

doi: 10.3788/gzxb20124102.0240

高速雪崩光探测器同轴封装的高频分析

徐光辉¹, 柴广跃¹, 彭金花², 黄长统¹, 段子刚¹, 谭科民³

(1 深圳大学 光电子学研究所 光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060)

(2 安徽建筑工业学院 电子与信息工程学院, 合肥 230601)

(3 中国电子科技集团第十三研究所, 石家庄 050051)

摘 要: 基于频率响应理论模型, 分析了同轴封装的雪崩光电探测器的高频特性. 包含芯片、键合金丝、跨阻放大器和同轴管座等各部分的高频特性及对器件高频特性的影响. 通过调节封装过程中不同键合金丝引入的电感参量, 可以得到不同现象的频率响应. 最后考虑实际工程条件, 优化得到了 10 GHz 的 -3 dB 带宽的同轴封装雪崩光电探测器件.

关键词: 雪崩光电探测器; 同轴封装; 频率响应; 跨阻放大器

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0240-4

0 引言

雪崩光电探测器 (Avalanche Photodetector, APD) 具有高灵敏度、低噪音和高倍增带宽等优点, 是长距离、高速光接收系统中的核心器件. 目前, APD 通常采用分立吸收层、渐变层、电荷层和倍增层结构 (Separate Absorption Grading Charge Multiplication, SAGCM), 得到了较好的频率响应, 国际上已有报道称带宽增益积甚至可达 320 GHz^[1-2]. 国内对用于光通信中光电探测器的光电流和带宽等理论和实验也陆续有报道^[3-5]. 然而芯片特性进步的同时也对封装提出了更高的要求.

同轴封装 (TO can packaging, TO) 是最经济、最简单的封装形式之一. TO 封装的 APD 器件 (TO-APD) 广泛用于 2.5 Gb/s、10 Gb/s 长途光纤通信系统及无源光接入网. 对 APD 的 TO 封装的等效电路模型和频率响应特性进行分析, 从而可以预测器件的高频响应, 对其后的电路连接提供理论支持, 并且可以通过调节某些内部参量来改进模组的高频响应^[6].

本文通过对 SAGCM APD 的频率响应模型、TO 封装中的键合金丝、跨阻放大器 (Transimpedance Amplifier, TIA) 和管座的高频电路模型的分析, 进行了 TO-APD 器件的高频特性模拟和优化.

1 理论模型

1.1 芯片的频率响应模型

SAGCM APD 芯片的频率响应函数是基于载

流子速率方程发展而来的. 麦宇翔等在考虑载流子的渡越时间和雪崩时间的基础上提出了等效电路模型并进行了实验, 实验参量吻合很好. 模型先在时域中建立, 然后经过傅里叶变换转换成频域响应函数^[7]. 芯片的频率响应函数为

$$P(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left\{ \frac{1}{\alpha v_p + j\omega} \left[1 - \exp\left(-\alpha W_a - \frac{j\omega W_a}{v_p}\right) \right] - \frac{\exp(-\alpha W_a)}{j\omega} \left[1 - \exp\left(-\frac{j\omega W_a}{v_p}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$N(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left\{ \frac{1}{\alpha v_p + j\omega} \exp\left(-j\omega \frac{x_t + x_m}{v_n}\right) \cdot \left[\exp(-\alpha W_a) - \exp\left(-\frac{j\omega W_a}{v_n}\right) \right] \left(\frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) + \frac{1}{j\omega} (1 - \exp(-\alpha W_a)) \right\} \quad (2)$$

$$P_s(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \exp\left(-\frac{j\omega x_t}{v_n}\right) \cdot \left(\frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) \cdot \left(1 - \exp\left(-j\omega \frac{x_t + W_a}{v_p}\right) \right) \left[\exp\left(-\frac{j\omega W_a}{v_n}\right) - \exp(-\alpha W_a) \right] \frac{M-1}{1 + j\omega(M-1)\tau_m} \quad (3)$$

$$N_s(\omega) = \frac{\eta P_0}{h\nu} \left(\frac{1}{j\omega} + \frac{1}{\alpha v_n - j\omega} \right) \cdot \exp\left(-\frac{j\omega x_t}{v_n}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-j\omega \frac{x_m}{v_n}\right) \right) \left[\exp\left(-\frac{j\omega W_a}{v_n}\right) - \exp(-\alpha W_a) \right] \frac{M-1}{1 + j\omega(M-1)\tau_m} \quad (4)$$

$$I_{ph}(\omega) = \frac{q}{D} [v_n(N(\omega) + N_s(\omega)) + v_p(P(\omega) + P_s(\omega))] = I_{op} \cdot H(\omega) = \frac{qP_0}{h\nu} \cdot H(\omega) \quad (5)$$

式中, $N(\omega)$ 表示光生电子的数目, $P(\omega)$ 表示光生空穴的数目, $N_s(\omega)$ 表示二次光生电子的数目, $P_s(\omega)$

基金项目: 高等学校优秀青年人才基金项目 (No. 2009SQRZ099) 和国家高技术研究发展计划项目 (No. 2007AAJ218) 资助

第一作者: 徐光辉 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器和光电探测器高频封装. Email: ghxu06@126.com

导师 (通讯作者): 柴广跃 (1959-), 男, 教授, 主要研究方向为通信用光电子集成器件、半导体照明器件及封装技术. Email: gychai@szu.edu.cn

收稿日期: 2011-09-16; 修回日期: 2011-11-05

表示二次光生空穴的数目. W_a 表示吸收层厚度, x_g 表示缓冲层厚度, x_c 表示电荷层厚度, x_m 表示倍增层厚度, M 表示增益因子. v_n 、 v_p 分别表示电子迁移率和空穴迁移率, α 代表吸收系数. P_0 为入射光功率, ν 为入射光频率, η 为外量子效率, τ_m 为雪崩建立时间. q 为电荷电量, D 为吸收层、缓冲层、电荷层和倍增层的厚度之和. I_{op} 、 I_{ph} 为直流光电流和外部响应电流, $H(\omega)$ 为频率响应函数.

根据芯片的频率响应得出简单电路模型,如图 1. APD 芯片等效为一电流源 $I_{op}H$ 、串联电阻 R_p 和并联电容 C_p . APD 芯片和 TIA 之间的连接金丝可等效为串联电感 L_{B_1} , 可通过改变金丝的长度来调节电感值, 电感值和长度的关系是 1 nH/mm [8].

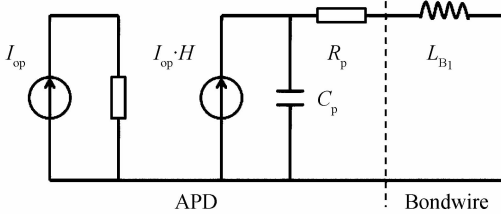


图 1 芯片等效电路和寄生电路
Fig. 1 Equivalent circuit model for the chip and parasitic

1.2 跨阻放大器的等效电路模型

跨阻放大器是光接收机前端放大器件,其作用是将电流信号转换成电压信号并传送到后级处理单元.关于 TIA 的等效电路模型已经有了很深入的研究,而本文给出一个简单的等效电路模型[9-10],如图 2.其

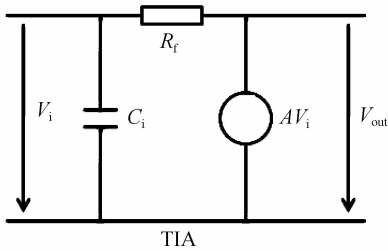


图 2 TIA 的等效电路模型
Fig. 2 Equivalent circuit model of TIA

中 C_i 为输入电容, R_f 为反馈电阻, V_i 和 I_i 为输入电压和电流, V_{out} 为输出电压, A 为电压放大系数.

$$j\omega C_i \cdot V_i + \frac{1}{R_f} (V_i - V_{out}) + I_i = 0 \quad (6)$$

$$V_{out} = -AV_i \quad (7)$$

将式(6)和式(7)联立解得跨阻增益 Z_m 为

$$Z_m = \frac{V_{out}}{I_i} = \frac{R_f}{j\omega C_i R_f + \frac{1+A}{A}} \approx \frac{R_f}{j\omega C_i R_f + 1} \quad (8)$$

在低频时, $Z_m = R_f$, 为了简化计算, 设 TIA 的反馈电阻 R_f 为 500Ω , C_i 为 0.01 pf , A 为设置 100 , 故可知在 $0 \sim 20 \text{ GHz}$ 内跨阻增益 Z_m 可近似视为理想值 $54 \text{ dB} \cdot \Omega$ [6].

1.3 TO 管座的等效电路模型

TO 管座的高频特性呈现低通滤波的作用, 所以管座的频率特性严重影响了整个 TO 封装的带宽. 对于 TO 管座的等效电路有很多, 而且对于不同的 TO 管座(如 TO46, TO56 等)就会有不同的等效电路. 本文采用 TO46 管座的等效电路用于仿真[11](图 3). 管座和 TIA 连接的金丝电感为 L_{B_2} , 管座的分布电容分别为 $C_1 = 0.273 \text{ fF}$ 、 $C_2 = 29.6 \text{ fF}$ 、 $C_3 = 0.01 \text{ pF}$, 管座的分布电感 $L_1 = 0.72 \text{ nH}$ 、阻值 0.6Ω 、 $L_2 = 0.467 \text{ nH}$ 、阻值 0.9Ω . R_L 负载阻抗为 50Ω , V_L 为负载上的压降.

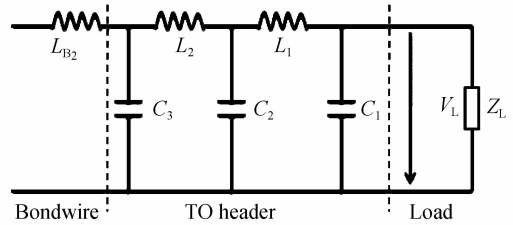


图 3 TO46 管座的等效电路模型
Fig. 3 Equivalent circuit model of TO46

2 理论计算与分析

由于整个 TO 封装的频率响应公式比较复杂, 本文先对芯片、金丝和 TIA 的频率响应函数进行分析. 式(9)的第一部分 $H(\omega)$ 为光探测器的光电流频率响应, 第二部分为寄生和 TIA 产生的频率响应. 整个响应作用是将探测器产生光电流信号转换为电压信号.

$$\frac{V_{out}}{I_{op}} = H(\omega) \cdot R_f / \left\{ \left[\frac{j\omega C_i R_f}{A} + \frac{A+1}{A} \right] \cdot \left[(j\omega L_{B_1} + R_p) j\omega C_p + 1 \right] + \frac{R_f}{A} j\omega C_p \right\} \quad (9)$$

由于 TO 管座所涉及的电容电感较多, 可以利用 ABCD 矩阵特性进行级联求解 V_L/V_{out} 频率响应函数, 因此整个 TO 封装的频率响应计算为 V_L/I_{op} . 计算中芯片所涉及的参量见表 1 [7].

表 1 芯片仿真参量

Table 1 Chip simulation parameters

Parameter	Value	Unit
W_a	1	μm
x_g	150	nm
x_c	150	nm
x_m	200	nm
x_t	300	nm
α	1.15×10^6	cm/s
v_p	6×10^6	cm/s
τ_m	1.33	ps
R_p	20	Ω
C_p	0.15	nm

对于 APD 芯片, 其本征频率响应会随着倍增

因子而发生变化,如图4.不同倍增因子下 -3 dB带宽的曲线如图4中虚线所示.由图4可知倍增因子减小,APD的频率响应曲线平坦, -3 dB带宽也会相应增大.仿真计算中,芯片本征响应都进行了归一化,倍增因子 M 取值为10,且其对应的 -3 dB带宽为12 GHz.

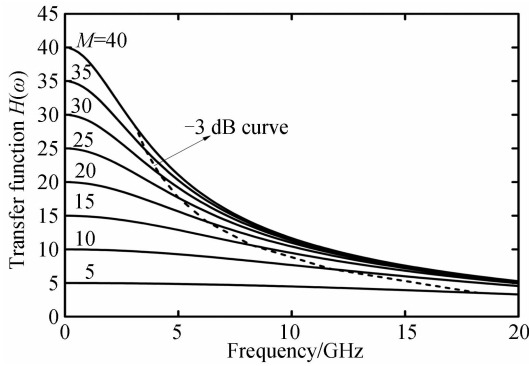


图4 不同倍增因子下的芯片本征频率响应
Fig. 4 Chip frequency responses for different multiplication gains

在高速封装中,金丝所引入的电感可能会在高频响应中带来谐振峰,可以来优化处理TO封装的高频特性^[12].故APD芯片和TIA的连接引线电感 L_{B_1} 、TIA数据输出端和TO管座的引脚连接引线电感 L_{B_2} 都会对整个TO封装的频率响应产生很重要的作用,且二者都是可控参量.首先固定电感 L_{B_2} 取值为1 nH,改变不同的电感 L_{B_1} 值,仿真图5显示电感 L_{B_1} 会引入强烈的谐振峰,说明此电感 L_{B_1} 和芯片寄生电容组成了一个谐振回路影响整个频率响应.对于电感值 L_{B_1} 的增大,谐振峰会增大,但其响应 -3 dB带宽减小.而减小电感值 L_{B_1} ,其会出现低频滚降,同样减少 -3 dB带宽.此连接金丝的电感效应已有实验所证明^[12].故通过优化选取 L_{B_1} 值,可以找出其 -3 dB的最佳值点.

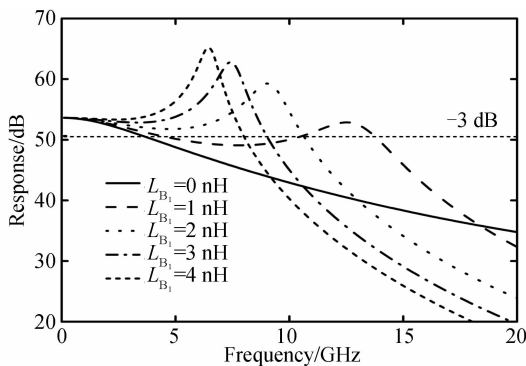


图5 在固定 $L_{B_2}=1$ nH和 L_{B_1} 不同取值下,TO封装的频率响应
Fig. 5 Fixed $L_{B_2}=1$ nH, TO packaging frequency responses for different values of L_{B_1}

图6是固定电感 L_{B_1} 值为1 nH,对于不同的电感 L_{B_2} 值的频率响应曲线.从图6可知 L_{B_2} 值减小会

提升整个TO封装的频率响应,会减小响应曲线在低频率区的滚降.故此电感 L_{B_2} 值越小越好,但是考虑到实际的封装中金丝是必然存在且会有一定长度.为了化解实际和理论上的矛盾,本文进行参量的调试计算得到电感 L_{B_1} 取值为2.2 nH,电感 L_{B_2} 取值为1.5 nH时响应曲线如图7, -3 dB带宽正好达到10 GHz.

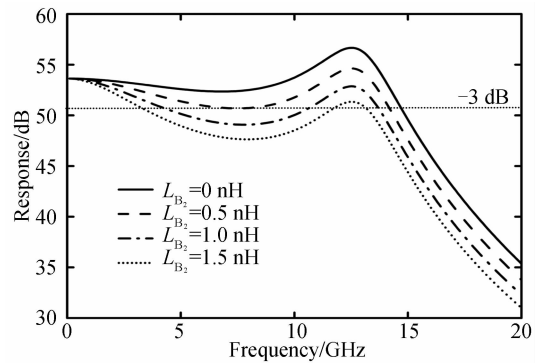


图6 在固定 $L_{B_1}=1$ nH和 L_{B_2} 不同取值下,TO封装的频率响应
Fig. 6 Fixed $L_{B_1}=1$ nH, TO packaging frequency responses for different values of L_{B_2}

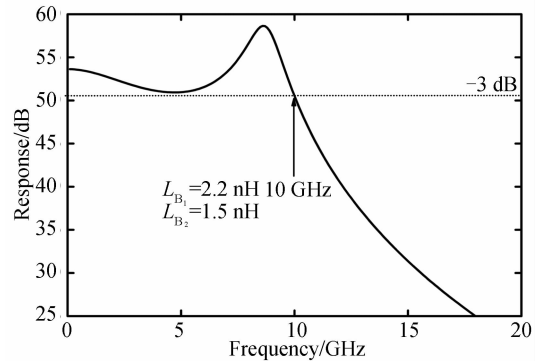


图7 在参量 $L_{B_1}=2.2$ nH, $L_{B_2}=1.5$ nH下,TO封装的频率响应
Fig. 7 TO packaging frequency response at $L_{B_1}=2.2$ nH and $L_{B_2}=1.5$ nH

3 结论

根据实际封装情况,键合金丝 L_{B_2} 有长度限制,通过调节金丝 L_{B_1} 和 L_{B_2} 的电感值,我们优化得到整个封装响应为10 GHz的 -3 dB带宽.本文中芯片的频率响应函数是基于一定的结构参量来模拟,然而在实际工程中,每一个APD芯片都会有频率响应和带宽的差异,即使同一类产品中也都会有所不同,故这也是本文的局限性.但是对于同一APD芯片产品来说,可以随机选取少量的芯片测量其的传递响应,根据统计分布的情况来判定出一个频率响应,植入模型中进行仿真,调节可控参量来优化其频率响应.此外,TIA和管座也可以用上述方法来判定其高频参量,特别对于管座,由于其固定结构和

材料,可能其差异性较小,很容易根据统计分布响应来提取其分布高频参量.上述的描述方法同样可以适用于其他类光电封装.

参考文献

- [1] JOE C C. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(1):109-121.
- [2] KINSEY G S, CAMPBELL J C, DENTAI A G. Waveguide avalanche photodiode operating at 1.55 μm with a gain-bandwidth product of 320 GHz [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(8):842-844.
- [3] ZHANG Rui-kai, ZHONG Yuan, XU Ying-qiang, *et al.* 1.3 μm GaInNAs/GaAs quantum well resonant cavity enhanced photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3):303-307.
张瑞康,钟源,徐应强,等. 1.3 GaInAs/GaAs 量子阱 RCE 光探测器[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3):303-307.
- [4] JIN Rui-ying, CHEN Zhi-ming, PU Hong-bin, *et al.* Photoelectric characteristics of SiC_{1-x}Ge/SiC heterojunction diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):205-208.
靳瑞英,陈治明,蒲红斌,等. SiC_{1-x}Ge/SiC 异质结光电二极管的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):205-208.
- [5] YU Yi-chuan, ZOU Yong-zhuo, HE Jiang-jun, *et al.* Analysis and optimization of MSM-PD's characteristics using a two dimensional numerical method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):347-351.
于弋川,邹勇卓,何建军,等. MSM 光探测器瞬态特性的二维分析及优化设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):347-35.
- [6] ZHU Ning-hui, LIU Yu, ZHANG Shang-jian, *et al.* Bonding-wire compensation effect on the packaging parasitics of optoelectronic devices[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, **48**(1):76-79.
- [7] MAI Yu-xiang, WANG Guang. Equivalent circuit modeling of separate absorption grading charge multiplication avalanche photodiode[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(9):1197-1202.
- [8] ZHU Ning-hua, LIU Yu. Scattering parameter measurements of laser diodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2002, **34**(8):747-757.
- [9] GIOVANNI G. Semiconductor devices for high-speed optoelectronics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009:234-242.
- [10] SUN Ning, WANG Zhi-gong, Gao Jian-jun. Relationship between S-parameters and transimpedance gain of transimpedance amplifiers[J]. *Research & Progress of Solid State Electronics*, 2006, **26**(1):85-90.
孙玲,王志功,高建军. 跨阻放大器 s 参量与跨阻增益间的关系[J]. *固体电子学研究与进展*, 2006, **26**(1):85-90.
- [11] ZHANG Sheng-li. Measuring of scattering parameters and TO packaging for high speed PIN photodiodes[D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2004:50-56.
张胜利. 高速 PIN 光电探测器的散射参量测量和 TO 封装[D]. 北京:中国科学院半导体研究所, 2004:50-56.
- [12] ZHANG Sheng-li, LIU Yu, SUN Jian-wei, *et al.* Optimized pack of high speed photodiode[J]. *Acta Optical Sinica*, 2004, **24**(5):659-662.
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.

High Frequency Analysis of TO Packaging for High-speed Avalanche Photodetectors

XU Guang-hui¹, CHAI Guang-yue¹, PENG Jin-hua², HUANG Chang-tong¹, DUAN Zi-gang¹, TAN Ke-min³

(1 Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

(2 School of Electronic & Information Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China)

(3 Institute of Hebei Semiconductor, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Based on the frequency response model, high frequency characteristic analysis for the TO packaged avalanche photodetectors is presented. The influence on frequency performance of TO packaging, including chip, bondwire, transimpedance amplifier, and TO header elements are investigated. By changing inductance parameters induced by different bondwires, the different frequency responses are observed. Finally, by considering the engineering conditions, a -3 dB bandwidth of 10GHz is optimally obtained for TO packaging.

Key words: Avalanche photodetector; TO can packaging; Frequency response; Transimpedance amplifier