

新型磁光调制器*

郭继华 朱兆明 邓为民

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

摘 要 介绍一种新型结构的磁光调制器。这种磁光调制器的显著优点是减小了磁光材料的温升, 从而减小了因温度效应引起的测量偏移。偏振角测量的实验表明, 其分辨力可达 3.3×10^{-7} rad, 长期稳定性偏差为 1.7×10^{-6} rad。

关键词 磁光调制器, 偏振角测量, 温度效应。

1 引 言

法拉第磁致旋光效应已经广泛应用于电学量和几何的精密测量^[1-3]。通常的单频干涉仪的分辨力难于突破 $3 \times 10^{-3} \lambda$; 外差干涉仪用分辨力为 0.01 度的相位计, 其分辨力难于突破 $3 \times 10^{-5} \lambda$; 而用磁光调制器的偏振干涉仪, 其分辨力可以突破 $1 \times 10^{-6} \lambda$ 。所以当分辨率要求特别高时, 偏振干涉仪成了首选设计。

磁光调制器常用结构如图 1 所示, 磁光介质放置于线圈内。这个结构虽然有磁场均匀而且比较强的优点, 但一个致命的缺点是由于温度

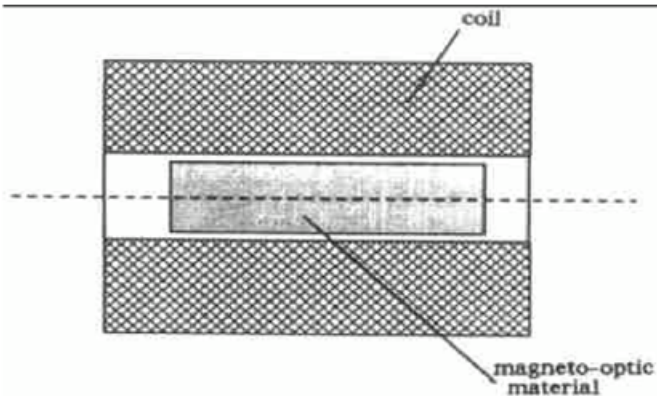


Fig. 1 Schematic of the traditional magneto-optic modulator

变化引起应力双折射及费尔德系数的变化, 产生很大的偏移, 影响测量的精度。磁光调制器本身就是一个热源, 温度的变化是难以避免的。采用费尔德系数大的磁光物质可以减小功耗, 从而减小温升^[4]。但是所有的费尔德系数大的材料应力双折射都大, 而且费尔德系数随温度的变化也大。目前难以打到更合适的材料。对磁光调制器进行热分析, 改善设计, 增加其向外热传导性能有一定作用, 但不能从根本上解决问题^[5, 6]。最近

谢广平等人^[3, 7]采用自动反馈控制的方法收到了较好的效果。这种反馈补偿的效率可达 97.2%, 即补偿后的残差仅为未补偿时的 2.8%, 补偿后的均方差为 1.75×10^{-6} rad。但这种反馈补偿的一个缺点是系统复杂。

我们最近设计了一个新型结构的磁光调制器, 这种磁光调制器结构是开放式的。实验表

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-06-01; 收到修改稿日期: 1998-10-05

明, 因温度效应引起的偏振角测量的测量偏移较小。由于不用反馈控制, 所以系统简单, 只是体积稍大。

2 新型磁光调制器的结构

改善磁光调制器的关键是减小磁光物质在工作时温度的变化。将磁光物质放置于线圈内, 由于线圈发热, 很难卓有成效地解决散热问题。最好的方法是将磁光材料置于线圈之外, 同时又置于磁场之中。这种新结构应尽可能引导线圈产生的磁场通过线圈外的磁光材料。初步的结构设计如图 2 所示。在两块大小相同的半椭圆形的磁性材料上绕以相同匝数的线圈, 通过相同的直流电流, 两磁性材料中产生均匀的对称磁场, 在轴线上形成均匀的同方向磁场。图 3 给出当线圈通 180 mA 直流电流时, 测得的轴线上的磁场强度分布。如果通以交变电流, 则磁场为交变磁场。

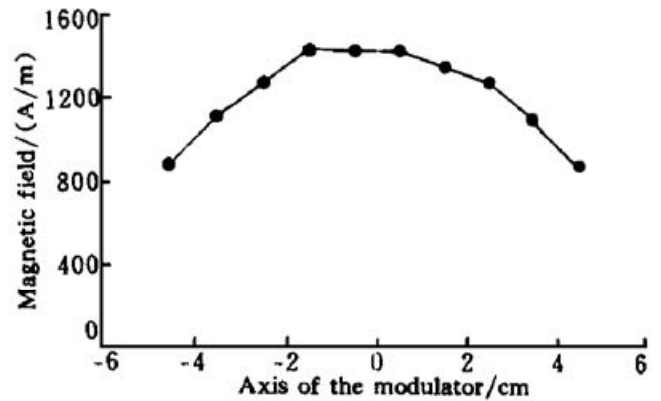
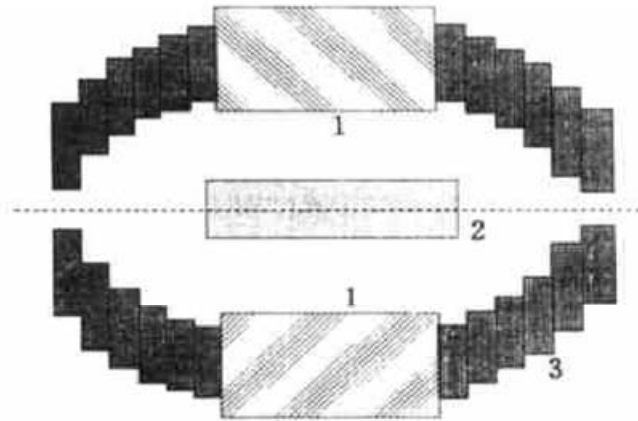


Fig. 2 Schematic of the new magneto-optic modulator.
1: coil, 2: magneto-optic material, 3: magnetic material

Fig. 3 Magnetic field along the axis of the magneto-optic modulator

这里, 用火石玻璃作为磁光物质, 玻璃棒长约 6 cm。

3 偏振角测量的实验

3.1 实验装置和原理

实验装置如图 4 所示。激光器(670 nm, 3 mW)发出的光束被准直和扩束后, 经过起偏器后变成线偏振光, 该线偏振光通过磁光调制器后偏振面受到交变调制, 然后通过放置于工作台上的检偏器, 聚焦于光电接收器上。光电探测器的输出信号送入锁相放大器(EG&G Model 5101), 锁相放大器直流输出由计算机采集和存储。

工作台的转角由转动臂(臂长为 2.5 cm)的位移来确定, 位移量的大小由 Millitron 测微仪(分辨率为 0.1 μm)来测量。1 μm 的位移量对应的角度变化为 4.0×10^{-5} rad。

设起偏器、检偏器的透光轴与纸面的夹角分别为 p 和 a 。磁光调制器的调制角度

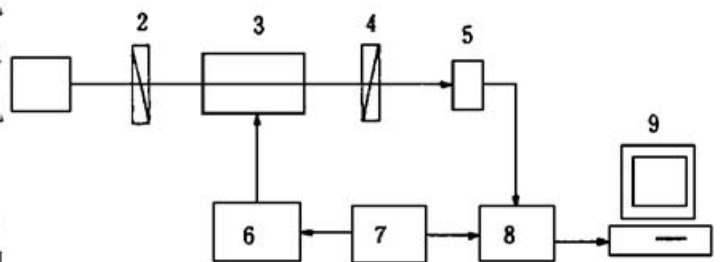


Fig. 4 Schematic setup for polarization test. 1: laser, 2: polarizer, 3: magneto-optic modulator, 4: analyzer, 5: photodetector, 6: power driver, 7: signal generator, 8: lock-in amplifier, 9: computer

$$\Phi = VLH_0 \sin(\Omega t) = M \sin(\Omega t),$$

V 为所用火石玻璃的费尔德系数, L 为玻璃棒的长度, H_0 为交变磁场的幅值, Ω 为调制角频率, M 为调制度。从起偏器透过的线偏振光的琼斯矢量为 $\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} \cos p \\ \sin p \end{bmatrix}$, 磁光调制器的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{G}_m = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix}.$$

检偏器的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} \cos^2 a & \cos a \sin a \\ \cos a \sin a & \sin^2 a \end{bmatrix}.$$

经过检偏器的出射光的琼斯矢量为:

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{G}_a \mathbf{G}_m \mathbf{E}_1 = \cos(p - a + \Phi) \begin{bmatrix} \cos a \\ \sin a \end{bmatrix}.$$

光电探测器接收到的光强为:

$$I = I_0 \mathbf{E}_2^* \mathbf{E}_2 = I_0 \cos^2(p - a + \Phi) = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos 2(p - a + M \sin \Omega t)].$$

如果 $p - a = \pi/2 + \varphi$, φ 为工作台的转角, 则

$$I = I_0 \left[\frac{1}{2} (1 - \cos \varphi) + 2\varphi J_1(2M) \sin \Omega t - \cos(2\varphi) J_2(2M) \cos(2\Omega t) + \dots \right]. \quad (1)$$

其中 J_n 为 n 阶贝塞耳函数。锁相放大器测量调制基频分量 I_Ω 。由于 M 和 φ 都很小, 所以

$$I_\Omega = 2I_0 J_1(2M) \varphi \approx 4I_0 M \varphi, \quad (2)$$

这样, 锁相放大器的直流输出电压正比于转角 φ 。

3.2 实验结果

图 5(a) 是锁相放大器的输出电压与 Millitron 测微仪读数的关系, 目的在于标定锁相放大器的直流输出与工作台转角的关系, 同时也可以检查仪器的测量范围和线性。锁相放大器的灵敏度设置在 10 mV 档。由图 5(a) 可得直线的斜率为 0.07055 V/ μm , 即 5.6×10^{-4} rad/V。在测量范围超过 5.8×10^{-4} rad 的情况下, 线性相关系数为 0.9996。

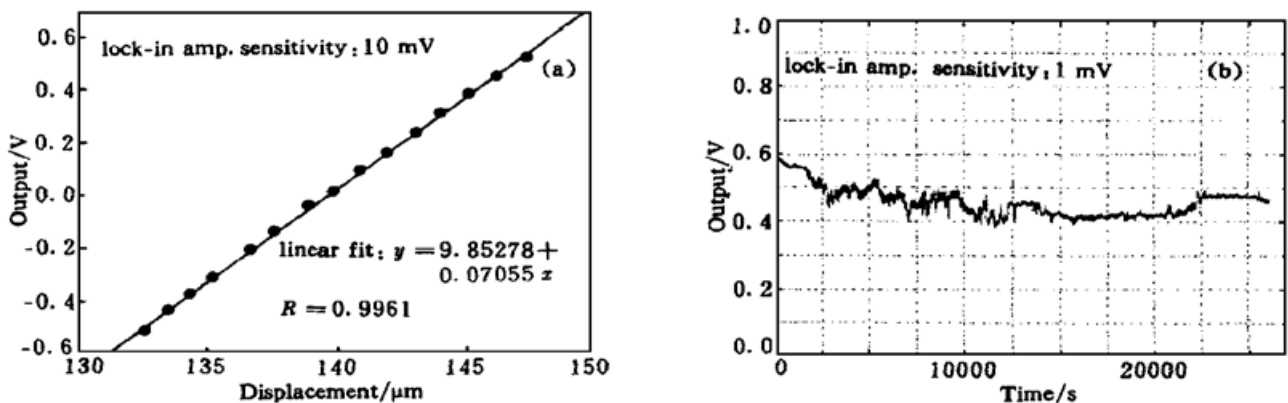


Fig. 5 (a) Linear relation between the output and the displacement, (b) Long-term drift of the output

图 5(b) 是当起偏器和检偏器固定不变的条件下, 锁相放大器输出电压随时间的波动情况。锁相放大器的灵敏度设置在 1 mV 档, 实验时间是 7.2 小时, 计算机每 5 秒钟记录一个电压值。对实验数据处理表明: 最后一个小时的标准偏差为 0.0058 V, 对应于 3.3×10^{-7} rad

的转角。这个值可以作为稳定后的测量灵敏度,它相当于 0.07 角秒。去掉一小时的预热时间,后面 6.2 小时测量数据的标准方差为 0.0295 V,对应于 1.7×10^{-6} rad 的测量误差。此值可以作为仪器的长期稳定性偏差。

4 讨论与结论

比较一下谢广平等^[7]的实验是非常有益的。他们的自动反馈补偿磁光调制实验装置和方法同本文一样。开机 30 分钟后,一小时的数据处理的标准方差为 1.75×10^{-6} rad,补偿系数为 97.2%。这说明如果不补偿,其旋光漂移超过 4.85×10^{-5} rad。而本文的开放结构的磁光调制器非常有效地解决了这一问题。开机一小时后,6.2 小时测量数据的偏差仅 1.7×10^{-6} rad,最后一小时的测量数据偏差仅 3.3×10^{-7} rad。应该指出,本文提出的这种磁光调制器虽然基本解决了线圈发热引起的旋光漂移,但是没有克服环境温度变化对磁光调制的影响。所以,应该在环境温度不大的情况下使用。

此外,这种磁光调制器已成功地应用在基于表面等离子体共振原理的微小角度测量中,测量分辨力已达 3.0×10^{-7} rad。关于微小角度测量系统将另文报道。

参 考 文 献

- [1] Tatam R P, Berwick M, Jones J D C *et al.*. Faraday effect magnetometry utilizing high Verdet constant glass. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(11): 864~ 866
- [2] 殷纯永, 陈计金, 方仲彦. 双光束自适应旋光准直系统. 清华大学学报, 1991, **31**(2): 55~ 60
- [3] 殷纯永, 谢广平, 成相印等. 滚转角测量方法的研究. 清华大学学报, 1996, **36**(10): 86~ 91
- [4] 刘公强, 刘湘林. 磁光调制和法拉第旋转测量. 光学学报, 1984, **4**(7): 588~ 591
- [5] 成相印, 方仲彦, 殷纯永等. 磁光调制器的热分析. 仪器仪表学报, 1997, **18**(1): 33~ 37
- [6] Duffy R M, Netterfield R P. Design of Faraday rotators and modulators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1984, **55**(5): 743~ 746
- [7] 谢广平. 违阿贝结构阿贝误差实时修正方法的研究. 清华大学博士学位论文, 1995.

A Novel Magneto-Optic Modulator

Guo Jihua Zhu Zhaoming Deng Weimin

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 1 June 1998; revised 5 October 1998)

Abstract A novel magneto-optical modulator is presented. This kind of modulator can effectively reduce the temperature rise and thus reduce the magneto-optical drift. Its performance is demonstrated in the polarization test, and the measuring resolution of 3.3×10^{-7} rad and the long-term stability error of 1.7×10^{-6} rad are achieved.

Key words magneto-optic modulator, polarization test, temperature effect.