

文章编号: 1001-3806(2017)06-0836-05

分布式反馈激光器调制特性研究

王海旭, 陈建冬, 常天英, 郎金鹏, 曾祥豹, 高文智, 孙 韦, 崔洪亮*

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130021)

摘要: 为了深入了解分布式反馈激光器(DFB)的发光机理与调制特性,通过理论分析和实验对DFB的调谐特性进行了研究。得到FITEL和JDS Uniphase两款激光器调制电流与输出中心波长的对应关系和两种确定系数不同的拟合方程,证明了这两款DFB激光器在实际应用中存在非线性关系。结果表明,FITELFRL15DCWD-A82激光器的3dB带宽与驱动电流幅值关系为 $3.715\text{pm}/\text{mA}$;该调制结果优化了该激光器的可用相干长度,并验证了驱动信号频率变化不影响3dB光谱宽度。对DFB激光器低频调制特性的定量分析结果可为相干检测系统驱动电路设计提供实验依据。

关键词: 激光器; 调谐; 非线性; 3dB带宽

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.014

Research of modulation characteristics of distributed feedback laser

WANG Haixu, CHEN Jiandong, CHANG Tianying, LANG Jinpeng,

ZENG Xiangbao, GAO Wenzhi, SUN Wei, CUI Hongliang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to understand the luminescence mechanism and modulation characteristics of distributed feedback laser (DFB), the corresponding relationship and fitting equation between modulation current and output central wavelength of FITEL laser and JDS Uniphase laser were obtained through theoretical analysis and experiment. It was proved that two DFB lasers had non-linear relationship in practical application. The results show that the relationship between 3dB bandwidth and the driving current amplitude of FITELFRL15DCWD-A82 laser is $3.715\text{pm}/\text{mA}$. The available coherence length of the laser is optimized by modulation result. It is proved that the frequency change of the driving signal does not affect 3dB spectral width. The research results can provide experimental basis for drive circuit design of a coherent detection system.

Key words: lasers; tuning; nonlinearity; 3dB bandwidth

引 言

分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)是一种半导体激光器,这种半导体激光器体积小、功耗低、光电转换效率高,同时具有使用寿命长、动态单模特性好、波长可调谐及便于光电集成等优点。DFB激光器主要是采用以折射率周期性改变的来实现谐振腔反馈功能。

目前DFB激光器主要的应用领域主要包括光通信领域、光学精密测量领域、光频域反射计领域以及可调谐二极管激光吸收光谱技术领域等,其中应用最为广泛的是痕量气体检测^[1]。在痕量气体检测中利用

DFB激光器的速度快、范围宽、可调谐、窄线宽及高边模抑制比的优良性能可以很好地提高仪器检测性能^[2]。

DFB激光器常用于相干测量领域,用于相干测量系统^[3],如分布振动测量^[4]、分布式光纤温度应变测量^[5-6]。对激光器进行调制的原理是通过控制激光器注入电流或激光器工作温度的变化来实现激光器输出波长及功率的变化。利用DFB激光器的动态单模、响应速度快的特点使其得到广泛的应用。在光谱吸收式气体检测^[7]、直接调制相位生成载波^[8]等领域得到广泛的应用。

目前内调制DFB激光器的应用原理主要是利用其中心波长的调制来实现检测^[9],但未考虑到其3dB带宽内波长调制的影响^[10]。本文中采用使用普遍的两款DFB激光器的驱动电流进行调频和调幅实验,通过对实验结果进行分析对比,分别得到了DFB激光器的电流-中心波长调谐特性和驱动幅度-3dB带宽调谐特性,实验结果可以很好地为DFB激光器的应用以

基金项目:中国海洋局海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201405026-01)

作者简介:王海旭(1987-),男,硕士研究生,现主要从事光纤传感领域的研究。

* 通讯联系人。E-mail:hcui@jlu.edu.cn

收稿日期:2016-12-08;收到修改稿日期:2017-01-13

及其驱动电路设计提供设计参考^[11]。

1 激光器调制原理

DFB 激光器本身为一种半导体激光器,因为其内部集成了在纤芯内形成的空间相位周期性分布的布喇格光栅,使其能够对波长进行选择发射^[12]。从而使其具有频率选频特性并且动态单模工作。通过布喇格反射原理可知,布喇格反射波长 λ_B 由光栅周期 Λ 决定:

$$2\beta\Lambda = 2\pi m \quad (1)$$

$$2\bar{n}\Lambda = m\lambda_B \quad (2)$$

式中, β 为光波传播常数; \bar{n} 为有源介质有效折射率; m 为光栅常数,通常 $m=1$ 。其中(2)式被称为布喇格条件。

能级结构和谐振腔的选频特性共同决定了半导体激光器的输出波长。DFB 激光器是一种具有内光栅反射器的多电极结构的半导体激光器,在选频方面,DFB 激光器需要满足布喇格反射的布喇格定律,应该表示为^[13]:

$$\Lambda = l\lambda/2 \quad (3)$$

式中, Λ 为光栅周期; λ 为激光器的输出光波长; l 为 DFB 激光器激射模式次级, $l=1,2,3\cdots$ 。

只有当特定波长的光满足(3)式时,才会发生反射,从而发生受激辐射,并最终实现激光器的动态单模输出。

DFB 激光器对能级结构和选频的影响主要体现在以下两个方面:(1)载流子浓度随注入电流的改变而发生相应的改变,同时载流子浓度的改变又导致有源区折射率的改变和材料增益系数的改变;(2)半导体材料带隙会跟着 DFB 激光器工作温度的升高而变窄,这种现象导致激光器输出波长增加,也称为红移。

通过对 DFB 激光器注入电流、工作温度调制特性分析研究可知,激光器输出波长随注入电流、工作温度的改变会发生具有一定的规律性的改变。在以下 5 个理想情况下:(1)载流子的侧向扩散影响忽略不计;(2)激光器谐振腔中电子、光子和粒子束分布均匀,并且电子和光子的密度只随时间而改变;(3)自发发射因子为理想值 100%;(4)横向限制因子为理想值 100%;(5)谐振腔在某一瞬间只存在一个振荡模式被放大激射, N 和 S 随时间变化的速率方程可以简化为^[14]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_r} - R_{st}S \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = R_{st}S + \frac{N}{\tau_r} - \frac{S}{\tau_p} \quad (5)$$

式中, J 为注入电流密度; e 为电子电荷; d 为有源区的有效厚度; τ_r 为腔内电子自发发射的复合寿命; τ_p 为腔内光子的寿命; R_{st} 为腔内受激发射速率; N 为激光器内载流子密度; S 为光子密度。

在(4)式中, $J/(ed)$ 代表有源区内 N 与 J 之间的变化关系; N/τ_r 代表有源区载流子密度的变化; $R_{st}S$ 代表载流子密度因受激发射复合的变化。

在(5)式中, $R_{st}S$ 代表光子密度增加速率与受激发射光子产生速率成正比; N/τ_r 代表自发发射进入激光腔谐振模式的速率; S/τ_p 代表因腔内损耗所引起光子减少的速率。

由(4)式可以知道, N 会随着 J 改变而改变。由等离子体效应可知,有源介质材料有效折射率 n 的变化与载流子浓度 N 有关,这种变化过程可以概括为下式^[14]:

$$\frac{dn}{dN} = -\frac{e^2}{2\epsilon_0 n \omega^2 m^*} \quad (6)$$

式中, n 为有源介质折射率; ϵ_0 为真空中的介电常数; m^* 为电子的有效质量; ω 为发射电子的角频率。

由(6)式可知, N 与 n 呈近似线性关系。

从 DFB 激光器的输出波长分别与注入电流和工作温度的关系中可以看出,焦耳热的注入导致了增益系数变化;载流子浓度 N 与注入电流的变化呈线性变化;注入电流和工作温度的改变都会使布喇格光栅折射率 n 的变化;温度升高导致半导体材料带隙变窄从而改变输出波长。

通过上述分析过程可以得到关于描述 DFB 激光器稳态波长特性的解析模型,应该表示为:

$$\lambda(I, T) = (k_1 T + k_2) \cdot I^2 + (k_3 T + k_4) \cdot I + k_5 T + \lambda_0 \quad (7)$$

式中, T 为温度,常数 k_1, \dots, k_5 和初始状态下的波长 λ_0 可根据各个激光器型号及稳态波长特性的测量得到。由分析可以得到激光器注入电流 I 与输出波长 $\lambda(I, T)$ 呈二次函数关系,并且激光器线宽特性也会受注入电流变化产生变化,下面将根据理论结果对激光器进行实测分析,来验证 DFB 激光器调制过程具体变化情况。

2 实验结果与分析

2.1 波长调谐实验

DFB 激光器的输出调谐特性是由其驱动电流以及工作温度控制^[15]的。温度的改变无法进行快速调整,因此实验中采用高精度温控及电流驱动控制器 Newport8008 进行两款不同厂家激光器(JDS Uniphase CQF91528, FITELFRL15DCWD-A82)驱动实验,这两款

激光器的工作电流范围分别为 20mA ~ 300mA, 15mA ~ 100mA, 为了保护激光器工作安全, 将其在 120mA 范围内进行试验, 采用 Agilent86120B 波长计对中心波长记录, 二者对应的测量结果如图 1a、图 1b 所示。

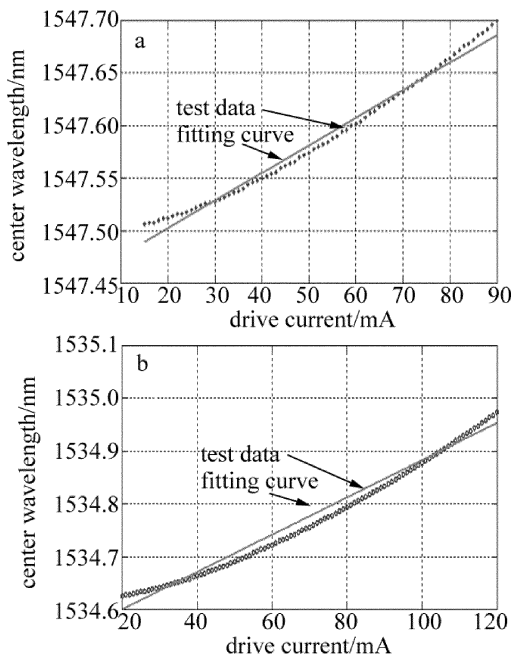


Fig. 1 Relationship between center wavelengths and drive current
a—JDSU laser b—FITEL laser

图 1a 和图 1b 分别为 JDSU 和 FITEL 两款 DFB 激光器的电流与输出中心波长曲线, 散点表示实测结果, 实线为线性拟合结果, 所得驱动电流 I 与输出中心波长 λ 之间线性拟合关系为:

$$\lambda_1 = 2.624 \times 10^{-3} I + 1547.45 \quad (8)$$

$$\lambda_2 = 3.53 \times 10^{-3} I + 1534.53 \quad (9)$$

这两个拟合结果线性拟合的确定系数分别为 0.9865 和 0.9842。由此可知, 对于 FITEL 的 DFB 激光器电流与中心波长之间的关系为 2.624pm/mA, 对于 JDSU 的这款激光器电流与中心波长之间的关系为 3.53pm/mA。

如果采用 2 阶拟合曲线对测量的驱动电流与输出中心波长数据进行拟合, 可得确定系数分别为 0.9997 和 0.9998 的 2 阶拟合曲线, 二者的拟合方程分别为:

$$\lambda_1' = 1.538 \times 10^{-5} I^2 + 1.009 \times 10^{-3} I + 1547.485 \quad (10)$$

$$\lambda_2' = 1.697 \times 10^{-5} I^2 + 1.153 \times 10^{-3} I + 1534.59 \quad (11)$$

采用二次函数进行拟合的结果如图 2 所示。图中驱动电流与 DFB 输出中心波长更准确地接近二次函数关系, 但二次项影响因子比一次项影响因子小两个数量级。因此, 将输出中心波长与驱动电流之间的关

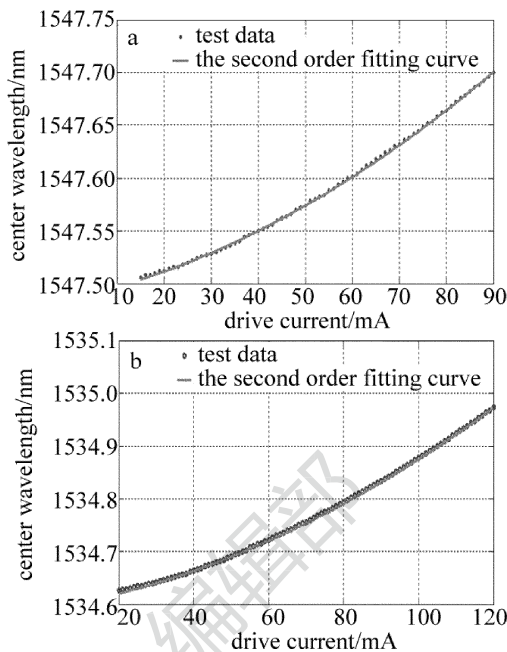


Fig. 2 Test result and the second order fitting curve
a—JDSU laser b—FITEL laser

系在实际应用中定为线性关系是准确可靠的。

2.2 正弦调制光谱分析

DFB 调谐特性应用于相干领域测量, 常采用其中心波长被调制的原理, 调制信号一般采用正弦形式, 并且由上述实验可知, 电流调制过程中会有非线性调制现象。因此对 3dB 带宽范围内进行调制结果测量对于 DFB 激光器用于相干测量领域的噪声分析非常重要, 但因为现有光谱分析仪的分辨率不能满足窄带宽激光器的测量范围, 所以实验中将利用非零拍自外差法对激光器光谱进行检测^[16]。采取窄带宽激光器测量方法, 利用光源发出的光波由 2×1 光耦合器分成两路, 其中一路经过光纤延迟线, 另一路经过频移器移频, 所得到的两路输出信号再由 2×1 耦合器进行干涉, 从而实现窄带宽激光器的检测^[17]。实验原理图如图 3 所示。

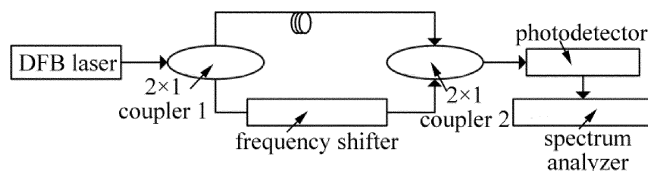


Fig. 3 Diagram of path-modulation non-zero frequency self-heterodyne interferometer

当激光器处于稳态时, 观察激光器输出结果如图 4 所示。图中白色实线方框所包含区域表示光谱 -3dB 频带宽度, 该 DFB 激光器温度控制在 25℃, 注入电流 50mA 情况下, 中心波长为 1547.576nm, 3dB 带宽 0.0170nm, 从图中可知该激光器的单纵模输出稳定, 3dB 带宽内的频谱稳定。

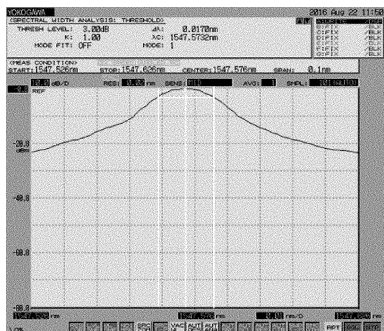


Fig. 4 3dB bandwidth spectrum of DFB laser (FRL15DCWD-A82-19530)

当 DFB 激光器受到调制时,所注入调制电流不同,调制波形不同,故对激光器 3dB 带宽内的所有波长的影响也会有不同的效果。通过激光驱动对激光器进行正弦调制,调制的直流偏置电流为 50mA,调制幅度逐渐递增,调制频率为 200Hz,调制信号类型为正弦信号。实验所得结果如图 5 所示。

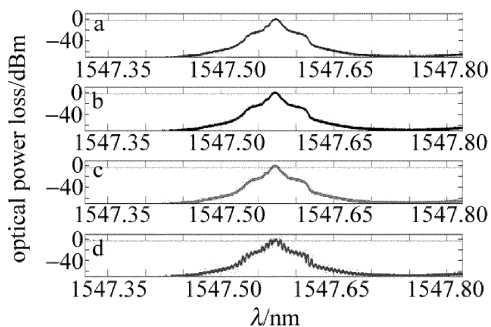


Fig. 5 Modulation spectrum with different drive current amplitudes
a—1mA b—2mA c—3mA d—4mA

从图 5a ~ 图 5d 可以看出,DFB 激光器调制对输出光谱的影响也存在阈值,大于该调制阈值后,激光器光谱才会受到调制电流调制。对于该 DFB 激光器 (FITELE) 调制幅度的阈值为 4mA。

将驱动频率不变,记录调制电流与光谱 3dB 带宽测量范围值结果如图 6 所示。

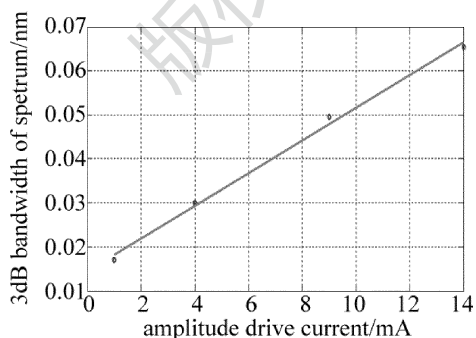


Fig. 6 3dB bandwidth with different drive currents and fitting curve

图 6 中圆点为测量数据,直线为拟合结果,对应的拟合方程为:

$$\Delta\lambda_{3dB} = 3.715 \times 10^{-3} I_a + 0.01444 \quad (13)$$

式中, $\Delta\lambda_{3dB}$ 代表 3dB 带宽实测结果, I_a 为驱动电流幅度。从该结果可知,驱动电流幅度变大,其结果为 3dB

光谱范围变宽,即驱动电流幅度增加,其 3dB 频谱宽度增加(3.715pm/mA),相干长度将变小。

DFB 激光器在实际使用中,不但注入电流调制幅度不同,还伴随有不同的调制频率,为了得到 DFB 激光器在不同调制频率下的表现情况,使其注入电流幅值保持恒定,中值电流为 50mA,调制幅度为 4mA,分别观测其在不同频率下频谱表现情况,如图 7 所示。

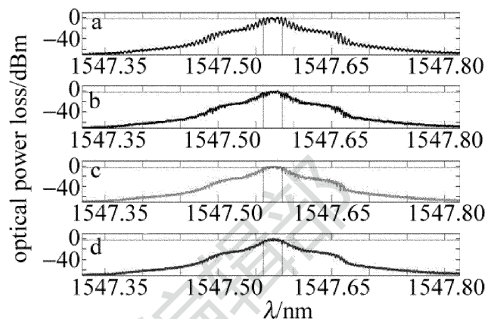


Fig. 7 3dB bandwidth with different drive frequencies
a—200Hz b—400Hz c—600Hz d—800Hz

由图 7 可以看出,在相同电流调制幅度情况下,改变调制信号的频率,对 DFB 激光器的 3dB 展宽宽度没有明显的影响。

3 结论

介绍了 DFB 激光器输出波长的调制机理,并对两种常用 DFB 激光器的电流-中心波长调制实验,得到了不同确定系数的拟合结果,实验结果说明,采用 2 阶非线性拟合对 DFB 输出波长的分析更加准确,但其 2 阶的影响因子比 1 阶的影响因子小 2 两个数量级,由此对采用线性拟合进行 DFB 激光器调制应用的理论分析提供支持;此外,还进行了驱动的频率改变、驱动幅度增加的实验,结果表明,激光器的调制是有阈值限定的, FITELE FRL15DCWD-A82 激光器的调制幅度与 3dB 光谱宽度之间关系为 3.715pm/mA,而调制频率不影响 3dB 光谱宽度。

根据所得实验结果和结论,可以为后续研究调制型 DFB 激光器在相干光路系统中的影响做定量分析,可为驱动电路设计、调制方式选择提供良好的理论依据与实验方案。

参考文献

[1] WANG L J, NING Y Q, QING L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Journal of Luminescence*, 2015, 36 (1): 1-19 (in Chinese).
 [2] SHI Y X. Study for distributed fiber optical strain monitoring system [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 13-29 (in Chinese).
 [3] LI Y, LIU Z, LIU Y, *et al.* Interferometric vibration sensor using phase-generated carrier method [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (25): 6359-6363.

- [4] ZOU D B, LIU H, ZHAO L, *et al.* Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1):86-89(in Chinese).
- [5] ZHANG J Sh. Research on simultaneous measurement system of temperature and strain distribution based on heterodyne detection of Brillouin scattering in optical fiber [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009;8-38(in Chinese).
- [6] WANG Y J, WANG Y T, WANG Zh D. Study on optical fiber detection system of methane gas[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, 29(2):148-149(in Chinese).
- [7] WANG G, XU T, LI F. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2093-2096.
- [8] TEIXEIRA J G V, LEITE I T, SILVA S, *et al.* Advanced fiber-optic acoustic sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(3): 198-208.
- [9] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [10] XU R H. Research on multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser and its application [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015; 13-42 (in Chinese).
- [11] GAO T. Research of DFB-FL and optimization of amplifier [D]. Ji'nan: Shandong University, 2015;8-26(in Chinese).
- [12] LIU J W. Research on the dynamic tuning characteristics of DFB lasers and its measurement methods [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012;12-77(in Chinese).
- [13] KIRKENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. *Journal of Physics*, 2004, D37(18): 197-216.
- [14] PENG J X. The research of linewidth measurement system of narrow linewidth laser [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015;7-41(in Chinese).
- [15] XIE D H, DENG D P, GUO L, *et al.* Line-width measurement method of narrow line width laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1):010006(in Chinese).
- [16] WANG M Y, SHENG L, TAO Y, *et al.* Effect of laser line-width on characteristics of -OTDR system [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4):615-618(in Chinese).
- [17] LIN W H, GAO Zh H, YANG Y, *et al.* NO₂ detection based on laser spectrum differential method [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6):835-838(in Chinese).