

## 偏振无关的旋光双反射结构的实验研究\*

赵顾颢<sup>1)†</sup> 赵尚弘<sup>1)</sup> 么周石<sup>2)</sup> 郝晨露<sup>3)</sup> 蒙文<sup>1)</sup> 王翔<sup>1)</sup> 朱子行<sup>1)</sup> 刘丰<sup>2)</sup>

1) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

2) (中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

3) (空军工程大学防空反导学院, 西安 710077)

(2013年1月21日收到; 2013年3月13日收到修改稿)

完成了偏振无关双旋光晶体双反射结构的实验研究. 根据其偏振补偿特点对双旋光晶体双反射结构进行简化, 提出了一种偏振无关的单旋光晶体双反射结构. 实验表明, 两种反射结构的偏振保持度均能达到 99.97% 以上. 作为对比, 分别测试了单个反射镜反射  $90^\circ$  和两个反射镜反射  $90^\circ$  时的输出光偏振态. 该条件下, 无保偏处理的反射镜的偏振保持度分别只有 92.1% 和 76.2%.

关键词: 偏振态, 偏振无关反射, 旋光晶体

PACS: 42.25.Ja, 77.22.Ej

DOI: 10.7498/aps.62.134201

## 1 引言

保持光子偏振态的稳定对于很多以光为载体的空间光通信系统都有重要的意义. 例如, 在相干光通信中, 接收端输入信号的偏振态必须与本振信号偏振态相匹配<sup>[1,2]</sup>, 否则将会引入偏振噪声<sup>[3]</sup>; 在空间量子密钥通信系统<sup>[4,5]</sup>中, 偏振态变化引入的量子误码会直接影响密钥分发系统的安全性<sup>[6,7]</sup>. 在实际的星载空间光通信系统中需要大量的反射镜<sup>[8]</sup>, 然而根据偏振光学原理, 反射镜将会改变光子的偏振态. 为了抵消这种偏振态的变化, 通常的做法是在反射镜上镀多达数十层的偏振无关的膜系结构<sup>[9]</sup>. 然而对于需要在星上运行的膜系结构而言将遇到以下三个困难: 1) 复杂的膜系结构必须能够承受航天器发射和运行过程中的应力变化<sup>[10]</sup>; 2) 膜系结构应当能够在长时间的空间辐照下保持性能稳定; 3) 在精跟踪状态下反射镜需要随时改变反射角, 因此膜系结构必须在反射角变化时依然保持稳定的偏振无关特性. 所以, 从提高系统稳定性, 延长运行时间以及降低系统复杂度等角度来看, 需要

特别为偏振敏感的星载光学系统设计一套新的偏振无关反射结构.

文献 [11] 中提出了一种基于双旋光双反射的偏振无关反射结构, 并在理论上对其进行了分析研究. 本文又提出了一种简化的单旋光双反射方案, 并在实验中验证了两种反射结构的偏振特性.

## 2 单旋光双反射方案

文献 [11] 中的双旋光双反射结构如图 1(a) 所示, 其中入射光  $O$  经过反射镜  $m_1$  和  $m_2$  的反射, 出射光  $Q$  与  $O$  之间夹角为  $90^\circ$ . 其中两面反射镜采用同样的材料, 且两个入射角分别为  $\theta_1 = \theta_2 = \frac{3}{8}\pi$ .  $A_1$  和  $A_2$  分别表示两个旋光角为  $90^\circ$  的旋光晶体, 其琼斯矩阵可以表示为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中第三行表示沿光束传播方向的偏振分量.

\* 中国空间技术研究院科技委员会发展研究项目 (批准号: 2011WK11) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zghlupin@163.com

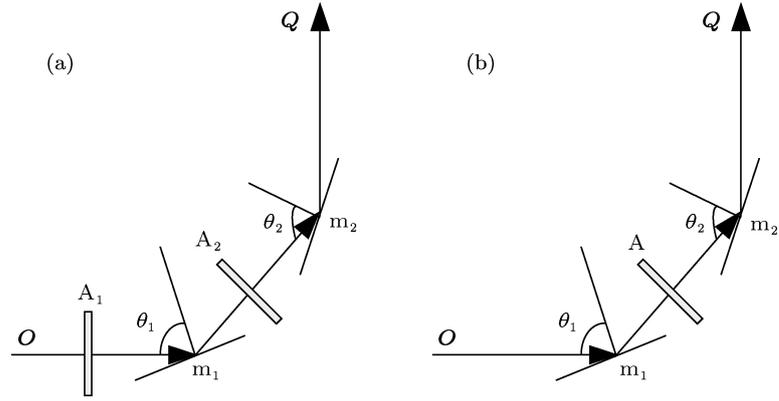


图1 双旋光-双反射结构 (a) 及单旋光-双反射结构 (b) 示意图

此时出射光的偏振态可以表示为

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E_{op} \\ E_{os} \\ 0 \end{bmatrix} &= J_{sp2} A_2 J_{sp1} A_1 \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -r_{p2}r_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{p1}r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} = -r_p r_s \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中  $A_1$  和  $A_2$  分别表示两个旋光晶体的琼斯矩阵,  $J_{sp1}$  和  $J_{sp2}$  表示两个反射镜的偏振特性. 在旋光晶体旋光角为  $90^\circ$ , 反射镜偏振特性完全相等

$$\left( J_{sp1} = J_{sp2} = \begin{bmatrix} r_p & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

的理想条件下, 输出光  $Q$  的偏振态与入射光  $O$  完全一致. 不难看出, 被  $m_1$  反射的光束经过  $A_2$  晶体后其偏振态旋转了  $90^\circ$ <sup>[11]</sup>, 由于  $m_2$  与  $m_1$  的偏振特

性完全相同, 在第二次反射中光束的偏振态变化被  $m_2$  完全自动补偿. 而  $A_1$  的主要作用是将反射光旋转  $90^\circ$ , 使得反射光偏振态与入射光偏振态完全相等. 因此当移除  $A_1$  晶体时, 并不影响该结构对反射镜偏振特性的补偿, 只是反射光偏振态与入射光偏振态正交, 这对于实际系统而言只需要采用预调制技术即可对其进行补偿. 因此可以对该结构进行简化, 简化后的结构图如图 1(b) 所示. 该结构下的理想偏振输出可表示为

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} E_{op} \\ E_{os} \\ 0 \end{bmatrix} &= J_{sp2} A J_{sp1} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -r_{p2}r_{s1} & 0 \\ r_{p1}r_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} = r_p r_s \begin{bmatrix} -E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

### 3 实验研究

为了测试图 1 所提反射结构的偏振特性, 我们准备了两个  $90^\circ$  旋光晶体和两只镀金的反射镜进行该实验, 其中旋光晶体的插入损耗为 0.17 dB. 实验选用了 1550 nm 的偏振输出激光器. 偏振态测试使用的是 thorlabs 的 PAX5700 偏振测试仪. 在实验中使用偏振测试仪的统计功能, 即在 10 s 内进行 333 次测试, 并进行统计平均. 每个测试项目取绝对偏差在 0.02 以内的 7 组结果, 其中偏振方位角和椭圆度分别对应仪器输出的 center azimuth 和 center ellipticity 项. 图 2 是激光器和双旋光双反射结构的输出偏振态. 其中双旋光双反射结构输出的结果中有两个坐标同为 (50.6, -0.31) 的点, 故仅能显示 6 个点. 图 3 为单个旋光晶体以及单旋光双反射结构的输出偏振态.

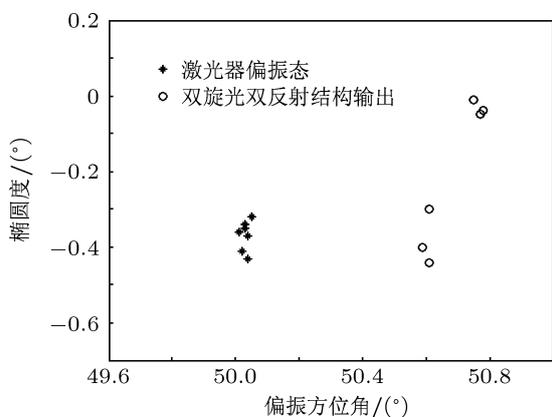


图 2 激光器和双旋光双反射结构的输出偏振态

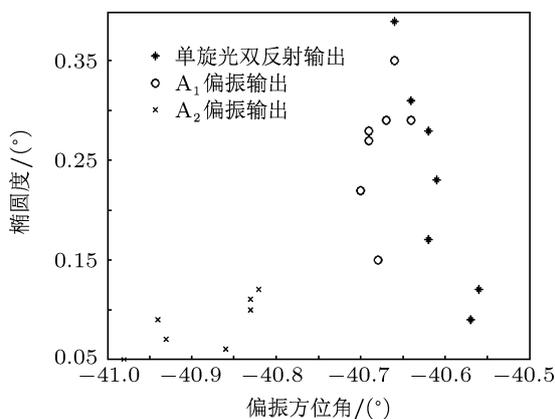


图 3 旋光晶体和单旋光双反射镜结构的偏振输出

作为对比, 我们同时测试了单面反射镜和两面反射镜完成  $90^\circ$  反射时的反射光偏振态. 由于反射镜没有做保偏处理, 因此反射光的偏振态变化较大. 图 4 为两种情况下  $90^\circ$  反射的输出光偏振态.

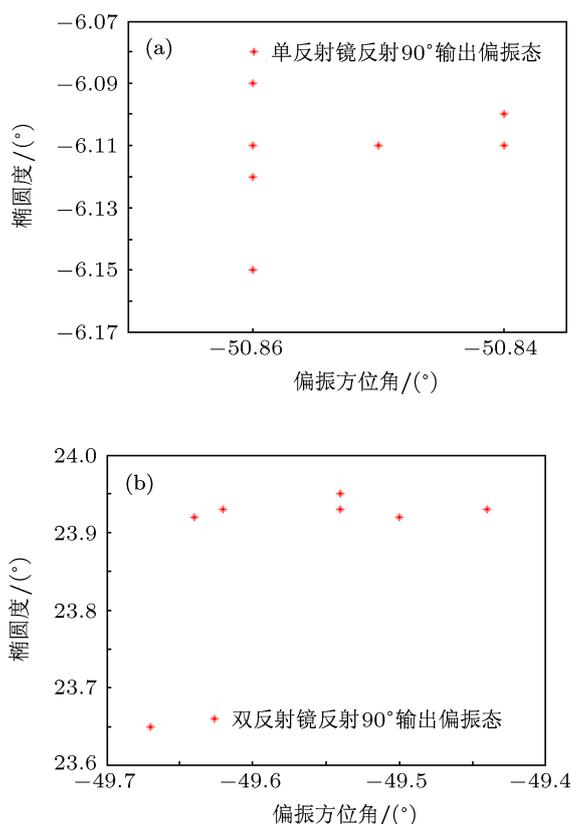


图 4 单反射镜 (a) 和双反射镜 (b) 反射  $90^\circ$  的偏振态输出

偏振测试仪的输出结果是以邦加球的形式给出的, 为了更直观地表示旋光晶体的旋光特性以及两个反射结构的偏振保持特性, 我们在计算时将偏振态全部转换成琼斯矢量的形式. 衡量旋光晶体的旋光特性时以偏振态旋转  $90^\circ$  为标准, 将归一化的输出光偏振态投影在归一化的标准  $90^\circ$  旋光偏振态上, 所得结果的平方定义为旋光度旋光度可以表示为

$$p = \left( \frac{E_{os} \cdot E_s + E_{op} \cdot E_p}{\sqrt{(E_{os}^2 + E_{op}^2)(E_s^2 + E_p^2)}} \right)^2, \quad (5)$$

其中  $E_{op}$  和  $E_{os}$  表示光束被标准  $90^\circ$  旋光后的水平偏振分量和垂直偏振分量,  $E_p$  和  $E_s$  表示经过旋光

晶体的光束偏振态的水平和垂直分量. 图 5 为两个旋光晶体的旋光度. 从结果中可以看出, 两个旋光晶体旋光度均在 99.98% 以上. 这说明旋光晶体能够很好地将光子的偏振态旋转  $90^\circ$ . 类似的, 定义双旋光双反射结构的输出光偏振保持度为反射光偏振态在入射光偏振态上的投影的平方. 而对于单旋光双反射结构而言, 理论上反射光偏振态与入射光偏振态相互垂直, 因此, 其偏振保持度定义为反射光偏振态在与入射光正交的偏振态上的投影的平方. 图 6 中是两种反射结构的偏振保持度. 两个反射结构的偏振保持度均在 99.97% 以上, 相比之下, 双旋光双反射结构的偏振保持度略高一些. 经过分析我们认为这是由于当反射镜较为可靠地使用同一材料制作时, 单旋光双反射结构的偏振补偿特性完全取决于旋光晶体 A 的旋光性能. 而双旋光双反射结构中的反射光偏振态受到两个旋光晶体的共同控制, 当其中一个晶体的旋光特性不理想时, 另一个晶体可以对其进行一定的补偿, 因此其偏振保持度相对较高.

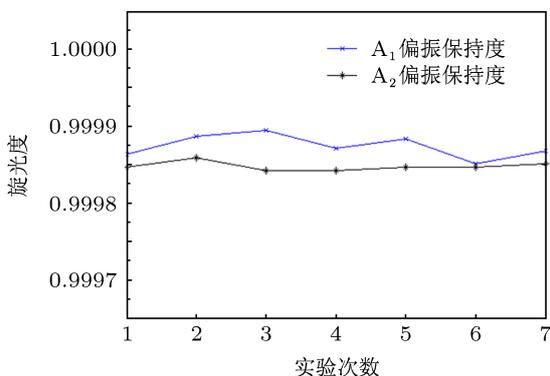


图 5 旋光晶体的旋光度

作为对比, 图 7 给出了经过一次反射和经过两次反射后的反射光偏振态 (反射光与入射光的夹角为  $90^\circ$ , 两次反射时, 两面反射镜上的入射角相等). 单反射镜的偏振保持度在 92.1% 左右, 而双反射镜的偏振保持度仅为 76.2% 这说明: 1) 反射镜在不做偏振无关处理的情况下, 反射光的偏振态变化较大; 2) 当要求的入射光和出射光矢量之间的夹角一定时, 之间经过的反射镜越多, 偏振态变化越大. 由此可见, 直接利用没有进行偏振处理的反射镜进行偏振敏感的光学实验是不可能的. 而在一些复杂的通信系统, 例如相干光通信系统中, 光束甚至需要被多次反射. 这时, 输出光的偏振态将被破坏, 影响通

信的性能.

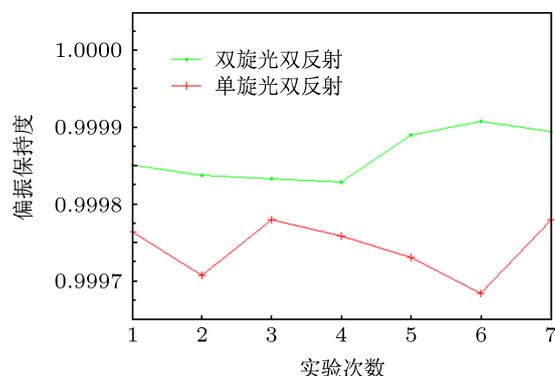


图 6 两种反射结构的偏振保持度

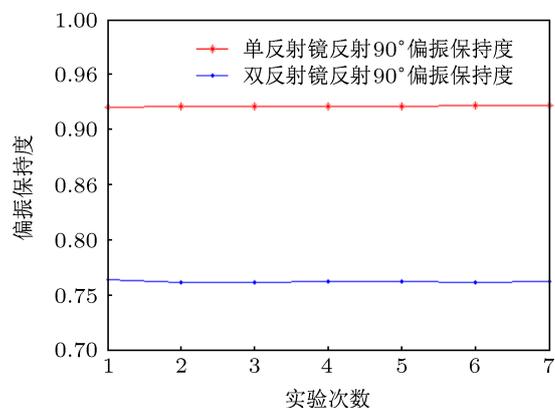


图 7 只用反射镜时偏振态保持度

## 4 结论

本文报道了双旋光双反射结构和单旋光双反射结构的  $90^\circ$  反射实验, 获得两种反射结构的偏振保持度均在 99.97% 以上. 同时, 作为对比, 测试了单个反射镜反射  $90^\circ$  和两个反射镜反射  $90^\circ$  时的偏振态输出, 其偏振保持度只有 92.1% 和 76.2%. 实验数据表明不做偏振处理的反射镜对光子的偏振态的改变非常大, 而利用旋光晶体进行补偿的反射结构的输出光偏振态保持度提高了 23.77%.

值得注意的是该结构中包括旋光晶体在内的所有器件均在实际的卫星系统中经历过太空环境的考验. 并且, 该方案中反射镜不需要镀复杂的保偏膜系结构, 这样在卫星的发射和运行过程中可以最大程度的延长设备的使用寿命. 因此旋光双反射结构非常适合偏振敏感的星载光学系统.

- [1] Yan H, Guifang L 2005 *Opt. Express* **13** 2761
- [2] Guo Z, Wen G Q, Zhang H X, Chen X W, Liu T G 2012 *Infrared and Laser Engineering* **41** 54 [郭振武, 温国, 张红, 陈信, 刘铁根 2012 红外与激光工程 **41** 54]
- [3] Rodler H, Ebberg A, Gaukel G, Noll B, Wittmann J, Auracher F 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 10
- [4] Ursin R, Tiefenbacher F, Schmitt M T, Weier H, Scheidl T, Lindenthal M, Blauensteiner B, Jennewein T, Perdigues J, Trojek P, Ömer B, Fürst M, Meyenburg M, Rarity J, Sodnik Z, Barbieri C, Weinfurter H, Zeilinger A 2007 *Nat. Phys.* **3** 481
- [5] Schmitt M T, Weier H, Fuerst M, Ursin R, Tiefenbacher F, Scheidl T, Perdigues J, Sodnik Z, Kurtsiefer C, Rarity J G, Zeilinger A, Weinfurter H 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 010504
- [6] Zhao G H, Zhao S H, Yao Z S, Meng W, Wang X, Zhu Z H, Liu F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240306 (in Chinese) [赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 蒙文, 王翔, 朱子行, 刘丰 2012 物理学报 **61** 240306]
- [7] Chen J, Li Y, Wu G, Zeng H P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5243 [陈杰, 黎遥, 吴光, 曾和平 2007 物理学报 **56** 5243]
- [8] Renny F, Carl L, Robert W, Josef W, David K, John J, Brian H, Gerd M, Wayne S, Uwe S, Ralph K, Rolf M 2010 *IEEE T. Geosci. Remote.* **48** 2
- [9] Macleod H A 2002 *Thin-film Optical Filters* (3rd Edn.) (London: institute of Physics Publishing) p368
- [10] Xiucan G, Weiquan F, Huiming Z, Lipo Y, Shupeng L, Tengfei M 2011 *Spacecraft Environment Engineering* **28** 332
- [11] Zhao G H, Zhao S H, Yao Z S, Meng W, Wang X, Zhu Z H, Liu F 2012 *Chinese Journal of Lasers* **39** 1018001 [赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 蒙文, 王翔, 朱子行, 刘丰 2012 中国激光 **39** 1018001]

# Experimental study on polarization-independent reflector structure based on magneto-optical crystal and two mirrors\*

Zhao Gu-Hao<sup>1)†</sup> Zhao Shang-Hong<sup>1)</sup> Yao Zhou-Shi<sup>2)</sup> Hao Chen-Lu<sup>3)</sup>  
Meng Wen<sup>1)</sup> Wang Xiang<sup>1)</sup> Zhu Zhi-Hang<sup>1)</sup> Liu Feng<sup>2)</sup>

1) (School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

2) (Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China)

3) (School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 21 January 2013; revised manuscript received 13 March 2013)

## Abstract

The experimental demonstration of polarization-independent reflection structure that consists of two magneto-optical crystals and two mirrors is reported. According to the characteristics of polarization compensation, the reflection structure was simplified in this paper. A single magneto-optical crystal and two mirrors reflection structure is presented to simplify the polarization-independent reflection structure. The experiment shows that the degrees of polarization maintenance of the two reflection structures are both higher than 99.97%. By way of contrast, the polarization states of 90° reflection laser of single mirror and two mirrors are measured. Under these conditions, the degrees of polarization maintenance of mirrors are 92.1% and 76.2%, respectively.

**Keywords:** polarization state, polarization independent reflection, magneto-optical crystal

**PACS:** 42.25.Ja, 77.22.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.62.134201

\* Project supported by the China Academy of Space Technology Committee on science and technology development (Grant Nos: 2011WK11).

† Corresponding author. E-mail: zghlupin@163.com