

双旋光双反射结构的温度-辐射自稳定性原理和实验研究

赵顾颢 毛少杰 赵尚弘 蒙文 祝捷 张小强 王国栋 谷文苑

Principle and experimental study of self-stability of reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors under effect of temperature and radiation

Zhao Gu-Hao Mao Shao-Jie Zhao Shang-Hong Meng Wen Zhu Jie Zhang Xiao-Qiang Wang Guo-Dong Gu Wen-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 164202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190429

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190429>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可实现偏振无关单向传输的二维硅基环形孔光子晶体

Two-dimensional silicon annular photonic crystals for realizing polarization-independent unidirectional transmission

物理学报. 2019, 68(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181397>

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状

Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources

物理学报. 2016, 65(1): 010702 <https://doi.org/10.7498/aps.65.010702>

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

物理学报. 2015, 64(23): 237802 <https://doi.org/10.7498/aps.64.237802>

铯原子激发态双色偏振光谱

Investigation of the two-color polarization spectroscopy between the excited states based on cesium atoms

物理学报. 2019, 68(11): 113201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181872>

低双折射光纤中拉曼增益对光偏振态的影响

Effect of Raman gain on the state of polarization evolution in a low-birefringence fiber

物理学报. 2015, 64(3): 034212 <https://doi.org/10.7498/aps.64.034212>

电子自旋辅助实现光子偏振态的量子纠缠浓缩

Quantum entanglement concentration for photonic polarization state assisted by electron spin

物理学报. 2017, 66(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.240301>

双旋光双反射结构的温度-辐射自稳定性 原理和实验研究*

赵 顾 颖^{1)2)†} 毛 少 杰¹⁾ 赵 尚 弘³⁾ 蒙 文³⁾ 祝 捷²⁾
张 小 强²⁾ 王 国 栋³⁾ 谷 文 苑³⁾

1) (空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京 210007)

2) (空军工程大学空管领航学院, 西安 710077)

3) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2019 年 3 月 27 日收到; 2019 年 5 月 15 日收到修改稿)

推导了双旋光双反射结构的反射光偏振态方程, 仿真了在环境影响下的反射光偏振态变化情况, 发现双旋光双反射结构的偏振无关反射自稳定性. 从温度和辐射两个方面实验验证了双旋光双反射结构的偏振无关反射自稳定性. 实验结果表明, 当温度在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化时, 双旋光双反射结构反射光的平均偏振保持度都能够达到 99.77%; 当对光学元件进行 400 Gy 的辐照后, 平均偏振保持度也能够达到 99.35%. 双旋光双反射结构能够在辐射和高低温环境的影响下依靠这种自稳定性保持较高的偏振无关反射能力, 有可能成为星基光学通信系统保偏反射元件的新选择.

关键词: 偏振态, 偏振无关反射, 温度, 辐射

PACS: 42.25.Ja, 77.22.Ej

DOI: 10.7498/aps.68.20190429

1 引 言

星基光通信技术^[1,2]和星基量子通信技术^[3,4]是未来全球高速通信网和保密通信网的基本实现手段. 捕获、跟踪、瞄准子系统 (acquisition, tracking and pointing, ATP) 是星基光学通信系统的重要子系统^[5,6], 其通过反射镜控制光束的出射方向, 进而完成光链路的对准和稳定. 根据偏振光学原理, 普通的反射镜会改变光子的偏振态^[7,8]. 为了抵消反射镜造成的这种光子偏振特性变化, 通常需要对反射镜进行镀膜处理. 然而这种膜系结构必须接受来自空间环境中的辐射^[9,10]和温度变化带来的考验^[11,12].

作者提出了一种偏振无关双旋光双反射结构的理论模型^[13], 该结构不需要对反射镜进行任何特殊的处理 (如镀膜), 仅通过对普通反射镜和 90° 旋光晶体的合理配置就可以实现任意角度的偏振无关反射, 并且通过实验验证了该结构的偏振无关反射能力^[14]. 在理论和实验研究过程中, 我们发现双旋光双反射结构的具有一定的自稳定性, 即构成该结构的器件并不需要严格满足理论要求——反射镜偏振特性严格一致, 且旋光晶体的旋光角严格为 90° ——也能实现很高的保偏反射能力. 在这一理论支撑下, 本文推导了双旋光双反射结构的量子力学模型, 仿真验证了其自稳定性特性, 并通过高低温环境变化, 以及用钴 60γ 射线源对反射镜和旋光晶体进行总剂量辐射试验^[15,16]模拟空间环境

* 国家自然科学基金 (批准号: 61601497) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zghlupin@163.com

对双旋光双反射结构的影响. 实验表明, 单个元器件的偏振特性受辐射和环境影响发生了一定的变化, 但是整体结构的偏振特性依然能够保持较高的水平.

2 双旋光双反射结构自稳定性的量子化模型

双旋光双反射结构的光路如图 1 所示, 其中入射光 $\vec{O}$ 经过反射镜 m_1 和 m_2 的反射, 出射光 $\vec{O}$ 与 $\vec{O}$ 之间夹角为 90° . 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 分别为两个旋光角为 90° 的旋光晶体.

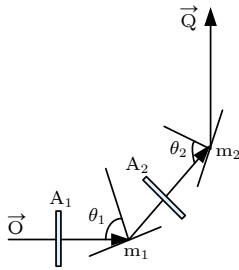


图 1 双旋光-双反射结构光路图

Fig. 1. Optical path diagram of reflection structure based on two magneto-optical crystals and two mirrors.

在文献 [13] 中, 作者已经给出了双旋光双反射结构的经典物理学模型. 虽然构成双旋光双反射结构的物理元件是经典器件, 可以用琼斯矩阵来描述, 但在量子通信中其操作对象是光子的量子态 (光子偏振态), 因此这里我们使用量子力学中的狄拉克算符对入射光、反射光、反射镜、旋光晶体以及反射过程进行描述. 归一化的入射光和反射光的偏振态可以表示为:

$$|E_{in}\rangle = \cos\alpha_{in} |0\rangle + \sin\alpha_{in} e^{i\delta_{in}} |1\rangle, \quad (1)$$

$$|E_{out}\rangle = \cos\alpha_{out} |0\rangle + \sin\alpha_{out} e^{i\delta_{out}} |1\rangle. \quad (2)$$

根据偏振光学的琼斯矩阵原理, 光学元件的偏振特性可以表示为一个 2×2 的矩阵. 双旋光双反射结构中使用的反射镜和 90° 旋光晶体的偏振特性分别可写为:

$$J = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s e^{i\delta_s} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

而根据狄拉克算符的运算规则, 任意偏振元件的算符形式可以表示为

$$x_{00} |0\rangle \langle 0| + x_{01} |0\rangle \langle 1| + x_{10} |1\rangle \langle 0| + x_{11} |1\rangle \langle 1|. \quad (5)$$

对于 90° 旋光晶体而言, 其算符可以为

$$\hat{A} = -|0\rangle \langle 1| + |1\rangle \langle 0|, \quad (6)$$

反射镜算符可以表示为

$$\hat{J} = r_p |0\rangle \langle 0| + r_s e^{i\delta_s} |1\rangle \langle 1|. \quad (7)$$

根据文献 [13] 给出的双旋光双反射结构设计, 则反射光偏振态可以写为

$$\begin{aligned} \langle E_{out} | &= \widehat{J}_2 \widehat{A}_2 \widehat{J}_1 \widehat{A}_1 |E_{in}\rangle = (r_{p2} |0\rangle \langle 0| \\ &+ r_{s2} e^{i\delta_{s2}} |1\rangle \langle 1|) (-|0\rangle \langle 1| + |1\rangle \langle 0|) \\ &\times (r_{p1} |0\rangle \langle 0| + r_{s1} e^{i\delta_{s1}} |1\rangle \langle 1|) (-|0\rangle \langle 1| \\ &+ |1\rangle \langle 0|) (r_{p1} |0\rangle \langle 0| + r_{s1} e^{i\delta_{s1}} |1\rangle \langle 1|) \\ &\times (-|0\rangle \langle 1| + |1\rangle \langle 0|) (\cos\alpha_{in} |0\rangle \\ &+ \sin\alpha_{in} e^{i\delta_{in}} |1\rangle) = -r_{p2} r_{s1} e^{i\delta_{s1}} \cos\alpha_{in} |0\rangle \\ &- r_{p1} r_{s2} e^{i(\delta_{s2} + \delta_{in})} \sin\alpha_{in} |1\rangle. \end{aligned} \quad (8)$$

若当外界条件发生一定变化时, 每个器件的偏振特性会发生一定的变化, 该变化可以用一个特征值平方和为 1 的对角阵代替, 该对角阵以狄拉克算符形式表示为

$$\hat{C} = \cos\gamma |0\rangle \langle 0| + \sin\gamma e^{i\delta} |1\rangle \langle 1|. \quad (9)$$

考虑受环境的影响, 反射光的偏振态可以写为

$$\begin{aligned} |E_{out_e}\rangle &= \widehat{J}_2 \widehat{C}_2 \widehat{A}_2 \widehat{C}_1 \widehat{J}_1 \widehat{A}_1 \widehat{C}_1 |E_{in}\rangle \\ &= (-r_{p2} \cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{A2} e^{i\delta_{A2}} r_{s1} e^{i\delta_{s1}} \\ &\times \sin\gamma_{J1} e^{i\delta_{J1}} \cos\gamma_{A1} \cos\alpha_{in} |0\rangle \\ &- r_{p1} r_{s2} e^{i\delta_{s2}} \sin\gamma_{J2} e^{i\delta_{J2}} \cos\gamma_{A2} \\ &\times \cos\gamma_{J1} \sin\gamma_{A1} e^{i\delta_{A1}} \sin\alpha_{in} e^{i\delta_{in}} |1\rangle), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\widehat{C}_J$ 和 $\widehat{C}_A$ 分别表示外界环境对反射镜和旋光晶体的偏振特性产生的影响. 根据 (10) 式, 假设双旋光双反射结构中的两枚反射镜和旋光晶体都完美一致, 即 $\widehat{J}_1 = \widehat{J}_2$, $\widehat{A}_1 = \widehat{A}_2$, 此时反射光的归一化偏振态为

$$|E_{out_e}\rangle = -r_s r_p e^{i(\delta_s)} (\cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{A2} \sin\gamma_{J1} \times \cos\gamma_{A1} \cos\alpha_{in} e^{i(\delta_{A2} + \delta_{J1})} |0\rangle + \sin\gamma_{J2} \cos\gamma_{A2} \cos\gamma_{J1} \sin\gamma_{A1} \sin\alpha_{in} e^{i(\delta_{J2} + \delta_{A1} + \delta_{in})} |1\rangle). \quad (11)$$

当环境仅对反射镜产生影响时, $\cos\gamma_{A1} = \sin\gamma_{A1} = \cos\gamma_{A2} = \sin\gamma_{A2} = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\delta_{A1} = \delta_{A2} = 0$, 归一化的反射光偏振态可以写为

$$|E_{out_eJ}\rangle = \left(\frac{\cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{J1} \cos\alpha_{in} e^{i(\delta_{J1})}}{\Psi} |0\rangle + \frac{\sin\gamma_{J2} \cos\gamma_{J1} \sin\alpha_{in} e^{i(\delta_{J2} + \delta_{in})}}{\Psi} |1\rangle \right), \quad (12)$$

其中

$$\Psi = \left[\left(\cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{J1} \cos\alpha_{in} e^{i(\delta_{J1})} \right)^2 + \left(\sin\gamma_{J2} \cos\gamma_{J1} \sin\alpha_{in} e^{i(\delta_{J2} + \delta_{in})} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

考虑到环境对反射镜的影响矩阵和对旋光晶体的影响矩阵在形式上完全一致且具有对称性, 这里不再赘述. 从方程 (12) 中可以看出, 反射光的偏振态仅取决于环境对两枚反射镜的不同影响, 为了计算环境的变化对反射光偏振态的影响, 引入入射光的投影算符

$$|E_{in}\rangle \langle E_{in}| = (\cos\alpha_{in} |0\rangle + \sin\alpha_{in} e^{i\delta_{in}} |1\rangle) \times (\cos\alpha_{in} \langle 0| + \sin\alpha_{in} e^{i\delta_{in}} \langle 1|). \quad (13)$$

反射光偏振态在入射光偏振态上的投影为

$$|E_{et}\rangle = |E_{in}\rangle \langle E_{in}| |E_{out_eJ}\rangle = \left(\frac{\cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{J1} \cos\alpha_{in}^2 e^{i(\delta_{J1})}}{\Psi} + \frac{\sin\gamma_{J2} \cos\gamma_{J1} \sin\alpha_{in}^2 e^{i(\delta_{J2} + 2\delta_{in})}}{\Psi} \right) |E_{in}\rangle. \quad (14)$$

定义反射光偏振保持度, 其在数值上等于归一化的反射光偏振态矢量在入射光偏振态矢量上的投影的平方, 单独考察环境对反射镜的影响时, 反射光偏振保持度为

$$n_{eJ} = \left(\frac{\cos\gamma_{J2} \sin\gamma_{J1} \cos\alpha_{in}^2 e^{i(\delta_{J1})}}{\Psi} + \frac{\sin\gamma_{J2} \cos\gamma_{J1} \sin\alpha_{in}^2 e^{i(\delta_{J2} + 2\delta_{in})}}{\Psi} \right)^2. \quad (15)$$

假设入射光为 45° 线偏振光, 即 $\alpha_{in} = 45^\circ$, $\delta_{in} = 0$,

仿真环境影响造成两面反射镜垂直和水平偏振特性发生的变化, 但不引入相位差 (即 $\delta_{J1} = \delta_{J2}$) 时的双旋光双反射结构偏振保持度变化情况如图 2(a) 所示, 当环境影响只引入相位差时, 双旋光双反射结构偏振保持度变化情况如图 2(b) 所示.

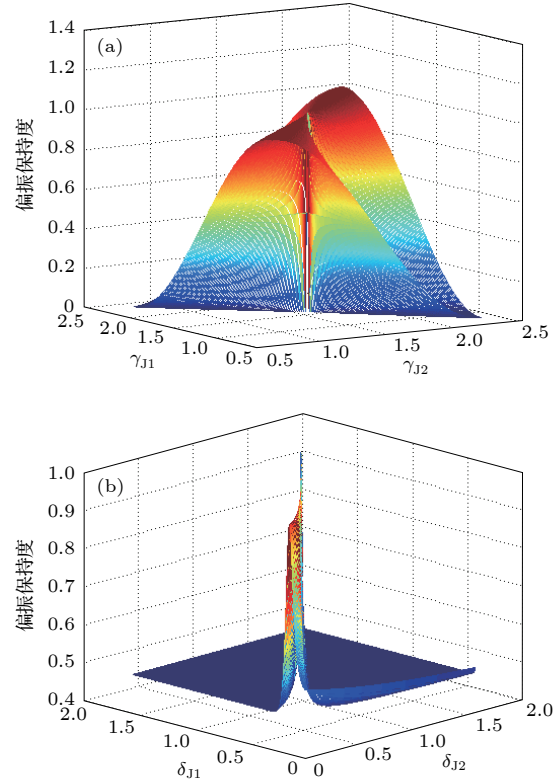


图 2 环境影响下的双旋光双反射结构偏振保持度变化 (a) 垂直和水平偏振特性受影响; (b) 相位差受影响

Fig. 2. Polarization maintaining of reflection structure based on two magneto-optical crystals and two mirrors: (a) Vertical and horizontal polarization characteristics are affected; (b) phase difference is affected.

从图 2 中可以看出, 当环境仅影响反射镜的垂直和水平偏振特性时, 偏振保持度曲面形状类似马鞍形, 但是在 $\gamma_{J1} = \gamma_{J2}$ 的对称面上, 偏振保持度能够达到 1. 随着环境对于两面反射镜的影响趋于不一致时, 偏振保持度不断降低, 直至接近于 0, 且在垂直于对称面的方向上降低得最快. 由此可见, 当在环境影响下反射镜的偏振特性差别不大时, 双旋光双反射结构的偏振保持度能够稳定保持在 1 附近, 相反, 当偏振特性差别较大时, 偏振保持度会迅速降低.

当环境仅引入相位差时, 在对称面上偏振保持度依然能够达到 1, 但是随着两面反射镜引入的相位差之间的差异变大时, 偏振保持度迅速下降, 但

是最低不小于 0.5. 从 (11) 式中不难看出, 环境对反射镜偏振特性的影响和对旋光晶体偏振特性的影响在形式上是一致的. 因此环境仅对旋光晶体产生影响的仿真曲面与图 2 完全相同, 不再赘述.

从以上公式推导和仿真中不难发现, 只要环境对双旋光双反射结构中两面反射镜偏振特性的影响相同, 同时对旋光晶体的影响也相同, 那么反射光的偏振态与入射光的偏振态能较好地保持一致. 考虑到在双旋光双反射结构中各个光学元件安装位置非常接近, 应用到 ATP 系统中时, 每个元件的受到环境影响也基本一样. 因此可以合理假设, 在温度交变和辐射环境下, 双旋光双反射结构的偏振保持度能够始终接近 1, 即保持偏振无光反射.

3 实验验证

为了测试双旋光双反射结构在外界环境变化时的偏振特性, 我们制备了三枚同批次生产的镀金反射镜和旋光晶体, 经过测试, 旋光晶体的插入损耗约为 0.18 dB, 旋光角约为 90.1° . 实验光源为 1550 nm 的分布式反馈激光器 (distributed feedback laser, DFB) 光纤激光器, 偏振态测试使用 Thorlabs 公司生产的 TXP5005 偏振分析仪, 其能够输出归一化斯托克斯矢量形式的偏振态.

为了保护激光器和偏振分析仪探头, 这两个仪器不能置于高低温交变环境中. 而目前市场上的高低温箱都采用封闭式设计, 没有 2 个以上的敞开式的开口供光路通过. 因此我们自行设计制作了一个高低温试验箱, 如图 3 所示. 高低温箱在三个侧板各有一个直径为 2 cm 的开孔, 其中 A 孔为入射光孔, B 孔用于单个反射镜和双旋光双反射结构的 90° 反射光输出, C 孔在 A 孔对面, 用于激光透过旋光晶体后测量其偏振态. 高低温箱顶端开有 1 个直径为 1 cm 的小孔, 用于插入温度计监控温度, 温度计位置接近 A1 旋光晶体侧边.

低温试验时在高低温箱内放置约 0.5 kg 干冰, 并通过填料口定时补充. 并以干燥剂填充除光路外的剩余空间. 高温实验时采用小型可调节电热器, 直接置于高低温箱内. 试验过程中, 当温度计指示温度达到最高和最低的目标温度后, 保持约 1 h 再进行测量, 以保证反射镜和旋光晶体内部均达到目标温度. 其后每隔 10°C 设置一个测量点, 且在测量点的温度保持至少 10 min 后再进行测量.

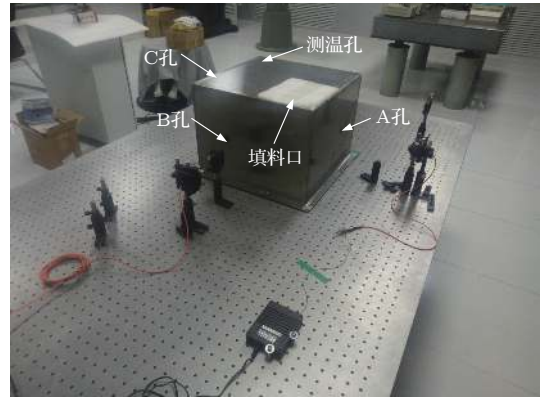


图 3 高低温箱

Fig. 3. High-low temperature test box.

实验共进行了 2 轮测试, 间隔 32 天, 第一轮为高低温实验, 第二轮为高低温-辐射实验. 实验过程和实验结果如下.

3.1 反射镜及旋光晶体偏振态实验

作为参考, 在第一轮和第二轮实验前, 分别测试反射镜和旋光晶体在高低温变化时的偏振特性. 为了确保实验的准确性, 每次进行高低温环境变化双旋光双反射结构偏振特性实验前, 先利用偏振测试仪的统计功能, 在 10 s 内进行 333 次测试, 并进行统计平均, 以此作为本次测试的入射光偏振态标准.

由于不能将偏振分析仪和激光器置于辐照环境下, 因此无法实时测量辐射过程中的双旋光双反射结构的偏振态变化情况. 因此在第二轮测试中, 我们先利用钴-60 辐照源对两面反射镜和两枚旋光晶体进行了总剂量约为 400 Gy 的辐照, 剂量约为 0.04 mGy , 辐照时长为 166 min. 相比于正常的反射镜, 经过辐照的反射镜呈现肉眼可见的浅褐色. 而旋光晶体由于受到厚度为 1.5 cm 的不锈钢永磁体的保护, 透过灯光观察晶体的颜色变化不大.

两轮实验测得的入射光、反射镜反射光、旋光晶体透射光的偏振态如图 4 和图 5 所示.

实验结果显示, 温度和辐射两种环境变化对反射镜和旋光晶体都有影响. 由于两轮实验间隔较长, 整个光路经过一次重新装配, 因此入射光偏振态在两轮实验中略有不同.

当仅存在温度变化时, 反射镜反射光的偏振态与入射光的偏振态有一定的差异, 且反射光偏振态在温度的影响下会在一定的区域内起伏, 大致的趋

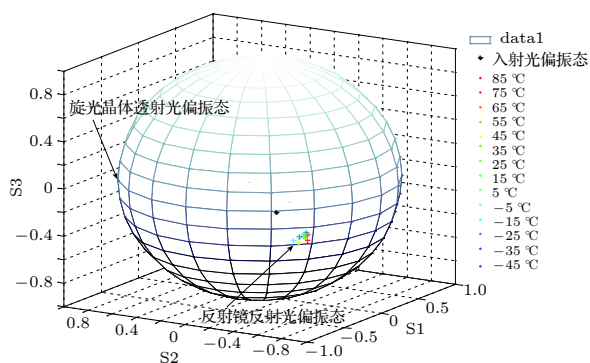


图 4 高低温对反射镜和旋光晶体的影响

Fig. 4. Effects of high-low temperature on mirrors and magneto-optical crystals.

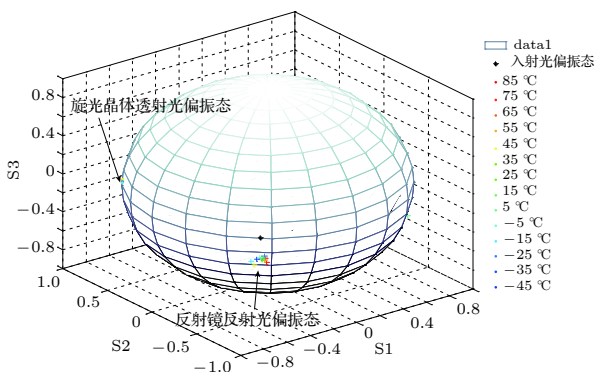


图 5 高低温-辐射对反射镜和旋光晶体的影响

Fig. 5. Effects of high-low temperature and radiation on mirrors and magneto-optical crystals.

势是温度越高, 反射光偏振态与入射光偏振态差距越大. 而旋光晶体透射光偏振态受温度影响相对较小, 变化较为平缓, 且基本不引入相位差, 均为线偏振光, 但是变化规律更为明显. 温度越高, 透射光偏振态与入射光偏振态差距越大. 分析认为这是由于旋光晶体的厚度受热胀冷缩的影响会发生少许变化, 而旋光角度的大小与光束在晶体内的光程成正比关系.

受辐射影响, 旋光晶体和反射镜的偏振特性都有一定变化, 其中旋光晶体的偏振特性变化不大, 基本能够保持对入射光偏振态的 90° 旋转. 反射镜经过辐照后偏振特性变化相对较大, 在各种温度下, 反射光偏振态整体向顺时针方向旋转.

3.2 双旋光双反射结构的高低温实验

在两轮的双旋光双反射结构实验中, 光路均按照文献 [13] 给出的双旋光双反射结构装调, 在第一轮实验中, 首先测试了双旋光双反射结构的温度

变化特性. 从图 6 中可以看出, 所有的测量点均分布在邦加球面上, 即入射光和反射光均为完全偏振光, 且不同温度下的入射光和反射光几乎完全重合.

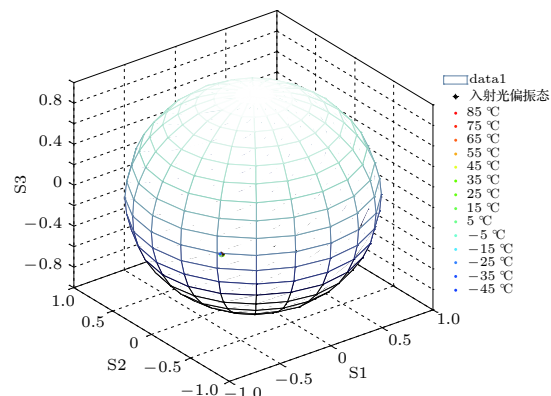


图 6 高低温影响下的双旋光双反射结构反射光偏振态

Fig. 6. Polarization of reflecting light of reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors under the effect of high-low temperature.

为了量化分析温度变化情况下的双旋光双反射结构的保偏反射能力, 将斯托克斯矢量转换为琼斯矢量 [17], 并按照 (15) 式计算偏振反射光的偏振保持度, 如图 7 所示. 当温度在 -45°C — 85°C 之间变化时, 反射光的偏振保持度在 99.99%—99.43% 之间变化, 14 次测试的均值为 99.77%. 从图 7 中可以看出在 -5°C — 55°C 之间时, 反射光的偏振保持度能够较为稳定地保持在 99.8% 左右, 而在低温区间和高温区间偏振保持度的起伏都很大. 这有可能是由于旋光晶体 (钇铁石榴石) 是在常温环境下制备的, 因此在极端的高温和低温环境下会造成其厚度的轻微变化, 进而影响其偏振特性. 但是旋光晶体的这种变化对双旋光双反射结构的影响是非常微弱的.

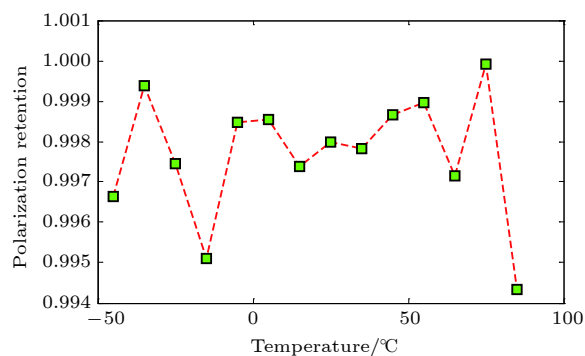


图 7 高低温影响下的反射光偏振保持度

Fig. 7. Polarization retention of the reflecting light under the effect of high-low temperature.

3.3 双旋光双反射结构的高低-辐射实验

本轮实验将两面反射镜和两枚旋光晶体全部进行 400 Gy 的总剂量辐照, 而后再放入高低温箱中进行高低温实验. 实验方法和实验过程与第一轮实验完全相同. 但是包括激光器在内的所有光学元件全部重新装调, 因此入射光偏振态与第一轮略有差别. 图 8 为入射光和反射光的偏振态, 图 9 为反射光的偏振保持度.

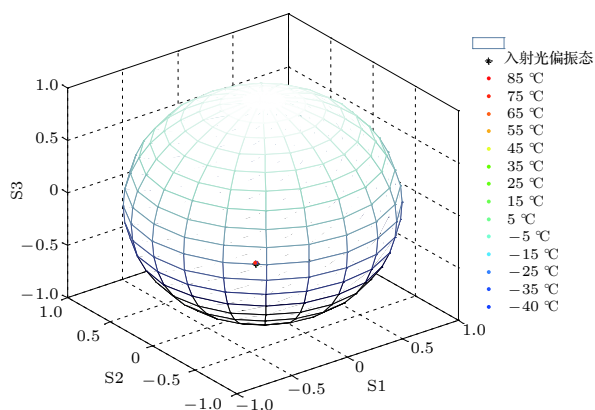


图 8 辐射和高低温影响下的双旋光双反射结构反射光偏振态

Fig. 8. Polarization of reflecting light of reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors under the effect of high-low temperature and radiation.

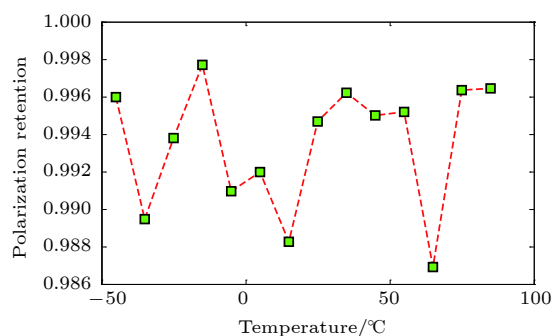


图 9 辐射和高低温影响下的反射光偏振保持度

Fig. 9. Polarization retention of the reflecting light under the effect of high-low temperature and radiation.

从实验结果来看, 反射光偏振态基本与入射光一致. 反射光的偏振保持度起伏虽然比未被辐射时大, 但是均能保持在 98.7% 以上, 14 次测试的均值为 99.35%. 根据 3.1 节的实验结果, 由于旋光晶体受辐照影响不大, 双旋光双反射结构反射光偏振保持度的降低可能主要由于反射镜经过辐照后产生的变化.

4 总 结

本文利用推导和仿真双旋光双反射结构受温度和辐射影响下的反射光偏振态的变化趋势, 并且通过实验对理论研究结果进行了验证. 实验显示, 仅受温度影响时, 双旋光双反射结构反射光的偏振保持度能够保持在 99.43% 以上; 而加入辐射影响以后, 反射光的偏振保持度有所下降, 但是依然能够保持在 98.7% 以上. 同时, 作为对比, 还测试了反射镜和旋光晶体受到温度和辐射的影响. 实验发现旋光晶体受到温度的影响较大, 而反射镜对于辐射的影响更敏感. 但是这些环境造成的影响几乎完全被双旋光双反射结构自身的偏振特性补偿了, 使得最终的反射光的偏振态能够保持在较高的水平.

本文通过实验证明了双旋光双反射结构能够在一定程度上抵抗空间环境的温度和辐射变化对光学元件带来的偏振特性改变, 这为偏振敏感的星基光通信系统提供了一个新的选择.

参考文献

- [1] Gregory M, Heine F F 2012 *Opt. Eng.* **51** 1202
- [2] Moss E B 2012 *J. Spacecr. Rockets* **5** 698
- [3] Vallone G, Bacco D, Dequal D, Gaiarin S, Luceri V, Bianco G, Villorosi P 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 040502
- [4] Takenaka H, Carrascosado A, Fujiwara M, Kitamura M, Sasaki M, Toyoshima M 2017 *Nat. Photon.* **1** 31
- [5] Kim J, Tapley B D 2002 *J. Guid. Control Dyn.* **6** 1100
- [6] Romano M, Agrawal B N 2003 *Acta Astronaut.* **4** 509
- [7] Harten G V, Snik F, Keller C U 2009 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **878** 377
- [8] Jiang L Y, Liu D Q, Ma C, Cai Q Y, Gao L S 2018 *Chin. Opt.* **4** 80 (in Chinese) [蒋丽媛, 刘定权, 马冲, 蔡清元, 高凌山 2018 中国光学 **4** 80]
- [9] Fan X H, Li M, Ni Q L, Liu S J, Wang X G, Chen B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6494 (in Chinese) [范鲜红, 李敏, 尼启良, 刘世界, 王晓光, 陈波 2008 物理学报 **57** 6494]
- [10] Wang C Q, Zhang X, Zhang L G, Zhang R Y, Jin L Q, Sun Y Q 2018 *Aerospace Shanghai* **4** 80 (in Chinese) [王春琴, 张鑫, 张立国, 张如意, 金历群, 孙越强 2018 上海航天 **4** 80]
- [11] Cheng X T, Xu X H, Liang X G 2016 *J. Ordn. Equip. Eng.* **5** 1
- [12] Good E J, Ghent D J, Bulgin C E, Remedios J J 2017 *J. Geoph. Res. Atmo.* **17** 124
- [13] Zhao G H, Zhao S H, Yao Z S, Meng W, Wang X, Zhu Z H 2012 *Chin. J. Las.* **10** 236 (in Chinese) [赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 蒙文, 王翔, 朱子行 2012 中国激光 **10** 236]
- [14] Zhao G H, Zhao S H, Yao Z S, Meng W, Wang X, Zhu Z H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134201 (in Chinese) [赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 蒙文, 王翔, 朱子行 2013 物理学报 **62** 134201]
- [15] Wang Y, Yan X W, Zheng J G 2016 *Inf. Elect. Eng.* **5** 811 (in Chinese) [王艳, 严雄伟, 郑建刚 2016 太赫兹科学与电子信息

息学报 5 811]

[16] Hisatake K, Matsubara I, Maeda K, Fujihara T, Uematsu K
1989 *Phys. Status Solidi A* 24 5[17] Shi M 2006 *Ph. D. Dissertation* (Qufu: Qufu Normal
University) (in Chinese) [史萌 2006 博士学位论文(曲阜: 曲阜
师范大学)]

Principle and experimental study of self-stability of reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors under effect of temperature and radiation^{*}

Zhao Gu-Hao^{1)2)†} Mao Shao-Jie¹⁾ Zhao Shang-Hong³⁾ Meng Wen³⁾
Zhu Jie²⁾ Zhang Xiao-Qiang²⁾ Wang Guo-Dong³⁾ Gu Wen-Yuan³⁾

1) (State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology, Nanjing 210007, China)

2) (College of Air Traffic Control & Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

3) (Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 27 March 2019; revised manuscript received 15 May 2019)

Abstract

Acquisition, tracking and pointing (ATP) is an important subsystem of satellite-based optical communication system. It controls the direction of the beam passing through the mirror, and then completes the alignment and stabilization of intersatellite/satellite-ground light path. As is well known, the ordinary mirror changes the polarization of photons, so the ATP mirrors must be specially processed in quantum communication system and coherent optical communication system. For example, in order to counteract the change of photon polarization caused by the mirror, it is usually necessary to coat the mirror. However, this membrane structure must be tested by the radiation and temperature change from the space environment. A polarization-independent reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors is proposed. This structure does not need any special treatment (such as coating) for the reflector. It can realize polarization-independent reflection at any angle only through the reasonable configuration of the ordinary reflector and 90° rotatory crystal. In addition, it is found that the structure has self-stability, that is, when the polarization characteristics of optical devices change due to environmental change, the overall polarization reflection characteristics of the reflective structure remain unchanged. The polarization equation of reflected light of reflector based on two magneto-optical crystal and two mirrors is derived. The polarization of reflected light under environmental influence is simulated, and the polarization independent reflection self-stability of double-rotating double-reflection structure is found. The polarization-independent self-stabilization of this structure is verified by temperature and radiation experiment. The experimental results show that the average polarization retention of the reflecting light of the reflector based on two magneto-optical crystal and two mirrors can reach 99.77% when the temperature varies from $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. The mirrors and the magneto-optical crystals are irradiated by cobalt 60 with a total dose of 400 Gy, and the average polarization retention of the reflective structure is also 99.35%. The experimental results show that the polarization-independent reflectance can be kept stable for a long time in the space environment where radiation and temperature change dramatically. Relying on this self-stability, the reflector based on two magneto-optical crystals and two mirrors can maintain high polarization-independent reflection capability for a long time in a space environment. This makes it a new option for polarization-preserving reflective components in satellite-based optical communication systems.

Keywords: polarization state, polarization independent reflection, temperature, radiation

PACS: 42.25.Ja, 77.22.Ej

DOI: 10.7498/aps.68.20190429

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61601497).

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