

文章编号: 0253-2239(2004)05-659-4

高速光探测器封装的优化设计*

张胜利 刘 宇 孙建伟 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: 提出了一种高速光探测器封装优化设计的新方法。首先用矢量网络分析仪对封装寄生参量和探测器芯片进行准确测量,研究了探测芯片的本征参量与封装寄生参量之间的谐振现象,然后合理利用这种谐振效应对芯片的频率响应特性进行有效补偿。理论分析和实验结果都证明优化封装后器件的频率响应带宽超过了芯片的响应带宽。该方法不需要另加其它元件,而仅仅利用光电器件封装过程中必不可少的金丝所带来的寄生电感,就达到了改善器件频率响应特性的目的。

关键词: 高速光探测器; 封装设计; 寄生参量; 频率响应

中图分类号: O434.12 文献标识码: A

Optimized Pack of High-Speed Photodiode

Zhang Shengli Liu Yu Sun Jianwei Zhu Ninghua

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

(Received 28 May 2003; revised 10 July 2003)

Abstract: A novel optimization for packaging high-speed photodiodes is presented. All the packaging parasitics and the intrinsic characteristic parameters of the photodiode chip are accurately measured with microwave network analyzer. The resonance among them is investigated. The resonance is utilized to significantly improve the frequency response of the devices. Both theoretical and experimental results show that the packaged photodiodes can have a 3 dB bandwidth which is broader than that of the photodiode chip. This method, which utilizes the parasitic inductance of necessary bonding wires, can be used to improve the frequency response of optoelectronics devices without any additional component, only by using parasitic inductance induced by gold wire which is essential in packing process of optoelectronic devices.

Key words: high-speed photodiodes; optimized packaging; parasitics; frequency response

1 引 言

光接收器件是光纤通信系统中的关键器件,高速光纤通信技术的飞速发展,要求相应的光探测器具有更快的响应速度。人们在研发高速光探测器芯片同时,也在不断努力改进芯片的高频封装技术。

随着器件速率的不断提高,封装寄生参量对器件的性能影响越来越明显。例如,封装中用于芯片连接的金丝的寄生电感就会有可能降低器件的响应,因

此,在高速光电器件封装过程中,人们往往采用尽量短的金丝或倒装焊技术以消除金丝电感的影响。光探测器的响应速度主要受芯片内部载流子输运、芯片电容和封装寄生参量的影响,为了提高探测器的响应速度,人们在芯片设计和器件封装中往往尽量减小芯片电容和封装的寄生参量^[1~3]。对于高速的光探测器来说,这种改善是有限的,因为探测器芯片的电容、封装寄生参量都不可能无限小。近来有人提出在探测器的封装中串联一个小电感进行调谐,可能有助于降低探测器芯片电容和封装寄生参量对探测器高频特性的影响,改善器件的频率响应特性^[4,5]。但是,由于探测器的频率响应特性受芯片本身的频率响应特性、芯片的电容、封装用的热沉等因素的影响,因而电

* “863”(2001AA312030, 2001AA312290)、“973”(G2000036601)、国家杰出青年基金(69825109)资助课题。

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

收稿日期:2003-05-28;收到修改稿日期:2003-07-10

感值的选择需要全面考虑以上因素。如果电感值选择不当,不但不能改进器件的频率响应特性,还可能会大大降低器件的高频性能。

本文首先采用矢量网络分析仪对封装寄生参量和探测器芯片进行了精确的测量,研究了探测器芯片、和封装寄生参量之间的谐振效应。然后利用该谐振效应对探测器的频率响应特性进行有效补偿。在此基础上,提出了一种优化封装设计的新方法,并通过实验验证了该方法的正确性。

2 封装寄生参量的测定

通常情况下,探测器芯片的P极在顶部,N极在底部,在封装探测器过程中,芯片都是安装在热沉上。

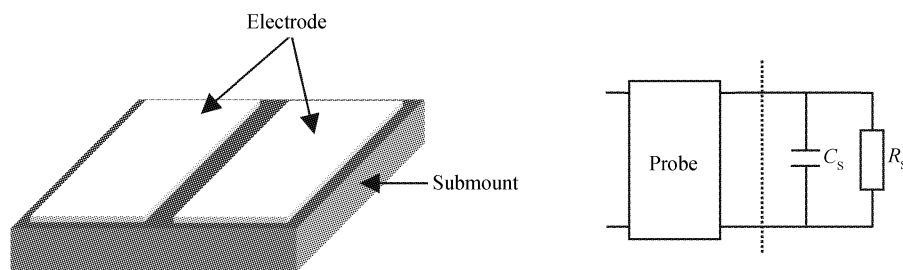


Fig. 1 Schematic diagram and equivalent circuit of submount

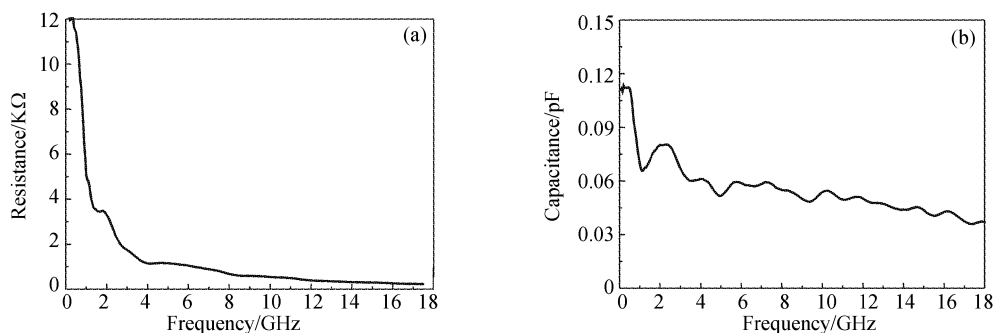


Fig. 2 (a) Measured resistance, (b) capacitance of submount

3 探测器芯片的测量

为了优化封装设计,我们还必须知道探测器芯片的特性。通常情况下,光探测器芯片的P极和N极不共面,无法用微波探针直接测量,所以首先要把它安装在热沉上,然后才能用微波探针进行测量。芯片测量的等效电路如图3所示,其中 R_s 和 C_s 分别为测量用热沉的等效电阻和电容, L_B 为连接金丝的等效电感。热沉和连接金丝的寄生参量以及激光器不平坦的频率响应带来的影响都包括在芯片的测量结果中^[6,7]。

热沉的选择要考虑它的导热性、绝缘性和高频特性等因素。综合考虑了以上因素我们选择了陶瓷基底的热沉,并在电极设计时尽量减小寄生电容。图1是热沉的结构示意图及其等效电路。我们用HP8720D网络分析仪通过双头微波探针直接测量,校准后的网络分析仪测试参考面位于探针头上。测量得到热沉的反射参量 Γ_s ,热沉的阻抗 Z_s 为^[6]

$$Z_s = R_s + \frac{1}{j\omega C_s} = \frac{(1 + \Gamma_s)Z_C}{1 - \Gamma_s}, \quad (1)$$

式中 R_s 为等效电阻, C_s 为等效电容, Z_C 为网络分析仪测试端口的特征阻抗 50Ω 。从图2所示的热沉电阻和电容值测量结果可见, R_s 在低频下阻值很高, R_s 和 C_s 都随着频率的增加而减小。

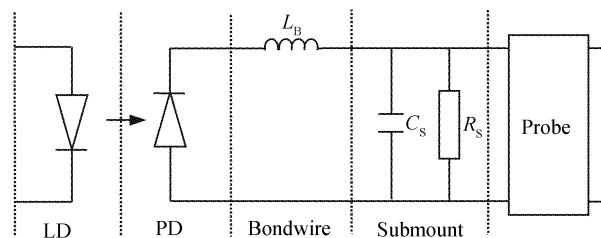


Fig. 3 Schematic diagram of the measurement for Photodiode chip

我们用网络分析仪测量了热沉的阻抗 Z_s 和连接金丝的等效电感 L_B ,并用在了 $50 \text{ MHz} \sim 45 \text{ GHz}$ 频率范围内响应平坦的New Focus Model 1014探测器对

激光器进行校准,测得激光器的传输系数 S_{LD21} 。然后用该激光器作光源对探测器芯片进行测量,测得探测器芯片的传输系数为 S_{D21} 。由于激光器的输入阻抗和微波探针的输出阻抗都为 50Ω ,与网络分析仪

的两端口阻抗匹配,并且激光器与探测器之间是光的单向传输作用,因而反射对传输特性的影响可以忽略^[8]。扣除掉测量用热沉、金丝和激光器的影响后,探测器芯片的真实传输系数 S_{PD21} ^[6]为

$$S_{PD21} = \frac{2S_{D21}R_S Z_C (S_{LD21})^{-1}}{Z_C \{ (1 + S_{D22}) Z_C + R_S [-2 + i(1 + S_{D22}) \alpha C_S Z_C] + \omega L_B \} - i(1 + S_{D22}) Z_C + R_S [i(1 - S_{D22}) + \alpha C_S Z_C (1 + S_{D22})]}, \quad (2)$$

图 4 是我们测量得到的三菱公司 PD7CP26-01 型探测器芯片的真实频率响应特性曲线,从图中我们可以看到测量的探测器芯片 3 dB 带宽为 10 GHz,与三菱公司所提供的产品数据的 3 dB 带宽一致。

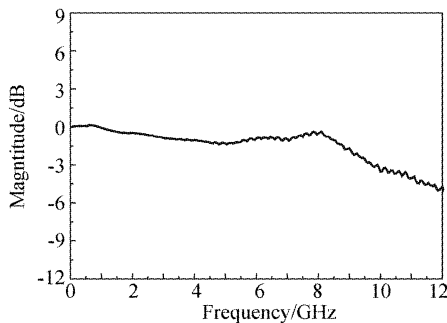


Fig. 4 Measured frequency response of photodiode chip

4 封装优化设计

封装中,首先将芯片安装在热沉上,然后通过金丝将芯片的 P 极和热沉上的另外一个电极连接起来,封装的示意图及等效电路如图 5 所示。光探测器芯片等效为一电流源 $I_t(\omega)$ 、串联电阻 R_P 和并联电容 C_P ,由上节的芯片测试结果计算出 R_P 和 C_P 分别为 10Ω 和 0.16 pF , L_B 为连接金丝的等效电感,光电器件封装中用的连接金丝的直径为一般为 $25 \mu\text{m}$,在 $50 \text{ MHz} \sim 18 \text{ GHz}$ 频率范围内,1 mm 长的这种金丝的等效电感约为 1 nH ^[6]。

封装后的光探测器的传输响应由电流源 $I_t(\omega)$ 和网络 $R(\omega)$ 级联而成,传输响应函数 $H_D(\omega)$ 可以表达为^[4]

$$H_D(\omega) = I_t(\omega) * R(\omega), \quad (3)$$

$$I_t(\omega) = S_{PD21} / [-iS_{PD21} + (1 - S_{PD22})(1 + i\omega C_P R_P)], \quad (4)$$

$$R(\omega) = 1 / [1 + (i\omega L_B + R_P)(i\omega C_S + 1/R_S + 1/Z_C)], \quad (5)$$

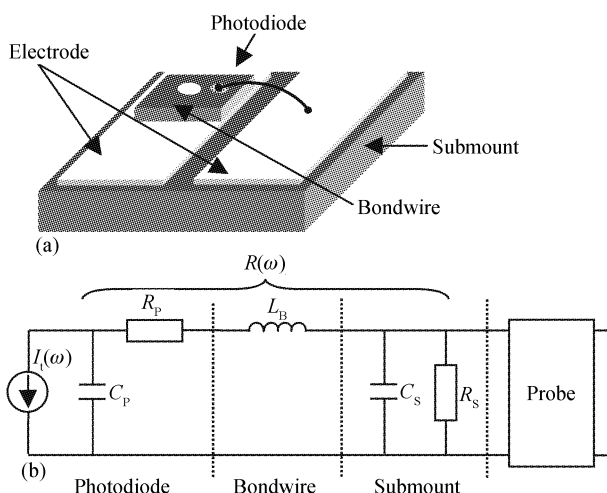


Fig. 5 Schematic diagram and (b) equivalent circuit of photodiode packaging

网络 $R(\omega)$ 呈现出谐振特性,图 6 给出了计算的 $R(\omega)$ 谐振曲线。从图中可以看到,随着 L_B 从 0.6 nH 增加到 2.4 nH ,谐振峰逐渐从高频向低频方向

移动,并且谐振峰峰值逐渐增加,所以通过调整 L_B 的大小可以改变谐振峰的位置和形状。

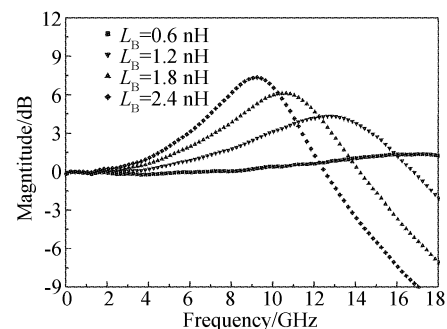


Fig. 6 Calculated resonance curve of $R(\omega)$

在高速光探测器的封装中,谐振峰可能会影响探测器的高频性能,所以人们往往尽量减小 L_B 以避免这种谐振的出现。但是如果合理的选择 L_B 的大小,谐振峰也可以用于改善探测器的频率响应特性。图 7 给出了根据测量数据模拟计算的封装后探测器的频率响应曲线,从图中我们可以看到,当 L_B

为 0.6 nH, 频响特性与芯片相比没有明显变化, 3 dB 带宽仍为 10 GHz, 当 L_B 增加到 1.2 nH, 3 dB 带宽增加到 15 GHz。而当 L_B 为 1.8 nH 和 2.4 nH 时, 响应曲线在不到 10 GHz 处都已经出现超过 3 dB 的谐振峰, 过高的谐振峰会导在大信号眼图中出现过冲和震铃, 从而导致误码率的升高^[9]。从上面的结果可以看到, 利用这种谐振对器件的频响特性进行补偿, 虽然会对带内信号响应的平坦度和带外信号的衰减速度有一定影响, 但总的来说, 在使用的频带范围内, 综合考虑带内波纹的幅度和频响带宽之间的关系, 可以达到有效扩展频响带宽的目的, 封装设计中 L_B 的大小可以通过模拟计算而合理选择。

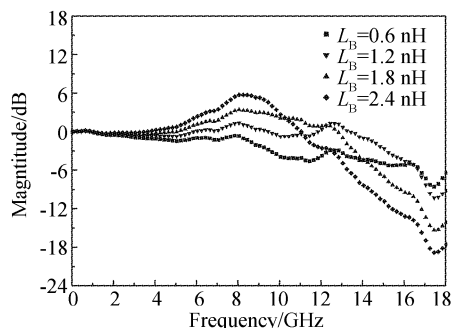


Fig. 7 Calculated frequency response of packaged photodiodes with different L_B

金丝的等效电感与其长度成正比, 因此, 在封装中只需改变金丝的长度即可达到对芯片的频率响应特性进行补偿的目的。我们对三菱公司 PD7CP26-01 型探测器芯片进行封装, 连接金丝的长度分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 和 2 mm, 图 8 给出了封装后探测器的频响曲线。从图中可以看到, 当金丝的长度为 1 mm 时, 测量的 3 dB 带宽达到 15 GHz。考虑到连接时金丝稍有弯曲, 连接金丝的实际电感值应该比 1 nH 略高, 所以实验结果与模拟计算符合很好。我们采用其它的探测器芯片重复上述实验, 得到相似的结果。证明了本文提出的方法可以用于改善高速光

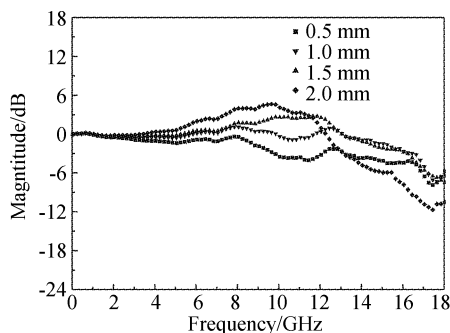


Fig. 8 Measured frequency response of packaged photodiodes with different bondwire length

探测器的频响特性。随着光探测器速率的增加, 需要进一步缩短和精确控制金丝的长度, 减小热沉电极间距并用金丝楔形焊接代替现在封装中常用的球形焊接技术可以达到继续改善其频响特性的目的。

结论 通过对探测器芯片和封装寄生参量精确的测量, 我们发现芯片、热沉和金丝之间存在着谐振效应, 谐振峰的位置和峰值随着金丝的长短而变化。因此, 只需改变金丝的长度即可达到对芯片的频率响应特性进行补偿的目的, 有效补偿所需要金丝的长度可以根据芯片和热沉的特性通过模拟分析确定。我们采用该方法对 3 dB 带宽为 10 GHz 的光探测器芯片在封装过程中进行补偿, 封装后光探测器的 3 dB 带宽提高到 15 GHz, 证明了这种方法的正确性。这种频率特性补偿的方法不需要另加其它元件, 而仅仅利用封装过程中必不可少的金丝所带来的电感, 就达到了改善光探测器频率响应的目的。该方法还可以推广用于电吸收调制器、激光器等光电器件的封装设计。

参 考 文 献

- 1 Chou S Y, Liu M Y. Nanoscale tera-hertz metal-semiconductor-metal photodetectors. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10):2358~2368
- 2 Krems T, Haydl W, Massler H *et al.*. Millimeter-wave performance of chip interconnections using wire bonding and flip chip. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1996, **1**(6):247~250
- 3 Budka T P. Wide-bandwidth millimeter-wave bond-wire interconnects. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2001, **49**(4):715~718
- 4 Lewen R, Westergren U, Schatz R *et al.*. Design of inductive p-i-n diode matching for optical receivers with increased bit-rate operation. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(12):1956~1963
- 5 Yang K, Gutierrez-Aitken A L, Zhang X *et al.*. Design, modeling, and characterization of monolithically integrated InP-based (1.55 μm) high-speed (24 Gb/s) p-i-n/HBT front-end photoreceivers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(8):1831~1839
- 6 Zhu N H, Liu Y, Pun E Y B *et al.*. Scattering parameter measurements of laser diodes. *Opt. Quant. Electron.*, 2002, **34**(8):747~757
- 7 Hale P D, Clement T S, Williams D F *et al.*. Measuring the frequency response of gigabit chip photodiodes. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9):1333~1339
- 8 Debie P, Martens L, Kaiser D. Improved error correction technique for on-wafer lightwave measurements of photodetectors. *Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4):418~420
- 9 Kim M J, Kim D K, Das M B. Determination of bit-rate and sensitivity limits of an optimized p-i-n/HBT OEIC receiver using SPICE simulations. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1997, **44**(4):551~558