

DFB 激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型^{*}刘景旺¹⁾²⁾ 杜振辉^{1)†} 李金义¹⁾ 齐汝宾¹⁾ 徐可欣¹⁾

1) (天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (北华航天工业学院, 廊坊 065000)

(2011 年 1 月 10 日收到; 2011 年 2 月 18 日收到修改稿)

从 DFB 型激光二极管调谐机理出发, 提出了电流-温度调谐特性的解析模型, 通过实验测量结果辨识出模型参数, 将模型应用于四个不同厂家的 DFB 型二极管激光器, 得到激光器电流-温度调谐的解析模型; 将模型预测值与实验测量值比较, 相关系数均在 0.9999 以上. 同时, 利用 CO₂ 气体的多个吸收谱线测量激光的波长, 验证了解析模型的预测波长值, 与 HITRAN 谱库中 CO₂ 气体吸收波长的误差在 3 pm 内. 解析模型能够精确预测激光器在快速调谐过程中的瞬态输出波长, 其精度能够满足光谱分析、光学相干测量等实用要求.

关键词: DFB 激光二极管, 调谐机理, 解析模型, 电流调谐和温度调谐

PACS: 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Fi

1. 引言

近年来, 可调谐二极管激光器 (tunable diode laser, TDL) 在光通信、吸收光谱检测、光学相干测量等领域获得了广泛应用^[1], 它们对 TDL 的要求是快速、宽谱、单模、连续的波长可调谐性^[2-4]. 激光器宽谱调谐过程中的瞬时波长监测与控制, 对于依赖波长的测量和检测非常重要^[5], 常规波长计测量方法由于测量时间长, 并不适合调谐过程瞬时波长的在线监测.

DFB 激光器是备受瞩目的单片可调谐激光器, 具有窄线宽 (<1 MHz)、高边模抑制比 (>35 dB)、快速可调谐等优点^[6], DFB 激光器的瞬时输出波长可由工作温度和注入电流改变^[7]. 然而, 由于 DFB 激光器输出波长随注入电流和温度的变化存在非线性, 并且随调谐速率的不同而有变化, 使得激光器快速调谐过程中的输出波长与注入电流及温度的定量关系很难用已有常规方法来描述^[2]. 迄今为止还缺少合适的数学模型对 TDL 动态调谐特性进行定量地分析.

本文从 DFB 激光器的调谐机理出发, 提出适合

于动态调谐过程的数学模型, 该模型针对 DFB 型激光器布拉格定律, 有源区折射率、光栅周期及布拉格波长等随注入电流和工作温度的不同变化特性, 综合考虑电流和温度的调谐机理, 得到了描述 DFB 激光器动态调谐特性的解析模型. 该解析模型波长预测值与光谱仪测量值的偏差在 15 pm 以内. 同时, 采用温度调谐的激光吸收光谱实验系统, 利用 CO₂ 气体的吸收线精确辨识出激光器输出波长, 解析模型预测波长值与 HITRAN 谱库中 CO₂ 气体吸收线波长比较的误差为 3 pm 以内, 进一步佐证了解析模型的准确性.

2. DFB 激光器调谐机理

半导体材料的折射率和带隙对应的辐射激光波长, 随温度、载流子浓度和电场强度等变化而改变^[8], DFB 激光器是具有内光栅反射器的多电极结构, 其调谐主要是依靠改变光栅反射区的折射率, 进而改变布拉格波长来实现, 只有满足布拉格发射条件 (布拉格定律) 的波长才能被激励^[9], 即

$$\Lambda = \frac{m\lambda_B}{2n'_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60938002), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA06Z410, 2009AA04Z160), 天津市自然科学基金 (批准号: 06YFJMJC06700), 河北省廊坊市科技支撑计划项目 (批准号: 2010011029/30/31) 和北华航天工业学院科研基金 (批准号: KY-2010-16) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn

式中, Λ 为光栅周期, λ_B 为布拉格波长, $m=1, 2, 3, \dots$ 是 DFB 模的次数 (m 一般取 1), n'_{eff} 是光栅有效折射率实部. 满足上式的特定波长的光才会反射, 形成受激辐射, 并可以实现动态单纵模工作.

由(1)式可见, DFB 激光器的输出波长主要是依靠改变光栅周期及有效折射率来实现调谐的, 而调谐方式主要包括注入电流和工作温度, 具体可以概括为: 1) 注入电流的变化引起载流子浓度的变化, 载流子浓度的变化又可以引起两个变化, 一是有源区折射率的改变; 二是材料增益系数的改变. 2) 温度的升高引起半导体材料折射率及带隙变化, 从而导致激光器输出波长和光功率变化^[10].

2.1. 注入电流调谐

激光器 pn 结内部承受着很大的电流密度和热损耗功率密度, 存在各种非辐射损耗、载流子吸收等损耗机理, 一部分注入电功率转化为焦耳热, 引起激光器温度升高, 等效为温度调谐^[11]. 更为主要的是, 注入电流改变引起有源区载流子浓度变化, 由于等离子效应^[12], 光栅有效折射率发生变化, 进而改变激光器的输出波长^[13],

$$\Delta n'_{\text{eff}} = -\Gamma \frac{\Delta n}{\Delta N} N, \quad (2)$$

式中, Γ ($=0.2-0.4$) 是光模式限制因子, $\Delta n/\Delta N$ (在 $1.55 \mu\text{m}$ 约为 $10^{-20}/\text{cm}^3$) 是单位载流子浓度引起的折射率变化, N 是载流子浓度. 折射率变化也会引起布拉格波长 (λ_B) 偏移

$$\Delta \lambda_B = \left(\frac{\lambda^2}{2\pi n_g} \right) \cdot \Delta \beta = \frac{\Delta n}{n_g} \cdot \lambda. \quad (3)$$

载流子浓度改变在引起折射率改变 (Δn) 的同时还引起了增益系数的改变 (Δg), 前者的效应比后者的效应大一个数量级, 二者之间符合 Kramers-Kronig 色散关系^[11]

$$\frac{\Delta \beta}{\Delta g} = -\frac{1}{2}\alpha, \quad (4)$$

式中, α 为线宽增加因子 (对于 DFB 一般很小 3—5)^[14], α 决定了单纵模谱线宽度^[15].

2.2. 温度调谐

光栅布拉格波长依赖于半导体材料的有效折射率, 而有效折射率又对温度有着很强的依赖关系, 布拉格波长与温度的关系为^[16-19]

$$\Delta \lambda_B = \lambda_{B0} (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T_{\text{FBG}}, \quad (5)$$

式中, $\Delta T_{\text{FBG}} = (T_H - T_0)$ 指工作温度, λ_{B0} 指在 T_0

温度下的布拉格波长, $\alpha_A = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right]$ 指热膨胀系数, $\alpha_n = \left[\frac{1}{n'_{\text{eff}}} \frac{\partial n}{\partial T} \right]$ 指热光系数. 折射率随温度变化率要更快于光栅周期随温度变化率, 前者是布拉格波长改变的主要原因^[20-22].

2.3. DFB 激光器的调谐特性

综上所述, DFB 激光器的温度、电流调谐特性可由图 1 描述, 载流子浓度随注入电流线性变化, 除了输出波长与载流子浓度呈负线性关系外, 线宽和输出光功率与载流子浓度都成正线性变化; 注入电流和工作温度都会引起折射率的变化, 注入电流主要靠焦耳热——对应于 I^2 来实现波长调谐, 温度升高导致半导体材料折射率变化进而改变布拉格波长, 因此波长又与 T 有关.

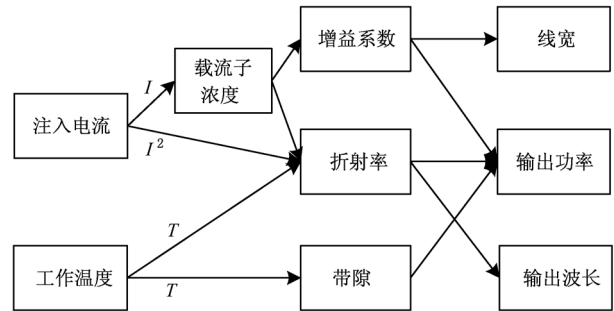


图 1 DFB 型激光二极管调谐机理 (仅限无跳模情况下)

根据上述分析, 描述 DFB 激光器调谐特性的解析模型可表示为

$$\lambda(I, T) = (k_1 T + k_2) \cdot I^2 + (k_3 + k_4 T) \cdot I + k_5 T + \lambda_0, \quad (6)$$

式中, 待定系数 $k_1, \dots, k_5, \lambda_0$ 可以由具体型号激光器静态调谐特性辨识得到. 解析模型中的 I 和 T 取值范围应该是激光器相应的正常工作范围.

3. 实验结果与分析

3.1. 模型参数的辨识

在实验室条件下, 使用光谱分析仪 (Agilent: 86142B) 测量 DFB 激光器在不同温度 and 不同电流条件下的输出波长、光功率以及激光器的结电压. DFB 激光器的注入电流、工作温度控制由激光控制器 (ILX: LDC-3908) 提供, 光谱仪的波长扫描范围 1300—1700 nm, 分辨率 0.06 nm.

测量了四个不同厂家的近红外连续输出 DFB-TDL, 激光器均为标准蝶形封装. 其中 DFB-LD1 (Furukawa; FOL15DDBA-A31) 输出光功率为 10 mW, 在工作电流 60 mA 时输出波长为 1582 nm. 实验分为两部分, 一是将 LD 驱动器工作温度保持不变, 只改变注入电流 (范围 20—120 mA, 步长 5 mA) 测量激光器输出波长, 即电流调谐谱; 二是在注入电流保持不变而只改变工作温度 (范围 268.15—308.15 K, 步长 10 K) 得到温度调谐谱. 部分测量结果如图 2 所示.

只给出 DFB-LD1 静态调谐特性图, 其他三个激光器静态调谐特性类似. 根据静态特性的实验数据, 结合解析模型(6), 可以辨识出模型中的 6 个参数, 如表 1 所示.

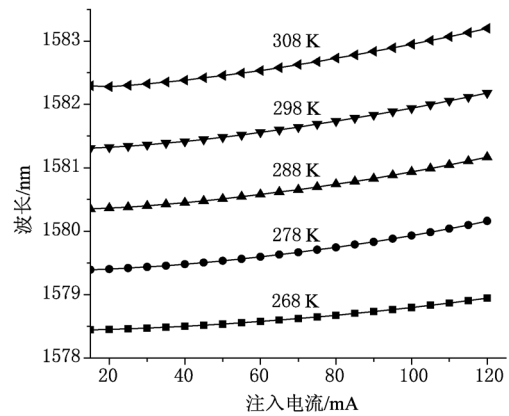


图 2 DFB-LD1 激光器在不同温度下输出波长随注入电流变化的曲线

表 1 四个激光器的调谐特性解析模型

序号	型号	模型参数						最大残差
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	λ_0	
1	Furukawa; FOL15DDBA-A31	-9.1428×10^{-8}	7.13121×10^{-5}	-0.01763	6.76583×10^{-5}	0.094184	1553.1662	10 pm
2	Furukawa; FRL15DDA-A31	3.2619×10^{-7}	-3.00671×10^{-5}	0.001757	8.22865×10^{-7}	0.097484	1570.9022	10 pm
3	Intense; 1653	-7.1102×10^{-7}	2.44497×10^{-4}	-0.018198	8.94607×10^{-5}	0.097038	1624.1616	10 pm
4	Qphonics1368	3.17254×10^{-8}	9.29721×10^{-6}	-0.005241	2.93073×10^{-5}	0.092766	1340.6575	15 pm

由表 1 可见, 四个 DFB-TDL 调谐特性的解析模型, 最大残差均在 15 pm 以内, 且相关系数均在到 0.9999 以上. 这一数值已低于测量仪器误差限 (0.06 nm), 说明解析模型的可靠性非常高. 图 3 是基于模型(6)得到 DFB-LD1 注入电流-温度的调谐特性解析模型谱图.

3.2. 解析模型的验证

以 DFB-LD1 激光器, 利用 CO₂ 气体在该波段的多个吸收谱线测量激光的波长. 采用温度调谐的激

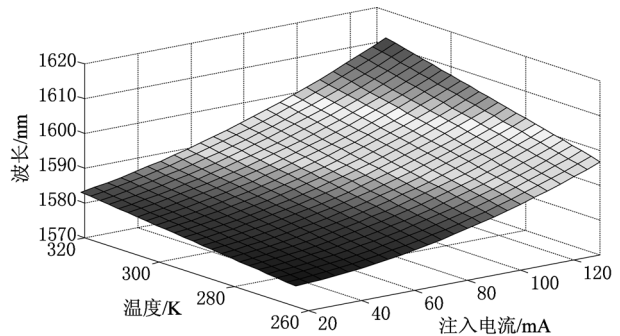


图 3 DFB-LD1 注入电流(温度)调谐特性解析模型谱图

表 2 DFB-LD1 激光器在不同 TEC 驱动电流下的波长预测结果与 HITRAN 谱库结果的比较

TEC 驱动电流/A		0.9		1.0		1.2	
No.	HITRAN 结果/nm	预测波长/nm	误差/pm	预测波长/nm	误差/pm	预测波长/nm	误差/pm
1.	1578.665330	1578.662654	-2.674	1578.665326	-0.004	1578.665630	0.301
2.	1579.115819	1579.114108	-1.711	1579.115775	-0.044	1579.115635	-0.184
3.	1579.573890	1579.573529	-0.359	1579.574024	0.134	1579.574686	0.797
4.	1580.039517	1580.040118	0.603	1580.039675	0.158	1580.040517	1.001
5.	1580.512671	1580.513137	0.466	1580.512113	-0.558	1580.512748	0.077
6.	1580.993321	1580.995845	2.519	1580.993352	0.031	1580.993753	0.427
7.	1581.481428	1581.483980	2.548	1581.481948	0.520	1581.480867	-0.564
8.	1581.976954	1581.978982	2.032	1581.976692	-0.262	1581.974051	-2.898

光器吸收光谱实验系统,通过 TEC 改变 LDM 的温度,DFB 激光器的注入电流(设定为 50 mA)、TEC 驱动电流(分别设定为 0.9 A,1.0 A,1.2 A)和热敏电阻的工作电流(设定为 100 μ A)由激光控制器提供,信号发生器提供激光器的调制信号和锁相放大器的 $2f$ 参考信号,在气体池中充有浓度 1% 的 CO_2 气体,经过气体吸收的信号与热敏电阻的电压一起经模数转换后由计算机处理.对该实验系统的详细介绍可参考我们之前的工作^[23].

由表 2 可见,解析模型预测值与 HITRAN 谱图中 CO_2 气体吸收线的差别仅在 3 pm 内,相比于现有光谱仪的最高分辨率(10 pm)还要高出 1 个数量级.这对于工程实践,是十分有意义的.

4. 结 论

基于 DFB 型可调谐二极管激光器调谐机理,提

出适合于动态调谐特性的解析模型,通过光谱仪测得四个不同激光器输出波长随注入电流(温度)调谐的静态特性,辨识得到解析模型中的六个参数.将模型预测值与实验测量值比较,误差均在 15 pm 以内,相关系数均在 0.9999 以上.同时,利用 CO_2 气体的多个吸收谱线测量激光器输出波长,验证了其中一个激光器的波长预测精度达到 3 pm,该结果已溯源到气体的吸收谱线的波长,因此,该解析模型的可靠性很高.这一结果能够满足光谱分析、光学相干测量、光通信等领域中要求的激光波长精度,由于该模型可以精确预测激光器在快速调谐过程中的瞬态输出波长值,所以对于相干光通讯、相干几何量测量、TDLAS 系统等实际应用都是十分有意义的.针对于激光器在高速调谐过程中的瞬态输出线宽、边模抑制比、波长稳定性等特性进行实时监测与优化,也是十分有意义的工作,课题组后续将开展这项工作.

- [1] Du Z H, Zhai Y Q, Li J Y, Hu B 2009 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **29** 3199
- [2] Liu J W, Du Z H, An Y, Li J Y, Gao D Y, Xu K X 2010 *Proc. SPIE* **7544** 75444V
- [3] Liu Y, Wang L S, Tao P L, Feng S C, Yin G L, Ren W H, Tan Z W, Jian S S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024207-1 (in Chinese) [刘 艳, 汪磊石, 陶沛琳, 冯素春, 尹国路, 任文化, 谭中伟, 简水生 2011 物理学报 **60** 024207-1]
- [4] Xie H Y, Jin D Y, He L J, Zhang W, Wang L, Zhang W R, Wang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4558 (in Chinese) [谢红云, 金冬月, 何莉剑, 张 蔚, 王 路, 张万荣, 王 圩 2008 物理学报 **57** 4558]
- [5] Mitsuhiro T 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 1389
- [6] Vincent W, David M, Richard P, Michael L, John D 2006 *Spectrochimica Acta A* **63** 1013
- [7] Jae-Ho Han, Sung-Woong Park 2007 *Current Appl. Phys.* **7** 6
- [8] Zhang G W 2002 *Tunable Lasers* (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [张国威 2002 可调谐激光技术(北京:国防工业出版社)]
- [9] Cai B R, Chen Z, Liu X 1995 *Semiconductor laser* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p59 (in Chinese) [蔡伯荣, 陈 峥, 刘 旭 1995 半导体激光器(北京:电子工业出版社) 第 59 页]
- [10] Jens Buus, Markus C A, Daniel J B 2005 *Tunable Laser Diodes and Related Optical Sources* (New York: John Wiley & Sons) p59
- [11] Kuznetsov M 1988 *IEEE J. Quant. Electron.* **24** 1837
- [12] Schmidt B, Hakimi R, Illek S 1997 *Electron. Lett.* **30** 389
- [13] Joanne M, Robert O 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 1525
- [14] Wiczorek S, Krauskopf B, Simpson T B, Lenstra D 2005 *Phys. Reports* **416** 14
- [15] Dutta N K, Hobson W S, Lopata J, Zydzik G 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 1219
- [16] Casey H C, Panish M B 1978 *Heterostructure laser* (New York: Academic Press) p50
- [17] Seufert J, Fischer M, Legge M, Koeth J, Werner R, Kamp M, Forchel A 2004 *Spectrochimica Acta A* **60** 3243
- [18] Vicet A, Yarekha D A, Ouvrard A, Teissier R, Alibert C, Baranov A N 2003 *IEEE Proc. Optoelectron.* **150** 310
- [19] Andrei A P, Albert N, Imenkov, Yakolev Y P 1996 *Spectrochimica Acta A* **52** 871
- [20] Fukuda M, Mishima T, Nakayama T, Masuda T 2010 *Appl. Phys. B* **100** 377
- [21] Tsang W T 1990 *Semiconductor Injection Laser* (New York: John Wiley & Son) p208
- [22] Dong X Y, Zhao C L, Guan B O, Tan H Y, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2750 (in Chinese) [董新永, 赵春柳, 关柏鸥, 谭华耀, 袁树忠, 开桂云, 董孝义 2002 物理学报 **51** 2750]
- [23] Li J Y, Du Z H, Gao D Y, Qi R B, Xu K X 2011 *Meas. Sci. Technol.* (to be published)

Analytical model for the tuning characteristics of static, dynamic, and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes^{*}

Liu Jing-Wang¹⁾²⁾ Du Zhen-Hui^{1)†} Li Jin-Yi¹⁾ Qi Ru-Bin¹⁾ Xu Ke-Xin¹⁾

1) (State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

(Received 10 January 2011; revised manuscript received 18 February 2011)

Abstract

From the tuning mechanism of the DFB laser diode, we establish an analytical model for current and temperature tuning characteristics. The parameters of the model are identified by experimental results. The model is used to analyze the four DFB diode lasers, and the transient characteristics of the lasers are obtained. We also obtain the static characteristics of these lasers from Agilent 86142B Spectrometer. The comparison between the two values indicates that the correlation coefficients are both more than 0.9999. At the same time, according to the absorption spectrum of CO₂ gas, we also measure the emission wavelength of lasers. Comparing it with the HITRAN spectrum of CO₂ absorption lines, the two errors are shown to be within 3pm. The analytical model can accurately predict the transient output wavelength of lasers in tuning, the accuracy can meet the spectrum, optical coherence measurements and other practical requirements.

Keywords: DFB laser diode, tuning mechanism, analytical model, current tuning and temperature tuning

PACS: 42.55.Px, 42.60.Fc, 42.62.Fi

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60938002), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2006AA06Z410, 2009AA04Z160), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 06YFJMJC06700), the Science and Technology Support Project of Langfang City (Grant No. 2010011029/30/31), and the Science Foundation of North China Institute of Aerospace Engineering (Grant No. KY-2010-16).

[†] Corresponding author. E-mail: duzhenhui@tju.edu.cn