修订日期: 2017-08-22.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0303800); 国家基金委重大科学仪器项目 (No. 61627815); 宁波大学王宽诚幸福基金

$\mu\text{m}$  and  $4.8 \mu\text{m}$ . The standard deviation of the refractive index measurement system is  $10^{-3}$  with a measurement uncertainty of 0.002 9. The system can be useful to quickly and accurately measure the refractive index of bulk materials in the infrared band.

**Key words:** infrared optical materials; chalcogenide glass; refractive index measurement; autocollimation refractometric method

## 1 引言

折射率是光学材料的基本性能参数,也是光学设计时的重要参量。随着各类红外材料(Ge、ZnS、ZnSe、硫系玻璃等)在红外光学系统中的广泛应用<sup>[1-2]</sup>,准确测量红外材料的折射率变得越来越重要。对于可见光范围内的折射率测量已经有比较成熟的方法和测量仪器,其测量原理可分为绝对测量和相对折射率差测量。绝对值测量能够直接获得待测样品的折射率,如最小偏向角法<sup>[3]</sup>、V棱镜法<sup>[4]</sup>、自准直法<sup>[5]</sup>、偏振测量法<sup>[6]</sup>、F-P干涉法<sup>[7]</sup>等。其中,最小偏向角法<sup>[8]</sup>及F-P干涉法<sup>[9]</sup>在可见光范围中的测量精度可以达到 $10^{-6}$ ,V棱镜法和自准直法<sup>[10]</sup>的测量精度可以达到 $10^{-5}$ 。间接测量法通过测量待测样品与标准样品之间的折射率差来间接获得折射率,如全反临界角法<sup>[11]</sup>,该方法通常能达到 $10^{-4}$ 的测量精度。通过测量角度或者干涉条纹变化的折射率测量方法一般情况下都需要借助高分辨的CCD成像瞄准器件<sup>[12]</sup>。然而,当测量波长由可见近红外移动到中远红外时,高分辨的中远红外CCD成像器件不仅造价昂贵且分辨率远不及可见近红外波段。全反临界角法测量折射率不仅需要高分辨的瞄准器件,而且对于较高的折射率(可达2.8以上)的红外材料而言,需制备高面型精度、高角度精度、大尺寸的直角棱镜<sup>[13]</sup>。目前,商用的利用全反临界角法的棱角耦合仪(如韩国SPA-400棱镜耦合仪<sup>[14]</sup>)可测试材料的折射率一般低于2.2,且测试波长通常在可见光和近红外波段(以632.8,1310和1550 nm为主)。国内西安应用光学研究所(205所)的国防科工委光学计量一级站<sup>[15]</sup>具有覆盖 $1\sim 16 \mu\text{m}$ 波段的折射率测量仪器,不确定度为 $\pm 0.004$ ,但对样品有比较严格的要求,需加工顶角为 $20^\circ$ 、尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的等腰三棱镜,且测量费用昂贵。

作者所在实验室长期从事硫系玻璃材料基础

研究和中试制备关键技术的研发,经常要在不同制备工艺参数下测量不同批次玻璃样品的红外折射率,以改进和优化制备工艺,因此,亟需快速、准确的折射率测量手段。本文借鉴自准直法测量材料折射率原理,自行设计并搭建了一套基于角度光强自动记录的红外块体材料折射率测量系统。该测量系统由红外光源、准直器、多维电控旋转台、电动控制驱动器、角度数字转换器、红外光电探测器、数据采集与分析系统组成,可自动获得偏转角度并计算待测样品的折射率。

## 2 测量原理

图1(a)为自准直法测量原理示意图,光以一定的夹角入射到顶角为 $\alpha$ 的棱镜上,调整入射光的角度,根据光路可逆原理,当第一次发生折射的光垂直照射到另外一个面时(为提高反射率通常

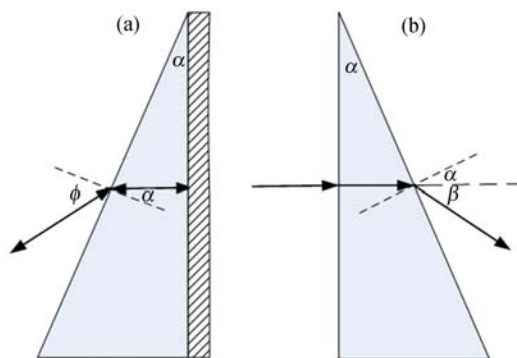


图1 (a)自准直法测量原理图;(b)本文折射率测量原理图

Fig.1 Schematic of collimation method (a) and our proposed method (b) for measuring refractive index

镀上高反射的金属膜),光沿着原来的入射方向返回。根据几何关系可知,折射角等于棱镜顶角 $\alpha$ ,测量入射角为 $\varphi$ ,那么有:

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

计算获得材料的折射率。红外波段光路按原路返回判定难度较大,考虑这个不利因素,本文借鉴自准直法测量原理来测量红外块体材料的折射率,其原理示意图如图 1(b)所示。准直光垂直入射到顶角为  $\alpha$  的棱镜上,此时光不发生偏转,折射光入射到棱镜另外一个面时发生折射,出射光发生偏转。根据几何关系,光密介质中的入射角为棱镜顶角  $\alpha$ ,光疏介质中的折射角  $\varphi = \alpha + \beta$ ,其中  $\beta$  为入射光的偏转角。通过测量光线的偏转角度  $\beta$ ,获得被测棱镜的折射率:

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}. \quad (2)$$

### 3 折射率测量装置搭建

图 2(a)和 2(b)分别为自行搭建的折射率测量装置原理和实物。该系统由可变波长光源(光源可选:3.39  $\mu\text{m}$  He-Ne 激光器、4.5  $\mu\text{m}$  和 7.5  $\mu\text{m}$  红外量子阱激光器、10.6  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光器以

及光纤激光器等,光源平均功率  $\geq 1 \text{ mW}$ )、光路准直系统(由红外透镜和小孔光阑组成,将光束直径变小同时实现平行光输出)、旋转台(包括下层的电动旋转台和上层的手动调节台,两者的轴心重合,前者可通过计算机精确控制转角,精度为  $\pm 0.75''$ ;后者可手动实现上下升降、绕轴旋转及俯仰变化)及配套的控制驱动器、角度数字转换器、HgCdTe 红外光电探测器(响应波长为  $2 \sim 12 \mu\text{m}$ )及基于虚拟仪器的数据处理与电脑控制系统。

利用该装置测量红外折射率的具体过程为:首先将加工好的硫系玻璃棱镜(顶部斜角为  $20^\circ$ ,加工精度为  $1'$ )置于手动调节台上,利用 532 nm LD 光源辅助,通过手动调节使棱镜一面垂直于入射光,并且使棱镜另外一个斜面与手动调台轴心所在的平面重合;然后切换到红外光源,通过电脑自动控制采集角度位置和对应的光强信息,确定光强最大值所对应的角度,从而自动计算待测样品的折射率。图 3 是利用 Labview 软件自行设计编写的折射率测量软件的界面。

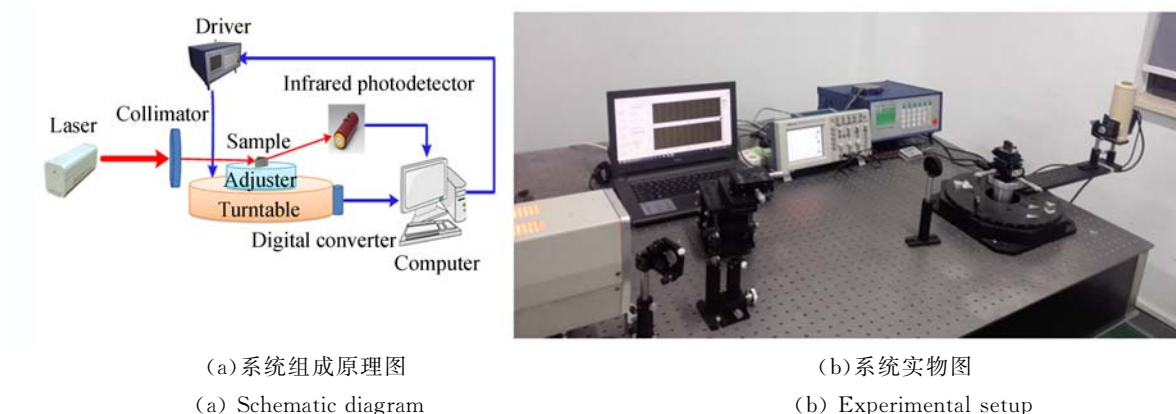


图 2 搭建的折射率测量系统

Fig. 2 Principle and photo of proposed refractive index measurement system

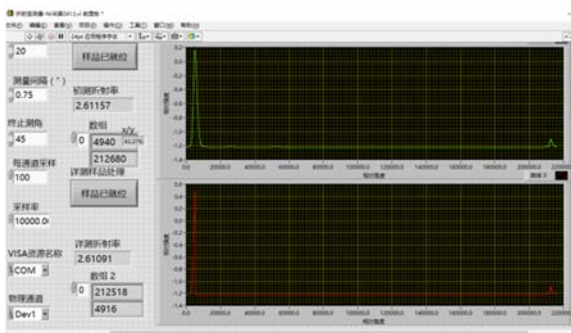


图 3 自编测试软件界面

Fig. 3 Software interface of self-compiled refractive index test program

由折射率测量原理可知,准确测量偏转角  $\beta$  是获得折射率的关键。为了提高偏转角  $\beta$  的测量精度,将测试系统中电动旋转平台上固定探测器的支架延长,并在探测器接收面元前端放置宽度为 0.3 mm 的垂直方向的狭缝,狭缝前端增加一个焦距为 50 mm 的  $\text{GaF}_2$  聚焦透镜。在测量过程中,为了降低空程误差产生的影响,单次测量采用同方向旋转,来回记录两次。第一次利用快速扫描获得两次光强最大值的相对位置;第二次在返回到初始位置的过程中,借助第一次记录的位置信息,在非信号探测位置旋转台以较高的速率旋

转以减少测试周期,在接近光强最大值时,降低旋转平台的旋转速率,利用旋转编码器的分辨极限获得最优的位置光强记录。单峰位光强信号随位置变化呈高斯分布,但是光源的功率波动以及背景噪声会影响光强极大值的位置确定,所以利用高斯拟合<sup>[16]</sup>获得峰值中心所对应的位置,从而准确确定偏转角  $\beta$ 。

## 4 硫系玻璃红外折射率测试结果

### 4.1 硫系玻璃折射率测量结果及精度

选取实验室自制的  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 、 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 、 $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  商用硫系玻璃样品。使用尺寸为  $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,顶角为  $20^\circ$  的标准棱镜作为参考,将玻璃样品加工成与标样棱镜相同规格的棱镜。利用万能测角仪、光学测角比较仪监控加工过程,可获得顶角为  $20^\circ\pm 1'$  的样品。实验中默认棱镜顶角为  $20^\circ$ 。为比较自建装置的折射率测试精度, $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 、 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  棱镜样品首先在西安应用光学研究所的国防科工委光学计量一级站进行了测量。测量条件为:温度  $23^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $74\%$ ,具体结果见表 1,测试精度为  $\pm 0.004$ 。分析数据可知:宽带光源测量下  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  样品在  $2\sim 12\ \mu\text{m}$  的折射率为  $2.626\ 1\sim 2.576\ 9$ , $3.39\ \mu\text{m}$  波长对应的折射率为  $2.611\ 2$ ;  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  在  $2\sim 12\ \mu\text{m}$  的折射率为  $2.642\ 2\sim 2.594\ 8$ , $3.39\ \mu\text{m}$  波长对应的折射率为

$2.624\ 7$ 。两组玻璃样品的折射率随着波长的增加逐步降低,且随着波长的增加,折射率下降的速率逐渐降变小。

然后,用自行搭建的装置测量了两个棱镜的折射率。光源采用  $3.39\ \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光,光束通过准直系统后,光斑直径为  $2.5\ \text{mm}$ ,照射到样品表面的功率约为  $1\ \text{mW}$ 。测试环境温度为  $18^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $51\%$ 。十次随机测量的结果及平均值如表 2 所示。表中  $n_i$  为第  $i$  次测量获得的折

射率,平均值  $\bar{n} = m^{-1} \sum_{i=1}^m n_i$ ,随机偏差为  $\sigma_i = \bar{n} - n_i$ ,由贝塞尔公式可得标准误差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - \bar{n})^2}{m-1}}. \quad (3)$$

然后对数据进行分析。如表 2 所示, $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  玻璃样品 10 次测量的平均值为  $2.611\ 1$ ,此外 10 次测量数据相差最大为  $2.431\times 10^{-3}$ ,标准偏差为  $1.13\times 10^{-3}$ 。 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  玻璃样品重复 10 次的测量数据如表 3 所示,测量结果显示数据的最大偏差为  $1.737\times 10^{-3}$ 。因此,可以确定  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  玻璃在  $3.39\ \mu\text{m}$  处的折射率为  $2.624\ 7\pm 0.000\ 8$ ,两组数据与国防科工委光学计量一级站测量的  $3.39\ \mu\text{m}$  处的折射率数据基本一致。

表 2  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  等精度重复测试结果

Tab. 2 Repeated test results of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  at same precision

第 $i$ 次测量结果	平均值 $\bar{n}$	随机偏差 $\sigma_i(\times 10^{-3})$	标准偏差 $\sigma(\times 10^{-3})$
2.613 0	2.610 9	-1.90	0.22
2.611 6	2.613 6	-0.44	-2.43
2.610 4	2.610 1	0.71	1.06
2.610 4	2.611 7	0.74	-0.54
2.610 8	2.610 4	0.30	0.77

表 3  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  等精度重复测试结果

Tab. 3 Repeated test results of  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  at same precision

第 $i$ 次测量结果	平均值 $\bar{n}$	随机偏差 $\sigma_i(\times 10^{-3})$	标准偏差 $\sigma(\times 10^{-3})$
2.625 1	2.625 3	0.373	0.473
2.624 4	2.623 1	-0.377	-1.737
2.624 2	2.624 3	2.624 7	-0.617 -0.517
2.625 8	2.625 4	1.033	0.573
2.625 1	2.625 1	0.313	0.303

表 1  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 、 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  玻璃不同波长的折射率

Tab. 1 Refractive indices of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  and  $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$  glasses for different wavelengths

波长/ $\mu\text{m}$	$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 折射率	$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 折射率
2	2.626 1	2.642 2
3	2.611 6	2.627 3
3.39	2.611 2	2.624 7
4	2.605 8	2.622 4
5	2.602 2	2.618 3
6	2.599 1	2.615 7
7	2.596 2	2.613 0
8	2.592 9	2.609 9
9	2.589 5	2.606 4
10	2.585 8	2.602 6
11	2.581 6	2.598 5
12	2.576 9	2.594 8

为了进一步检验测试系统的重复测试精度,在 3.39  $\mu\text{m}$  He-Ne 激光条件下又对  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  样品进行 10 次重复测量,测量结果如表 4 所示。为了进一步检验不同光源条件下的测试结果,选取 4.8  $\mu\text{m}$  的量子阱激光器作为光源对上面四块不同组分的样品进行 10 次等精度测量,结果如表 4 所示。

进一步分析 3.39  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$  条件下获得的测量数据。通过查阅相关的产品技术手册获得各组材料样品在测试 3.39  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$  附近的折射率。对 10 次测量数据取算术均值,结果表

明所获得的测试结果的算术平均值在参考范围之内。通过比较最大偏差和标准偏差可以发现,3.39  $\mu\text{m}$  He-Ne 激光下的数据波动要高于 4.8  $\mu\text{m}$  量子阱激光条件下的测试数据。对比两款激光器的产品参数,发现 3.39  $\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光的最大发射功率为 10 mW,发散角较大,因此在测量过程中准直出口直径需调节到 3 mm;而 4.8  $\mu\text{m}$  的量子阱激光器的输出功率可以达到 150 mW,且发散角较小,因此准直器的出口直径可以调到 2 mm。较高的光强和较小的激光半径可以提高峰位判断的灵敏度,测试结果的波动性较小。

表 4 3.39  $\mu\text{m}$  和 4.8  $\mu\text{m}$  等精度重复测试数据

Tab. 4 Repeated test data of 3.39  $\mu\text{m}$  and 4.8  $\mu\text{m}$  at same precision

硫系玻璃	折射率数据(@3.39 $\mu\text{m}$ )									
$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$	2.613 0	2.611 6	2.610 4	2.610 4	2.610 8	2.610 9	2.613 6	2.610 1	2.611 7	2.610 4
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	2.625 1	2.624 4	2.624 2	2.625 8	2.625 1	2.625 3	2.623 1	2.624 3	2.625 4	2.625 1
$\text{As}_2\text{S}_3$	2.414 6	2.414 3	2.413 7	2.414 5	2.413 9	2.414 2	2.414 6	2.414 7	2.413 7	2.414 2
$\text{As}_2\text{Se}_3$	2.801 8	2.800 0	2.801 1	2.799 1	2.800 9	2.801 4	2.801 0	2.802 0	2.800 0	2.801 1
硫系玻璃	折射率数据(@4.8 $\mu\text{m}$ )									
$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$	2.604 0	2.603 4	2.603 5	2.603 4	2.603 5	2.604 6	2.604 8	2.604 8	2.604 6	2.604 5
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	2.619 9	2.620 0	2.621 4	2.621 1	2.621 1	2.620 5	2.620 7	2.621 2	2.621 8	2.620 9
$\text{As}_2\text{S}_3$	2.408 1	2.407 1	2.406 9	2.408 4	2.408 7	2.408 3	2.408 5	2.408 4	2.408 7	2.408 4
$\text{As}_2\text{Se}_3$	2.792 1	2.791 7	2.792 4	2.791 8	2.791 1	2.791 7	2.791 5	2.791 6	2.792 4	2.792 3

表 5 等精度重复测试结果

Tab. 5 Repeated test results at same precision

硫系玻璃	3.39 $\mu\text{m}$				4.80 $\mu\text{m}$			
	参考折射率 / $\mu\text{m}$	平均值	最大偏差 $\sigma_{\text{max}}$ / $10^{-13}$	标准偏差 / $10^{-13}$	参考折射率 / $\mu\text{m}$	平均值	最大偏差 $\sigma_{\text{max}}$ / $10^{-13}$	标准偏差 / $10^{-13}$
$\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$	2.611 2 @3.39	2.611 3	2.31	1.19	2.605 8~2.602 2 @4~5	2.604 1	0.73	0.61
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	2.624 7 @3.39	2.624 8	-1.68	0.78	2.622 4~2.618 3 @4~5	2.620 8	0.94	0.60
$\text{As}_2\text{S}_3$	2.414 3~2.413 8 @3.30~3.40	2.414 2	-0.54	0.37	2.408 1~2.407 6 @4~5	2.408 1	0.51	0.64
$\text{As}_2\text{Se}_3$	2.803 4~2.796 4 @3~4	2.801 0	-1.74	0.89	2.796 4~2.792 6 @4~5	2.791 9	-0.73	0.42

## 4.2 系统不确定度分析

引起折射率测量的不确定因素可分为以下三种:由测量样品面形和角度精度所产生的不确定度、测试装置本身引起的不确定度以及由环境因素造成的不确定度。实验环境造成的不确定度(通常为  $10^{-6}$  数量级)要远小于前面两种不确定度,本文将它忽略。

由折射率计算公式(1)可知,影响折射率计算结果的因素有棱镜顶角  $\alpha$  和光路偏折角  $\beta$ ,分别对  $\alpha, \beta$  求偏微分得到:

$$\frac{\partial n}{\partial \alpha} = -\frac{\sin \beta}{\sin^2 \alpha} \quad (4)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \beta} = \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$$

棱镜的加工精度为  $1'$ , 角度编码的分辨率为  $1.5''$ , 带入式(5):

$$u_1 = \sqrt{\frac{\partial^2 n}{\partial \alpha^2} \cdot \Delta^2 \alpha + \frac{\partial^2 n}{\partial \beta^2} \cdot \Delta^2 \beta}, \quad (5)$$

获得计算的不确定度为  $u_1 = 0.0018$ 。

测试仪器的不确定度由样品误差及其对准误差、转台空程误差、光源光强波动以及光强极大值中心位置确定综合产生。测试仪器本身的不确定度可以用  $u_2 = \sigma/3$  来度量。由于环境温湿度变化等偶然因素造成的不确定度在本测试系统可以忽略, 因此系统的综合不确定度为:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}. \quad (6)$$

综合以上数据计算得到不确定度  $u = 0.0029$ 。

## 参考文献:

- [1] 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
YU H ZH. *Infrared Optical Material*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 戴世勋, 林常规, 沈祥, 等. 红外硫系玻璃及其光子器件[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
DAI SH X, LIN CH G, SHEN X, et al.. *Infrared Chalcogenide Glass and Photonic Device*[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [3] DAIMON M, MASUMURA A. High-accuracy measurements of the refractive index and its temperature coefficient of calcium fluoride in a wide wavelength range from 138 to 2326 nm[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25): 5275-5281.
- [4] 李锡善, 孙保定, 孙晶砚, 等. 自动V棱镜折射仪[J]. 仪器仪表学报, 1995, 13(2): 113-120.  
LI X SH, SUN B D, SUN J F, et al.. Automatic vee-block prism refractometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995, 13(2): 113-120. (in Chinese)
- [5] 陈振强, 张戈, 沈鸿元, 等. 绿宝石激光晶体的主折射率及其温度系数的精确测量[J]. 中国激光, 2003, 30(9): 843-846.  
CHEN ZH Q, ZHANG G, SHEN H Y, et al.. Measurement of principal refractive indices and expression of thermal refractive index coefficients of

## 5 结论

本文设计了基于角度位置自动识别的红外折射率测量系统。折射率测量实验表明:该系统具有角度信息  $0.75''$  的分辨精度, 光源可变条件下测量波长为  $2 \sim 12 \mu\text{m}$ , 通过在  $3.39 \mu\text{m}$  He-Ne 以及  $4.8 \mu\text{m}$  量子阱激光条件测试顶角为  $20^\circ$  的  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 、 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 、 $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  样品获得的折射率与参考数据对比, 测试精度达到  $10^{-3}$ 。同时设备还预留灵活的红外光源输入口, 可实现各种波段的折射率测量, 满足一般的测试需求, 为红外材料折射率检测提供了一种有效的测试手段。

- emerald laser crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(9): 843-846. (in Chinese)
- [6] HUANG ZH M, CHU J H. The refractive index dispersion of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  by infrared spectroscopic ellipsometry[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42(2): 77-80.
- [7] 魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 551-554.  
WEI R X, JIANG D SH. Refractive index measurement with Fabry-Perot interference wavelength[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(6): 551-554. (in Chinese)
- [8] BHATTACHARYA J C. Refractive index measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 1987, 19(1): 29-32.
- [9] 孟庆华, 向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2114-2119.  
MENG Q H, XIANG Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2114-2119. (in Chinese)
- [10] KLLEV I K, KUMAGAI H, TOYODA K. A fiber-optic autocollimation refractometric method for dispersion measurement of bulk optical materials using a widely tunable fiber Raman laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(11): 1897-1902.
- [11] TALIM S P. Measurement of the refractive index of a prism by a critical angle method[J]. *Optica*

- Acta: International Journal of Optics*, 1978, 25 (2): 157-165.
- [12] 闫俊岑, 车英, 耿树彬. 基于新数学模型的自动对准式色散系数测量系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2858-2862.
- YAN J C, CHE Y, GENG SH B. Dispersion coefficient measuring system of automatic alignment based on novel mathematical model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2858-2862. (in Chinese)
- [13] SANGHERA J S, SHAW L B, AGGARWAL I D. Chalcogenide glass-fiber-based mid-IR sources and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15 (1): 114-119.
- [14] 孙杰, 聂秋华, 戴世勋, 等. OH-对 Er<sup>3+</sup> 掺杂 Ge-Ga-S-CsI 玻璃中红外荧光特性的影响[J]. *无机材料学报*, 2011, 26(8): 836-840.
- SUN J, NIE Q H, DAI SH X, *et al.*. Effect of OH- content on mid-infrared emission properties in Er<sup>3+</sup>-doped Ge-Ga-S-CsI glasses[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(8): 836-840. (in Chinese)
- [15] 王雷, 王生云, 侯西旗, 等. 红外光学材料参数测试[J]. *应用光学*, 2001, 22(6): 40-42.
- WANG L, WANG SH Y, HOU X Q, *et al.*. Parameter measurement for infrared optical materials [J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, 22(6): 40-42. (in Chinese)
- [16] 崔琳哲, 李书平, 康俊勇. 基于 LabVIEW 的外延片光致发光扫描系统[J]. *光子学报*, 2012, 41 (7): 790-793.
- CUI L ZH, LI SH P, KANG J Y. Mapping of the epitaxial wafer system based on Labview[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41 (7): 790-793. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘永兴(1987—),男,湖北利川人,博士研究生,2010年、2013年于宁波大学分别获得学士、硕士学位,主要从事新型红外光子器件方面的研究。E-mail: liuyongxing@nbu.edu.cn

#### 导师简介:



戴世勋(1974—),男,湖北宜城人,研究员,博士生导师,1996年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1999年、2003年于中科院上海光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事红外硫系玻璃材料、特种玻璃光纤、光谱发光等方面的研究。E-mail: daishixun@nbu.edu.cn