

## 被动调 Q 双波长 Yb:YAG 板条激光的偏振控制

张锋宸, 惠沉林, 王丹利, 廖洪林, 林志立, 苏少坚, 庄凤江\*

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

**摘要** 采用激光二极管(LD)来泵浦 Yb:YAG 板条晶体被动调 Q 双波长激光器,开展可控激光输出偏振态的实验研究。实验搭建紧凑的 V 型谐振腔,通过调节输出镜(OC)的倾角可以实现激光输出从 0°水平线偏振到 90°垂直线偏振的切换。通过实验设计可以得出最终的输出偏振态取决于腔内的附加相位差,当腔内附加相位差为  $\pi$  时,输出偏振由水平偏振向垂直偏振切换。实验结果表明:当 OC 倾角的变化量约为 3.6 mrad 时,线偏振态从水平偏振切换至垂直偏振,水平线偏振的消光比最优为 28.98 dB,垂直线偏振的消光比最优为 25.96 dB;在泵浦功率为 18.42 W 时,获得了 1.66 W 的平衡双波长激光输出,对应的脉冲宽度为 42.6 ns。

**关键词** 激光器;被动调 Q;板条激光;偏振控制;双波长输出

中图分类号 O436;TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0814003

## Polarization Control in Passively Q-Switched Dual-Wavelength Yb:YAG Slab Laser

Zhang Fengchen, Hui Chenlin, Wang Danli, Liao Honglin, Lin Zhili,  
Su Shaojian, Zhuang Fengjiang\*

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract** The laser diode (LD) is used to pump the passively Q-switched dual-wavelength laser with Yb:YAG slab crystal, and the experimental study of controllable laser output polarization is carried out. A compact V-shaped resonator is built in the experiment, and the laser output can be switched from 0° horizontal polarization to 90° vertical polarization by adjusting the inclination of the output mirror (OC). Through the experimental design, it can be concluded that the final output polarization depends on the additional phase difference in the cavity. When the additional phase difference in the cavity is  $\pi$ , the output polarization changes from horizontal polarization to vertical polarization. The experimental results show that when the change of OC inclination angle is about 3.6 mrad, the linear polarization is switched from horizontal polarization to vertical polarization, the optimal extinction ratio of horizontal and vertical polarization is 28.98 dB and 25.96 dB, respectively. When the pump power is 18.42 W, a balanced dual-wavelength laser output of 1.66 W and the corresponding pulse width of 42.6 ns are obtained.

**Key words** lasers; passively Q-switch; slab laser; polarization control; dual-wavelength output

## 1 引言

近红外偏振激光源在非线性频率变换<sup>[1]</sup>、激光成像<sup>[2]</sup>和干涉测量<sup>[3]</sup>等领域具有重要的物理意义和应用价值。近年来,研究人员通过控制腔内与偏振相关的损耗来获取具有高消光比的线偏振激光的输

出。为了在光学各向同性的激光晶体中实现具有高消光比的偏振激光的输出,常用方法大多采用特殊的腔结构或者偏振选择元件,如偏振泵浦源<sup>[4]</sup>、布儒斯特角切割激光晶体<sup>[5]</sup>或者在腔内插入薄膜偏振片<sup>[6]</sup>等。人们对于稀土离子掺杂钇铝石榴石(YAG)的研究逐渐深入,发现通过微调谐振腔的结

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505058)、福建省自然科学基金(2020J01062)、厦门市青年创新基金(3502Z20206013)

通信作者: \*fjzhuang@gmail.com

构可以在各向同性的激光晶体中观察到具有高消光比的线偏振激光的直接输出。Goodno 等<sup>[7]</sup>采用端面泵浦板条 Yb:YAG 晶体并采用 ZigZag 光路来减少热致双折射效应,从而观察到稳定的线偏振激光的输出。Li 等<sup>[8]</sup>采用 YAG/Tm:YAG/YAG 和微调谐振腔获得了 5 种线偏振激光的输出。Tang 等<sup>[9-10]</sup>采用 Nd:YAG 激光晶体观察到 0° 和 90° 两种线偏振态的直接输出。类似地,Cheng 等<sup>[11]</sup>采用 Nd:YAG 晶体观察到双波长正交偏振态的输出。这些基于谐振腔来调控直接输出具有高消光比的线偏振激光的方法不需要引入额外的偏振选择元件,具有操作简单、装置紧凑和光-光转换效率高等优点,为设计具有高消光比的偏振激光源提供了一个新思路。

本文基于 Yb:YAG 板条晶体的激光输出特性并结合其双波长激光增益特性,开展了调控双波长激光线偏振态的实验研究,以设计具有高消光比的线偏振双波长激光器。实验中,通过调节输出镜(OC)的倾角,可以有效地实现线偏振态从水平线偏振 0° 到垂直线偏振 90° 的切换,并能够获得具有高消光比的线偏振激光。另一方面,本文详细地分析了线偏振态随 OC 倾角变化的情况,通过理论模型探究了线偏振态的切换机制。通过理论分析得出,当 OC 的倾角从 0 增大至 3.6 mrad,即腔内本征模之间的相位差从 0 增加至  $\pi$  时,可以获得由水平偏振态过渡至垂直偏振态的输出。当腔内本征模的附加相位差保持在 0 或  $\pi$  时,谐振腔产生了水平线偏振或者垂直线偏振的输出,由此说明实验结果与仿真分析基本一致。实验结果证实,OC 倾角的改变与腔内本征模之间的相位差存在紧密的联系,输出的线偏振态取决于腔内本征模的附加相位差,这有助于设计高效紧凑的可控偏振固体激光器。

## 2 实验装置

激光实验装置采用紧凑的 V 型折叠腔结构,主要由波长为 940 nm 的 LD(Laser Diode)光纤耦合泵浦器、输入耦合透镜组、输入镜 M1、Yb:YAG 板条激光晶体、折叠镜 M2、Cr:YAG 调 Q 晶体以及 OC 组成,如图 1 所示。为了消除偏振泵浦对实验结果的影响,LD 光纤耦合泵浦器为无偏振输出,中心波长为 940 nm,数值孔径为 0.22,芯径为 105  $\mu\text{m}$ 。采用耦合比为 1:2 的输入耦合透镜组将泵浦光聚焦入射到激光晶体端面上,激光晶体端面上泵浦光斑的大小约为 250  $\mu\text{m}$ ,经过输入耦合透镜组后的最大泵浦功率约为 20.25 W。Yb:YAG 板条

激光晶体的尺寸为 1 mm $\times$ 10 mm $\times$ 5 mm,掺杂浓度(原子数分数)为 5%,激光晶体的两端面均镀有波长在 1020~1060 nm 之间的增透膜,激光晶体用铝箔包裹并安装在具有 TEC(Thermo Electric Cooler)的铜块上,控制冷却温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。Cr:YAG 的尺寸为 3.00 mm $\times$ 3.00 mm $\times$ 1.75 mm,前后表面均镀有波长在 1.0~1.1  $\mu\text{m}$  之间的增透膜,透过率为 92.5%。M1 为平凹镜,曲率半径为 150 mm,镀有波长为 940 nm 的增透膜和波长在 1020~1060 nm 之间的高反膜。M2 为平凹镜,曲率半径为 150 mm,镀有波长在 1020~1060 nm 之间的高反膜。为了实现双波长运转,之前的研究中证明了满足双波长振荡条件的输出耦合镜的透过率约为 86%<sup>[2-14]</sup>。由于 Cr:YAG 的插入损耗将会明显提高双波长运转的条件,实验最终采用波长在 1020~1060 nm 之间、透过率为 10% 的 OC,整个谐振腔的长约为 27 cm。通过分光片与衰减片的结合可以将输出激光的功率衰减至合适的值,采用格兰棱镜可以分析输出激光的偏振态。采用硅基光电探头和示波器(带宽为 1 GHz)可以记录调 Q 激光的脉宽和频率,同时通过光谱仪可以检测输出激光波长的情况。

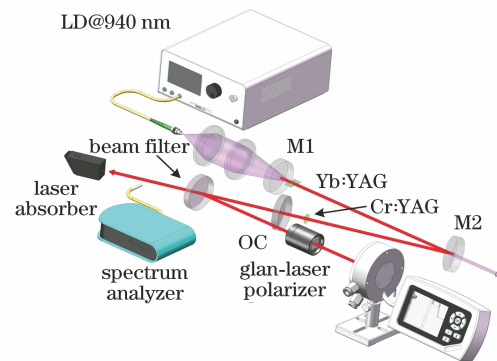


图 1 波长为 940 nm 的 LD 泵浦板条 Yb:YAG 激光的实验装置

Fig. 1 Experimental device of LD-pumped slab Yb:YAG laser with wavelength of 940 nm

## 3 分析与讨论

Yb:YAG 激光实验装置搭建完成后,首先测量输出功率和脉冲宽度随泵浦功率的变化情况,结果如图 2 所示。结合光谱仪来测量输出波长,当双波长同时振荡时,泵浦功率约为 16.48 W(图 2 阴影区域)。随着 LD 泵浦功率的增加,腔内双波长之间的增益趋于相等,说明两者竞争达到平衡,在泵浦功率为 18.42 W 时获得了平衡的双波长输出。图 3 显示了在双波长输出平衡时的激光波长和脉冲宽度,

对应的中心波长分别位于 1029.6 nm 和 1049.3 nm,此时光-光转换效率约为 9.0%。同时,采用光电探头和示波器监测了调 Q 激光的脉宽随泵浦功率的变化情况。随着谐振腔内功率密度的提升,调 Q 激光的脉宽从 78.6 ns 逐渐缩小至约 45.0 ns。值得注意的是,当 LD 的泵浦功率进入双波长区域(泵浦功率为 16.48 W)时,调 Q 激光的脉宽呈现增大的趋势,并存在一定的波动,这是由于 1030 nm 波长的激光发射截面是 1050 nm 波长的激光发射截面的 7 倍左右,说明 1030 nm 波长的激光更容易向下能级跃迁而形成窄脉宽的巨脉冲。当泵浦功率达到四能级系统的 1050 nm 起振条件时,1050 nm 波长的激光振荡后减小了巨脉冲的脉宽。同时,准三能级与四能级系统的增益竞争会造成输出功率存在  $\pm 0.1$  W 左右的波动,也造成调 Q 激光的脉宽存在一定的波动。当双波长输出达到平衡,即四能级系统的增益大于准三能级系统时,调 Q 激光的脉宽趋于稳定。

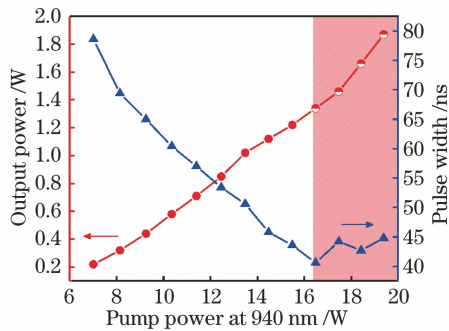


图 2 输出功率与脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线  
Fig. 2 Curves of output power and pulse width with pump power

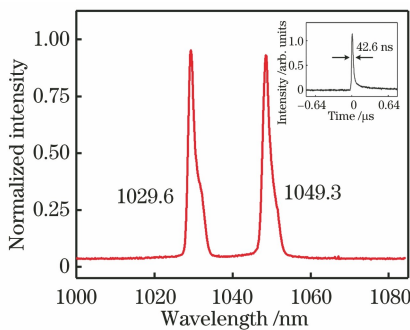


图 3 平衡双波长激光的光谱及脉宽图  
Fig. 3 Spectrum and pulse width of balanced dual wavelength laser

进一步研究 Yb:YAG 板条激光器的线偏振特性,激光器输出的激光通过格兰棱镜来分析偏振消光比(PER)以评价线偏振度(实验定义水平方向为

$0^\circ$ ,垂直方向为  $90^\circ$ )。实验研究中,通过调节螺丝螺距的变化量和调整架的结构来获得倾角值,以  $10^\circ$  为间隔旋转格兰棱镜,记录不同 OC 倾角下的功率分量变化情况。图 4 为不同 OC 倾角下归一化功率分量与格兰棱镜角度的关系。如图 4 所示,将在水平偏振的 PER 值最大时对应的 OC 位置定义为倾角 0,随着 OC 的倾角从 0 逐渐改变至 2.5 mrad,在格兰棱镜后端测得的归一化功率分量趋于 0.5(图 4 的三角点线)。从图 4 阴影区域可以看出,当格兰棱镜角度在  $40^\circ \sim 50^\circ$  之间时,归一化功率分量均趋于 0.5,说明各偏振态在这角度之间的投影分量相等。在 OC 倾角为 2.5 mrad 时,激光输出的偏振态为无偏振态,如图 5 的三角点线所示。如图 5 的圆形点线所示,在泵浦功率为 13.48 W 时,PER 值为 28.96 dB 的偏振激光所输出的偏振态为水平偏振态,改变 OC 倾角后,水平方向和垂直方向的功率分量呈现此消彼长,最终显示出垂直偏振的特征。如图 5 的方形点线所示,在 OC 倾角为 3.6 mrad 时,垂直偏振的 PER 值最大达到 21.36 dB,通过改变 OC 的倾角可以实现对激光输出偏振态的调整,总体表现为从水平偏振过渡到无偏振至垂直偏振的变化过程。

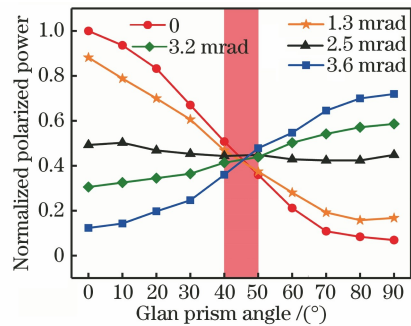


图 4 不同 OC 倾角下归一化功率分量与格兰棱镜角度的关系  
Fig. 4 Relationship between normalized power component and glan prism angle under different OC obliquity

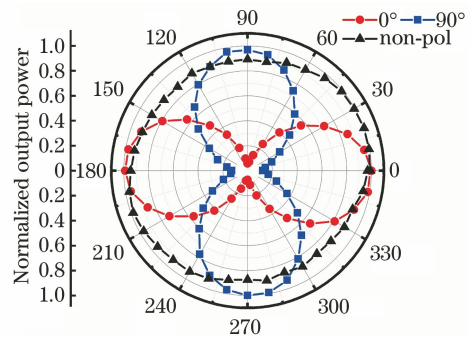


图 5 板条 Yb:YAG 输出的线偏振态特性图  
Fig. 5 Linear polarization characteristic diagram of slab Yb:YAG output



根据实验结果可知,当 OC 倾角分别为 0 和 3.6 mrad 时,谐振腔获得了具有高 PER 的两个本征偏振模式,即 OC 镜倾角的改变伴随谐振腔结构的变化,从而引起两个正交本征模式之间的切换。两个正交偏振模式的有效切换,可以用类似波片的相位差来解释。通过对腔内空间相位差的分析,当相位差为  $\pi$  时,两个本征模式之间实现了有效切换,即水平-垂直线偏振输出的切换。因此,根据谐振腔的参数来建立理论模型,使用该模型来分析 OC 倾角的改变引起谐振腔内本征模相位差的变化情况,腔结构示意图如图 6(a)所示。M1 和 M2 均为平凹透镜,曲率半径均为 150 mm, M1 和 M2 之间的距离为 150 mm。OC 为平面镜,其与 M2 之间的距离为 120 mm, OC 倾角角度的变化量为  $\theta$ , 起始光程长度为  $L_0 + L_1$ , OC 倾角调整后的光程长度为  $L_2 + L_3$ , 其中  $L_0 \sim L_3$  分别为 OC 倾角调整前 M2 与 OC 的距离和 M1 与 M2 的距离、OC 倾角调整后的 M2 与 OC 的距离和 M1 与 M2 的距离。本征模之间的相位差为  $\Delta\varphi$ 。根据图 6(a)的腔型并结合三角几何关系,往返一周后相位变化量  $\Delta\varphi$  的表达式为

$$\Delta\varphi = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda}(L_2 + L_3 - L_1 - L_0), \quad (1)$$

$$L_2 = \sqrt{(R - L_0)^2 \cos^2 \theta - L_0^2 + 2RL_0} - (R - L_0) \cos \theta, \quad (2)$$

$$L_3 = 2 \sqrt{L_2^2 \sin^2 \theta + \frac{1}{4}R^2}, \quad (3)$$

式中:  $R$  为 150 mm;  $\lambda$  为基频光波长 1030 nm。将

谐振腔的参数代入(3)式,忽略晶体热效应因素的影响,得到  $\Delta\varphi$  与 OC 倾角之间的关系,如图 6(b)所示。从图 6(b)可以看出,随着 OC 倾角的增加,  $\Delta\varphi$  为一个单调递增的函数,当 OC 倾角为 3.6 mrad 时,  $\Delta\varphi$  增加至  $\pi$  会产生垂直偏振的输出,此时若继续增加 OC 倾角,即大于 4 mrad,将会导致激光的输出功率显著下降,这是由于 OC 倾角调整过大而导致谐振腔进入非稳态,如图 6 阴影区域所示。实验中在 OC 倾角处于 0 时反方向调节 OC 倾角,在 OC 倾角为 -2.55 mrad 时获得了无偏振输出;继续减小 OC 倾角,即小于 -3 mrad,激光的输出功率显著下降,谐振腔进入非稳态。两个方向的倾角调节范围不一致的原因:由于 PER 值最优所对应的 OC 倾角与功率最佳所对应的 OC 倾角不处于同一个位置。在 -2.5 mrad 倾角附近也观察到无偏振输出的结果,这证实了正反改变 OC 倾角都起到改变  $\Delta\varphi$  的作用。当 OC 倾角约为 2.55 mrad ( $\Delta\varphi = \pi/2$ ) 时,谐振腔产生了功率分量均一的输出,进一步在腔外放置 1/4 波片来检测其输出为无偏振态,无偏振态输出的原因可以理解为腔内圆偏振的各分量受激辐射的结果。腔内存在由圆偏振光振荡产生各方向的电矢量,电矢量通过激光晶体后会产生各种偏振方向的受激辐射光,且这些偏振态同时存在会导致最终输出结果为无偏振态。综上,OC 倾角的改变所引起的腔相位变化可等效为腔内线偏振光通过波片的物理过程,这可以有效分析 OC 倾角变化对输出激光线偏振态的影响,实验结果与理论分析基本一致。

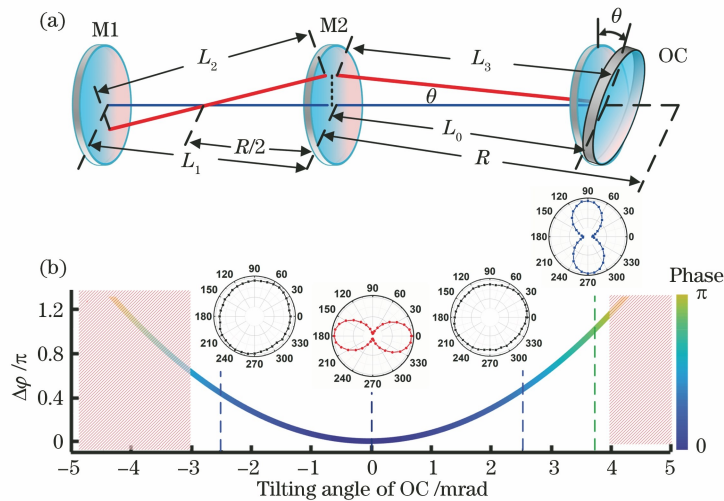


图 6 腔内相位差的理论分析图。(a)腔内相位差的计算模拟示意图;(b) OC 倾角与腔内相位差的仿真结果

Fig. 6 Theoretical analysis diagram of phase difference in cavity. (a) Schematic of calculation and simulation of phase difference in cavity; (b) simulation results of tilting angle of OC and phase difference in cavity

采用 SP620U 型激光光束分析仪来测量输出光斑的空间分布。当泵浦功率为 18.42 W 时,平衡双波长在运行情况下输出激光的光束轮廓如图 7 所示。从图 7 可以看到,在水平偏振输出或者垂直偏振输出的情况下,输出光束维持良好的高斯分布,两种偏振所对应的光束质量因子均优于 1.2。此外,在泵浦功率为 18.42 W 时,采用硅基光电探头和示波器来记录被动调 Q 激光的重复频率,测得输出脉冲的频率约为 4 kHz,对应的单脉冲能量约为 0.4 mJ,脉冲序列如图 7 所示。Cr:YAG 存在激发态吸收等问题,使得 Q 开关在每次开启时间存在波动,从而导致 Q 开关存在重频不稳定等问题,这可进一步采用预抽运<sup>[15]</sup>来改善被动调 Q 激光的不稳定性。综上所述,实验中获得的线偏振激光总体上维持较高的消光比,具有良好的光束质量,可用于设计稳定可靠的线偏振板条激光器。

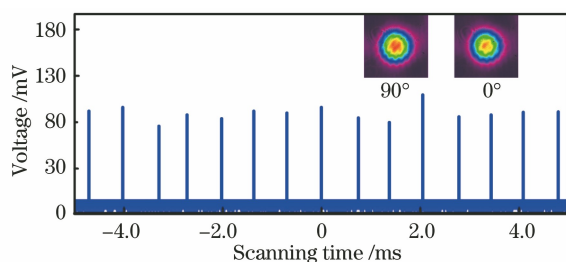


图 7 双波长线偏振下的脉冲序列及光斑图

Fig. 7 Pulse train and spot pattern in dual wavelength linear polarization

## 4 结 论

本文采用波长为 940 nm 的 LD 泵浦板条 Yb:YAG 晶体被动调 Q 双波长激光器,通过微调谐振腔的结构可以实现偏振态从水平偏振到垂直偏振的切换。在泵浦功率为 18.42 W 时获得了平衡双波长的输出,对应的输出功率和脉冲宽度分别为 1.66 W 和 43.6 ns。实验中,通过调节 OC 倾角可以实现偏振态从水平偏振至垂直偏振的变化,水平偏振的 PER 值最优为 28.98 dB,垂直偏振的最优 PER 值为 25.96 dB。理论模拟解析了腔内本征模在相位差为  $\pi$  时,激光输出的水平-垂直偏振之间的切换,证实了 OC 倾角变化对输出激光线偏振态的影响,实验结果与理论分析基本一致。本激光器不需要额外的偏振元件,可通过调控谐振腔来实现激光输出偏振态的切换,具有操作简单和输出线偏振质量高等优点,所设计的激光器在光学计量、医学诊断和水下成像等领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Budni P A, Pomeranz L A, Lemons M L, et al. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(5): 723-728.
- [2] Cui W Y, Huang W J, Yi W N. Calibration and preprocessing method for amplitude divided simultaneous imaging polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2011002.  
崔文煜, 黄文娟, 易维宁. 分束型同时偏振成像系统定标及预处理方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2011002.
- [3] El-Damak A R, Chang J H, Sun J, et al. Dual-wavelength, linearly polarized all-fiber laser with high extinction ratio [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 1501406.
- [4] Liu J L, Chen X Y, Wang R M, et al. A stable wavelength operation Ho:YAG laser with orthogonally polarized pump [J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(2): 12-14.
- [5] Baum A, Grebner D, Paa W, et al. Axial mode tuning of a single frequency Yb:YAG thin disk laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(8): 1091-1096.
- [6] Khandokhin P A, Khanin Y I, Mamaev Y A, et al. Low-frequency dynamics of a class B laser with two elliptically polarised modes [J]. *Quantum Electronics*, 1998, 28(6): 502.
- [7] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, et al. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1672-1674.
- [8] Li Y, Chen W D, Lin H F, et al. Manipulation of linearly polarized states in a diode-pumped YAG/Tm:YAG/YAG bulk laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1945-1948.
- [9] Tang K F, Liao W B, Li K, et al. Coherent combination of two intracavity eigenmodes producing linearly polarized emission in an isotropic laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34337-34345.
- [10] Tang K F, Liao W B, Lin D, et al. Self-polarization emission based on coherent combination of intracavity eigenmodes in Nd:YAG/Cr<sup>3+</sup>:YAG lasers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(2): 021401.
- [11] Cheng H P, Liu Y C, Huang T L, et al. Orthogonally polarized single-longitudinal-mode operation in a dual-wavelength monolithic Nd:YAG laser at 1319 nm and 1338 nm [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(8): 815.
- [12] Taira T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG

- lasers[J]. Applied Optics, 1997, 36(9): 1867-1874.
- [13] Zhuang F J, Shu Q H, Gong D M, et al. Optical bistability in diode-end-pumped dual-wavelength Yb:YAG laser for all-optical switching [J]. Optical Materials, 2020, 107: 110146.
- [14] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. Science, 1988, 239(4841): 742-747.
- [15] Wang Y, Jiang M H, Hui Y L, et al. Passively Q-switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup> microchip laser with low time jitter and high repetition rate[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1014004.  
王煜, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 小时间抖动、高重复频率 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微型激光器[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1014004.