

基于腔内偏振分束器偏振控制的线偏振掺镱 双包层光纤激光器

冯德军¹ 刘冠秀¹ 张茂森¹ 刘希路¹ 宁 鼎² 姜守振³

¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100
² 中国电子科技集团公司第 46 研究所, 天津 300220
³ 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014

摘要 研究了一种单双波长可切换的线偏振掺镱双包层光纤激光器结构, 腔内插入可以绕光轴方向旋转的立方体偏振分束器(PBS)进行偏振控制, 实现单双波长的转换。激光谐振腔由高反射率的双色镜和较低反射率(10.2%)的保偏光纤布拉格光栅(PM-FBG)构成; 由于保偏光纤光栅的偏振选择反馈作用增强了偏振烧孔效应, 通过调节谐振腔内偏振分束器的旋转角度实现了激光的单双波长之间的切换。利用琼斯矩阵理论分析了偏振态与旋转角度的关系, 其结果与实验结果吻合。实验中输出激光的双波长为 1070.08 nm 和 1070.39 nm、功率为 1 W、激光信噪比为 48 dB、斜率效率为 34%、3 dB 带宽为 0.02 nm。利用格兰-汤姆孙棱镜对该激光的偏振特性进行了研究: 单波长运转时为线偏振激光, 偏振度达 13.37 dB; 双波长运转时为正交偏振激光。

关键词 激光器; 掺镱光纤激光器; 保偏光纤布拉格光栅; 偏振度; 斜率效率

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0714002

Linear Polarized Yb³⁺-Doped Double-Clad Fiber Laser with an Intracavity Cubic Polarization Beam Splitter as Polarization Selection

Feng Dejun¹ Liu Guanxiu¹ Zhang Maosen¹ Liu Xilu¹
Ning Ding² Jiang Shouzhen³

¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China
² China Electronics Technology Group Corporation No.46 Research Institute, Tianjin 300220, China
³ College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China

Abstract A single and dual-wavelength switchable linear polarization Yb-doped double-clad fiber laser configuration is proposed, in which the resonance cavity is composed of a fiber Bragg grating fabricated in a polarization maintaining fiber and a high reflectivity dichromatic mirror. A cubic polarization beam splitter (PBS) rotating around its own optical axis is inserted between the high reflection cavity mirror and the collimator in the laser cavity, which is used to adjust the polarization to realize single and dual-wavelength lasing emission. The polarization hole burning is enhanced by the selective polarization feedback from the polarization maintaining fiber Bragg grating (PM-FBG). The relationship between polarization states and rotating angle of PBS is analyzed by using Jones matrix, which agrees well with the experimental results. The laser features wavelength of 1070.08 nm and 1070.39 nm, output power of 1.0 W, signal noise ratio of 48 dB, slope efficiency of 34%, as well as a very narrow linewidth of 0.02 nm. The polarization characteristics are studied by measuring the laser power transmitted through a Glan-Thomson polarizer. The polarization state of the laser is linearly polarized with a polarization degree of 13.37 dB when it is lasing at single wavelength, while it is orthogonal polarization laser for dual wavelength operating.

收稿日期: 2014-01-12; 收到修改稿日期: 2014-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(61377043, 61205174)、山东省自然科学基金(ZR2011FM013, ZR2011AL005)、中国电子工业集团第 46 研究所创新基金(CJ20130303)

作者简介: 冯德军(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学全息与光信息处理、光纤传感技术、光纤光栅研制和光纤激光器等方面的研究。E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn

Key words lasers; Yb³⁺-doped fiber laser; polarization maintaining fiber Bragg grating; degree of polarization; slope efficiency

OCIS codes 140.3615; 060.3735; 260.5430

1 引 言

目前对连续(CW)输出的掺 Yb 光纤激光器的研究主要集中于两个方向:1)向单纤高功率方向发展,其中最近公开报道的单根掺 Yb 光纤的连续单模输出超过 3 kW^[1],而脉冲方式运转的峰值功率在 5 MW 以上,2)向获得高光束质量方向发展^[2-4],如以实现双波长或者多波长、单横模、单频、线偏振、窄线宽等为目的,进而推进光纤激光器在波分复用系统、微波信号产生、高分辨率光谱仪和光纤传感等领域的应用。其中,线偏振掺 Yb 光纤激光器在激光频率非线性转换(如二次谐波的产生)、偏振激光组束、相干光纤传感器、超连续谱产生和作为主振荡光纤功率放大(MOPA)的种子源等方面具有重要用途^[5-8],因而引起了研究者极大的兴趣。

近年来,实验上通过几种常见偏振控制方案实现了线偏振窄线宽掺 Yb 光纤激光器输出。Jelger 等^[9]使用了体布拉格光栅(VBG)和一个薄膜起偏器作为波长和偏振态选择器件,实现了线宽为 0.2 nm,偏振消光比(PER)为 15 dB 的激光输出,但该方案中的体布拉格光栅在激光高功率时发热较严重,对光的吸收和散射带来较大影响。Shirakawa 等^[10]把两个保偏光纤布拉格光栅(PM-FBG)熔接在增益光纤两端构成激光腔,实现了 PER 为 18 dB,线宽为 0.02 nm 的激光输出。该方案要求两个保偏光栅必须正交熔接,即快轴和慢轴正交熔接以实现激光偏振振荡,其中作为输出腔镜的光栅的波长(对应快轴)必须通过精确温度控制才能保证与高反腔镜的光栅谐振波长(对应慢轴)对准,实现稳定激光输出的温度范围仅 8 °C,复杂的温度控制和激光波长的不可调谐是该方案的主要弊端。Goto 等^[11]利用飞秒激光在单偏振的光子带隙光纤中刻写的光纤布拉格光栅(FBG)作为输出腔镜,方案利用双色镜引入抽运光,实现了 1068 nm 的线偏振激光输出,其中 PER 为 19.6 dB。Dong 等^[12]采用紫外光在 Corning 公司的单偏光纤上刻写 FBG 作为高反腔镜,与保偏掺 Yb 双包层增益光纤(YDCF)的另一端熔接的一段单偏光纤构成谐振腔,实现了线偏振激光,激光线宽为 0.054 nm,PER 为 28 dB。该方案中使用的单偏振光纤相对稀缺,增益光纤与单偏光纤之间的熔接需要专门的熔接机,且二者模场的

失配带来较大熔接损耗。Zhang 等^[13]报道了利用偏振相关的光纤环镜作为高反腔镜、刻写在保偏 PM980 光纤上的 FBG 作为输出腔镜,实现了线偏振激光输出(PER 大于 20 dB)。

本文利用反射率较低的 PM-FBG 和高反射率的双色镜(DM)构成激光谐振腔^[14],实现了双波长正交偏振的掺镱光纤激光运转;由于和 PM-FBG 两个反射峰对应的不同激光波长的偏振态相互正交,从而在均匀展宽的掺镱光纤中增强了偏振烧孔(PHB)效应,偏振烧孔效应大大降低了不同模式之间的竞争,利于优势模的运转。其次,在腔内的双色镜和准直器之间插入立方体偏振分束器(PBS),绕着激光光轴方向旋转 PBS,可以实现激光分别在双波长和两个单波长之间的切换;在单波长运转时,激光为线偏振激光。

2 实验方案

以 PM-FBG 作为输出腔镜的掺 Yb 双包层光纤激光器的实验装置如图 1 所示。采用美国 Alfalight 公司生产的中心波长为 915 nm、尾纤输出最大功率为 4.8 W 的多模半导体激光器作为抽运源,尾纤为 100 μm/125 μm 的多模光纤。抽运光经(2+1)×1 的锥形光纤束(TFB)耦合到一段优化长度约为 13.6 m 的双包层保偏单模掺镱光纤中,光纤的纤芯数值孔径(NA)为 0.13,内包层数值孔径为 0.46,对抽运光(915 nm)的吸收系数为 0.6 dB/m;TFB 中的单模光纤和一个单模光纤准直器相熔接,输出的准直光垂直地照射到一个 1 μm 波段高反射率(反射率大于 96%)的双色镜上;而增益光纤右端熔接上一个 PM-FBG 作为谐振腔的输出腔镜,二者构成谐振腔。在双色镜和准直器之间插入一个可以在绕着激光轴向光路的方向上作转动的 PBS。通过 PBS 的旋转,腔内相互垂直的双波长偏振激光振荡与 PBS 的主轴的夹角发生变化,以光谱仪观察激光光谱的变化,即可观察到单、双波长激光的转换过程。激光输出腔镜即 PM-FBG 是采用相位掩模法在载氢 PM980 保偏光纤中刻写,其光栅透射谱如图 2 所示。光栅的反射率为 10.2%,长度为 2 cm,3 dB 宽度为 0.11 nm,对应于快慢轴的布拉格反射波长分别为 1069.72 nm 和 1069.97 nm。

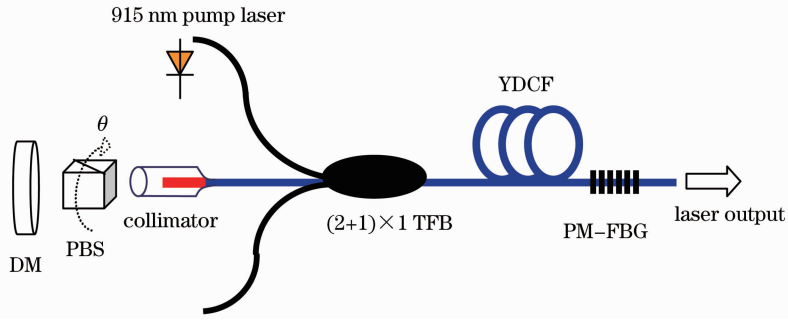


图 1 单双波长可切换的掺镱双包层激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single and dual-wavelength switchable Yb-doped double-clad fiber laser

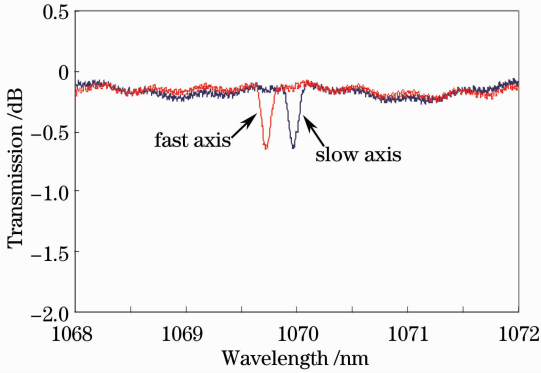


图 2 保偏光纤布拉格光栅的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of PM-FBG

3 实验结果及讨论

双波长激光输出光谱如图 3 所示,两波长分别为 1070.08 nm 和 1070.39 nm, 3 dB 带宽为 0.02 nm, 信噪比为 48 dB。两个波长间隔约为 0.3132 nm, 略大于由 PM980 保偏光纤的拍长 ($L_B \approx 3.3$ mm) 决定的间隔, 即 $\Delta\lambda_B = \frac{2\Delta\lambda}{L_B} = 0.26$ nm, 其中 L_B 为保偏光纤拍长, λ 为光栅的工作波长, $\Delta\lambda_B$ 为光栅的两个布拉格反射波长之差, Δ 为光栅周期。双波长激光输出光谱的波长间隔大于保偏光纤拍长决定的间隔, 这是由于实验中固定光栅时引入了一定的应力双折射所引起; 同时引入的预应力导致光栅的布拉格波长较之自由状态时增加一些。旋转 PBS 使激光腔内入射到 PM-FBG 的光具有不同偏振态, 经过光栅后对偏振态的选择性反馈, 极大地增强了腔内偏振态的非均匀性, 并在均匀展宽的掺镱光纤增益介质中增强了偏振烧孔效应从而抑制了不同模式间的竞争。当 PBS 旋转到一定的角度时, 会实现双波长运转。当 PBS 的主轴方向平行于 PM-FBG 的任一偏振方向时, 将产生单波长激光运转。

图 4 给出了 PBS 旋转 180° 的过程中, 观察到的

激光双、单波长切换的过程。图中 $\lambda_{p//}$ 和 $\lambda_{s\perp}$ 表示偏振正交的两个激光波长, $\lambda_{p//} > \lambda_{s\perp}$; 虚线表示 PBS 的主轴方向; 角度 θ 表示 PBS 在旋转刻度盘上的读数。可见, 当 $\theta = 222^\circ$ 和 $\theta = 132^\circ$ 时, 沿 PBS 主轴方向的光会在 $\lambda_{p//}$ 和 $\lambda_{s\perp}$ 两个方向具有相通的分量, 因此形成双波长运转; 当 θ 由 222° 变化为 177° 时, 光只有沿 $\lambda_{s\perp}$ 方向有分量, 形成短波长线偏振激光, 在此变化过程中的 200° 位置则可看到较弱的长波长位置的激光。而在 $\theta = 132^\circ$ 变化到 $\theta = 42^\circ$ 过程中, 在 $\theta = 87^\circ$ 产生长波长位置的线偏振激光。综上所述, 在 PBS 旋转一周的过程中, 会出现两次 $\lambda_{p//}$ 、两次 $\lambda_{s\perp}$ 和四次双波长激光。

偏振烧孔效应使得激光腔中形成一对正交的线偏振激光, 设其强度均为 A , 短波长激光对应的琼斯矢量设为: $A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, 长波长激光对应的琼斯矢量设为: $A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, 则腔内激光的 Jones 矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在腔内插入 PBS 后, 主轴与 PM-FBG 的快轴的夹角为 α , 则 PBS 的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{G}_{\text{PBS}} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

所以输出激光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{G}_{\text{PBS}} \cdot \mathbf{E}_1, \quad (3)$$

当 $\alpha = 0^\circ, 180^\circ$, $\mathbf{E}_2 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, 输出短波长激光; 当 $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$, $\mathbf{E}_2 = A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, 输出长波长激光; 当 $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时, $\mathbf{E}_2 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$, 输出双波长激光。可

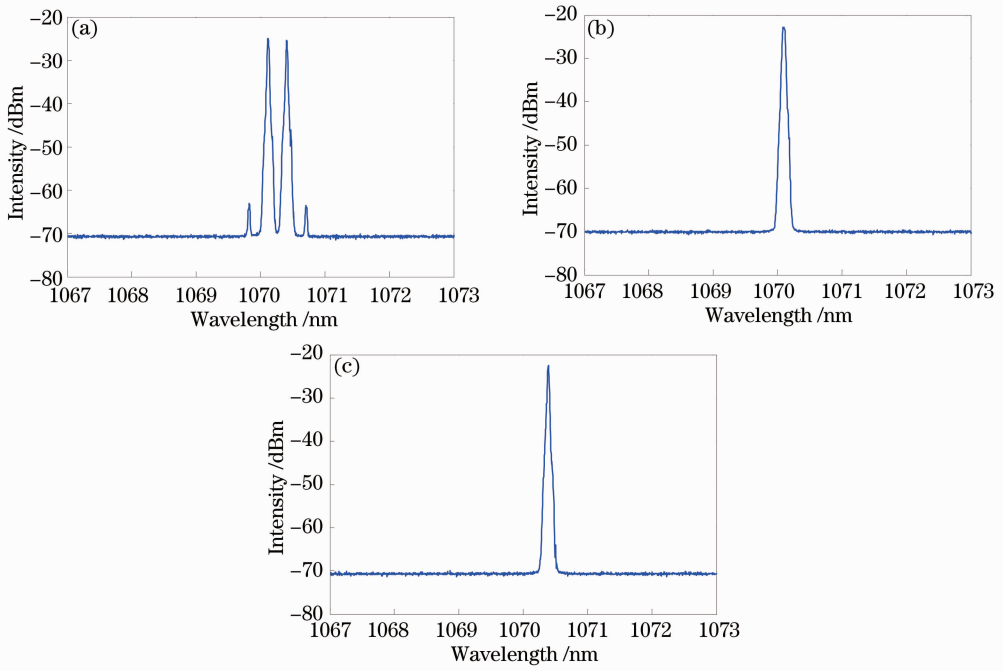


图 3 掺镱双包层光纤激光器的输出激光谱。(a)双波长；(b)波长仅为 1070.08 nm；(c)波长仅为 1070.39 nm
 Fig. 3 Spectra of Yb^{3+} doped fiber laser. (a) Dual-wavelength; (b) wavelength of 1070.08 nm;
 (c) wavelength of 1070.39 nm

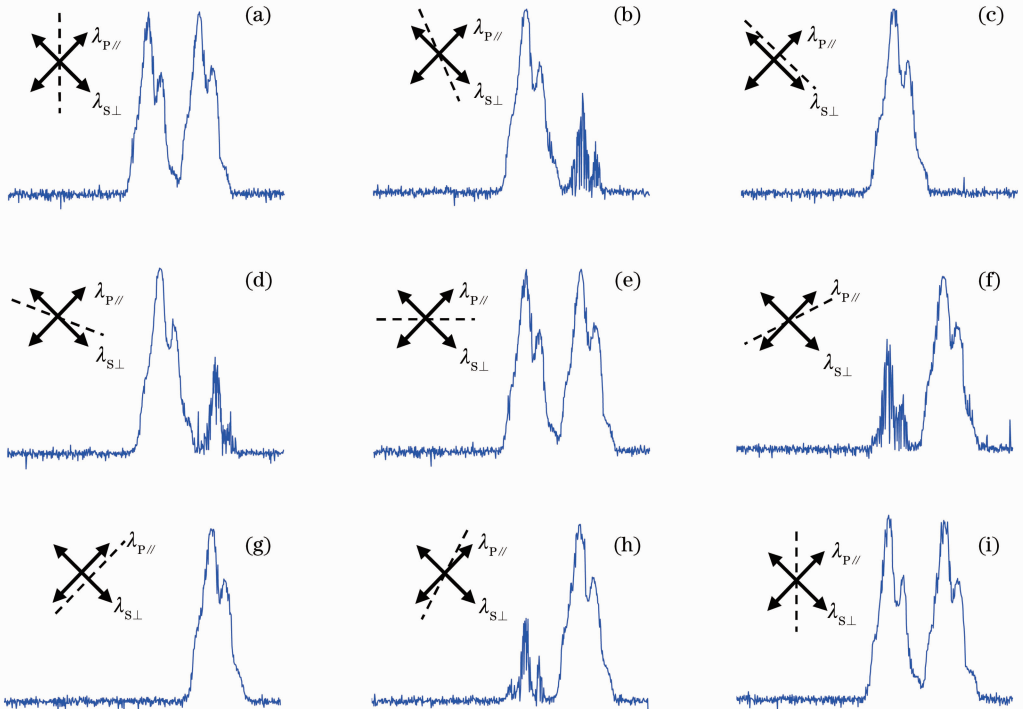


图 4 PBS 不同旋转角度下的激光光谱。(a) $\theta=222^\circ$ ；(b) $\theta=200^\circ$ ；(c) $\theta=177^\circ$ ；(d) $\theta=155^\circ$ ；(e) $\theta=132^\circ$ ；(f) $\theta=110^\circ$ ；
 (g) $\theta=87^\circ$ ；(h) $\theta=65^\circ$ ；(i) $\theta=42^\circ$

Fig. 4 Spectra of Yb^{3+} doped fiber laser under different rotation degrees. (a) $\theta=222^\circ$ ；(b) $\theta=200^\circ$ ；(c) $\theta=177^\circ$ ；
 (d) $\theta=155^\circ$ ；(e) $\theta=132^\circ$ ；(f) $\theta=110^\circ$ ；(g) $\theta=87^\circ$ ；(h) $\theta=65^\circ$ ；(i) $\theta=42^\circ$

见，激光的理论变化规律与实验吻合， α 与 θ 的对应关系可表示为 $\alpha = \theta + 177^\circ + k\pi$, k 为整数。

图 5 给出了输出功率随入纤抽运功率变化的关系曲线。斜率效率为 34%，随抽运功率的增长，激

光输出功率未出现饱和,说明可以获得更高的输出功率,受限于抽运激光功率。在单双波长激光运转时的斜率效率基本一致,入纤抽运功率为 3.2 W 时,得到最大输出功率为 1 W。

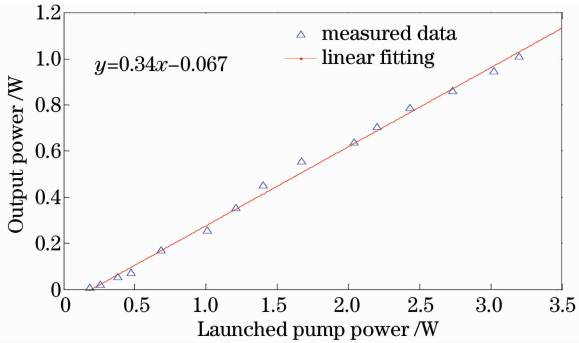


图5 激光输出功率与入纤抽运功率的关系曲线

Fig. 5 Output power versus launched pump power

表1 不同抽运电流下,单波长线偏振激光的偏振度

Table 1 Degree of polarization of single wavelength linear polarization laser at different pump currents

| Pump current / A | Output power / mW | Transmittive power / mW | | Degree of polarization | |
|------------------|-------------------|-------------------------|------------|------------------------|-----------------------------|
| | | I_{\max} | I_{\min} | $P / \%$ | $P_{\text{dB}} / \text{dB}$ |
| 2 | 266 | 182 | 9 | 90.57 | 10.26 |
| 4 | 628 | 444 | 14 | 93.89 | 12.14 |
| 6 | 948 | 664 | 16 | 95.29 | 13.27 |
| 6.5 | 1010 | 720 | 17 | 95.39 | 13.37 |

4 结 论

研究了一种双波长可切换线性偏振掺镱双包层光纤激光器。利用 PM-FBG 和高反射率的双色镜构成激光谐振腔。单模保偏掺镱双包层光纤作为增益介质,由于 PM-FBG 的反馈选择反馈作用增强了偏振烧孔效应。通过调节腔内的 PBS 的旋转角度,实现了激光在两个单波长和双波长之间运转的切换。在 PBS 旋转一周的过程中,会出现两次 $\lambda_{p//}$,两次 $\lambda_{s\perp}$ 和四次双波长激光。输出激光波长为 1070.08 nm 和 1070.39 nm,功率为 1 W,激光信噪比为 48 dB 和斜率效率为 34%,3 dB 带宽为 0.02 nm。利用格兰-汤姆孙棱镜对该激光的偏振特性进行了研究,结果表明,单波长的激光是线偏振激光,且随抽运电流的增加,偏振度有所改善,在抽运电流由 2 A 增加到 6.5 A 时,偏振度由 10.26 dB 增加到 13.37 dB。而双波长激光经过旋转的分光镜时则没观察到激光功率的变化,从而验证了该双波长激光为正交偏振的线偏振光。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所全

为了验证单波长运转时激光的线偏振特性,输出激光入射到格兰-汤姆孙(Glan-Thomson)棱镜上,测量了其透射光强度随棱镜的旋转角度而变化。表1给了不同抽运电流下,输出激光在棱镜旋转过程中得到的最小和最大的激光功率,由偏振光的偏振度的定义式: $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ 和 $P_{\text{dB}} = -10\lg(1 - P)$,分别得到百分比和 dB 单位表示的偏振度,激光的偏振度最大为 13.37 dB。所采用的 PBS 的透射消光比为 100:1,若采用更高品质的 PBS,则偏振度有望得到提高。

由马吕斯定律知,两束同强度相互正交的线偏振光沿格兰-汤姆孙棱镜的偏振轴方向投影的合成强度不随角度旋转而改变。因此,实验观察到双波长激光经过分光镜后,得到的光强不随分光镜旋转角而变化,为正交偏振的双波长激光^[12]。

固态激光与应用技术重点实验室周军研究员给予的实验支持和有益讨论。

参 考 文 献

- 1 V Khitrov, J D Minelly, R Tumminelli, *et al.*. 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser [C]. SPIE, 2014, 8961: 89610V.
- 2 E Wikszakl, J Thomas, S Klingebiel, *et al.*. Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2007, 32(18): 2756-2758.
- 3 X Liu, S Du, J Zhou, *et al.*. Linearly polarized operation of Yb-doped fiber laser by Brewster's angle-polished fiber end [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(2): 184-186.
- 4 W Wu, T Ren, J Zhou, *et al.*. Frequency doubling of narrow-linewidth pulsed fiber laser [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(5): 050604.
- 5 A Liu, M A Norsen, R D Mead. 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser [J]. Opt Lett, 2005, 30(1): 67-69.
- 6 N Jovanovic, A Fuerbach, G Marshall, *et al.*. Stable high-power continuous-wave Yb³⁺-doped silica fiber laser utilizing a point-by-point inscribed fiber Bragg grating [J]. Opt Lett, 2007, 32(11): 1486-1488.
- 7 I Kelson, A A Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(9): 1570-1577.
- 8 B He, Q Lou, J Zhou, *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. Opt Express, 2006, 14(7): 2721-2726.

- 9 P Jelger, P Wang, J K Sahu, *et al.*. High-power linearly-polarized operation of a cladding-pumped Yb fibre laser using a volume Bragg grating for wavelength selection [J]. *Opt Express*, 2008, 16(13): 9507–9512.
- 10 A Shirakawa, M Kamijo, J Ota, *et al.*. Linearly-polarized Yb-doped fiber laser in an all-fiber configuration [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007*, CMC: CMC5.
- 11 R Goto, R J Williams, N Jovanovic, *et al.*. Linearly polarized fiber laser using a point-by-point Bragg grating in a single-polarization photonic bandgap fiber [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(10): 1872–1874.
- 12 Dong Xue, Angie R El-Damak, Xijia Gu. All-fiber single polarized Yb-doped fiber laser with a high extinction ratio [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(6): 1059–1061.
- 13 L Zhang, J Wang, X Gu, *et al.*. A linearly-polarized tunable Yb-doped fiber laser using a polarization dependent fiber loop mirror [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(9): 2410–2413.
- 14 Feng Dejun, Huang Wenyu, Liu Guanxiu, *et al.*. Dual-wavelength orthogonally polarized Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1214001.
冯德军, 黄文育, 刘冠秀, 等. 正交偏振的双波长掺镱双包层光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1214001.

栏目编辑: 王晓球