

文章编号: 0253-2239(2005)07-913-5

# 光调制技术测量半导体激光器固有高频响应\*

陈 诚 祝宁华 袁海庆

(中国科学院半导体研究所集成光电国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 采用一种新的全光纤连接的半导体激光器光调制技术, 实现了对高速半导体激光器固有响应的直接测量。利用速率方程能够对光调制的动态响应过程进行准确的描述。基于对抽运源和探测器的频率响应对光调制数据准确性影响的分析, 通过将网络分析仪校正到同轴端, 然后用直接扣除法和相互扣除法, 在网络分析仪外部对测量数据进行了修正。两种修正方法得到了一致的结果, 并且同已有的理论和实验结果相符合。改进后的光调制技术和两种修正数据的方法不但提高了数据的精确性, 而且扩展了测量的频率范围。

**关键词:** 光通信技术; 高速半导体激光器; 光调制技术; 固有高频响应; 抽运源; 探测器; 数据修正  
中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## Extraction of Intrinsic Response of Semiconductor Lasers Using Improved Optical Modulation Technique

Chen Cheng Zhu Ninghua Yuan Haiqing

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

**Abstract:** An improved all-fiber-connected optical modulation setup has been established for the direct measurement of the intrinsic frequency response of semiconductor lasers. The analytical expression of the dynamic response of high-speed semiconductor lasers has been deduced from the rate equations. The measurements have been made with a calibrated vector network analyzer (VNA), and the effects of the pump laser and photodetector have been removed from the measured data using direct-subtracting method and mutual-subtracting method. The accurate intrinsic frequency response of semiconductor lasers can therefore be obtained. The experiment shows that the results obtained using these two methods agree well as expected. It is not only an improvement of extracted data, but also an extension to the range of measurable frequency.

**Key words:** optical communication technology; high-speed semiconductor lasers; optical modulation technique; intrinsic response; pump laser; photo detector; data correction

## 1 引 言

半导体激光器作为现代光纤通信网络中最主要的光源, 其性能从很大程度上决定了信道中传输的光信号的质量, 而其在光网络中其他方面的应用也一直受到广泛的关注<sup>[1,2]</sup>。随着对通信速率需求的不断提高, 对半导体激光器的高频性能也提出了越来越高的要求。半导体激光器的高频性能同两个方面的限制因素有关<sup>[3]</sup>, 一方面的限制来源于封装所

引入的电寄生网络和芯片本身的寄生参量, 另一方面来源于半导体激光器固有频率响应的限制。前者的影响虽然无法完全消除, 但可以通过合理的芯片和封装设计降低; 后者由激光器谐振腔内激射模和增益介质相互作用的动态过程所决定, 它反映了激光器有源层的高频特性。固有响应决定了器件调制带宽的上限, 而且可以提供与有源层物理特征和生长器件的材料体系相关的信息, 因而对它的测量具

\* 国家 863 计划(2001AA312030, 2001AA312290)、国家 973 计划(G2000036601)和国家杰出青年基金(69825109)资助课题。

作者简介: 陈 诚(1980~), 男, 湖北宜昌人, 中国科学院半导体研究所硕士研究生, 主要从事半导体激光器的高频特性分析及其测试方面的研究。E-mail: chencheng@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2004-05-24; 收到修改稿日期: 2004-10-11

有实际应用和基础研究双重的重要意义。

光调制过程发生在有源区内<sup>[4]</sup>,不受外部寄生网络的影响,因而可以测得半导体激光器的固有响应。相比于另一种有源层光子混合技术<sup>[5]</sup>,光注入调制技术<sup>[4]</sup>的注入光束来自于一个被直接调制的抽运激光器的光束,虽然测量频率范围相对较窄,但可以利用网络分析仪方便地进行扫频测量。类似的技术及其改进方法<sup>[6,7]</sup>被用来测量半导体激光器的高频性能和获取相关参量。本文改进了光注入调制技术,在全光纤连接的实验系统中,实现了对半导体激光器固有高频响应的测量。

## 2 光吸收调制的原理

考虑了载流子输运、俘获、逃逸等过程,半导体量子阱激光器载流子与光子相互作用过程可用三个速率方程描述<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dN_B}{dt} = \frac{1}{eV_{SCH}} - \frac{N_B}{\tau_r} - \frac{N_B}{\tau_{nb}} + \frac{N_w V_w}{\tau_e V_{SCH}}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_B V_{SCH}}{\tau_r V_w} - \frac{N_w}{\tau_n} - \frac{N_w}{\tau_{nr}} - \frac{N_w}{\tau_e} - v_g G(N_w) S / (1 + \epsilon S), \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma v_g G(N_w) S}{1 + \epsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_w}{\tau_n}, \quad (3)$$

式中  $N_B$ 、 $N_w$ 、 $S$  分别为半导体激光器分别限制区(SCH区)和量子阱区的载流子密度,以及腔内光子密度; $\tau_{nb}$ 为载流子在SCH区总的复合寿命; $\tau_n$ 和 $\tau_{nr}$ 分别为载流子在量子阱区的辐射复合寿命和非辐射复合寿命; $\tau_p$ 为光子寿命; $\tau_r$ 为载流子通过SCH区到达有源层的传输时间; $\tau_e$ 为载流子从量子阱逃逸到SCH层的逃逸时间; $V_{SCH}$ 和 $V_w$ 分别为SCH区和量子阱的体积; $I$ 为注入电流, $e$ 为电子电荷; $v_g$ 为有源区光速, $\Gamma$ 为光限制因子, $\epsilon$ 为增益抑制因子, $G(N_w)$ 为有源区增益; $\beta$ 为自发辐射因子。

在有源区内有外部光束注入时,当注入光子能量能够被有源区吸收而不被SCH区吸收时,描述该过程只需要在(2)式左边添加一项由于注入光而产生的载流子密度项  $v_g \alpha_p S_p$ ,其中  $\alpha_p$  为有源区对于抽运波长的吸收系数, $S_p$  为注入光子密度。当激光器被偏置在阈值以上,即  $I(t) = I_0$ ,在小信号光注入下,采用小信号近似,根据上述被修改后的速率方程,归一化后的光调制的响应可近似写成

$$\frac{H(\omega)}{H(0)} = \frac{s(\omega)/s(0)}{s_p(\omega)/s_p(0)} = \frac{\omega_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j\omega\gamma}, \quad (4)$$

其中  $s$ 、 $s_p$  分别为被测激光器腔内光子浓度和注入光

子浓度的高频成分; $\omega_r$  为被测激光器的张弛振荡角频率, $\gamma$  为衰减率,两者与文献[8]中电调制小信号响应的相应量有着相同的形式,因此前者的平方同后者满足线性关系,其比例系数  $K$  是通常被用于描述半导体激光器的最大可能调制带宽。对于恒温下的同一激光器芯片而言,这两个量都只和偏置电流的大小有关。因此通过对激光器光调制响应的测量,将其同(4)式相拟合,就可以获得  $\omega_r$ 、 $\gamma$  和  $K$  因子等描述半导体激光器固有响应的参量,即得到其固有高频响应特性。

## 3 抽运源及探测器对测量结果的影响

图1所示为光调制的实验系统,图中粗实线表示同轴电缆。该系统利用网络分析仪 HP 8720D 进行光调制小信号扫频测试;采用直调的  $1.31 \mu\text{m}$  高速半导体激光器作为抽运源,并用环形器将光路中注入光和出射光分开;被测激光器波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,注入抽运光将被其有源层吸收,如图中细实线所示的单模光纤连接的光路。虚线表示另一条独立的光路,其作用将在下文中说明。通过前一光路,从网络分析仪端口1输出的微波扫频信号  $a_i$  注入抽运激光器后,产生被调制的高频抽运光信号,其功率  $P_p$  与注入光子浓度  $s_p$  成正比;该信号被耦合进被测激光器,使它的输出光受到调制,其中的高频信号(其功率  $P$  与腔内光子浓度  $s$  成正比)经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,被 New Focus 45 GHz 光探测器所探测,转变为输出波信号  $b_o$ 。因此根据文献[9]中对  $S$  参量的定义,网络分析仪测得的传输响应为:

$$S_{21} = \frac{b_o}{a_i} = \frac{P_p}{a_i} \times \frac{P}{P_p} \times \frac{b_o}{P} = G(\omega) \times H(\omega) \times R(\omega), \quad (5)$$

由此可见,归一化后的测量结果中将包含抽运源的

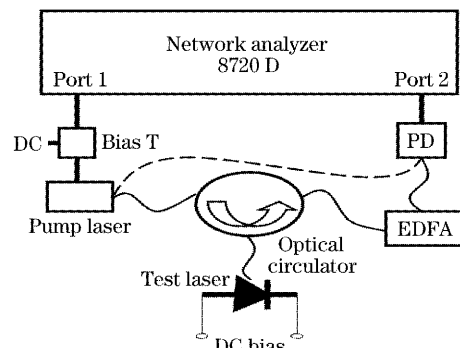


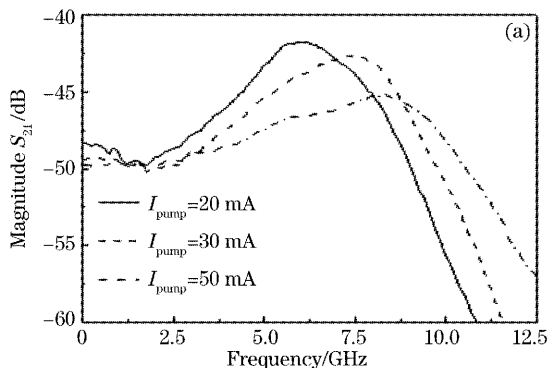
图1 光调制实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of optical modulation technique

响应  $G(\omega)$ , 光调制获取的被测激光器的固有响应  $H(\omega)$  和探测器的响应  $R(\omega)$ 。

由于半导体激光器固有响应带宽大于直接电调制带宽, 因而要求测量系统有尽可能大的响应频率范围。而在实验中, 虽然探测器的响应在较宽的范围可视为平坦, 但要获得平坦响应而且带宽很宽的抽运激光器却十分困难。因此通过使用带宽较宽而且相对平坦的调制光源, 从而将抽运源响应不平坦对测量带来的影响忽略的方法<sup>[6]</sup>, 其获取数据的精度依赖于抽运光源响应的平坦度, 同时这也使测量的频率范围限制在抽运源的平坦响应范围以内。

图 2(a) 所示为在相同的被测激光器的偏置电流 (50 mA) 下, 改变抽运激光器偏置电流后测得的光调制的响应曲线。从图上可见, 在抽运激光器的



偏置电流变化时, 光调制曲线的张弛振荡峰发生了明显的移动, 这将使在该偏流下, 通过测量所获取的被测激光器的  $\omega_r$  在不同的抽运光强下有不同的值。而  $\omega_r$  只同被测激光器的偏流有关, 与抽运光强无关。这说明(5)式中抽运激光器响应对光调制所获取的  $\omega_r$  的值有很大影响。图 2(b) 中实线为抽运激光器偏置电流为 50 mA 时, 被测激光器在不同的偏置电流下测得的光调制响应, 及其同理论公式(4)相拟合的结果。从图 2 中可见, 实验结果在低频部分和理论结果能够拟合时, 其高频部分则比理论预计有更快的衰减。这使衰减率  $\gamma$  难以确定而且很不准确。由此可见, 由于光调制测量结果中包含了抽运源和探测器的响应, 这必然会对光调制的测量结果造成理论拟合上的困难和数据提取中的误差。

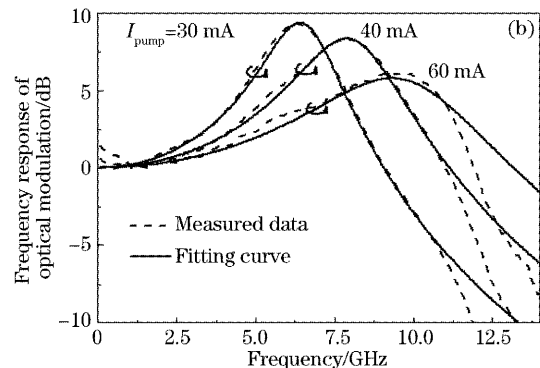


图 2 (a) 抽运源偏置电流的变化下的光调制结果, (b) 未经修正的光调制响应及其理论拟合曲线

Fig. 2 (a) The influence of the pump laser on optical modulation, (b) uncorrected optical modulation data and their fitting curves

#### 4 测量结果的修正

文献[2]采用了利用网络分析仪(VNA)自身的 thru 校准, 将抽运光由单模光纤直接接入探测器, 即图 1 中虚线所示的光路, 作为 thru 标准由网络分析仪记录下来, 在之后的测量中由网络分析仪内部算法将抽运源和探测器的影响扣除。但在这种修正方法下, 网络分析仪一旦记下 thru 的数据, 就认为这一数据恒定不变。这样一方面忽略了抽运源的响应可能在测量过程中因外界因素的影响而发生变化, 如较长时间工作后, 受热效应影响抽运源响应可能发生较大的变化。另一方面在实验过程中, 往往需要根据注入光耦合进被测激光器的情况, 来调节注入光强, 但在这种校准下, 每次改变抽运源偏置来改变注入光强时, 由于同时改变了抽运源的响应, 必须重新进行网络分析仪的校准, 使实验过程复杂。

由(5)式可见, 要从测量获得的数据中获取固有响应, 就要扣除抽运源和探测器的响应。而在网络

分析仪被校正到同轴端时, 通过图 1 中虚线所示的光路, 所测得的响应为

$$S'_{21} = \frac{b'_o}{a'_i} = \frac{P_p}{a_i} \times \frac{b'_o}{P_p} = G(\omega) \times R(\omega), \quad (6)$$

这正好是需要从测得的光调制数据中扣除的部分。因此, 用直接测量得到的光调制响应, 除以通过图 1 中虚线光路测量获得的抽运源和探测器的响应, 就可以修正光调制数据, 获得所需的固有响应。在以 dB 为单位时, 就是两者的相减。这就是直接扣除法。

图 3(a) 为测得的如(6)式表示的抽运源和探测器总的频率响应。从图中可见, 抽运源响应在 10~12 GHz 左右开始出现明显下跌, 这和图 2(b) 中理论拟合和实验数据开始出现差别的频段相同。这说明正是抽运源响应的下跌, 造成了图 2(b) 中理论拟合和实验数据的差别。图 3(b) 给出了图 2(b) 中响应曲线经修正后的结果以及同理论公式的拟合曲线。修正前的高频部分理论同测量之间的差异已不

存在,实验数据在 14 GHz 的范围内都同(4)式符合得非常好。这充分说明直接扣除法很好地消除了抽运源和探测器对光调制结果的影响,而且使测量的频率范围大大超过了抽运源响应的 3 dB 带宽[如图 3(a)].图 3(c)给出了不同的抽运偏置下的测试

结果的比较。图中横轴为从调制曲线中提取的  $\omega_r$  的平方,纵轴为衰减率。从图中可见,  $\omega_r$  的平方和  $\gamma$  基本满足理论预计的线性关系,而且在不同抽运源偏流下获得的线性关系是一致的,这同光调制结果不受抽运光强影响的理论推测相符合。

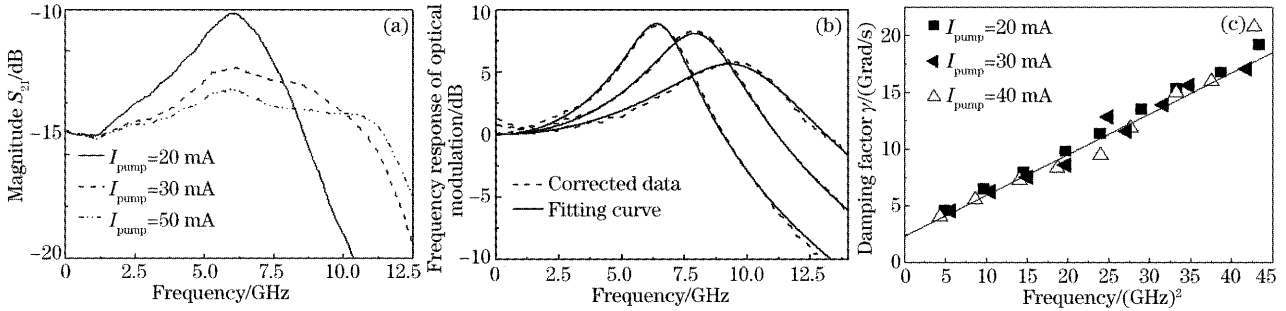


图 3(a) 抽运光源在不同偏置电流下的传输特性,(b)光调制响应曲线经直接扣除法修正后的结果及理论公式的拟合结果,(c)不同抽运源偏置电流下修正后的光调制响应的提取数据

Fig. 3 (a) Frequency response of the pump laser under different bias, (b) corrected optical modulation response using direct-subtracting method and the fitting curves, (c) corrected data extracted from optical modulation responses under different bias of the pump laser

由于在抽运源偏置电流不变时,改变被测激光器偏置电流得到的两条光调制曲线中所包含的抽运源和探测器的影响是相同的,即对于某一偏置电流下的被测激光器,其光调制测量结果为

$$S_{21}^a = \frac{b_o^a}{a_i^a} = \frac{P_p^a}{a_i^a} \times \frac{P_p^a}{P_p^a} \times \frac{b_o^a}{P^a} = G(\omega) \times H^a(\omega) \times R(\omega), \quad (7)$$

在改变被测激光器的偏置电流后,所得到的另一光调制测量结果为

$$S_{21}^b = \frac{b_o^b}{a_i^b} = \frac{P_p^b}{a_i^b} \times \frac{P_p^b}{P_p^b} \times \frac{b_o^b}{P^b} = G(\omega) \times H^b(\omega) \times R(\omega), \quad (8)$$

所以将两测量结果相除,即以 dB 为单位时的相减,可以得到

$$\frac{S_{21}^b}{S_{21}^a} = \frac{H^b(\omega)}{H^a(\omega)} = \frac{P^b/P_p^b}{P^a/P_p^a} = \frac{s^b/s_p^b}{s^a/s_p^a} = C * \left| \frac{\omega_r^{b2}(\omega_r^{a2} - \omega^2 + j\omega\gamma^a)}{\omega_r^{a2}(\omega_r^{b2} - \omega^2 + j\omega\gamma^b)} \right|^2, \quad (9)$$

式中  $C$  为常数,可在归一化中被消除。因此,在抽运源偏置电流保持不变时,通过对两条不同被测激光器偏置电流下测得的光调制结果相减,然后同(9)式拟合,就能够提取不受抽运源和探测器响应影响的激光器固有响应。这就是相互扣除法修正光调制结果的原理。

如图 4(a)所示,两条光调制测量结果相减的所得的曲线同(9)式很好地拟合。由于光调制结果存在较大噪声,因此这里所选择的相减的两条光调制曲线,还需要考虑两者有着相近的有效频率范围。

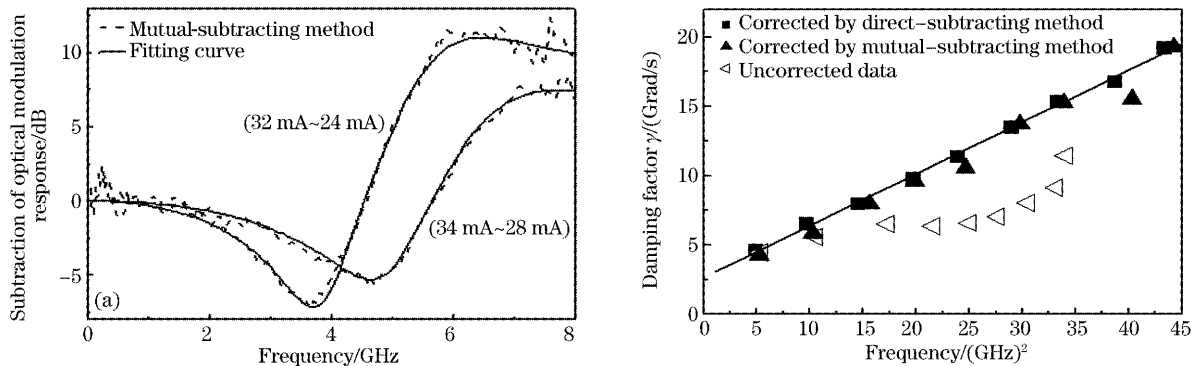


图 4 (a)互扣法修正光调制响应,(b)两种修正方法的修正结果的比较

Fig. 4 (a) Correcting data using mutual-subtracting method, (b) comparison between results of the two correcting methods

图 4(b)比较了抽运源偏置为 20 mA 下直接扣除法和互扣法修正结果。可见对于同样的一组光调制测量结果,两种方法修正的结果基本一致。对比未经修正的测量结果,可见两种修正方法的修正效果是显著的。

## 5 结 论

用全光纤连接的光调制技术实现了测量半导体激光器小信号固有高频强度调制响应,分析了抽运源和探测器的调制响应对测量结果造成的影响。针对已有的校准方法中存在的问题,提出了两种新的修正测量结果的方法。其中直接扣除法将校正过程在网络分析仪外部完成,从而降低了实验过程中抽运源响应的不稳定性给测量带来的误差,也方便了在实验过程中按需要调节抽运光强;互扣法则更为方便地解决了数据修正的问题,省去了前者所需的抽运源响应测量,甚至不需要对网络分析仪进行十分精确的校准。两种修正方法得到了符合理论预期的、并且是一致的结果,同时也使测量的有效频率范围大大加宽。这为光调制技术测量结果的准确性提供了保证,并为其应用提供了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Tonggang, Ren Jianhua, Li Wei *et al.*. Theoretical model analysis of wavelength conversion based on semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1071~1075 (in Chinese)  
赵同刚,任建华,李蔚等. 半导体激光器实现波长转换的理论模型分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1071~1075
- 2 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1122~1126 (in Chinese)  
王鸣,聂守平,李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
- 3 Rodney S. Tucker. High-speed modulation of semiconductor lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(6): 1180~1192
- 4 C. B. Su, J. Eom, C. H. Lange *et al.*. Characterization of the dynamics of semiconductor lasers using optical modulation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(1): 118~127
- 5 K. J. Vahala, Michael A. Newkirk. Parasitic-free modulation of semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(6): 1393~1397
- 6 D. C. Lin, H. H. Liao, J. W. Liew *et al.*. Measuring the intrinsic frequency response of a DFB laser diode using an all-fibre-connected optical modulation technique[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1223~1225
- 7 A. Moritz, R. Wirth, S. Heppel *et al.*. Intrinsic modulation bandwidth of strained GaInP/AlGaInP quantum well lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(5): 650~652
- 8 Radhakrishnan Nagarajan, Masayuki Ishikawa, Toru Fukushima *et al.*. High speed quantum-well lasers and carrier transport effects[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(10): 1990~2008
- 9 Paul D. Hale, Dylan F. William. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique*, 2003, **51**(4): 1442~1429