

文章编号: 0253-2239(2005)09-1214-5

# 半导体激光器同轴封装的高频影响: 分析与实验\*

张尚剑 刘超 陈诚 伞海生 谢亮 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:** 在高频调制下, 封装对半导体激光器的影响非常显著。通过分析封装前后激光器散射参量之间的关系, 推导出可用于分析半导体激光器封装高频影响的两种方法: 预测法和评价法, 从而提供了分析激光器封装的另外两种等价方法。实验中, 对同轴(TO)封装的高频特性进行了测试和分析, 分析结果与传统比较法的测试结果吻合表明新方法有效。实验表明在 10.2 GHz 以内同轴封装不会降低半导体激光器的频响带宽, 即同轴封装的带宽可达 10 GHz, 且发现同轴封装中电感和电容元件之间的谐振效应对器件的频响具有补偿作用。两方法可为筛选光电子器件封装提供依据, 并为优化封装的设计提供参考。

**关键词:** 激光器; 半导体激光器; 同轴封装; 散射参量

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## Influence of TO Packaging on the High-Frequency Response of Semiconductor Laser: Analysis and Experiment

Zhang Shangjian Liu Chao Chen Cheng San Haisheng Xie Liang Zhu Ninghua

(State Key Lab on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academic of Sciences, Beijing 100083)

**Abstract:** The parasitics from packages can obviously degrade the overall performance of the packaged laser diode at high frequencies. Two novel equivalent methods, namely predication method and evaluation method, which can be used to analyze the influence of through-hole (TO) packaging on the high frequency response of laser diode, are deduced from the relation between the scattering parameters of laser diode before and after packaging. In the experiment, TO packaged laser module is taken as an example to investigate the high-frequency influence of the TO packaging. The coherence between the experimental results from the novel method and that from traditional comparison method show the effectivity of the methods. It also can be seen that the TO packaging does not reduce the bandwidth of the packaged laser diode, which means that TO packaging can achieve a frequency bandwidth of 10 GHz, furthermore, the resonance among the circuit elements of TO packaging provides compensation for the frequency response of the devices. The two methods are useful for screening and optimizing the packaging of high-speed optoelectronics devices.

**Key words:** lasers; semiconductor laser; through-hole packaging; scattering parameters

## 1 引 言

近年来, 同轴(TO)封装激光器实现了 10 Gb/s 的高速调制重新引起了人们对它的研究兴趣<sup>[1,2]</sup>。由于体积小、成本低、连接方便, 同轴封装激光器被广泛用于接入网、城域网和机架交换设备的光收发模块, 如小尺寸封装模块(SFF)、小尺寸可插拔封装模块(SFP)和 10 Gb/s 小尺寸可插拔封装模块

(XFP)等中。同轴封装已成为极具潜力的激光器封装形式<sup>[3,4]</sup>。在激光器的高频测试中我们发现, 激光器的本征特性决定其潜在性能, 实际器件性能的发挥往往还依赖于封装设计<sup>[5~8]</sup>, 因此分析同轴封装对激光器的高频影响是研究和设计同轴封装激光器中非常有意义的工作。通常, 最直接的方法就是比较封装前后的激光器频响变化<sup>[5]</sup>, 但这种比较法有其局限

\* 国家 863 计划(2004AA31G220)、国家 973 计划(G20000036601)和国家杰出青年基金(69825109)资助课题。

作者简介: 张尚剑(1979~), 男, 江西鄱阳人, 博士研究生, 主要从事光电子器件高频特性研究。

E-mail: shangjianzhang@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2004-10-10; 收到修改稿日期: 2005-01-13

性:1) 该方法只能显示现象,无法解释其原因;2) 该方法需要对激光器进行封装,一旦封装后指标不合格,再重新封装有可能损坏芯片,造成浪费。

本文先用微波网络理论推导封装前后激光器散射参量(S参量)之间的关系,在此基础上给出了用于分析半导体激光器封装高频影响的另外两种方法:预测法和评价法。作为例子,对我们封装的同轴激光器进行了分析,并将分析结果与测试结果进行了比较。

## 2 理论与方法

S参量是微波网络分析和设计中最重要参量之一。二端口微波网络的S参量或者S矩阵的定义为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $a_i, b_i (i=1,2)$ 表示 $i$ 端口的入射波和反射波。 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 分别为被测网络的反射系数和正向传输系数。显然,S参量没有量纲。利用网络分析仪可以直接测量被测器件的S参量,由于网络分析仪自动化程度高、操作简单,也可用于光电子器件的测试。但光电子器件测试中电/光和光/电器件会配对出现,其S参量定义与纯电网络有所不同<sup>[9]</sup>。根据Paul D. Hale和Dylan F. Williams等<sup>[9]</sup>的理论,设光只从激光器到探测器正向传播而无反射,其光功率 $p(t)$ 可表示为

$$p(t) = p_0(1 + m\text{Re}\{\exp[j(\omega t + \theta)]\}), \quad (2)$$

式中 $p_0$ 为直流光功率, $m$ 为调制系数, $\theta$ 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参量分别表示为

$$\mathbf{S}^L = \begin{bmatrix} S_{11}^L & 0 \\ S_{21}^L & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ S_{21}^R & S_{22}^R \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{S}^L$ 和 $\mathbf{S}^R$ 分别表示激光器和探测器的S参量,其中激光器的 $S_{11}^L$ 和探测器的 $S_{22}^R$ 与纯电网络定义相同。两者的传输系数 $S_{21}$ 定义如下:

$$S_{21}^L = \frac{p_0 m \exp(i\theta)}{a_1}, \quad (4)$$

$$S_{21}^R = \frac{b_2}{p_0 m \exp(i\theta)} \Big|_{a_2=0},$$

$S_{21}^L$ 具有能量平方根的单位, $S_{21}^R$ 具有能量平方根分之一的单位。

封装后的激光器的S参量由封装网络和激光器共同决定,其可由传输矩阵表示为

$$\mathbf{T}^{\text{PL}} = \mathbf{T}^{\text{P}} \mathbf{T}^{\text{L}}, \quad (5)$$

式中上角标P代表封装网络,PL代表封装后的激光器。传输矩阵 $\mathbf{T}$ 与 $\mathbf{S}$ 参量矩阵的转换关系为<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{T}^X = \frac{1}{S_{21}^X} \begin{bmatrix} 1 & -S_{22}^X \\ S_{11}^X & -\Delta S^X \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$\mathbf{S}^X = \frac{1}{T_{11}^X} \begin{bmatrix} T_{21}^X & \Delta T^X \\ 1 & -T_{12}^X \end{bmatrix}, \quad (6b)$$

其中 $\Delta\psi^X = \psi_{11}^X \psi_{22}^X - \psi_{12}^X \psi_{21}^X$ , $\psi = \mathbf{S}$ 或 $\mathbf{T}$ , $X = \text{LR}, \text{P}$ 或 $\text{PLR}$ 。经过 $\mathbf{S}$ 矩阵与 $\mathbf{T}$ 矩阵之间的变换,可得封装后激光器的S参量:

$$\mathbf{S}^{\text{PL}} = \begin{bmatrix} (S_{11}^{\text{P}} - \Delta S^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}})/(1 - S_{22}^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}}) & 0 \\ S_{21}^{\text{P}} S_{21}^{\text{L}}/(1 - S_{22}^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}}) & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

如图1所示,通常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激光器和探测器组成的级联网络的S参量<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{S}^{\text{LR}} = \begin{bmatrix} S_{11}^{\text{L}} & 0 \\ S_{21}^{\text{L}} S_{21}^{\text{R}} & S_{22}^{\text{R}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

如果激光器含有封装,则被测网络是封装网络、激光器和探测器三者的级联网络。与(7)式类似的推导过程,得到

$$\mathbf{S}^{\text{PLR}} = \begin{bmatrix} (S_{11}^{\text{P}} - \Delta S^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}})/(1 - S_{22}^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}}) & 0 \\ S_{21}^{\text{P}} S_{21}^{\text{L}} S_{21}^{\text{R}}/(1 - S_{22}^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}}) & S_{22}^{\text{R}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

由(7)式、(8)式和(9)式可得封装前后激光器的 $S_{21}$ 之比为

$$\frac{S_{21}^{\text{PL}}}{S_{21}^{\text{L}}} = \frac{S_{21}^{\text{PLR}}}{S_{21}^{\text{LR}}} = \frac{S_{21}^{\text{P}}}{1 - S_{22}^{\text{P}} S_{11}^{\text{L}}}, \quad (10)$$

(10)式表明在分析封装网络的高频影响中,封装前后激光器的 $S_{21}$ 之比与网络分析仪测得的 $S_{21}$ 之比相同。由(10)式可知,分析封装网络的高频影响除了比较法以外,还可用封装前激光器的 $S_{11}^{\text{L}}$ 和封装网络的 $S_{21}^{\text{P}}$ 、 $S_{22}^{\text{P}}$ 表示,这种方法称为预测法。又由(7)式可得封装前后激光器 $S_{11}$ 的关系

$$S_{11}^{\text{L}} = (S_{11}^{\text{PL}} - S_{11}^{\text{P}})/(S_{11}^{\text{PL}} S_{22}^{\text{P}} - \Delta S^{\text{P}}), \quad (11)$$

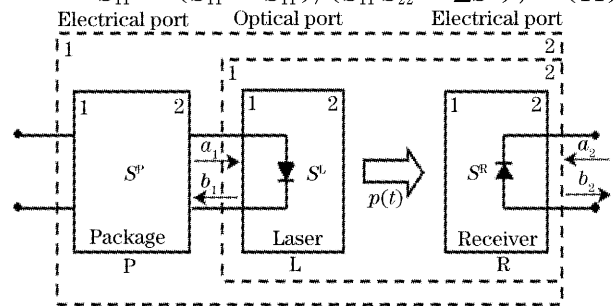


图1 半导体激光器高频测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high-frequency measurement of laser diode

将(11)式代入(10)式,得到

$$\frac{S_{21}^{Pl}}{S_{21}^L} = S_{21}^P + \frac{S_{22}^P (S_{11}^{Pl} - S_{11}^P)}{S_{12}^P}, \quad (12)$$

(12)式表明由封装后激光器的  $S_{11}^{Pl}$  和封装网络的  $S^P$  也可得到激光器封装网络的高频影响,这种方法称为评价法。

从理论上讲预测法和评价法是等价的,作为传统的比较法的补充,两方法只需测试封装网络的  $S$  参量和封装前或者封装后激光器的反射系数就能分析封装网络的高频影响。其中,预测法提供了封装前预见封装后激光器高频响应的一种途径;评价法适合在不易测得封装前  $S$  参量的情形下使用,为我们筛选适合待封装激光器的封装网络提供了理论依据。

### 3 实 验

作为实例,实验中将对激光器芯片和用该芯片制作的同轴封装模块进行测试和分析。激光器测试

芯片一般带有热汇、金丝等以形成共面电极结构,因此需要微波探针连接到网络分析仪的同轴测试端口<sup>[10]</sup>;而同轴封装激光器则需要夹具实现到同轴测试端口的转接。在测试中扣除夹具的影响才能得到准确的被测激光器的  $S$  参量<sup>[10,11]</sup>。

实验选用 HP8720D 矢量网络分析仪和带宽为 45 GHz 的 New Focus Model1014 光探测模块对激光器的  $S$  参量进行测试。测试前先用 HP85052D 3.5-mm 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。在激光器芯片测试中,采用 Cascade ACP-GS 200 微波探针,用 Cascade 103-736 校准件和开路-短路-匹配负载(OSL)方法实现探针校准<sup>[11]</sup>。对 Archcom 的 1.31  $\mu\text{m}$  的法布里-珀罗激光器芯片进行测试得到芯片的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

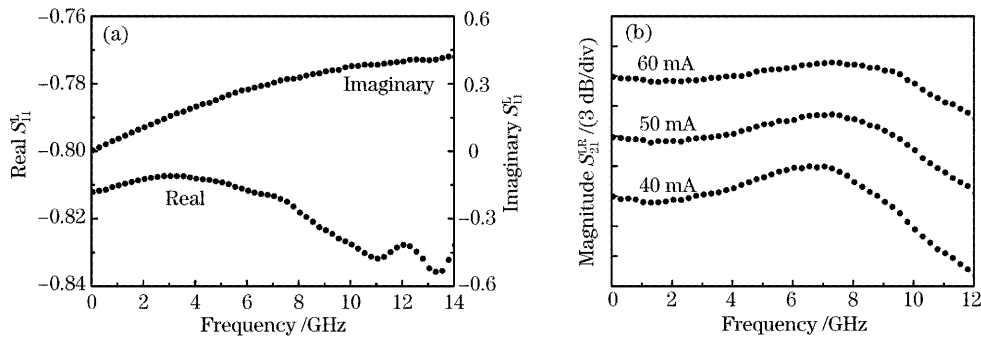


图 2 测得的激光器芯片的  $S$  参量。(a) 反射系数, (b) 传输系数

Fig. 2 Measured reflection coefficient (a), transmission coefficient (b) of laser chip

再对同轴封装座的  $S$  参量进行测量。通常两端口不一致的二端口被测网络,如微波探针等,其  $S$  参量可从一端分别接短路、开路和匹配标准时探针另一端测得的反射系数计算得到,但是适合同轴座的匹配标准很难找到,其  $S$  参量只有用等效电路拟合同轴座开路和短路时的反射系数得到。图 3 给出

了同轴封装的示意图和我们建立的集总元件和分立元件相结合的同轴座的等效电路。模型中 TL1 代表管脚穿过基座的传输线部分,电容 C2、C3 和电感 L1 代表管座外管脚和传输线的不连续性,L2 代表连接金丝电感。拟合得到同轴座各元件参量值如表 1 所示。

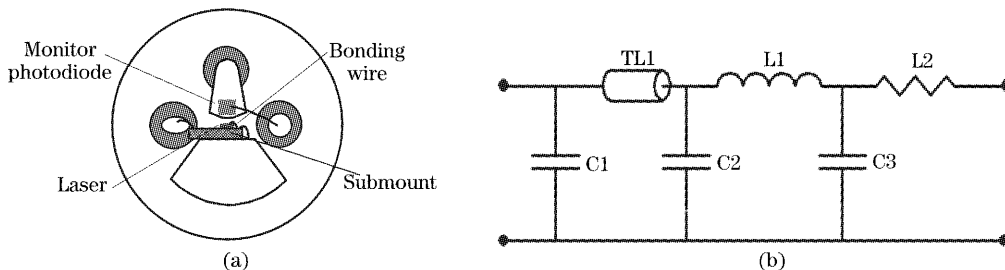


图 3 激光器同轴封装原理图(a),等效电路(b)

Fig. 3 (a) Typical schematic diagram of laser submount and connection to TO packaging (a) and equivalent circuit model of through-hole packaging (b)

将激光器芯片的  $S_{11}$  数据嵌入同轴座电路模型得到激光器模块的反射系数的模拟值,如图 4(a)中实线所示。再对同轴激光器模块进行测试,测试过程与芯片类似,只是微波探针由另外的测试夹具代

替。同轴激光器模块的反射系数和传输系数测试值分别如图 4(a)和图(b)中虚线所示。测试和模拟值吻合说明同轴座模型和参量是合理有效的。

表 1 同轴封装等效电路的元件值

Table 1 Values of the equivalent circuit elements of through-hole packaging

Elements	C1 /pF	C2 /fF	C3 /fF	L1 /nH	L2. L /nH	L2. R / $\Omega$
Value	0.15	20	80	0.26	0.4	0.32

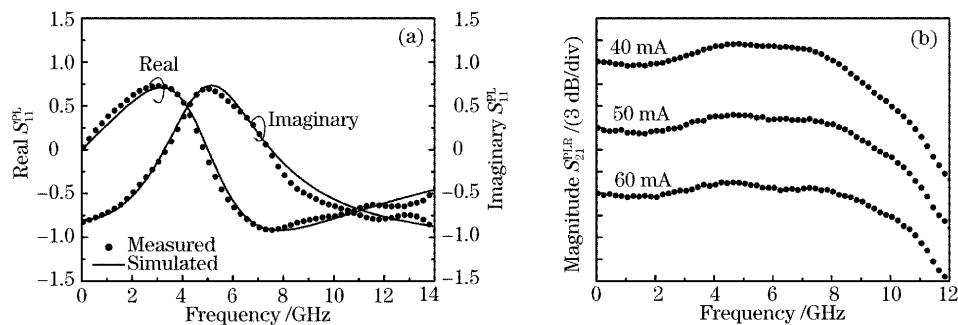


图 4 同轴激光器模块的反射系数(a)和传输系数(b)

Fig. 4 Measured reflection coefficient (a), transmission coefficient (b) of through-hole laser module

根据同轴座的  $S$  参量,结合(10)式和(12)式可计算得到预测法和评价法的分析结果,如图 5 中的实线所示,将激光器模块与芯片的  $S_{21}$  测试数据直接相比得到比较法的结果,如图 5 中的点线所示。从图 5 可以看出:在 10.2 GHz 以下同轴封装不会降低激光器芯片的高频响应带宽,即同轴封装激光器的 3 dB 带宽可达 10.2 GHz;且在 2.4 GHz 到 5.6 GHz 之间同轴封装对激光器频响具有补偿作用,这是由于同轴座电路模型中的电容和电感元件谐振引起的。当然激光器模块中金属管壳等对激光器电特性也有影响,而我们建立的同轴座的电路模型只是对单独同轴座的模拟,使得模拟与测试结果

不完全重合。

## 4 结 论

本文推导了封装前后激光器  $S$  参量之间的关系,给出了可用于分析半导体激光器高频影响的预测法和评价法。理论表明,这两种方法与传统的比较法是等价的,其可以作为后者的有益补充。作为例子,实验中分析了半导体激光器同轴封装的高频影响。模拟结果和测试结果均发现:在约 10.2 GHz 以内,同轴封装不会降低被封装激光器芯片的高频响应带宽。这一实验结果验证了本文分析方法的可行性,也说明了同轴封装激光器模块的调制响应带宽可达 10 GHz,另外,我们发现同轴座内部的电容和电感元件在特定频率产生的谐振,对半导体激光器的频响具有一定的补偿作用。文中同轴座的等效电路模型和同轴封装的频率补偿现象为更好优化激光器封装设计提供了参考。

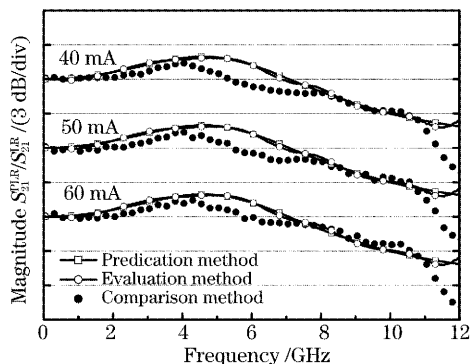


图 5 同轴封装对激光二极管高频响应的影响

Fig. 5 Influence of TO packaging on the high-frequency response of laser diode

## 参 考 文 献

- 1 A. Ebberg, F. Auracher, B. Borchert. 10 Gbit/s transmission using directly modulated uncooled MQW ridge waveguide DFB lasers in TO package[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17): 1476~1477
- 2 A. Ebberg, R. Bauknecht, M. Bittner *et al.*. High performance optical receiver module for 10 Gbit/s application with low cost potential[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 741~742

- 3 Holger Karstensen, Franz Auracher, Norbert Ebel *et al.*. Module packaging for high-speed serial and parallel transmission [C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 2000, **479~486**
- 4 Jim Tatum. VCSEL Packaging for data communication transceiver design[J]. *Fiberoptic Product News*, 2000, **6**: 21~23
- 5 N. H. Zhu, Y. L. Wang, E. Y. B. Pan *et al.*. Study of potential modulation bandwidth of TO packaged laser modules [C]. *SODC*, Stuttgart, Germany, 2002. 110~111
- 6 S. J. Zhang, N. H. Zhu, E. Y. B. Pun *et al.*. Subtraction of scattering parameters for small-signal modulation characteristics of laser diode[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **2**(4): 174~177
- 7 Zhang Shangjian, Liu Yu, Zhang Shengli *et al.*. New simulation method for small-signal modulation response of laser with parasitics[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 676~680 (in Chinese)
- 张尚剑,刘 宇,张胜利 等. 含寄生网络的激光器小信号调制响应模拟新方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 676~680
- 8 Zhang Shengli, Liu Yu, Sun Jianwei *et al.*. Optimized pack of high-speed photodiode[J]. *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
- 9 Paul D. Hale, Dylan F. Williams. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2004, **51**(4): 1422~1429
- 10 N. H. Zhu, Y. Liu, E. Y. B. Pun *et al.*. Scattering-parameter measurements of laser diode[J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 2002, **34**(8): 747~757
- 11 Zhenyu Chen, Youlin Wang, Yu Liu *et al.*. Two-port calibration of the test fixtures with different test ports[J]. *Microwave Optical Technol. Lett.*, 2002, **35**(4): 299~302