

高速光探测器频率响应的精确表征

温继敏 伞海生 黄亨沛 谢亮 祝宁华[†] 赵玲娟 王圩

(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: 提出一种新的基于分布布拉格反射可调激光器的光外差频率响应测试系统, 并给出了准确有效的校准方法来消除输出光功率和拍频线宽的波动等引起的误差, 从而可以精确表征高速光探测器的频率响应特性. 通过对标准高速光探测器的测试和校准, 得到的结果与制造商提供的数据表相当符合, 证明了该测试方法的准确性和有效性. 文中也研究了系统中可能会影响频率特性测量的其他因素, 如光源的边模抑制比、波长调谐速度等.

关键词: DBR 可调激光器; 光外差技术; 频率响应; 高速光探测器

EEACC: 7230

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)09-1630-05

1 引言

高速光探测器是光传输和光信号处理系统中的基本元件, 然而随着光探测器的带宽超过几十 GHz, 其频率响应特性的精确表征变得越来越难. 最近二十年来发展的频率响应测试方法有四大类: 网络分析仪频率扫描测试法^[1]、光脉冲频谱分析法^[2]、干涉的频率调制边带谱分析法^[3]和光外差法^[4]. 前三种方法都存在不同程度的局限性^[5], 将越来越难于满足频率响应测试的宽带要求.

已经证明光外差法是一种有效的方法^[4-7], 其优点在于不需要额外的校准光源(在所测频带上频率响应特性已知或者相当平坦), 就可测试光探测器的宽带频率响应. 然而, 传统的光外差测试系统需要两只频率匹配和频率稳定性要求苛刻的激光器^[8], 因而需要一套精密的温度监控系统或机械微调装置; 且环境对任何一个光源的相对扰动都会带来拍频频率的漂移, 因此系统复杂而且稳定性差. 本文提出了一种基于分布布拉格反射 (DBR) 可调激光器的光外差测试系统, 系统简单可靠, 并针对不同情况, 提出了两种误差校准方法, 光功率和拍频信号线宽波动的误差可以通过校准被消除, 因而测试精度大大提高. 通过对标准高速光探测器的测量, 实验结果证明了校准方法的有效性.

2 测试系统和校准原理

2.1 测试系统

图 1 是本文提出的光外差频率响应测试系统的

示意图, 主要由 DBR 可调光源、光纤环形干涉仪、探测分析装置以及 GPIB 控制部件四部分组成. 其中最显著的特征是, 仅用一只 DBR 可调激光器就替代了传统光外差测试系统中的两只频率匹配和频率稳定性要求苛刻的激光器. 本文采用的四段式 1.5 μm 多量子阱 (MQW) DBR 可调激光器, 由有源增益区 (active)、前/后布拉格光栅区 (Bragg)、相区

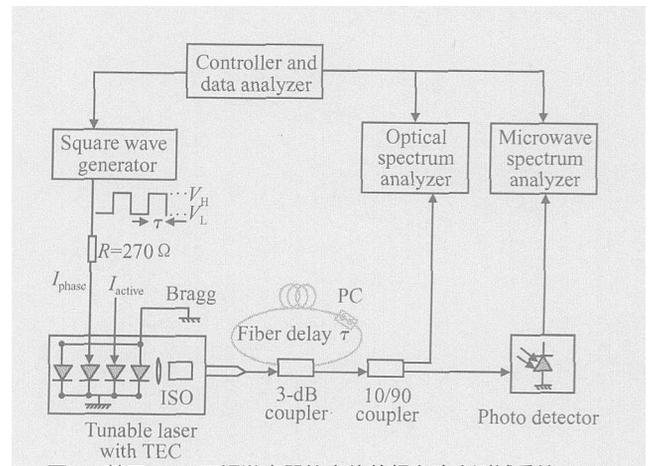


图 1 基于 DBR 可调激光器的光外差频率响应测试系统
Fig. 1 Frequency response measurement system using heterodyne method based on DBR tunable laser

(phase) 组成. 在有源增益区注入稳定的低噪声直流源, 布拉格光栅区短接到地, 采用 Agilent 33250A 函数波形发生器产生幅度和频率连续可调的方波电压信号, 通过 270 Ω 的分压电阻加载到激光器相区, 使得激光器的输出光周期性地位于两个不同的频率. 光纤环形干涉仪为约 1.8km 的 G653 单模光纤.

[†] 通信作者. Email: nhzhu@red.semi.ac.cn

调节方波的半周期 $= 9\mu s$, 恰好等于干涉仪时延臂引入的额外延时. 两束频率差固定的光保持同步, 并耦合到待测光探测器的光敏面进行混频. 产生的拍频信号的中心频率 ν_b 可以通过控制方波信号的幅度来实现连续可调. 拍频信号的功率谱由 Advantest 公司的 R3182 频谱分析仪 (已从 $0 \sim 40\text{GHz}$ 校准到同轴输入端) 记录, 可以读出峰值功率 $P_b(\nu_b)$ 和功率谱线宽 $\Delta\nu_b$. 由 Advantest 公司的 Q8384 光谱分析仪记录对应两个波长的光强 P_1 和 P_2 , 这样可以通过下文提出的校准方法来消除光功率和拍频信号线宽波动的误差. 在干涉仪时延臂上加偏振控制器, 是为了消除两束光的偏振方向夹角 ϕ 不同对结果的影响. 实验中, 为了抑制光反射的不利影响, DBR 可调激光器的尾纤装有隔离度大于 30dB 的隔离器. 待测光探测器为 Agilent 11982A.

为了获得连续可调的拍频信号, 先考察 DBR 可调激光器相区的波长调谐特性. 从图 2(a) 可以看出, 当 DBR 可调激光器相区的外加电压在 $150 \sim 990\text{mV}$ 之间时, 波长在 $1575.957 \sim 1575.496\text{nm}$ 连续可调, 对应的拍频信号扫描范围达到了 56GHz . 我们只需选取其中一段, 比如固定方波电压信号的

高电平 V_H 为 600mV , 低电平 V_L 从 600mV 调节到 300mV , 相应地, 拍频信号扫描的范围为 $0 \sim 30\text{GHz}$. 图 2(b) 即为 DBR 可调激光器的相区加载该方波电压后的输出光谱. 可以看出边模与主模的波长差超过了 0.5nm , 因此边模与主模的拍频频率超过了 60GHz ; 而且, 即使有某两个边模之间的拍频频率可能会等于主模之间的拍频频率, 由于边模抑制比大于 29dB , 边模引起的影响也是可以忽略的.

另外, 在每个调谐周期, 拍频实际上都会经历一个动态过程, 考察这一过程, 需测量 DBR 可调激光器的波长调谐速度. 实验表明, 当调谐频率低于 3MHz 时, 可调激光器的光波长都是很稳定的. 调谐方波周期为 $18\mu s$, 在这么长的持续时间内, 输出光波长绝大部分都处在稳态, 因而由 DBR 可调激光器的波长瞬态转换引起的误差也是可以忽略的.

2.2 校准原理

在光外差探测技术中, 两束频率差为 ν_b 的光场耦合到光探测器的光敏面进行混频, 由频谱仪测量到的拍频功率谱峰值可表示为^[7]:

$$P_b(\nu_b) = \left(\frac{e}{h}\right)^2 E_1^2 E_2^2 R_L \cos^2 \phi F^2(\nu_b) S_b(\nu_b) d \quad (1)$$

式中 e 是电子电荷; η 是量子效率; h 是光子的能量; ϕ 是两束光极化方向的夹角; ν_b 为拍频功率谱的中心频率; $F(\nu_b)$ 是光探测器的频率响应函数; $S_b(\nu_b)$ 为拍频信号的归一化功率谱型; $R_L = 50 \Omega$ 为频谱分析仪的输入阻抗; B 为频谱仪的分辨率带宽.

一般认为半导体激光器为 FM 型噪声谱线加宽, 其相位随机扰动可近似为高斯白噪声, 光谱谱线为罗仑兹型, 混频后输出的拍频信号功率谱可表示为^[8,9]:

$$S_b(\nu_b) = \frac{b}{2 \left\{ (\nu_b - \nu_c)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 \right\}} \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu_b$ 为拍频功率谱的线宽, 等于两激光器的线宽之和. 因此, 由频谱仪测量到的拍频功率谱峰值可表示为:

$$P_b(\nu_b) = \left(\frac{e}{h}\right)^2 E_1^2 E_2^2 R_L \cos^2 \phi F^2(\nu_b) \times \frac{b}{2 \left\{ (\nu_b - \nu_c)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 \right\}} d \times \left(\frac{e}{h}\right)^2 \times P_1 P_2 R_L \cos^2 \phi F^2(\nu_b) \arctan \frac{B}{b} \quad (3)$$

综上所述, 如果拍频信号连续可调, 且同时保持两束光偏振方向夹角 ϕ 恒定, 并同步检测两束光强和拍频功率谱线宽 $\Delta\nu_b$ 的变化, 就能够得到光探测

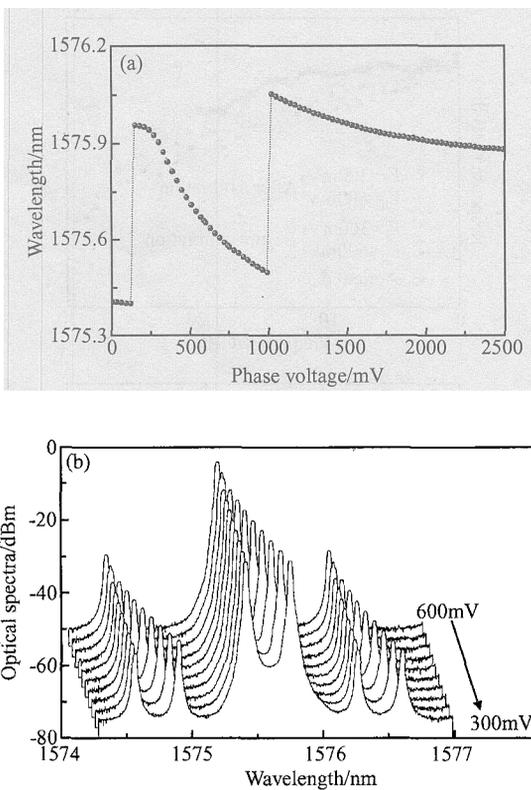


图 2 DBR 可调激光器的波长(a)和光谱(b)随相区电压的变化
Fig.2 Measured wavelengths (a) and spectra (b) of DBR tunable laser as functions of the phase voltage

器的频率响应函数：

$$F(f) = C \times \left| \frac{P_b(f)}{E_1^2 E_2^2 \arctan(B/f)} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

3 实验和结果

图 3(a) 为频谱仪记录的拍频信号功率谱. 从中可以读出峰值功率 $P_b(f)$ 和功率谱线宽 b , 对应于高低电平的两个波长的光强 P_1 和 P_2 , 如图 3(b) 所示. 当然, 采取另外一种扫频方式, 固定方波电压信号的低电平 V_L 为 300mV, 高电平 V_H 从 300mV 调节到 600mV, 也可以得到 0 ~ 30GHz 的拍频信号, 测试结果如图 4. 两种扫频方式下由公式 (4) 校准得到的光电探测器的频率响应函数 $F(f)$, 与 Agilent 公司提供的频率响应数据对比如图 5(a) 所示. 可以看出直接用这两种扫频方式记录的拍频功率谱峰值有很大的不同, 但经过校准之后, 得到的频率响应函数 $F(f)$ 与 Agilent 公司提供的数据相当符合, 表明了该方法的精确性, 从而验证了本文提出的光外差频率响应测试方法的有效性.

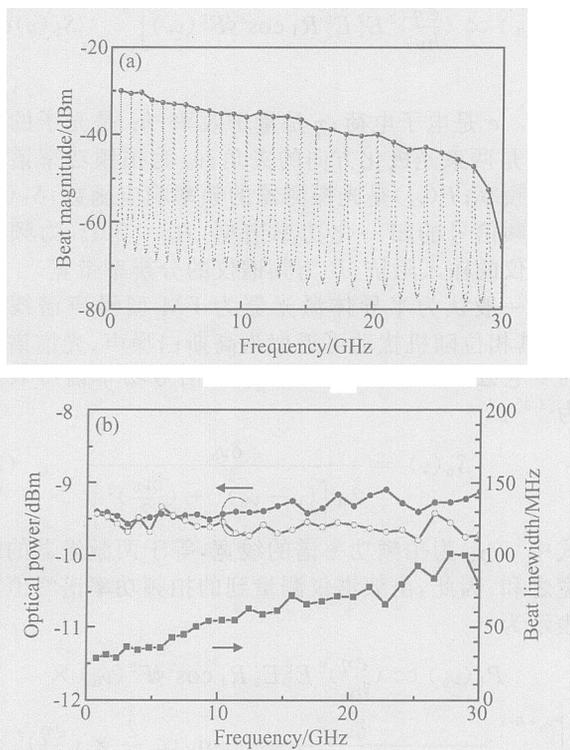


图 3 (a) 拍频信号的功率谱, 高电平固定为 600mV; (b) 拍频信号的功率谱线宽以及对应于高低电平的两个波长的光强
Fig.3 (a) Measured magnitude of the beat signals, where V_H is fixed at 600mV; (b) Measured linewidth of the beat signals and optical peak power of two wavelengths corresponding to V_H and V_L

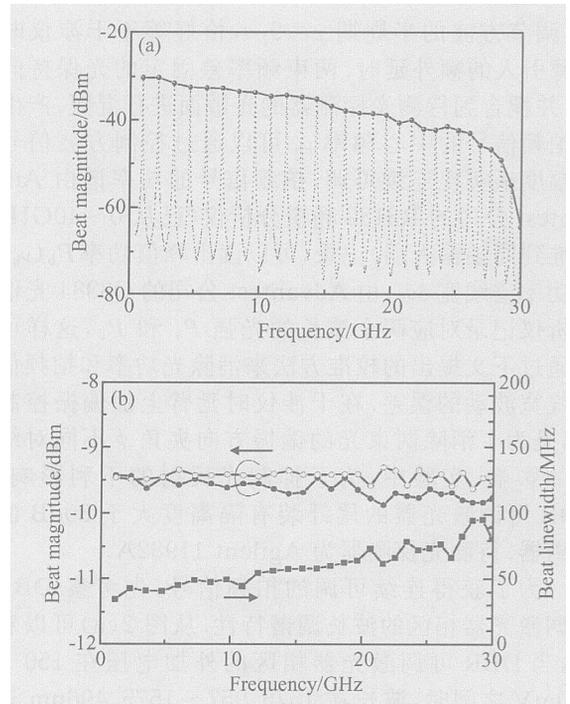


图 4 与图 3 类似, 低电平固定为 300mV
Fig. 4 Similar to Fig. 3, but V_L is fixed at 300mV

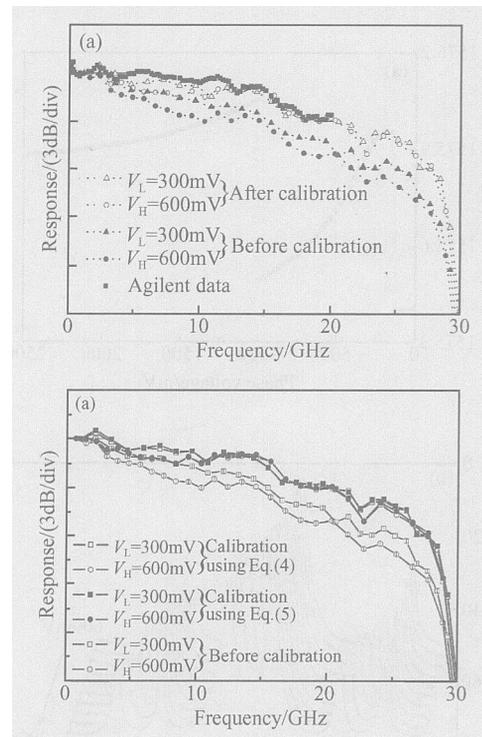


图 5 (a) 用公式 (4) 校准得到的频率响应函数, 与 Agilent 公司的数据对比; (b) 分别用公式 (4) 和 (5) 校准得到的频率响应函数
Fig. 5 (a) Calibrated frequency responses by Eq. (4), compared with the data provided by Agilent; (b) Calibrated frequency responses by Eqs. (4) and (5)

4 讨论

公式(4)是基于光谱谱线为罗仑兹型的假设导出的,然而,对于 DBR 可调激光器,还必须考虑到注入条件对线宽的影响^[10-12]. 这主要是由于相区注入的方波电信号会导致外微分子效率变化,其次还有由有源增益区和布拉格光栅区引入的电噪声. 因此,拍频信号可能偏离罗仑兹线型. 这种情况下,应该用光谱仪记录的拍频谱型进行校准. 公式(4)变为:

$$F(\nu_b) = C \times \left| \frac{P_b(\nu_b)}{E_1^2 E_2^2 \frac{\nu_b + B_0}{\nu_b - B_0} S_b(\nu_b) d} \right|^2 \quad (5)$$

这里 B_0 是实测线型的 6dB 线宽; $S_b(\nu)$ 是实测到的拍频谱型. 校准后的频率响应可以通过公式(5)得到. 用这种方法校准图中的测量数据,得到的频率响应函数如图 5(b)所示. 可以看出,与公式(4)提出的校准方法相比,所得结果相当一致,也就是说,对于实际应用来说,公式(4)提出的简单校准方法已经有足够的精度.

5 结论

本文提出的新的光外差测试系统与传统光外差系统相比,产生拍频的两束光来自于同一个激光器,削弱了由于环境扰动造成的拍频频率漂移,因而增强了系统的稳定性. 通过我们提出的两种校准方法,有效消除了输出光功率和拍频线宽的波动引起的误差,因而与传统光外差系统相比,对光源频率、线宽以及功率的稳定性要求大为降低. 总之,本文提出的测试和校准方法,结构简单、系统可靠、结果精确,其潜在带宽仅受限于所采用的频谱分析仪的带宽,可以用于精确表征高速光探测器的频率响应特性. 另外,本文提出的测试系统稍作改进即可用于测试 DBR 可调激光器在不同工作条件下的线宽,从而可

以全面描述线宽和增益区电流、布拉格光栅区电流以及相区电流三者的关系.

参考文献

- [1] Blauvelt H, Thurmond G, Parsons J, et al. Fabrication and characterization of GaAs Schottky barrier photodetectors for microwave fiber optic links. *Appl Phys Lett*, 1984, 45(3): 195
- [2] Shao Y, Gallawa R L. Fiber bandwidth measurement using pulse spectrum analysis. *Appl Opt*, 1986, 25(7): 1069
- [3] Eichen E, Silletti A. Bandwidth measurements of ultrahigh-frequency optical detectors using the interferometric FM sideband technique. *IEEE J Lightwave Technol*, 1987, LT-5(10): 1377
- [4] Tan T S, Jungerman R L, Elliott S S. Optical receiver and modulator frequency response measurement with a Nd:YAG ring laser heterodyne technique. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1989, 37: 1217
- [5] Kawanishi S, Saruwatari M. A very wide-band frequency response measurement system using optical heterodyne detection. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1989, 38(8): 569
- [6] Hawkins R T, Jones M D, Pepper S H, et al. Comparison of fast photodetector response measurements by optical heterodyne and pulse response. *J Lightwave Technol*, 1991, 9(10): 1289
- [7] Hou S, Tucker R S, Koch T L. High-speed photodetector characterisation by delayed self-heterodyne method. *Electron Lett*, 1989, 25(24): 1632
- [8] Kawanishi S, Takada A, Saruwatari M. Wide-band frequency-response measurement of optical receivers using optical heterodyne detection. *J Lightwave Technol*, 1989, 7(1): 92
- [9] Abramski K M, Rodzen W, Kaczmarek P R, et al. Laser diode linewidth measurements. *Proceedings of 5th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2003, 2: 87
- [10] Dum G H, Gallion P. Drive current noise induced linewidth in tunable multielectrode lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3(4): 302
- [11] Signoret P, Myara M, Turrenc J P, et al. Bragg section effects on linewidth and lineshape in 1.55- μm DBR tunable laser diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(6): 1429
- [12] Turrenc J P, Signoret P, Myara M, et al. Low-frequency FM-noise-induced lineshape: a theoretical and experimental approach. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, 41(4): 549

Accurate Characterization for the Frequency Response of High-Speed Photodetectors

Wen Jimin, San Haisheng, Huang Hengpei, Xie Liang, Zhu Ninghua[†],
Zhao Lingjuan, and Wang Wei

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

Abstract: A novel optical heterodyne system with a distributed Bragg reflector (DBR) tunable laser is proposed, and an efficient calibration method is also put forward for removing errors caused by the fluctuations of optical power and the linewidth of the beat signal. Accurate frequency response of high-speed photodetectors can be obtained with this method. Results calibrated by our method agree well with data provided by the manufacturer, thereby demonstrating the accuracy and effectiveness of this method. Side-mode suppression ratios and dynamic behavior of wavelength transients, which probably affect the measurement of frequency response, are also investigated.

Key words: DBR tunable laser; optical heterodyne; frequency response; high-speed photodetector

EEACC: 7230

Article ID: 0253-4177(2006)09-1630-05

[†]Corresponding author. Email: nhzhu@red.semi.ac.cn