

文章编号: 0253-2239(2007)05-0871-4

直接扣除法测量半导体光放大器频率响应^{*}

刘 戡 胡永红 张尚剑 谢 亮 黄永箴 祝宁华

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在光电子器件散射参量定义的基础上建立了基于直接扣除法的半导体光放大器频率响应测量系统, 测量中通过扣除激光器和探测器系统的频率响应, 得到放大器固有的频率响应。对 InGaAsP 体材料行波腔半导体光放大器样品进行了测量, 得到了放大器在不同注入光功率和不同偏置电流下的频率响应曲线。这些曲线很好地反应了半导体光放大器的增益饱和和噪声特性, 进一步分析发现半导体光放大器对低频调制信号的放大能力弱于对高频信号的放大能力, 分析认为其原因在于半导体光放大器的载流子寿命有限导致低频信号长时间消耗载流子时, 载流子数量无法及时恢复, 从而使得增益降低。

关键词: 半导体光放大器; 频率响应; 直接扣除法; 增益饱和效应

中图分类号: TN247; TN29 文献标识码: A

Frequency Response Measurement of Semiconductor Optical Amplifiers Based on Direct-Subtracting Method

Liu Jian Hu Yonghong Zhang Shangjian Xie Liang Huang Yongzhen Zhu Ninghua

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

Abstract: A frequency response measuring system of semiconductor optical amplifiers based on direct-subtracting method is proposed according to the definition of scattering parameters of optoelectronic devices. By subtracting the frequency response of laser-photodetector system, the frequency response of an semiconductor optical amplifier its own can be obtained. With this system an InGaAsP traveling-wave semiconductor optical amplifier is measured under different input optical powers and different bias currents, and the frequency response curves are calculated. These curves indicate the gain saturation effect and the noise characters of the semiconductor optical amplifier. Moreover, it is shown that the signal gain of lower frequencies is less than that of higher frequencies. The reason is the carrier lifetime of semiconductor optical amplifier is limited. Lower-frequency signals have longer period to deplete carriers continuously, therefore the number of carriers cannot resume in time.

Key words: semiconductor optical amplifier; frequency response; direct-subtracting method; gain saturation effect

1 引 言

由于体积小、成本低并具有良好的单片集成特性^[1,2], 半导体光放大器 (Semiconductor optical amplifier, SOA) 在光通信系统中有着广泛的应

用^[3~5], 实现功率放大、中继放大和接收机前置放大等功能。在高速通信系统中, 理想的光放大器应该对信号实现无失真放大。而实际应用中由于半导体光放大器存在增益饱和、载流子响应速度有限、增益

^{*} 国家重点基础研究发展计划项目(G2006CB604902、2006CB302806)、基金委重大国际合作项目(60510173)和基金委重点项目(60536010)资助课题。

作者简介: 刘 戡(1981—), 男, 湖南人, 博士研究生, 主要从事高速光电子器件高频特性方面的研究。

E-mail: jliu@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高速光通信器件封装测试方面的研究。

E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

收稿日期: 2006-02-21; 收到修改稿日期: 2006-06-20

随注入光波长变化等性质,信号放大后会产生失真,且失真随输入波形不同而不同^[6]。在频域上表征为半导体光放大器对信号中不同频率分量的增益不同。目前一般文献中所提到的半导体光放大器的频率响应特性,都是指半导体光放大器的增益随入射光频率变化而变化^[7,8],而非本文关注的随信号调制频率的响应特性。文献[9]考察了半导体光放大器用作波长转换器时,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)对其调制信号频率响应带宽的影响,指出频率响应特性是半导体光放大器应用于通信领域时的重要参量。但文献[9]并未给出如何获取半导体光放大器固有的频率响应特性。

本文利用直接扣除法^[10]测量了半导体光放大器频率响应,得到了半导体光放大器的固有频率响应曲线,并对其频响特性进行了分析。

2 直接扣除法

图1所示为测试半导体光放大器频率响应特性的实验系统。矢量网络分析仪(Vector network analyzer, VNA)端口1输出的微波扫频信号 a_1 通过激光器调制到光上,调制光经可变衰减器、隔离器后(设其功率为 P_{in})进入半导体光放大器,放大后的调制光(设其功率为 P_{out})由光探测器转变为微波信号 b_2 送回矢量网络分析仪的端口2。

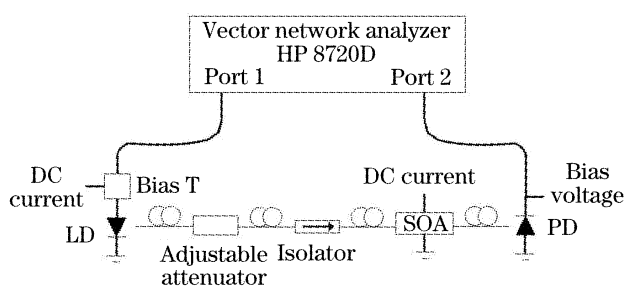


图1 半导体光放大器频率响应测量系统示意图

Fig. 1 Experimental setup for frequency response measurement of semiconductor optical amplifiers

根据文献[11]对光电器件 S 参量的定义,矢量网络分析仪测得的传输参量为

$$S_{21}^{LAR} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{P_{in}}{a_1} \times \frac{P_{out}}{P_{in}} \times \frac{b_2}{P_{out}} = H_L(\omega) \times H_{SOA}(\omega) \times H_R(\omega), \quad (1)$$

可见测量结果包含了激光器及衰减器、隔离器的响应 $H_L(\omega)$ 、半导体光放大器的响应 $H_{SOA}(\omega)$ 和探测器的响应 $H_R(\omega)$ 。为了得到半导体光放大器的固有响应 $H_{SOA}(\omega)$,应从上式表达的测量结果中扣除另两部分器件的响应 $H_L(\omega)$ 和 $H_R(\omega)$ 。

若在图1的测试系统中去掉半导体光放大器,令调制光信号从隔离器输出后直接进入探测器,则矢量网络分析仪测得的传输参量变为

$$S_{21}^{LR} = \frac{b'_2}{a_1} = \frac{P'_{in}}{a_1} \times \frac{b'_2}{P'_{in}} = H_L(\omega) \times H_R(\omega), \quad (2)$$

这正是(1)式中应该被扣除的部分。因此只需用(1)式的测量数据除以(2)式的数据,就可获得半导体光放大器的固有频率响应:

$$H_{SOA}(\omega) = S_{21}^{LAR} / S_{21}^{LR}, \quad (3)$$

或以dB表示为

$$H_{SOA}(\omega)[dB] = S_{21}^{LAR}[dB] - S_{21}^{LR}[dB], \quad (4)$$

这就是用以获取半导体光放大器固有频率响应的直接扣除法,不难看出该方法实现了对半导体光放大器高频测量的校准。

3 实验测量

实验中所用矢量网络分析仪为HP公司的8720D;激光器为Alcatel公司的EA集成DFB激光器,其直流偏置为80 mA,EA的偏压为-1 V;探测器为HP公司的11982A探测器;被测半导体光放大器为InGaAsP行波腔放大器(Traveling-Wave SOA, TW-SOA)。测量前用SOLT方法^[12]将矢量网络分析仪校准到同轴端口。

令可调衰减器分别引入0 dB、6 dB和12 dB的衰减,在每一个衰减值下,半导体光放大器注入不同电流时的幅度得到了测量,分别如图2(a)~图2(c)所示。取走半导体光放大器后在上述三个衰减值时的 S_{21}^R 的幅度也得到了测量,亦分别画于上述三图中。

利用(4)式处理了上述数据,得到半导体光放大器在上述不同衰减值下(亦即不同输入功率下)的固有频率响应 $H_{SOA}(\omega)[dB]$,分别如图3(a)~图3(c)所示。

4 结果分析

如图3所示,测量得到的半导体光放大器频响曲线有以下几个特点:

1) 对于相等的偏置电流,注入光功率越低(引入的衰减越大),信号增益越高。例如当偏置电流为130 mA时,衰减值为0 dB、6 dB和12 dB的10 GHz处的信号增益值分别为-1.5 dB、3.9 dB和9.6 dB。这显示了半导体光放大器的增益饱和效应^[8]。行波半导体光放大器的信号增益表达为

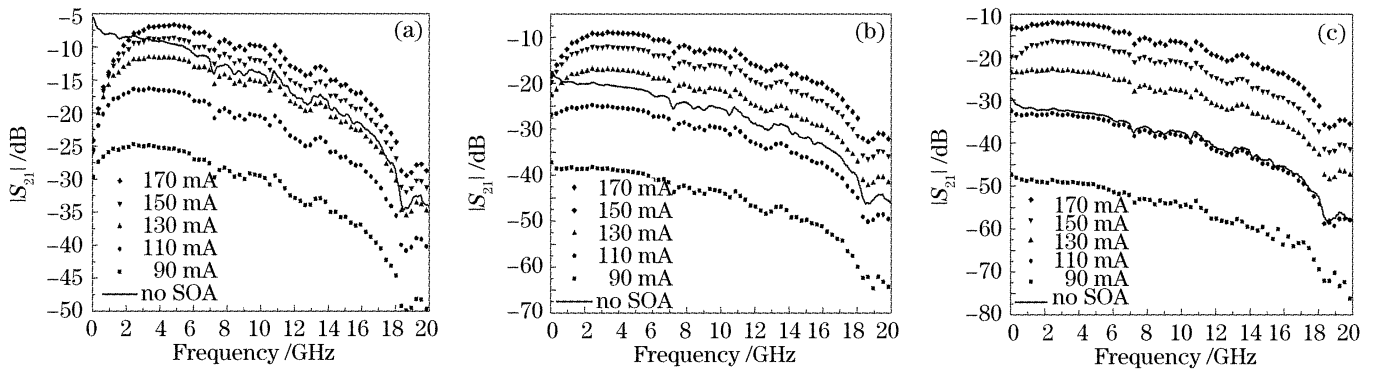


图 2 可调衰减器引入不同衰减时测得的 S_{21} 。(a) 0 dB, (b) 6 dB, (c) 12 dB

Fig. 2 Measured S_{21} under different introduced attenuation by adjustable attenuator. (a) 0 dB, (b) 6 dB, (c) 12 dB

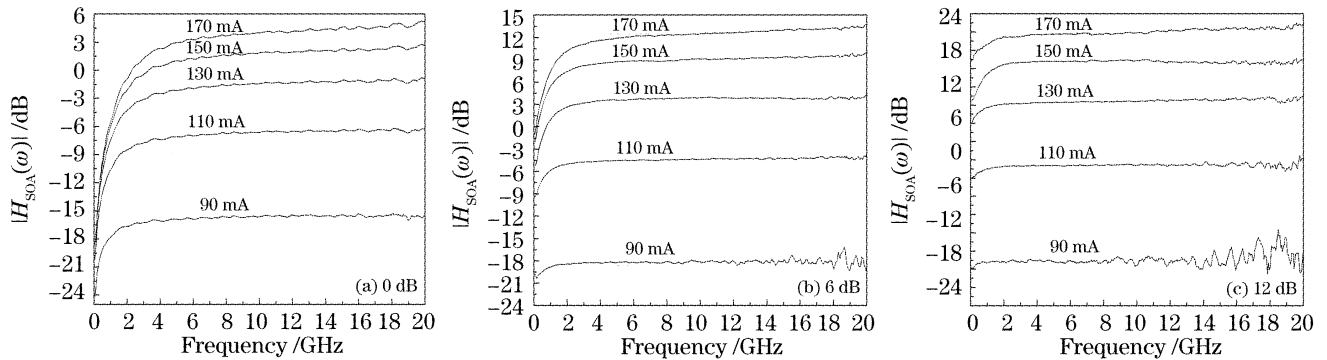


图 3 可调衰减器引入不同衰减时计算得到的半导体光放大器频响曲线。(a) 0 dB, (b) 6 dB, (c) 12 dB

Fig. 3 Calculated frequency response of the semiconductor optical amplifier under different introduced attenuation by adjustable attenuator. (a) 0 dB, (b) 6 dB, (c) 12 dB

$$G = \int_0^L \exp\{[\Gamma g(z) - \alpha]z\} dz, \quad (5)$$

其中 Γ 为有源区的模式限制因子, L 为有源区长度, α 为有源区的光损耗系数, $g(z)$ 则是有源区的光增益系数:

$$g(z) = \frac{g_0}{1 + P(z)/P_s}, \quad (6)$$

(6) 式中 $P(z)$ 为有源区的光功率, P_s 为饱和功率, g_0 为有源区的小信号增益系数, 它与有源区的注入电流 I 呈线性关系^[13]:

$$g_0 = \Gamma \sigma_g \left(\frac{I \tau_c}{qV} - n_{tr} \right), \quad (7)$$

其中 σ_g 为微分增益系数(又称增益截面), τ_c 为有源区载流子寿命, V 为有源区体积, n_{tr} 称为透明载流子浓度, 是有源区受激辐射速率等于受激吸收速率时的载流子浓度。正是 (6) 式分母的饱和项, 导致了上述特点的出现。

2) 对于相等的注入光功率, 偏置电流越高, 信号增益也越高, 但增益上升的幅度越小。以衰减 0 dB 时 10 GHz 的信号增益为例, 偏置 110 mA 时增益较 90 mA 时上升了 9.0 dB, 而偏置 170 mA 时增益较 150 mA 时则只上升了 2.1 dB。这仍然体现了

增益饱和效应。由 (7) 式可见, 小信号增益随注入电流线性增大, 但有源区内受激辐射的光子浓度也随着载流子浓度的增大而增大, 因此在 (6) 式的作用下, 信号增益会随偏置电流的增大而减幅增加并趋于饱和。

3) 注入光功率和偏置电流都很小的情况下, 高频响应特性将会恶化。例如衰减值为 12 dB、偏置电流为 90 mA 时, 频响曲线 12 GHz 之后出现了大幅度的波动。这是因为半导体光放大器的受激辐射强度已经减弱到和自发辐射强度相近的量级, 自发辐射噪声的频谱掩盖了信号频谱。此时半导体光放大器已无法起到信号放大作用(增益仅为 -18 dB), 噪声严重影响了频响特性。

4) 频响曲线在 3~20 GHz 范围内都较平坦, 而在 0~2 GHz 范围曲线随频率降低而下陷。进一步可以看出, 对于相等的偏置电流, 注入光功率越大, 低频段的下陷越严重; 而在相等的注入光功率下, 偏置电流越大, 下陷也越严重。本文认为其原因在于强度调制的注入光注入有源区时将载流子产生持续消耗; 由于有源区载流子寿命 τ_c 为纳秒量级, 对于低于 1 GHz 的信号, 其周期已经可以和 τ_c 相比拟, 因此在信号光强大于偏置光强的半周期内, 载流

子的消耗速度大于补充速度,这不仅会使增益下降,同时还将导致正弦波形畸变(由于矢量网络分析仪是扫频测量,在每个频率点,调制信号都是正弦信号),使得该频率分量的幅值降低。信号频率越低,周期越长,对载流子的消耗越多,从而增益越低;相反,当调制周期小于 τ_c 时,载流子浓度能够得到恢复,从而增益升高。偏置电流小的情况下,整体增益不高,因此低频段的下陷不明显;大的偏置电流下,高频段可获得更大的增益,因此低频段的下陷相比之下更为严重。

5 结 论

本文通过分析光电子器件的散射参量和传输函数,建立了基于直接扣除法的半导体光放大器频率响应测量系统。对 InGaAsP 体材料行波腔半导体光放大器在不同入射光功率和不同偏置电流下进行了测量,通过扣除激光器和探测器系统的频率响应,计算得到了半导体光放大器固有的频率响应曲线。这些曲线除了反映出半导体光放大器的增益饱和效应和噪声特性,还特别显示出半导体光放大器对低频信号的放大能力劣于对高频信号的放大能力,且注入光功率越高或偏置电流越大,这一现象越明显。由此可以看出,半导体光放大器的高增益和频率响应的平坦度是互为矛盾的指标。在光通信系统中应用半导体光放大器时,可通过本文提出的方法测量和分析半导体光放大器的频率响应特性,并考虑系统的要求是侧重于高增益还是侧重于信号保真,以决定半导体光放大器的注入光功率和偏置电流的大小。

参 考 文 献

1 Fengnian Xia, Jian Wei, Vinod Menon *et al.*. Monolithic integration of a semiconductor optical amplifier and a high bandwidth p-i-n photodiode using asymmetric twin-waveguide technology[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 452~454
2 Lianping Hou, Hongliang Zhu, Fan Zhou *et al.*. Monolithically

integrated semiconductor optical amplifier and electroabsorption [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**: 912~916
3 Wang Ying, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Novel all-optical and gate based on cross gain modulation in cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1433~1436 (in Chinese)
王 颖, 张新亮, 黄德修. 基于级联半导体光放大器中交叉增益调制效应的新型全光逻辑与门[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1433~1436
4 Teng Xiang, Zhang Hanyi, Guo Yili *et al.*. Performance optimization of the wavelength converter based on cross-polarization-modulation in SOA[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 810~814 (in Chinese)
滕 翔, 张汉一, 郭奕理等. 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的波长转换器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 810~814
5 Dai Kehui, Zhang Xinliang, Xu Fan *et al.*. Actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation effect of semiconductor optical amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 293~297 (in Chinese)
戴科辉, 张新亮, 徐 帆等. 基于半导体光放大器交叉增益调制效应的主动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 293~297
6 Li Lijun, Lin Hongrong, Chi Xiaoling. The pulse distortion in gain saturated semiconductor optical amplifier [J]. *Study on Optical Communications*, 2002, **109**: 53~57 (in Chinese)
李利军, 林洪榕, 迟晓玲. 脉冲在增益饱和半导体光放大器中的畸变[J]. *光通信研究*, 2002, **109**: 53~57
7 Takaaki Mukai, Yoshihisa Yamamoto. Gain, frequency bandwidth, and saturation output power of AlGaAs DH laser amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(6): 1028~1034
8 Tadashi Saitoh, Takaaki Mukai. 1.5 μm GaInAsP traveling wave semiconductor laser amplifier[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(6): 1010~1020
9 Hsiao-Yun Yu, Daniel Mahgerefteh, Pak S. Cho *et al.*. Optimization of the frequency response of a semiconductor optical amplifier wavelength converter using a fiber Bragg grating[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(2): 308~315
10 Chen Cheng, Zhu Ninghua, Yuan Haiqing. Extraction of intrinsic response of semiconductor lasers using improved optical modulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 913~917 (in Chinese)
陈 诚, 祝宁华, 袁海庆. 光调制技术测量半导体激光器固有高频响应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 913~917
11 Paul D. Hale, Aylan F. William. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory Technol.*, 2003, **51**(4): 1422~1429
12 Ning Hua Zhu, Chen Qian, You Lin Wang *et al.*. Frequency limitation in the calibration of microwave test fixtures[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2003, **51**(9): 2000~2006
13 Govind P. Agrawal. *Lightwave Technology: Components and Devices* [M]. Hoboken, NJ: John Wiley, 2004. 212