

·测试、试验与仿真·

磁旋光晶体特性及其在自动偏振检测中的应用

杨宇光

(北京交通大学,北京 100044)

摘要:综述分析了磁旋光晶体的特性,包括磁光效应的基本理论、磁致圆二向色性、磁光晶体中 Faraday 效应的非线性、物质磁性分类。并介绍了目前常用的自动偏振检测装置即步进电机控制检偏器旋转,由于机械装置的局限性,导致步进电机控制检偏器旋转的自动偏振检测装置很难达到更高精度。在对磁旋光晶体的特性进行分析后,发现完全可以应用于自动偏振检测中,由此提出了关于自动偏振检测装置的新方案即应用磁旋光晶体实现自动偏振检测。

关键词:磁旋光晶体;Faraday 效应;特性;偏振检测;应用

中图分类号:O734;O657.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2012)06-0080-04

Characteristics of Magneto-optic Rotation Crystal and Application in Full-automatic Polarization Detection

YANG Yu-guang

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Characteristics of magneto-optic rotation crystal such as basic theories of magneto-optical effect, the dichroism of magneto circulars, nonlinear of Faraday effect in magneto-optic crystal and magnetic classification of material are analyzed. And common detection device for full-automatic polarization, such as stepping motor which is used to control the analyzer rotation is introduced. Full-automatic polarization detection devices are difficult to reach higher accuracy due to the limitations of mechanical devices. Magneto-optic rotation crystal is suitable to be used in full-automatic polarization detection after the characteristic analysis. So a new scheme for full-automatic polarization detection devices by using magneto-optic rotation crystal is proposed.

Key words: magneto-optic rotation crystal; Faraday effect; properties; polarization detection; application

在磁场中当光与传播媒介相互作用时就会产生磁光效应。现代物理学产生之初就已经对这一效应开始了研究并已经对其发展产生了深远的影响。目前,以各种磁光晶体为基础应用于光隔离器^[1]、光纤电流传感器^[2]、磁场测量^[3]、光调制器、光环行器等领域的器件相继开发出来。深入掌握磁光晶体的特性,将对改善磁光器件的性能产生重要作用。

1 磁旋光晶体特性

1.1 磁光效应基本理论

光波从具有磁矩的物质透射后,光的偏振态会

发生变化,这是介质与电磁波的电场和磁场相互作用的结果。因此,所有的磁光效应都是材料本身在不同方向上折射率的不同所引起的。这种各向异性是材料的回转电路特性并且可以用介质的介电常数非对角矩阵描述。

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & i\delta & 0 \\ -i\delta & \epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, δ 的绝对值是外磁场以及自身磁场所引起的与磁化强度 M 成比例的值,其相位是关于入射光在传输过程中椭圆率的变化。由于磁化过程在光频段,描述回磁效应的磁导率 $\mu \approx 1$ 。

设入射光为线偏振光,有

$$E = E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (2)$$

将式(1)、式(2)代入麦克斯韦方程组,经推导可得

$$\begin{bmatrix} n^2(1-\alpha^2) - \epsilon_x & -n^2\alpha\beta - i\delta & -n^2\alpha\gamma \\ -n^2\alpha\beta - i\delta & n^2(1-\beta^2) - \epsilon_x & -n^2\beta\gamma \\ -n^2\alpha\gamma & n^2\beta\gamma & n^2(1-\gamma^2) - \epsilon_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

式中 α 、 β 、 γ 分别表示波矢相对于 x 、 y 、 z 轴的方向余弦。 E 具有非零解的条件是式(3)中的三阶系数行列式等于零,由此得

$$n^4(\epsilon_x \alpha^2 + \epsilon_x \beta^2 + \epsilon_x \gamma^2) - [(\epsilon_x - \delta^2)(\alpha^2 + \beta^2) + \epsilon_x \epsilon_y (\alpha^2 + \beta^2 + 2r^2)] + \epsilon_x (\epsilon_x - \delta^2) = 0 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可以得出折射率 n 以及与之相对应的传输模式。

由于波矢 k 平行于磁化强度 M ,则 $\alpha = \beta = 0, \gamma = 1$,若光波在立方对称或各向同性的介质中传播,则 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \epsilon$,代入式(2)可得

$$n_{\pm} = \epsilon \pm \delta \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)得 $E_y = \mp i E_x$ 。

假设沿 Z 方向传播的入射线偏振光的电场强度矢量沿 x 轴方向,电场强度可表示为

$$E = E_0 \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda} z - \omega t\right) \quad (6)$$

此线偏振光进入介质后的电场强度可以表示为

$$E_x = E_x^+ + E_x^- = E_0 \cos\left(\frac{\pi(n_+ - n_-)}{\lambda} z\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi(n_+ + n_-)}{\lambda} z - \omega t\right) \quad (7)$$

$$E_y = E_y^+ + E_y^- = -E_0 \cos\left(\frac{\pi(n_+ - n_-)}{\lambda} z\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi(n_+ + n_-)}{\lambda} z - \omega t\right) \quad (8)$$

由此可以得出,入射光在晶体中传输 z 后,所转过的角度为

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-E_x}{E_y} = \frac{\pi(n_+ - n_-)}{\lambda} z \quad (9)$$

简单地说就是一束线偏振光可以分为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,在晶体中两种模式无相互作用地以不同的折射率传输,这样在出射时,尽管仍然可以合成线偏振光,但偏振面相对于入射角发生了旋转^[4,5]。

1.2 磁致圆二向色性

在实际情况下,晶体会对光波有吸收效应,故折射率通常是复数,将使左旋和右旋偏振光产生相位差和幅度差,导致出射光变成椭圆偏振光。

设 $n_{\pm} = n'_{\pm} + i n''_{\pm}$,由式(9)可得旋光率为 $\theta_F = \theta'_F + i \theta''_F = \frac{\pi(n_+ - n_-)}{\lambda}$,则出射光表示为

$$E = \frac{E_0}{2} \left[e^{-i(\omega t + \theta_1) + i(\omega t + \theta_2)} \right] \quad (10)$$

式中, θ_1 、 θ_2 分别为右旋和左旋圆偏振光的角。考虑介质存在吸收的情况,式(10)变为

$$E = E_r e^{-i(\omega t + \theta_1)} + E_l e^{i(\omega t + \theta_2)} \quad (11)$$

式中, $E_r = \frac{E_0}{2} e^{\theta_1}$; $E_l = \frac{E_0}{2} e^{-\theta_2}$ 。由此可以看出,出射光变为椭圆偏振光,其长轴、短轴分别为 $E_{\max} = E_r + E_l$ 和 $E_{\min} = E_r - E_l$ 。

复旋光率实部的平均值描述了磁光材料的法拉第旋转率,它用来表征磁致圆双折射效应,一般称作Faraday效应,虚部则描述了磁光材料的磁致圆二向色性。

由于圆二向色性的影响,出射光的偏振态不再是线偏振光,光的偏振度降低,使磁光晶体产生退偏效应^[6]。

1.3 磁光晶体中Faraday效应的非线性

铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性介质中存在着强烈的交换作用,从而使得次晶格中的间接交换作用有效场 H 与磁化强度 M 不再是线性关系,应用经典电磁场理论可以得到比法拉第旋转角

$$\theta_F \approx V_1(\omega) \sum_{i=1}^l v M_i + V_3(\omega) \left(\sum_{i=1}^l v M_i \right)^3 + V_3(\omega) \left(\sum_{i=1}^l v M_i \right)^3 + \dots \quad (12)$$

式中, v 为分子场常数; l 为介质中的次晶格数。且在磁性介质中, v 和 M 均与温度 T 有关,因此磁光晶体又会表现出复杂的温度特性。

文献[7]中指出,在亚铁磁性钇铁石榴石(YIG)晶体中掺入非磁性元素后,不仅会降低磁化强度 M ,而且还将降低两次晶格间的间接交换作用,从而导致式(12)中高次项的贡献迅速下降。文献[5]中给出了具体的实验表明,外加磁场的磁化强度只有在某一阶段时旋转角与磁化强度才会体现出较好的线性关

系,在其他阶段体现出的都是非线性关系^[7,8]。

1.4 物质磁性分类

按照物质磁化率的大小和符号,可将物质的磁性分为五大类:抗磁性、顺磁性、铁磁性、反磁性和亚铁磁性。

1.4.1 抗磁性

抗磁性也称逆磁性。抗磁性物质的磁化率,且其绝对值很小。抗磁性物质主要有以下几类:(1)惰性气体,如He、Ne、Ar、Kr、Xe等;(2)不含过渡族元素的离子晶体,如NaCl和KBr等;(3)不含过渡元素的共价键化合物,如水和CO₂,以及几乎所有的有机化合物;(4)某些重金属,如Cu、Ag、Au、Hg和Pb等,以及一些高价金属。

1.4.2 顺磁性

顺磁性的物质 $x > 0$,但很小。在磁化后,原子(分子或离子)磁矩有沿外磁场方向排列的趋势,外磁场越大,排列越趋整齐。顺磁性物质实际应用较少,主要是含过渡元素的化合物和合金等。某些顺磁性物质,如铽玻璃(Terbium Glass)等也是重要的磁光材料。

1.4.3 铁磁性

由于铁磁性物质原子或离子的电子之间存在交换作用,这种相互作用十分强大,与其等效的“磁场”称为分子场(Molecular field),分子场克服热运动的影响,使原子(离子)磁矩相互平行排列。铁磁性物质磁化的主要特点是:(1)磁化率 $x > 0$,且很大,性能优良的铁磁性材料的 X 可高达 10^5 以上;(2) x 不是常数,而是随磁场 H 而变, $x=M/H$, M 具有饱和值 M_s ,称为磁饱和强度(saturation magnetization)。

1.4.4 反铁磁性

反铁磁性物质具有亚磁晶格结构,相邻亚晶格磁矩间相互反平行,对外不显示磁性。在外磁场作用下,也只能显示微弱的磁性,即其 $x > 0$,但很小。主要包括部分金属(如高温下的Eu、Dy、Ho、Er等稀土元素)和部分化合物。

1.4.5 亚铁磁性

亚铁磁性物质的磁化率 $x > 0$,且很大。一般随 H 变化,较易磁饱和,有磁滞现象。亚铁磁性物质多为氧化物,因其中多含铁,也称铁氧体(ferrite),主要分4种类型:(1)尖晶石型,分子式 MFe_2O_4 ,属立方晶系, M 为二价金属;(2)磁铅石型;(3)钙钛石型,结构

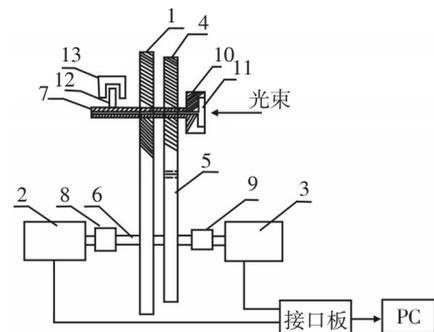
与钙钛石(CaTiO₃)相同,属立方晶系;(4)石榴石型,分子式 $A_3Fe_5O_{12}$,属体心立方, A 多为稀土元素。

2 磁旋光晶体在自动偏振检测中的应用

目前,偏振光技术在传感器、光纤陀螺仪和激光调制器等领域有着广泛的应用,其中偏振检测的质量将直接影响到整个系统的性能,因此引起了人们的极大重视。自动偏振检测将使偏振检测的质量得到进一步的提高。用步进电机控制检偏器旋转是一种较为常用的一种自动偏振检测装置^[9]。

2.1 传统自动偏振检测设备

工作原理为检偏器由步进电机带动旋转,让检偏器旋转一周得到光强曲线,由此曲线就可以计算出待测光信号的偏振态信息。由于步进机在每次加脉冲时,只能转过一个特定的步进角,且步进角一般在 1° 左右,所以要达到更小的步进角,存在很多困难,因此很难达到较高的定位精度。



1—安装支架;2—轴角编码器;3—电机;
4—从动齿轮;5—主动齿轮;6—主动轮轴;
7—从动轮轴;8—联轴器;9—连轴器;10—偏振座;
11—偏振片;12—挡光片;13—光耦合器

图1 偏振偏转角自动检测与控制装置

在此基础上,文献[10]给出了一种改进方法即将步进机变为齿轮进行工作,结构图如图1所示。

从图1可以看出,此装置将步进机转化成了主从齿轮,大大提高了装置的精度。但是其本质还是一个机械装置,因此其不但结构复杂,而且精度、稳定性等方面还是很难达到很好的效果。

2.2 磁旋光晶体应用于自动偏振检测

由于转动电机稳定性较差,以及构造过于复杂等特点,不利于系统的实用化。文中设计的实验系

系统将采用特殊晶体受控旋光技术取代以往的机械式旋转方式,固定偏振分析仪的起偏器和检偏器,将特殊受控旋光晶体插入起偏器和检偏器中间的平行光路,并使起偏器和检偏器及特殊受控旋光晶体三者共轴。这样通过改变特殊受控旋光晶体上所施加的直流电压,改变其输出光的偏振方向,从而达到对入射光偏振特性分析的目的。由于在这一装置中,特殊受控旋光晶体的偏振方向由相应的电信号进行控制,因此避免了由于机械式起偏器、检偏器或波片旋转过程中转轴错位所导致的测量误差,从而实现对入射激光偏振态的精密测量,同时也大大提高了自动检偏器的测量灵敏度。

磁旋光晶体是一种很好的旋光介质。通过控制线圈中电流来调节线圈产生的磁场,进而改变磁旋光晶体轴向上作用的磁场强度,由此控制通过磁旋光晶体轴向上的偏振光的偏振方向。这种偏振方向的变化通过检偏器后即可变成输出光的强度变化。由于这种偏振分析系统中无任何机械部件,所以其测试精度要高于传统的机械式自动检偏系统。

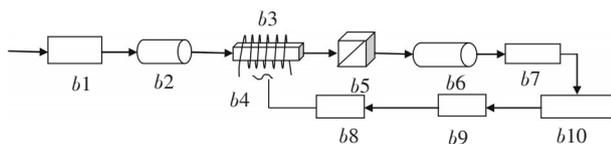


图2 磁旋光晶体式全自动偏振检测

检偏器装置如图2所示,包括光纤适配器**b1**、自聚焦透镜**b2**、磁旋光装置**b4**、检偏器**b5**、自聚焦透镜**b6**、光电探测器**b7**、驱动信号合成器**b8**、计算机**b9**和数据采集卡**b10**,磁旋光装置由电磁线圈和设置在线圈内部的晶体组成。其中:偏振光产生装置的输出光依次经过**b1**、**b2**后被转变成平行光,平行光依次经过**b4**、**b5**后被**b7**接收,**b7**将每个偏转角度下出射光在**b5**的偏振主轴上的光强分量转变为电信号,并通过**b10**传送给**b9**,**b9**对其进行处理得到入射光的主偏振方向。**b9**通过控制**b8**来调节磁旋光装置中的电磁线圈中的电流进而控制磁旋光装置输出光方向。从而得到偏振光强曲线,计算出偏振光的偏振态。

3 结束语

由于磁光晶体在光纤通信和光纤传感领域都有

着广泛的应用,人们正不断地研究磁光晶体的结构以尽量提高磁光材料的法拉第转角。与此同时,人们也在不断地探索用光子晶体结构^[11]以及光纤中添加不同的掺杂物来实现磁光效应^[12]。随着磁光材料特性的不断改善,以磁光效应为基础的磁光器件将展现出更加广阔的应用空间。

参考文献

- [1] D Budker, W Gawlik, D F Kimball, et al. Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms[J]. Reviews of modern physics, 2002, 74 (10):1154-1201.
- [2] H Lassing, W J Mastop, A F G van der Meer, et al. Plasma current measurements by Faraday rotation in a single-mode fiber[J]. Appl. Opt, 1987, 26:2456-2460.
- [3] E H Hwang, B Y Kin. Pulsed high magnetic field sensor using polymethyl methacrylate[J]. Meas.Sci.Technol, 2006, 17: 2015-2021.
- [4] Martin Gaugitsch, Hans Hauser. Optimization of a Magneto-Optical Light Modulator—Part I: Modeling of Birefringence and Faraday Effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17 (12):2633-2644.
- [5] 王吉明.磁光晶体的磁致偏振特性研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学, 2003.
- [6] 李永安.传统光纤及光子晶体光纤偏振与磁光特性研究[D]. 西安:西北大学, 2007.
- [7] 刘公强, 梁波, 卫邦达.磁光效应的各向异性和非线性特性[J]. 光学学报, 1997, (17) 10:1300-1305.
- [8] Ryo Yasuhara, Shigeki Tokita, Junji Kawanaka, et al. Cryogenic temperature characteristics of Verdet constant on terbium gallium garnet ceramics[J]. Optics express, 2007, 15 (18):11255-11261.
- [9] 田宁军, 吴君毅, 于国萍.偏振光强自动检测系统软硬件的设计和研制[J]. 测控技术, 2007, 26(11):13-19.
- [10] 华南师范大学.偏振片转角自动检测与控制装置:中国, 02249112.0[P]:2003-10-22.
- [11] V I Belotelov, A K Zvezdin. Magneto-optical properties of photonic crystals[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2005, 22(1):286-292.
- [12] Helmut C Y Yu, Martijn A van Eijkelenborg, Sergio G Leon-Saval, et al. Enhanced magneto-optical effect[J]. Applied optics, 2008, 47(35):6497-6501.