

文章编号: 0253-2239(2005)11-1497-4

基于光外差技术的超宽带频率响应测量系统*

伞海生^{1,2} 温继敏¹ 刘 戩¹ 谢 亮¹ 祝宁华^{1**}

(¹ 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)
(² 兰州大学磁学和磁性材料教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 介绍了一种利用光外差技术测量光电探测器超宽带频率响应的测试方法。将一个可调谐外腔激光器和一个固定波长的分布反馈激光器(DFB-LD's)产生的激光输入到光电探测器进行混频。通过对可调激光器腔长的控制,可以在光电探测器产生从 DC 到上百 GHz 的拍频信号,在无需额外校准光源的情况下就可以进行光电探测器超宽带频率响应特性的测试,这是该方法最突出的优点。实验证明该方法比较准确、简便、易于操作。在实验中,对两个不同的 InGaAs p-i-n 探测器进行测量,得到器件的 3 dB 带宽分别为 14.4 GHz 和 40 GHz。该测量方法对同类实验的研究和应用都具有实用意义。

关键词: 探测器; 光外差技术; 超宽带频率响应; 拍频

中图分类号: TN247; TN29 文献标识码: A

Measurement System of Ultra-Wideband Frequency Response Based on Optical Heterodyne Technique

San Haisheng^{1,2} Wen Jimin¹ Liu Jian¹ Xie Liang¹ Zhu Ninghua¹

(¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083
² Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Material of Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: An ultra-wideband frequency response measurement system for optoelectronic devices has been established using the optical heterodyne detection method utilizing a tunable laser and wavelength-fixed distributed feedback-laser diode. By controlling the laser diode cavity length, the beat frequency is swept from DC to beyond 100 GHz, and ultra-wideband frequency response character can be measured without using any high-speed light modulation source and additional calibration. This is the major advantage of this method. In the measurement, two InGaAs p-i-n detectors have been tested, and their 3 dB bandwidths are 14.4 GHz and 40 GHz, respectively. Experiments show that this method is accurate and easy to carry out. Finally, several suggestions for improving measurement accuracy are given.

Key words: detector; optical heterodyne technique; ultra-wideband frequency response; beat frequency

1 引 言

随着数字光通信的发展,对于快速光波的测量无论在理论研究和实际应用上都已变得十分重要。随着信道速率的提高,作为光通信系统的核心器件—高速光电探测器(诸如 GaAs、InGaAs 等半导体光电二极管)应该具有更高的响应度和更快的响应率^[1,2]。现今,已报道的 PIN 探测器可以同时达到

0.85 A/W 的响应度和 50 GHz 的带宽^[3]及 1.02 A/W 和 48 GHz 的带宽^[4]。然而,要精确测量带宽超过 20 GHz 的频率响应是很难的。目前,测量光电器件的频响有好几种方法(如扫频法、时域法、干涉 FM 边带法、白噪音法等),但它们都不具有超宽带测量能力(>20 GHz)。传统的扫频法测量受限于三个方面的因素:1)可校准的调制频率范围;2)光

* 国家 863 计划(2004AA31g220)、国家 973 计划(G2000036601)和基金委重大国际合作项目。

作者简介: 伞海生(1970~),男,吉林人,博士研究生,主要从事高速光电子器件封装和测试的研究。

** 通信联系人。E-mail: nhzhu@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2005-01-05; 收到修改稿日期: 2005-03-04

源或调制器对调制频率的响应,即采用直接调制或外调制都要求激光器或调制器的已知频响带宽大于光电探测器的带宽;3)光源或调制器在带宽以内的平坦度。如果波动较大,则要从测量的频响中扣除它们的影响才能得到真实的探测器响应。利用时域的测量方法受限于皮秒级的光脉冲的产生和采样与计算所带来的误差^[5];利用干涉 FM 边带方法要覆盖 20 GHz 以上的频率则受大的、可调谐的调制深度的限制,并通过计算得到频响^[6]。

近年来,利用光源的相干特性测量带宽的技术-光外差宽带频率响应测量法已经被证明是一种准确、可靠和行之有效的方法^[7,8]。尤其是波长可调激光器的产生极大地降低了测试系统的复杂性,为这一技术在超宽带频响测量领域铺平了道路。外差技术优点在于不需要已知光源的频率响应或平坦度,通过差拍的信号测量光电探测器的频响。由于拍频信号频率可以从几 DC 到上百 GHz 变化,所以可以完成超宽带频响测量的任务。本文在阐述光外差频率响应测量原理的基础上,提出了使用分布式反馈激光器和外腔可调激光器建立光外差测量系统,给出了测量条件和对 15 GHz 和 45 GHz 带宽的两个探测器进行测量的结果,并提出了改进意见。

2 光外差测量原理

在外差探测技术中,两束频率相差 ω_b 的激光束准直到光电探测器表面,每一个线性极化的输出光束的接收光场可写为

$$\begin{cases} E_1 \cdot \exp(j\omega_1 t) \\ E_2 \cdot \exp[j(\omega_1 + \omega_b)t] \end{cases} \quad (1)$$

E_1 和 E_2 分别是光场的强度, ω_1 是激光器的频率, ω_b 是两束光波的频率差。两束光在探测器表面混频后其强度可表达为

$$I(t) = E_1^2 + E_2^2 + 2\cos\phi \cdot E_1 E_2 \cos(\omega_b t), \quad (2)$$

由于光电接收器的频响远跟不上极高的光频,故上述光强表达式中已略去和频项及二倍频项,仅保留差频项。 ϕ 是两束光波极化方向的角度。光电流因此可写为

$$i_c(t) = \frac{e\eta}{h\nu} [E_1^2 + E_2^2 + 2F(\omega_b) \cos\phi \cdot E_1 E_2 \cos(\omega_b t)], \quad (3)$$

上式中, e 是电子电荷, η 是量子效率, $h\nu$ 是光子的能量, $F(\omega_b)$ 是探测器的频率响应函数。式中的最后一项就是频率为 ω_b 的拍频信号。

因此,由频谱仪测量到的拍频信号功率为^[9]

$$P(\omega_b) = 2 \left(\frac{e\eta}{h\nu} \right)^2 E_1^2 E_2^2 R_s \cos^2\phi \cdot F^2(\omega_b) \int_{\omega_b - \pi B}^{\omega_b + \pi B} \frac{\Delta\omega}{2\pi[(\omega - \omega_b)^2 + (\Delta\omega/2)^2]} d\omega = 2 \left(\frac{e\eta}{h\nu} \right)^2 E_1^2 E_2^2 R_s \cos^2\phi \cdot F^2(\omega_b) \arctan\left(\frac{2\pi B}{\Delta\omega}\right), \quad (4)$$

其中 R_s 是频谱仪的输入阻抗, B 是频谱仪的分辨率带宽, $\Delta\omega$ 是拍频信号的线宽(FWHM)并且等于两个激光器线宽之和。从上式可见,当调谐其中一束激光器的频率同时保持另一激光器的频率不变时,其差频信号 ω_b 可以扫过从 DC 到上百 GHz 的频率范围,如果保持两个激光器的输出功率 E_1 和 E_2 、偏振方向夹角 ϕ 和线宽 $\Delta\omega$ 恒定的测试条件,就可以从频谱仪测出探测器的频率响应 $F(\omega_b)$ 。

3 实验装置

图 1 为实验使用的光外差测量系统结构示意图。该系统所选择的参考光源为 1550 nm 分布式反馈蝶形封装的激光器,由于温度的变化对 DFB-LD 的输出光波频率的影响约为 10 GHz/(°),所以在 LD 的下面有珀耳帖制冷器防止温度变化带

来的频偏。在光被耦合到单膜光纤之前,一个超过 50 dB 的光隔离器被用来隔离反射光对激光器线形的干扰,整个激光器与光电子控制器集成在一起。扫描光源为 NetTest 公司的 TUNICS-purity SC 可调谐的外腔半导体激光器,其波长变化范围为 1465 ~ 1570 nm 并保持输出的功率非常稳定,线宽为 150 kHz,调节的最小步长为 0.01 nm。腔体结构采用改进的萨尼亚克干涉仪,在光栅上的双路反射可以提供最大的腔长变化。准直透镜、隔离器和双面后反射镜保证了输出光的稳定性。另外,通过(4)式可以发现偏振方向对拍频信号幅度的影响。理论上,当调两束光的偏振方向一致时,可以增强拍频信号的幅度。然而,由于现有的偏振控制器插入损耗很大,且发现调整任一束光的偏振方向时,拍频信号幅度变化并不明显,所以本系统未加偏振控制器。

实验中,通过 Advantest 公司的 Q8384 光谱分析仪和 R3182(9 kHz~40 GHz)频谱分析仪分别观察输出的光波和拍频信号。实验分别对带宽约为

15 GHz的 HP11982A (InGaAs) 探测器和带宽为 45 GHz的 New Focus Model 1014 探测器进行测量并给出结果。

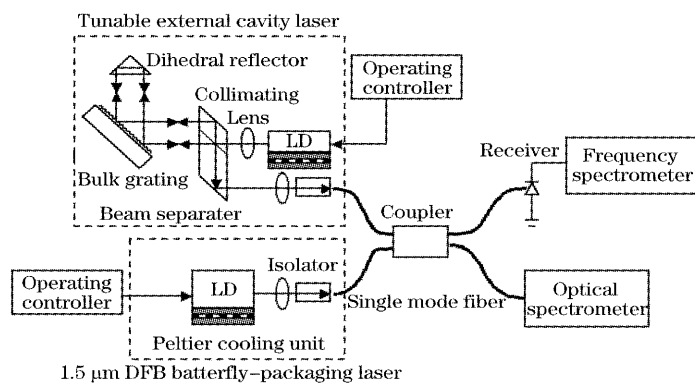


图 1 基于光外差技术的频率响应测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency response measurement system based on optical heterodyne technique

4 实验结果和讨论

图 2 为扫描光源与参考光源经耦合器输出后的光谱和相对应的 11.7 GHz 拍频信号。

图 2 (a)中参考光源的波长固定为 1549.793 nm, 当可调光源的波长为 1549.886 nm 时,根据公式

$$\Delta f = c \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \approx \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda, \quad (5)$$

可计算出拍频频率为 11.7 GHz,这与图 2 (b)中的拍频信号频率基本一致。

图 3 (a) 为拍频信号 (频率范围为

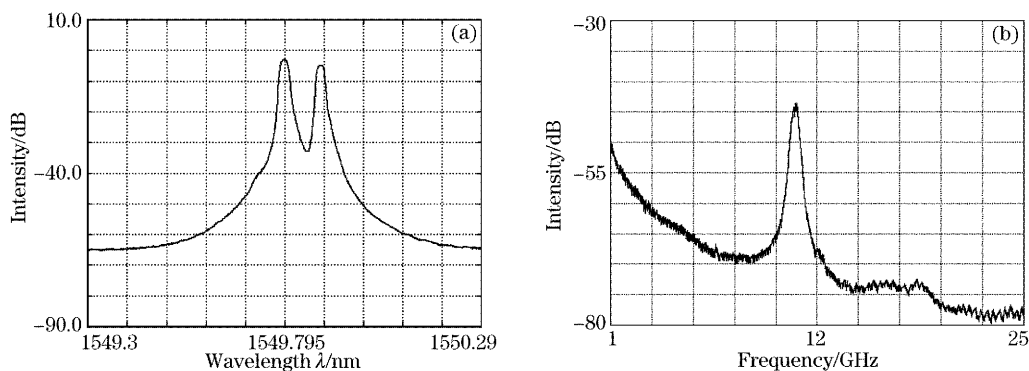


图 2 (a) 两个激光器的光谱, (b) 与光谱对应的拍频谱

Fig. 2 (a) Two laser's optical spectrum, (b) the corresponding beat signal

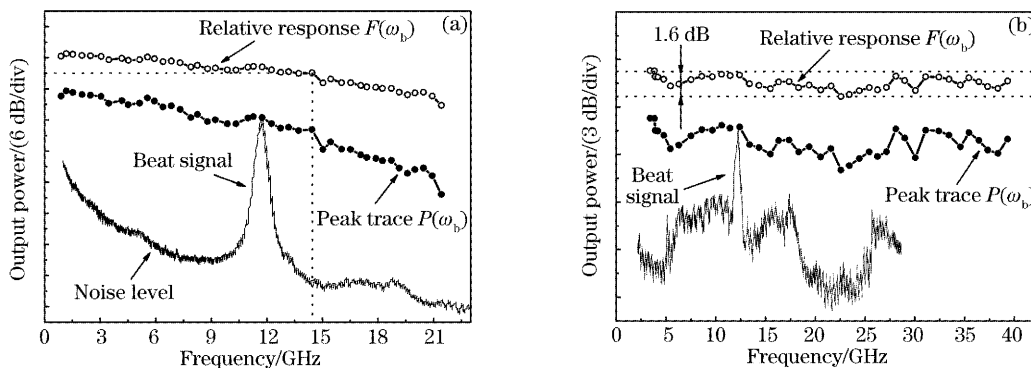


图 3 探测器的频率响应和拍频谱。(a) HP11982A, (b) New Focus Model 1014

Fig. 3 Frequency response and beat spectrum. (a) HP11982A, (b) New Focus Model 1014

680 MHz~21.5 GHz,扫描步长为 0.02 nm)扫过带宽约为 15 GHz 的 HP11982A (InGaAs) 探测器,通过跟踪拍频信号的峰值轨迹并根据公式(4)对 $P(\omega_b)$ 进行开方(dB 值除 2)得到探测器的相对频响 $F(\omega_b)$ 。频谱仪的分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)分别设为 3 MHz 和 1 kHz。在较低频处,频谱仪的拍频信号与噪音信号之比(S/N)很差,拍频信号在 $f < 680$ MHz 时基本被淹没在噪音里。从图中可以看到探测器的 3 dB 带宽为 14.4 GHz,与已知带宽基本接近。图 3 (b)是对带宽为 45 GHz 的 New Focus Model 1014 光探测器进行测量的结果(步长为 0.04 nm)。由于频谱仪的最大量程为 40 GHz,所以在整个频率范围内频响曲线都在 1.6 dB 范围内波动,可见其 3 dB 带宽超过 40 GHz。

通过实验研究发现,利用光外差技术测量探测器的频响应注意以下几点:1)光源输出功率要稳定;2)激光器输出光必须加光隔离器以防止光反射的干扰;3)频谱仪的峰值搜索算法要求 $RBW > \Delta\omega$,因此为了准确定位拍频信号峰值位置提高测试精度,频谱仪应选择最大的 RBW,同时使用较窄线宽的激光器;4)较窄的激光器线宽能增大 S/N 并提高测量系统灵敏度;5)测试过程中要保持测试环境的稳定,避免震动和温度变化对偏振的影响;6)在测量系统中可以考虑使用插入损耗较低的偏振控制器或 3 dB 偏振保持耦合器来增加拍频信号的功率。

为了降低测量误差和提高实验可靠性,可以通过外腔激光器控制器后面板的 GPIB 接口与计算机相连,由计算机控制光源的扫描频率并启用频谱仪峰值跟踪功能可实现自动化测试并可降低随机误差。

5 结 论

利用光外差原理建立了光电探测器超宽带频率

响应测试系统,可以实现从 DC 到上百 GHz 频率范围内光探测器频响的测试,测试的带宽取决于频谱仪的带宽。通过本方法得到了两个探测器的频响并针对本实验系统提出了实验要求和改进意见。该方法最大优点是不需要高速光调制源和额外的校准过程。相对其他测量技术而言,具有系统简便、测试频率高、灵敏度高、且重复性、可靠性高等优点,尤其适用于现代通信中所用光电器件的频率特性测量。

参 考 文 献

- 1 Zhang Shengli, Liu Yu, Sun Jianwei *et al.*. Optimized pack of high-speed photodiode. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 659~662 (in Chinese)
张胜利,刘宇,孙建伟等. 高速光探测器封装的优化设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 659~662
- 2 Zhang Shengli, Sun Jianwei, Liu Yu *et al.*. Measuring the high-frequency characteristics of chip photodiodes[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 857~860 (in Chinese)
张胜利,孙建伟,刘宇等. 光探测器芯片的高频特性测量[J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 857~860
- 3 Kato K, Hata S, Kawano K *et al.*. A high-efficiency 50 GHz InGaAs multimode waveguide photodetector[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **28**(10): 2728~2735
- 4 S. Demiguel, Ning Li, Xiao Weili *et al.*. Very high responsivity evanescently-coupled photodiodes integrating a short planar multimode waveguide for high-speed applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1761~1763
- 5 Hemery E, Chusseau L, Lourtioz J M. Frequency characterization of photodetectors by Fabry-Perot interferometry of modulated semiconductor lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(1): 42~44
- 6 E. Eichen, A. Silletti. Bandwidth measurements of ultrahigh-frequency optical detectors using the interferometric FM sideband technique[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(10): 1377~1381
- 7 S. Kawanishi, A. Takada, M. Saruwatari. Wide-band frequency response measurement of optical receivers using optical heterodyne detection[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1): 92~98
- 8 Wang J, Kruger U, Schwarz B *et al.*. Measurement of frequency response of photoreceivers using self-homodyne method [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(11): 722~723
- 9 S. Kawanishi, M. Saruwatari. A very wide-band frequency response measurement system using optical heterodyne detection [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1989, **38**(2): 569~573