

# 半导体光放大器非均匀注入的环形腔激光器 光谱特性研究

刘英峰 王 智 刘岚岚 孙振超 张丽梅 吴重庆

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 基于半导体光放大器(SOA)的环形腔激光器可在超过 100 nm 的调谐带宽内实现全带宽范围的兆赫兹级调谐,且输出激光信噪比高、平坦度好,因此在光纤通信、光纤传感和生物光子学领域应用广泛。采用稳态模型和分段算法,分别讨论了线性函数、二次函数、指数函数和平方根函数形式注入电流对 SOA 的增益谱和 SOA 峰值波长的影响,研究非均匀注入对 SOA 增益特性和环形腔激光器输出特性的影响。结果表明,输出激光波长在较大平均注入电流时随电流变化较小,且在指数型非均匀注入时存在变化率为 0 的极值点,可获得很高的波长稳定性。

**关键词** 激光器; 半导体光放大器; 非均匀注入; 可调谐环形腔激光器; 增益

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102010

## Spectral Characteristics of the SOA-Based Tunable Ring Laser with Non-Uniform Injection

Liu Yingfeng Wang Zhi Liu Lanlan Sun Zhenchao Zhang Limei Wu Chongqing

(Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** Semiconductor optical amplifier-based ring cavity laser (SOA-RL), which has been widely used in optical communications, optical fiber sensing, and bio-photonics fields, can be tuned at an ultra high speed up to megahertz over 100 nm bandwidth range with high signal-to-noise ratio (SNR) and good flatness output. A steady-state model and segmentation algorithms are employed to investigate the gain spectra of the SOA and the laser wavelength of the SOA-RL when the SOA is driven by some non-uniform injections, such as linear, quadratic, exponential, or square root functions. The results show that the laser wavelength changes slowly with the change of injection current when its average is greater, and there is a minimum value when the injection current is exponentially distributed along the SOA, which exhibits high wavelength stability.

**Key words** lasers; semiconductor optical amplifier; non-uniform injection; tunable ring laser; gain

**OCIS codes** 140.5960; 170.4500; 230.6080

## 1 引 言

基于半导体光放大器的环形腔激光器(SOA-RL)<sup>[1-2]</sup>可实现波长扫描激光器、傅里叶域锁模激光器<sup>[3]</sup>,在光纤通信、光纤传感、生物光子和高速全光信号处理等领域有广泛应用,如光通信系统性能

测试<sup>[4]</sup>、光学相干成像系统(OCT)的光源<sup>[5]</sup>、高分辨率分布式光纤传感<sup>[6]</sup>、光功率均衡<sup>[7]</sup>、全光数据交换<sup>[8]</sup>等。它除了具有一般半导体环形腔激光器的特点以外,还同时兼有外腔激光器的许多优点,既可充分发挥 SOA 所拥有的独特优点,还可方便地在线

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61077048,61077014)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032)、北京市自然科学基金(4132035)、中央高校基本科研业务费(2009JBM103,2012JBM103)

作者简介: 刘英峰(1988—),女,硕士研究生,主要从事可调谐环形激光器方面的研究。E-mail: 11121825@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,博士,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(中国光学学会会员号: s0404210815)

内置各种控制器件,如滤波器、光纤耦合器、光隔离器和偏振控制器等元器件<sup>[9]</sup>,实现各种工作模式的激光输出。光纤环形腔结构更易于实现单纵模振荡,并获得窄线宽的高速脉冲<sup>[10]</sup>,全光纤型结构与光纤系统的兼容性很好,有利于降低各种连接损耗和扰动,如衍射损耗、背向散射、反射光对 SOA 的不良影响等<sup>[11]</sup>。基于半导体光放大器的环形腔激光器的灵活调控性和光纤兼容性,使其在未来的光子器件和高速光通信技术中越来越重要。

目前 SOA-RL 激光器的应用研究比较多,但是有关基本机理的基础研究却很少,尤其是对于 SOA 的工作电流非均匀注入的情形更是很少有报道<sup>[12]</sup>,而关于 SOA-RL 的相关研究仍未见报道。本文利用分段模型,研究了工作电流为多种不同空间函数的非均匀注入时 SOA 的增益特性,进一步研究 SOA-RL 输出波长与非均匀注入参数的关系,得到不同注入函数时的光谱特性。

## 2 理论模型与算法

SOA-RL 基本结构如图 1 所示,SOA 在注入电流作用下产生自发辐射,自发辐射光在环形腔内传输,并经 SOA 多次放大,形成谐振,输出激光。光场在 SOA 中满足指数放大规律,因此载流子沿 SOA 纵向呈非均匀变化。本文采用稳态分段模型将 SOA 分为  $N$  段,且认为每一段内载流子和光子

数密度均匀分布,因此理论上分段数目越大结果越精确。在实际数值模拟中,SOA 纵向长度为  $700\ \mu\text{m}$ ,当分段数目达到 40 时算法收敛性很好,因此为了达到一定的精度,并节省程序运行时间,本文分段数目取 40。另一方面,不同波长(频率)的光在 SOA 中的增益不同,消耗的载流子也不相同;而且 SOA 中的放大自发辐射(ASE)噪声光谱带宽达到  $100\ \text{nm}$  左右,不同频率处的强度不同,在 SOA 中传播时增益也不同。本文对自发辐射谱进行频率分割,把一定频率宽度范围内的自发辐射噪声看成单频光,通过将连续的频谱离散化来研究整个 ASE 的光谱特性。

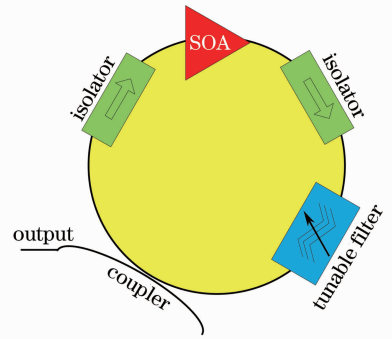


图 1 基于 SOA 的环形腔激光器基本结构

Fig. 1 Basic scheme of the SOA-RL

载流子(光子)数密度  $N$  在纵向位置  $z$  处的速率方程为<sup>[13]</sup>

$$\frac{dN(z)}{dt} = \frac{I}{edLW} - R[N(z)] - \frac{\Gamma}{dW} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s} g_m[\nu_k, N(z)][N_{sk}^+(z) + N_{sk}^-(z)] \right\} - \frac{2\Gamma}{dW} \left\{ \sum_{j=1}^{N_m-1} g_m[\nu_j, N(z)]K_j[N_j^+(z) + N_j^-(z)] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I$  为注入电流,  $e$  为基本电荷电量,  $L, d, W$  分别为有源区长、高、宽,  $\Gamma$  为有源区光场限制因子,  $g_m$  为有源区材料增益系数, 等号右边第 1 项为载流子注入过程, 第 2 项为自发辐射复合过程, 第 3 项为外界注入光(抽运光、信号光等, 频率为  $\nu_k$ ) 导致的受激辐射复合过程, 其中  $N_{sk}^+(z), N_{sk}^-(z)$  分别为沿正向、反向传播的外界注入光在  $z$  处的光子速率, 等号右边最后一项表示 ASE 导致的受激辐射复合过程, 其中  $N_j^+(z), N_j^-(z)$  分别为正、反向传播的自发辐射(频率为  $\nu_j$ ) 在  $z$  处的光子速率。

本文参考文献[14]中提出的算法分析 SOA 的 ASE 光谱和放大过程, 并结合环形腔激光器的结构, 设计算法模型, 具体实现过程不在此赘述。

## 3 非均匀注入时 SOA 的增益谱

将 SOA 沿纵向均匀分为 40 段, 认为每一小段内注入电流均匀, 光子数密度和载流子也均匀分布。

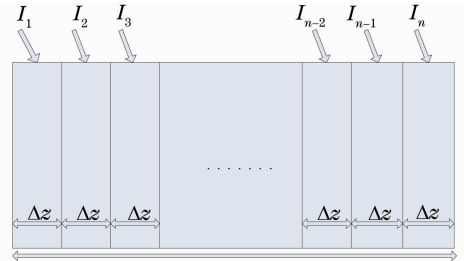


图 2 SOA 空间非均匀注入电流的分段模型

Fig. 2 Segmentation model of the SOA with non-uniform injection

图 2 是 SOA 注入空间不均匀电流的模型。

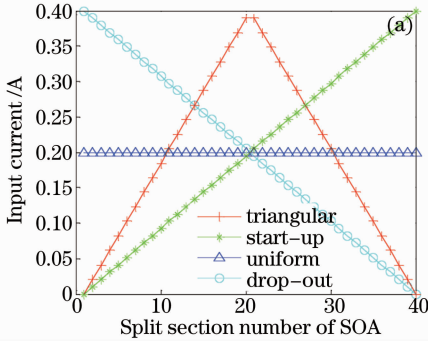
### 3.1 线性电流注入

$$I_0 = a_0 z + b, I_{0\text{ave}} = \frac{1}{2} a_0 n_z + b, a_0 = 2 \frac{(I_{0\text{ave}} - b)}{n_z}, \quad (2)$$

$$I_1 = \begin{cases} a_1 z + b \\ a_1 (n_z - z) + b \end{cases}, I_{1\text{ave}} = \frac{1}{4} a_1 n_z + b, a_1 = 4 \frac{(I_{1\text{ave}} - b)}{n_z}, \quad (3)$$

式中  $I_{0\text{ave}}$  和  $I_{1\text{ave}}$  分别是对应的平均电流,  $z$  对应 SOA 纵向位置分段数,  $n_z$  是 SOA 最大分段数。(2) 式中,  $b$  值与  $I_{0\text{ave}}$  值相等时即为均匀注入,  $b > I_{0\text{ave}}$  时为线性上升注入,  $b < I_{0\text{ave}}$  时为线性减小注入。

图 3(a) 是注入电流沿 SOA 纵向分布情况, 横轴为 SOA 纵向分段位置, 对应的 4 种线性非均匀注



均匀、线性减小、线性上升和三角形非均匀电流可分别表示为

入电流平均值都为 0.2 A, (2) 式中的  $b$  分别为 0.2、0.4、0, (3) 式中  $b=0$ 。输入光功率为 -20 dBm 时, SOA 的增益谱如图 3(b) 所示。从图中可以看出, 电流平均值一样的情况下, SOA 增益峰值波长处, 注入线性上升电流时增益最大, 均匀、三角和线性减小的电流注入时增益依次减小。

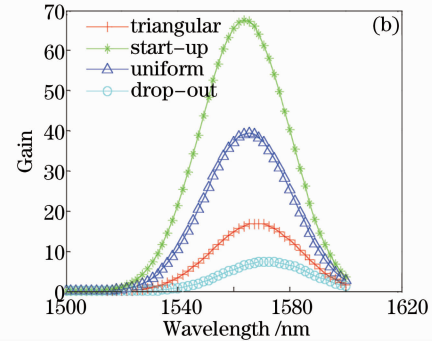


图 3 线性电流注入时 SOA 的增益谱特性。(a) 电流纵向分布; (b) SOA 增益谱

Fig. 3 Current distribution and gain spectra of the SOA with linear injection. (a) Current distribution along SOA; (b) gain spectra of SOA

### 3.2 非线性电流注入

本文研究的非线性电流函数形式包括指数函数、平方根函数和二次函数, 分别表示为

$$I_2 = b \exp(a_2 z), I_{2\text{ave}} = \frac{b}{a_2 n_z} [\exp(a_2 n_z) - 1], \quad (4)$$

$$I_3 = \sqrt{a_3 z + b^2}, I_{3\text{ave}} = \frac{2}{3 a_3 n_z} [(a_3 n_z + b^2)^{3/2} - b^3], \quad (5)$$

$$I_4 = a_4 z^2 + b, I_{4\text{ave}} = \frac{1}{3} a_4 n_z^2 + b, a_4 = 3 \frac{(I_{4\text{ave}} - b)}{n_z^2}. \quad (6)$$

式中  $I_{2\text{ave}}$ 、 $I_{3\text{ave}}$  和  $I_{4\text{ave}}$  分别是对应的平均电流,  $z$  对应 SOA 纵向位置分段数,  $n_z$  是 SOA 最大分段数。图 4(a) 是这 3 种非线性非均匀注入电流在 SOA 中的纵向分布, 为了便于比较, 图中同时给出了线性上升的电流分布, 4 种情况的平均电流都为 0.2 A,  $b = 0.01$ , 为此, 系数  $a_0, a_2, a_3, a_4$  分别为 0.095, 0.114, 0.0024, 0.00037。

输入光功率为 -20 dBm 时, SOA 的增益谱如图 4(b) 所示, 可以看出, 电流平均值相同时, SOA 增益峰值波长处, 注入二次函数的电流时增益最大, 注入一次函数电流、指数函数电流和平方根函数电流时增益依次减小。

## 4 非均匀注入时 SOA-RL 输出波长

SOA 增益特性与非均匀注入方式有关, 因此, 基于 SOA 的环形腔激光器的输出特性也会受到影响。图 3(b) 和 4(b) 中, 不同注入电流时, SOA 的增益峰值波长发生了变化, 必将导致激光器输出波长的变化。

为了研究基于 SOA 的环形腔激光器输出波长与注入电流的关系, 对(2)式和(3)式的 5 种非均匀注入情况都进行分析, 注入电流平均值变化范围在 0.05~0.8 A, 改变参数  $b$ , 可得到对应的参数  $a$  以及电流沿 SOA 纵向分布  $I(z)$ 。按照前文所述的方法, 对每一种非均匀注入条件下的 SOA 和 SOA-RL 进行仿真计

算,可得到激光器输出中心波长变化情况。

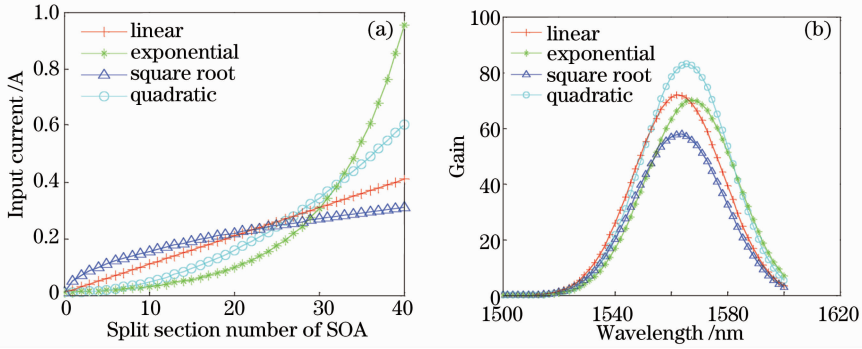


图 4 非线性电流注入时 SOA 的增益谱特性。(a) 电流纵向分布; (b) SOA 增益谱

Fig. 4 Current distribution and the gain spectra of the SOA with nonlinear injection. (a) Current distribution along SOA; (b) gain spectra of SOA

图 5(a)~(d)和图 6(a)分别是线性、三角、平方根、二次函数和指数函数形式的非均匀注入条件下, SOA-RL 输出激光中心波长随平均注入电流 (lave) 和(2)式与(3)式中参数  $b$  的变化情况。从这些结果看,激光器输出激光峰值中心波长与 SOA 工作平

均电流和注入函数形式有密切关系。一般地,平均电流较小时,激光波长随电流变化较大,平均电流较大时,这 5 种非均匀注入的激光波长随电流变化较慢,因此,为了使注入电流变化时 SOA-RL 输出波长变化较小,应使其工作于较大注入电流状态。

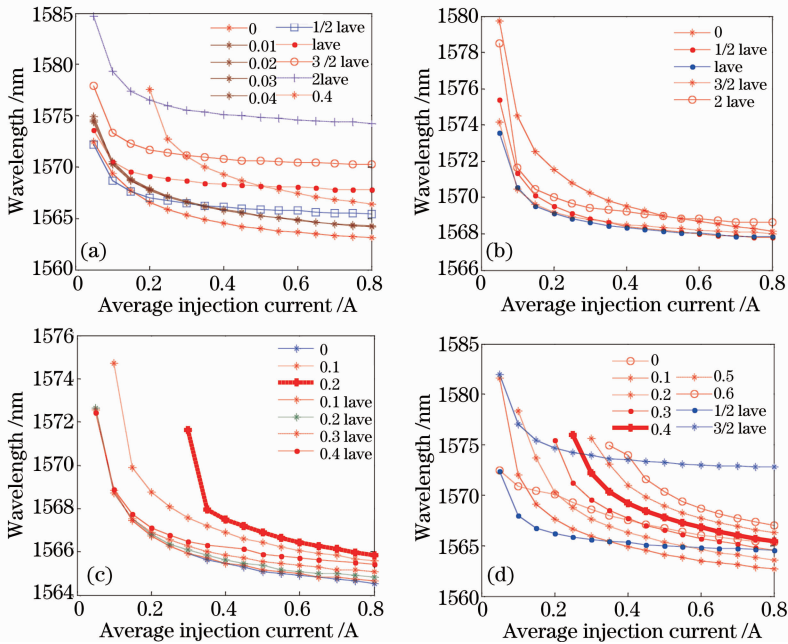


图 5 四种非均匀注入方式的 SOA-RL 输出波长与平均注入电流和非均匀参数的关系。

(a) 线性函数; (b) 三角函数; (c) 平方根函数; (d) 指数函数

Fig. 5 Relationship between the SOA-RL output wavelength and the average injection current for four non-uniform injections. (a) Linear; (b) triangular; (c) square root; (d) quadratic

图 5(a)、(c)、(d)中,参数  $b$  增大时,激光波长随之变大,图 5(b)所示的三角形函数注入时,激光波长与参数  $b$  的关系不明显。图 6(a)是当注入电流按指数函数非均匀分布时,SOA-RL 输出波长与平均注入电流和非均匀参数的关系。从图中可以看出,参数  $b$  随平均注入电流变化时,激光波长随  $b$  增

大而增大;但是,如果参数  $b$  不随平均注入电流改变,激光波长随  $b$  增大(0.01~0.45)而减小。而且,对于与平均电流无关的参数  $b$ ,每取一个  $b$  值,激光波长随平均注入电流的变化不再是单调的,存在一个平均电流值,使激光器输出某一最短波长,在此附近,激光波长随平均注入电流变化率为 0,说明激光

器波长稳定性最好。为了更清晰地表示这一结果,图 6(b)给出了最稳定波长和参数  $b$  与平均注入电

流的关系,可以看到,平均电流增大时,参数  $b$  随之增大,可获得向短波长移动的最稳定波长。

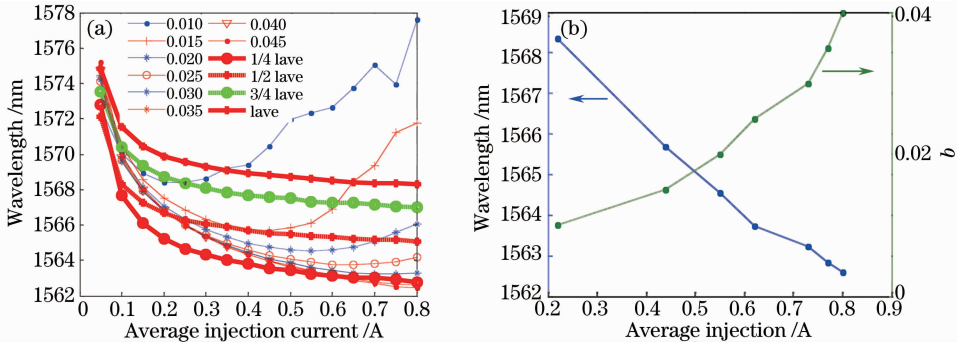


图 6 (a) 指数非均匀注入时 SOA-RL 输出波长与平均注入电流和非均匀参数的关系;  
(b) 最小波长对应的平均注入电流和参数  $b$

Fig. 6 (a) Relationship between SOA-RL output wavelength and average injection current for exponential injection; (b) the minimum wavelength at different average injection currents and parameter  $b$

## 5 结 论

本文基于 SOA 的分段模型和环形腔结构,研究 SOA-RL 在非均匀注入时的特性。得到了多种不同非均匀注入时 SOA 的增益谱特性,结果表明 SOA 注入电流和载流子分布互补时增益较大;进一步得到 SOA-RL 的输出波长与平均注入电流和非均匀函数形式的复杂关系。结果表明,该结构的输出激光波长在较大平均注入电流时随电流变化较小,且在指数型非均匀注入时存在变化率为 0 的极值点,可获得很高的波长稳定性,且稳定波长与平均注入电流和非均匀参数有关。这些结果有利于在研究基于 SOA 的环形腔激光器时进行工作状态调节和控制,为实际应用提供一定的指导。

## 参 考 文 献

- 1 Y Liu, M T Hill, N Calabretta, *et al.*. Three-state all-optical memory based on coupled ring lasers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(10): 1461–1464.
- 2 Qianfang Xu, Minyu Yao. Theoretical analyses on short-term stability of semiconductor fiber ring lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(10): 960–965.
- 3 Hongxin Chen. Multiwavelength fiber ring lasing by use of a semiconductor optical amplifier[J]. Opt Lett, 2005, 30(6): 619–621.
- 4 Wang Lutang, Fang Nian, Wang Ying, *et al.*. Dual-channel PolSK optical transmissions using SOA-based all-optical polarization modulations[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 138–144.
- 王陆唐, 方捻, 王颖, 等. 基于 SOA 全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 138–144.
- 5 S R Chinn, E A Swanson, J G Fujimoto. Optical coherence

tomography using a frequency tunable optical source[J]. Opt Lett, 1997, 22(5): 340–342.

- 6 Huang Junfen, Huang Minshuang, Tang Jian. Research progress on high spatial resolution distributed sensing technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 47–50.
- 黄军芬, 黄民双, 唐建. 高空间分辨率分布式光纤传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 47–50.
- 7 J Leuthold, M Kauer. Power equalisation and signal regeneration with delay interferometer all-optical wavelength converters[J]. Electron Lett, 2002, 38(24): 1567–1568.
- 8 Christian Habib, Varghese Baby, Lawrence R Chen, *et al.*. All-optical swapping of spectral amplitude code labels using nonlinear media and semiconductor fiber ring lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2008, 14(3): 879–888.
- 9 Pan Wei. Research of Fiber Ring Cavity Semiconductor Laser [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- 潘炜. 光纤环形腔半导体激光器的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- 10 M Schell, E Schol. Time-dependent simulation of a semiconductor laser amplifier: pulse compression in a ring configuration and dynamic optical bistability [J]. IEEE J Quantum Electron, 1990, 26(6): 1005–1013.
- 11 L F Stokes, M Chodorow, H J Shaw. All-single-mode fiber resonator[J]. Opt Lett, 1982, 7(6): 288–290.
- 12 H Taleb, K Abedi, S Golmohammadi. Operation of quantum-dot semiconductor optical amplifiers under nonuniform current injection[J]. Appl Opt, 2011, 50(5): 608–617.
- 13 Michael J Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model[J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(3): 439–447.
- 14 Liu Yingfeng, Wang Zhi, Zhang Limei, *et al.*. Lasing of the tunable fiber ring laser based on semiconductor optical amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202002.
- 刘英峰, 王智, 张丽梅, 等. 基于半导体光放大器的可调谐环形腔激光器的激光建立过程[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202002.

栏目编辑: 宋梅梅