

# 基于磁光效应的双路偏振输出激光器

阮剑剑<sup>1,2</sup>, 龙 慧<sup>1</sup>, 黄晓桦<sup>1,2</sup>, 林洪沂<sup>1,2</sup>, 孙 栋<sup>1,2</sup>, 刘 虹<sup>1,2</sup>

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门理工学院 福建省光电技术与器件重点实验室, 福建 厦门 361024)

**摘 要:** 基于 TSAG 磁光晶体的法拉第效应和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的偏振特性, 本文研究了一种双路输出的激光器, 其激光输出呈线性偏振。未加磁场时, 激光器单路偏振输出。当加上磁场后, 激光器则成双路偏振输出, 且输出偏振角度和功率随磁场强度而变化。随着磁场强度的不断增大, 一路光的输出功率不断减小, 而另一路的输出功率则不断增大。双路偏振输出激光器可以应用于位移测量、区域环境监测和双光梳测距技术等领域。

**关键词:** TSAG 磁光晶体; 法拉第效应; 双路偏振; Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.11.007

## A dual-polarization output laser based on the magneto-optic effect

RUAN Jian-jian<sup>1,2</sup>, LONG Hui<sup>1</sup>, HUANG Xiao-hua<sup>1,2</sup>, LIN Hong-yi<sup>1,2</sup>, SUN Dong<sup>1,2</sup>, LIU Hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Opto-electronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;  
2. Fujian Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** A dual polarization laser is studied based on the Faraday magneto-optic effect of TSAG and the polarization characteristics of Nd:YVO<sub>4</sub>. When there is no magnetic field, the laser has only a single polarization output. When the magnetic field is applied, it becomes dual polarization output, and the polarization angle and power of laser vary with the magnetic field intensity. With the increase of magnetic field intensity, one output power is decreasing, while another one is increasing. Dual polarization laser can be used in displacement measurement, regional environmental monitoring, dual-comb ranging and other fields.

**Keywords:** TSAG; Faraday effect; dual polarization; Nd:YVO<sub>4</sub> laser

## 1 引 言

掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)晶体是目前用于制作激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器中最为有效的激光晶体之一,它具有很多优良的性能,如:稳定的化学和物理加工性、较低激光阈值、较大的受激发射截面、较高的泵浦光吸收效率等,使得Nd:YVO<sub>4</sub>晶体得到了越来越广泛的应用。其基质YVO<sub>4</sub>属于一种具有较强自然双折射现象的四方晶系晶体,掺钕离子后加强了偏振吸收和辐射特性,以致激光输

出呈线性偏振<sup>[1-2]</sup>。

输出线偏振光的激光器在目标探测与识别、水下探测、生物医学等领域有非常广泛的应用。谢绍禹等研究基于线偏振激光主动成像的目标探测与识别,利用线偏振激光照射探测目标,然后通过比较不同目标材料的反射光偏振度差异和偏振图像来进行探测与识别一种新技术<sup>[3-4]</sup>。长春理工大学的王春艳等人将线偏振激光应用于水下探测研究中,在水下使用线偏振激光可以减少后向散射的影响,扩大

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 11904304);福建省中青年教育科研项目(No. JAT200477)资助。

**作者简介:** 阮剑剑(1986-),男,硕士,实验师,主要从事激光腔内磁光调制技术的研究。E-mail: 2013120601@xmut.edu.cn

**收稿日期:** 2020-01-07; **修订日期:** 2020-02-27

水下扫描成像的作用距离,提高水下目标图像的清晰度<sup>[5-6]</sup>。在生物医学领域,根据各向异性的生物分子对偏振激光的散射退偏振作用,可以为生物组织病变情况的检测提供一些新的方法<sup>[7-8]</sup>。

激光器的双路输出同样具有广阔的应用前景,清华大学的张书练等在激光器谐振腔内置入石英片作为双折射晶体,研究了一类正交线偏振激光器,在位移测量、波片位相延迟测量、弱磁场测量等领域得到了新应用<sup>[9-10]</sup>。刘文清等开展了双通道偏振激光雷达的研制,并对北京局部区域的环境进行监测,通过偏振激光雷达回波信号的偏振特性变化,可以实时确定局部区域内的污染物散布区域、位置和相对强度等信息<sup>[11]</sup>。清华大学吴冠豪等研制的双光梳绝对测距技术,将双光梳光源、测距光路和数据处理系统集成,充分利用光频梳光谱分辨率强、脉冲速率高等特点,可以为测量精度、测量速度和非模糊范围等综合性能提升方面提供了独有的帮助,目前已经在航天领域的空间相机绝对变形测量和卫星天线展开的地面验证测量中得到了应用<sup>[12-13]</sup>。本文利用磁光晶体的法拉第磁光效应,设计了一款双路偏振输出的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,并研究了磁场强度对激光输出功率和线偏振方向的影响。

## 2 TSAG 磁光晶体特性

法拉第磁光效应是指当线偏振光在磁光介质中传播时,若在平行于光的传播方向上加一强磁场,则光振动方向将发生偏转。入射光矢量旋转的角度  $\alpha$  与沿着光传播方向作用在磁光材料上的磁感强度  $B$  及光在磁场中所通过的物质长度  $l$  成正比,即  $\alpha = VBl$ 。其中,  $V$  是费尔德常数,与介质性质及光波频率有关。同时,磁致旋光的方向只与磁场的方向有关,而与光的传播方向无关,光束往返通过磁致旋光物质时,旋转角度往同一方向累加。

TSAG (Terbium Scandium Aluminum Garnet, 铽钪铝石榴石) 是一种理想磁光晶体,主要用于 400 ~ 1600 nm 的波长范围,即可见光和红外波段。TSAG 具有维尔德常数大 (比 TGG 高 20 % 左右),低吸收系数 (比 TGG 小 30 % 左右),高功率,低热致双折射等优点,适用于超高功率激光器。

本文采用的 TSAG 的尺寸为  $\Phi 3.92 \times 7$  mm,采用偏振测量仪测量线偏振光旋转角与磁场强度关系如图 1 所示。由此可计算出,在 632.8 nm、654.3 nm

和 1064.1 nm 波长处,TSAG 磁光晶体的维尔德常数分别为 160.59、142.82、45.16 rad/T·m。使通过该 TSAG 磁光晶体的线偏振光旋转 45°,所需的磁场强度分别为 698.3 mT、785.2 mT 和 2483.2 mT。

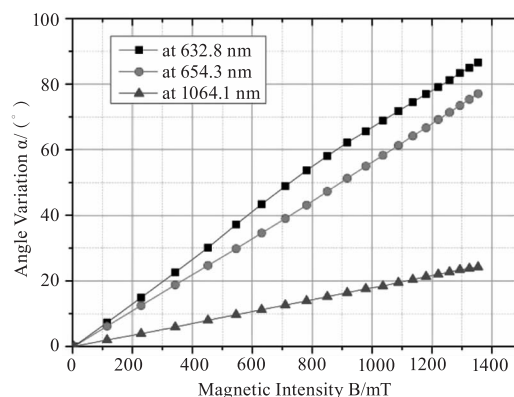


图1 TSAG 磁光晶体的维尔德常数测量

Fig. 1 The measurement of Verdet constant of the TSAG magneto-optic crystal

## 3 实验装置

基于 TSAG 的法拉第磁光效应,本文设计的双路偏振输出激光器如图 2 所示。泵浦源采用光纤耦合激光二极管 (LD),中心波长为 807.9 nm。泵浦光通过透镜组会聚到激光晶体 (Nd:YVO<sub>4</sub>) 端面。激光谐振腔是由激光输入镜 ( $M_1$ )、输出镜 ( $M_2$ ) 和偏振分束器 ( $M_{BP}$ ) 组成的三镜 L 型谐振腔, $M_1$  和  $M_{BP}$  之间的距离为 105 mm, $M_{BP}$  和  $M_2$  之间的距离为 20 mm。 $M_1$  是激光高反膜 (镀在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的左侧面),它对于 807.9 nm 的光具有高透过率,对于 1064 nm 的光具有高反射率。 $M_2$  对于 1064 nm 光的透过率为 10 %。 $M_{BP}$  为偏振分束器,对于 P 光的透过率为 99.8 %,对于 S 光的透过率则小于 0.1 %。当 1064 nm 的激光通过时 S 光将发生折射并继续传播以实现振荡,而 P 光则可以通过该偏振分束器逃离谐振腔。

实验中将 TSAG 磁光晶体放置于激光器的 L 型谐振腔内,当未加磁场时,因激光晶体钕酸钇 (Nd:YVO<sub>4</sub>) 产生的激光为 S 光,则输出端有激光输出,逸出端没有。当外加磁场时,通过磁光晶体的激光偏振方向发生旋转,输出端激光偏振角度旋转  $\alpha$ ,如图 2(a) 所示;部分激光经  $M_2$  反射后再次经过磁光晶体时,激光的偏振方向将改变  $2\alpha$ ,则 P 光分量可从偏振分束器逸出,如图 2(b) 所示。逸出端 P 光的透射率可以由下列方程决定:

$$T_p = \sin^2(2\alpha) = \sin^2(2VBl)$$

式中,可见,改变磁场强度  $B$ ,就可以改变  $P$  光的透过率,从而改变激光的输出功率。

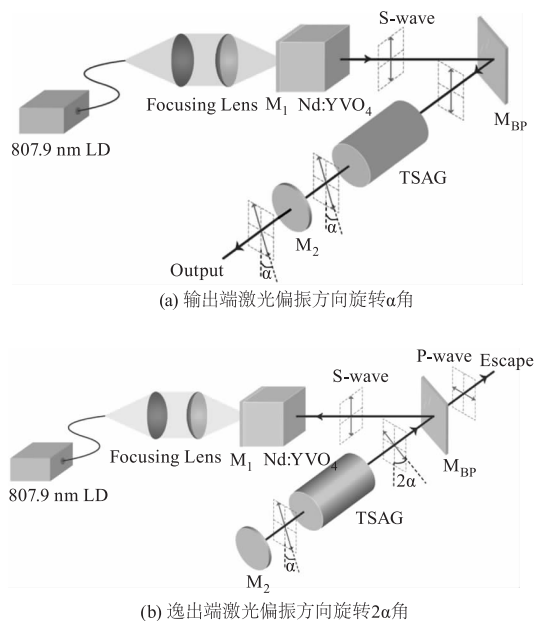


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental device diagram

根据公式可得,1064.1 nm 波长下,逸出端的透过率  $T_p$  与磁场强度的对应关系如图 3 所示。可知,要使  $M_{BP}$  的透过率达到 10 %、20 %、30 %、40 % 和 50 %,所需的磁场强度分别为 517.7 mT、746.9 mT、927.4 mT、1094.0 mT 和 1247.7 mT。

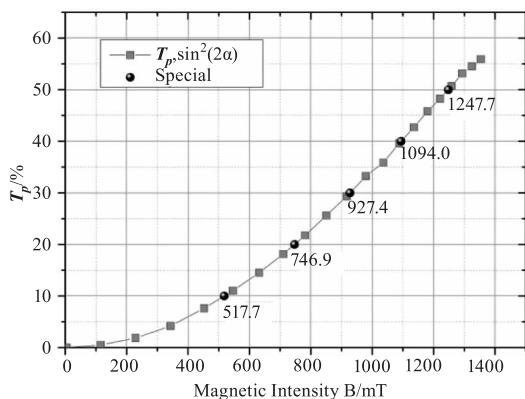


图 3 逸出端的透过率  $T_p$  与磁场强度的对应关系曲线

Fig. 3 The relationship curve between  $T_p$  and magnetic field intensity at the escape end

#### 4 实验结果

实验中,当泵浦功率为 5868 mW 时,测量不同磁场强度下 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器的输出功率,如图 4 所示。由图 4 可知,当未加磁场时,输出端的输出功率为 2175 mW,逸出端则无功率输出。随着磁场强

度不断增强,输出端的功率不断减弱,逸出端的功率则不断增强。实验装置中,将  $M_{BP}$ 、 $M_2$  和 TSAG 都放置于电磁铁线圈内的空气隙处,导致气隙宽度较大,磁场强度最大只能达到 563.4 mT,此时输出端的功率为 1117 mW,逸出端的功率则为 1398 mW,比输出端功率更大。

当磁场强度为 510.8 mT 时,两个端口的输出功率相等,为 1249.3 mW。此时,  $M_{BP}$  的透过率为 10 %,与  $M_2$  的透过率一致。

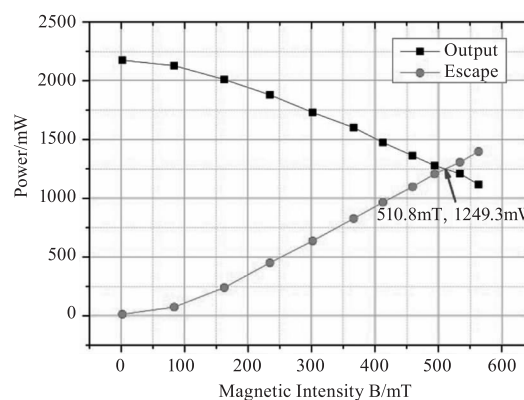


图 4 泵浦功率为 5868 mW 时,不同磁场强度下 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器的输出功率

Fig. 4 The power of Nd : YVO<sub>4</sub> laser under different magnetic field intensity when the pump power is 5868 mW

当磁场强度为 510.8 mT 时,激光器输出功率随泵浦功率的变化如图 5 所示。可见输出端和逸出端的功率基本保持一致。激光器的泵浦阈值约为 2009 mW。在 5868 mW 的泵浦功率下,其输出功率为 1237 mW,其转换效率为 21.1 %。

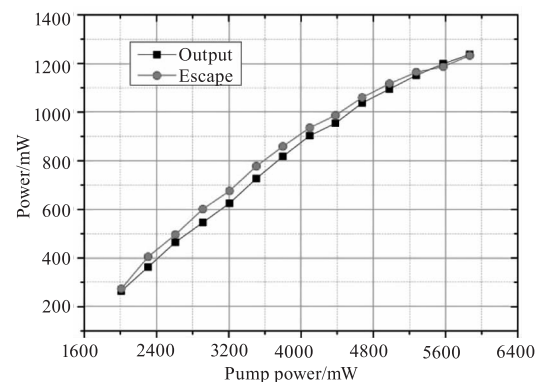


图 5 激光器输出功率随泵浦功率的变化情况

Fig. 5 The relationship curve between the power of Nd : YVO<sub>4</sub> laser and the pump power

#### 5 结 论

利用 TSAG 磁光晶体的法拉第效应,本文设计

了一款双路输出激光器,其输出为线偏振激光,且输出功率随磁场强度变化而变化。当磁场强度不断增强时,输出端的功率不断减小,而逸出端功率则不断增大。当磁场强度为 510.8 mT 时,两个端口的输出镜透过率相等,此时,两路激光的输出功率相等。在 5868 mW 的泵浦功率下,其输出功率为 1237 mW,其转换效率为 21.1%。该激光器在位移测量、区域环境监测和双光梳测距技术等方面具有一定的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Yu Ye, Duan Yanmin, Guo Junhong, et al. Realization and performance study laser of Nd : YVO<sub>4</sub> of  $\pi$ - and  $\sigma$ -polarization crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (7): 282 – 286. (in Chinese)  
俞叶, 段延敏, 郭俊宏, 等. Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体  $\pi$  和  $\sigma$  偏振激光的实现及性能研究 [J]. 中国激光, 2017, 44 (7): 282 – 286.
- [2] Gao Zhihong, Zhang Wenxi, Guo Xiaoli, et al. Single-frequency green laser based on birefringent filter comprising a wedge Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (3): 93 – 99. (in Chinese)  
高志红, 张文喜, 郭晓丽, 等. 基于楔形 Nd : YVO<sub>4</sub>/KTP 双折射滤波的单频绿光激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47 (3): 93 – 99.
- [3] Xie Shaoyu, Ye Mao, Zhao Yiqiang, et al. Target-recognition of laser fuze based on polarization detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47 (1): 13 – 17. (in Chinese)  
谢绍禹, 叶茂, 赵毅强, 等. 偏振探测激光引信目标判别技术 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (1): 13 – 17.
- [4] Hu Fangrong, Xiong Xianming, Dong Tingjin. Target detection and identification based on linear polarization laser active imaging [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (2): 108 – 110. (in Chinese)  
胡放荣, 熊显名, 董挺进. 基于线偏振激光主动成像的目标探测与识别 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (2): 108 – 110.
- [5] Yang Fan, Wang Chunyan, Pang Guangning, et al. Optical system design for underwater polarization detector [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 41 (1): 56 – 59. (in Chinese)  
杨帆, 王春艳, 庞广宁, 等. 基于偏振技术的水下探测器光学系统设计 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41 (1): 56 – 59.
- [6] Mu Chang, Wang Caixia, Duan Ke, et al. Research on underwater target detection technology based on polarization information [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 41 (6): 86 – 89. (in Chinese)  
牟畅, 王彩霞, 段可, 等. 基于偏振信息的激光水下目标探测技术研究 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41 (6): 86 – 89.
- [7] Carvalho Mariana T, Lotay Amrit S, Kenny Fiona M, et al. Random laser illumination: an ideal source for biomedical polarization imaging [J]. Multimodal Biomedical Imaging Xi, 2016.
- [8] Welsh R C, Rosen M S, Coulter K P, et al. Biomedical magnetic resonance imaging and spectroscopy with laser polarized noble gases [J]. Bulletin of the American Physical Society, 2019, 41 (3).
- [9] Zhang Shulian, Tan Yidong. Orthogonal linearly-polarized lasers and its new application in precision measurement [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36 (3): 1 – 11. (in Chinese)  
张书练, 谈宜东. 正交线偏振激光器及其在精密测量中的新应用 [J]. 光电工程, 2009, 36 (3): 1 – 11.
- [10] Zhang Shulian. Physical characteristics of orthogonally polarized dual frequency laser by cavity tuning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48 (5): 12 – 28. (in Chinese)  
张书练. 正交偏振双纵模激光器腔调谐物理效应 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48 (5): 12 – 28.
- [11] Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Lu Yihuai, et al. Design and applicatin of dual-channel scan polarized lidar [J]. Optical Technique, 2009, 35 (2): 261 – 264. (in Chinese)  
董云升, 刘文清, 陆亦怀, 等. 双通道扫描偏振激光雷达的研制及应用 [J]. 光学技术, 2009, 35 (2): 261 – 264.
- [12] Zebin Zhu, Guanhao Wu. Dual-comb ranging [J]. Engineering, 2018, 4 (6): 772 – 778.
- [13] Siyu Zhou, Chen Lin, Yuetang Yang, et al. Multi-pulse sampling dual-comb ranging method [J]. Optics Express, 2020, 28 (3): 4058 – 4066.