

文章编号: 0258-7025(2005)03-0404-03

使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性

陈 磊, 王 青, 朱日宏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 介绍了运用工作波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的红外干涉仪测试红外光学材料(锗晶体)的折射率均匀性的方法。运用传统的干涉法检验光学材料的折射率均匀性时,由于锗晶体太软,表面不易加工,其表面面形难以满足测试要求。为了消除面形偏差对折射率均匀性偏差测试的影响,使用可见光移相式数字平面干涉仪精确测试被测样品的面形偏差,该干涉仪具有很高的测试精度,其测量不确定度可以达到 $\lambda/50$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$)。然后在红外干涉图数据处理中将样品的面形偏差扣除,得到样品折射率的偏差分布。对锗单晶材料进行了实际测试。

关键词 测量与计量;红外材料;折射率;均匀性;干涉仪

中图分类号 TN 213; TN 247 **文献标识码** A

Measurement of the Homogeneity of Refractive Index of the Germanium Crystal Using IR Interferometer

CHEN Lei, WANG Qing, ZHU Ri-hong

(School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The method is presented to measure the homogeneity of the refractive index of infrared optical material, germanium crystal, using infrared interferometer with $10.6 \mu\text{m}$ wavelength laser as light source. Using traditional interferometric method, as the germanium material is too soft to process, the surface form of the test piece may not meet the requirement for the measurement. The digital phase-shifting interferometer with visible light source is an accurate instrument of which uncertainty is within $\lambda/50$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$). The surface distributions of test piece are accurately obtained using the phase-shifting interferometer with visual light source and surface errors are subtracted during the data processing to reduce the affection from the surface form deviation during the interference test. A piece of germanium crystal is tested and the deviation distribution of the refractive index is presented.

Key words measurement and metrology; infrared material; refractive index; homogeneity; interferometer

1 引 言

近年来,红外热成像技术的发展,对红外光学成像系统的质量提出了更高的要求。能否对红外材料的折射率均匀性进行精确测量,是影响红外光学系统成像质量的一个重要因素。

在红外波段,尤其在中远红外,由于红外材料不能透过可见光,所以对其折射率均匀性的测量较可见光波段困难一些。如对于大量使用的锗材料,国内许多研制与使用单位,仅通过测量锗材料的电导

率来判断其光学均匀性。Gaskin 等^[1]采用透射干涉条纹或反射干涉条纹,测试了锗材料在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长上的折射率均匀性。但其仅讨论了样品的楔角对折射率变化所造成的影响,而未考虑样品表面面形偏差的影响。Synborski 等^[2]考虑了样品面形偏差对测试结果的影响,但他仅给出了样品折射率均匀性偏差的总体指标,并未给出样品局部折射率偏差值。Dichler 等^[3]在小口径泰曼型 CO_2 激光干涉仪上,采用空间扫描的测试方法,该方法对样品表面的平整度有很高的要求。

收稿日期:2003-10-05; 收到修改稿日期:2004-03-29

作者简介:陈 磊(1964—),男,回族,南京理工大学电子工程与光电技术学院教授,博士生导师,主要研究方向为光学计量测试、光学智能仪器。E-mail:chenlei@mail.njust.edu.cn

本文运用了一种在 $10.6\mu\text{m}$ 波长上测量锺材料的方法。在红外平面干涉仪中获得样品前后两个表面反射波前相干的干涉图,并由干涉图计算得到其所反映的波差;再使用移相式数字平面干涉仪^[4](工作波长 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$)精确测试样品的面形偏差,并在结果中将其去除,最终给出样品折射率变化分布。

2 测试原理

干涉法测量折射率均匀性是通过测试光波透过被测样品后所产生的波前变化来进行的,原理图如图 1 所示。由于样品厚度的偏差会改变入射波前的光程,所以高精度测试必须考虑样品厚度变化对测试结果的影响。样品的厚度可用下式表示

$$t(x, y) = t_0 + p(x, y) + q(x, y), \quad (1)$$

其中 t_0 为被测样品厚度名义值, $p(x, y)$ 与 $q(x, y)$ 分别表示样品前后两表面的面形偏差。

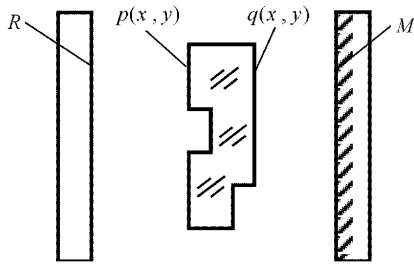


图 1 干涉法测量折射率均匀性原理图

R:参考平面;M:平面镜

Fig. 1 Layout of refractive index measurement using interferometer

R: reference flat; M: flat mirror; $p(x, y)$: front surface distribution; $q(x, y)$: rear surface distribution

一般折射率的偏差远小于折射率的名义值 n_0 , 故折射率函数可表示为

$$n(x, y) = n_0 + \Delta n(x, y), \quad (2)$$

使样品从前后两表面反射的波前产生干涉。因为 Δn 与 p, q 的量值很小, Δn 与 p, q 的乘积可以忽略, 则前后两反射波前 w_1, w_2 可表示为

$$w_1 = w - 2p, \quad (3)$$

$$w_2 = w - 2(n_0 - 1)p + 2n_0q + 2t_0\Delta n, \quad (4)$$

式中 w 为干涉仪准直光路的出射波前。两波前相干,其波像差可写为

$$w_2 - w_1 = 2n_0(p + q) + 2t_0\Delta n. \quad (5)$$

波像差 $w_2 - w_1$ 可由干涉图计算得到,并通过

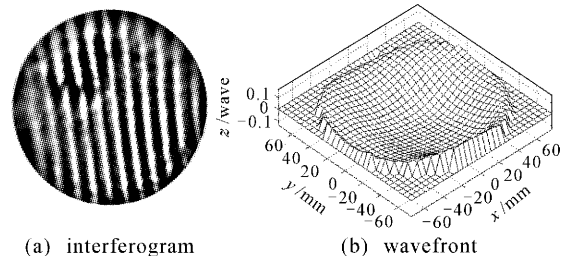
最小二乘法用 Zernike 拟合为数学波前。此外,面形偏差 p 与 q 可使用工作波长为 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ 的移相式数字平面干涉仪精确测定,并将其从式(5)中扣除。于是有

$$\Delta n = \frac{1}{2t_0}[(w_2 - w_1) - 2n_0(p + q)]. \quad (6)$$

3 实验与结果

实验所使用的仪器是我们自行研制的移相式红外斐索型干涉仪^[5]。光源采用 CO_2 激光器,工作波长为 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ 。探测器采用热释电摄像机。

由于所采用的干涉图由被测样品前后两表面的反射波前相干形成,所以实验中将红外干涉仪的标准参考平板移出,并将被测样品置于标准参考平板位置。被测样品为光学锺单晶平板,口径为 $\phi 155\text{mm}$,厚为 15mm 。实验所得干涉图如图 2(a)所示。用自行开发的分析软件可计算出对干涉图所表示的波像差^[4,6,7],其三维分布如图 2(b)所示。



(a) interferogram

(b) wavefront

图 2 被测样品前后表面反射波前干涉图及波像差

Fig. 2 Interferogram and wave aberration of the test piece

移相干涉术自 20 世纪 70 年代提出以来,至今已发展成为高精度光学干涉测试的最重要的一种方法。“移相式数字平面干涉仪”^[4,6,7]测量光学平面平整度的不确定度可达 $\lambda/50$ ($\lambda = 0.633\mu\text{m}$)。同样用自行研制的移相式数字平面干涉仪测试被测锺晶体的表面面形。仪器采用斐索平面干涉仪的型式,测试孔径达到 $\phi 250\text{mm}$ 。仪器的标准参考平面采用液面校正,测量不确定度达到 $\lambda/50$ ($\lambda = 0.633\mu\text{m}$)。前、后表面的面形分布如图 3(a), (b)所示。

由式(6),将样品的面形偏差从红外反射干涉图所表示的波像差中扣除,即可得到样品的折射率分布,如图 4 所示。折射率偏差的峰谷值为 $\Delta n_{\text{pv}} = 3.92 \times 10^{-5}$,均方根值为 $\Delta n_{\text{rms}} = 0.77 \times 10^{-5}$ 。

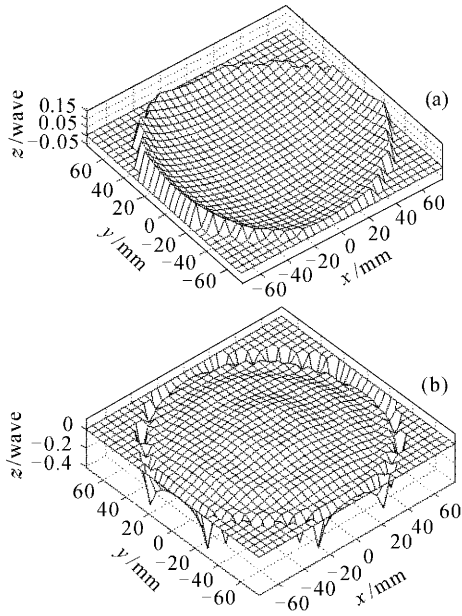


图3 样品前(a)后(b)表面面形分布
Fig. 3 Front (a) and rear (b) surface profiler distribution

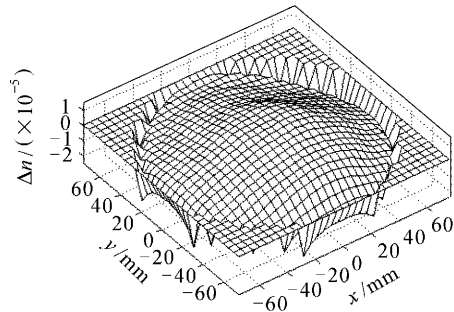


图4 样品折射率均匀性分布
Fig. 4 Homogeneity distribution of the test piece

红外光学材料(如锗、硒化锌、氟化钡、硫系玻璃等)的硬度一般较低,强度较差,在加工过程中容易出现划痕与崩边等现象,其面形难以加工到普通光学玻璃所能达到的精度。因此被测样品的面形偏差会给测试精度带来一定的影响。如果采用传统测试方法,为使被测样品偏差所引起的光学均匀性误差不大于 1×10^{-5} ,根据式(6),有

$$\frac{n_0(p+1)}{t_0} < 10^{-5}. \quad (7)$$

被测样品的折射率名义值 $n_0 = 4.004$,名义厚度值 $t_0 = 15\text{mm}$ 。由式(7),面形偏差 p 或 q 应不大于 $0.018 \mu\text{m}$,光圈数相当于 $\lambda/15$ ($\lambda = 0.55 \mu\text{m}$)。这种面形加工要求对红外材料来说是极难达到的。

但是使用移相式数字平面干涉仪精确测定样品面形偏差,其测试不确定度 (δ_p, δ_q) 引起的折射率

均匀性测量最大误差为

$$\delta(\Delta n) = \frac{n_0(\delta_p + \delta_q)}{t_0}. \quad (8)$$

分别取 δ_p, δ_q 为 $\lambda/50$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$),则 $\delta(\Delta n) = 0.68 \times 10^{-5}$ 。

由于光学锗材料软,不易加工,本文所测试的锗晶体前后表面的面形偏差仅达到 $\lambda/4$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$),如果不消除面形偏差的影响,则样品前后表面的面形偏差最大可以达到 $\lambda/2$ ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$),根据式(8),由于面形偏差所引起的折射率不均匀性的最大测量误差将达到 8.45×10^{-5} 。由此可见,将试件表面面形误差因素扣除,将明显提高测试精度。

4 结 论

运用红外干涉技术测量锗材料的光学折射率均匀性。由于被测样品表面的面形偏差对测试结果会造成很大影响,所以使用移相式数字平面干涉仪精确测定面形偏差并将其扣除,保证了折射率均匀性偏差的测试不确定度达到 10^{-5} 量级。同时,由于可精确测定面形偏差,这样就可使样品面形的加工要求大大降低。

参 考 文 献

- 1 R. E. Gaskin, C. Lewis. Interferometric measurements of refractive index variations in infrared transmitting material at $10.6 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Acta*, 1980, **27**(9):1287~1294
- 2 Charles E. Synborski, Mary J. Hanes. $10.6 \mu\text{m}$ wavelength interferometry and the measurement of infrared transmitting materials index of refraction homogeneity [C]. *SPIE*, 1980, **255**:32~39
- 3 B. Dichler, P. Koidl. Scanning CO_2 laser interferometer for the inspection of infrared transmitting plane parallel plate [C]. *SPIE*, 1988, **966**:177~182
- 4 Chen Jinbang, Song Dezhen, Zhu Rihong *et al.*. Large aperture-high accuracy phase shifting digital flat interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(7):1936~1942
- 5 Chen Jinbang, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. A large aperture phase-shifting CO_2 laser interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1):31~36
陈进榜,陈磊,王青等. 大口径移相式 CO_2 激光干涉仪[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1):31~36
- 6 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing *et al.*. A new algorithm for phase shifting interferometry: four step overlapping averaging method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(12):1288~1293
朱日宏,陈进榜,王青等. 移相干涉术的一种新算法:重叠四步平均法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(12):1288~1293
- 7 Chen Jinbang, Song Dezhen, Zhu Rihong *et al.*. Large aperture high accuracy wave aberration standard: phase shifting digital flat interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4):480~485
陈进榜,宋德真,朱日宏等. 高精度、大口径平面波象差标准——移相式数字平面干涉仪[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4):480~485