

基于 NPR 效应的多波长 SOA 光纤激光器

郝红甜, 刘柯, 周雪芳*, 王希杰

(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了实现稳定的多波长输出, 设计了一种基于半导体光放大器(SOA)的非线性偏振旋转(NPR)效应的多波长光纤激光器。该激光器利用 SOA 的 NPR 效应, 将 SOA 与其它偏振器件组合引起强度相关损耗(IDL), 抑制 SOA 均匀加宽线宽内的模式竞争, 在室温下实现了波长间隔为 0.63 nm 的 35 个稳定的多波长输出。此外, 通过偏振调节实现了 12 nm 的波长调谐。最后, 实验验证了增加保偏光纤(PMF)长度能够实现更小波长间隔的稳定多波长输出。

关键词: 多波长光纤激光器; 模式竞争; 非线性偏振旋转; 强度相关损耗; sagnac 环

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)08-0031-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-wavelength SOA fiber laser based on NPR effect

HAO Hongtian, LIU Ke, ZHOU Xuefang*, WANG Xijie

(School of communication and engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to achieve stable multi-wavelength output, a multi-wavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation (NPR) of semiconductor optical amplifiers (SOA) is proposed and demonstrated. Due to the NPR effect of SOA, the intensity-dependent loss (IDL) is induced by the combination consisting of SOA and other polarization devices to suppress mode competition within homogenous broadening linewidth of SOA. Stable multi-wavelength lasing with wavelength spacing as small as 0.63 nm and wavelength number up to 35 is achieved at room temperature. Moreover, 12 nm wavelength tuning is implemented by tuning polarization. Finally, experimental investigation is carried out to show the stable multi-wavelength output with smaller wavelength spacing can be achieved by increasing the length polarization-maintaining fiber (PMF).

Key words: multi-wavelength fiber laser; mode competition; nonlinear polarization rotation; intensity-dependent loss; sagnac loop

0 引言

多波长光纤激光器因其输出波长数量多、光束质量好、插入损耗小和结构紧凑等优点, 在光通信、光传感、光检测技术以及微波光子学等领域得到了广泛的应用^[1-3]。典型的多波长光纤激光器由增益介质和波长选择器构成。现有光纤激光器的研究证明, 掺铒光纤放大器(EDFA)为均匀展宽介质, 基于 EDFA 的光纤激光器会产生模式竞争效应, 室温下很难实现稳定的多

收稿日期: 2019-10-30。

基金项目: 浙江省自然科学基金(LGG19F050001)资助; 浙江省教育厅一般项目(Y201840747)资助; 国家自然科学基金(601705055)资助。

作者简介: 郝红甜(1995—), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向为基于 EDFA 的光纤激光器和基于 SOA 的光纤激光器技术, 并且已取得大量的关于光纤激光器的实验结果, 目前已发表 1 篇中文论文和 1 项发明专利。

* 通信作者: 周雪芳(E-mail: zhouxf@hdu.edu.cn)。



波长输出。对比 EDFA, 半导体光放大器(SOA)作为非均匀加宽增益介质, 当波长间隔大于 SOA 均匀展宽线宽时能够实现稳定的多波长输出。因此, 研究者们已设计出多种基于 SOA 的多波长光纤激光器^[4-7]。文献[4]报道了一种基于 SOA 的线性腔双输出端口激光器, 以 Lyot-sagnac 环作为滤波器, 实现了波长间隔为 2.8 nm 的 9 个波长输出。文献[5]报道了一种基于 SOA 的光纤环形激光器, 结合少模高双折射光纤的 sagnac 环作为滤波器, 实现了波长间隔为 2.1 nm 的 11 个波长输出。为实现更多波长和更小间隔的多波长输出, 文献[6]报道了基于非线性偏振旋转(NPR)效应的多波长 SOA 光纤激光器, 以 Lyot 滤波器进行波长选择, 实现了波长间隔为 0.2 nm 的 153 个波长输出, 验证了 NPR 效应抑制均匀加宽线宽内模式竞争的作用, 但此激光器很难在满足多波长输出的同时实现波长的调谐。

本文设计一种基于 NPR 效应的多波长 SOA 光纤

激光器,以 sagnac 环作为滤波器件,实现稳定的多波长输出,在没有明显的波长数变化的情况下通过调节偏振控制器(PC)实现 12 nm 的波长调谐。另外,通过增加保偏光纤(PMF)长度,实现在更小波长间隔下的稳定多波长输出。

1 sagnac 环的理论分析

Sagnac 环结构如图 1 所示,由 1 个 PC、1 段 PMF 和 1 个四端口的 3 dB 耦合器(OC)构成。输入光通过 OC 的 1 端口后分成 2 束功率相同的光束,这 2 束光分别通过 OC 的 3 端口和 4 端口沿环腔的顺、逆时针传

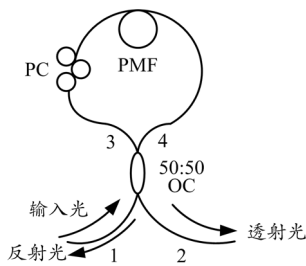


图 1 sagnac 环结构图

输,经过 PC 与 PMF 产生相位差,最终回到 OC 进行相干滤波输出。通过 OC、PC 以及 PMF 的琼斯矩阵可以计算得到 sagnac 环的传输函数。设耦合器的耦合比 $K=0.5$,从文献[8-9]可知透射函数为:

$$T = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \quad (1)$$

输出滤波谱波长间隔公式为:

$$\Delta \lambda = \lambda^2 / \Delta n L \quad (2)$$

其中, $\varphi = \pi \Delta n L / \lambda$, L 为 PMF 的长度, Δn 为 PMF 快慢轴的折射率差, θ 为 PC 的偏振旋转角度, λ 为入射波长。

从式(2)可以看出,波长间隔跟 PMF 的长度和 PMF 的双折射差有关,因此改变 PMF 的双折射差和长度将会影响输出的波长间隔。增加 PMF 的长度可以实现更窄的波长间隔,设 PMF 的 $\Delta n = 4.012 \times 10^{-4}$,将 θ 固定为 $\pi/2$,当 PMF 长度分别为 7.3 m、13.5 m 及 71 m 时,利用 Matlab 仿真得到的 sagnac 环透射谱如图 2 所示。随着 PMF 长度增加,波长间隔变小,输出的滤波谱更加密集。

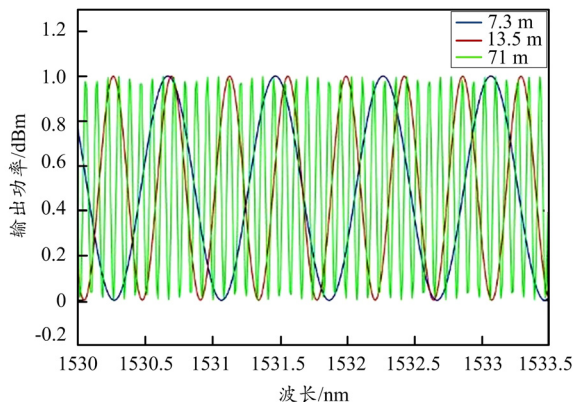


图 2 不同 PMF 长度的 sagnac 环透射谱仿真图

2 实验结构与工作原理

基于 NPR 效应的多波长 SOA 光纤激光器的实验结构如图 3 所示,该激光器由 1 个 SOA、1 段长 7.3m 的 PMF、3 个 PC、1 个偏振相关隔离器(PDI)、1 个四端口的 50:50 OC1 和 1 个三端口的 10:90 耦合器(OC)组成。

图 3 中,SOA 作为光纤激光器的增益介质,由 PC3 和 PMF 构成的 sagnac 环作为滤波器,50:50 OC1 连接 sagnac 环和主

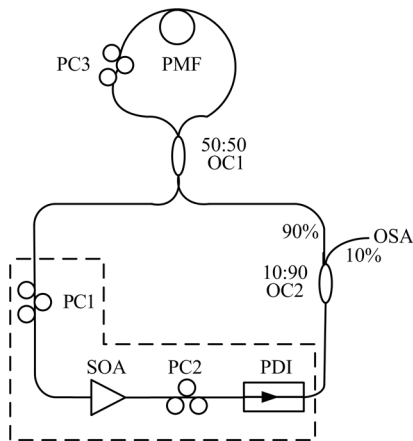


图 3 多波长 SOA 光纤激光器结构图

环腔。PDI 既作为隔离器确保光束在腔内单向传输,同时又作为起偏器与 PC1、PC2、SOA 构成 PC1-SOA-PC2-PDI 联合体(图 3 中虚线框所示)。利用 SOA 的 NPR 效应,通过调节 PC1、PC2 使高功率的光通过此结构时经历更大的损耗,从而抑制均匀加宽线宽内的模式竞争效应,实现稳定的多波长输出。产生的多波长激光通过 10:90 的 OC2,90% 的光功率被反馈到环腔中,10% 的光功率输入到光谱仪 (OSA) 中进行观测。OSA 的分辨率为 0.02 nm。

3 实验结果和讨论

实验中 SOA 的驱动电流为 214 mA,PMF 长度为 7.3 m,按照图 3 将器件进行连接。仔细调节 3 个 PC 实现了稳定的多波长输出,输出光谱图如图 4 所示。在 1524~1546 nm 范围内输出了 35 个波长,波长间隔为 0.63 nm,信噪比(SNR)小于 35 dB。但环腔内光强过小

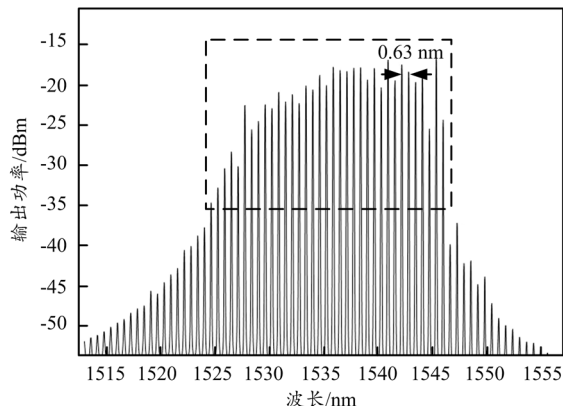
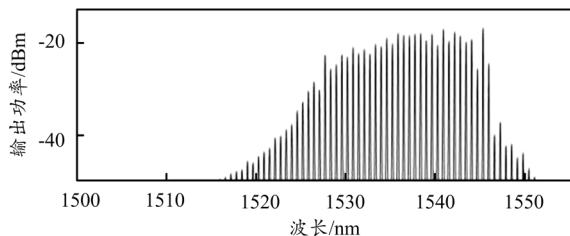


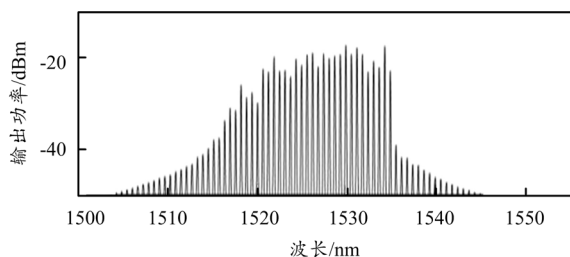
图 4 多波长 SOA 光纤激光器输出光谱

导致多波长功率平坦度降低,最大功率差为 20 dB。文献[10]证实了在基于强度相关损耗(IDL)的多波长光纤激光器中高腔损耗对获得平坦的多波长输出十分重要。由于 IDL,高强度的光能够产生高腔损耗,因此为增加腔内损耗需要进一步调整 SOA 的驱动电流或输出耦合器的耦合比来增加腔内的光强度,从而增加多波长功率平坦度。

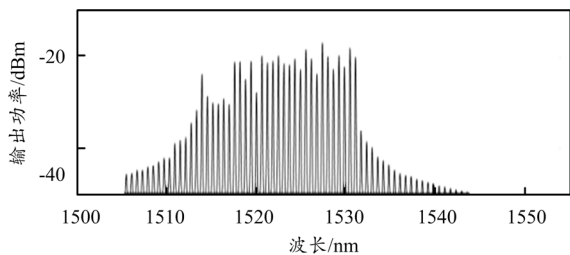
通过调节 PC3,本文在没有明显波长数变化的情况下实现了约 12 nm 的波长调谐范围,结果如图 5 所示。



(a) 中心波长为 1535 nm 的多波长输出光谱



(b) 中心波长为 1525 nm 的多波长输出光谱



(c) 中心波长为 1523 nm 的多波长输出光谱

图 5 调节 PC3 实现波长调谐

为了验证所提出的多波长 SOA 光纤激光器的稳定性,本文对输出的 35 个波长在 15 min 内以 3 min 的时间间隔重复扫描了 5 次,扫描结果如图 6 所示。输出波长没有明显的功率波动,平均最大功率波动为 0.71 dB,结果表明此光纤激光器能够在室温下实现稳定的多波长输出。

为了验证 PC1-SOA-PC2-PDI 联合体在激光器中的作用,本文用偏振不敏感隔离器(ISO)代替 PDI,输出的光谱图如图 7 所示。因为波长间隔 0.63 nm 小于

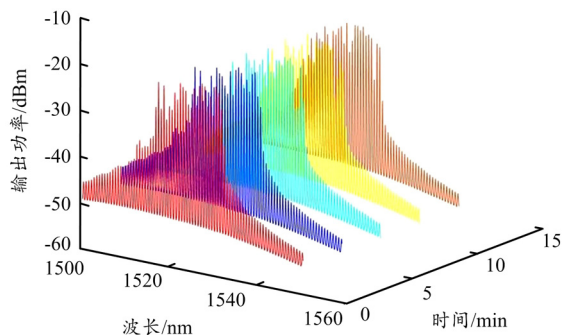


图 6 在 15 min 内以 3 min 间隔重复扫描输出光谱图

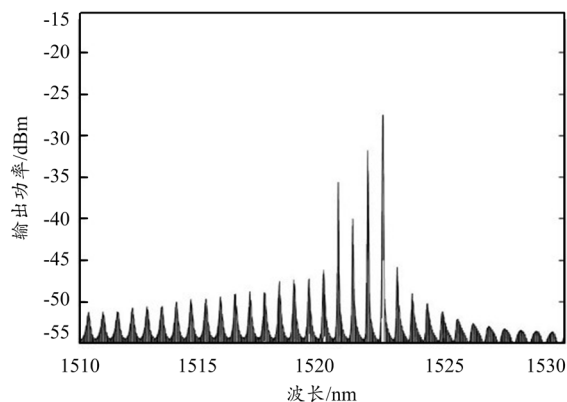


图 7 ISO 代替 PDI 的输出光谱图

SOA 的均匀加宽线宽,产生模式竞争效应,因此出现跳模现象,无法实现稳定的多波长输出。

根据 sagnac 环的理论分析可知,不同 PMF 长度与滤波谱波长间隔成反比。因此,为实现更小波长间隔的输出,本文分别用 13.5 m 和 71 m 的 PMF 代替 7.3 m 的 PMF 进行实验测试。使用 13.5 m 的 PMF 输出光谱图如图 8 所示,在 1511~1526 nm 范围内输出了 48 个波长,波长间隔为 0.33 nm,SNR 小于 31 dB。使用 71 m PMF 输出光谱图如图 9 (a) 所示,在 1506~1525 nm 范围内输出了 240 个波长,将图 9 (a)中

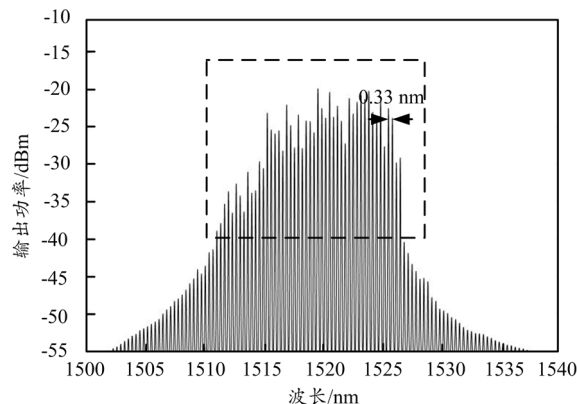


图 8 13.5 m PMF 的输出光谱图

郝红甜,刘柯,周雪芳,等:基于 NPR 效应的多波长 SOA 光纤激光器

1515~1520 nm 波长范围进行放大得到图 9(b),波长间隔为 0.075 nm,SNR 小于 11 dB。

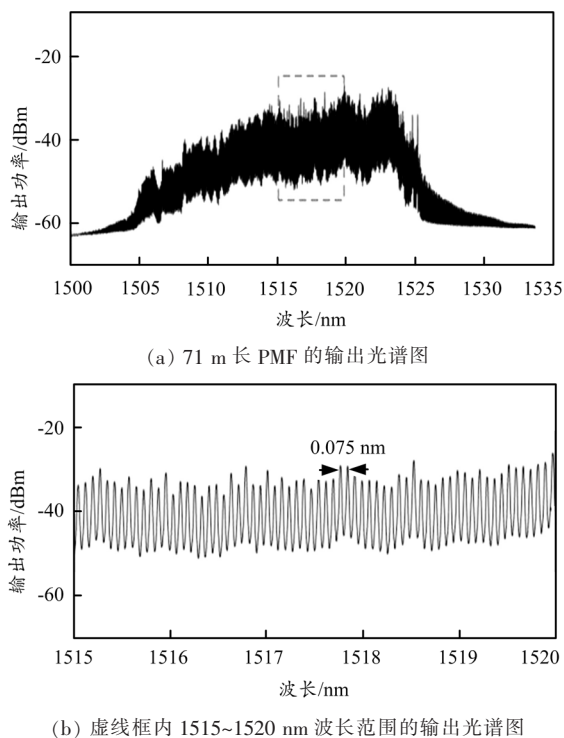


图 9 71 m PMF 的输出光谱图及
1515~1520 nm 波长范围的放大光谱图

从实验结果可以看出,随着 PMF 长度增加,输出的激光波长间隔变小,实验结果与仿真结果相符。并且由于 NPR 效应抑制 SOA 均匀加宽线宽下的模式竞争,此激光器在 PMF 长度为 13.5 m 和 71 m 时,同样实现了稳定的多波长输出。但实验中 PMF 长度的增加使得插入损耗变大,输出的 SNR 变小。

将实验结果与参考文献[4-6]的实验结果进行对比分析,得到不同类型的 SOA 光纤激光器输出特性如表 1 所示。可以看出,本文所设计的光纤激光器能够在更小的波长间隔下实现稳定的多波长输出,波长数量达到 240 个,并且可以实现波长调谐。

表 1 不同类型 SOA 光纤激光器的输出特性比较

文献	NPR 效应	波长数	波长间隔/nm	波长调谐
文献[4]	无	9	2.8	有
文献[5]	无	11	2.1	有
文献[6]	有	153	0.2	无
本文	有	240	0.075	有

4 结束语

本文设计了一种基于 NPR 效应的多波长 SOA 光

纤激光器,该激光器中的 PC1-SOA-PC2-PDI 联合体引起的 IDT 能够有效抑制 SOA 均匀加宽线宽的模式竞争效应,从而得到稳定的多波长输出。实验中,通过调节 PC1~PC3 实现了波长间隔为 0.63 nm 的 35 个稳定的多波长输出。另外,通过调节 PC3,在波长数基本不变的情况下实现了 12 nm 的波长调谐范围。为了实现更小波长间隔的多波长激光输出,实验中使用了 13.5 m 的 PMF,实现了波长间隔为 0.33 nm 的 48 个波长输出。还使用了 71 m 的 PMF,实现了波长间隔为 0.075 nm 的 240 个波长输出,实验结果与仿真结果相符。本文设计的激光器结构简单、性能稳定,在室温下通过改变 PMF 长度能够实现更小波长间隔的稳定多波长输出。本文的不足之处在于环腔内光强过小导致多波长功率平坦度降低,因此在以后的实验中需要进一步调整 SOA 的驱动电流或输出耦合器的耦合比来增加腔内的光强度,从而增加多波长功率平坦度。

参考文献:

- [1] OEHLER A E H, ZELLER S C, WEINGARTEN K J, et al. Broad multiwavelength source with 50 GHz channel spacing for wavelength division multiplexing applications in the telecom C band[J]. Optics Letters, 2008(33): 2158-2160.
- [2] ZHU T, KE T, RAO Y, et al. Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement[J]. Optics Communications, 2010, 283(19): 3683-3685.
- [3] PENG P C, LEE W Y, WU S S, et al. Multiwavelength fiber laser for the fiber link monitoring system[J]. Opt. Laser Technol., 2013, 51: 62-66.
- [4] UMMY M A, MADAMOPOULOS N, JOYO A, et al. Tunable multi-wavelength SOA based linear cavity dual-output port fiber laser using Lyot-Sagnac loop mirror[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3202-3211.
- [5] SUN G, ZHOU Y, CUI L, et al. Tunable multiwavelength SOA-fiber ring laser based on Sagnac loop mirror incorporating few-mode high birefringence fiber[J]. Laser Physics, 2011, 21(11): 1899-1902.
- [6] SULAIMAN A H, ZAMZURI A K, HITAM S, et al. Flatness investigation of multiwavelength SOA fiber laser based on intensity-dependent transmission mechanism[J]. Optics Communications, 2013, 291: 264-268.
- [7] LIU Tonghui, JIA Dongfang, YANG Tianxin, et al. Stable L-band multi-wavelength SOA fiber laser based on polarization rotation[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2787-2791.
- [8] 倪勇. L 波段多波长光纤激光器的理论研究和实验测试[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2016.
- [9] 曹志刚. 新型光纤滤波器及在可调谐光纤激光器中的应用研究[D]. 合肥:安徽大学, 2015.
- [10] FENG X, LU C, TAM H Y, et al. Mechanism for stable, ultra-flat multiwavelength operation in erbium-doped fiber lasers employing intensity-dependent loss[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(1): 74-77.