

光探测器 TO 封装的高频分析与改进*

张尚剑 刘 骛 温继敏 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: 推导了封装前后探测器的散射参数的关系,提出了探测器封装网络高频影响的两种分析方法.一种方法是直接比较封装前后探测器的频响,另一种则是从待封装探测器的反射系数和封装网络散射参数计算获得.以 TO 封装探测器为例,对两种方法的有效性进行了验证.分析结果表明,封装网络中电容和电感的谐振效应具有补偿作用,通过改变封装中的这些参数,改进了 TO 封装探测器的频响.

关键词: 光通信技术; 探测器; TO 封装; 散射参数; 寄生效应

EEACC: 4250; 1350

中图分类号: TN364+.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)11-2254-05

1 引言

在光纤通信系统中,2.5 Gbps 及以下速率的 TO 封装激光器和探测器模块由于体积小、成本低、连接方便,而被广泛运用在接入网、城域网和机架交换设备中^[1].近来,随着局域网的发展和高速光互连的需要,更高速率的 TO 封装光电子模块的研究越来越受到人们的重视^[2].但是在高频调制下,金丝和管壳引入的寄生参数会降低其整体性能^[3],因此研究 TO 封装网络高频影响是必要的.本文的目的就是建立探测器封装网络高频影响的分析方法,并对相应封装的探测器模块的频响进行改进.

本文从探测器的散射参数(S 参数)出发,推导了封装前后探测器 S 参数之间的关系,从而提供了探测器封装网络高频影响的分析方法.

2 分析方法

以图 1 所示结构的 TO 探测器模块为例,对 TO 管座、探测器芯片和探测器模块的参数进行测试.

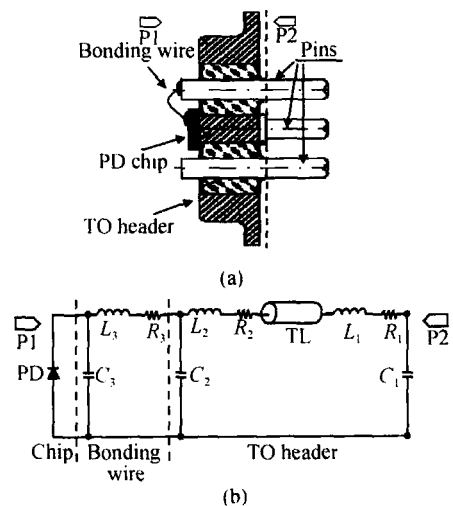


图 1 TO 探测器模块的结构(a)和等效电路图(b)
Fig.1 Configuration (a) and equivalent circuit (b) of TO photodiode module

S 参数是微波网络分析中常用的参数,随着光电子器件工作速率的不断提升和高速测试中网络分析仪的使用, S 参数也被扩展用于光电子器件^[4].如图 2 所示,设光从发射端入射到接收端,其瞬态光功率满足

$$p(t) = p_0 (1 + m \operatorname{Re}\{e^{j(t+\tau)}\}) \quad (1)$$

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2001AA312030,2001AA312190),国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000036601)和国家杰出青年基金(批准号:69825109)资助项目

张尚剑 男,1979 年出生,博士研究生,目前从事高速光电子器件高频特性研究.

祝宁华 男,1959 年出生,研究员,博士生导师,目前从事高速光通信器件的封装测试研究.

2005-03-01 收到,2005-06-13 定稿

式中 p_0 为直流光功率; m 是调制系数; ϕ 为调制包络的初始相位. 在小信号调制下, 激光器和探测器的 S 参数可用光端口的光功率 p 和电端口入射波 a 和反射波 b 分别表示为^[5]

$$S^L = \begin{bmatrix} S_{11}^L & 0 \\ S_{21}^L & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1/a_1 & 0 \\ p_0 m e^{j\phi}/a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S^R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ S_{21}^R & S_{22}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_2/p_0 m e^{j\phi} & b_2/a_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中上角标 L 和 R 分别对应于激光器和探测器. (3) 式可直接应用于探测器芯片. 对于探测器模块, 其 S 参数与探测器芯片和封装网络有关, 用传输矩阵表示

$$T^{RP} = T^R T^P \quad (4)$$

式中上角标 RP, R 和 P 分别对应探测器模块、芯片和封装网络. 传输矩阵 T 和 S 参数矩阵的转换关系为^[6]

$$T^X = \frac{1}{S_{21}^X} \begin{bmatrix} 1 & -S_{22}^X \\ S_{11}^X & S_{12}^X S_{21}^X - S_{11}^X S_{22}^X \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$S^X = \frac{1}{T_{11}^X} \begin{bmatrix} T_{21}^X & T_{11}^X T_{22}^X - T_{12}^X T_{21}^X \\ 1 & -T_{12}^X \end{bmatrix}$$

其中 $X = L, R, P, LR$ 或 LRP .

因此, 探测器模块的 S 矩阵可表示为

$$S^{RP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{S_{21}^R S_{21}^P}{1 - S_{11}^P S_{22}^R} & \frac{S_{22}^P - S_{22}^R (S_{11}^P S_{22}^P - S_{12}^P S_{22}^P)}{1 - S_{11}^P S_{22}^R} \end{bmatrix} \quad (6)$$

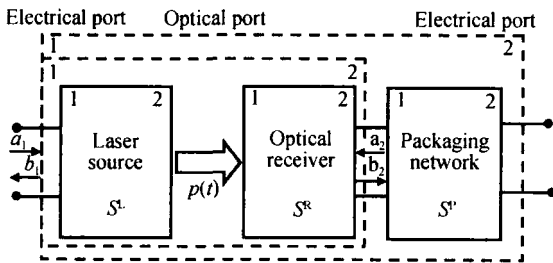


图 2 探测器高频测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of high frequency measurement of photodiode

通常, 在光电子器件的频响特性测试中电/光和光/电器件会配对出现. 网络分析仪测得的是探测器和激光器组成的级联网络的 S 参数^[5],

$$S^{LR} = \begin{bmatrix} S_{11}^L & 0 \\ S_{21}^L S_{21}^R & S_{22}^R \end{bmatrix} \quad (7)$$

如果探测器经过封装, 则被测网络是激光器、探测器

和封装网络三者的级联网络. 与 (6) 式的推导过程类似, 得到

$$S^{LRP} = \begin{bmatrix} S_{11}^L & 0 \\ \frac{S_{21}^L S_{21}^R S_{21}^P}{1 - S_{11}^P S_{22}^R} & \frac{S_{22}^P - S_{22}^R (S_{11}^P S_{22}^P - S_{12}^P S_{22}^P)}{1 - S_{11}^P S_{22}^R} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由 (3), (6), (7) 和 (8) 式可得封装前后探测器的 S_{21} 之比为

$$\frac{S_{21}^{RP}}{S_{21}^R} = \frac{S_{21}^{LRP}}{S_{21}^{LR}} \quad (9)$$

$$\frac{S_{21}^{RP}}{S_{21}^R} = \frac{S_{21}^P}{1 - S_{11}^P S_{22}^R}$$

(9) 式表明在分析封装网络的高频影响过程中, 封装前后探测器的 S_{21} 之比与网络分析仪测得的 S_{21} 之比相同. 从 (9) 式可以看出, 封装网络的高频影响可有两种分析方法, 一种是直接测量封装前后的探测器 S_{21} , 称为比较法; 另一种是测量待封装探测器的 S_{22} 和封装网络的 S_{11} 和 S_{21} , 称为预测法. 从理论上讲两种方法是等价的. 由于第二种方法只涉及纯电域参数, 测试起来更方便.

3 测试

为了分析 TO 封装的高频影响, 首先需要分析 TO 封装网络、探测器芯片和 TO 封装模块的 S 参数进行测试. 由于这些器件都不是同轴结构, 需要微波探针和特制的夹具才能接在网络分析仪上进行测试. 在测试中需要去除夹具的影响才能得到准确的被测器件的 S 参数.

实验选用 8720HPD 矢量网络分析仪和 40 GHz 的 LiNbO₃ 光调制器模块对探测器芯片的 S 参数进行测试. 测试前先用 HP85052D 3.5mm 标准和全双端口开路-匹配-直通 (SOLT) 方法对网络分析仪进行校准, 将其测试参考面校准到两同轴端口. 被测芯片是 Opto Speed 公司的 PDCS32T 型探测器芯片. 探针是 Cascade ACP-GS 200 型微波探针, 其可用 Cascade 103-736 校准件和开路-短路-匹配负载 (OSL) 方法实现校准^[7,8]. 光源由 DFB 激光器和 40 GHz 的 LiNbO₃ 调制器组成, 在 20 GHz 内可认为其频率响应是平坦的^[9], 对该芯片测试得到的 S_{22} 和 S_{21} 分别如图 3 所示.

TO 管座是 TO 封装网络的主要元件, 也是探测器芯片的载体, 实验中也需对其 S 参数进行测量. 由于其两个端口不一致, 且无法找到适合 TO 座

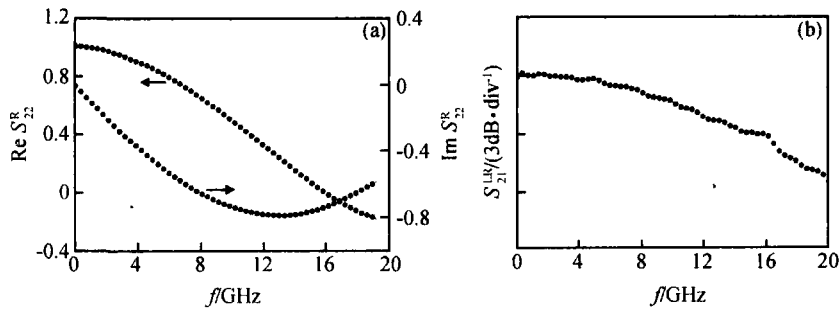


图 3 测得的探测器芯片的反射系数(a)和传输系数(b)

Fig. 3 Measured scattering parameters of the photodiode chip

的匹配标准,我们只能从其一端分别接短路、开路时另一端的反射系数并结合等效电路模拟得到 S 参数. 在测试中引入了从同轴端口到 TO 管座接头的夹具, 要使用网络分析仪的端口扩展(port extension)^[10] 功能将参考面移到 TO 管座的接头处, 以消除测试夹具的影响.

根据 TO 管座连接短路和开路时的反射系数可以得到 TO 管座等效电路元件的值^[11,12]. 图 4(a) 和

(b) 分别给出了 TO 座接短路和开路时反射系数测试结果和模拟结果, 可以看出两者非常吻合, 这说明各元件值是有有效的.

用探测器芯片与 TO 管座可以组成 TO 探测器模块, 探测器模块的测试系统与芯片的测试系统相似, 不同的是需要端口扩展将连接夹具的影响去除. 图 5 给出了 TO 探测器模块的 S_{22} 和 S_{21} 测量值.

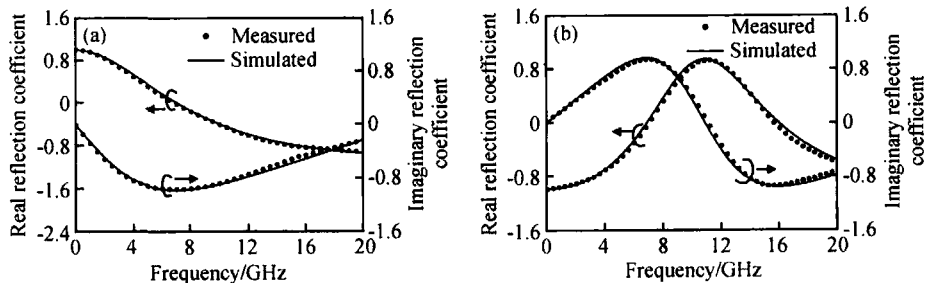


图 4 测量与仿真的 TO 座接开路(a)和短路(b)时的反射系数

Fig. 4 Measured and simulated reflection coefficient of TO header with open (a), and short (b) termination

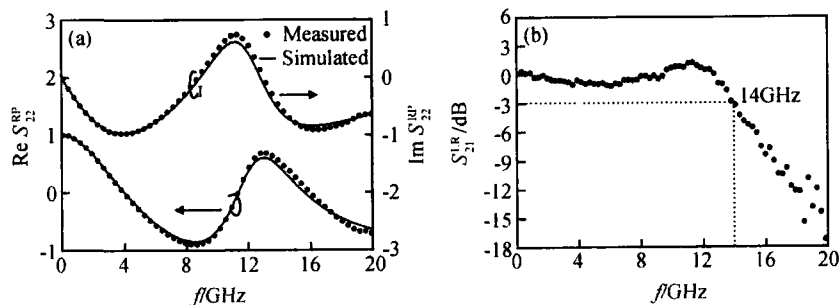


图 5 TO 探测器模块的反射系数(a)和传输系数(b)

Fig. 5 Measured and modeled scattering parameters of TO photodiode module

4 仿真与优化

将探测器芯片的 S_{11} 测试数据嵌入 TO 模块的电

路模型, 由于已经得到 TO 管座的元件值, 只剩下元件 C_3 , R_3 和 L_3 需要确定. 元件 R_3 和 L_3 代表金线的电感和电阻, C_3 则表示金线与芯片电极之间的电容.

实验中使用的金线直径为 $25\mu\text{m}$, 长度约为

0.5mm. 在 20GHz 以内,这种型号的金丝电感和电阻分别约为 1nH 和 2 /mm^[4],通过拟合 TO 模块的反射系数可以确定出 R_3, L_3 和 C_3 的值,TO 探测器模块的反射系数的模拟值分别如图 5 (a) 中实线所示. 测试值和模拟值吻合,证明元件参数是合理的. TO 封装网络的所有元件值如表 1 所示.

表 1 TO 封装网络的元件参数

Table 1 Determined values of the circuit elements of TO packaging network

Component	Element	Value	Element	Value	Element	Value
TO header	TL. Di	0.44mm	TL. Do	1.17mm	TL. L	1.07mm
	C_1	41.7fF	L_1	0.02nH	R_1	0.6
	C_2	40fF	L_2	0.45nH	R_2	0.2
Bondwire	C_3	105fF	L_3	0.4nH	R_3	0.8

根据 (9) 式可以很容易得到 TO 封装网络的高频影响. 如图 6 所示,实线是预测法计算的结果,虚线是比较法测试的结果. 两结果的吻合证明两方法的一致性. 从结果中可看出 TO 封装网络中存在谐振,也正是由于谐振的补偿作用使得封装后的 TO 探测器模块的带宽与封装前芯片的带宽非常接近.

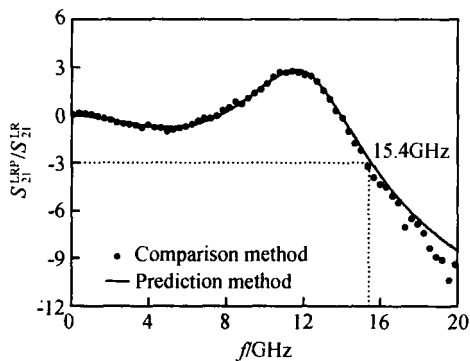


图 6 探测器 TO 封装网络的高频影响

Fig. 6 High frequency effect of TO packaging via comparison method and prediction method

进一步考察谐振曲线随着金丝元件 L_3 和 R_3 的变化,如图 7 所示. 发现随着 L_3 的减少,曲线低频部分不平坦性增加,高频部分响应趋于平坦;而随 C_3 的减少,曲线低频部分基本不变,高频部分响应趋于不平坦. 为了验证该结果,实验中分别将金丝的根数增加到 2 根和 4 根以减少 L_3 ,此时的 TO 探测器模块的高频响应如图 8 所示,可以看出金丝数增加后,探测器的响应带宽达到 17GHz,频响得到改进.

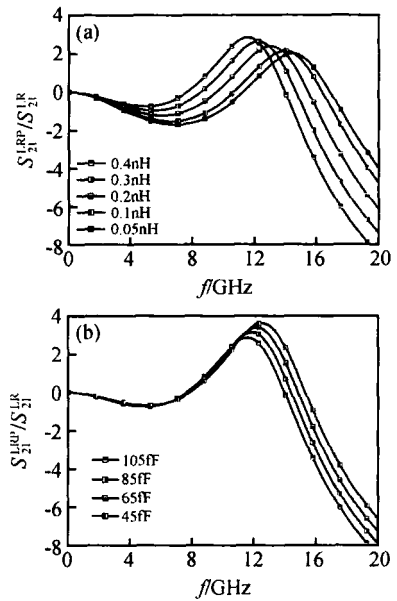


图 7 TO 封装高频影响随 C_3 和 L_3 变化的仿真曲线

Fig. 7 Modeled high frequency influence of TO packaging versus the change of C_3 and L_3

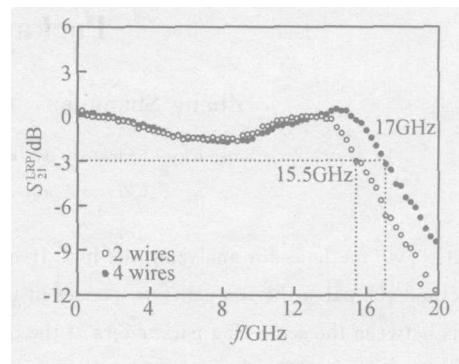


图 8 改进封装后的 TO 探测器的传输系数

Fig. 8 Measured transmission coefficient of the optimized TO packaged photodiode module

5 结论

本文给出了分析探测器封装网络高频影响的两种简单方法,一种是通过直接测量封装前后探测器的传输系数得到;另一种则只需进行电域的散射参数测试就可得到. 两种分析结果呈现一致性,还表明在 TO 封装网络的信号通路上存在谐振. 谐振曲线随金丝的电感和电容的变化而变化,进一步的实验表明,增加连接金丝的数目,减少了金丝电感,从而改善了 TO 封装模块的高频响应.

参考文献

[1] Ebberg A, Auracher F, Borchert B. 10Gbit/s transmission u-

- sing directly modulated uncooled MQW ridge waveguide DFB lasers in TO package. *Electron Lett*, 2000, 36(17):1476
- [2] Zhu N H, Wang Y L, Qian C, et al. Frequency bandwidth estimation of TO packaging techniques for laser modules. *Optical and Quantum Electronics*, to be published
- [3] Lindgren S, Ahlfeldt H, Kerzæ B, et al. Packaging of high speed DFB laser diodes. 22nd European Conference on Optical Communication, 1996, MoC. 3. 1:1. 97
- [4] Zhu N H, Liu Y, Pun E Y B, et al. Scattering-parameter measurement of laser diodes. *Optical and Quantum Electronics*, 2002, 34(8):747
- [5] Hale P D, Williams D F. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2003, 51(4):1422
- [6] Ludwig R, Bretchko P. *RF circuit design: theory and applications*. Prentice Hall, 2002:175
- [7] Chen Z Y, Wang Y L, Liu Y, et al. Two-port calibration of test fixtures with OSL method. *Microw Opt Technol Lett*, 2002, 35(4):299
- [8] Zhu N H, Qian C, Wang Y L, et al. Frequency limitation in the calibration of microwave test fixtures. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2003, 51(9):2000
- [9] Debie P, Martens L. Correction technique for on-chip modulation response measurements of optoelectronic devices. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1995, 43(6):1264
- [10] Hale P D, Clement T S, Williams D F, et al. Measuring the frequency response of gigabit chip photodiodes. *IEEE J Lightw Technol*, 2001, 19(9):1333
- [11] On-wafer measurements using Agilent 8510 Network Analyzer and cascade microtech wafer probes, Agilent Technologies, Product Note 8510-6
- [12] Tucker R S, Popo D J. Microwave circuit models of semiconductor injection lasers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1983, 31(3):289
- [13] Wang Youlin, Liu Yu, Sun Jianwei, et al. Reflection coefficient and small-signal response measurement of electroabsorption modulated DFB laser. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9):955 (in Chinese) [王幼林, 刘宇, 孙建伟, 等. 电吸收调制器和 DFB 激光器集成器件的测量. *半导体学报*, 2003, 24(9):955]

Analysis and Improvement on the High Frequency Effect of TO Packaging for Photodiodes^{*}

Zhang Shangjian, Liu Jian, Wen Jimin, and Zhu Ninghua

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

Abstract: Two methods for analyzing the high frequency effect of the packaging techniques for photodiodes are presented. The first method compares the frequency responses of the photodiode before and after packaging, and the second one is based on the relations between the scattering parameters of the packaging network, photodiode chip, and module. In the experiment of the TO photodiode module, results from the two methods show coherence, which indicates that the methods established are effective for practical applications. Analysis results also denote that there is a resonance between the inductance in the bonding wire and the parasitic capacitance in both the feedthru of the TO header and the photodiode chip. This resonance can be used to compensate for the overall frequency response of the device. By adjusting the values of the inductance and capacitance, an optimized frequency response of the TO photodiode module is achieved.

Key words: optical communication; photodiode; TO packaging; scattering parameters; parasitics

EEACC: 4250; 1350

Article ID: 0253-4177(2005)11-2254-05

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 2001AA312030, 2001AA312190), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000036601), and the National Natural Science Foundation as a Distinguished Young Scientist (No. 69825109)

Zhang Shangjian male, was born in 1979, PhD candidate. His current research interest is in characterization of high speed optoelectronic devices.

Zhu Ninghua male, was born in 1959, professor and advisor of PhD candidates. His current research interest is in packaging and measurement of high speed devices for optical communication.

Received 1 March 2005, revised manuscript received 13 June 2005