

文章编号:1004-4213(2010)06-1125-4

使用红外干涉仪测量红外材料折射率*

贺俊^{1,2}, 陈磊^{1,†}, 王青¹

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 中国兵器工业集团南京北方信息产业集团, 南京 210022)

摘要:使用自行研制的泰曼型红外干涉仪测量红外材料的折射率. 在干涉仪的测试臂中加一个旋转台, 将被测件放在旋转台上旋转, 在旋转过程中经过被测件的光程发生改变, 导致干涉条纹发生移动, 通过测量条纹的移动数和被测件的旋转角度来计算出被测件的折射率. 测量结果显示, 25 °C 时在 10.6 μm 波段处锗单晶的折射率为 4.003, 硫系玻璃锗砷硒(GeAsSe)的折射率为 2.494. 折射率测量的误差在 10⁻³量级, 增加被测件的厚度会进一步提高折射率的测量准确度, 待测红外材料的折射率越低, 测量准确度越高.

关键词:测量; 折射率; 红外材料; 红外干涉仪; 误差

中图分类号: TN213

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.1125

0 引言

随着红外技术在军事、通讯、遥感等方面的发展, 红外光学材料和零件的测试显得尤其重要. 折射率就是红外光学材料的其中一项重要参量, 目前大多数情况下, 只能通过手册查出它们的数值, 因此有必要对红外材料的折射率进行测量. 测量折射率常用的方法有 V 棱镜法、阿贝折光法和偏向角法. 其中 V 棱镜法和阿贝折光法都需要提供已知折射率的标准 V 棱镜或标准样块, 不适于红外材料的测量. 1982 年, R. P. Edwin 等用最小偏向角法测量了锗(Ge)在 8~14 μm 波段的折射率, 其测量不确定度在 3×10⁻⁴[1]. 西安应用光学研究所 2001 年曾采用了偏向角法研制了一台红外材料折射率测试仪, 测量了 Ge 等红外材料在 3~12 μm 波段的折射率, 测量准确度可以达到 2×10⁻⁴[2]. 这两种方法测量波段宽、准确度高, 但是由于红外光不可见, 且红外探测器的分辨率不是很高, 在测量中对光路的准直和光电瞄准的准确度较难控制, 并且对于不同波长的红外光还需要采用不同的红外探测器, 在一般实验条件下很难达到这样的要求.

本文所采用的方法是在红外干涉仪的测试臂中加一旋转台, 将加工成平板的样品放在旋转台上旋转, 通过旋转过程中光程的改变来计算出样品的折射率. 1988 年, Mr. C. Brady 使用这种方法测量了

10.6 μm 波段处 ZnS 的折射率, 测量准确度在 10⁻²量级[3]. 2004 年, Glen D. Gillen 等使用 Michelson 干涉仪测量了 ZnGeP₂ 在 10.6 μm 波段的折射率, 其不确定度在 10⁻³量级[4]; 他们还在 2005 年, 用 Michelson 和 Fabry-Perot 干涉仪测量了 Ge 等红外材料的厚度和折射率, 其折射率的测量准确度在 10⁻³量级[5].

1 原理

图 1 是泰曼型红外干涉仪光路图, 待测样品 2 放置在测试端一旋转台上, 当样品旋转至某一角度 θ

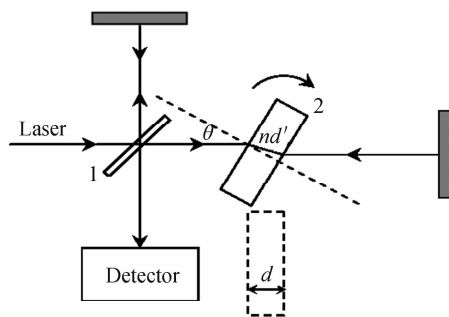


图 1 折射率测量光路图

Fig. 1 The sketch of refractive index test

时, 根据三角函数关系和 Snell 定律有

$$m\lambda = 2d(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - n + 1 - \cos \theta) \quad (1)$$

由式(1)可以求出 n

$$n = \frac{(m\lambda/2d)^2 + (1 - \cos \theta)(2 - m\lambda/d)}{2 - 2\cos \theta - m\lambda/d} \quad (2)$$

式中, d 是被测件的厚度, λ 是 CO₂ 激光的波长; θ 是被测件转过的角度, 通过电动转台, 可以比较精确地知道样品所转过的角度; m 为移动的条纹数. 知道

*教育部博士点基金(20070288010)和兵器预研支撑基金(62301110116)资助

† Tel: 025-84315427

Email: chenleiy@126.com

收稿日期: 2009-07-22

修回日期: 2009-10-21

d, λ, θ, m 后就可以用式(2)计算出样品的折射率.

2 实验

实验装置如图 2. 图中:1 是泰曼型红外干涉仪, 其工作波长是 $10.6 \mu\text{m}$; 2 是标准平面镜; 3 是待测红外材料, 本实验中的待测红外光学材料为 Ge 和 GeAsSe; 4 是电动转台, 北京光学仪器厂生产 (MRS102); 5 是步进电机控制器. 红外干涉仪的具体光路、构造以及光路调整详见文献[6].

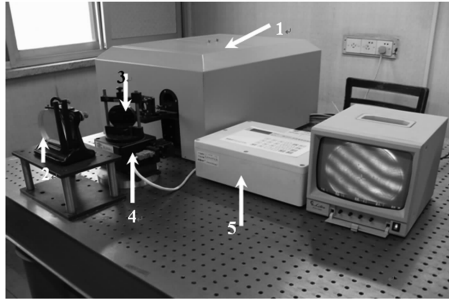


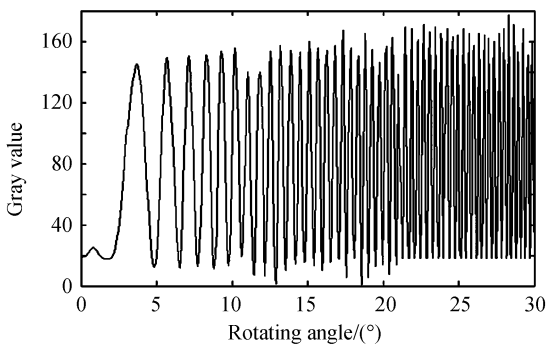
图 2 折射率测量实验装置

Fig. 2 The setup of refractive index test

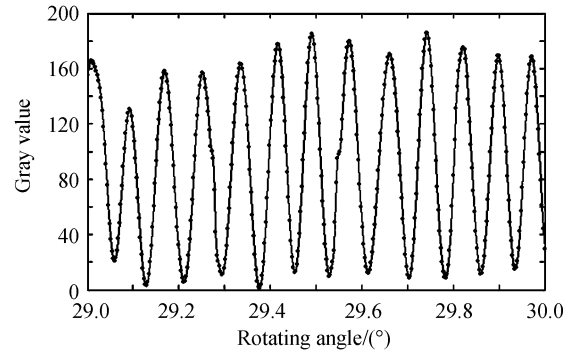
通过立式光学计可以测得试件 Ge 平板和 GeAsSe 平板的厚度 d 分别为 10.048 mm 和 9.967 mm , CO_2 激光器的波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, 步进电机驱动电动转台使待测样品发生旋转, MRS102 电动转台的准确度是 0.003° , 测量时室温 25°C .

调整好干涉仪并在测试臂插入待测 Ge 平板; 调整 Ge 平板位置, 使得经 Ge 平板前表面反射回去的光与经干涉仪的参考镜反射的光发生干涉, 此时可以认为入射光束是垂直入射 Ge 平板表面的, 即 $\theta = 0^\circ$. 通过电动转台将 Ge 平板从 0° 旋转至 30° , 在旋转过程中记录下干涉图中的光强值. 光强随旋转角度变化的曲线如图 3(a), 图 3(b) 为光强曲线的局部放大图, 光强变化的周期数也就是移动的条纹数.

为了精确的确定光强变化的周期数, 利用三次样条函数对光强曲线进行插值. 由图 3(a) 可以看出, 随着旋转角度的增大, 旋转单位角度所移动的条纹就越多, 光强变化曲线中每个周期的采样点也就越少, 由图 3(b) 可以看出, 旋转角度在 $29^\circ \sim 30^\circ$ 时,



(a) Recorded interferogram for a Ge sample



(b) A close-up of the recorded points for large

图 3 干涉图的光强变化曲线

Fig. 3 The intensity curve of interferogram

每个周期的采样点为 28 个. 经过三次样条插值后, 每个周期的采样点至少可以增加到 140 个. 根据光强曲线图分别计算出第一次出现光强极大值所对应的角度 θ_1 和最后一次出现光强极大值所对应的角度 θ_2 , 待测样品从 θ_1 旋转至 θ_2 移动的条纹数可以通过计数程序得到. 根据式(1)、式(2), 可得到此时折射率的计算公式

$$n = \left\{ \left[\left(\frac{m\lambda}{2d} + \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \right)^2 + \left(\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2 \right) \right]^2 - 4 \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 \right\}^{1/2} / \left[2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) - m\lambda/d \right] \quad (3)$$

使用同样的方法可以测量 GeAsSe 的折射率, Ge 和 GeAsSe 折射率测量的实验数据如表 1.

表 1 Ge 和 GeAsSe 实验折射率

Table 1 Refractive index of the test piece

	d / mm	θ_1	θ_2	m	n
Ge	10.048	1.845°	29.935°	193	4.003 ± 0.002
GeAsSe	9.967	2.007°	29.902°	155	2.494 ± 0.001

根据文献[7]报道 Ge 在 25°C 时 $10.6 \mu\text{m}$ 波段处的折射率为 4.0048 , GeAsSe 在 25°C 时 $10 \mu\text{m}$ 波段处的折射率为 2.4976 .

3 误差分析

3.1 理论误差

在只考虑理论误差的情况下, 根据误差传递公式有

$$u(n) = \left\{ \left[\frac{\partial n}{\partial \theta} u(\theta) \right]^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial d} u(d) \right]^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial m} u(m) \right]^2 + \left[\frac{\partial n}{\partial \lambda} u(\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

再由折射率计算公式(2), 有

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = -\frac{A(2-A)\sin \theta}{2(1-\cos \theta-A)^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial n}{\partial d} = -\frac{m\lambda}{2d^2} \frac{2(1-\cos \theta)\cos \theta + 2(1-\cos \theta)A - A^2}{2(1-\cos \theta-A)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = \frac{m}{2d} \frac{2(1-\cos \theta)\cos \theta + 2(1-\cos \theta)A - A^2}{2(1-\cos \theta-A)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial m} = \frac{\lambda}{2d} \frac{2(1-\cos\theta)\cos\theta + 2(1-\cos\theta)A - A^2}{2(1-\cos\theta - A)^2} \quad (8)$$

式中 $A = m\lambda/(2d)$.

1) 在 Ge 的折射率测量中, 旋转角度 $\theta = 29.9358^\circ$, 经过三次样条插值后角度的测量准确度可以达到 $u(\theta) = 6 \times 10^{-4}$, 化成弧度为 $u(\theta) = 1.05 \times 10^{-5}$, 那么由于角度测量的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial\theta)u(\theta) = 5.20 \times 10^{-4}$; Ge 平板的厚度通过立式光学计测得 $d = 10.048$ mm, 其准确度 $u(d) = 10^{-3}$ mm, 那么由于厚度测量的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial d)u(d) = -1.30 \times 10^{-3}$; CO₂ 激光器的波长 $\lambda = 10.6$ μm , 根据激光器制作单位所提供的数据, 波长的不确定度为 $u(\lambda) = 10^{-6}$ μm , 那么由于波长的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial\lambda)u(\lambda) = 1.23 \times 10^{-6}$; 条纹移动数 m 可以直接从图 3 中读取出来, 经过三次样条插值后 m 的判读准确度可以达到 $u(m) = 0.01$, 那么由于 m 判读的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial m)u(m) = 6.69 \times 10^{-4}$. 再根据误差传递公式(4)求出折射率 n 的理论误差为 $u(n) = 1.57 \times 10^{-3}$, 相对误差 $u(n)/n = 3.92 \times 10^{-4}$.

2) 在 GeAsSe 的折射率测量中, 旋转角度 $\theta = 29.9028^\circ$, 由于角度测量的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial\theta)u(\theta) = 1.64 \times 10^{-4}$; GeAsSe 平板的厚度通过立式光学计测得 $d = 9.967$ mm, 由于厚度测量的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial d)u(d) = -4.20 \times 10^{-4}$; 由于波长的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial\lambda)u(\lambda) = 3.79 \times 10^{-7}$; 条纹移动数 m 判读的不确定度引起的测量误差为 $(\partial n/\partial m)u(m) = 2.59 \times 10^{-4}$. 再根据误差传递公式(4)求出折射率 n 的理论误差为 $u(n) = 5.07 \times 10^{-4}$, 相对误差 $u(n)/n = 2.03 \times 10^{-4}$.

根据分析可以看出, 待测样品厚度测量的不确定度对折射率测量误差的贡献最大. 如果将待测样品的厚度增加到 20 mm, Ge 和 GeAsSe 折射率测量的准确度提高到 8.98×10^{-4} 和 2.90×10^{-4} , 可见增加样品的厚度可以提高折射率测量的准确度. 在 Ge 和 GeAsSe 的折射率测量中, GeAsSe 的测量准确度明显要比 Ge 的测量准确度高, 可见样品折射率减小, 折射率测量的准确度会相应增加.

3.2 被测件平行度的影响

在绝大多数情况下, 平板的前后表面都会有一定的楔角, 样品的不平行会给测量结果带来影响.

3.2.1 旋转轴与样品棱脊平行时

如图 4 所示为样品旋转轴与棱脊平行时光束通过楔形样品后光路的偏转. 图中楔形板的楔角为 α , θ 表示楔形板转过的角度, θ' 表示在第一个面的折射

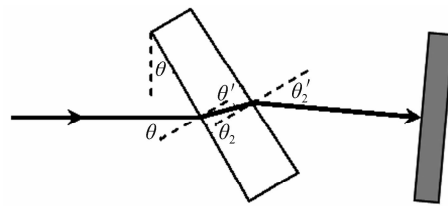


图 4 楔形样品光路

Fig. 4 Ray path for a wedge-shaped sample

角, 而 θ_2 和 θ_2' 则分别表示光束在第二个面的入射角和折射角. 由三角函数关系和 Snell 定律可以得到

$$\delta_{\parallel} = n\alpha \left[\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n\cos\theta} - 1 \right] \quad (9)$$

这里 δ_{\parallel} 表示光束经过样品后的角度偏转, α 表示样品的楔角. 光束两次通过样品引起的角度偏差为 $2\delta_{\parallel}$.

3.2.2 旋转轴与样品棱脊垂直时

当旋转轴与样品棱脊垂直时, 光束通过样品后的偏转角度为

$$\delta_{\perp} = \alpha (\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - n + 1 - \cos\theta) \quad (10)$$

光束两次通过样品引起的角度偏差为 $2\delta_{\perp}$.

实验中 Ge 平板的楔角是 $58.8''$, 如果平板旋转的角度取 30° , 折射率 n 取 4.003, 那么由式(9)和式(10)可求出光束通过样品后引起的角度偏差分别为 $\delta_{\parallel} = 3.70 \times 10^{-5}$ 和 $\delta_{\perp} = 3.93 \times 10^{-6}$. 实际测量中, 由于样品不平行引起的角度偏差介于这两者之间. 而角度 θ 的测量准确度仅为 6×10^{-4} , 可见此时样品的楔角对测量结果影响很小.

3.3 样品调整带来的影响

式(1)表示在理想情况下, 光束两次通过样品时完全重合. 实际上由于调整等因素的影响, 往往使两次通过样品的光束不重合, 此时如果用 θ 表示光束在样品上的入射角, θ' 表示经反射镜反射后再入射至样品上的入射角, 那么 θ 和 θ' 由式(11)和(12)给出^[8]

$$\cos\theta = \cos W [\cos(\theta') + \tan P \tan W] / (1 + \tan^2 P)^{1/2} \quad (11)$$

$$\cos\theta' = \cos W [\cos(\theta - 2E) - \cos 2E \tan(P - 2U) \tan W] / [1 + \tan^2(P - 2U) \cos^2 2E]^{1/2} \quad (12)$$

式中, θ' 为 θ 在水平面的投影(即旋转角度的测量值), W 为样品的法线与水平面的夹角, P 是入射光与水平面的夹角, E, U 分别表示光束在平面反射镜上的入射角分别在水平面和垂直面上的投影.

通过调整干涉仪, 可以将 W, P, E, U 的值控制在 $15'$ 以内, 此时用旋转角度的测量值 θ' 代替 θ 和 θ' , 带来的角度误差为 $0.5''$, 由此引起折射率的测量误差为 4.10×10^{-5} .

4 结论

采用了自研制的红外干涉仪测量了红外材料 Ge 和 GeAsSe 的折射率. 在 25 °C 时在 10.6 μm 波段处 Ge 的折射率为 4.003±0.002, GeAsSe 的折射率为 2.494±0.001, 测量的相对误差在 10⁻⁴ 量级. 虽然此方法的测量准确度比最小偏向角或任意偏向角法的准确度要低, 但是它是在一台通用的干涉仪上所测量的结果. 折射率低的样品测量的准确度会相应提高, 而且如果增加待测样品的厚度还可以进一步提高折射率的测量准确度. 本工作解决了红外材料折射率测量的难题, 适用于在 10.6 μm 波段处透光的红外材料折射率的检测.

参考文献

- [1] EDWIN R P, DUDERMEL M T, LAMARE M. Refractive index measurements of ten germanium samples[J]. *Appl Opt*, 1982, **21**(5):878-881.
- [2] ZHENG Ke-zhe, WANG Jiang-gang, ZHU Ming-gui, et al. An instrument of measuring IR refractive index[J]. *Journal of Applied Optics*, 2001, **22**(2):24-27.

- 郑克哲, 汪建刚, 朱铭佳, 等. 红外光学材料折射率测试仪[J]. *应用光学*, 2001, **22**(2):24-27.
- [3] Mr BRADY C. Optical testing of infrared materials and component[C]. *SPIE*, 1988, **916**:112-119.
- [4] GILLEN G D, GUHA S. Refractive-index measurements of zinc germanium diphosphide at 300 and 77K by use of a modified Michelson interferometer [J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(10):2054-2058.
- [5] GILLEN G D, GUHA S. Use of Michelson and Fabry-Perot interferometry for independent determination of the refractive index and physical thickness of wafers[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(3):344-347.
- [6] HE Jun, WANG Qin, CHEN Lei. Alignment of Twyman-Green infrared phase-shifting interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3):516-520.
- 贺俊, 王青, 陈磊. 移相式泰曼-格林红外干涉仪调试技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3):516-520.
- [7] YU Huai-zhi. Infrared optics materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:55, 108.
- 余怀之. 红外光学材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007:55, 108.
- [8] ALEXANDROV S A, CHERNYH I V. Interference method for determination of the refractive index and thickness[J]. *Opt Eng*, 2000, **39**(9):2480-2486.

Measurements of Infrared Materials Refractive-index Using Infrared Interferometer

HE Jun^{1,2}, CHEN Lei¹, WANG Qing¹

(1 School of Electronic Engineering & Photo-electric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

(2 Nanjing North Information Industrialization Group Corporation, Nanjing 210022, China)

Abstract: The refractive index of infrared material is measured using the infrared Twyman-Green interferometer. By adding a rotation stage in the test arm, the OPD of the test piece placed on the stage is changed with the rotation and the interference fringe is shifted. The refractive index of the test piece can be calculated by the recorded values of rotating angle and shifting fringe. The result shows that the refractive index of germanium crystal is 4.003 and the refractive index of GeAsSe is 2.494 when the temperature is 25 °C and the wavelength is 10.6 μm. The measurement error of the method is 10⁻³, which indicates that the precision can be improved if the test piece is thicker or its refractive index is lower.

Key words: Measurement; Refractive index; Infrared materials; Infrared interferometer; Error



HE Jun was born in 1978. He is a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on optical metrology and measurement.