

文章编号: 0253-2239(2010)03-0787-06

利用对称非线性光纤环镜产生多波长激光的研究

田佳峻¹ 姚 勇¹ 孙云旭¹ 于雪莲¹ 陈德应^{1,2}

(¹ 哈尔滨工业大学深圳研究生院电子与信息工程学科部, 广东 深圳 518055
² 哈尔滨工业大学可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 利用非线性偏振旋转效应可在能量对称的非线性光纤环镜中获得强度相关损耗输出, 具有该特性的非线性光纤环镜可作为强度均衡器来抑制室温条件下的掺铒光纤中的模式竞争。对这种环镜在多波长掺铒光纤激光器中的应用进行了研究, 分析了入射偏振态和环镜内双折射对非线性光纤环镜输出特性的影响, 研究了激光腔内光场的偏振条件以及对多波长激光系统的作用, 并在 L 波段获得了 3 dB 范围内 13 条波长输出, 波长间隔为 1 nm, 单波长半个小时内的功率波动小于 0.6 dB。通过调整非线性光纤环镜引入的强度相关损耗的大小可以控制多波长的数目和频谱位置。

关键词 光纤光学; 激光器; 非线性偏振旋转; 非线性光纤环镜; 多波长

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0787

Study on Generation of the Multiwavelength Laser Using the Symmetric Nonlinear Optical Loop Mirror

Tian Jiajun¹ Yao Yong¹ Sun Yunxu¹ Yu Xuelian¹ Chen Deying^{1,2}

(¹ Department of Electronic and Information Engineering, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China
² National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The intensity-dependent loss output characteristic of the symmetric nonlinear optical loop mirror (NOLM) can be induced by the nonlinear polarization rotation effect. The application of symmetric NOLM as the intensity equalizer to suppress the mode competition in multiwavelength erbium-doped fiber laser is studied. The influences of both input polarization and birefringence on the output characteristic are analysed. The polarization conditions in this laser cavity are analysed. A multiwavelength erbium-doped fiber laser with this device is proposed and demonstrated successfully. In the L-band 13 lasing wavelengths, with 1nm spacing in 3 dB range, has been obtained, single-wavelength power fluctuation of each laser line is less than 0.6 dB within 0.5 h. Both the laser line number and its multiwavelength operation spectral region can be controlled by adjusting the intensity-dependent loss in the cavity.

Key words fiber optics; lasers; nonlinear polarization rotation; nonlinear optical fiber loop mirror (NOLM); multiwavelength

1 引 言

非线性光纤环镜(NOLM)^[1]也被称作 Sagnac 干涉仪,最基本的组成为定向耦合器和单模光纤,其

中定向耦合器同侧两个端口被单模光纤相连。NOLM 能够提供多样的非线性输出特性,因此具有多种应用,如用于光孤子传输^[2]、锁模激光器^[3]、脉

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60977034)、广东省自然科学基金(8151805707000004)、深圳市科技计划(JC200903120167A)和哈尔滨工业大学优秀青年教师发展计划项目(HITQNJ.S.2008.60)资助课题。

作者简介: 田佳峻(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: jiajuntian@gmail.com

导师简介: 姚 勇(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤光学与光通信等方面的研究。E-mail: yaoyong@hit.edu.cn (通信联系人)

冲压缩^[4]、光纤非线性折射率的测量^[5]和微波光子相位调制器^[6]等。大多数的 NOLM 依赖于顺时针方向(CW)光路与逆时针方向(CCW)光路能量的不对称设计,通过自相位调制(SPM)效应而积累不同的相位差^[1]。近期的研究发现即使在能量对称的 NOLM 中,CW 与 CCW 光场的偏振态不同也能引起不同的非线性相位旋转(NPR),当 CW 与 CCW 方向的光场在耦合器处重新汇合时,不同的 NPR 能造成不同的非线性输入特性(类似于在能量不对称 NOLM 中不同的 SPM 造成不同的非线性输出特性)^[7,8]。这种基于非线性偏振旋转效应的能量对称的非线性光纤环境,已被用于光脉冲序列幅度调整^[9]、光脉冲整形^[10]和被动锁模光纤激光器^[11]等。

近来,因为在波分复用通信系统、光学测量及传感、光谱分析等方面潜在的应用,多波长掺铒光纤激光器得到了广泛的关注。然而由于在室温条件下铒纤为均匀展宽增益介质,存在强烈的模式竞争。为了克服这一技术障碍,多种技术已被应用以获得室温条件下的稳定的多波长输出^[12~18]。本文对基于 NPR 效应的能量对称的 NOLM 的输出特性进行了分析,研究了不同入射偏振态和环境内的双折射度对 NOLM 输出特性的影响。对利用能量对称 NOLM 的强度相关损耗输出特性抑制掺铒光纤中由均匀展宽特性引起的模式竞争,进而实现室温下的多波长掺铒光纤激光器进行了研究。分析了在环形激光器腔内利用 NOLM 获得多波长稳定振荡所需要满足的偏振态和偏振演化条件。实验结果证明该方法可以有效地抑制室温条件下掺铒光纤中的模式竞争,得到稳定的多波长输出。与以往实现室温多波长掺铒光纤激光器的方法相比,本方法可通过调整入射偏振态和环境内双折射度实现对多波长激光数目和频谱位置的灵活调整,提高了应用的灵活性和功能性。

2 原 理

本文利用的能量对称非线性光纤环境结构的理论模型来源于文献^[7,19],由对称的定向耦合器、一段盘绞的单模光纤(SMF)以及一个 1/4 波片(QWP)组成,波片可在垂直于光纤的平面内转动。SMF 的盘绞可引入强烈的旋光效应,使得在 NOLM 中不同传播方向的光场的偏振态得以保持。采用弱非线性近似的方法,Pottiez 等利用矩阵表达式,成功地推导出了此结构的 NOLM 的透射比表达式^[19],对

其进一步推导得到下列 3 式,并用 SMF 的有效非线性长度对其绝对长度进行修正:

$$T = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\beta - 2\alpha - \frac{A_s^{cw} n_2 \pi PL_{eff}}{3\lambda A_{eff}}\right) \cdot \cos\left(\beta - 2\alpha - \frac{A_s^{ccw} n_2 \pi PL_{eff}}{3\lambda A_{eff}}\right), \quad (1)$$

$$A_s^{ccw} = -\sqrt{1 - A_s^{cw^2}} \sin 2(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\delta L}}{\delta}, \quad (3)$$

式中 $\beta = \mu L/L_b + \theta$, $\mu = \sqrt{g^2 + \pi^2}$, $\theta = qL$ 。 $q, L, L_b, L_{eff}, A_{eff}, \delta$ 分别为 SMF 的盘绞率、长度、拍长、有效非线性长度、模场有效面积和衰减因子。 $g = \gamma\pi/k$ 为圆双折射与线性双折射的比, $\gamma = (h/2n - 1) \cdot q$ 为圆双折射, n 为折射率,在光纤中 $h \approx 0.13 \sim 0.16$, $k = \pi/L_b$ 为 SMF 的线性双折射。 P 为绝对输入功率, $b = 4\pi n_2/3\lambda A_{eff}$ 为非线性系数, n_2 为克尔系数, λ 为输入波长。光场信号的偏振态 ϕ 由斯托克斯参量 A_s 和光场信号的偏振方向 φ 来定义,其中 $A_s^{cw} = |C^+|^2 - |C^-|^2$ 为 CW 光场的斯托克斯参量, C^+ 和 C^- 分别为右、左圆偏振分量的复振幅,并且由入射功率 P 归一化,使得 $|C^+|^2 + |C^-|^2 = 1$ 。 φ 为光场信号的偏振方向, α 为 1/4 波片与水平方向的夹角, A_s^{ccw} 为 CCW 光场信号的斯托克斯参量。假设定向耦合器是偏振无关的,所以 CW 光场的偏振态与入射偏振态是一致的,即 $\phi_s^{cw} = \phi_s^{in}$ 。

(1)式~(3)式表明,通过调整入射偏振态和双折射度(1/4 波片的转动角度)可以使 NOLM 得到多样的非线性输出特性,如图 1 所示。当通过调整输入偏振态和环境内的双折射度使其透射率随入射功率的增高而降低时,NOLM 可作为强度均衡器应用于多

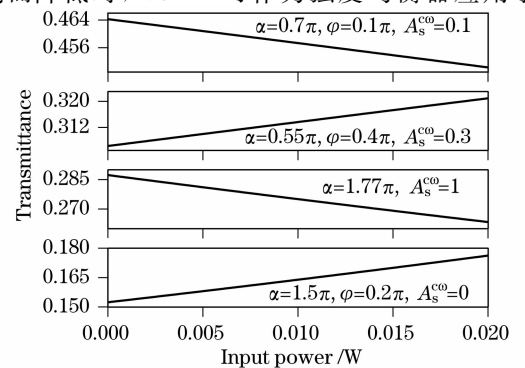


图 1 不同输入偏振态(A_s^{cw}, φ)和 QWP 转动角度 α 条件下的 NOLM 的透射曲线

Fig. 1 Various nonlinear output characteristics of NOLM for the different input polarizations (A_s^{cw}, φ) and angles (α) of QWP

波长掺铒光纤激光器中,抑制室温条件下的掺铒光纤由均衡展宽特性引起的模式竞争。此时 NOLM 的强度相关损耗输出特性使得激光腔内功率高的波长将获得比功率低的波长更大的损耗,当激光腔内的模式竞争和 NOLM 的功率相关损耗作用达到平衡时,可实现室温条件下的多波长输出。值得注意的是,对于图 1,当 $A_s^{cw}=1$ 时,输入光场为圆偏振态,因此偏振方向角度 φ 可以等于任意值。本文中所有仿真图形使用的典型值为 $n_2=3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $A_{\text{eff}}=50 \text{ } \mu\text{m}^2$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, $L=20 \text{ km}$, $h=0.14$, $n=1.45$, $q=6$, $L_b=15 \text{ m}$, $\delta=0.0461 \text{ km}^{-1}$ 。

3 偏振条件及偏振演化分析

一般来讲,NOLM 的输出偏振态由输入偏振态和输入功率共同决定^[19]。对于一个具体的激光器比如环形激光器,NOLM 的输入偏振态与输出偏振态互为因果关系,而输入偏振态又直接影响着透射率。因此一般情况下,环形腔内光功率的变化将引起 NOLM 输出偏振态的变化,最终直接影响 NOLM 的功率相关损耗输出特性。为了达到室温条件下稳定的多波长输出目的,使得 NOLM 的输出偏振态与输入功率无关就显得尤为必要。文献[19]讨论了 NOLM 的输出偏振态与输入功率之间的依赖关系,本文直接采用其关于输出偏振态与输入功率无关条件的结论,分析 NOLM 用于环形多波长掺铒光纤激光器时,激光腔内应满足的光场偏振态及偏振演化条件。

首先,激光腔内的光场的偏振态必须保证 NOLM 处于输出偏振态与输入功率无关的工作状态。对于圆偏振输入光($A_s^{cw}=\pm 1$),输出偏振态与输入能量无关的条件是 $\alpha=\beta/2+k\pi/2$, (k 为整数)。由(1)~(3)式可知在此条件下,低功率的透射比为 0,高能量的透射比为 1,显然这样的输出条件不适合用来抑制模式竞争。对于线偏振光输入($A_s^{cw}=0$),输出偏振与功率无关的条件是 $\alpha=\beta/2+k\pi/2$, $\varphi=-\beta/2+k\pi/4$ 或 $\varphi=-\beta/2+(2k+1)\pi/4$ 。在第一种情况下透射率永远为 0,在第二种情况下,在 0 到第一个临界功率之前,透射率随着功率增大而增大。显然这几种输出特性都不能抑制模式竞争。对于椭圆偏入射光($-1 < A_s^{cw} < 1$ 且 $A_s^{cw} \neq 0$),NOLM 输出偏振功率无关的条件是 $A_s^{\text{out}}=A_s^{cw}$ 。利用(2)式能够证明对于任意的一个 φ ,总存在一个 A_s^{cw} ,使其在椭圆偏($-1 < A_s^{cw} < 1$ 且 $A_s^{cw} \neq 0$)输入时满足 $A_s^{\text{out}}=A_s^{cw}$ ^[19]。在此条件下,输出偏振态与输入功率是无

关的,并且输出偏振态为 $A_s^{\text{out}}=-A_s^{cw}$, $\varphi^{\text{out}}=-\varphi+\pi/2$ 。

为了在环形腔内得到稳定和连续的多波长激光射,务必保证 NOLM 始终处于功率相关损耗状态,因此除了上文讨论的 NOLM 的输入偏振条件外,腔内的偏振演化还需要满足以下条件:

$$\phi_m^{\text{out}}=M_{\text{nolm}}(\phi_m^{\text{in}}), \quad (4)$$

$$\phi_{m+1}^{\text{in}}=M_{\text{pc}}[M_o(\phi_m^{\text{out}})], \quad (5)$$

$$\phi_{m+1}^{\text{in}}=\phi_m^{\text{in}} \quad (6)$$

(4)~(6)式为多波长激光稳定激射的偏振演化条件。 ϕ_m^{in} 和 ϕ_m^{out} 分别定义为环形腔内 NOLM 的输入和输出偏振态,下标 m 代表循环次数。 M_{nolm} 表示 NOLM 对光场偏振态的改变作用, M_{pc} 表示偏振控制器(PC)对信号光偏振态的改变作用, M_o 表示腔内其它器件及实验中光纤不可避免地扭曲等因素对光场信号的改变作用。在椭圆偏输入且保证输出偏振与功率无关的条件下,通过调整不同的人射偏振态和旋转波片设置不同的 α 值,可以得到多样的透射曲线,如图 2 和图 3 所示。当 NOLM 的透射比曲线为输入功率越高透射比越低(损耗越大)时,NOLM 便相当于幅度均衡器,起到抑制模式竞争的作用。

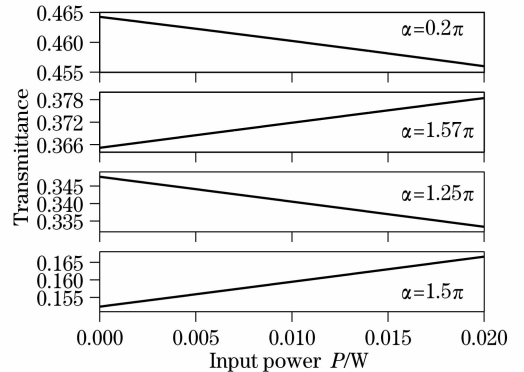


图 2 椭圆偏输入时输出偏振态与输入功率无关条件下 1/4 波片不同转动角度对 NOLM 的透射比的影响曲线, $A_s^{cw}=0.3$, φ 由 $A_s^{\text{out}}=A_s^{cw}$ 和(2)式确定

Fig. 2 Transmission of NOLM for different angle (α) of QWP under the condition of power-independent output polarization. $A_s^{cw}=0.3$, φ is determined by

$$A_s^{\text{out}}=A_s^{cw} \text{ and Eq. (2)}$$

4 实验结果

多波长掺铒光纤激光器的结构如图 4 所示。能量对称的 NOLM 被插入单向的环形腔内作幅度均衡器。NOLM 由 3 dB 定向耦合器,20 km 单模光纤(Coring; SMF-28e)以每米 3 圈的盘绞率盘绞,

并熔接在定向耦合器同侧的两个端口,由单模光纤按照合适的曲率绕成的 1/4 波片插入 NOLM 中。抽运源采用的是波长为 1480 nm 的抽运激光器 (Amonics: ALD1480-400-B-FA),实验中输出功率始终为 410 mW。15 m 高掺杂浓度铒纤 (Nufern: EDFL-980-HP) 作为增益介质。采用法布里-珀罗 (F-P) 滤波器 (MOI: FFP-TF2) 作为梳状滤波器,其自由光谱区为 1 nm。腔内的隔离器用来抑制反向放大的自发辐射光 (ASE),用来调节输入 NOLM 中的光场的偏振态。激光经由 10 dB 耦合器的 10% 端口输出到光谱仪 (ANDO: 6317B) 中,光谱仪的波长分辨率设置为 0.05 nm。

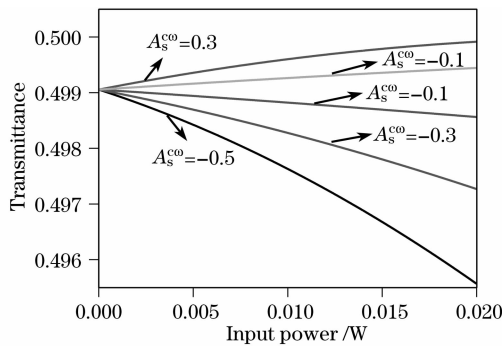


图 3 输出偏振功率无关条件下不同椭圆偏振态输入时 NOLM 的透射比 $\alpha=0.65\pi$, φ 由 (2) 式和 $A_s^{cw} = A_s^{cw}$ 确定

Fig. 3 Transmittance of NOLM for different elliptic input polarizations (A_s^{cw} , φ) under the condition of power-independent output polarization. $\alpha=0.65\pi$, φ is determined by $A_s^{cw} = A_s^{cw}$ and Eq. (2)

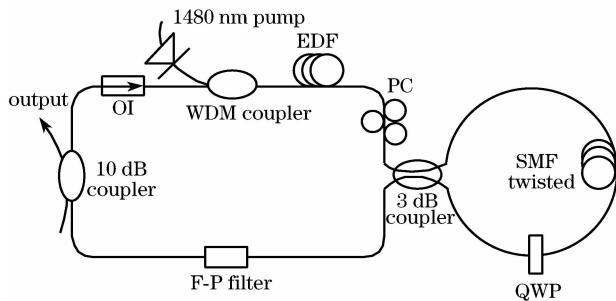


图 4 激光器结构图

Fig. 4 Schematic diagram of proposed laser

如上原理论述,通过调整 PC 和 QWP 的转动角度很容易使 NOLM 工作在强度相关损耗的输出状态,得到连续多波长激光。通过 PC 和 QWP 进一步优化的调整,如图 5 所示,最大波长数目为 22 条,光谱范围为 1584~1607 nm。其中 3 dB 带宽范围内的波长数目为 13 条,光谱范围为 1589~1604 nm。波长间隔为 1 nm,这是由作为梳状滤波器的 F-P 滤

波器的自由光谱范围决定的,因此可以通过更换不同的 F-P 滤波器以实现波长间隔的调整。同时测量了激光器输出功率的稳定性,1596 nm 处的单波长输出功率在 0.5 h 内的输出功率随时间的波动情况如图 6 所示。在 0.5 h 的周期内信号的输出功率波动小于 0.6 dB。

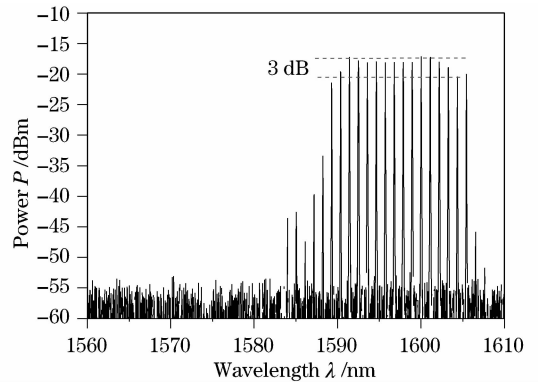


图 5 22 条波长连续激光输出光谱

Fig. 5 Output spectra of 22 lines multiwavelength oscillations

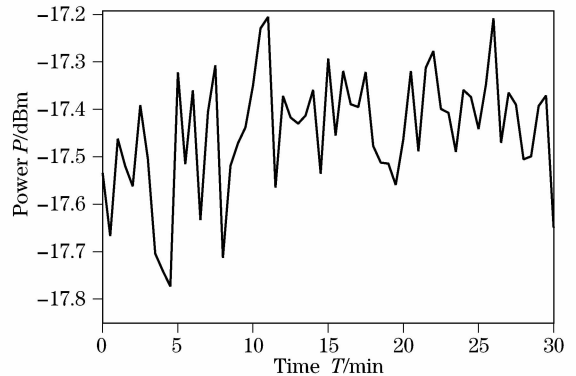


图 6 输出功率随时间的波动情况

Fig. 6 Output power fluctuation versus time

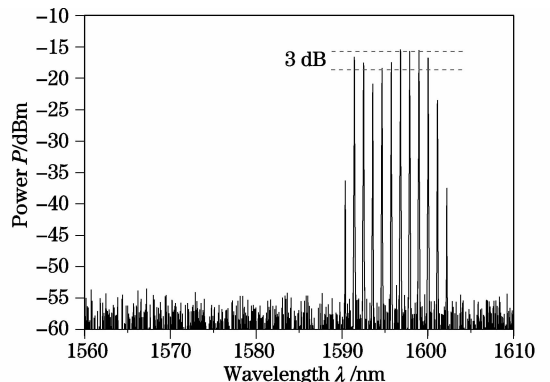


图 7 3 dB 范围内 8 条波长连续输出光谱

Fig. 7 Output spectra 8 lines multiwavelength oscillations in 3 dB bandwidth

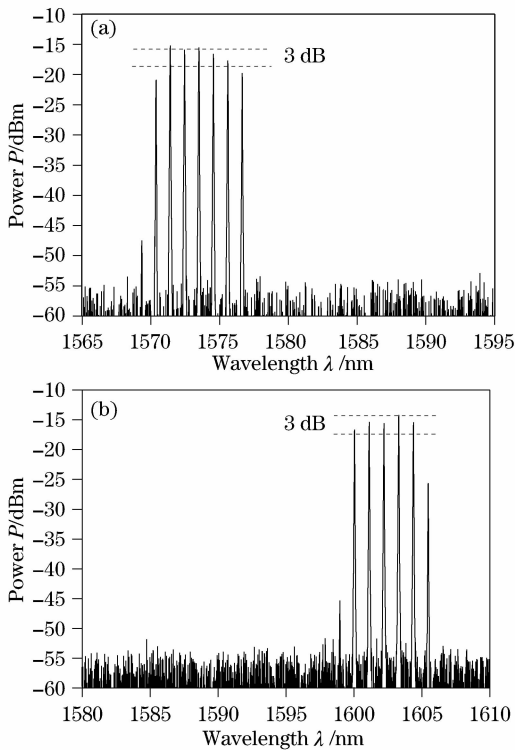


图 8 3 dB 带宽内的 5 条波长的多波长连续输出,光谱范围:(a) 1571~1576 nm;(b) 1601~1604 nm

Fig. 8 Output spectra of the laser under 5 lines operation within 3 dB bandwidth. (a) 1571 ~ 1576 nm; (b) 1601~1604 nm

由图 2 和图 3 可知,当 NOLM 处于强度相关损耗输出的工作状态时,输入功率为 0 对应的透射率往往远远小于 1,这意味着除了强度相关的非均匀损耗外,NOLM 还引入了强度无关的均匀损耗。非均匀损耗对模式竞争起了主要作用,其强度大小对多波长激射数目和输出功率的平坦度有直接的影响^[20,21]。一般来讲,在激光腔内增益条件不变的情况下,非均匀损耗越强,多波长输出的数目越多,输出功率越平坦。均匀损耗对模式竞争没有直接的作用,而会直接地影响腔内固有损耗总量的大小。从而直接影响激射波长的频谱位置^[22,23]。又由图 2 和图 3 可知,非均匀损耗和均匀损耗的大小可以通过输入偏振态和 QWP 的转动角度同时或者单独的调节。这意味着,通过调整 PC 和 QWP 的转动角度,可以实现对激射波长的频谱和数目的控制。如图 7 所示,实现 3 dB 带宽内 8 条波长的被激射,波长范围为 1592~1600 nm,这一波长范围与图 5 基本一致。这意味着,在同一波长范围内可实现波长数目的调节。通过调整 PC 和 QWP,调整腔内的均匀损耗和非均匀损耗的强度,不同波长范围内同一波长数目的多波长激射也被实现,如图 8 所示。

3 dB 带宽内 5 条波长对应波长的光谱范围分别为 1571~1576 nm、1601~1604 nm。

5 结 论

分析了基于非线性偏振旋转效应的 NOLM 的输出特性,研究了输入偏振态和双折射度(QWP 的转动角度)对 NOLM 的透射率的影响,论证了利用 NOLM 强度相关损耗特性抑制室温条件下掺铒光纤的模式竞争的方法,并对激光腔内的偏振条件和偏振演化进行了分析。实验得到了 3 dB 范围内 13 条波长的激射。通过调整 PC 和 QWP 可以实现对激射波长数目和波长光谱位置的调节。测量显示 0.5 h 内的单波输出功率波动小于 0.6 dB。

致谢 感谢哈尔滨工业大学深圳研究生院网络环境智能计算重点实验室给予的支持。

参 考 文 献

- 1 N. J. Doran, D. Wood. Nonlinear-optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 56~158
- 2 N. J. Smith, N. J. Doran, Picosecond soliton transmission using concatenated nonlinear optical loop mirror intensity filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(6): 1117~1125
- 3 I. N. Duling, C. J. Chen, P. K. A. Wai *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(1): 194~199
- 4 K. Smith, N. J. Doran, P. G. J. Wigley. Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(22): 1294~1296
- 5 D. Monzon-Hernandez, A. N. Starodumov, Y. O. Barmenkov *et al.*. Continuous-wave measurement of the fiber nonlinear refractive index[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(16): 1274~1276
- 6 Y. Dong, H. He, W. S. Hu *et al.*. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 745~747
- 7 E. A. Kuzin, J. A. AndradeLucio, B. I. Escamilla *et al.*. Nonlinear optical loop mirror using the nonlinear polarization rotation effect[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1-3): 60~64
- 8 E. A. Kuzin, N. Korneev, J. W. Haus *et al.*. Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birefringence fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(7): 919~925
- 9 O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla *et al.*. High-order amplitude regularization of an optical pulse train using a power-symmetric NOLM with adjustable contrast [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 154~156
- 10 O. Pottiez, B. Ibarra-Escamilla, E. A. Kuzin. Optical pulse shaping at moderate power using a twisted-fibre NOLM with single output polarisation selection[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1037~1046
- 11 E. A. Kuzin, B. I. Escamilla, D. E. Garcia-Gomez. Fiber laser mode locked by a Sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(20): 1559~1561
- 12 A. Bellemare, M. Karasek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored

- on the ITU Tetu, frequency grid[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **18**(6): 825~831
- 13 X. M. Liu, X. Q. Zhou, C. Lu. Four-wave mixing assisted stability enhancement: theory, experiment and application[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2257~2259
- 14 C. L. Zhao, X. F. Yang, C. Lu *et al.*. Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers by using cascaded fiber Bragg gratings written in high birefringence fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(4-6): 313~317
- 15 Z. X. Zhang, L. Zhan, K. Xu *et al.*. Multiwavelength fiber laser with fine adjustment, based on nonlinear polarization rotation and birefringence fiber filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 324~326
- 16 Zhang Zuxing, Sang Minhuang, Ye Zhiqing *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652
张祖兴, 桑明煌, 叶志清等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652
- 17 Ji Heng, Yang Siguang, Zhang Ye *et al.*. Dual-wavelength Erbium-doped fiber laser based on phase sampled fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 919~922
季 恒, 杨四刚, 张 邨等. 基于相位采样光栅的双波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 919~922
- 18 Z. X. Zhang, L. Zhan, Y. X. Xia. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with enhanced power efficiency[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9731~9736
- 19 O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla *et al.*. Theoretical investigation of the NOLM with highly twisted fibre and a $\lambda/4$ birefringence bias[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **254**(1): 152~167
- 20 X. H. Feng, H. Y. Tam, H. L. Liu *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser employing a nonlinear optical loop mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(2): 278~281
- 21 Z. X. Zhang, K. Xu, J. Wu *et al.*. Multiwavelength figure-of-eight fiber laser with a nonlinear optical loop mirror[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2008, **5**(3): 213~216
- 22 A. Bellemare, M. Karásek, C. Riviere *et al.*. A broadly tunable erbium-doped fiber ring laser: experimentation and Modeling[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2001, **7**(1): 22~29
- 23 X. Y. Dong, P. Shum, N. Q. Hgo *et al.*. Output power characteristics of tunable erbium-doped fiber ring lasers [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1334~1341