

磁光薄膜法拉第旋转角温度特性的实时线性测量

许灿华¹ 徐启峰¹ 马靖² 谢楠^{1*}

(¹ 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)
(² 福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350116)

摘要 介绍了一种基于晶体斜劈的偏振光法拉第旋转角的实时线性测量方法,并将该方法用于磁光薄膜温度特性的测量。相比于传统的偏振角度测量方法,晶体斜劈方法不仅不受光源功率波动影响,而且在测量过程中无需调节光学元件,可以实时测量。更重要的是用该方法可以实现任意法拉第旋转角的线性测量,偏振角度测量的相对精度可达到 8.7×10^{-4} 。将该方法用于测试掺 Tb 离子的 Bi:YIG 磁光薄膜在不同温度下的 Verdet 常数,研究其温度特性。

关键词 测量;法拉第旋转角;实时线性测量;晶体斜劈

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0808001

Real-Time Linear Measurement of the Temperature Dependence of the Magneto-Optical Film's Faraday Rotation Angle

Xu Canhua¹ Xu Qifeng¹ Ma Jing² Xie Nan¹

(¹ College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)
(² College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract The real-time linear measurement of the Faraday rotation angle of polarized light based on the crystal wedge is presented. Compared to the traditional methods, the measurement based on crystal wedge is not only insensitive to the light power fluctuation, but also can realize the real-time detection due to no adjustment of the optical elements during the experiments. More importantly the linear measurement can be kept for any polarization angle, and the relative accuracy reaches 8.7×10^{-4} . The Verdet constants of the Bi:YIG magneto-optical film with Tb doping under various temperature are investigated by this method, and the temperature dependence is analyzed.

Key words measurement; Faraday rotation angle; real-time linear measurement; crystal wedge

OCIS codes 160.3820; 120.6810; 120.5410

1 引 言

近年来法拉第效应被广泛应用于电流传感,光学隔离,磁光调制和化学组份的分析^[1-3]等领域。根据法拉第效应当线偏振光通过磁场中磁光介质时,光的偏振面将发生旋转,旋转角度与磁场强度和介质的磁光系数有关。对法拉第旋转角的测量通常采用马吕斯定律, $I = I_0 \cos^2 \varphi$, 式中 I_0 为入射光强, φ 为光的偏振面和线性检偏器透光轴的夹角。即采用

测量通过线性偏振器的光功率来推算偏振角度。结合平衡光路和相位调制以及锁相放大器等方法已经可以实现微小法拉第旋转角的高精度测量^[4-5]。由于余弦关系,在原理上这些测试过程都是非线性的。然而线性测试对于测试过程的快速响应、简化数据处理以及获得一致的准确度等方面是至关重要的。为了实现线性测试,通常需要将法拉第旋转角限制在很小的范围内,例如在光学电流传感器中为了获

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51177016)、福州大学人才引进科研启动经费(022499)

作者简介: 许灿华(1978—),男,博士,讲师,主要从事光学电压电流传感方面的研究。E-mail: canhua_xu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xien551@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

得线性测量要求法拉第旋转角小于 5° 。这么小的信号通常淹没在温度、振动等带来的随机噪声之中,严重限制了测试结果的精度和长期稳定性。随着磁光材料的发展,大磁光系数高饱和磁场的材料已经广泛应用到光学隔离,光学电流传感等领域^[6-7]。通过磁光介质,接近 45° 甚至更大的法拉第旋转角可以轻易实现。如果能够对大法拉第旋转角实现实时线性测量,对于提高测试系统的信噪比和时间响应,以及提高测试精度和长期稳定性都具有重大的意义。

任意法拉第旋转角的实时测试技术在近年随着可进行全斯托克斯参量测试的实时偏振成像技术^[8]的研究已经有了很大的进展。已有的研究中采用分幅^[9]、分孔径^[10]以及分焦平面^[11]等成像技术来实现实时测量。在2003年,Okamoto等^[12]报道了采用双折射晶体斜劈对的方法进行测量,并通过空间频谱分析来获得偏振态信息。但偏振成像技术通常需要对大面积的图像进行处理,其时间分辨率在几赫兹到几十赫兹,无法测试响应时间在毫秒量级以下的快速变化过程。本文提出一种可以实时线性测量任意法拉第旋转角的方法:首先用 $1/4$ 波片将法拉第旋转角转换成相位延迟,(相当于谢奈尔门补偿法^[13]的逆光路),再用晶体斜劈和线偏振片将该相位延迟调制成与法拉第旋转角呈正比的亮暗条纹的移动。最终用相机测试该移动量获得偏振旋转角。该测量可以在任意偏振角度保持线性关系,而且测量过程中无需调节光学元件,是一维图像的单发测量。配合高速的一维线阵相机,可以实现动态过程的快速测量。将该方法用于测量掺杂 Tb 离子的 Bi:YIG 磁光薄膜的温度特性。实验结果表明在 808 nm 波段,在常温下磁光薄膜的 Verdet 常数高达 $10^4 \text{ rad}/(\text{T} \cdot \text{m})$,该常数随温度的相对变化率为 $5.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。

2 实验装置和测量原理

采用晶体斜劈测量法拉第旋转角的实验装置如图 1 所示。本实验采用上海科乃特激光有限公司生产的 vinus 光源,为带温控的 808 nm 单横模稳频半导体激光光源,波长稳定性为 $\pm 0.02 \text{ nm}$,功率

30 mW,稳定性为 $\pm 1\%$ 。光斑经过扩束后直径为 10 mm,通过第一片偏振片后其偏振在竖直方向。磁光薄膜放置在温控盒(TEC)中,可通过 TEC 对其控温由线圈通直流电产生外加磁场。磁场方向与样品表面垂直,对偏振光产生法拉第旋转。后续 808 nm 波段的 $1/4$ 零级石英波片(福建福特科光电有限公司)的快轴在竖直方向。其作用是在偏振光的竖直和水平方向的分量之间引入 90° 相位差。如图 1 所示,石英晶体劈的劈角放置在水平方向上,其快慢轴与竖直方向呈 45° 。其光轴与通光方向垂直,所以光通过石英晶体时自然旋光效应可以忽略。所用石英晶体的劈角为 1° ,尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。光束通过晶体劈后在光斑的不同水平位置上引入不同的光程差,最后通过第二片光轴水平放置的偏振片到达纸屏形成干涉图样。用 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的工业 CCD 相机(维视数字图像技术有限公司, MV-1300UC/UM)采集并用 Labview 程序进行数据处理。由于 YIG 晶体属于立方晶体,理论上不存在自然双折射,并且 YIG 晶体自然的旋光性极其微弱可以忽略,所以该实验装置中测量暗条纹移动量将对应外加磁场引起的法拉第旋转角。

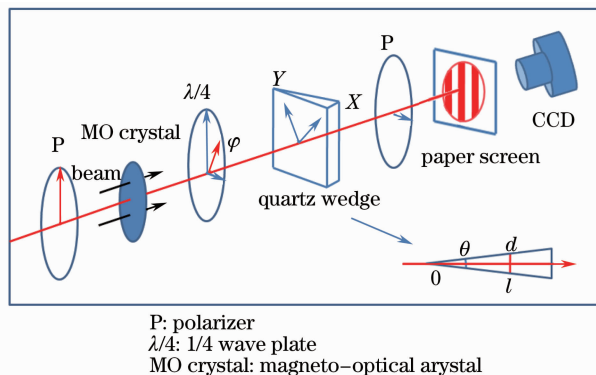


图 1 用晶体劈方法测量法拉第旋转角的实验装置图
 Fig. 1 Experimental setup of Faraday rotation angle measurement based on crystal wedge

假设入射光的振幅为 1,经过磁光薄膜后,入射光的偏振角旋转 φ ,以波片的快慢轴为坐标轴,经过 $1/4$ 波片的琼斯矩阵可以表示为 $[\cos \varphi \quad i \cdot \sin \varphi]^T$,当坐标轴旋转 45° 时,(图 1 中的 x, y 方向),偏振光可以表示为

$$\begin{bmatrix} \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ i \cdot \sin \varphi \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \cos \varphi - i \cdot \sin \varphi \\ \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi) \\ \exp(+i\varphi) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

即在 x 和 y 方向上,偏振光可以看成振幅相等为 $\sqrt{2}/2$,且相角分别为 $m\varphi$ 的两束光。与谢奈尔门法

相似, x 和 y 方向上的偏振光相位差等于偏振旋转角的 2 倍。

图 1 右下角的插图给出了俯视图中晶体劈厚度与位置的关系。假设晶体劈的顶点为坐标原点, 则厚度为 $d = l \cdot \tan \theta$ 。由晶体劈引入的快慢轴方向的光程差与厚度有关

$$\delta_c(l) = (n_e - n_o) \cdot d = (n_e - n_o) \tan \theta \cdot l, \quad (2)$$

式中 n_o 和 n_e 分别是石英晶体 o 光和 e 光折射率。

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \delta_c(l)\right] \end{bmatrix} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp(-i\varphi) \\ \exp(+i\varphi) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(-i\varphi) \left\{ \begin{matrix} 1 \\ \exp\left\{i \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta_c(l) + 2\varphi \right] \right\} \end{matrix} \right\}, \quad (4)$$

经过水平方向放置的偏振片后得到的光强是

$$I(l, T) = |A_x \cos(\pi/4) - A_y \sin(\pi/4)|^2 = 1/2 + 1/2 \cos[\Delta\varphi(l, T)], \quad (5)$$

式中

$$\Delta\varphi(l, T) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta_c(l) + 2\varphi. \quad (6)$$

从以上推导可以看出, 纸屏上光斑的强度与磁光薄膜的法拉第旋转角以及晶体劈不同厚度引入的相位差有关。当 $\Delta\varphi(l, T)$ 为相位 π 的偶数倍时光强最强, 为 π 的奇数倍时光强为零。最终在纸屏上会形成竖直方向的亮暗交错条纹, 条纹的周期就是 (3) 式的全波行程。而由偏振面旋转引起的相位延时量变化表现在条纹的整体横向平移上。(6) 式表明偏振面变化 π 时相位变化 2π , 条纹整体移动一个周期。在未提供磁场时对系统的条纹位置进行定位, 记录初始位置。加入磁场产生法拉第旋转后通过 CCD 测量条纹的移动量 ΔL , 则可以推导出待测的法拉第旋转角为

$$\varphi = \frac{\Delta L}{l_\lambda} \cdot \pi. \quad (7)$$

由于条纹呈周期性分布, 在移动量为一个周期时将与原干涉图样重复。为了实现条纹移动量与偏振旋转角的唯一对应关系, 通常将偏振旋转角的测量范围限制在 $\pm\pi$ 以内。

3 实验样品

离子掺杂的 YIG 晶体在高性能磁光器件中具有广泛的应用, 是磁光隔离器, 磁光调制器以及光学电流传感器等的核心元件。对磁光晶体温度特性的研究是提高磁光器件性能的有效手段, 一直是磁光材料研究领域的热点^[14]。本实验采用液相外延法生长的 320 μm 厚的 Bi:YIG 薄膜作为测试样品。在

上述光程差为一个波长时对应的 l 称为全波行程

$$l_\lambda = \frac{\lambda}{(n_e - n_o) \tan \theta}. \quad (3)$$

在实验中所用的晶体劈厚度为 1° , 在 808 nm 时, 石英晶体的 n_o 为 1.544, n_e 为 1.553, 则可以计算出全波行程为 5.142 mm。以晶体劈快慢轴的方向作为 x 和 y 轴的取向, 经过晶体劈后偏振光矩阵表示如下:

YIG 晶体薄膜中采用重掺杂的 Bi 离子提高磁光系数, 由于 Tb^{3+} 与 Y^{3+} 对磁光薄膜的法拉第旋转的温度特性贡献相反, 采用适当比例的 Tb 离子可以改善磁光薄膜的温度特性^[14]。该磁光薄膜在通讯波段如 1310 nm 和 1550 nm 具有很好的透射率, 通过测试得到在 808 nm 的透射率为 23.5%。但考虑到磁光薄膜的 Verdet 常数在近红外波段通常比通信波段大数倍^[15], 而且在该波段的偏振态检测在磁光材料研究^[6]、传感遥感技术^[16]甚至天体研究^[17]等领域都有广泛的应用前景, 在本实验中采用近红外光源。

用光斑直径约为 0.5 mm 的 808 nm 线偏振光照射磁光薄膜, 在透过光束中存在着多级衍射环, 如图 2(a) 所示, 这是由磁光薄膜的磁畴结构决定的^[18-19]。这些衍射环并不是等间距的, 三个环的间距(红线)从内到外的比例约为 1:1.24:0.82。而且各个圆环所对应的偏振态并不相同。如图 2(a)~(c) 对应了在磁光薄膜后无偏振片, 以及分别放置与入射光偏振方向平行和垂直的线偏振片得到的衍射图案。衍射环的直径以及偏振态与磁畴的具体结构有关。由于本实验室目前缺乏直接测量磁畴的实验手段, 对磁畴衍射环的精确解释将在后续研究中进行。在图 2 的实验中, 磁光薄膜的后表面离成像衍射环的距离为 10 cm, 第一个衍射环对应的半径为 4.89 mm, 则可以算出衍射角 α 为 2.8° 。从衍射角与磁畴尺寸关系^[18]的公式 $d = \lambda/\alpha$, λ 是光波长, 可以计算磁畴的平均尺寸 d 为 16 μm 。

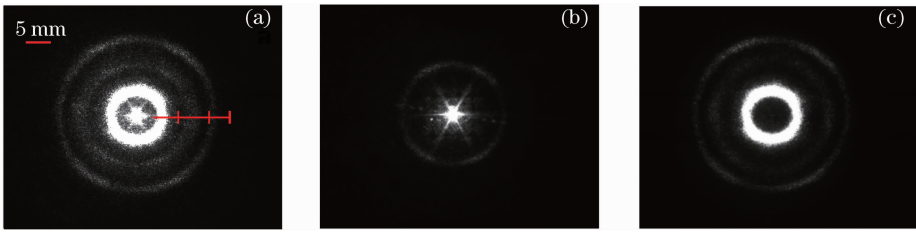


图 2 磁光薄膜对 808 nm 线偏振光的衍射。(a) 磁光薄膜后无偏振片；(b) 磁光薄膜后置与入射光偏振方向平行的偏振片；(c) 磁光薄膜后置与入射光偏振方向垂直的偏振片

Fig. 2 Diffraction of the magneto-optical film at 808 nm polarized light. (a) No polarizer after the magneto-optical film; (b) axis of the polarizer is parallel to the incident polarization; (c) axis of the polarizer is vertical to the incident polarization

4 实验结果和讨论

图 1 的实验装置中 CCD 相机采集到的图像如图 3(a)所示,出现等间距的亮暗条纹。条纹间距与晶体劈的倾角以及实际光路中光斑的放大率有关。两个条纹之间对应了 180° 偏振角度变化。可以对图 3(a)的光斑强度沿垂直方向进行积分,消除光路中灰尘、杂质等带来的光强不均匀的影响。在具体数据处理过程中,CCD 采集图像的强度对应了二维数组,将数组的各行相加,得到沿着横向像素分布的光强数据,如图 3(b)的曲线。其中横坐标对应了图 3(a)横向的像素数值。在数据处理中 Labview 程序是对曲线的

波谷进行定位,可以得到每个暗纹间距对应了约 250 pixel。暗纹位置移动量的最小可分辨距离为 CCD 相机 1 pixel 的尺寸(约为 $4.5 \mu\text{m}$)。为了提高暗纹移动量测试的准确性,即提高偏振角度测量的精度(7)式采用光学扩束器将图 3(a)的光斑进一步放大,使得 CCD 相机采集的光斑仅包含两个暗纹如图 4(a)所示。图 4(b)为对应的纵向光强积分,其中曲线的波谷间隔为 722 pixel,对应了 180° 偏振角度变化。在实验中增强磁场或者改变磁光薄膜的温度即可以改变法拉第旋转角,从而使暗纹发生移动,通过测量暗纹移动量就可得到偏振角度的变化。

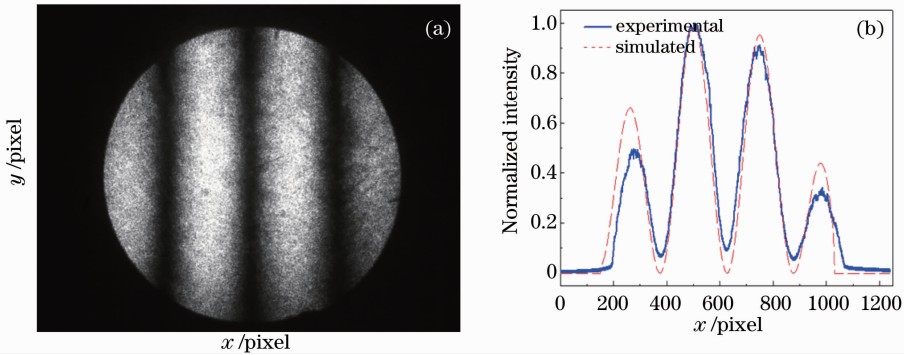


图 3 (a) CCD 相机采集到得含暗纹的实验光斑；(b) 光斑的纵向积分

Fig. 3 (a) Experimental spot with dark lines on CCD camera; (b) optical intensity integration along the vertical direction

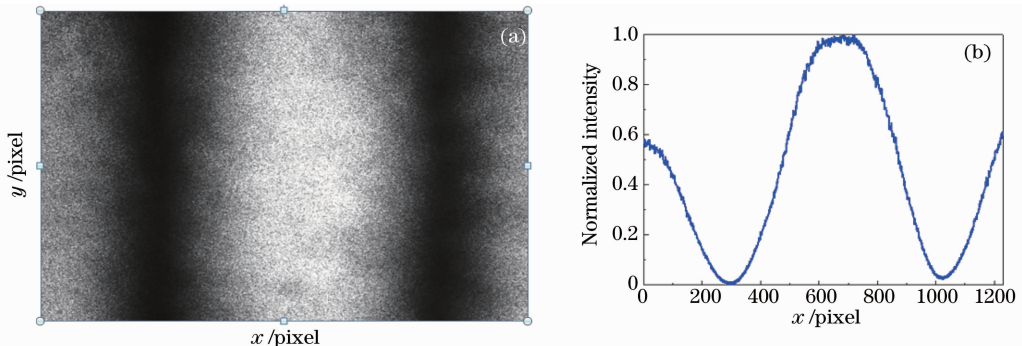


图 4 (a)放大后的暗条纹及(b)其光强积分

Fig. 4 (a) Amplified dark lines and (b) optical intensity integration

未引入磁场时在磁光薄膜之后插入 808 nm 波段的 1/2 零级石英波片(福建福特科光电有限公司),在波片光轴与垂直光轴的方向之间引入 180° 相位差,使得入射光的偏振角度的变化量等于原偏振方向与 1/2 波片光轴夹角的 2 倍。通过旋转 1/2 波片可以改变光的偏振角度对系统进行定标,结果如图 5 所示。在 -120°~120° 的偏振角范围内,暗纹位置的变化量与偏振角度成正比。可见对于任意法拉第旋转角,晶体劈方法的测试结果都是线性的。图中实验数据对拟合直线的微小偏差来自于 1/2 波片手动调节的误差。

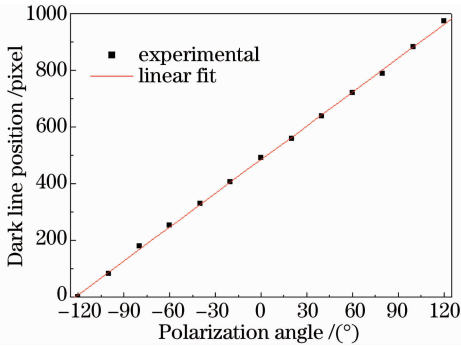


图 5 偏振角测量装置的定标

Fig. 5 Calibration of the setup of polarization angle measurement

对磁光薄膜施加垂直表面方向的磁场并进行温控,测量在不同温度,不同磁场得到的暗纹位置的变化,并换算成法拉第旋转角如图 6 所示。可见随着磁场的增加,磁光薄膜引入的法拉第旋转角呈线性增加,而且在 70 mT 时可达 39°。此时法拉第旋转角并没有偏离线性关系,磁光薄膜没有出现磁饱和。随着温度的变化,法拉第旋转角有所减少。根据实验结果可以计算出在 808 nm 波段,温度为 30 °C, 50 °C, 70 °C 和 90 °C 时,Verdet 常数分别为 3.133×10^4 , 3.095×10^4 , 3.063×10^4 以及 $3.037 \times$

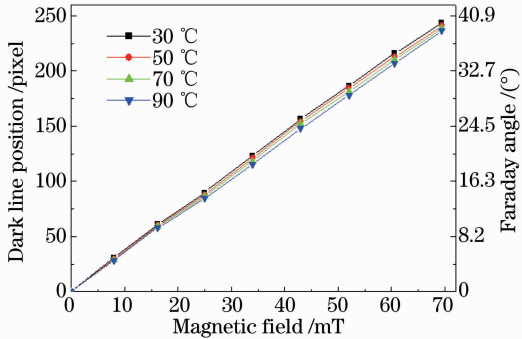


图 6 不同温度下磁光薄膜法拉第旋转角的测试

Fig. 6 Faraday angle of the magneto-optical film at various temperature

10^4 rad/T/m。约为未掺杂的 YIG 薄膜在相同波段下 Verdet 常数的 3 倍^[15]。Verdet 常数随温度的相对变化率为 $-5.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。文献[15]报道掺 Tb 离子的 Bi:YIG 材料在 1550 nm 时 Verdet 常数的温度系数为 $-1.55 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 并且在 808 nm 时 Verdet 常数约为 1550 nm 时的 4 倍,所以实验结果与文献[15]结果相符合。可见该薄膜具有大的 Verdet 常数和稳定的温度特性,特别适合用于需要大角度法拉第旋转角的光学器件。

5 偏振角度测量精度分析

采用晶体斜劈方法测量偏振角度不受光源功率波动的影响,从而可以得到较高的测试精度。影响测量结果的主要因素有光源的波长变化、晶体劈的温度变化以及光路振动的影响。在本实验中,采用稳频率光源,其波长波动为 $\pm 0.02 \text{ nm}$,从石英晶体的色散公式^[20]可以计算出波长变化引起的波片相位差的相对变化值为 3.15×10^{-6} 。而从(3)式可以计算出波长波动引入的全波行程相对误差约为 2.5×10^{-5} ,这两者对测量结果的影响可以忽略。实验室温度变化影响到晶体劈材料的折射率以及厚度、劈角发生变化,将引入较大的实验误差。参照文献[21],通过石英晶体的膨胀率和折射率的温度系数等等可计算出如果环境温度变化 10 °C,在测试结果中引入的相对误差为 1.5×10^{-4} 。实验过程中用空调保持环境温度的变化小于 2 °C,则这部分影响也可以忽略。由于采取对暗纹位置的定位进行测量,实验结果对光路的振动比较敏感,需要尽量将光路缩短并且固定在共同的光学平台上以保证测试的精度。在实验参数相同的条件下,图 3 中的暗条纹积分后对应的像素位置的变化量为 0.2 pixel,并且在升温过程和降温过程测得的实验结果的差别也在该范围内,说明该实验具有很高的可重复性。由于图中暗纹间距为 722 pixel,对应了 180° 偏振角,则可以计算出偏振角测量的相对精度为 8.7×10^{-4} ,对应了 0.05°。该方法可以通过放大光斑增加暗条纹的间距,或者采用高分辨率的 CCD 相机等来进一步提高测试精度。

6 结 论

使用采用晶体斜劈方法测试磁光薄膜的法拉第旋转角随温度的变化。根据实验结果在 808 nm 波段,温度分别为 30 °C, 50 °C, 70 °C 和 90 °C 时,掺

Tb 离子的 Bi:YIG 磁光薄膜的 Verdet 常数分别为 3.133×10^4 , 3.095×10^4 , 3.063×10^4 和 3.037×10^4 rad/(T·m), Verdet 常数随温度的相对变化率为 $-5.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。晶体斜劈方法不受光源功率波动的影响,其测试精度主要受制于相机的分辨率,在实验中偏振角度测试的相对精度可达 8.7×10^{-4} 。并且该方法对任意的偏振角度的测量都是线性的,在测试过程无需调节光学器件,也不需要额外的调制设备,从而可以实现任意偏振旋转角度的实时测量,极大提高了测量结果的信噪比和稳定性。相比于传统法拉第旋转角的测量方法,晶体斜劈方法不仅可用于静态偏振角度测量,也适合动态过程的分析。本文采用 DALSA 线阵相机(型号 spyder3 S3-24)代替面阵 CCD 相机,已经实现 4 kHz 的时间分辨率。该分辨率受限于 DALSA 线阵相机的最高扫描速度。目前商品化的线阵相机最高的扫描速度已经可以达到百千赫兹量级,如果结合高速的线阵相机,采用晶体劈测量偏振旋转角的方法在偏振面快速变化的化学、生物、光学传感等等研究领域将有重大的应用前景。

参 考 文 献

- Liu Yanbing, Li Hongbin, Yu Chunyu, *et al.*. Electronic Instrument Transformer[M]. Beijing: Science Press, 2009. 11—98.
刘延冰,李红斌,余春雨,等.电子式互感器[M].北京:科学出版社,2009.11—98.
- Arikawa Takashi, Wang Xiangfeng, Belyanin Alexey A, *et al.*. Giant tunable Faraday effect in a semiconductor magneto-plasma for broadband terahertz polarization optics[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19484—19492.
- Yang Zhiyong, Huang Xianxiang, Zhou Zhaofa, *et al.*. Application of square wave magneto-optic modulation to transmitting the azimuth between equipments without mechanical connection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212006.
杨志勇,黄先祥,周召发,等.方波磁光调制测量在无机连接的设备间方位传递中的应用[J].光学学报,2012,32(12): 1212006.
- Lin Chunen, Yu Chihjen, Li Yingchang, *et al.*. High sensitivity two-frequency paired polarized interferometer in Faraday rotation angle measurement of ambient air with single-traveling configuration[J]. J Appl Phys, 2008, 104(3): 033101.
- Liu Qiang, Zeng Xianjin, Zhang Junhai, *et al.*. Application of Faraday modulation in tiny rotatory angle detection[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(6): 65—68.
刘强,曾宪金,张军海,等.法拉第调制技术在微小旋转角检测中的应用[J].光学与光电技术,2009,7(6): 65—68.
- Chong Chen, Ni Yi, Shengming Zhou, *et al.*. Preparation of (Tb_{0.8}Y_{0.2})₃Al₅O₁₂ transparent ceramic as novel magneto-optical isolator material[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(2): 021601.
- Sascha Liehr. Optical Measurement of Currents in Power

- Converters [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006. 12—44.
- Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0826002.
唐珮珺,陈飞虎,唐志列.偏振态的可视化及其成像技术研究[J].光学学报,2013,33(8): 0826002.
- J Scott Tyo, Dennis L Goldstein, David B Chenault, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. Appl Opt, 2006, 45(22): 5453—5469.
- He Hucheng, Ji Yiqun, Zhou Jiankang, *et al.*. Optical design of decentered aperture-divided polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622005.
贺虎成,季轶群,周建康,等.偏心分孔径偏振成像光学系统的设计[J].光学学报,2013,33(6): 0622005.
- Hamamoto T, Toyota H, Hihuta H. Micro-retarder array for imaging polarimetry in the visible wavelength region[C]. SPIE, 2001, 4440: 293—300.
- Kazuhiko Oka, Toshiaki Kaneko. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms[J]. Opt Express, 2003, 11(13): 1510—1519.
- Shintani Ryuichi, Fan Aiyang, Kang Changhe. Polarization Light [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994. 1—18.
新谷隆一,范爱英,康昌鹤.偏振光[M].北京:原子能出版社,1994.1—18.
- Ji Rongjin, Fang Caixiang, Zeng Yanwei. Research advances in substituted yttrium iron garnet for magneto-optical application [J]. Materials Review, 2011, 25(17): 60—64.
纪荣进,方才翔,曾燕伟.离子掺杂钇铁石榴石磁光材料研究进展[J].材料导报,2011,25(17): 60—64.
- Huang Min, Xu Zhichun. Liquid phase epitaxy growth of bismuth-substituted yttrium iron garnet thin films for magneto-optical applications[J]. Thin Solid Films, 2004, 450(2): 324—328.
- Wang Feng, Yang Jinhong, Li Xiaoming, *et al.*. Oil spill visible/near-infrared polarized light detection method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 051202.
王峰,杨锦宏,李小名,等.水面溢油可见/近红外偏振光检测方法研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(5): 051202.
- Chen Zhiwei, Jiang Zhibo. Near-infrared polarimetry in study of star formation regions[J]. Progress in Astronomy, 2009, 27(4): 316—329.
陈志维,江治波.近红外偏振观测在恒星形成研究中的应用[J].天文学进展,2009,27(4): 316—329.
- Logunov M, Nikitov S A, Gerasimov M, *et al.*. Magneto-optic Fraunhofer diffraction on 2D magnetic domain patterns[J]. Solid State Phenomena, 2012, 190: 737—741.
- Zhu Jinrong, Xiang Mei, Hu Jingguo. Dynamic behaviors of domain wall in FM/AFM bilayers[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18): 501—506.
朱金荣,香妹,胡经国.铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴动力学行为[J].物理学报,2012,61(18): 501—506.
- Gorachand Ghosh. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals [J]. Opt Commun, 1999, 163(1-3): 95—102.
- Zhao Shuang, Wu Fuqun. The study on dispersive equation and thermal refractive index coefficient of quartz crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1183—1186.
赵爽,吴福全.石英晶体的色散方程及折射率温度系数[J].光子学报,2006,35(8): 1183—1186.

栏目编辑:何卓铭