

文章编号: 1001-3806(2009)02-0198-03

H 参量简化模型的调谐特性与双稳特性的关系

黄立平^{1,2}, 潘炜^{2*}

(1. 青海民族学院 电子工程与信息科学系, 西宁 810007; 2. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了研究光栅调谐外腔半导体激光器的调谐特性和双稳特性之间的关系, 采用建立 H 参量简化模型、以载流子密度表征阈值特性的方法, 得到了以 H 参量表达的调谐范围解析式, 对反共振所需剩余反射率的上限进行了理论分析, 数值模拟了激光出射端反射系数、剩余反射率对调谐范围和双稳环环宽的影响, 得到了环宽最大值的位置。结果表明, H 参量简化模型能够阐明光栅调谐外腔半导体激光器的调谐特性与双稳特性的关系。

关键词: 激光技术; H 参量简化模型; 载流子密度; 调谐范围; 双稳环

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Relation between tuning characteristics and bistability characteristics of H parameter simplified model

HUANG Li-ping^{1,2}, PAN Wei²

(1. Department of Electronic Engineering and Information Science, Qinghai University for Nationalities, Xining 810007, China; 2. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the relation between tuning characteristics and bistability characteristics, after establishing H parameter simplified model and taking carrier density for the characteristic of threshold, an analytical expression for the tuning range was derived. Then the maximum residual reflectivity for anti-resonance was analyzed, the effect of reflectivity in laser output terminal and residual reflectivity on tuning range and hysteresis loop width was simulated, and the maximum hysteresis loop width was obtained. Based on the model, the relation between tuning and bistability characteristics can be clarified.

Key words: laser technique; H parameter simplified model; carrier density; tuning range; hysteresis loop

引言

自1996年提出了强反馈外腔半导体激光器的简化模型并得到其稳定极限条件以来^[1], 国内外学者的研究大多以 H 参量为1的光栅调谐外腔半导体激光器 (grating-tuned external cavity semiconductor laser, ECLD) 简化模型为对象, 讨论其损耗系数、剩余反射率、展宽因子对调谐范围的影响, 以及在 H 参量不变的情况下确定双稳环的环宽^[2-5]。至今得出 ECLD 调谐范围的方法有两种, 一是直接定义^[2], 二是由振荡条件推出单模最大调谐范围^[6], 它们都是在不考虑 H 变化的基础上得到的。然而 ECLD 实现连续调谐时光栅反射波长偏离原增益峰值波长是调谐必经的, 理论

研究也涉及模式频率改变的情形^[7], 虽然不少研究都涉及到振荡频率偏离增益峰值的情况^[3,7-8], 但未见将 H 参量作为变量来讨论其对调谐范围的影响的报道。现在的研究发现由于 ECLD 具有极窄的线宽和良好的波长可重复性, 在线宽、模式以及波长稳定性等方面均比以往的多波长激光器优越^[9], 所以, 需要了解振荡波长偏离增益峰值时的调谐特性和双稳特性。

作者将 H 参量作为一个与波长有关的量, 构建了 ECLD 以 H 表达的简化模型, 讨论 ECLD 的 H 简化模型中各种载流子密度的相互关系, 导出调谐范围的理论表达式, 并讨论影响调谐范围的因素和调谐特性与双稳特性的关系。

1 理论分析

ECLD 由管芯长度为 L_0 的激光二极管和光栅构成, 镀减反膜后的二极管 (AR-coated diode, ARCD)^[3] 其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 , 相应的反射系数分别为 r_2, r_3 ; ARCD 的后端面向光栅, 采用等效腔体的3镜面法把外腔无源区的损耗和 ARCD 镀膜端面剩余反射率特性参量对

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057; 90201011); 教育部科学技术研究重点资助项目 (105148); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20070613058)

作者简介: 黄立平 (1963-), 男, 副教授, 主要从事光通信与光器件相关技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wpan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2007-12-20; 收到修改稿日期: 2008-01-16

ECLD 的影响归结到 ARCD 后端面的剩余反射率 R 和反射系数 r 上。单管参考载流子密度 N_{th} 和阈值增益 $F(\lambda)$ 仍采用文献[2]中所提供的普遍表达式。

由于通过对注入电流的调谐,可将出射光束的中心波长很好地控制在某些需要的波长上^[9];也可在适当的范围内调整外腔的长度,改变复合腔的模谱,以实现不同波长的调谐精度。所以,实际上并不能保证在任何电流下, λ_g 都能与某一纵模的共振波长 λ_M 相重合, H 参量可表示为^[4]:

$$H = 1 + (\lambda - \lambda_g)^2 / Q^2 \quad (1)$$

式中, Q 是增益曲线的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM), λ_g 是与 N_{th} 相应的增益峰值波长。

参考载流子密度 N_r 在原来定义^[2,4] 的基础上考虑 H 参量后,阈值载流子密度为:

$$N(\lambda) = H \times \{N_0 + [\ln F(\lambda) + \gamma_e L_d] / (a \Gamma L_d)\} \quad (2)$$

式中, γ_e 为损耗系数。可以证明当 $F(\lambda)$ 为极小值时,对应共振态的阈值载流子密度 $N_M(\lambda)$,当 $F(\lambda)$ 为极大值时,对应于反共振态时的阈值载流子密度 $N_m(\lambda)$:

$$N_{M,m} = H \times \left\{ N_0 + \frac{1}{a \Gamma} \left[\frac{1}{L_d} \ln \left(\frac{1 \pm r r_3}{r_3 r_2 \pm r r_2} \right) + \gamma_e \right] \right\} \quad (3)$$

式中,“+”对应于 $N_M(\lambda)$,“−”对应于 $N_m(\lambda)$ 。可导出用波长表示的共振态的最大调谐范围 $\Delta\lambda_M$ 和反共振态的最小调谐范围 $\Delta\lambda_m$:

$$\Delta\lambda_{M,m} = 2 |\lambda_{M,m} - \lambda_g| = 2Q \times \left\{ \frac{\ln(r_3 \pm r) - \ln[r(1 \pm r_3 r)]}{a \Gamma L_d N_0 + \gamma_e L_d + \ln(1 \pm r_3 r) - \ln(r_2 r_3 \pm r r_2)} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式中,“+”对应于 $\Delta\lambda_M$ 、共振波长 λ_M ;“−”对应于 $\Delta\lambda_m$ 、反共振波长 λ_m 。

由(4)式可自然得到文献[2]中推出的实现 ECLD 反共振激射所需剩余反射系数的上限:

$$r_{rq} = 1/r_3 - (1/R_3 - 1)^{1/2} \quad (5)$$

光栅反射率 R_3 越大剩余反射率的上限 $R_{rq} = r_{rq}^2$ 也越大。

2 计算结果

下面运用数值计算来模拟各种载流子密度之间的关系并从中分析 ECLD 的调谐特性和双稳特性以及它们之间的关系,除特别说明外,所作的数值计算和图形均采用如下数据: $\gamma_e = 30 \text{ cm}^{-1}$, $L_d = 0.02 \text{ cm}$, $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\Gamma = 0.3$, $N_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $Q = 40 \text{ nm}$, $n_r = 4.16$; $\alpha = 5$, $\nu_m = 2.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (对应的波长为 1300 nm), $c = 2.99 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $r_2 = 0.31$, $R_3 = 0.1$ 。

2.1 H 参量简化模型展示的调谐特性和双稳特性

图 1 为 $\lambda_g = 1310 \text{ nm}$, $R = 0.01$ 时载流子密度与波长的关系图谱。用文献[2]和文献[4]中给出的式子

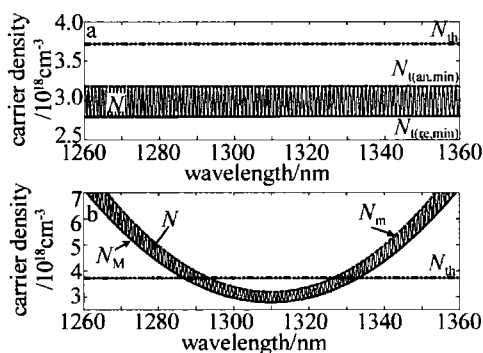


Fig. 1 Phase of carrier density versus wave length
a— $H=1$ b— H versus wavelength

作出图 1a,图中的 $N_{l(an,min)}$ 和 $N_{l(re,min)}$ 分别为反共振态和共振态下最小名义载流子密度^[2];图 1b 是参量简化模型的载流子密度与波长的关系曲线,图中显示 $N_m(\lambda)$, $N_M(\lambda)$ 是 $N(\lambda)$ 振荡曲线的上、下包络线。与图 1a 不同, $N(\lambda)$, $N_M(\lambda)$, $N_m(\lambda)$ 不仅都随 λ 变化,而且 N_m 与 N_M 曲线偏离 λ_g 后两侧向上抬升,并与 N_{th} 相遇;在 λ_g 处 $N(\lambda)$ 最小,波长偏离 λ_g , H 和 $N(\lambda)$ 增大;偏离 λ_g 较大时,因 $N(\lambda)$ 大于 N_{th} 使 ECLD 无法实现振荡;同时在 λ_g 处, N_m 与 N_M 的垂直距离 ΔN 最短,随着 λ 开始偏离 λ_g , ΔN 因 H 的增大而稍微变大,这些是图 1a 所不能展示的。

图 2 为 R 分别为 0.015 和 0.0015 时载流子密度与波长的关系图, N_m 与 N_{th} 的两个交点的间距 CD 对应

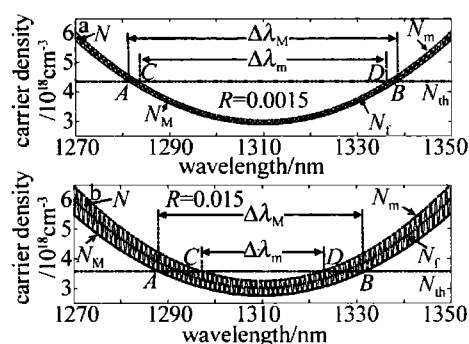


Fig. 2 Tuning range versus the different R value

$\Delta\lambda_m$; N_m 与 N_{th} 的两个交点间距 AB 对应 $\Delta\lambda_M$ 。从图 1、图 2 可知,随着 R 的增大, ΔN 增宽, N_{th} 下降,调谐范围缩小, $\Delta\lambda_M$ 与 $\Delta\lambda_m$ 的差距加大。

由图 2 可判断,在调谐范围内出现了双稳环, C, D 之间双稳环的环宽不受 N_{th} 的制约,在 AC, BD 这两个区域,环宽因 N_{th} 而变小;同时随着 R 的减小, ΔN 变小,双稳环向右的倾斜度变小,环宽缩小,当 R 降低到一定值时,双稳环消失。当 R 一定时,图 2b 中的 C, D 两处有环宽极大值。

2.2 载流子密度与剩余反射率的关系

为进一步反映调谐特性与双稳特性的关系,利用载流子密度与剩余反射率的关系作出了图 3,从中可

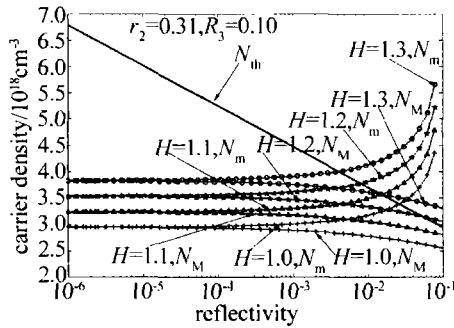


Fig. 3 Carrier density versus the different H value

得到如下的结果:(1)R 越小, $N(\lambda)$ 波动越小;当 R 很小(小于 10^{-4})时, N_M 与 N_m 重合,不存在双稳环;(2) R 和 H 越小, N_M, N_m 与 N_{th} 的差距越大,即调谐范围越大;(3)H 值一定时,随着 R 的增大, $N(\lambda)$ 起伏越来越大;在 N_M, N_m 和 N_{th} 所夹的四边形区域出现双稳环,环宽随 R 增大而增大;在 N_m 与 N_{th} 的交点处,环宽达极大值,当 $H=1$ 时环宽为最大值;随后环宽在 N_{th} 下降中逐渐缩小;(4)在 R 相同的情况下, H 值越大,环宽也越大,但这只在 N_{th} 线以下才有意义。

2.3 剩余反射率 R 对调谐范围的影响

调谐范围 $\Delta\lambda_M, \Delta\lambda_m$ 与剩余反射率 R 的关系如图 4 所示, $\Delta\lambda_M$ 和 $\Delta\lambda_m$ 都随着 R 的减少而增大,但 $R <$

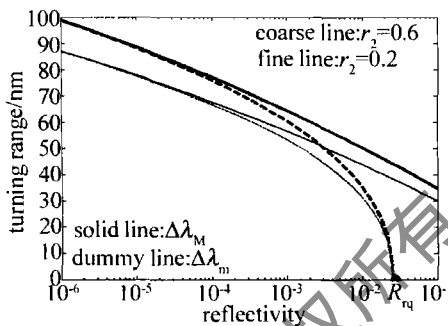


Fig. 4 Tuning range versus residual reflectivity

10^{-3} 后,双稳环消失。因最小剩余反射率可达 3×10^{-6} ^[3],所以可算出,当 $R = 10^{-2}$ 时, $\Delta\lambda_M = 46.22\text{nm}$, $\Delta\lambda_m = 32.83\text{nm}$;当 $R = 10^{-6}$ 时,调谐范围可达到 $\Delta\lambda_M = 91.32\text{nm}$, $\Delta\lambda_m = 91.22\text{nm}$ 。

2.4 剩余反射率等于 R_{rq} 时双稳环环宽为最大值

R 在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 之间对 $\Delta\lambda_m$ 的影响很大,在这个调谐范围内双稳环环宽较大,这也就是双稳环要求 R 不能太小的原因。 $R_3 > R > R_{rq}$ 时, $\Delta\lambda_m = 0$,但环宽不为 0;在 $\Delta\lambda_m$ 刚为 0 处,即图 4 中横轴的 R_{rq} 处,此时 $H=1$,环宽为最大值。所以, R_{rq} 既是实现 ECLD 反共振激射所需剩余反射率的上限,也是其实现双稳环环宽最大值的上限。本例中当 $R_3 = 0.1$ 时, $R_{rq} = 2.6334 \times 10^{-2}$ 。

2.5 H 的取值

图 5 为最大调谐范围所能够允许的 H 最大值 H_{max}

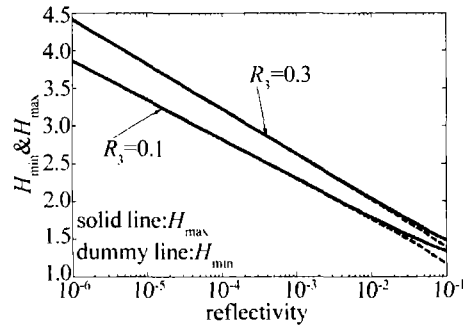


Fig. 5 H_{min} and H_{max} versus residual reflectivity

和最小调谐范围所能够允许的 H 最小值 H_{min} 与剩余反射率 R 的关系曲线。首先光栅反射率越大,调谐范围也越大,则 H 值也越大;其次随之 R 的减小,调谐范围的增宽, H 的取值范围也变大,当 $R = 10^{-2}$ 时, $H_{max} = 1.792$, $H_{min} = 1.769$;在 $R = 10^{-6}$ 处, H 竟可高达 $H_{max} = H_{min} = 4.412$ 。

3 结论

H 参量简化模型不仅能清晰地表达阈值载流子密度、单管参考载流子密度、共振态和反共振态的阈值载流子密度的相互关系,且能在这些关系里直观展示连续调谐过程中最大调谐范围、最小调谐范围、双稳环环宽的变化趋势;同时也能反映剩余反射率 R、出射端反射系数 r_2 对调谐范围的影响,并且得到双稳环环宽最大值的位置。这些结果表明,由于 H 参量可高达 4.4,所以,波长偏离增益峰值波长而引起的效应不能忽视,考虑 H 参量能够从另外的角度研究调谐特性和双稳特性,拓宽光栅外腔半导体激光器的应用范围。

参考文献

- [1] CHAI Y J, ZHANG H Y, ZHOU B K. Stability limit conditions of semiconductor lasers with a strongly coupled external cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, 23(4): 303-306 (in Chinese).
- [2] ZHOU X H, CHEN J G, LU Y C. Studying the tuning range of external cavity semiconductor lasers by ray trace method [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1996, 17(2): 158-161 (in Chinese).
- [3] PAN W, ZHANG X X, LUO B, et al. Reflectivity spectral characteristics on diode facets of external-cavity semiconductor lasers [J]. Optical Technique, 2001, 27(4): 291-293 (in Chinese).
- [4] CHEN J G, LI Y, LI D Y, et al. Determination of hysteresis loops for tunable external cavity semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2000, 24(5): 285-288 (in Chinese).
- [5] PAN Zh Q, YANG J Q, YE Y B, et al. Programmable wide band wavelength tuning external-cavity semiconductor laser [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(2): 221-225 (in Chinese).
- [6] YANG L Zh, YANG H Y, WANG Y C, et al. The operating mode of semiconductor laser with external-cavity optical feed back [J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(12): 1118-1120 (in Chinese).
- [7] ZHANG J, CHEN X Z, WANG Y Q. Analysis on continuous tuning range of tunable diode lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1220-1224 (in Chinese).

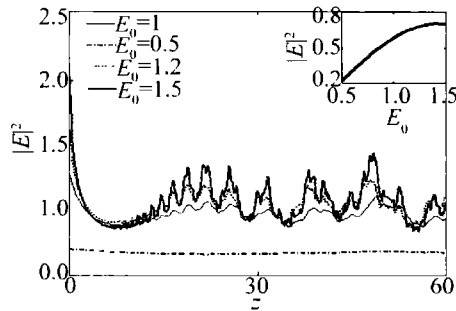


Fig. 7 The FWHM varying with the the original pulse peak E_0

时,脉冲演化的规律与只考虑 b 的变化的影响时很相似,但峰值功率的变化比只考虑 b 时的变化更快,变化幅度更大,这是由于 5 阶非线性项的大小与光强的 4 次方成正比,因而光脉冲的峰值的大小显著地影响着 5 阶效应。在实际应用中,光纤的非线性系数往往是固定的,因此,非线性项的大小取决于脉冲的峰值功率。

3 结论

标准非线性薛定谔方程考虑了 5 阶非线性项后,使光脉冲在光纤中的传播会产生调制不稳定性,负的 5 阶非线性效应使光脉冲的峰值减小,脉冲被展宽,正的 5 阶非线性效应使峰值增大,脉冲被压缩。但不管是负还是正 5 阶非线性效应,脉宽被展宽或被压缩的平均值与 5 阶非线性系数都成非线性关系。较小的 5 阶非线性效应产生的较小调制不稳定性,因而光脉冲能保持基本的形状,忽略光纤的损耗时,光脉冲保持绝热传输。对正的 5 阶非线性效应,适当小的损耗可以减缓调制是不稳定性。在 5 阶非线性系数固定的情况下,初始入射脉冲的峰值会显著地增加 5 阶非线性项的贡献。

参考文献

- [1] NEWELL A C, MOLONEY J V. Nonlinear optics [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1992: 104-110.
- [2] PUSHKAROV D, TANEV S. Bright and dark solitary wave propagation and bistability in the anomalous dispersion region of optical waveguides with third- and fifth-order nonlinearities [J]. Opt Commun, 1996, 124(3/4): 354-364.
- [3] PUSHKAROV D, TANEV S. Solitary wave propagation and bistability in the normal dispersion region of highly nonlinear optical fibers and waveguides [J]. Opt Commun, 1997, 141(5/6): 322-328.
- [4] PORSEAIAN K, NAKKEERAN K. Optical soliton propagation in an Erbium doped nonlinear light guide with higher order dispersion [J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(15): 2941-2944.
- [5] DIMITREVSKI K, REIMHULT E, SVENSSON E, et al. Analysis of stable self-trapping of laser beams in cubic-quintic nonlinear media [J]. Phys Lett, 1998, A248(5/6): 369-376.
- [6] HONG W P. Optical solitary wave solutions for the higher order nonlinear Schrödinger equation with cubic-quintic non-Kerr terms [J]. Opt Commun, 2001, 194(1/3): 217-223.
- [7] LIU Q Y, LUO K J. The influence of fifth-order nonlinearity on the propagation properties of the soliton-like pulse in the optical fiber [J]. Laser Journal, 2001, 22(5): 43-44 (in Chinese).
- [8] PAN B, SHEN T G, YAO J, et al. The effect of five-order nonlinear on the propagation of soliton and couple of soliton [J]. Laser Journal, 2003, 24(6): 52-53 (in Chinese).
- [9] HONG W P. Modulational instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation [J]. Opt Commun, 2002, 213(1/3): 173-182.
- [10] ZHONG X Q, CHEN J G, LI D Y. Modulation in stability in the decreasing dispersion fibers with quintic nonlinearity [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 27-30 (in Chinese).
- [11] REN Z J, WANG J, YANG A L, et al. The effect on modulational instability of quintic nonlinearity [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(6): 758-760 (in Chinese).
- [12] KONAR S, SOUMENDU J, MANOJ M. Induced focusing and all optical switch in cubic quintic nonlinear media [J]. Opt Commun, 2005, 255(1/3): 114-129.
- [13] AGRAWAL P G. Nonlinear fiber optics & application of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 26-36 (in Chinese).
- [14] ZHONG X Q, CHEN J G, LI D Y. Modulation instability induced by cross-phase modulation in fibers with cubic-quintic nonlinearity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(8): 1035-1039 (in Chinese).
- [15] RADHAKRISHNAN R, KUNDU A, LAKSHMANA M. Coupled nonlinear Schrödinger equation with cubic-quintic nonlinearity: integrability and soliton interaction in non-Kerr media [J]. Phys Rev, 1999, E60(3): 3314-3323.
- [16] CHANG Q, JIA E, SUN W. Difference schemes for solving the generalized nonlinear Schrödinger equation [J]. Journal Computational Physics, 1999, 148(2): 397-415.
- [8] LIU Ch, GE J H, CHEN J. Investigation of loss and threshold characteristics in the laser diode with external feedback [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12): 1413-1416 (in Chinese).
- [9] JIANG P F, ZHOU Y, XIE F Z. Research on the dual-wavelength external-cavity semiconductor laser [J]. Optical Technique, 2007, 33(2): 287-291 (in Chinese).

(上接第 200 页)