

红外光学材料折射率温度系数测量装置

王 雷, 杨照金, 黎高平, 宗亚康

(国防科工委光学计量一级站, 陕西 西安 710065)

摘要: 本文介绍一台红外光学材料折射率温度系数测量装置。该装置是由温控系统、精密测角系统、光学系统和电器控制系统等组成的一台高精度全自动化测量系统, 采用改进的自准直法测量折射率温度系数值。该装置达到的主要技术指标: 工作波长为 $2\sim 12\ \mu\text{m}$, 温度范围为 $-50\sim 150\ \text{C}$, 测量不确定度为 3% , 可满足各种红外光学材料折射率温度系数测量的要求。利用该装置对红外材料锗折射率温度系数值进行了测量, 并对测量数据进行了报道。

关键词: 红外光学材料; 折射率; 折射率温度系数; 自准直

中图分类号: TH741

文献标识码: A

An Equipment for Measuring the Temperature Coefficient of Refractive Index of Infrared Materials

WANG Lei, YANG Zhao-jin, LI Gao-ping, ZONG Ya-kang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The automatic high-precision system, which is composed of temperature control system, precision goniometer system, optical system and electrical control system for measuring the temperature coefficient of refractive index of infrared materials is introduced in the paper. The temperature coefficient of refractive index is measured with the improved autocollimating method. The key index of the instrument is as follows: its wavelength range is $2\sim 12\ \mu\text{m}$, temperature range is $-50\sim 150\ \text{C}$, uncertainty is 3% . The instrument can meet the measurement requirement of temperature coefficient of refractive index of the different infrared materials. With this instrument, the temperature coefficient of germanium material has been measured and the results has been reported.

Keywords: infrared material; refractive index; temperature coefficient; autocollimation

引言

随着红外热成像、红外制导等技术的发展, 近十年来, 红外光学材料在军事上得到了广泛的应用。光学材料生产厂家都十分重视红外材料的研制和生产, 生产了许多新型的红外光学材料。随着众多新型红外材料的出现和广泛应用, 红外材料性能评价测试的要求愈益迫切。在先前的报道中^[1], 我们介绍了国防科工委光学计量一级站在红外光学材料参数测试方面已具备的能力和条件, 包括折射率测量、均匀性测量、应力双折射测量和光谱透射比的测量。由于红外材料在许多情况下工作在很宽的温度范围, 而红外材料折射率随温度会产生很大

变化, 因此要设计工作于很宽温度范围的红外光学系统, 必须测量材料折射率温度系数。国外在这方面有许多报道^[2~4], 国内仅见物质结构研究所报道的测量晶体温度系数的方法^[5], 而未见到完整的测量装置报道。正因为如此, 我们研制了一台工作波长为 $2\sim 12\ \mu\text{m}$, 温度范围为 $-50\sim 150\ \text{C}$, 适用于各种红外材料的折射率温度系数测量装置。本文对此予以简要介绍。

1 测量原理

折射率温度系数是指材料折射率随温度变化的系数, 即:

作者简介:王雷(1976—),女,陕西榆林人,国防科工委光学计量一级站博士研究生,主要从事光学计量测试研究工作。

$$\beta = \frac{dn}{dT} \quad (1)$$

我们采用的自准直法测量原理如图1所示。

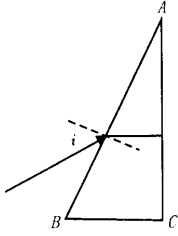


图1 测量原理

Fig. 1 Theory of measurement

被测材料加工成直角棱镜形式,棱镜的后表面镀全反射膜。平行光以角度*i*入射,当此光线经过棱镜折射后垂直于AC面时,光线将按照原路返回,由折射定律可得其折射率*n*:

$$n = \frac{\sin i}{\sin \theta} \quad (2)$$

式中, θ 是加工时就确定了一个常数。

β 的测量按两步进行:第一步,在室温条件下,确定每一个波长下的折射率*n*和棱镜顶角 θ ;第二步,把棱镜移入折射率温度系数测量装置中,测量折射率随温度的变化量 δn 。

通过对(2)式进行微分,可得

$$\delta n = \frac{\delta i (1 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta} \quad (3)$$

式中, δi 是自准直角的改变量。把 δi 看作是温度的函数,用(3)式对温度求导,即得

$$\beta = \frac{\delta n}{\delta T} = \frac{\delta i}{\delta T} = \frac{\delta i (1 - n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta} \quad (4)$$

通过改变温度,可求得 $\beta \sim T$ 曲线;通过改变波长,可得到 $\beta(\lambda, T) \sim T$ 曲线。

2 测量装置

测量装置如图2所示,系统可分为三个大部分。

第一部分,准直光源系统。该系统由红外光源1、单色仪5、平面反射镜6和离轴抛物面镜17组成,是提供可变波长的平行入射光源(其中光源、单色仪和离轴抛物面镜是其核心)。

第二部分,测角仪和温控系统。该系统由一个精密测角仪和一套抽真空温度控制系统组成。温控

系统放在测角仪上,样品放在温控室内。这一部分是整套装置的核心,测温精度和测角精度直接影响测量结果。

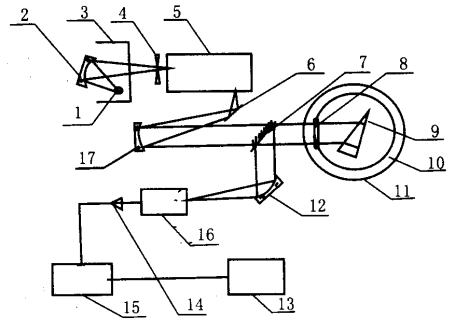


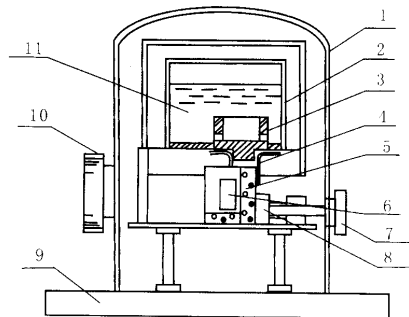
图2 测量系统原理图

Fig. 2 The schematic diagram of test system

第三部分,探测、检测和处理系统。该系统由探测器16、锁相放大器15和计算机13组成,用于检测、控制和数据处理。

被测样品放在温控室内。首先在室温下通过旋转测角仪,确定自准直角,得到初始角位置;随后开始升温或降温,在每一温度下,再次确定自准直角(前后之差即为(4)式中的 δi)。前后温度差即为 δT ,根据已知测量波长下室温折射率值和棱镜顶角,就可得到折射率温度系数 β 。

温控室结构如图3所示。



1. 真空罩; 2. 液氮槽; 3. 冷脂; 4. 导热辫; 5. 样品台; 6. 样

3 不确定度分析

(4)式中, $\beta = \frac{\delta n}{\delta T} = \frac{\delta i}{\delta T} \frac{(1-n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta}$ 。影响 β

测量不确定度的主要因素有:

$$u(\beta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \delta i}\right)^2 u_{\delta i}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \delta T}\right)^2 u_{\delta T}^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial n}\right)^2 u_n^2 + u_{\beta}^2(\text{其它})} \quad (5)$$

式中:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \delta i} = \frac{1}{\delta T} \cdot \frac{(1-n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta} = \frac{1}{\delta i} \beta \quad (6)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \delta T} = \frac{\delta i}{\delta T^2} \cdot \frac{(1-n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta} = \frac{1}{\delta T} \beta \quad (7)$$

根号下第三项是折射率变化引入的分量,第四项是棱镜顶角变化引入的分量,这两项可以忽略。

令 $\frac{(1-n^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{\sin \theta}$ 为常数 A :

$$A = 2.67$$

已知:

$$\delta T = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\beta = 4 \times 10^{-4}$$

由 $10\beta = 2.67\delta i$ 得到:

$$\delta i = \frac{4 \times 10^{-4}}{2.67} = 0.0001498 \text{ (rad)}$$

若以角秒为单位,则

$$\delta i = 0.0001498 \times 57.3248 \times 3600 = 30.9''$$

测角仪的测角误差假设为均匀分布

$$(u_{\Delta i}) = 0.6'' / \sqrt{3} = 0.35$$

温度控制误差为 $0.008 \text{ } ^\circ\text{C}$, 假设为均匀分布

$$(u_{\Delta T}) = 0.08 / \sqrt{3} = 0.04618$$

令:

$$C_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \delta i} = \frac{\beta}{\delta i} = \frac{4 \times 10^{-4}}{30.9} = 1.29 \times 10^{-5}$$

$$C_2 = \frac{\partial \beta}{\partial \delta T} = \frac{\beta}{\delta T} = \frac{4 \times 10^{-4}}{10} = 4 \times 10^{-5}$$

$$u^2(\beta) = C_1^2 u_{\delta i}^2 + C_2^2 u_{\delta T}^2 = (1.29 \times 10^{-5} \times 0.35)^2 + (4 \times 10^{-5} \times 0.046)^2 = 23.64 \times 10^{-12}$$

则 $u(\beta) = 4.86 \times 10^{-6}$

扩展不确定度:

$$u = 2u(\beta) = 9.72 \times 10^{-6}$$

相对扩展不确定度:

$$\frac{U}{\beta} = \frac{9.72 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-4}} = 2.43\%$$

(1) 角度测量引起的误差;

(2) 温度测量引起的误差。

以锗为例,假如 $n=4$, $\theta=12^\circ$, $\beta=4 \times 10^{-4}$, 合成不确定度为

由此可见,测量装置不确定度小于 3%。

4 测量结果

我们选用锗单晶作为测量样品进行测量,样品加工成直角棱镜,棱镜顶角为 12.5° ,后表面镀高反射膜,测量结果见表 1。

表 1 锗单晶折射率温度系数测量结果

Table 1 Measurement result of temperature coefficient of refractive index of germanium material

温度 $^\circ\text{C}$	$\beta (\times 10^{-4})$	
	$4 \mu\text{m}$	$8 \mu\text{m}$
-40	3.16	3.37
-20	3.16	3.37
0	3.28	3.27
20	3.71	3.79
40	3.57	3.59
60	3.63	3.78
80	3.58	3.77
100	3.55	3.73
120	3.55	3.81
140	3.64	3.98

从结果可知,控温精度达到 $0.08 \text{ } ^\circ\text{C}$, 温场均匀性为 $0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$, 测角不确定度为 $1''$, 折射率温度系数测量不确定度为 3%。

参考文献:

- [1] 王雷,王生云,侯西旗,杨照金. 红外光学材料参数测试[J]. 应用光学,2001,22(6):40-43.
- [2] K W Raine, A B Penfold. An instrument for measuring the thermal coefficient of refraction index in the infrared[J]. Phys E Sci Instrum,1985,18:593-595.
- [3] K W Raine, A E L Kibble. Measurement of the thermal coefficient of refractive index of solid materials in the wavelength range 3 to $5 \mu\text{m}$ [R]. NPL: Technique Report,1992.
- [4] R P Edwin, M T Dudermeil, M Lamare. Refractive index measurements of ten germanium samples[J]. Applied Optics,1982,21(5):1344-1347.
- [5] 张德颖,等. 改性KTP晶体主折射率及主折射率温度系数的测量[J]. 光学学报,1999,19(8):1134-1136.