

文章编号: 1001-3806(2003)03-0229-04

环形谐振腔中结构特征参数的优化设计*

潘 炜¹ 张晓霞² 罗 斌¹ 吕鸿昌¹ 陈建国³

(¹西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都, 610031)

(²电子科技大学光电信息学院, 成都, 610054) (³四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 利用光纤环形腔半导体激光器(FRSLs)模型,同时考虑到增益介质端面剩余反射率、系统光路的耦合效率和耦合分光比的影响,对 FRSLs 速率方程进行理论计算,提出优化结构特征参数,调控环形腔损耗、阈值、外量子效率和输出功率的方案。给出了剩余反射率对最大腔增益和增益稳定度的制约关系。此外,从实验上证实阈值电流与分光比倒数的对数满足线性关系。理论分析结果较好地预测了器件的性能。

关键词: 环形腔; 光纤耦合器; 剩余反射率; 增益

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Optimal design configuration parameter for ring resonance cavity

Pan Wei¹, Zhang Xiaoxia², Luo Bin¹, Lü Hongchang¹, Chen Jianguo³

(¹Institute of Computers & Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

(²Department of Optoelectronic Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, 610054)

(³Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Influences on the FRSLs (fiber ring semiconductor lasers) properties of configuration parameter, i. e., splitting ratio and coupling coefficient and residual reflectivity of SOA (semiconductor optical amplifier), have been examined using a simple traveling wave rate equations model of FRSLs, which is used to calculate threshold current, quantum efficiency and output power. The analysis confirms that there is an optimum splitting ratio to trade off between the threshold current, quantum efficiency and output power, whose behavior of an almost linear increase in single pass gain, maximal cavity gain and its stability with decrease average residual reflectivity. The threshold current to logarithm of splitting ratio meets linear relation. The simulating results verify that theory can give more accurate explanation to experimental phenomena.

Key words: ring cavity; fiber coupler; residual reflectivity; gain

引 言

近期,随着全光波长转换技术和集成光学器件的广泛应用,有关光纤环形腔半导体激光器(FRSLs)的研究在一定程度上引起了人们的关注,各种复合型的 FRSLs 也相继出现^[1-3]。就其结构本身而言,由于半导体光放大器(SOA)芯片所固有的端面剩余反射率,以及 SOA 与光纤的耦合效率成为限制 FRSLs 增益的重要因素^[4]。同样,光纤耦合分光比的控制问题,都直接关系到环形腔的传输特性、互连耦合及综合调谐输出特性的优化。从实用

的角度来讲,无论是实验研究还是实际制备过程,两端面剩余反射率和耦合效率毕竟是难于控制和达到一致性的^[5]。与此相反,耦合分光比却是相对容易满足设计要求,尤其是可变光纤耦合器件的问世,使得这种在线调控分光比的设想成为现实。

迄今为止,有关光纤耦合分光比的控制问题,尚未得到仔细地描述。文中基于 FRSLs 的稳态行波速率方程^[6,7]和边界条件,针对不同的结构特征参数条件,具体分析了耦合分光比、耦合系数与阈值电流、外量子效率和输出功率的定量关系,探讨了 SOA 端面剩余反射率对单程腔增益、最大腔增益以及腔增益稳定度的制约作用。为 FRSLs 系统光路结构特征参数的配置,环形腔损耗、阈值、输出功率等物理量的有效控制,以及获得高质量的环形谐振腔的基本途径,提供了理论依据。

* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介:潘 炜,男,1959年12月出生。博士,教授。现从事半导体激光器与光通信、光电混合系统建模及仿真的研究。

收稿日期:2002-01-21;收到修改稿日期:2002-07-02

1 系统原理描述

FRSLs 系统光路的基本结构如图 1 所示, 它由增益介质 SOA、光纤耦合器(或波分复用器)、光隔离器、偏振控制器和光滤波器等构成。SOA 两端面镀有增透膜(AR), 有源区横截面积为 A 、腔长为 L 。设环形谐振腔中光信号沿 SOA 的 z 方向单向传播。值得注意的是, 光纤耦合器具有双重作用, 其一是正反馈作用, 对于 Y 型可变耦合器, 耦合分光比 k 定义为: 馈入光纤环的光功率相对于总光功率的百分比, 它与驻波腔出光腔镜的反射率十分类似^[6]; 其二是耦合输出作用, 部分光经它分束后输出。FRSLs 的损耗主要体现在芯片与成型光纤耦合之间, 不妨设芯片左右端面($z = 0$ 和 $z = L$)的耦合系数分别为 η_1, η_2 。测试系统包括 SOA 的驱动稳压电源, 以及输出端的 x - y 记录仪和光功率计。

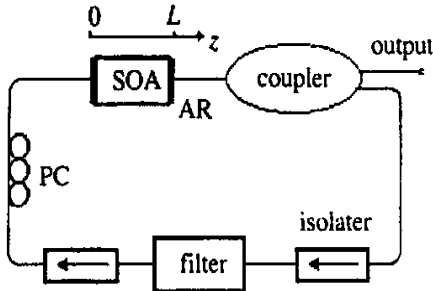


Fig. 1 Schematic diagram of system frame FRSLs

针对 FRSLs 模型, 假设增益介质横截面内载流子均匀分布, 模型可简化为 1 维问题。此外, 由于光隔离器的设置, 环形腔中的光波是单向传输。若考虑到杂质吸收和散射损耗, 忽略自发辐射复合的贡献, 则单模、行波 FRSLs 的稳态速率方程可表示为^[6,7]:

$$\frac{I}{eAL} = \frac{N(z)}{\tau} + a[N(z) - N_0]S(z) \quad (1a)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} = a\Gamma[N(z) - N_0]S(z) - \alpha S(z) \quad (1b)$$

方程描述了腔内载流子和光子的供给、产生和消耗的基本动力学过程。(1a)式各项分别是泵浦项、载流子复合项(自发辐射复合、俄歇复合和表面复合等)和受激复合项的贡献;(1b)式右边分别是受激发射光子和腔内损耗项的贡献。式中, $S(z)$ 和 $N(z)$ 反映了有源区内光子流密度、载流子密度的纵向分布规律, e 是电子电荷, v_g 是群速度, τ 是载流子寿命, Γ 是限制因子, I 是注入电流(作为均匀注入处理), α 是分布损耗系数。增益系数采用线性函数 $g(z) = a[N(z) - N_0]$, 其中 a 是微分增益系数,

N_0 是透明载流子数密度。

根据图 1, 边界条件满足 $S(0) = S(L)k\eta_1\eta_2 \times (1 - R_1)(1 - R_2)$, 其中 R_1 和 R_2 是端面剩余反射率。若将器件的插入损耗一并纳入耦合系数中, 则光子流密度 $S(L)$ 的纵向分布满足:

$$S(L) = \frac{G(1 - Y)}{a\alpha\Gamma[1 - Yk\eta_1\eta_2(1 - R_1)(1 - R_2)]} \quad (2)$$

式中,

$$Y = \exp\left\{-\frac{\alpha[GL + \ln[k\eta_1\eta_2(1 - R_1)(1 - R_2)]]}{G + \alpha}\right\} \quad (3)$$

显然, $S(L)$ 不仅与增益介质的结构参数有关, 还取决于端面反射率、分光比、耦合系数等参数。这里, 小信号净增益系数为:

$$G = a\Gamma(N_p - N_0) - \alpha \quad (4)$$

$$\text{注入载流子密度 } N_p: N_p = I\tau/eAL \quad (5)$$

由(2)式可确定阈值电流、输出功率与结构特征参数之间的依赖关系。FRSLs 输出功率为:

$$P = h\nu AS(L)\eta_2(1 - k)(1 - R_2) \quad (6)$$

式中, $h\nu$ 是光子能量。同样, 按上述直接而繁琐地推导, 也可推出载流子密度的解析关系。

2 模拟分析

2.1 耦合分光比与激射阈值的关系

取模拟参数值 $A = 1\mu\text{m}^2$, $L = 350\mu\text{m}$, $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$, $N_0 = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $R = 10^{-4}$, $\Gamma = 0.3$, $\tau = 2.2\text{ns}$ 和 $\alpha = 15\text{cm}^{-1}$ 。FRSLs 的 P - I 特性曲线如图 2 所示, 耦合分光比对激射阈值、输出

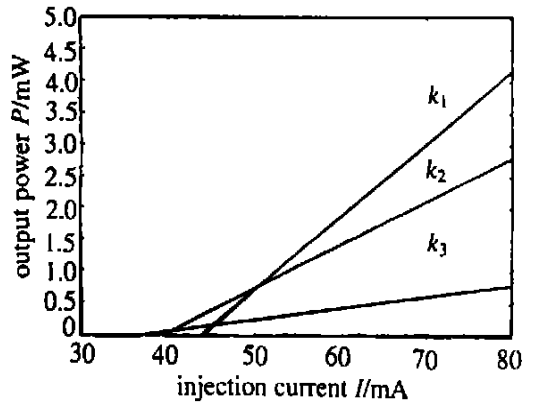


Fig. 2 The P - I curve of FRSLs $k_i = 0.3, 0.6$ and $0.9 (i = 1, 2, 3)$

功率和外量子效率等物理量均有不同的影响。阈值电流会随着分光比的增大而降低, 但外量子效率却随之降低, 这是由于分光比增加, 相应的馈入环形腔的反馈量也增加, 分束作用又将导致输出功率的降

低。即可用分光比来调控 FRSLs 的阈值特性。实验中,分别采用分光比为 50: 50, 25: 75 和 10: 90 的 SM1×2 型单模光纤耦合器,通过反馈支路的交叉使用,得到 $k=0.1, 0.25, 0.5, 0.75$ 和 0.9 的 5 种分光比。图 3a 给出了 FRSLs 阈值电流与分光比倒数的对数的实验曲线,图中的星点为实测数据。图 3b 为实验数据的误差分析棒图,实线是利用多项式对数据点进行拟合后的结果。结果表明,阈值电流与分光比倒数的对数满足线性关系,这与理论分析结果完全吻合。

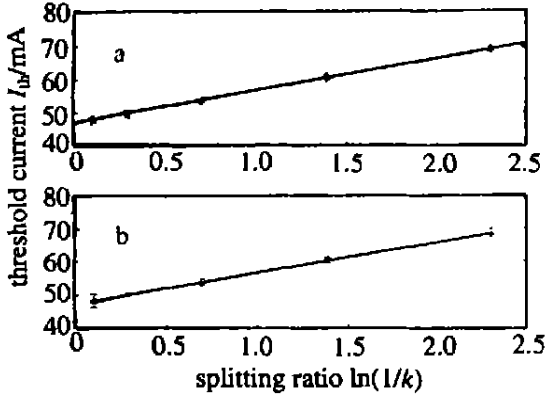


Fig. 3 Threshold current vs. logarithmic of splitting ratio
a—experimental result b—draw up curve

2.2 端面剩余反射率的影响

图 4 比较了端面反射率对腔增益波动量的影响,而单程信号增益与端面反射率几何平均值

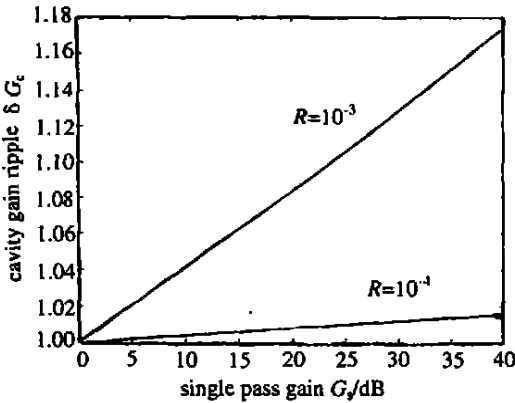


Fig. 4 Cavity gain ripple vs. for different reflectivity
a— $R=10^{-3}$ b— $R=10^{-4}$

$\sqrt{R_1 R_2}$ 的依赖关系如图 5 所示。不难发现,对于确定的单程增益,端面反射率越低腔增益的波动量越小。端面反射率越低,满足行波条件的单程增益就越大(倘若要获得大于 25dB 单程增益,则要求 $\sqrt{R_1 R_2} \leq 5.4 \times 10^{-4}$,事实上,这也是 SOA 工作于行波状态的一个重要判据)。同样,端面反射率的大小直接制约着 SOA 的最大腔增益,如图 6 所示,降

低端面反射率,即降低端面反射率的几何平均值,可提高 SOA 的最大腔增益,这意味着对于相同的信号增益来说其 3dB 带宽将得到增加。问题是,腔增益受到端面反射率的制约,必然导致输出功率受制约。进而,调谐范围也会受端面反射率的制约(使得调谐的连续性也受到制约^[4])。所以,镀制极低反射率的增透膜是实现最大平坦型高增益 SOA 的关键所在,它直接影响着 FRSLs 的调谐范围和输出功率。

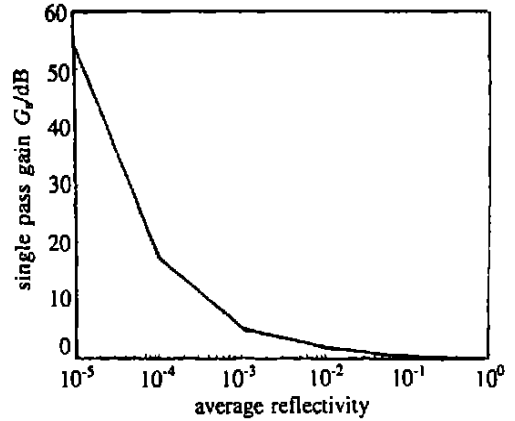


Fig. 5 Single pass gain vs. average reflectivity

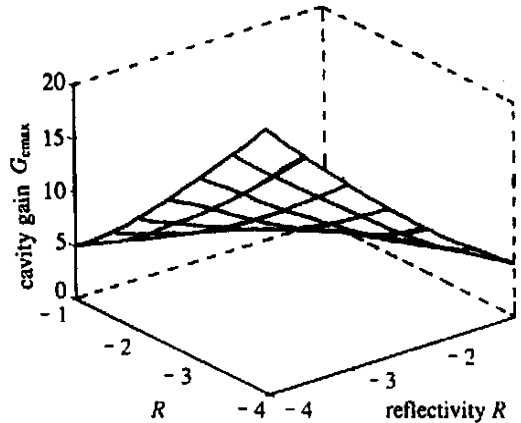


Fig. 6 Maximal cavity gain vs. reflectivity

2.3 分光比、耦合系数的优化

图 7 分别以耦合系数、分光比为参变量,比较了

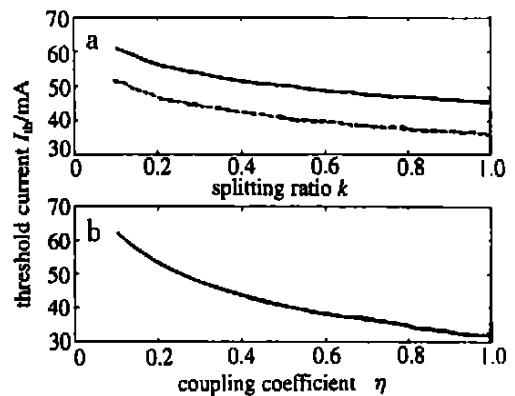


Fig. 7 Threshold current vs. splitting ratio and coupling coefficient
a—solid line $\eta=0.25$, dashed line $\eta=0.5$ b— $k=0.5$

FRSLs 的阈值电流随分光比、耦合系数的变化规律。相比之下,耦合效率对阈值的影响更为明显,亦即增加分光比和提高耦合系数,减少分布损耗(包括环形谐振腔中各器件的插入损耗、连接损耗等)有利于降低激射阈值,而提高耦合效率对降低激射阈值更为重要。同样,输出功率随耦合效率的变化规律如图 8 所示,不难发现,除了提高耦合效率可增加输

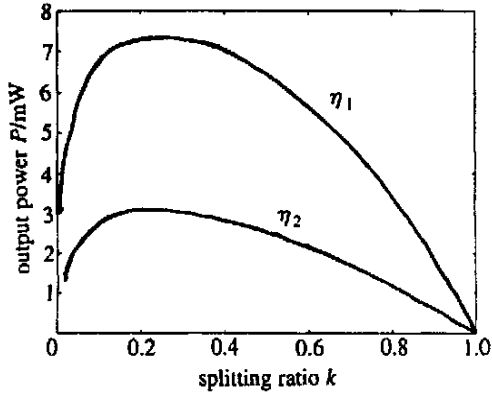


Fig. 8 Output power vs. splitting ratio for different coupling coefficient $\eta_i = 0.5, 0.25 (i = 1, 2)$

输出功率外,曲线的峰值右移,两翼得到拓宽,展宽了分光比的有效控制区域。

(上接第 228 页)

表 1 列出了不同剪切量下的染料激光波面的计算

Table 1 Wavefront of dye laser in different shearing quantity

x view shearing quantity	y view shearing quantity	power	defocus			in focus	
			PV	RMS	curve	PV	RMS
0.1343	0.1216	3.458	7.543	1.745	12.008	1.682	0.306
0.1567	0.1388	3.443	7.408	1.728	12.061	1.366	0.243
0.1865	0.1569	3.475	7.522	1.748	11.949	1.510	0.274
0.2071	0.1778	3.484	7.604	1.759	11.919	1.715	0.317
0.2258	0.1978	3.465	7.535	1.748	11.984	1.652	0.304
	average	3.476	7.536	1.750	11.946	1.546	0.281
	dispersion	0.024	0.062	0.013	0.081	0.098	0.021

3 结论

利用三平板剪切干涉仪对激光器出射波面质量进行检测。通过编制的专家辅助软件系统,将光机型的三平板剪切干涉仪配置了实时图像采集、处理系统,由计算机计算波面的 PV 值及 RMS 值,给出了所测波面的 2 维和 3 维波面图。对染料激光器激光波面进行测试,并对重复性进行了考核,实验证明

3 结论

综上所述,针对一定的注入电流,过大或过小的分光比,都无法满足低阈值电流和高输出功率要求。尤其是在低分光比值区域,耦合系数对阈值的影响更为明显,提高耦合效率,更有利于分光比的控制。同样,SOA 芯片端面剩余反射率越低,腔增益波动量越小,满足行波条件的单程增益越大。与此相关的是,耦合效率也受端面剩余反射率的制约,这些都直接影响 FRSLs 的线宽压缩和波长连续调谐特性。上述结果对于其它类型的环形腔、波分复用器件的参数设计也有一定的借鉴作用。

参考文献

- [1] Xu C Q, Shinozaki K, Okayama H *et al.* A P L, 1996, 69(15): 2154.
- [2] Zhou D, Prucnal P R, Glesk I. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(6): 781.
- [3] Papakyriakopoulos T, Vlachos K, Hatziefremidis A *et al.* Opt Lett, 1999, 24(17): 1209.
- [4] 潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 *et al.* 光学学报, 2001, 21(8): 975.
- [5] 潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 *et al.* 激光技术, 2001, 25(6): 445.
- [6] Li H Ch, Luo B, Pan W *et al.* Appl Opt, 1999, 38(9): 1764.
- [7] 潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 *et al.* 光电子·激光, 2001, 12(5): 446.

结果,从表中可以看出,复原的原始波面相同。由以上计算结果表明,波面重复性精度为 0.021λ (RMS)。

该方法操作方便,计算的精度高、重复性好。

参考文献

- [1] 刘晓军. 光学精密工程, 1999, 7(3): 103~ 108.
- [2] 史红民. 激光杂志, 1999, 20(4): 6~ 8.
- [3] 赵长明. 激光技术, 2000, 24(6): 341~ 344.
- [4] 徐文东. 中国激光, 1999, 26(11): 982~ 986.
- [5] 许晓军, 陆启生. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 269~ 272.
- [6] Bug H V N. Appl Opt, 1997, 36(13): 623~ 629.