

文章编号: 0253-2239(2001)08-0975-05

端面反射率的波长特性对外腔半导体激光器 调谐范围的影响*

潘 炜 张晓霞 罗 斌 吕鸿昌

(西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都 610031)

陈建国

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘要: 端面镀增透膜的激光二极管构成的光栅外腔激光器(ECLD)中, 考虑到镀膜端面剩余反射率对波长的依赖关系以后, 利用等效腔法导出了该激光器阈值载流子密度随波长变化的解析表达式, 以此为出发点, 讨论了增透膜反射率极小位置对调谐范围的影响。结果表明, 除了增大剩余反射率带宽和降低剩余反射率能够提高调谐范围这一明显结论之外, 在镀膜工艺确定的情况下, 即假定剩余反射率带宽和剩余反射率极小值变化不大时, 通过控制剩余反射率极小值所对应的波长相对于镀膜前增益峰的偏移量, 可进一步拓宽波长调谐范围。

关键词: 外腔半导体激光器; 调谐范围; 反射率; 带宽

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

1 引 言

多年以来, 由于外腔半导体激光器具有线宽窄、波长调谐范围宽等优点, 一直受到人们的关注^[1-3]。降低激光二极管面向外腔端面的反射率是改善外腔半导体激光器性能的重要手段之一, 对于改善半导体光放大器(SLAs)、超辐射二极管(LEDs)和功率激光器等光电器件的性能也是一种十分有效的技术手段。通常, 反射率的降低是通过在激光二极管端面镀制增透膜来实现的。这种镀增透膜后的激光二极管称为 ARCD(AR-coated diode)^[3]。在过去的研究中, 为了处理问题方便, 常将剩余反射率作为常数对待, 但是, 实际上端面剩余反射率是与波长有关的, 且其带宽也是有限的^[4,5]。所以, 为了更好地描述外腔半导体激光器的波长调谐特性, 有必要进一步考察剩余反射率波长特性的影响。

本文从理论上指出, 除了外腔耦合效率、光栅衍射效率和增益谱宽随载流子密度变化外, 外腔半导体激光器阈值载流子密度对波长的依赖性, 以及 ARCD 参考载流子密度(用于表征 ARCD 中平衡增益和损耗时所需的载流子密度, 亦即载流子密度的

上限)的大小都是影响外腔半导体激光器波长调谐范围的重要因素, 而镀膜端面剩余反射率的谱特性对这两者又都有很大的影响。因为只有当选定波长的阈值载流子密度低于单个激光二极管的参考载流子密度时, 外腔半导体激光器才可能在该波长处振荡, 由此可得出外腔半导体激光器的波长调谐范围(WTR)。通过考察反映剩余反射率波长特性的基本参数(如剩余反射率的大小、带宽以及极小波长位置等)的变化, 提出采用多层镀膜工艺, 增大剩余反射率带宽, 以及控制镀膜后剩余反射率极小波长的位置, 提高激光二极管的参考载流子密度, 来拓宽外腔半导体激光器的波长调谐范围。

2 理论分析

光栅外腔半导体激光器由管芯长度为 L_d 的激光二极管和光栅构成。设外腔长度为 L_c , 激光二极管后端面面向光栅并镀制增透膜, 其镀膜前后的反射率分别为 R_1 和 R , 前端面为激光器的输出端, 反射率为 R_2 , 光栅的反射率为 R_3 , 以上各项对应的反射系数分别为 r_1 、 r 、 r_2 和 r_3 。

实验观察与数值模拟已经表明, 端面剩余反射系数和波长有关, 且带宽有限^[4-6]。通常的剩余反射系数存在一极小值 r_0 , 设其对应的波长为 λ_0 。在

* 铁道部科技发展计划(97×21)和四川省青年科技基金资助课题。

所关心的波长范围内,远离波长 λ_0 时,剩余反射系数会逐渐增大,并趋于某一值 r_i ($r_i < r_1$)。为简便起见,根据这一事实,直接引用文献[3]关于端面剩余反射系数的描述方式,将镀膜后的反射系数写为

$$r(\lambda) = r_0 \exp \left\{ \left[1 - \exp \left(- \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{D^2} \right) \right] \ln \left(\frac{r_i}{r_0} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中, D 是和反射系数带宽相关的参数。利用等效腔法^[7],可以求得由激光二极管后端面和光栅构成复合腔后的等效反射系数

$$r_{\text{eff}}(\lambda) = \frac{r(\lambda) - r_3 \exp(-i4\pi L_c/\lambda)}{1 - r(\lambda)r_3 \exp(-i4\pi L_c/\lambda)}, \quad (2)$$

则复合腔等效反射系数的模为

$$|r_{\text{eff}}(\lambda)| = \frac{1}{1 - r^2 r_3^2} \left\{ \left[\frac{(1 + r_3^2)(1 + r^2)}{2} \right]^2 - \left[\frac{(1 - r_3^2)(1 - r^2)}{2} + 2rr_3 \cos(4\pi L_c/\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

于是,外腔半导体激光器的损耗系数可表示为

$$\gamma_e = \alpha - \frac{1}{L_d} \ln [r_2 |r_{\text{eff}}(\lambda)|]. \quad (4)$$

式中, α 为分布损耗系数。在洛伦兹近似下,增益系数随波长的变化为

$$G(\lambda) = a\Gamma \left[\frac{N}{1 + (\lambda - \lambda_g)^2/Q^2} - N_0 \right], \quad (5)$$

式中, λ_g 为增益峰值波长, N 为载流子密度, N_0 为透明载流子密度, a 为微分增益系数, Γ 为光限制因子, Q 为增益曲线的半值全宽(FWHM)。通常, λ_g 随 N 的增加而向短波长方向移动,当 N 在一定的范围内变化时,可以近似地表示为线性关系^[8]。若以镀膜前激光二极管阈值载流子密度 N_{t0} 所对应的增益峰值波长 λ_{g0} 作为参考点,则 λ_g 可写成

$$\lambda_g = \lambda_{g0} + k(N - N_{t0}), \quad (6)$$

其中 k 为比例常数,而 N_{t0} 的表达式为

$$N_{t0} = \frac{\alpha - [\ln(r_2 r_1)]/L_d}{a\Gamma} + N_0. \quad (7)$$

在阈值条件下,有

$$G(\lambda) = \gamma_e, \quad (8)$$

$$\frac{4\pi n L_d}{\lambda} + \delta = 2m\pi, \quad (9)$$

式中, m 为激光二极管的等效折射率, m 取整数, δ 为复合腔等效反射系数 $r_{\text{eff}}(\lambda)$ 的幅角。

由于相位条件(9)式的约束,当 L_d 和 L_c 固定不变时,振荡波长只能取一系列分离值。但是,为保证波长调谐的连续性,外腔长度应能微调。在此情形下,计算等效反射系数 $r_{\text{eff}}(\lambda)$ 时,外腔长度就不能作为独立的量,而应同时考虑到它随不同波长变化时的调整因素。本文将针对外腔长度可以微调的一般情况进行讨论,利用(9)式得到外腔长度与波长的关系后,等效反射系数 $r_{\text{eff}}(\lambda)$ 的模可重新写成为

$$|r_{\text{eff}}(r)| = \frac{r_3^2 - r^2}{[r_3(1 - r^2)^2 - r^2(1 - r_3^2)^2 \sin^2(4\pi n L_d/\lambda)]^{1/2} - r(1 - r_3^2) \cos(4\pi n L_d/\lambda)}. \quad (10)$$

从(4)式~(8)式可以推出,外腔半导体激光器被调谐在选定的波长振荡时所需的阈值载流子密度

$$N_{\text{te}}(\lambda) = \frac{2kW + Q^2/M_e - [(2kW + Q^2/M_e)^2 - 4k^2(Q^2 + W^2)]^{1/2}}{2k^2}, \quad (11)$$

其中

$$W = (\lambda - \lambda_{g0}) + kN_{t0}, \quad (12)$$

$$M_e = \frac{\gamma_e}{a\Gamma} + N_0. \quad (13)$$

对于外腔半导体激光器而言,仅当选定波长处的阈值载流子密度低于单个激光二极管的参考载流子密度时,它才可能在该波长处振荡。为了求外腔半导体激光器的波长调谐范围,有必要先知道激光二极管在其端面镀制增透膜后的参考载流子密度 N_{ts} , 或者说是载流子密度的上限^[3],它反映了 ARCD 平

衡增益和损耗时所需的载流子密度,即便是构成外腔后,外腔半导体激光器的阈值载流子密度也应低于参考载流子密度这一上限。

用类似的分析方法,将(7)式中的 r_{eff} 用 $r(\lambda)$ 替换,便可得到激光二极管在不同波长振荡时所需的载流子密度解析式。当满足 $N_{\text{te}} \leq N_{ts}$ 时,对比 $N_{\text{te}}(\lambda)$ 和 N_{ts} ,便可确定出外腔半导体激光器的波长调谐范围。

3 分析与讨论

在下面的模拟计算中,除特别指明外,将采用下列参数

$$\begin{aligned} \alpha &= 20 \text{ cm}^{-1}, & L_d &= 0.02 \text{ cm}, \\ a &= 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2, & n &= 4.16, \\ k &= -1 \times 10^{-17} \text{ nm} \cdot \text{cm}^3, & \lambda_{g0} &= 1310 \text{ nm}, \\ N_0 &= 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, & Q &= 40 \text{ nm}, \\ D &= 15 \text{ nm}, & \Gamma &= 0.3, \\ r_0 &= 10^{-2}, & r_i &= 0.1, \end{aligned}$$

$$r_1 = r_2 = 0.557, \quad r_3 = 0.316.$$

图1分别给出了外腔半导体激光器的阈值载流子密度 $N_{te}(\lambda)$, 以及 ARCD 在不同波长振荡时所需的载流子密度 $N_a(\lambda)$ 的理论模拟曲线。其中,水平线代表 ARCD 的参考载流子密度 N_{ts} , 而 W_a 和 W_b 分别是曲线 $N_{te}(\lambda)$ 和 N_{ts} 的两个内侧交点,它们之间的 $N_{ts}(\lambda)$ 总是低于代表 N_{ts} 的水平线,因此,从 $W_a - W_b$ 就可以确定出外腔半导体激光器的波长连续调谐范围。

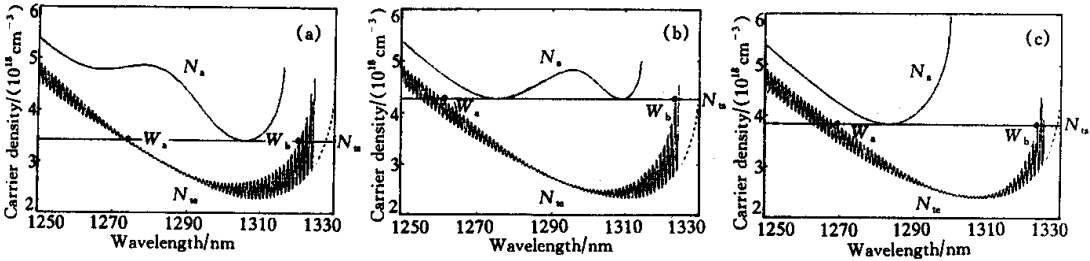


Fig. 1 Variation of $N_{te}(\lambda)$ and $N_a(\lambda)$ with wavelength λ for different minimum wavelength λ_0 . (a) $\lambda_0 = 1282 \text{ nm}$, (b) $\lambda_0 = 1292 \text{ nm}$, (c) $\lambda_0 = 1302 \text{ nm}$, reflectivity bandwidth $D = 15 \text{ nm}$

需要说明的是,在 W_a 左侧和 W_b 右侧的某些波长处,阈值载流子密度 $N_{te}(\lambda)$ 也低于 N_{ts} ,也是可以调谐振荡的。但是,由于受到激光二极管内腔的影响, $N_{te}(\lambda)$ 随着波长发生周期性的振荡,而且,越往两边这种振荡就越剧烈,甚至在某些波长处 $N_{te}(\lambda)$ 将趋于无穷大,如图 W_b 中右侧一段区域,我们只能用虚线画出这些波长与激光二极管内腔共振时的 $N_{te}(\lambda)$ 曲线。

由图1可见,剩余反射系数极小波长 λ_0 的位置,同时对 $N_{te}(\lambda)$ 和 N_{ts} 产生影响,且对于 N_{ts} 的影响更大,进而也说明了反射系数极小值位置直接影响到外腔半导体激光器的调谐范围。在图1(b)中,曲线 $N_a(\lambda)$ 有两个大小相等的极小值,由此决定的 N_{ts} 是最大的,图中的 $\lambda_0 = 1292 \text{ nm}$ 是针对当前计算参数优化的结果,可以看出,严格控制 λ_0 位置将有助于提高 N_{ts} , 增大波长调谐范围。同时,图1(a)和图1(c)分别计算了 λ_0 取其它值的情形,当 λ_0 在 1292 nm 的基础之上分别改变 $\pm 10 \text{ nm}$ 时,无论波长位置向左还是向右偏移,曲线 $N_a(\lambda)$ 就只有一个极小值, N_{ts} 也有不同程度的减小。比较图1的模拟结果可见,不同的 λ_0 对 $N_{te}(\lambda)$ 的影响,主要体现在 $N_{te}(\lambda)$ 周期性振荡强弱的波长位置随 λ_0 有一定的变化,而 $N_{te}(\lambda)$ 的缓变部分,或者说 $N_{te}(\lambda)$ 的外包

络形状变化不明显,这是因为光栅反射率比镀膜端面剩余反射率大得多,即近似满足通常所说的强反馈条件。

在图2和图3中,分别以剩余反射率的极小值 $R_0 = |r_0|^2$ 和其带宽相关参数 D 作为参变量,分析了外腔半导体激光器波长调谐范围随波长偏移量 $\lambda_0 - \lambda_{g0}$ 的变化曲线。这里的波长偏移量定义为,镀膜后的剩余反射率极小波长 λ_0 与镀膜前增益峰值波长 λ_{g0} 之差,图中调谐范围已对 Q 进行了归一化处理。为清楚起见,结合实验和文献报道结果,在图2中选择了较低的 R_0 值,分别为 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} ,而在图3中分别取带宽相关参数 D 为 15 nm 、 30 nm 和 45 nm 。

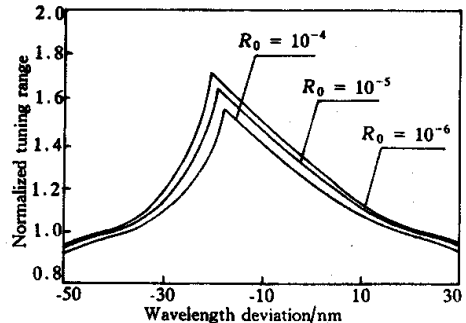


Fig. 2 Variation of the normalized WTR with the deviation ($\lambda_0 - \lambda_{g0}$) for different minimum reflectivity R_0

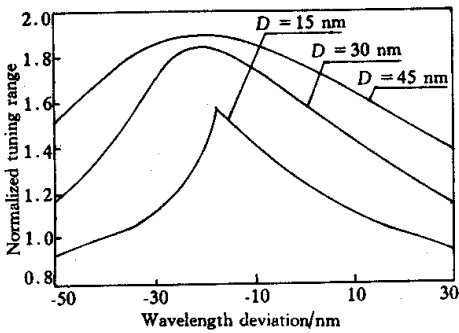


Fig. 3 Variation of the normalized WTR with the deviation ($\lambda_0 - \lambda_{g0}$) for different reflectivity bandwidth D

模拟结果表明：

1) 对于一定的波长偏移量,外腔半导体激光器的波长调谐范围有极大值存在。图中出现调谐范围极大值处,正对应于图 1(b)中 $N_x(\lambda)$ 有两个极小值的情形,尤其是剩余反射率带宽较窄时(通常,单层膜的谱宽并不是很宽),剩余反射率极小波长的位置变化会明显地影响到外腔半导体激光器调谐范围,这完全不同于剩余反射率作为常数处理时的情形。

2) 减小 r_0 或增大 D ,都将使得调谐范围变大。在极低的剩余反射率情形,减小 r_0 时,曲线的形状变化不大,当剩余反射率极小值变化达到两个量级时,仍然表现为左边陡峭,右边相对平缓,为达到理想的调谐范围要求,波长偏移量就必须控制在相对较窄的范围内。而增大 D 时,曲线变得越来越平坦,此时对波长偏移量的控制要求相对放宽。

3) 若剩余反射率极小值达到 10^{-4} 量级甚至更低时,由于反射率带宽的限制,继续追求更低的反射率极小值,既增加了工艺上的难度,又无十分明显的效果。与此相反,若严格控制剩余反射率极小波长的位置,则更有利于增加波长调谐范围。

上述模拟结果与外腔半导体激光器获得稳定纵模和宽调谐范围的条件(R_0 低于 10^{-4} , D 大于 30 nm)相吻合。

此外,近期文献报道获得 3.5×10^{-5} 的最小反射率,以及反射率低于 10^{-3} 、带宽为 140 nm 和反射率低于 10^{-4} 、带宽为 31 nm 的实验结果,而采用多层镀膜后获得 3×10^{-6} 的最小反射率,以及反射率低于 5×10^{-5} 、带宽为 30 nm 结果^[9]。这充分表明,实施主动监控法^[4,10],采用多层镀膜工艺以增大剩余反射系数带宽是实际工作中应优先采取的措施^[11]。在剩余反射率大小和剩余反射率带宽指标确定的情形,应以控制好波长偏移量作为前提条件,进一步降低有效剩余反射率来更好地增加外腔半导

体激光器的波长调谐范围。

结论 研究表明,增透膜端面反射率的波长特性参数对外腔半导体激光器波长调谐范围有着重要的影响。

在实际应用中,一方面应通过优化膜系设计,采用多层镀膜的方法,尽可能降低剩余反射率,增大剩余反射率带宽;另一方面还应严格控制镀膜后剩余反射率极小波长的位置,提高激光二极管的参考载流子密度,达到进一步拓宽外腔半导体激光器的波长调谐范围的目的。

参 考 文 献

- [1] Sun H, Menhart S, Adams A. Calculation of spectral linewidth reduction of external-cavity strong-feedback semiconductor lasers. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(21):4771~4775
- [2] Zhou X, Chen J, Lu Y *et al.*. Analytical characterization of grating-tuned external-cavity semiconductor lasers. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18):4138~4141
- [3] Zhou X, Chen J, Luo B *et al.*. Graphic analysis of the effective reflectivity of antireflection-coated films on diode facets. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(12):2385~2389
- [4] Luo B, Wu L, Chen J *et al.*. Determination of wavelength dependence of the reflectivity at AR coated diode facets. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(11):1279~1281
- [5] Merritt S A, Dauga C, Fox S *et al.*. Measurement of the facet modal reflectivity spectrum in high quality semiconductor traveling wave amplifiers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3):430~433
- [6] Saiton T, Mukai T, Mikami O. Theoretical analysis and Fabrication of Antireflection. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(2):288~293
- [7] Kakiuchida H, Ohtsubo J. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(9):2087~2097
- [8] Wang J, Chen J, Hao Y *et al.*. Additional wavelength shift of peak gain due to inhomogeneous distributions of carriers inside semiconductor lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(10):1171~1173
- [9] Lee J, Tanaka T, Uchiyama S *et al.*. Broadband double-layer antireflection coating for semiconductor laser amplifiers. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(1A/B):L52~L54
- [10] Chen J, Li D, Lu Y *et al.*. Experimental and theoretical studies on monitored signals from semiconductor diodes undergoing antireflection-coatings. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(31):4554~4559
- [11] 罗 斌,吕鸿昌,卢玉村等. 双层减反射膜镀制半导体光放大器. *真空科学与技术学报*, 1998, **18**(1):33~37

Effect of Wavelength Dependence of Reflectivity at AR-Coating Facets on Tuning Range of External-Cavity Semiconductor Lasers

Pan Wei Zhang Xiaoxia Luo Bin Lu Hongchang
(*Department of Computers and Communications Engineering ,
Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031*)

Chen Jianguo
(*Department of Opto-Electronics , Sichuan University , Chengdu 610064*)
(Received 24 July 2000 ; revised 6 December 2000)

Abstract : Wavelength dependence of reflectivity at AR-coating facets has been taken into account to study the wavelength tuning range of the external-cavity semiconductor lasers. By applying the equivalent cavity method , an analytical expression for the threshold carrier density varied with wavelength has been derived. Analysis shows that the deviation between the wavelength of minimum reflectivity at the AR-coated facets and that of the gain peak before AR-coating is a key parameter to increase wavelength tuning range.

Key words : external-cavity semiconductor laser ; tuning range ; reflectivity ; broadband