

# 用于 40 Gb/s 光电子器件的新型低成本 硅基过渡热沉\*

熊 兵 王 健 蔡鹏飞 田建柏 孙长征 罗 毅

(清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种新型低成本硅基过渡热沉,用以实现高达 40 Gb/s 的高速光电子器件封装. 采用高阻硅衬底作为热沉基底,制作出了 0~40 GHz 范围内传输损耗小于 0.165 dB/mm 的共面波导传输线. 热沉中采用 Ta<sub>2</sub>N 薄膜电阻作为负载以实现器件的阻抗匹配,达到了 0~40 GHz 范围内低于 -18 dB 的宽带低反射特性. 和传统硅基平台相比,新型硅基热沉更具有制作工艺简单、导热性能良好等优点. 为了证明其实用性,热沉被应用于高速电吸收调制器的管芯级封装测试,获得了超过 33 GHz 的小信号调制带宽特性,在硅基热沉上首次实现可用于 40 Gb/s 系统的光电子器件.

**关键词:** 宽带硅基过渡热沉; 高速电吸收调制器; 高阻率硅衬底; 低损耗共面波导; 薄膜电阻

**EEACC:** 6260C; 4270; 1305

**中图分类号:** TN491

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)10-2001-05

## 1 引言

基于波分复用(WDM)系统的光纤通信技术正处在向单路 40 Gb/s 速率迈进的关键时期,发展既有高性能又有低成本的光电子器件已是大势所趋. 在光电子器件的制作成本中封装要占据绝大部分,如何减小这部分成本是备受关注的研究方向. 封装过程中首先是管芯级封装,即把器件管芯焊到过渡热沉(submount)上,再通过引线连接将管芯和热沉上的微波电路连接起来. 因此,实现宽带过渡热沉对于保障高速光电子器件的性能很关键<sup>[1,2]</sup>;而减小过渡热沉的成本,又对实现更低价格的光电子器件起着重要作用.

与常用的过渡热沉材料金刚石<sup>[3]</sup>、BeO 等相比,无论是在材料价格还是制作工艺上,硅都具有绝对的优势. 然而,传统硅材料的电阻率较低,在硅上制作微波电路有损耗严重等问题. 为了减小微波损耗,往往需要在硅衬底上制作厚达几十微米的绝缘介质

层,如 SiO<sub>2</sub>、聚酰亚胺等,但是这样的制作工艺复杂,增加成本,同时破坏了硅材料良好的散热特性<sup>[4,5]</sup>. 近年来随着硅材料制备工业的发展,高电阻率的纯硅衬底价格越来越低,直接在高阻硅材料上制作低损耗微波波导也有多次报道<sup>[6~8]</sup>. 如果采用高阻硅材料制作过渡热沉,首先可以避免制作厚绝缘介质层,使制作工艺难度和成本大为降低,并可继承硅基材料良好的散热特性;其次由于硅基材料可以方便地制作像 V 型槽之类便于光纤耦合的结构,则可进一步降低封装成本. 据我们所知,至今尚未见到基于高阻硅材料过渡热沉的研究报道,也没有采用硅基过渡热沉的 40 Gb/s 光电子器件的研究报道.

本文针对 40 Gb/s 高速光电子器件的封装要求,提出并实现了基于高阻硅材料的新型低成本、宽带过渡热沉. 在此热沉中,采用共面波导(CPW)传输线传递微波信号,制作 Ta<sub>2</sub>N 薄膜电阻实现器件的阻抗匹配. 由于共面波导传输线是直接制作在高阻硅衬底上,既实现了 0~40 GHz 范围内小于

\*国家自然科学基金(批准号:60244001,60223001和60290084),国家高技术研究发展计划(批准号:2001AA312190和2002AA31119Z)及国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000-03-6601)资助项目

熊 兵 男,1975 年出生,博士研究生,现从事高速半导体光电子器件的研究.

2004-09-02 收到,2005-04-19 定稿

0.165 dB/mm 的宽带低损耗传输,又避免了制作厚绝缘层引入的复杂工艺和散热性能恶化的问题.为了检验过渡热沉的实用性,将其应用于电吸收调制器的管芯级封装测试中.此电吸收调制器的小信号调制带宽超过了 33 GHz,在硅基热沉上首次实现了可用于 40 Gb/s 系统的光电子器件.

## 2 热沉的制作工艺

图 1 所示是本文采用的硅基过渡热沉的结构示意图,图 1(a)是顶视图,在热沉上制作了 CPW 传输线和薄膜电阻;图 1(b)是 CPW 传输线的剖面图.热沉衬底采用的是国产高纯硅衬底,电阻率约  $4\text{ k}\cdot\Omega\cdot\text{cm}$ .

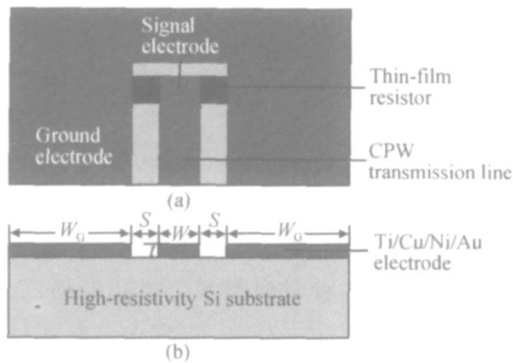


图 1 硅基过渡热沉的结构示意图 (a) 热沉的顶视图;(b) 共面波导传输线的剖面图

Fig.1 Schematic structure of the Si-based submount (a) Top view of the submount;(b) Cross section view of CPW transmission line

在热沉中,采用 Ti/Cu/Ni/Au 多层金属材料作为共面波导传输线的电极材料<sup>[9]</sup>.如图 1 所示,共面波导的金属电极末端和  $\text{Ta}_2\text{N}$  薄膜电阻直接接触,必须保证两者之间的良好连接以实现器件的阻抗匹配.由于过渡热沉在封装过程中需要进行高温焊接,不仅要求接触电阻尽量小,而且要求接触电阻具有很好的温度稳定性,所以选择合适的金属电极材料非常重要.在用作金属电极的材料中,Cr/Au, Ti/Au 类二元金属电极采用得比较多,但这些材料在高温条件下会发生严重的金属互扩散,形成高阻合金 CrAu, TiAu,从而导致金属电极和薄膜电阻材料间的接触电阻急剧增加,因此不能用作共面波导的电极材料.在本文采用的 Ti/Cu/Ni/Au 材料中,Cu/Ni 材料间隔在 Ti 和 Au 材料之间,起到阻隔 Ti

和 Au 相互扩散的作用,可以使金属电极和  $\text{Ta}_2\text{N}$  材料之间的接触特性大为改善.图 2 所示是金属材料与薄膜电阻之间接触电阻和退火温度之间的关系曲线,采用 Cr/Au 材料作为电极的接触电阻随着退火温度升高而急剧升高,而 Ti/Cu/Ni/Au 电极的接触电阻在退火温度升高到 500 仍能保持稳定,因此在热沉中采用了 Ti/Cu/Ni/Au 作为金属电极材料来制作共面波导传输线.

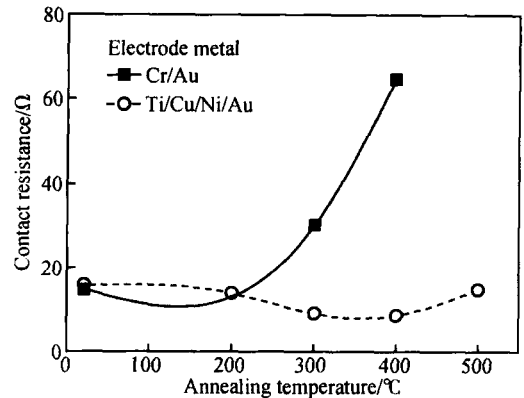


图 2 不同温度退火后金属电极和  $\text{Ta}_2\text{N}$  之间的接触电阻  
Fig.2 Contact resistance between the electrode metal and  $\text{Ta}_2\text{N}$  film after annealing at different temperatures

为了制作出微波损耗低、特征阻抗匹配的微波波导,首先对共面波导传输线的结构进行了优化设计.考虑到制作工艺的实际情况,金属电极厚度  $t$  被固定为  $2\mu\text{m}$ .由于测试使用的微波探针的探针间距为  $150\mu\text{m}$ ,所以在设计中要求信号电极宽度  $w$  加上电极间隔宽度  $s$  约为  $150\mu\text{m}$ ,以配合微波探针的测试需要.通过优化设计,获得的最优化结构参数  $w$  和  $s$  分别为  $92\mu\text{m}$  和  $54\mu\text{m}$ .根据设计的结构参数,我们在高阻硅衬底上直接制作了共面波导传输线,并采用网络分析仪 (Agilent 8722 network analyzer) 和两个微波探针 (Cascade ACP40-GSG probe) 对传输线的传输和反射特性进行了测量.图 3 所示是一个 6mm 长的高阻硅基共面波导传输线的典型传输损耗和反射系数,其结构参数是:  $w = 93\mu\text{m}$ ,  $s = 53\mu\text{m}$ ,  $w_G = 1100\mu\text{m}$ ,  $t = 2\mu\text{m}$ .图 3 表明,在硅衬底上成功实现了 0 ~ 40 GHz 范围内传输损耗小于 0.165 dB/mm 的甚低损耗微波传输线.

在过渡热沉中,微波信号通过共面波导传输线传递到光电子器件,例如高速半导体激光器、电吸收调制器等,但要实现阻抗匹配才能避免微波反射回去.对于电吸收调制器而言,需要在传输线终端并联

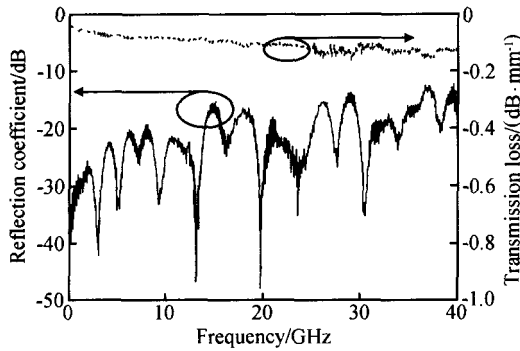


图 3 高阻硅衬底上共面波导传输线的传输损耗和反射系数测量结果

Fig. 3 Measured transmission loss and reflection coefficient of a CPW transmission line formed on high-resistivity Si substrate

一个 50  $\Omega$  负载电阻以实现阻抗匹配. 我们选用了  $Ta_2N$  薄膜材料制作匹配电阻, 主要是考虑到它具有良好的热稳定性和高频阻抗稳定性<sup>[10,11]</sup>. 在制作薄膜电阻时, 通过选择合适的  $Ta_2N$  薄膜宽度使负载电阻值达到 50  $\Omega$  左右, 从而尽可能减少反射回去的微波信号. 在微波传输线和薄膜电阻的工艺基础上, 我们制作出完整的硅基热沉, 其中微波传输线的结构参数为:  $L = 500\mu m$ ,  $W = 93\mu m$ ,  $S = 53\mu m$ ,  $W_G = 1500\mu m$ ,  $t = 2\mu m$ ,  $Ta_2N$  薄膜电阻宽度约为  $75\mu m$ . 然后利用网络分析仪和微波探针对其微波特性进行了测试. 图 4 所示是硅基热沉的典型反射系数曲线, 其中实线部分为测试数据, 数据表明已成功实现了反射系数在 0 ~ 40 GHz 范围内小于 -18dB 的宽带热沉, 虚线部分是根据插图中的等效电路拟

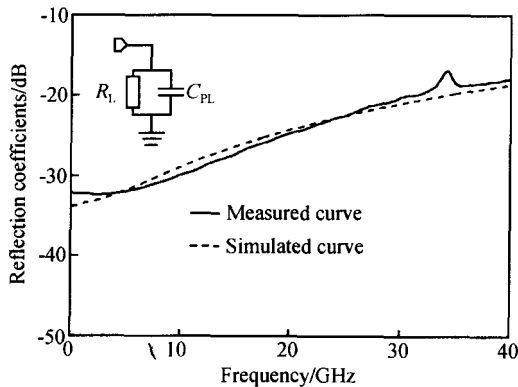


图 4 高阻硅基热沉的反射系数测量值和模拟计算值 插图所示是热沉的等效电路.

Fig. 4 Measured and calculated reflection coefficients of a high-resistivity Si-based submount Inset shows equivalent circuit of submount.

和测试结果的计算数据. 在此等效电路中, 电阻  $R_i$  代表薄膜电阻的电阻值,  $C_{PL}$  代表热沉的寄生电容. 根据模拟结果估算出的热沉匹配电阻  $R_i$  约为 48  $\Omega$ , 而寄生电容  $C_{PL}$  仅有 0.019pF.

### 3 利用电吸收调制器的实验验证

新型硅基过渡热沉具有制作成本低、微波损耗低和散热特性好等优点, 非常适合用于高速光电子器件的封装. 为了验证其实用性, 我们利用此热沉对高速电吸收调制器进行了管芯级封装测试. 调制器正面朝上焊在硅基热沉上, 然后将调制器焊盘和热沉上的薄膜电阻进行金丝球焊连接. 电吸收调制器的结构和制作工艺已在以前的文献中介绍过<sup>[12]</sup>, 此处不再赘述. 测试中, 采用网络分析仪 (Agilent 8722 network analyzer) 给出微波信号, 经微波探针 (Cascade ACP40-GSG probe) 加载到热沉的共面波导传输线上, 再通过传输线微波信号被传递给调制器; 从调制器端面出来的被调光信号经高速光探测器 (U2T-XPDV2020 detector) 转换为电信号反馈回网络分析仪.

图 5 所示的是器件的反射特性曲线, 实线是实验数据曲线, 虚线是根据等效电路得到的拟和数据曲线. 插图所示的是管芯级封装的电吸收调制器的等效电路, 其中  $L_w$  是金丝引线的电感,  $R_s$  代表调制器的串联电阻,  $C_P$  代表调制器焊盘电极电容,  $G$

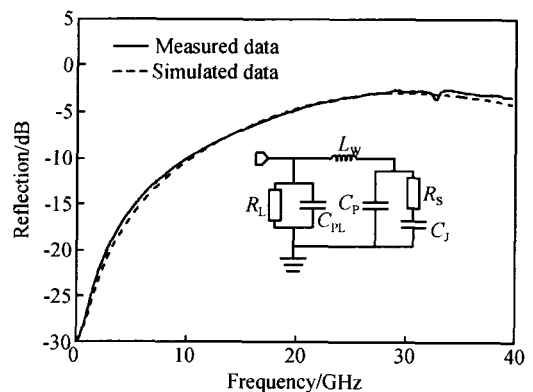


图 5 采用新型硅基热沉管芯级封装的电吸收调制器反射系数测量值和模拟计算值 插图所示是管芯封装器件的等效电路.

Fig. 5 Measured and calculated reflection coefficients of a chip-level packaged EA modulator using the novel Si-based submount Inset illustrates the equivalent circuit of the chip-level packaged device.

代表调制器结区势垒电容. 根据对测试数据的等效电路模拟结果, 我们估算出的  $L_w$ ,  $R_s$ ,  $C_p$ ,  $G$  分别是  $0.18\text{nH}$ ,  $48\ \Omega$ ,  $0.090\text{pF}$ ,  $0.092\text{pF}$ . 图 6 所示是器件的小信号调制特性曲线, 其中虚线部分的拟合数据曲线是根据图 5 插图的等效电路计算得到, 实线是根据探测器频率响应和微波探针的传输损耗进行了数据校准后的测试曲线. 测试数据和拟合数据曲线均表明, 调制器的  $3\text{dB}$  小信号调制带宽大于  $33\text{GHz}$ .

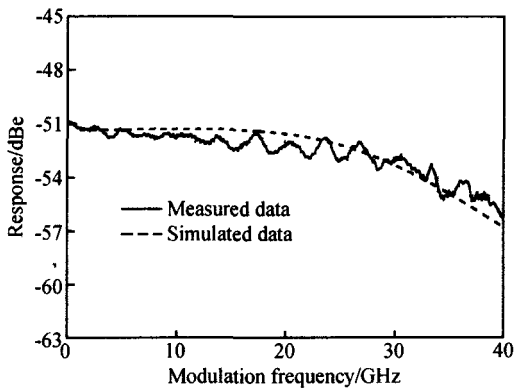


图 6 采用高阻硅基热沉管芯级封装的电吸收调制器的小信号调制响应曲线

Fig. 6 Small signal response of the EA modulator of chip-level packaged on the high resistivity Si-based submount

为了衡量硅基热沉对器件特性的影响, 将图 5 等效电路中的热沉参数设为理想值  $R_L = 50\ \Omega$ ,  $C_{PL} = 0\text{pF}$ , 计算得到理想条件下的调制器反射系数和小信号调制响应曲线, 并与图 5, 6 中的反射系数和小信号调制响应曲线计算值在图 7 中进行了比较.

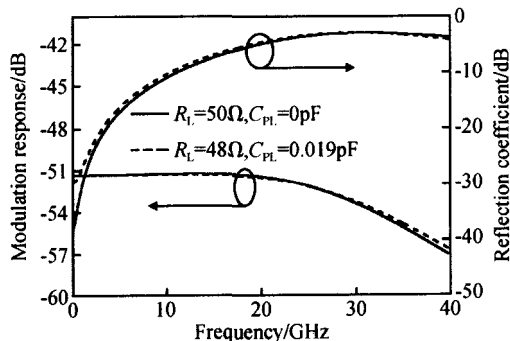


图 7 采用理想和实际的热沉参数计算得到的反射系数和调制响应曲线的比较

Fig. 7 Comparison of calculated reflection coefficient and modulation response with ideal and real submount parameters

结果表明, 采用实际热沉参数所得到的数据已经非常接近理想参数条件下的器件反射特性和小信号调制特性.

采用新型硅基热沉进行管芯级封装的调制器达到了  $33\text{GHz}$  的调制带宽, 有望应用于  $40\text{Gb/s}$  光纤通信系统中. 据我们所知, 这是在硅基热沉上首次实现  $40\text{Gb/s}$  光电子器件的报道. 可以相信, 新型硅基过渡热沉在未来的  $40\text{Gb/s}$  光电子器件封装中具有巨大的应用前景.

## 4 结论

本文提出了一种新型低成本硅基过渡热沉, 可用于高达  $40\text{Gb/s}$  的光电子器件封装. 通过直接在高阻硅衬底上制作共面波导传输线用于微波传送, 获得了直到  $40\text{GHz}$  仍低于  $0.165\text{dB/mm}$  的甚低传输损耗. 共面波导末端连接  $50\ \Omega$   $\text{Ta}_2\text{N}$  薄膜电阻用于器件的阻抗匹配, 其反射系数直到  $40\text{GHz}$  仍小于  $-18\text{dB}$ . 新型热沉用于高速电吸收调制器的封装测试, 达到了  $33\text{GHz}$  的小信号调制带宽, 首次报道了基于硅基热沉的  $40\text{Gb/s}$  光电子器件. 新型硅基过渡热沉具有成本低、性能高的突出优点, 非常适用于高速光电子器件的封装.

## 参考文献

- [1] Lindgren S, Ahlfeldt H, Kerzar B, et al. Packaging of high speed DFB laser diodes. 22nd European Conference on Optical Communication, 1996, 1:97
- [2] Henderson R M, Katehi L P B. Silicon-based micro machined packages for high-frequency applications. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1999, 47(8):1563
- [3] Pan Cunhai, Li Junyue, Hua Jizhen, et al. Investigation of diamond/ Ti/ Ni/ Au metallization scheme applied in semiconductor lasers for thermal management. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(7):737 (in Chinese) [潘存海, 李俊岳, 花吉珍, 等. 用于半导体激光器热沉的金刚石膜/ Ti/ Ni/ Au 金属化体系的研究. 半导体学报, 2003, 24(7):737]
- [4] Mino S, Ohyama T, Hashimoto T, et al. High frequency electrical circuits on a planar lightwave circuit platform. J Lightwave Technol, 1996, 14(5):806
- [5] Ternent G, Ferguson S, Borsofaldi Z, et al. Coplanar waveguide transmission lines and high Q inductors on CMOS grade silicon using photoresist and polyimide. Electron Lett, 1999, 35(22):1957
- [6] Reyes A C, El-Ghazaly S M, Dorn S, et al. Silicon as a micro-

- wave substrate. Digest of IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1994, 3:1759
- [ 7 ] Taub S R, Young P. Temperature dependent performance of coplanar waveguide (CPW) on substrates of various materials. Digest of IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 1994, 2:1049
- [ 8 ] Reyes A C, El-Ghazaly S M, Dorn S J, et al. Coplanar waveguides and microwave inductors on silicon substrates. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1995, 43(9):2016
- [ 9 ] Morabito J M, Thomas J H, Lesh N G. Material characterisation of Ti-Cu-Ni-Au (TCNA)-a new low cost thin film conductor system. IEEE Trans Parts, Hybrids and Packaging, 1975, 11(4):253
- [ 10 ] Katz A, Pearton S J, Nakahara S, et al. Tantalum nitride films as resistors on chemical vapor deposited diamond substrates. J Appl Phys, 1993, 73(10):5208
- [ 11 ] Henderson R, Zurcher P, Duvallet A, et al. Tantalum nitride thin film resistors for integration into copper metallization based RF-CMOS and BiCMOS technology platforms. Digest of IEEE MTT-S Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, 2001:71
- [ 12 ] Xiong Bing, Sun Changzheng, Wang Jian, et al. Low threshold DFB laser integrated high speed EA modulators based on ridge waveguide structure by ICP etching. Proceeding of SPIE, 2002, 4905:161

## A Novel Low-Cost Wideband Si-Based Submount for 40 Gb/s Optoelectronic Devices<sup>\*</sup>

Xiong Bing, Wang Jian, Cai Pengfei, Tian Jianbo, Sun Changzheng, and Luo Yi

*(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Department of Electronic Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

**Abstract:** A novel low-cost wideband Si-based submount is proposed and fabricated for 40 Gb/s optoelectronic devices. In the submount, a CPW transmission line is directly formed on a high-resistivity Si substrate and exhibits a transmission loss as low as 0.165 dB/mm up to 40 GHz. The submount contains a Ta<sub>2</sub>N thin-film resistor for impedance matching, and a low reflection coefficient of less than -18 dB up to 40 GHz is achieved. Such a configuration has the advantages of simplified fabrication procedures and efficient heat dissipation. As a demonstration, the Si-based submount is used in a high-speed electroabsorption (EA) modulator for chip-level packaging. The small-signal modulation bandwidth is measured to be over 33 GHz, which is the first report of 40 Gb/s optoelectronic devices on a Si-based submount.

**Key words:** wideband Si-based submount; high-speed EA modulator; high-resistivity Si substrate; low-loss CPW transmission line; thin-film resistor

**EEACC:** 6260C; 4270; 1305

**Article ID:** 0253-4177(2005)10-2001-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60244001, 60223001 and 60290084), the National High Technology Research and Development Program of China (Nos. 2001AA312190, 2002AA31119Z), and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000-03-6601)

Xiong Bing male, was born in 1975, PhD candidate. He is engaged in research on high-speed integrated optoelectronic devices.

Received 2 September 2004, revised manuscript received 19 April 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics