

宽可调谐双微环耦合半导体激光器的模拟研究

赵建宜¹ 刘 文^{1,2} 黄晓东² 周 宁²

(¹ 华中科技大学光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)
² 光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了对宽可调谐微环耦合半导体激光器进行理论研究,提出了一种新型半导体激光器动态理论模型对其动态特性进行仿真分析。激光器的有源区采用传统的时域行波法进行模拟,由于调谐带宽大于 40 nm,需要考虑增益谱线型,而无源区则先利用频域模型计算其频谱特性,再利用有限冲击响应数字滤波器转化到时域与有源区进行连接。通过仿真分析得出,微环的耦合系数对激光器的大信号调制具有十分重要的影响。低耦合系数可以获得极窄的线宽但是激光器大信号直接调制能力也会随之急剧劣化。仿真结果还显示出该类型激光器可以进行高速大范围波长调谐。

关键词 激光器;动态波长切换;微环;时域行波法;大信号调制

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0214003

Modeling of Widely Tunable Double-Ring-Resonator Coupled Semiconductor Laser

Zhao Jianyi¹ Liu Wen^{1,2} Huang Xiaodong² Zhou Ning²

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China
² Accelink Technologies Company, Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A relatively simple model is developed to simulate the widely tunable double-ring resonator lasers. In the simulation, the active region of the device is modeled using conventional time domain traveling method, because when the tuning range is large than 40 nm, the gain shape should be considered. The passive parts are first modeled by frequency domain method and then transformed into time domain via digital filter. The simulation result shows that the coupling coefficient has a significant effect on large signal modulation. With low coupling coefficient the laser can get narrow linewidth but poor modulation performance. Finally, the switching characteristics such as switching delay and multi-mode competition are also investigated. The result shows that the laser can switch the wavelength with high speed and large range.

Key words lasers; dynamic wavelength switching; microring; time domain traveling wave method; large signal modulation

OCIS codes 140.3560; 140.3600; 130.3120; 230.0250

1 引 言

高速宽可调谐半导体激光器是现代光网络的核心器件。它们广泛地应用于网络备份,可重构光分

叉复用系统及波长路由网络等^[1]。微环谐振器可以提供很强的模式选择能力并且具有紧凑的结构,十分适合运用在光电子集成器件中^[2,3]。近年来,基

收稿日期: 2011-07-11; 收到修改稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603)资助课题。

作者简介: 赵建宜(1986—),男,博士研究生,主要从事光电子器件设计与制造等方面的研究。

E-mail: Jianyi.zhao@accelink.com

导师简介: 刘 文(1960—),男,博士,教授级高工,主要从事光通信系统及器件等方面的研究。

E-mail: Wen.Liu@wri.com

于微环的可调谐激光器作为一种新型的器件越来越受到人们的重视。相比于传统的取样光栅分布布拉格反射(SGDBR)激光器^[4,5],基于微环的可调激光器理论上可以提供更窄的线宽,更高的边模抑制比(SMSR)以及更宽的波长调谐范围。更重要的是,它可以通过传统的平面光波导工艺制作而不需要高精度的光刻及额外的外延生长用以制作掩膜光栅。而这两步都是传统的 SGDBR 激光器的制作中不可缺少的。一些文献^[6]中实验上已经得到了该类型激光器可调范围大于 50 nm,而调谐电流小于 10 mA。

然而由于微环耦合半导体激光器的复杂结构,国内外还没有对其动态性能进行研究的理论模型。本文提出了一种新型的时域行波法,结合散射矩阵法完整地模拟了其动态特性。利用该模型可以十分容易地对其大信号调制特性及波长切换特性进行模拟。

2 理论与模型

激光器结构如图 1 所示,在激光器有源区部分采用时域行波法。这一算法的核心是:时域中两个互为反向传输的光场在每个时间步长 dt 中移动 $dz = dt \cdot v_g$ (v_g 为群速度)的距离,同时光场与载流子以及增益保持自洽关系。而在双微环谐振区,由于其为纯无源器件,其特性可以完全包含在频谱中。所以可以首先采用成熟的频域模型如散射矩阵法得到其频域响应^[7,8],然后通过傅里叶逆变换转化到时域,最后利用数字滤波器有效地将两部分连接起来^[9]。由于激光器的可调谐相位区在器件中仅仅起到移相的作用,在计算中可以简单地用 $\exp(-j\beta z)$ 代替并整合进微环谐振器区。

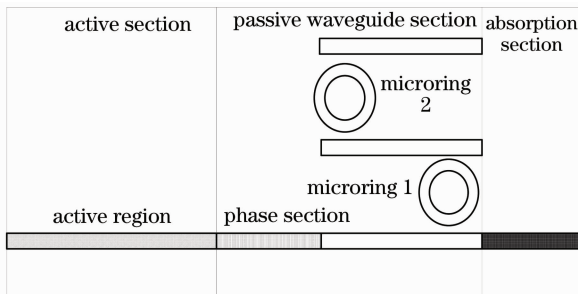


图 1 双微环谐振腔(DRR)激光器结构

Fig. 1 Structure of the double-ring-resonator (DRR) laser

在激光器有源区部分,里面的光场用一对反向传输的光波来描述^[8,9]:

$$v_g \frac{\partial E_{l/r}}{\partial t} \pm \frac{\partial E_{l/r}}{\partial z} = (\Gamma g - \alpha_s - j\delta) E_{l/r} + S, \quad (1)$$

式中 v_g 是群速度, Γ 是光场限制因子, g 是增益, α_s 是内部损耗, δ 是由于注入载流子引起折射率变化产生的失谐量, S 是自发辐射噪声, 由于它在时域行波法中做激光器激射的种子光源, 所以它对激光器性能具有重要影响^[10~12]。在模拟中认为自发辐射噪声的振幅服从高斯分布, 而相位则是平均分布。为了对(1)式进行数值求解, 将激光器有源区分为很多小段, 每一段中的参数是一致的, 而段与段之间则是变化的。腔内载流子密度可以用速率方程进行求解:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{V} - \frac{N}{\tau} - BN^2 - CN^3 - \frac{v_g g(N - N_0)}{1 + \epsilon P} P, \quad (2)$$

式中 I 和 e 分别为注入电流及自由电子电荷, V 为有源区体积, τ , B , C 分别为电子寿命, 辐射复合因子及俄歇复合因子; g 为增益系数, N_0 为透明载流子浓度, ϵ 为增益压缩因子; P 是有源区光子密度。在无源波导区, $g = 0$ 。对于宽可调谐激光器, 波长相关的增益影响不能忽略。因此传统 DFB 激光器模拟中用到的平坦的增益谱需要被替换成

$$g(\omega) = g(\omega_0) H(\omega),$$

式中 $g(\omega_0)$ 为其参考频率处的增益, 由如下表达式决定:

$$g(\omega_0) = \frac{g \ln(N/N_0)}{2(1 + \epsilon P)}, \quad (3)$$

$H(\omega)$ 为洛伦兹响应函数,

$$|H(\omega)|^2 = \frac{(1 - \eta)^2}{1 + \eta^2 - 2\eta \cos[(\omega - \omega_0) \Delta t]}, \quad (4)$$

其中参数 η 决定其增益宽度, ω_0 决定其中心频率。利用一阶无限冲击响应滤波器整合进(1)式内。

在双微环调谐区, 首先利用标准的散射矩阵法求出其频域谱线^[10,13], 然后利用离散傅里叶逆变换将其转化到时域。典型的双微环谐振器的反射谱如图 2 所示, 在波导损耗一定的情况下, 振幅传输系数 T 越大, 反射谱次级峰越小, 半峰全宽越小, 相应的选模效果越好, 但是同时也可以发现其反射峰值降低, 对激光器阈值的减小产生不利影响。

由双微环谐振器的频域谱可以很容易地得到其对时域信号的加权系数为

$$E(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} E(f) \exp(2\pi j k \Delta t), \quad (5)$$

式中 $E(f)$ 为双微环的频域谱, Δt 是模拟的时间步长。利用有限冲击响应滤波器, 从无源微环区反射

回有源区的反射光场为

$$E_{\text{ref}} = \sum_{k=0}^M E^k(t) E_{\text{in}}^{n-k}, \quad (6)$$

E_{in} 表示入射光场, M 是滤波器的级数。在模拟中不

考虑激光器的热效应, 因为它的响应时间通常远大于信号变化及波长切换时间。

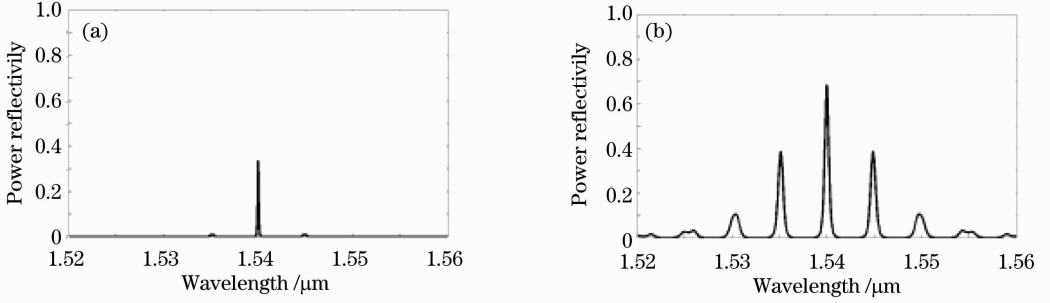


图2 DRR的反射谱。(a) $T=0.9$; (b) $T=0.7$ 。波导损耗为 2 cm^{-1}

Fig. 2 Reflection spectra of DRR. (a) $T=0.9$; (b) $T=0.7$. The waveguide loss is 2 cm^{-1}

3 结果及讨论

在模拟中设计两个微环的半径分别为 $23.5 \mu\text{m}$

和 $22.5 \mu\text{m}$, 相移区长度为 $100 \mu\text{m}$, 模拟中使用到的其他主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真的主要参数

Table 1 Parameters used in the simulation

Parameter	Symbol	Value	
Cavity length	$L / \mu\text{m}$	500	
Waveguide width	$w / \mu\text{m}$	2	
Waveguide loss	Active region	α / cm^{-1}	30
	Passive region	$\alpha_{p0} / \text{cm}^{-1}$	2
Waveguide confinement factor	Active region	Γ	0.35
	Passive region	Γ_p	0.5
Carrier recombination time	Active region	τ / ns	1
	Passive region	τ_p / ns	10
Waveguide thickness	Active region	d / nm	40
	Passive region	d_p / nm	200
Effective refractive index	n_0	3.3	
Group refractive index	n_g	3.7	
Transparent carrier density	N_0 / cm^{-3}	1.5×10^{18}	
Bimolecular recombination coefficient	$B / (\text{cm}^{-6} \cdot \text{s}^{-1})$	10^{-10}	
Differential gain coefficient	g_N / cm^{-2}	3.5×10^{-16}	
Gain coefficient	g_0 / cm^{-1}	1800	
Nonlinear gain coefficient	ϵ / cm^3	3×10^{-17}	
Electron mass	m_0 / kg	9.1×10^{-31}	
Effective mass of electrons	m_e	$0.05m_0$	
Effective mass of holes	m_h	$0.5m_0$	
Mobility of electrons	$\mu_e / [\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})]$	2000	
Mobility of holes	$\mu_h / [\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})]$	200	

通过在有源区注入电流中加入 2.5 Gb/s 的调制信号来模拟其大信号调制^[14]。其中“1”脉冲为 100 mA , “0”脉冲为 15 mA , 略低于其阈值电流。分析激光器出射脉冲的眼图(如图 3 所示)可以得到,

微环谐振器的振幅传输系数 t 越大, 激光器的直接调制性能越差, 具体表现在其脉冲上升沿的过冲变大及弛豫时间的加长。产生这种现象的原因在于, 微环谐振器在激光器中不仅是一个波长选择用的滤

波器,还是一个能量存储元件。如果微环谐振器的振幅耦合系数及传输损耗足够小,其内的光子寿命

就会极大地延长^[13,15],以至于其不能响应外界的高频信号。

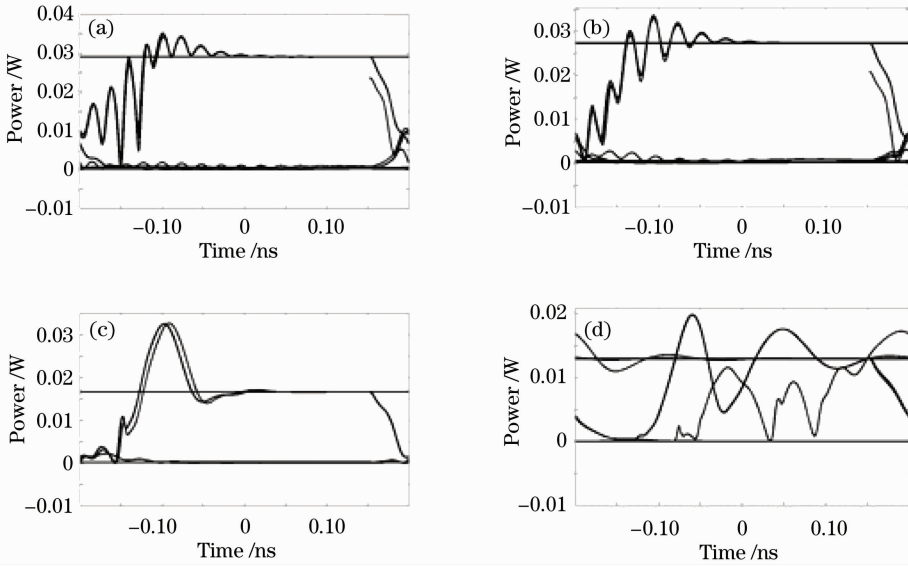


图3 直接调制信号的眼图。(a) $T=0.7$; (b) $T=0.8$; (c) $T=0.9$; (d) $T=0.95$

Fig. 3 Eye-diagram of large signal modulation. (a) $T=0.7$; (b) $T=0.8$; (c) $T=0.9$; (d) $T=0.95$

同时用这个模型研究了微环耦合激光器的动态波长切换性能。日本 NTT 公司已经通过实验证实了该种器件具有快速稳定的波长切换能力,波长切换时间小于 5 ns。如图 4 所示,两条曲线分别为输出功率及第 1 个微环中载流子浓度随时间的变化,模拟实验验证了微环耦合激光器的波长时延主要取决于波长切换无源波导中载流子的寿命及有源区中的多模竞争现象。

时域数字滤波器得到了各个波长成分功率随时间变化的曲线,如图 5 所示,通过模拟可以清晰地看到激光波长变化和跳跃以及激光器的超模和腔模位置。

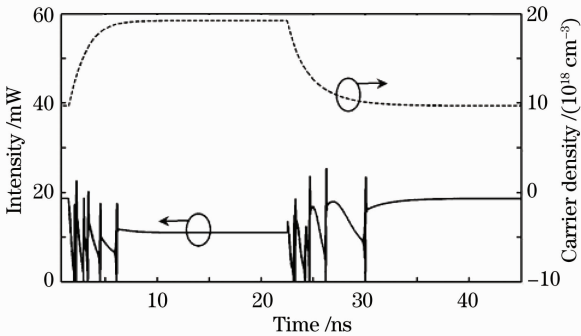


图4 功率与载流子密度随波长切换时间的变化

Fig. 4 Variation of output power and carrier density in the first microring with switching time

将第 1 个微环中的注入电流从 2.1 mA 提高到 7.3 mA 然后再回到 2.1 mA,同时分别保持第 2 个微环、有源区及相位区电流为 1, 100, 0 mA。利用

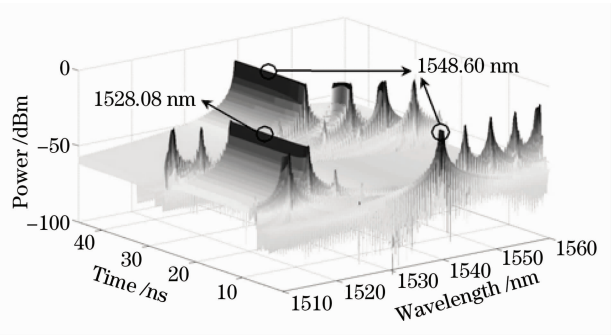


图5 模式功率随切换时间变化

Fig. 5 Mode power varying with switching time

从图 6 中可以更清晰地看出在 1 ns 时激光器初始激光波长为 1528 nm。当逐步增大第 1 个微环中的调谐电流时,微环谐振器的反射峰会由于游标效应移动。由于激光条件发生了变化,多模竞争现象立即出现,如图 6(b)和(d)所示。当载流子稳定以后,所有的瞬态模逐步被抑制,如图 6(c)所示。在相反的切换过程中,类似的现象也会出现,但是由于载流子的弛豫效应,其切换时间会更长。

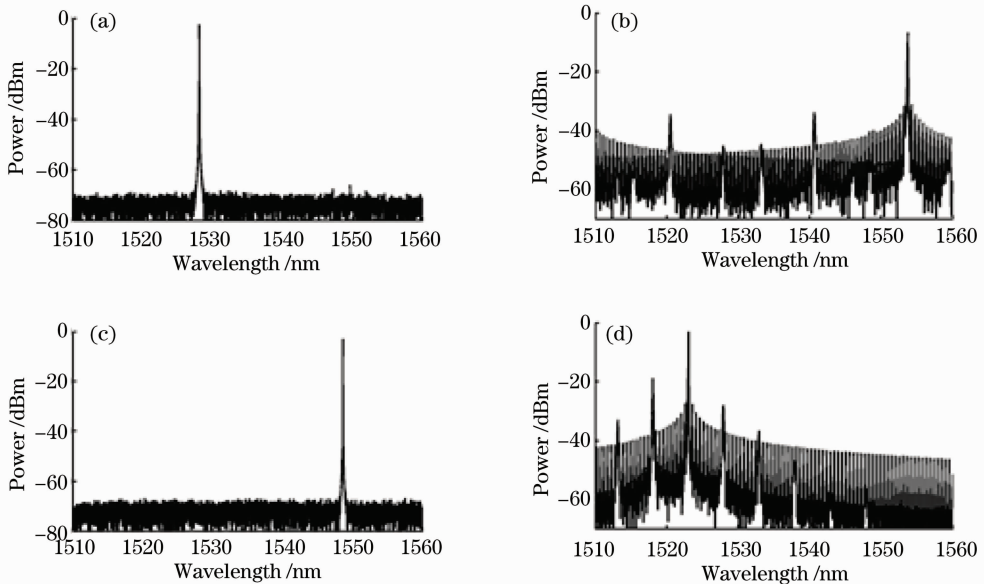


图6 波长切换过程中的瞬态光谱。(a) 1 ns; (b) 5 ns; (c) 21 ns; (d) 23 ns

Fig. 6 Transient spectra during wavelength switching. (a) 1 ns; (b) 5 ns; (c) 21 ns; (d) 23 ns

4 结 论

建立了一个新型时域模型用以研究微环耦合半导体激光器的大信号调制及波长切换性能。结果显示由于高Q值微环谐振器具有较高的能量存储能力,利用双微环耦合半导体激光器难以实现高速大信号直接调制。其波长切换时间主要受限于载流子寿命及多模竞争。本文中提出的激光器模型在对微环耦合半导体激光器的动态模拟中被证实是一个高效的模型,对指导微环耦合激光器的制作具有实际意义。

参 考 文 献

- 1 J. Buus, E. J. Murphy. Tunable laser in optical networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 5~11
- 2 Z. Bian, B. Liu, A. Shakouri. InP based passive ring resonator coupled lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(7): 859~865
- 3 B. Liu, A. Shakouri, J. E. Bowers. Passive micro-ring-resonator-coupled lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(22): 3561~3563
- 4 Y. A. Akulova, C. Schow, A. Karim *et al.*. Widely tunable electro-absorption modulated sampled grating DBR laser transmitter[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(6): 1349~1357
- 5 F. Delorme. Widely tunable 1.55 μm lasers for wavelength-division-multiplexed optical fiber communications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1706~1716
- 6 K. R. Hiremath, R. Stoffer, T. Kakitsuka *et al.*. All optical wavelength routing switch with monolithically integrated filter free tunable wavelength converters and an AWG [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4340~4345
- 7 Wang Xianyin, Ma Chunsheng, E Shulin *et al.*. Theoretical analysis for transmission characteristics of polymer microring

resonant wavelength multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 45~50

王现银, 马春生, 鄂书林等. 聚合物微环谐振波分复用器传输特性的理论分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 45~50

- 8 Zhang Bin, Mao Luhong, Xie Sheng *et al.*. A new spice model of silicon-based micro-ring resonator and application for optical filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 537~541
- 张彬, 毛陆虹, 谢生等. 一种基于Spice的硅基微环光学谐振器模型及其在光学滤波器中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 537~541
- 9 W. Li, W. P. Huang, X. Li. Digital filter approach for simulation of a complex integrated laser diode based on the traveling wave model[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(5): 473~480
- 10 Xie Sheng, Guo Weilian, Li Xianjie *et al.*. Design and fabrication of InP-based low threshold microring laser with unique unidirectional bistability operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302011
- 谢生, 郭维廉, 李献杰等. InP基低阈值单向双稳态工作微环激光器的设计与制备[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302011
- 11 S. F. Yu. Time domain travelling wave algorithms on the analysis of distributed feedback lasers [J]. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 2003, **150**(3): 266~272
- 12 Shan Jiang, Lei Dong, Ruikang Zhang *et al.*. A new approach for dynamic modeling of widely tunable GCSR lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(10): 960~963
- 13 Liu Xin, Kong Mei, Wang Xueping. Influence of loss on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 247~250
- 刘鑫, 孔梅, 王雪萍. 损耗对串联双微环谐振器滤波特性的影响[J]. *光学学报*, 2011, **40**(2): 247~250
- 14 M. L. Majewski, J. Barton, L. A. Coldren *et al.*. Directly intensity modulation in sampled-grating DBR lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 747~749
- 15 Han Xiyou, Zhang Jianing, Song Hongyan *et al.*. Influence of coupling conditions on time delay line characteristics of integrated waveguide microring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0613001
- 韩秀友, 张佳宁, 宋红妍等. 耦合条件对集成波导微环延时线性性能的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0613001