

文章编号: 1001-3806(2008)05-0521-02

双折射晶体厚度干涉测量技术的研究

唐朝伟¹, 邵艳清¹, 何国田^{1,2}, 张 鹏¹, 张旭洋³, 赵丽娟¹, 傅明怡¹

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030 2 重庆师范大学 物理与信息学院, 重庆 400030 3 西南大学 物理学院, 重庆 400715)

摘要: 为了能精确测量出晶体厚度, 利用晶体的双折射特性, 采用剪切干涉法来测量双折射晶体的厚度, 从理论上推导出其实现的可行性, 并结合实验验证了测量系统的具体实现过程及计算厚度的算法。结果表明, 该方法可用于测量厚度为厘米量级的双折射晶体的厚度, 测量的均方根误差小于 20nm。

关键词: 测量与计量; 晶体厚度测量; 双折射特性; 干涉技术

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

Novel interferometry measurement technique for birefringence crystal thickness

TANG Chaowei¹, SHAO Yanqing¹, HE Guotian^{1,2}, ZHANG Peng¹, ZHANG Xuyang³, ZHAO Lijuan¹, FUMingyi¹

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China 2 College of Physics & Information, Chongqing Normal University, Chongqing 400030, China 3 College of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract In order to measure the crystal thickness accurately, a measurement method based on the birefringence characteristics of crystal was proposed and the feasibility was analyzed. Furthermore the realization process of measuring system and arithmetic of calculating thickness was validated by experiments. The experiment result shows that the root mean square of measuring error was less than 20nm.

Key words measurement and metrology; measurement of crystal thickness; birefringence characteristics; interferometry

引 言

晶体在光学领域已得到广泛的应用^[1-7],但在实际应用中需要确定晶体光轴方向厚度,这就需要精确测量出晶体的厚度。其常用的方法有机械方法、电学法、光学法。机械方法有螺旋测微仪法、探针法等^[8],这类方法简单直观,是一种接触式的厚度测量方法,但因接触对其光学表面易造成不必要的损伤,而影响器件的正常使用。利用晶体振荡测量晶体厚度的电学方法^[9],对晶体的起振性能要求高,不适用于起振性能较差的晶体,必须通过与已知高起振性能的晶体进行比较才能确定其厚度,其测量过程复杂且容易产生转移误差。光学测量方法是一种非接触式的测量方法,有光谱法、旋光特性法等^[10-11]。光谱法是一种典型的光学方法,通过对待测晶体构成的光学系统输出光谱进行分析匹配,经过数次迭代后计算出晶体的实际厚度,其算法复杂,测量时间相对较长。旋光特性法利用石英器件的旋光特性测量出石英晶体光轴方向厚度,这种方法简便易行,是一

种具有实用价值的测量方法,但测量精度低。

为克服以上的缺点且可高精度测量晶体厚度,作者提出一种基于双折射晶体的晶体厚度测量方法——双折射法。该方法是一种典型的干涉测量方法,通过对待测晶体构成的光学系统输出的双折射光束的干涉信号进行分析得到其厚度,不仅测量方法简单,且测量精度也较传统的测量方法高,有较高的实用价值。

1 干涉测量原理

双折射晶体厚度干涉测量仪的原理图如图 1 所示。He-Ne 激光器出射的光经空间滤波器、准直透镜、分束器 (polarization beam splitter PBS)、 L_1 、 $\lambda/4$ 波片 Q_1 入射到被测量晶体,再入射到石英双折射晶体 (剪切发生器 shearing generator SG),由 SG 分为两束平行

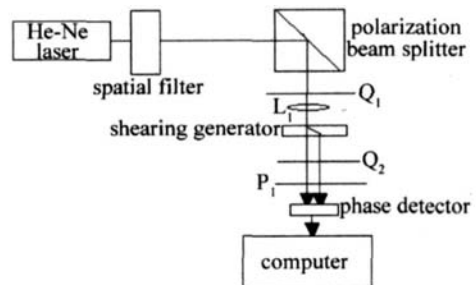


Fig 1 The principle diagram of the crystal thickness interferometer

作者简介: 唐朝伟 (1966-), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为测控技术、信号与信息处理。

E-mail: willianc@163.com

收稿日期: 2007-07-16 收到修改稿日期: 2007-10-25

光,此二束光通过 $\lambda/4$ 波片 Q_2 和偏振片 P_1 , 在重叠区发生偏振剪切干涉。相位检测器 (phase detector PD) 将干涉信号转换成电信号, 通过图像采集卡送入计算机获得被晶体的厚度。

图 2 为光照射石英双折射晶体时的分光示意图。

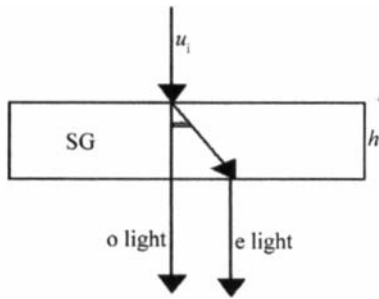


Fig 2 The prismatic sketch map of the quartz birefringence crystal (SG)

设激光照射到待测量晶体 SG 的光波为:

$$u_i = 2A \cos \omega t \quad (1)$$

式中, $2A$ 为入射光的振幅, ω 为光波角频率, t 为时间变量。

光波 u_i 通过 SG 后, 分为 o 光与 e 光, 则 o 光为^[11]:

$$u_o = A_o \cos \left[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda_0} n_o h \right] \quad (2)$$

式中, n_o 为 o 光的双折射晶体主折射率, λ_0 为光波波长。

$$\text{e 光为: } u_e = A_e \cos \left[\omega t + \frac{2\pi}{\lambda_0} n_e h \right] \quad (3)$$

式中, n_e 为 e 光的双折射晶体主折射率, 且:

$$A_o = A_e = 2A / 2 = A \quad (4)$$

o 光与 e 光产生的干涉信号为:

$$I = u_i^2 = (u_o + u_e)^2 = 2A^2 + 2A^2 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (n_e - n_o) h \right] \quad (5)$$

设光经过待测双折射晶体引入的相位差为:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_e - n_o) h \quad (6)$$

由上式可得到待测量双折射晶体的厚度 h 。

由 (6) 式可知, 相位 α 的主值区间在 $[0, 2\pi]$, 其测量精度达纳米量级, 但测量范围为毫米量级, 实际应用中要求测量范围达到厘米量级。为了扩大测量范围, 将测量分成粗测与精确测量两步。所谓粗测是指已知双折射晶体的大约高度或用精度较低的方法测得的双折射晶体厚度, 此厚度用 h_c 来表示, 则有:

$$N = \text{int}(h_c / \lambda_0) \quad (7)$$

式中, N 为整数。

所谓精确测量是指用本文中的方法测量出待测量双折射晶体厚度小于一个波长的部分。

则待测双折射晶体的厚度可表示为:

$$h = N \lambda_0 + \varepsilon \lambda_0 \quad (8)$$

式中, ε 为小数。由 (8) 式可知, 只要测出 N 和 ε 则可高精度大范围测量出待测量双折射晶体的厚度 h 。

2 实 验

为了验证上述理论, 以双折射石英晶体为例进行了测量。从上面的推导过程可以看出, $(n_e - n_o)$ 是一个非常重要的参量, 在通常情况下随波长 λ_0 而变化。故可表示为:

$$n_e - n_o = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 \quad (9)$$

式中, a, b, c 分别为常数。利用任意 3 个波长的双折射率就可以确定出系数 a, b, c 。为了避免偶然误差, 采用曲线拟合的方法求解出系数分别为 0.0085878, 0.00020002, 0.00000898。

双折射晶体厚度测量系统如图 1 所示, 波长为 632.8nm 的氦氖激光为光源。对 6 只不同厚度的双折射石英晶体进行了测量, 其测量结果如表 1 所示。

Table 1 Measurement results of the thickness of the birefringence quartz crystal

quartz crystal	thickness of crystal/mm	root mean square/nm
1	15.3267	18.1
2	20.8712	20.3
3	15.3698	17.6
4	9.3645	10.2
5	13.2659	12.3
6	4.6568	8.2

从表 1 可知, 测量范围达到厘米量级, 其均方根误差小于 20nm。此外, 晶体厚度测量误差与光源波动和被测晶体通光面的法线必须同一个晶轴是否重合等因素有关。在此只讨论后者, 设样品面法线与 O 轴的偏差为 β , 则偏差引入的折射率误差为:

$$\Delta n_o = n_o - n_o \cos \beta \quad (10)$$

取 $\beta = 1^\circ$, $n_o = 1.544$, $n_e = 1.553$, 折射率误差为 7.15×10^{-10} , 则引入待测相位的相对误差为 $7.95 \times 10^{-4}\%$ 。因此, 经过上述的测量计算和分析可得: 利用石英晶体的双折射特性进行双折射晶体厚度的光学测量, 不仅不会损伤双折射石英晶体的光学表面, 而且具有较高的测量精度。

3 结 论

利用晶体的双折射特性和剪切干涉法, 实现了双折射晶体厚度高精度测量。不仅不会损伤石英晶体的光学表面, 且具有较高的测量精度和可靠性。这是一种简便可行且很有实用价值的精确测量双折射晶体厚度

(下转第 530 页)

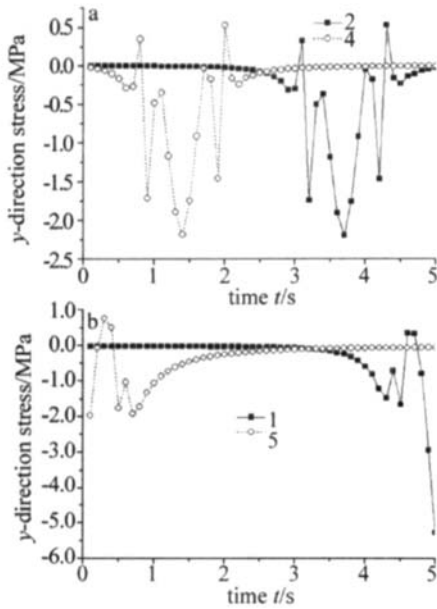


Fig 8 The y -direction stress curve of different points on film surface symmetry at different times

的拉应力与同等强度激光相比,其分布趋势大致相同,但应力值相差较大,等强度激光的拉应力较大,高斯激光在光斑中心有较大的压应力^[10]。

4 结 论

(1)经激光加载后,得到了高斯移动激光加载下的温度场分布。温度场随激光光源的移动而移动,温度场中温度最大点在激光光斑中心处,且激光光源移动方向后方的温度场有较大的迟滞现象。

(2)在膜基系统中产生的应力场主要集中在薄膜

内部,在薄膜表面和轴线上都是逐渐递减的,膜基界面结合处产生的应力较大会导致薄膜的脱粘。

参 考 文 献

- [1] KEDA R, CHO H, SAWABE A. Laser spallation method to measure strength against mode I decohesion of CVD diamond films [J]. *Diamond & Related Materials*, 2005, 14(3): 631-636.
- [2] MITAL K L. Adhesion measurement of films and coatings [C] // *The First International Symposium on Adhesion Measurement of Films and Coatings* Netherlands USA: VSP, 1995: 1-435.
- [3] MITAL K L. Adhesion measurement of films & coatings [C] // *The Second International Symposium on Adhesion Measurement of Films and Coatings* Boston: VSP, 2001: 1-351.
- [4] FENG A X, ZHANG Y K, XIE H K. A study on the new method of laser scratch testing technique to characterize interfacial adhesion between thin film and substrate [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 259/260: 615-619.
- [5] FENG A X, ZHANG Y K, XIE H K. A study on the failure procedure of the film-substrate interface based on the laser scratch testing technique [J]. *Materials Science Forum*, 2004, 471/472: 746-749.
- [6] TANG C P, FENG A X, ZHANG Y K, *et al.* Study on the temperature and stress field of film-substrate system irradiation by gauss laser [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(6): 361-364 (in Chinese).
- [7] LI D J. The numerical simulation of welding stress and distortion [D]. Wuhan: Wuhan Science and Technology University, 2003: 3 (in Chinese).
- [8] KANG J, LIU S H, WAN P T, *et al.* 3-D numerical study on laser bending of sheet metal [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(2): 97-99 (in Chinese).
- [9] ZHANG J Q, LUO Q, LIU F, *et al.* The distribution of the thermal stress in the cylinder produced by the laser radiation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1999, 16(4): 123-129 (in Chinese).
- [10] LIM H, LU A G, SONG Y Z. A numerical simulation for temperature and thermal stress distribution in Nd:YAG amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 86-88 (in Chinese).
- [1] LEIX Y, LI H, DING F, *et al.* Novel application of a perturbed photonic crystal high quality filter [J]. *A P L*, 1997, 71(20): 2889-2891.
- [2] FORESI J S, VILLENCOUV P R, FERRERA J. Photonic-band gap microcavities in optical waveguides [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 143-145.
- [3] MEKCKIS A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(18): 3787-3790.
- [4] KNIGHT J C, BROCK J B, RKS T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [5] HARRIS S E, AMMANN E Q, CHANG I C. Optical network synthesis using birefringent crystals I: synthesis of lossless networks of equal length crystals [J]. *JO SA*, 1964, 54(10): 1267-1269.
- [6] ZHANG J L, LI L R, ZHOU Y, *et al.* Flattening optimization of spectral transmittance for birefringent filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 426-430 (in Chinese).
- [7] BARTELT H, LOHMANN A W, SICRE E E. Optical logical processing in parallel with theta modulation [J]. *JO SA*, 1984, A1(9): 949-951.
- [8] MASELTIP. Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques [J]. *Thin Solid Films*, 1985, 124(3/4): 249-257.
- [9] SUN H B, HE Y B, WU G Zh, *et al.* Crystal thickness determination based on spectroscopic methodology [J]. *Optical Instruments*, 2003, 25(1): 3-7 (in Chinese).
- [10] YAO Q J. Optics tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 338-339 (in Chinese).
- [11] FENG T Zh, WU F Q, LI G H. Optical measurement of the thickness along the quartz crystal axis [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(2): 124-125 (in Chinese).

(上接第 522 页)

的光学方法。实验结果表明,该系统具有简单实用、测量范围广、测量精度高等优点,有着广泛的应用前景。

参 考 文 献