

基于SOA的可调谐环形腔光纤激光器

石开明, 时 敏, 杨乐鑫

贵州电网有限责任公司凯里供电局, 贵州 凯里

收稿日期: 2025年9月4日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月4日

摘 要

本文设计并研究了一种基于半导体光放大器(SOA)的可调谐环形腔光纤激光器, 重点分析其噪声特性及优化方法。通过实验探究输出耦合比、注入电流及腔长对激光输出信噪比的影响, 发现SOA的增益饱和效应可有效抑制模式竞争, 从而改善噪声性能。实验表明, 当输出耦合比为0.1、注入电流为242 mA时, SOA处于深度增益饱和状态, 显著提升信噪比至13 dB, 并在92 nm调谐范围内实现0.7 dB的功率平坦度和1.79 mW的输出功率。腔长变化对信噪比影响较小, 优化后可缩短至10 m以简化结构。研究指出激光器噪声主要源于放大的自发辐射(ASE), 进一步优化滤波器位置有望抑制ASE噪声。此外, 采用自由光谱范围更宽的光纤FP滤波器可扩展激光器的可调谐范围。该激光器结构紧凑、性能稳定, 为干涉型光纤传感系统的高精度光源设计提供了重要参考。

关键词

半导体放大器(SOA), 可调谐环形腔光纤激光器, 低噪声

Tunable Ring Cavity Fiber Laser Employing SOA

Kaiming Shi, Min Shi, Lexin Yang

Kaili Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Kaili Guizhou

Received: September 4, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 4, 2025

Abstract

This paper designs and investigates a tunable ring cavity fiber laser based on a Semiconductor Optical Amplifier (SOA), with a focus on analyzing its noise characteristics and optimization methods. Experimental studies demonstrate the effects of output coupling ratio, injection current, and cavity length on the laser's output signal-to-noise ratio (SNR). It is found that the gain saturation effect of the SOA effectively suppresses mode competition, thereby improving noise performance. Experiments

indicate that when the output coupling ratio is 0.1 and the injection current is 242 mA, the SOA operates in deep gain saturation, significantly enhancing the SNR to 13 dB. Additionally, a power flatness of 0.7 dB and an output power of 1.79 mW are achieved across a 92 nm tuning range. Changes in cavity length exhibit minimal impact on SNR, which after optimization can be shortened to 10 m to simplify the structure. The study identifies amplified spontaneous emission (ASE) as the primary source of laser noise, suggesting that optimizing filter placement may effectively suppress ASE noise. Furthermore, employing a fiber Fabry-Pérot (FP) filter with a wider free spectral range (FSR) could extend the laser's tuning capability. This compact and stable laser provides a significant reference for designing high-precision light sources in interferometric fiber sensing systems.

Keywords

Semiconductor Optical Amplifier, Tunable Ring Cavity Fiber Laser, Low Noise

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,可调谐光纤激光器广泛应用于光反射计、生物医学成像、光纤传感查询和测试测量等领域。在可调谐光纤激光器中,以使用半导体光放大器(SOA)和掺铒光纤放大器作为增益介质的最为普遍[1]。其中,SOA作为增益介质的可调谐光纤激光器不仅具有1520~1600 nm的宽增益带宽,还具备结构紧凑、可靠性高、成本效益好等特点,特别适合作为光纤传感系统的光源使用[2]。然而,激光器的噪声特性直接影响着干涉型光纤传感器的测量精度,当激光器自身的强度噪声和相位噪声通过干涉仪转换为系统噪声时,会严重劣化传感系统的信噪比和检测极限[3]。因此,深入研究SOA型可调谐激光器的噪声产生机理及其抑制方法,对提升光纤传感系统的性能具有重要意义。

激光器的噪声是表征其性能的重要指标之一,特别是用于干涉传感系统时,激光器自身的噪声会直接转变为干涉传感的系统噪声[4],直接影响传感查询系统测量精度。因此抑制可调谐激光器的噪声是光纤激光器传感技术的重要研究内容之一[5]。本文设计了一种基于SOA的可调谐环形腔光纤激光器,重点研究了其噪声特性与优化方法。本文先通过实验获得激光器各个参量的变化对激光输出信噪比的影响,然后在理论上分析产生这些实验现象的原因并总结出抑制噪音的方法。通过系统分析输出耦合比、注入电流和腔长等关键参数对激光输出信噪比的影响,我们发现SOA的增益饱和效应能有效抑制模式竞争,从而改善激光器的噪声性能。实验表明,通过合理配置激光器参数,可以在92 nm调谐范围内实现13 dB的信噪比和0.7 dB的功率平坦度。

2. 实验装置示意图

实验装置由基于SOA的可调谐环形腔光纤激光器和探测与控制电路组成,如图1所示。

基于SOA的可调谐光纤激光由半导体光放大器(SOA)、光隔离器(ISO)、90/10 光纤耦合器(OC)、光纤FP腔可调谐滤波器(FFP-TF)、偏振控制器(PC)组成。其中SOA作为增益介质;ISO起到保持光路单向运行的作用;FFP-TF则作为波长选择器件;在光输入到SOA之前加PC,用以控制输入光的偏振态。

激光器输出的激光经90/10的输出耦合器后分成两路,其中10%的激光输出再经过50/50的光纤耦合器分光后一部分直接连接到光电探测器PIN管上,经计算机处理后显示激光输出功率;另一部分经过

HCN 吸收池后再输入到 PIN 管上, 用于标定扫描激光器输出的激光波长。锯齿波发生器用于驱动 FFP-TF, 使滤波器处于动态扫描状态下, 在一个锯齿波周期内使滤波器也正好扫过一个自由光谱范围。

3. 实验结果与讨论

所用的 SOA 在 360mA 驱动电流时 ASE 中心波长为 1489 nm, 3 dB 带宽为 75 nm, 噪音指数为 7.1 dB, ASE 纹波和偏振相关增益(PDG)分别是 0.5 和 0.8 dB。我们对不同驱动电流下的 SOA 做了试验分析, 如图 2 所示为 SOA 各个电流下的 ASE 谱图。从图中我们可以看出, 当注入电流增大时, ASE 谱图的中心峰值功率增大, 并且峰值波长向短波方向移动。这是由于在 SOA 中, 半导体吸收泵浦能量后就会在导带中产生电子, 而在价带中留下空穴, 然后电子和空穴都迅速向能带的最底点弛豫, 当电流增加后越来越多的电子和空穴集中在导带底和价带顶, 这个过程会使平均带隙增大。因而 SOA 的 ASE 峰值增益波长明显向短波长方向移动。

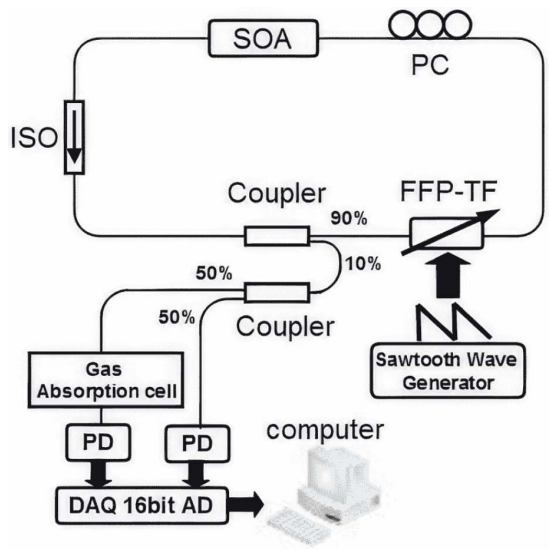


Figure 1. Semiconductor fiber laser and optoelectronic detection and control system
图 1. 半导体光纤激光器及光电探测与控制系统

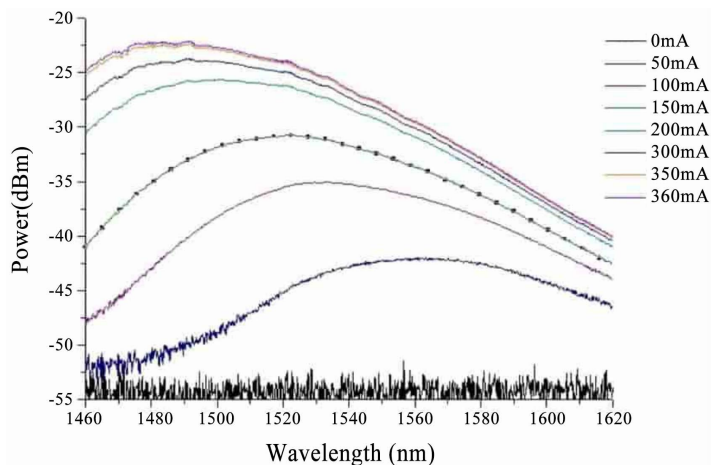


Figure 2. ASE spectra of SOA under different working currents
图 2. SOA 不同工作电流下的 ASE 光谱图

从图中我们还可以发现当注入电流大于 300 mA 后, ASE 谱线变得不光滑, 有起伏, 并且有“毛刺”出现。这是因为放大器两端面所镀的增透膜没有到达完全增透所造成的, 从“毛刺”的深浅可以大致判断出镀膜质量的好坏。两端面反射率越低, 曲线越光滑。而曲线起伏, 主要是由于 SOA 的噪声指数比较大所造成。由以上分析可知为了使 SOA 工作在较大增益且较小噪声条件下, 应控制注入电流在 50 到 300 mA 之间。

3.1. 输出耦合比对激光输出的影响

为研究其对扫描激光器的输出信噪比的影响, 固定注入电流 $I = 125$ mA 和腔长 $L = 15$ m, 输出耦合比 γ 取 0.7, 0.3 和 0.1。计算信噪比的公式: $SNR = 10 \lg \frac{P_o}{P_{std}}$, 其中, P_o 为调谐范围内激光的输出平均功率; P_{std} 为调谐范围内激光输出功率的标准差。由图 3 可见, γ 对信噪比的影响很大, 三种情况下, $\gamma = 0.1$ 信噪比最好, 信噪比为 10.4 dB, $\gamma = 0.7$ 最差, 信噪比为 6 dB。而且我们可以看出, $\gamma = 0.1$ 的情况下扫描输出的功率平坦度也是最好的。图中还可以从看出当 $\gamma = 0.1$ 时, 输出的激光长波段要比短波段功率大, 而前两种情况长波段的功率都要比短波段小, 这是由于增大反馈量后, SOA 处于深度饱和状态下引起的功率“红移”。下一部分我们将就 SOA 的增益饱和效应对激光输出信噪比的影响做详细的分析。

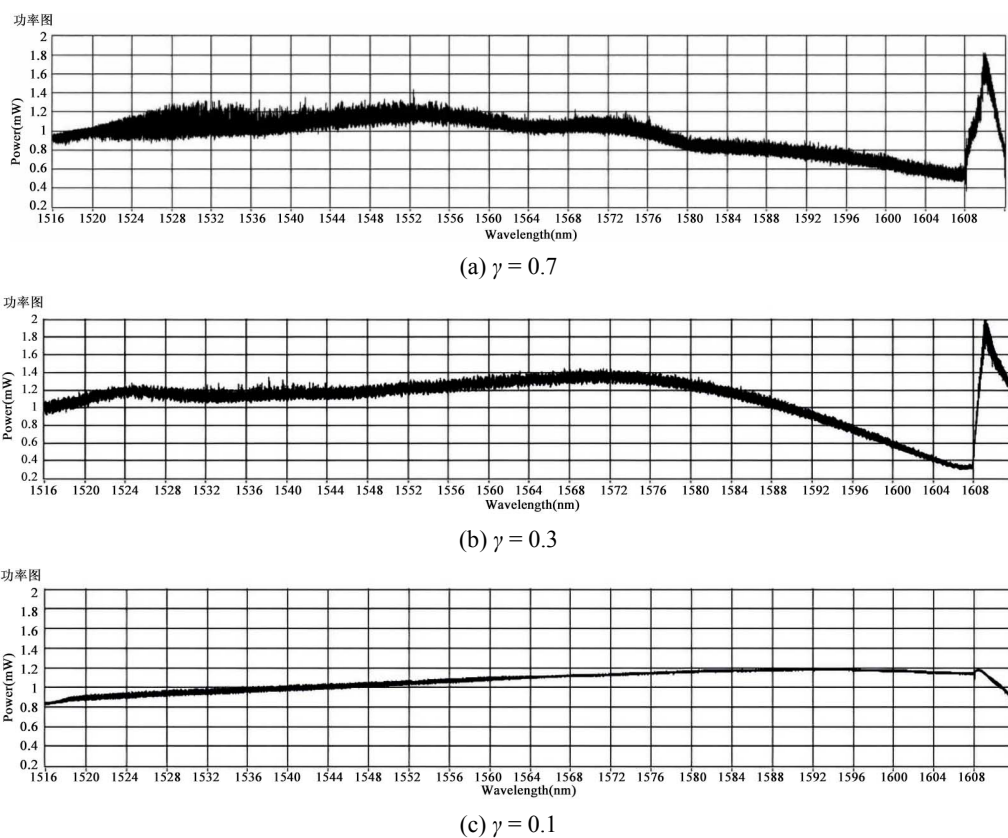


Figure 3. Laser output power under different output coupling ratios

图 3. 不同输出耦合比下的激光输出功率图

3.2. 注入电流对激光输出的影响

图 4 所示为扫描激光器输出功率随注入电流的变化情况, 注入电流分别为 100, 150 和 200 mA。其

他参量分别设为 $L = 15 \text{ m}$ ， $\gamma = 0.1$ 。随着注入电流的增加激光功率增大，信噪比也有所增加，三种电流下的信噪比分别是 8.2, 9.4 和 10.5 dB。这是由于在其他条件一定时，增加注入电流使增益饱和的深度增大，所以，进一步的提高了信噪比。因此，可是适当的增加注入电流，但是由于 FP 滤波器所能承受的功率有限，SOA 最大注入电流要保证在 250 mA 以下。

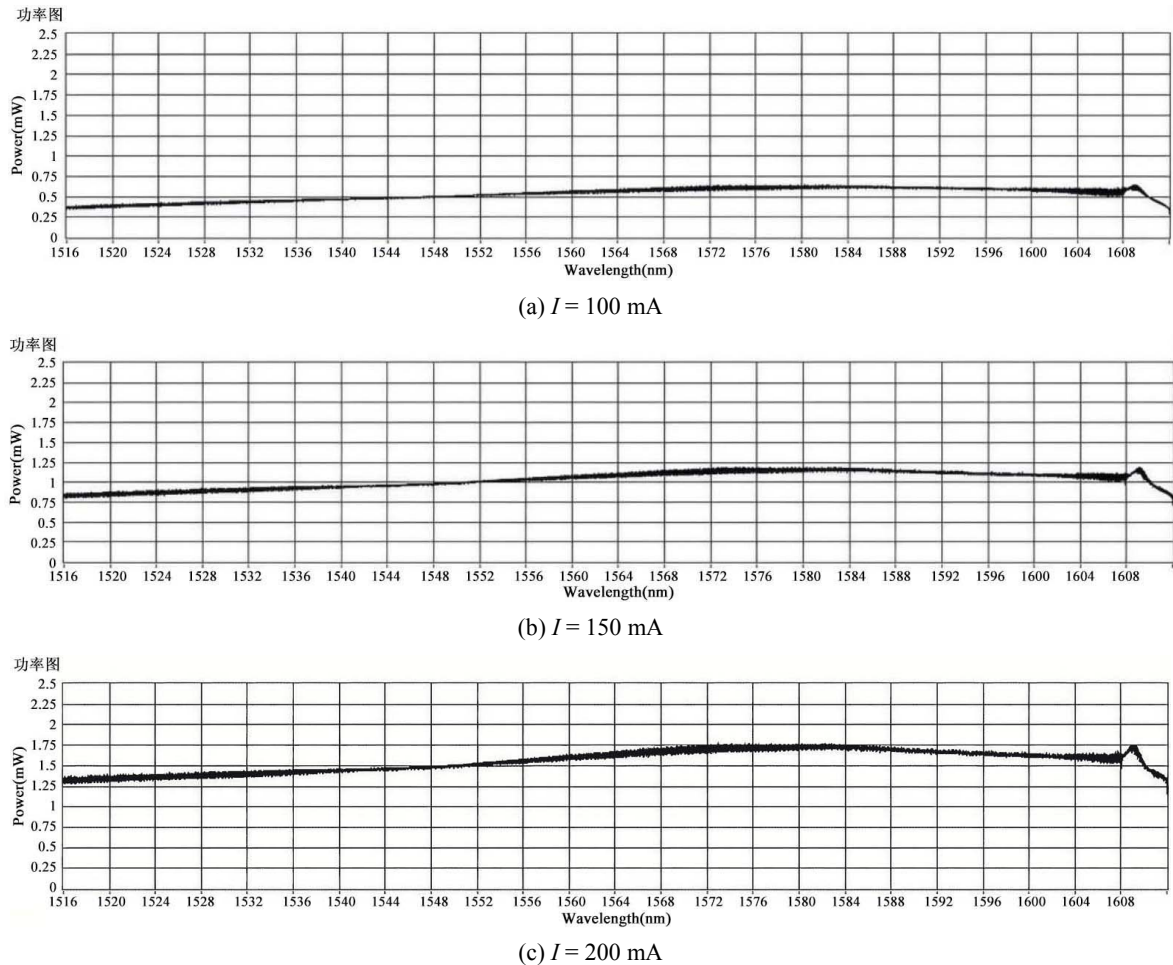


Figure 4. Laser output power under different injection currents

图 4. 不同注入电流下的激光输出功率图

3.3. 腔长 L 对激光输出的影响

由于增益介质 ASE 带宽在 THz 量级，FP 滤波器的带宽为几十个 GHz，而腔长通常在 10 m 以上的激光器腔内纵模间隔至多在几个 MHz 量级。因此，滤波器带宽内有很多模式同时运行。各个模式之间的竞争可能会对输出激光的信噪比产生一定的影响，激光器的腔长决定了滤波器线宽内激光模式的多少。

图 5 所示为 $I = 210 \text{ mA}$ ， $\gamma = 0.1$ 时，腔长分别为 10 和 20 m 激光输出功率图。由图可以看出在以上参量一定条件下，腔长对信噪比的影响不是很大。最大信噪 11.5 dB 最小信噪 11 dB，其差异主要是源于在改变腔长的同时光路内激光的偏振状态有所改变，可以通过调节偏振控制器来消除各个光路之间的微小信噪比差异。所以我们可以得出在满足相同电流和耦合输出比的情况下，腔长对信噪比的影响几乎可以忽略的结论。因此为了使光路更简洁，我们可以适当缩短腔长。

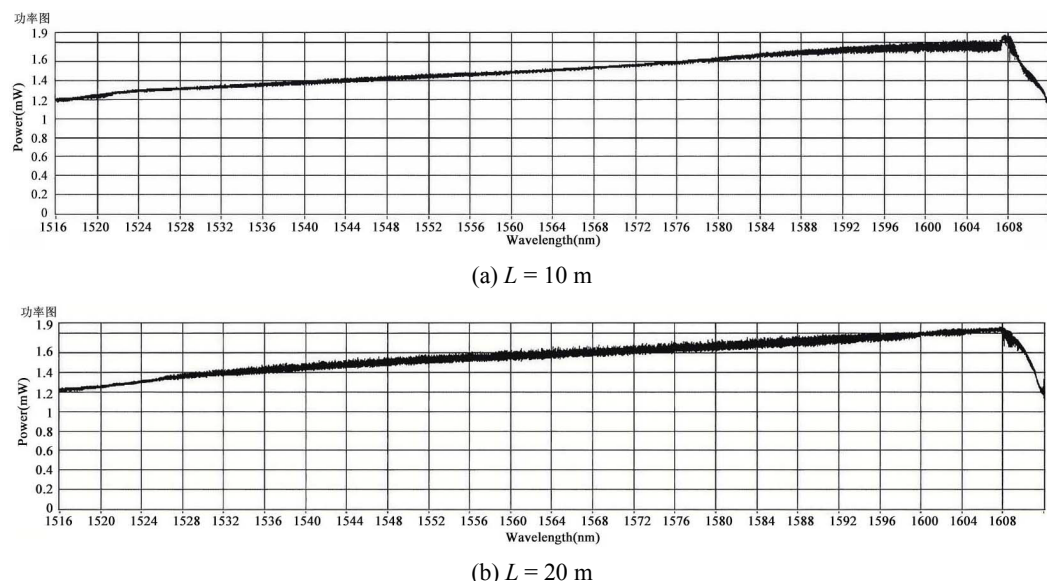


Figure 5. Laser output power at different cavity lengths

图 5. 不同腔长下的激光输出功率图

3.4. 讨论

决定扫描激光器输出的短期稳定性主要有两个因素，一是弛豫振荡，另一个是模式竞争。一般 SOA 载流子寿命为 300 ps 左右；而环形腔扫描激光器，在腔长为十几米，损耗为几个 dB 的情况下，光子寿命约为 100 ns。所以，SOA 载流子恢复时间远小于腔内光子寿命，环境扰动导致环内激光波长光功率的小幅波动将随时间迅速衰减，不会形成弛豫振荡[6]。所以对基于 SOA 的扫描激光器输出信噪比影响比较大的因素只有模式竞争。

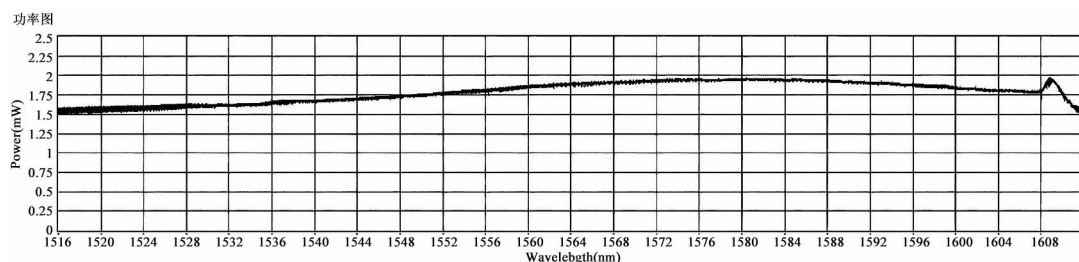


Figure 6. Output power of the laser under the conditions of $L = 10 \text{ m}$, $\gamma = 0.1$, and $I = 242 \text{ mA}$

图 6. $L = 10 \text{ m}$, $\gamma = 0.1$, $I = 242 \text{ mA}$ 条件下，激光器输出功率图

扫描激光器中，滤波器或增益介质不能有效抑制模式竞争。通常，多个模式同时振荡，模式之间的干涉将使光纤激光器的输出信噪比劣化[7]。但是，如果 SOA 处于增益饱和状态下，增益饱和效应就会抑制模式竞争，将会大大的提高激光器的输出信噪比。这就是为什么在加大光反馈后信噪比有了明显的提高的原因。噪音的抑制源于 SOA 的非线性效应。在时域上可以这样理解非线性压缩效应：输入信号功率低则增益高，输入信号功率高则增益低，光每经过一次 SOA，功率的起伏都会被压缩一些[8]。

以环形腔中的主模和其中一个边模为例，假设这两个模式具有相同的小信号增益。在 SOA 的输入端，主模写为 $E_d = E \cdot \cos \omega_0 t$ ，边模为 $E_s = \delta_i \cdot E \cdot \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \phi]$ ，二者的边模消光比 $\delta_i \ll 1$ 。得到 SOA 的输入光功率为：

$$P_i = \frac{1}{2}(1 + \delta_i^2)E^2 + \delta_i E^2 \cos(\Delta\omega \cdot t + \phi) = \bar{P}_i + \Delta P_i(t) \quad (1)$$

输入功率的相对变化定义为:

$$R_i = \frac{|\Delta P_i|_{\max}}{\bar{P}_i} = \frac{2\delta_i}{1 + \delta_i^2} \quad (2)$$

则

$$\Delta P_i(t) = R_i \bar{P}_i \cos(\Delta\omega \cdot t + \phi) \quad (3)$$

同样,我们也可以定义半导体光放大器输出的边模消光比 δ_o 。输出功率的相对变化 R_o 。下面用 SOA 的小信号动态方程推导。SOA 的积分增益为:

$$h(t) = \int_0^L g(z, t) dz = \bar{h} + \Delta h(t) \quad (4)$$

其中的 $\Delta h(t)$ 是输入的光功率引起的时变项。时变项由以下方程决定:

$$\tau_c \cdot \frac{d\Delta h(t)}{dt} + \left(1 + \frac{\bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}}}{P_{sat}}\right) \Delta h(t) = -\frac{\Delta P_i(t)}{P_{sat}} (e^{\bar{h}} - 1) \quad (5)$$

其中, τ_c 是载流子寿命, P_{sat} 为 SOA 饱和光功率。定义饱和系数 S , 来表征 SOA 饱和深度的为:

$$S = \frac{\bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}}}{P_{sat}} \quad (6)$$

将(3)式和(6)式代入(5)式, 然后求解可得:

$$\Delta h(t) = \frac{-SR_i(1 - e^{-\bar{h}})}{(1 + S)^2 + (\tau_c \Delta\omega)^2} \left[(1 + S) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \phi) + \tau_c \Delta\omega \cdot \sin(\Delta\omega \cdot t + \phi) \right] \quad (7)$$

得到 SOA 输出功率的表达式:

$$P_o = P_i \cdot e^h \approx \bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}} + \Delta P_i(t) \cdot e^{\bar{h}} + \bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}} \cdot \Delta h(t) \quad (8)$$

忽略(8)式中的高阶小信号。由(3)(7)(8)联立可求得输出功率随时间变化的表达式:

$$\begin{aligned} \Delta P_o(t) &\approx \Delta P_i(t) \cdot e^{\bar{h}} + \bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}} \cdot \Delta h(t) \\ &= \bar{P}_i R_i e^{\bar{h}} \left[\left(1 - \frac{(1 + S)S(1 - e^{\bar{h}})}{(1 + S)^2 + (\tau_c \Delta\omega)^2}\right) \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t + \phi) - \frac{S(1 - e^{\bar{h}}) \cdot \tau_c \Delta\omega}{(1 + S)^2 + (\tau_c \Delta\omega)^2} \sin(\Delta\omega \cdot t + \phi) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

输出光功率相对变化为:

$$R_o = \frac{|\Delta P_o|_{\max}}{\bar{P}_i \cdot e^{\bar{h}}} = \sqrt{1 - \frac{(1 + S)^2 A(2 - A)}{(1 + S)^2 + (\tau_c \Delta\omega)^2}} \cdot R_i \quad (10)$$

其中 $A = \frac{S(1 - e^{\bar{h}})}{1 + S}$, 因为 $0 < A < 1$, 很明显 $R_o < R_i$ 。当边模消光比 $\delta < 1$ 时, R 随着 δ 的减小单调递减, 所以有 $\delta_o < \delta_i$, 表明边模与主模相比具有较小的有效增益, 虽然边模和主模具有相同的小信号增益, 但边模有效增益小, 则其振荡被抑制。

通过以上理论分析我们对装置的各个参数进行合理配置($L = 10$ m, $\gamma = 0.1$, $I = 242$ mA), 适当调节偏振控制器后, 得到图 6 所表示的激光输出功率图, 在 92 nm 扫描范围内, 信噪比为 13dB、平坦度为 0.7 dB。图 7 为激光的频谱图, 可以看出激光在短波段 ASE 噪声比长波段强。在此状态下激光器噪声主要来

自 ASE。如果将 FP 滤波器置于输出耦合器之前, 将会滤除一部分 ASE 噪声, 可进一步提高激光输出的信噪比。

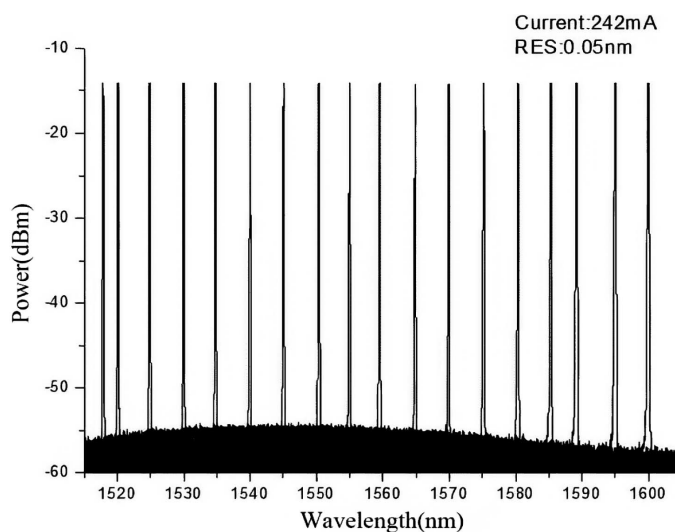


Figure 7. Laser spectrum diagram
图 7. 激光频谱图

4. 总结

本文设计并实现了一种基于 SOA 的可调谐环形腔光纤激光器, 结构紧凑、性能稳定。通过调节激光器参数, 包括注入电流、输出耦合比和腔长, 系统研究了它们对激光输出信噪比的影响。实验表明, 合理设置输出耦合比($\gamma = 0.1$)和注入电流($I = 242 \text{ mA}$)可使 SOA 处于增益饱和状态, 从而有效抑制模式竞争, 提高输出信噪比。最终在 92 nm 调谐范围内, 实现了 13 dB 的信噪比、0.7 dB 的功率平坦度和 1.79 mW 的输出功率。结合实验观察, 推测激光器主要噪声源为 ASE, 进一步优化滤波器位置有望提升信噪比。SOA 的 ASE 具有很宽的光谱范围, 但是由于此装置采用的滤波器自由光谱范围的限制, 所以可调谐范围只有 92 nm, 如果采用自由光谱范围更宽的 FP 滤波器, 此装置将可以得到更大的可调谐范围。

参考文献

- [1] 王晓娜, 王琦, 陈乐华, 等. 基于扫描光纤激光器的光纤传感解调仪研究[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 82-85.
- [2] Zhu, G., Wang, Q., Dong, H. and Dutta, N.K. (2004) Fiber Laser Relaxation Oscillation Noise Suppression through the Use of Self-Biased Intracavity Loss Modulator. *SPIE Proceedings*, **5595**, 318-322. <https://doi.org/10.1117/12.565162>
- [3] Yew Tai Chieng, and Cowle, G.J. (1995) Suppression of Relaxation Oscillations in Tunable Fiber Lasers with a Nonlinear Amplified Loop Mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, **7**, 485-487. <https://doi.org/10.1109/68.384518>
- [4] Foster, S., Tikhomirov, A. and Milnes, M. (2007) Fundamental Thermal Noise in Distributed Feedback Fiber Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **43**, 378-384. <https://doi.org/10.1109/jqe.2007.894744>
- [5] 马丽娜. 光纤激光水听器技术[D]: [博士学位论文]. 北京: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 王华, 姚敏玉, 张洪明. 基于 SOA 的 L 波段多波长锁模光纤环形激光器[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 991-993.
- [7] 王永福. 基于半导体光放大器的多波长光纤激光器的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] Qianfan Xu, and Minyu Yao, (2003) Theoretical Analyses on Short-Term Stability of Semiconductor Fiber Ring Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **39**, 1260-1265. <https://doi.org/10.1109/jqe.2003.817668>