

采用菲涅尔菱体的高隔离度宽带光隔离器*

许贵宝 许心光 于晓强 杜晨林 王正平 王 东 邵宗书
(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要: 报道了一种新型的宽带、高隔离度的光隔离器, 采用菲涅尔菱体延迟器取代通常光隔离器中的 1/4 波片, 使其反向光隔离度高于 40 dB, 且在较宽波长范围内(约 300 nm)有效。

关键词: 物理光学; 光隔离器; 菱体型延迟器; 宽带器件

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

在光放大、激光干涉测量和双光子聚合等激光系统中, 光的反馈和背向散射会影响激光系统的稳定性, 导致激光输出功率的涨落。因此, 光隔离器作为一种非互易光学器件, 被广泛地应用在激光技术和光纤通信中^[1~5]。

通常激光系统中使用的光隔离器有两种, 一种是由 1/4 波片和偏振器组成; 另一种则是基于磁光效应的法拉第旋转器, 在光纤通信和集成光学中有着广泛的应用^[6~8]。这两种光隔离器存在着相同的缺点: 由于色散, 无法在可见波段所有波长都实现高的隔离度。近年来, 虽有关于宽带光隔离器的报道^[9], 但其隔离度偏低, 约在 20 dB 左右。

菱体型相位延迟器可以用作高度消色差的 $\lambda/4$ 延迟器, 国内外已有将其应用在光隔离器中的报道^[10, 11], 并对其工作原理作了较为详细的分析。本文在前人工作的基础上, 采用菲涅尔菱体取代 1/4 波片, 实现了在宽光谱范围内高效率的反馈光的隔离, 并对该隔离器的结构特点、性能参量作了较为详细的分析测试工作。

2 器件设计

菱体型延迟器结构简单, 性能稳定, 是具有适当接收角和高度消色差性能的 $\lambda/4$ 延迟器。我们采用最常见的菲涅尔菱体^[11]。当入射光束在菱体内侧面全反射时, 根据菲涅尔公式, 菱体内每次全反射所

引起的相位延迟可由下式得出:

$$\tan \frac{\Delta}{2} = \tan \left(\frac{\delta_p}{2} - \frac{\delta_s}{2} \right) = \frac{\cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

式中, n 为菱体材料的折射率, θ 为菱体内反射面上的人射角。当 $n \geq 1.496$ 时, 选取一定的 θ 值, 可使每次内全反射的相位延迟 Δ 等于 45° (即 $\pi/4$), 则菱体内的两次全反射会导致入射偏振光束的 $\pi/2$ 的相位延迟; 同时, 当入射光束偏振的方位角为 45° 时, 经菲涅尔菱体内全反射后, 平面线偏光将变成平面左旋(或右旋)圆偏光。再选择一个质量较好的格兰-泰勒棱镜, 便可完成光隔离器的设计。

为了使偏振光束的相位延迟不随材料的双折射改变, 制造菱体的材料必须是光学均匀的和各向同性的。鉴于此, 我们选用最常见的 K9 光学玻璃来制作菱体延迟器, 同时根据实验室常用激光波长范围, 选取激光波长为 760 nm 来进行数值计算, 以设计从 532 nm 到 1064 nm 宽波段的光隔离器。

根据公式(1), 以及对 K9 玻璃折射率的拟合, 我们计算出当菱体内两次全反射引起的相位延迟为 $\pi/2$ 时, 菱体的锐角可以有两个取值, 48.5° 和 54.7° 。考虑到偏振光束存在一定的发散角, 以及改变激光系统波长时隔离器的易调节性, 我们分析了当偏振光束在小角度范围内改变入射角时, 相位延迟和入射内角改变量 $\Delta\theta$ 之间的关系, 以及在不同的菱体锐角下, 菱体的消色差性能。具体计算方法参见参考文献^[10, 11]。通过分析, 我们发现当菱体锐角为 54.7° 时, 相位延迟随入射内角改变量的变化较为平缓, 且消色差性能较好。

另外, 需要指出的一点是: 光束在经过菱体延迟

* 国家重点基础研究计划(G1998061402)资助课题。

E-mail: guibao@icm.sdu.edu.cn

收稿日期: 2002-07-10; 收到修改稿日期: 2002-11-29

器后存在一个光束平移, 平移量的大小 d 可根据几何光学计算得出:

$$d = 2h \sin \theta, \quad (2)$$

式中, h 为菱体延迟器的宽度, θ 为菱体内全反射的入射内角。

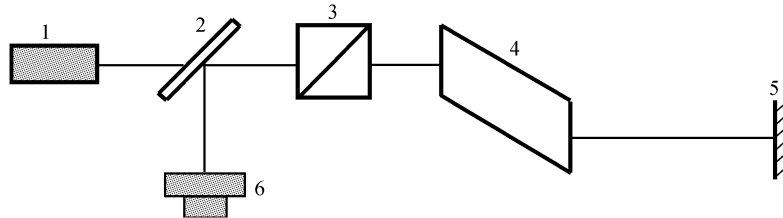


Fig. 1 Schematic of the experiment on measurement of a degree of optical isolation. 1: laser; 2: beam-splitter; 3: Glan-Taylor prism; 4: Fresnel rhomb retarder; 5: highly reflective mirror; 6: photodiode

从激光器 1 出射的光束经分束器 2 后, 再通过格兰-泰勒棱镜 3 变成平面偏振光, 经菱体型延迟器 4 后, 产生 $\pi/2$ 相位延迟, 变成左旋(右旋)圆偏光; 经反射镜 5 反射时, 由于存在半波损失, 左旋(右旋)圆偏光变成右旋(左旋)圆偏光。反射光反向通过菱体型延迟器后, 光束偏振方向相对于与原入射光束转过 90° 方位角, 无法反向通过起偏棱镜, 从而实现光束的反向隔离。

当入射光束的波长改变时, 只须改变菱体延迟器的方位, 即让平面偏振光束在菱体的前端面上斜入射, 以改变菱体内全反射时的入射角, 来调和波长变化时菱体折射率 n 的变化, 使得菱体内两次全反

3 实验测试

我们选取菱体锐角为 54.7° 加工了四块菲涅耳菱体型延迟器, 并进行了光隔离度和通光效率的实验测试, 实验装置如图 1 所示。

射产生的相位延迟仍然等于 $\pi/2$, 便可实现在其他波长下的光的反向隔离。

隔离度可以采用下式定义:

$$K = -10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \text{ (dB)}, \quad (3)$$

式中, I_1 为经菱体延迟器后, 入射到反射镜的光强, I_2 为反向通过光隔离器的光强, 由光电二极管测量, 并考虑分束器的反射率后得到。

测试时, 先调节起偏棱镜使光束偏振方向与入射面成 45° , 然后调节菱体型延迟器以改变光束入射角度, 就可以实现不同波长下的光的反向隔离。实验结果见表 1。

Table 1 Measurement of broad-band optical isolator

Wavelength /nm	Degree of optical isolation /dB				Transmittance /%			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
515	40.72	40.38	40.63	40.32	88.37	87.60	89.84	87.69
633	41.26	42.53	41.07	41.71	87.73	87.29	87.43	88.20
730	42.45	43.06	42.27	41.32	93.02	94.70	91.38	93.27

同时, 我们在表 1 中三个波长下对采用 $1/4$ 石英波片的光隔离器作了相同的测试, 采用的 $1/4$ 波片的规格分别为: $515 \text{ nm}; \phi 15 \text{ mm}, d=1519 \mu\text{m}$; $633 \text{ nm}; \phi 15 \text{ mm}, d=1486 \mu\text{m}$; $730 \text{ nm}; \phi 15 \text{ mm}, d=1437 \mu\text{m}$ 。测试结果见表 2。

Table 2 Measurement of commonly optical isolator

Wavelength/nm	Degree of optical isolation /dB	Transmittance/%
515	19.60	87.60
633	18.42	88.52
730	16.44	92.89

由测试结果可以看出, 我们设计的光隔离器可以使反馈光的剩余透射降低两个数量级, 即将隔离

度从约 20 dB 提高到约 40 dB, 且有很宽的高隔离度的波长范围; 并且菱体延迟器的透过率与 $1/4$ 波片的透过率相当。这种光隔离器有着较大的实用价值。

根据由偏振器和相位延迟器组成的光隔离器的工作原理可以得出: 在使用相同的偏振器的情况下, 隔离器的性能完全取决于相位延迟器性能的优劣。对于通常所使用的 $1/4$ 石英波片, 由于机械加工精度的影响和色散的关系, 其延迟效果并不理想; 虽然可以采用倾斜波片的办法提高相位延迟的精确度, 但这种方法比较笨拙, 并且对于波长需要连续调节的激光系统来讲, 其调节范围太窄。而对于菱体延迟器来讲, 其本身就是高度消色差的相位延迟器, 并

且在连续调节全反射入射内角的情况下,可非常容易地不同波长下较为精确地达到 $\pi/2$ 的相位延迟;从而使整个隔离器在比较宽的波长范围内具有较好的隔离效果。

结论 本文在前人工作的基础上设计并测试了一种新型的光学隔离器,采用菱体型延迟器取代通常使用的光隔离器中的 $1/4$ 波片,从而实现高效率 and 宽光谱范围的光的反向隔离。其隔离度大于 40 dB,高于通常使用的 $1/4$ 波片光隔离器(约 20 dB)和商品化的磁光隔离器(约 30 dB)。同时,这种光隔离器具有成本低、制作简单、性能稳定、调节方便等优点,有很高的实用价值。其缺点是光束通过菱体延迟器后存在一个光束平移,可能对某些激光系统造成不便。

参 考 文 献

- 1 Chun M K, Goldberg L, Weller J R. Second harmonic generation at 421 nm using injection-locked GaAlAs laser array and KNbO₃. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(13): 1170~1171
- 2 Kozlovsky W J *et al.*. Generation of 41 mW of blue radiation by frequency doubling of a GaAlAs diode laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(23):2291~2292
- 3 Freitag I, Golla D, Knoke S *et al.*. Amplitude and

- frequency stability of a diode-pumped Nd:YAG laser operating at a single-frequency continuous-wave output power of 20 W. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5):462~464
- 4 Yu Guohua, Liu Shuihua, Fang Luozhen *et al.*. Analysis on insertion loss and backward isolation of wedge-type polarization-independent optical isolator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8): 1108~1112 (in Chinese)
- 5 Liu Qingju, Lin Lizhong. An optical isolator using a new type prism. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8):1130~1133 (in Chinese)
- 6 Sakaguchi S, Sugimoto N. Multilayer films composed of periodic magneto-optical and dielectric layers for use as Faraday rotators. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(1~3):64~70
- 7 Bahlmann N *et al.*. Nonreciprocal coupled waveguides for integrated optical isolators and circulators for TM-mode. *Opt. Commun.*, 1999, **161**(4~6):330~337
- 8 Lohmeyer M *et al.*. Integrated magneto-optic cross strip isolator. *Opt. Commun.*, 2001, **189**(4~6):251~259
- 9 Hariharan P, Ciddor P E. Broad-band optical isolator. *Opt. Laser Technol.*, 1997, **29**(2):83~84
- 10 Lin Lihuang, Chen Shisheng, Liang Xiangchun *et al.*. Experimental investigation on the Fresnel rhomb optical isolator. *J. Lasers* (激光), 1979, **6**(11): 33~38 (in Chinese)
- 11 Palik E D. The use of polarized infrared radiation in magneto-optical studies of semiconductors. *Appl. Opt.*, 1963, **2**(5):527~539

High Isolation Broadband Optical Isolator with Fresnel Rhomb

Xu Guibao Xu Xin'guang Yu Xiaoqiang Du Chenlin

Wang Zhengping Wang Dong Shao Zongshu

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan 250100)

(Received 10 July 2002; revised 29 November 2002)

Abstract: A new-type broadband, high-isolation optical isolator with Fresnel rhomb to replace $1/4$ wave plate is reported. Its degree of optical isolation is greater than 40 dB, and it is effective in a wide range of wavelengths.

Key words: physical optics; optical isolator; rhomb retarder; broadband components