

# 流图法在光探测器芯片高频特性测量校准上的应用\*

苗 昂<sup>†</sup> 黄永清 李轶群 吴 强 黄 辉 任晓敏

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 在采用光调制法测量光探测器芯片高频响应特性的过程中,测试系统往往忽视光调制器响应、高频探针衰减以及端口间失配等误差中的一项或几项.为了降低校准不完善对结果造成的误差,文中提出了基于信号流图的系统校准分析方法,考虑了各种频响误差及端口间失配的影响,推导出校准公式.利用该法对一种光探测器的典型测试系统——基于LCA(lightwave component analyzer)的测试系统做了进一步校准分析,在130MHz~20GHz范围内,测量了一种新型光探测器的高频响应参数 $S_{21}$ ,结果表明经流图法校准的 $S_{21}$ 参数比仅使用原有校准算法有明显改善,证明了该方法的可行性.

**关键词:** 光探测器; 高频响应; 校准

EEACC: 7210; 7230C; 7310N

中图分类号: TN015

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)03-0448-05

## 1 引言

在光电集成电路(OEIC)设计和封装过程中,分立光电子器件的精确模型,如激光器、光探测器必不可少.而器件模型参数的精确度在很大程度上依赖于器件特性测量的精确度<sup>[1~3]</sup>.提取模型参数往往使用 $P-I$ (光电流)特性、 $V-I$ (伏安)特性和高频特性等参数.低频参数(如 $P-I$ ,  $V-I$ 特性)测量,不易受外界干扰,校准相对简便易行;对于高频特性测量,特别是涉及光/电、电/光高速特性而言,测试系统往往采用夹具、光调制器等额外器件,无法统一标准,造成校准上的不便.为了提高光电子器件模型的准确性,测试系统附加影响被尽可能地降低,使测量值尽量接近器件的真实参数.光调制法是光电子器件高频特性测量的常用方法<sup>[4,5]</sup>,其基本原理是把待测器件和高速调制光源连接起来,用校准好的双端矢量网络分析仪测量它们的总体传输参数,作为器件的测试结果.对于光探测器芯片在片测试,上述方法忽略了一些重要误差源,如调制器频响、高频探针衰减及端口间失配等误差的一项或几项,不完善的校准造成了测量结果的误差,势必影响光电子模型的准确性.针对以上问题,本文提出了一种基于信号流图的光探测器高频响应测量的全面校准方法.信号流图可以用来分析微波网络以及它们之间整体互连关系,虽然信号流图常用于系统控制理论中,但

同系统控制论相似的是,电磁波传播也可认为只与其传输通道以及通道网络上的节点有关,用信号流图描述电磁波的传输特性可大大简化分析过程.文献[6]曾针对基于HP83420A组件的光探测器高频响应的测量结果,用信号流图进行校准处理,带有一定的局限性,而且没有给出信号流图误差模型的建立过程.本文从理论上阐明了信号流图在光探测器高频测量误差校准上的应用,综合考虑了各种频响误差及端口间失配的影响,利用流图推导出对光探测器高频响应测量具有广泛意义的校准公式.并对一种光探测器的典型测试系统——基于LCA的测试系统进行了具体分析.在130MHz~20GHz范围内,测量了一种新型光探测器的高频响应参数 $S_{21}$ ,实验结果表明,经流图法校准的 $S_{21}$ 参数比仅使用传统校准法的参数有明显改善.

## 2 流图法分析误差

### 2.1 流图分析模型

进行光探测器在片测试时要用到光调制器、高频探针等.利用信号流图分析光调制测量系统,考虑到光调制器、待测器件和高速探针,参考正向12项误差模型<sup>[6~8]</sup>,测试系统流图如图1所示.

其中 $E_D$ 为方向性误差; $E_R$ 为反射误差; $E_S$ 为源失配误差; $E_L$ 为负载失配误差; $E_T$ 为正向频响误

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2003CB314901),国家自然科学基金(批准号:60576018)和教育部“新世纪人才支持计划”(批准号:NCET-05-0111)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者, Email: angmiao@gmail.com

2006-08-02 收到, 2006-11-01 定稿

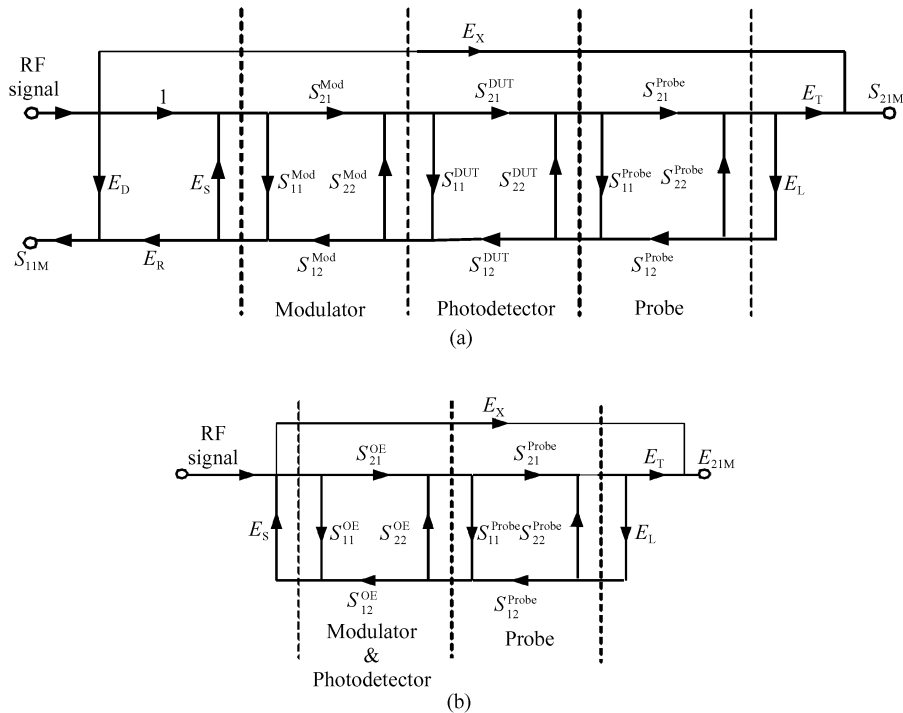


图 1 测量系统流图 (a) 基于正向 12 项误差模型的测量系统流图; (b) 测量系统的正向传输流图  
 Fig.1 Measurement system flow-graph (a) Measurement system flow-graph based on traditional VNA error model; (b) Forward transmission flow-graph of measurement system

差;  $E_X$  为泄漏误差. 只考虑 O/E 传输过程的高频响应, 图 1(a) 简化为图 1(b). 其中  $S_{ij}^{OE} (i, j = 1, 2)$  表示调制器和探测器级联的总体散射参数. 显然, 对于光调制器, 其反向传输系数和在输出端的光反射系数非常小; 对于光探测器, 其反向传输系数和输入

端的光反射系数也是很小的, 因此忽略以上系数, 即:  $S_{12}^{Mod} = S_{22}^{Mod} = 0; S_{11}^{DUT} = S_{12}^{DUT} = 0$ .

故级联网络的散射参数可表示为:  $S_{11}^{OE} = S_{11}^{Mod}; S_{21}^{OE} = S_{21}^{Mod} S_{21}^{DUT}; S_{22}^{OE} = S_{22}^{DUT}$ .

经推导, 图 1(b) 流图有以下关系成立:

$$S_{21M} = S_{21}^{DUT} \times \frac{(1 - S_{11}^{OE} E_S)(1 + S_{22}^{OE} E_L \det[S^{Probe}] - S_{22}^{Probe} E_L - S_{22}^{OE} S_{11}^{Probe})}{S_{21}^{Probe} E_T} + E_X \quad (1)$$

可见, 为了求出光探测器真实频响值  $S_{21}^{DUT}$ , 必须进一步确定各误差项、光探测器输出端反射系数  $S_{22}^{OE}$ 、矢量网络分析仪 Port 2 的反射系数  $E_L$  以及高频探针散射参数  $S_{ij}^{Probe} (i, j = 1, 2)$ .

### 2.2 反射系数的测量

为了准确测量  $S_{22}^{OE}$  和  $E_L$ , 必须进行单端口校准. 误差模型如图 2 所示. 其中  $\Gamma_M$  和  $\Gamma_{DUT}$  分别为反射系数测量值及反射系数真实值, 根据图 2 有以下关系成立:

$$\Gamma_{DUT} = \frac{\Gamma_M - E'_D}{E'_S(\Gamma_M - E'_D) + E'_R} \quad (2)$$

有三个未知误差系数  $E'_R, E'_D$  和  $E'_S$ . 采用 OLS 法求出这三个误差系数, 即在参考面左侧分别接标准负载 Open, Load, Short, 将三次真实反射系数值  $\Gamma_{DUT}$  和反射系数测量值  $\Gamma_M$  带入 (2) 式即可解

出误差系数. 测量中使用了 HP85052D 和 CasCade 103-726 ISS 标准负载组件.

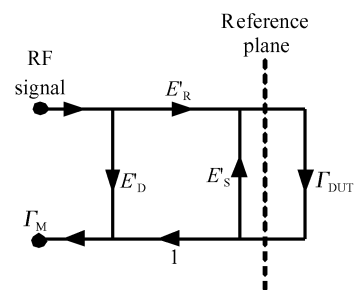


图 2 单端口流图误差模型  
 Fig.2 One port flow-graph error model

### 2.3 高频探针散射参数的提取

探针附有出厂参数, 但由于磨损和外界影响, 每次测试都需要重新提取探针参数. 过程如下: 在探针

输出面依次接 103-726 ISS 中的 Open, Short 和 Load,并在输入端面依次测量每次的反射系数  $\Gamma_O$ ,  $\Gamma_S$  和  $\Gamma_L$ .带入下式:

$$S_{11}^{\text{Probe}} = \Gamma_L \tag{3}$$

$$S_{22}^{\text{Probe}} = \frac{\Gamma_O + \Gamma_S - 2\Gamma_L}{\Gamma_O - \Gamma_S} \tag{4}$$

$$S_{21}^{\text{Probe}} S_{12}^{\text{Probe}} = 2 \times \frac{(\Gamma_O - \Gamma_L)(\Gamma_L - \Gamma_S)}{\Gamma_O - \Gamma_S} = A e^{j\varphi} \tag{5}$$

其中:

$$A = |S_{21}^{\text{Probe}} S_{12}^{\text{Probe}}|$$

$$\varphi = \text{Arg}(S_{21}^{\text{Probe}} S_{12}^{\text{Probe}})$$

由于探针可视为互易二端口网络(即  $S_{21}^{\text{Probe}} = S_{12}^{\text{Probe}}$ ),因此:

$$S_{21}^{\text{Probe}} = |S_{21}^{\text{Probe}}| e^{j\theta} = \sqrt{S_{11}^{\text{Probe}} S_{22}^{\text{Probe}}} = \sqrt{A} e^{j\frac{\varphi}{2}}$$

在求  $\theta$  时要注意避免相位计算错误,由于相频响应是一个以  $2\pi$  为周期的周期函数,因此习惯取相位的主值(在  $-180^\circ \sim 180^\circ$  之间),形成类似锯齿状跳变的周期曲线,如果直接取周期表达值的一半就会得到错误的结果.为了得到正确的  $\theta$  值,应将周期跳变的相位主值展为连续递减的真实相位值  $\varphi$ ,然后再除以 2,可得正确  $\theta$  值.

依照上法,对 Cascade ACP40-A-GS-100 型探针进行了实际参数提取.图 3 (a),(c),(e)为探针散射参数实测幅值和出厂幅值的比较,实线为实测值,虚线为出厂值;图 3(b),(d),(f)为散射参数的相位值.

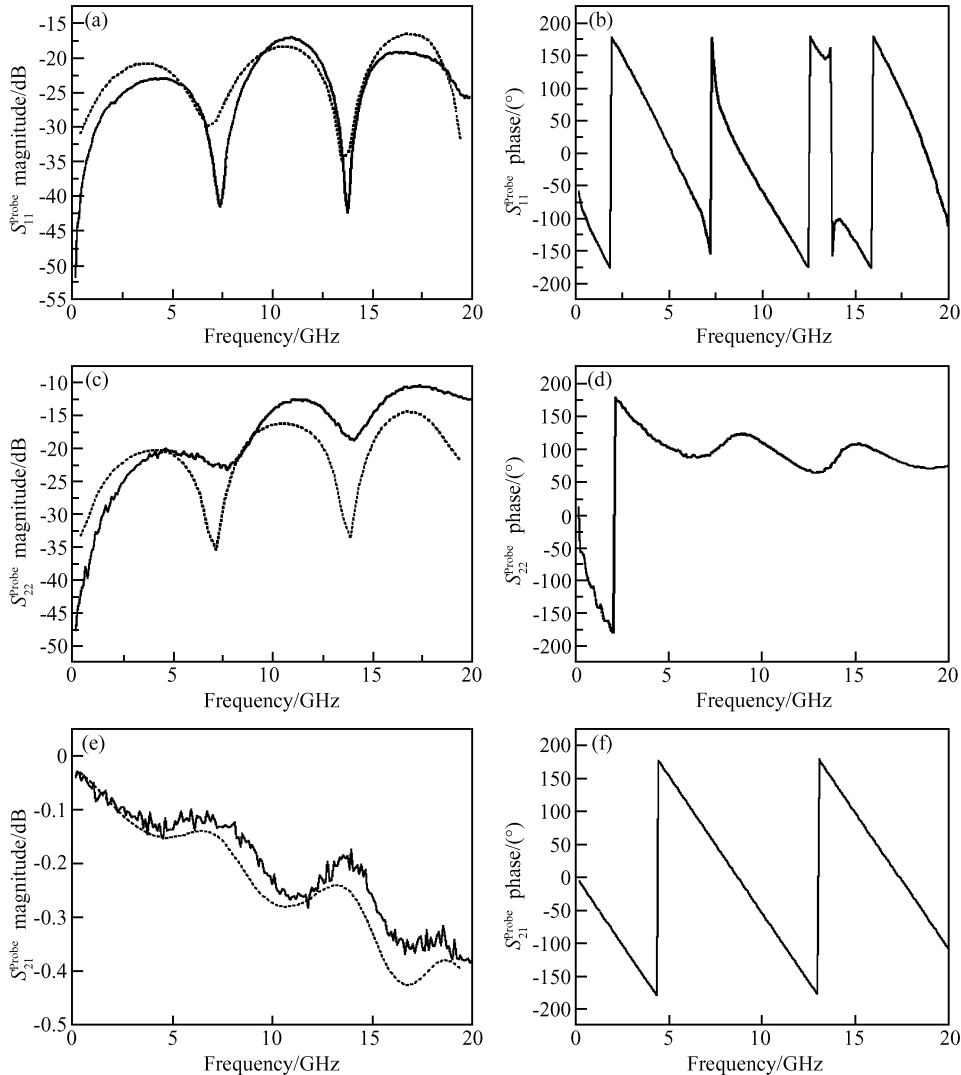


图 3 探针散射参数的实测值

Fig.3 Measurement results of probe scattering parameters

## 2.4 具体测量系统分析

实际测量采用 HP8703A 型 LCA 作为主要设备. 波长为  $1.55\mu\text{m}$  的高速调制光信号通过光纤入射至光探测器台面, 探测器产生的电信号经高频探针和射频同轴电缆输入 LCA 的 Port 2. 采用 Cascade ACP40-A-SG-100 高频探针和 Agilent 11612A 电压偏置器.

由于 LCA 内部线路失配较小且系统线路连接良好, 因此  $E_x \approx 0$ ,  $S_{11}^{\text{OE}} E_s \approx 0$ . 测试前, 对 LCA 进行“Response”校准<sup>[9]</sup>:

$$S_{21}^{\text{DUT}} = E_{\text{response}} S_{21\text{M}} \quad (6)$$

其中  $S_{21\text{M}}$  为测量值;  $S_{21}^{\text{DUT}}$  为待测器件校准后的值;  $E_{\text{response}}$  为正向频响误差系数, 包含了光调制器和信号传输通道的频响信息. 考虑到预先校准, (1)式变为:

$$S_{21}^{\text{DUT}} = E S_{21\text{M}} \quad (7)$$

其中  $E$  为误差系数:

$$E = \frac{S_{21}^{\text{Probe}} E_{\text{response}}}{1 + S_{22}^{\text{OE}} E_L \det[S^{\text{Probe}}] - S_{22}^{\text{Probe}} E_L - S_{22}^{\text{OE}} S_{11}^{\text{Probe}}} \quad (8)$$

可见, 我们已经去除光调制器的频响, 准确测量出探测器输出端反射系数  $S_{22}^{\text{OE}}$ , LCA Port 2 的反射参数  $E_L$  以及高频探针散射参数  $S_{ij}^{\text{Probe}} (i, j = 1, 2)$ .

## 3 实验与讨论

为了验证上述方法的正确性, 在  $130\text{MHz} \sim 20\text{GHz}$  的范围内, 利用 LCA 对一个自产的电极共面 OMITMiC (one-mirror inclined three-mirror cavity) 光探测器<sup>[10]</sup> 芯片进行了  $S_{21}$  参数的测量, 偏压  $V_{\text{bias}} = -3.5\text{V}$ . 利用(7)式对所测数据做进一步修正, 实验结果如图 4 所示. 可见, 由于探针本身频响以及接口之间的失配, 仅使用“Response”校准方法测量的曲线中出现较大的波动. 扣除探针频响和接口间失配影响后, 频率响应曲线变得平滑, 测得此时光探测器的 3dB 带宽为  $11\text{GHz}$ .

通过实验研究得知, 测试中有以下几个方面需要注意: (1) 测试夹具的形变会导致分布参数和相位的变化, 高频测试结果对探针针尖形变量十分敏感, 而现有测试方法不可避免地对操作依赖性较强, 因此探针每次接触压焊电极和 ISS 时, 形变量要保持一致且符合 ISS 的标记规定, 利于探针参数稳定, 便于校准; (2) 测试过程避免震动和温度变化, 以减少探针针尖形变量和温致探测器高频响应的不稳定性; (3) 根据以上两点, 为了提高测试系统的机械重复性和稳定性, 实现测量自动化是十分必要的; (4) 测试过程为避免外界电磁干扰, 测试系统最好处于

电磁屏蔽室中; (5) 测试前仪器预热 3h 以上以确保测试源功率稳定; (6) 为提高数据处理效率, 可通过 GPIB 接口, 利用 VB 或 VC 语言结合 Matlab 编程, 实现数据的自动提取和处理.

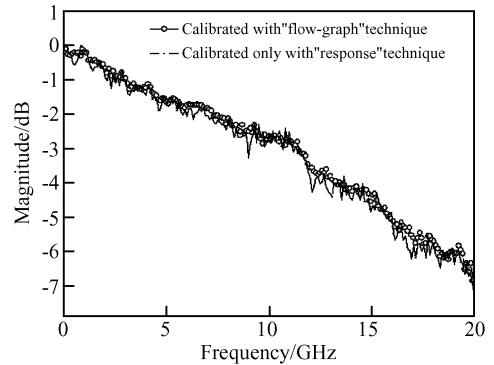


图 4 探测器芯片频率响应参数  $S_{21}$  的幅值

Fig. 4  $S_{21}$  magnitudes of photodetector before and after further calibration

## 4 结论

针对光调制法测量光探测器参数的过程, 提出了流图校准法. 该法旨在提高光探测器高频特性测量的精度, 它全面考虑了系统频响及端口间失配对结果的影响, 使校准更加完善, 并推导出相应校准公式. 采用该法对一种光探测器的典型测试系统——基于 LCA 的测试系统进行了具体分析. 实验表明, 用该校准法处理的数据比仅使用原有校准算法有显著改善, 从而验证了流图法校准的可行性. 作为一种针对光调制测量法的全面校准方法, 流图法对基于矢量网络分析仪的其他光电子器件的高频特性测量校准同样有效.

## 参考文献

- [1] Wang G, Tokumitsu T, Hanawa I, et al. Analysis of high speed p-i-n photodiode S-parameters by a novel small-signal equivalent circuit model. IEEE Microw Theory Wireless Compon Lett, 2002, 12(10): 378
- [2] Xu Yao, Wang Wei, Wang Ziyu. Measurement of 3dB bandwidth of laser diode chips. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 794
- [3] Zhu N H, Liu Y, Pun Y B. Scattering-parameter measurements of laser diodes. Opt Quantum Electron, 2002, 34: 747
- [4] Hale P D, Williams D F. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2003, 51(4): 1422
- [5] Wong R W, Hernday P, Hart M G, et al. High-speed light-wave component analysis. Hewlett-Packard Journal, 1989, 40(3): 35

- [ 6 ] Debie P, Martens L, Kaiser D. Improved error correction technique for on-wafer lightwave measurements of photodetectors. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 7(4): 418
- [ 7 ] Marks B, Jargon A, Rytting K. Accuracy of lumped-element calibrations for four-sampler vector network analyzers. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1998, 1487
- [ 8 ] Fitzpatrick J. Error models for systems measurements. *Microwave*, 1978, 5: 63
- [ 9 ] HP Company. HP 8703A lightwave component analyzer operating manual. 1991: 7
- [ 10 ] Huang Y Q, Huang C, Wang Q, et al. Analysis of a one mirror inclined three-mirror cavity photodetector for high-speed application. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(1): 53

## Application of “Flow-Graph” Technique in Measurement Calibration of High Frequency Characteristics of Photodetectors<sup>\*</sup>

Miao Ang<sup>†</sup>, Huang Yongqing, Li Yiqun, Wu Qiang, Huang Hui, and Ren Xiaomin

(*Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies of the Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** In order to reduce the inaccuracy of traditional calibration, the “flow-graph” method is proposed. This method takes into account the effects of the inaccuracy of various frequency responses and the mismatch between different ports. Furthermore, a calibration formula is deduced. This method was applied to the further calibration analysis of a typical lightwave component analyzer (LCA)-based photodetector measurement system. The experiment of a novel photodetector demonstrates that in the range of 130MHz to 20GHz, an obvious improvement in the calibration of the  $S_{21}$  parameter has been achieved compared to the traditional algorithm, and the proposed method is proved feasible.

**Key words:** photodetector; high frequency response; calibration

**EEACC:** 7210; 7230C; 7310N

**Article ID:** 0253-4177(2007)03-0448-05

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314901), the National Natural Science Foundation of China (No. 60576018), and the Program for New Century Excellent Talents in University of the Ministry of Education of China (No. NCET-05-0111)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: angmiao@gmail.com

Received 2 August 2006, revised manuscript received 1 November 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics