

近红外可调式磁光隔离器*

虞志强 宋慧德 张冬喜 刘公强

(上海交通大学应用物理系)

刘湘林 傅方耀

(中国科学院上海冶金研究所)

提要: 研制了近红外可调式磁光隔离器。计算了亚铁磁性材料磁光旋转的色散关系;设计了可调式磁场系统。有效地改善了磁光晶体的温度特性,外界强磁场和时间老化等因素对磁光隔离器性能的影响;降低了晶体加工的精度要求,提高了磁光隔离器的实用价值。在入射光波长 $1.3\mu\text{m}$ 和室温条件($T\sim 25^\circ\text{C}$)下进行了器件性能测试,获得了正向插入损耗 $<1.8\text{dB}$,反向隔离比 $>29\text{dB}$ 的实验结果。

关键词: 磁光隔离器, Faraday 旋转器, 可调式磁场系统

Adjustable magneto-optical isolator in near-infrared region

Yu Zhiqiang, Song Huide, Zhang Dongxi, Liu Gongqiang

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Liu Xianglin, Fu Fangyao

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A new adjustable magneto-optical isolator in near-infrared region is reported. Based on the theoretical analysis an adjustable magnetic field system is designed for 45° Faraday rotator, getting a $1.0^\circ\sim 1.5^\circ$ adjustable region under the condition of saturation, by which the characteristics of magneto-optical isolator are improved effectively that are influenced by the temperature characteristics of magneto-optical crystal, strong external magnetic field, ageing effect of device and so on. The experimental results are obtained at $1.3\mu\text{m}$ and at room temperature ($T=25^\circ\text{C}$). Its insertion loss is less than 1.8dB and isolation is over 29dB .

Key words: magneto-optical isolator, Faraday rotator, modifiable magnetic field system.

一、引言

随着光纤通信和光信息处理等领域中研究工作的迅速发展,为了消除光纤端面以及光路中其它器件引起的反射波对激光源工作稳定性的干扰,提高光信号的长距离传输质量和系统可靠性,磁光隔离器的研制正引起人们的广泛重视。

磁光隔离器的工作原理是利用磁光效应的非互易原理来消除光路中反射波对激光源以及通信系统的影响。磁光隔离器的研制目标为:低正向插入损耗、高反向隔离比、温度特性好、时间稳定性好以及环境影响小、易集成化等。不少文献^[1,2]报道了工作波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ 的磁光隔离器在光纤通信领域中已取得了良好的应用结果。由于长波长光纤通信在实现长距离信号传输等方面的广阔应用前景,使得目前在 $1.3\ \mu\text{m}$ 工作波长范围近红外磁光隔离器的研究工作得到很大发展。

二、磁光隔离器的非互易原理

磁光效应的非互易特性就是指一束线偏振光通过介质时,当入射光的方向与介质中的磁化强度 M 的方向平行或反平行,则引起的磁光旋转的方向是不相同的。对于这种磁光效应的非互易原理以及相应磁光薄膜波导的非互易模式转换理论,有其严格的数学推导,这里只是给出一个较为直观的物理图像。下面结合图 1 来阐述磁光效应的非互易特性在磁光隔离器中的工作原理。

激光源输出的一束线偏振光沿 z 轴方向通过光轴平行于 x 轴的起偏器 P 之后,变成偏振面平行于 x 轴的线偏振光。再经过磁化强度 M (如图 1 所示)的磁光晶体(即 45° Faraday 旋转器)时,因为入射光方向与 M 一致,所以其偏振面按右手螺旋法则在 xy 平面内旋转 45° ,恰与检偏器 A 的光轴相一致,所以偏振光毫无阻拦(忽略介质本质的吸收)地通过检偏器 A 而输出。这就是入射光正向通过器件的情形。

反射光(或任何偏振状态的光波反向通过器件)的情形是:当如图 1 所示的反射光首先经过检偏器 A ,变为其偏振面在 xy 平面内偏 x 轴 45° 的线偏振光之后再入射到磁光晶体,因入射光方向与 M 反平行,所以偏振面按左手螺旋法则旋转 45° ,变成平行于 y 轴的方向。这样,从磁光晶体出射的偏振光其偏振面正与起偏器 P 的光轴相互垂直,处于消光位置。所以反射光被“消光”,器件起到了隔离作用。

由上述分析可知:

1. 作为 45° Faraday 旋转器的磁光晶体,其 45° 磁光旋转能否精确测定,将直接影响到器件的插入损耗和隔离比。当磁光旋转 θ 偏离 45° 时,若检偏器 A 与起偏器 P 夹角为 45° ,则将增加插入损耗;若检偏器 A 与起偏器 P 夹角为 $(45^\circ \pm \Delta\theta)$,则将使隔离比下降。因此,磁光晶体的厚度测定和加工成为器件研制中的一个重要环节。

2. 磁光晶体的温度特性,外界强磁场对磁化强度的影响,以及作为起偏器和检偏器的 Glan-Thompson 棱镜消光比的精度,也都将影响器件的插入损耗、隔离比和工作稳定性。

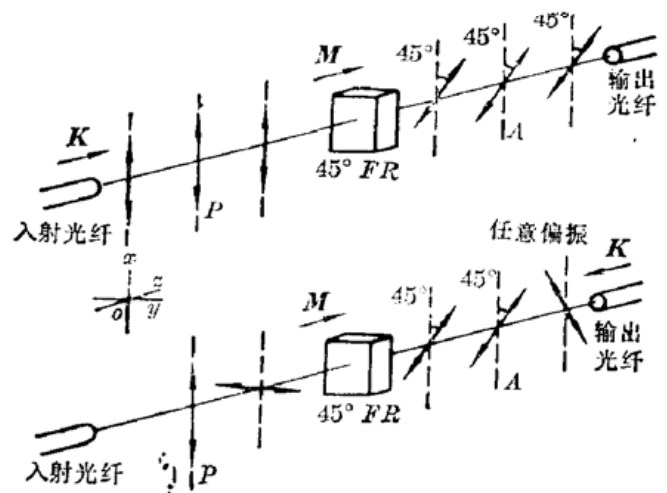


图 1 磁光隔离器中的非互易过程

三、可调式磁场系统的设计

由于构成非互易 45° Faraday 旋转器的 YIG 磁光晶体的温度特性,使得磁光晶体在不同环境温度下其磁光旋转有一定的变化,由此将引起器件的插入损耗增大和隔离比下降。并且,由于环境磁场或通信系统中其它强磁性体的影响,导致器件内磁场分布的变化, 45° Faraday 旋转器中的磁通量的变化,从而也将引起既定工作波长条件下磁光旋转的变化。为了有效地克服上述因素对器件性能稳定性的影响,根据对亚铁磁性材料磁光旋转的理论分析,进行了可调式磁场系统的设计。

根据 Lorentz 电子论的物理模型,从磁性介质中的电子运动方程出发,并结合有效场概念和在介质中光波所满足的 Maxwell 场方程组,可推出右、左旋圆偏振光折射率 N_+ , N_- 的表达式:

$$\left. \begin{aligned} N_+^2 - 1 &= \frac{\mu_0 N e^2 c^2 / m}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega - N e^2 / 3\epsilon_0 m - \frac{e\mu_0 H_i \omega}{m}} \\ N_-^2 - 1 &= \frac{\mu_0 N e^2 c^2 / m}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega - N e^2 / 3\epsilon_0 m + \frac{e\mu_0 H_i \omega}{m}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若忽略阻尼项 $i\gamma\omega$, 则由此可以推出亚铁磁性材料的磁光旋转表达式^[3]:

$$\theta = \frac{e\mu_0 L \lambda}{2mc} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot (H_e + \sum_i \nu_i M_i) \quad (2)$$

在正常色散区 ($\frac{dn}{d\lambda} < 0$), 可以解得:

$$\theta = \frac{e\mu_0 L}{mc} \cdot \left(\frac{a}{\lambda^2} + \frac{b}{\lambda^4} \right) \cdot (H_e + \sum_i \nu_i M_i) \quad (3)$$

(3) 式为忽略阻尼情况下亚铁磁性材料磁光旋转的色散关系, 式中 $(H_e + \sum_i \nu_i M_i) = H_i$, 即有效场; a, b 均为常系数。

由 (2) 式或 (3) 式可知: 在亚铁磁性材料中, θ 与 $(H_e + \sum_i \nu_i M_i)$ 成正比, 且随各 M_i 趋于饱

和而饱和。当 $\sum_i \nu_i M_i$ 饱和后再增加外磁场 H_e , 则 θ 将随 H_e 而变化。通常在磁光石榴石单晶(或薄膜)中满足 $\sum_i \nu_i M_i \gg H_e$, 表明对亚铁磁性磁光旋转的贡献主要来源于 $\sum_i \nu_i M_i$ 。这与实际情形是一致的^[3]。

根据亚铁磁性材料的磁光旋转 θ 主要正比于 $\sum_i \nu_i M_i$ 的特点, 设计了如图 2 所示的旋转型可调式磁场系统。将用作为 45° Faraday 旋转器的

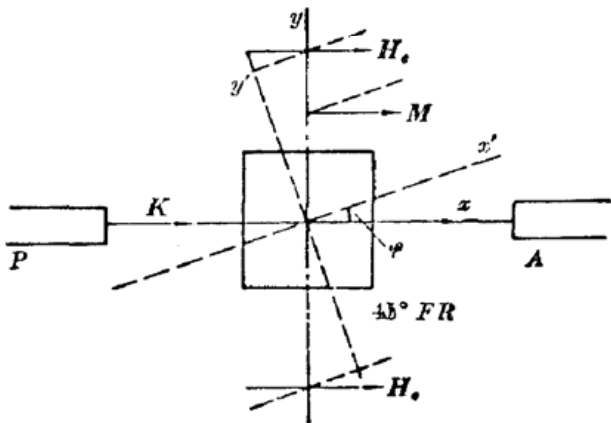


图 2 可调式磁场系统

YIG 磁光晶体置于磁场 H_e 内, 使其磁化强度处于饱和状态 M_s , 且光波的 K 和 H_e, M_s 均在 xy 平面内。由图 2 可知, 当入射光平行于 x 轴(亦即与磁场 H_e 平行)通过磁光晶体(MOC)时,

磁光旋转 θ 正比于 M_s 的数值大小; 当磁场 H_s 在 xy 平面内被旋转偏离 x 轴一个角度 φ , 则 M_s 的方向在 xy 平面内亦偏离 x 轴 φ 角度。此时入射光的 K 与 M_s 之间的夹角为 φ , M_s 在 x 轴上(亦即在 K 的方向上)投影为 $M'_s = M_s \cos \varphi$, 而磁光旋转 θ 则正比于 $M_s \cos \varphi$ 。于是就可以通过调节 φ 角来实现磁场可调, 从而在一定的范围内实现了非互易 45° Faraday 旋转器磁光旋转的可调性。

这种磁场可调的特点在于:

1. 磁场 H_s 使磁光晶体的磁化强度 M 完全处于磁饱和状态, 从而使磁光旋转 θ 处于饱和区。在调节过程中只是调节饱和磁化强度 M_s 在入射光方向上的投影, 而不是 M 的数值。这样, 保证了非互易 45° Faraday 旋转器在工作点处的稳定性。

2. 当磁场 H_s 的方向调节 φ 角时, 磁光旋转 θ 的变化仅为 $\theta \cos \varphi$ 。例如当 $\varphi = 15^\circ$ 时, 磁光旋转 θ 的变化约为 3%。这样对于一定的 θ 调节范围的要求, φ 的可调范围较大。由此对于可调式磁场系统的加工, 和调节范围的定量选择都带来了很大的便利。

上述可调式磁场系统, 经实验结果表明: 对于 45° Faraday 旋转器在磁饱和条件下磁光旋转 θ 获得了 1.5° 的最大调节范围, 足以满足磁光隔离器在实际应用中的要求。

四、实验结果

在如图 3 所示的测量精度为 $\pm 0.01^\circ$ 的近红外磁光旋转测试装置上, 用文献[4]上所报道的磁光调制倍频法测量了 YIG 磁光单晶的比 Faraday 旋转, 确定了 YIG 磁光单晶用作于 45° Faraday 旋转器所需的厚度。测量结果表明, 本文工作中所采用的 YIG 磁光单晶, 其比 Faraday 旋转为 $\sim 210^\circ/\text{cm}$ 。

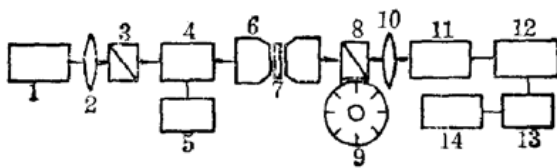


图 3 近红外磁光旋转测试装置

1—光源; 2—透镜; 3—起偏器; 4—磁光调制器; 5—信号发生器; 6—直流磁场; 7—样品; 8—检偏器; 9—测角仪; 10—透镜; 11—单色仪; 12—光电探测器; 13—放大器; 14—示波器

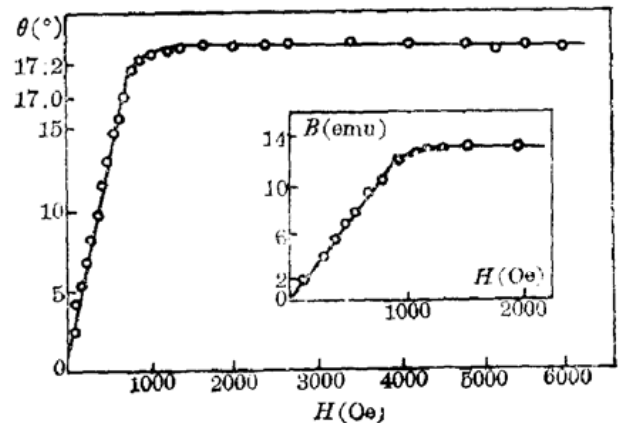
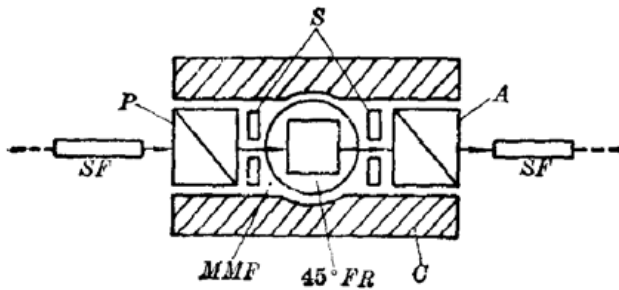


图 4 YIG 磁光单晶的 $\theta \sim H_s$ 关系

在图 3 所示的测试装置上还测量了 YIG 磁光单晶的 $\theta \sim H_s$ 曲线, 如图 4 所示。其中附图是 YIG 的磁化曲线。由图可知, 当 $H_s > 1200$ Oe 时, 磁光旋转 θ 随着 M (即 $\sum \nu_i M_i$) 趋于饱和而趋于饱和, 并且具有相似的饱和特性。这证明了前面理论分析中关于亚铁磁性材料的磁光旋转主要来源于 $\sum \nu_i M_i$ 的贡献的结论。

图 5 是近红外可调式磁光隔离器的示意图。在 $1.3 \mu\text{m}$ 入射光波长和室温 ($T \sim 25^\circ\text{C}$) 条件下进行了器件性能测试, 获得了正向插入损耗 $< 1.8 \text{ dB}$, 反向隔离比 $> 29 \text{ dB}$ 的实验结果。



SF—自聚焦棒状透镜；*P*—起偏器；
S—光闸；*A*—检偏器；
MMF—可调式磁场；*45°FR*—*45°*Faraday 旋转器；
C—壳体

图5 近红外可调式磁光隔离器示意图

参 考 文 献

- 1 Kohroh Kobayashi *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-16**(1), 11 (1980)
- 2 T. Tamaki *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **9**, 125 (1985)
- 3 刘公强, 吴蓓, *光学学报*, **8**(2), 105 (1988)

(上接第 26 页)

线示于图 6。假设其线型为高斯型函数, 则计算的脉宽 ~ 310 fs。

2. TSRS 光的频谱特性的观察

前向受激散射斯托克斯脉冲的瞬态光谱其典型值如图 7 中 (a), (b) 和 (c) 所示, 图中对应的泵浦光功率分别为 $\sim 1 \times 10^9$ W/cm², $\sim 2 \times 10^9$ W/cm² 和 $\sim 4 \times 10^9$ W/cm²。曲线明显的反应了其光谱随泵浦光功率变化的分裂情况。当泵浦功率增加时其中心光谱峰朝短波长方向产生微小的移动, 光谱宽度增加, 光谱线产生分裂结构。也观察了其向后散射的喇曼光的瞬态光谱, 实验发现其光谱特性与前向散射没有明显差异。

当在乙醇溶液中加入 $\sim 1 \times 10^{-5}$ M 的若丹明 6G 时, 实验中观察到前向散射的喇曼光的峰值光谱位置基本不变, 而后向散射的喇曼光的光谱峰值位置则朝短波长方向漂移了约 0.2~0.3 nm, 这时无无论前向散射还是后向散射的喇曼光谱均产生不对称的分裂。

参 考 文 献

- 1 R. S. Adrain *et al.*, *Opt. Commun.*, **15** (2), 290 (1975)
- 2 R. L. Carman *et al.*, *Phys. Rev. A*, **2** (1), 60 (1970)
- 3 R. L. Carman *et al.*, *Phys. Rev. A*, **5** (1), 341 (1972)
- 4 W. H. Lowdermilk, G. L. Kachen, *Appl. Phys. Lett.*, **27** (3) 133 (1975)