

文章编号:1001-9014(2007)05-0344-05

应用于 40Gb/s 高速热沉的匹配电阻研究

张明俊, 孙长征, 蔡鹏飞, 熊兵, 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: 针对 40Gb/s 高速过渡热沉阻抗匹配的要求, 对基于 Ta₂N 薄膜的匹配电阻制作工艺进行了系统研究. 根据过渡热沉的等效电路模型, 分析了 Ta₂N 薄膜电阻与传输线电极间接触电阻对高频反射特性的影响, 并通过理论仿真确定了热沉匹配电阻的容差范围. 利用磁控反应溅射技术, 制作出特性稳定、方阻可调的 Ta₂N 电阻薄膜. 通过优化高温退火条件, 将电阻薄膜与金属电极间的比接触电阻率降至 10⁻⁶ Ω·cm² 量级. 在此基础上, 制作出了性能良好稳定、可应用于 40Gb/s 光电子器件封装的高速过渡热沉.

关键词: 阻抗匹配; Ta₂N 薄膜; 接触电阻; 比接触电阻率

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A

STUDY ON MATCHING RESISTOR OF 40GB/S HIGH-SPEED SUBMOUNTS

ZHANG Ming-Jun, SUN Chang-Zheng, CAI Peng-Fei, XIONG Bing, LUO Yi

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

Abstract: A systematic study of the fabrication process of Ta₂N thin-film resistor was presented to meet the impedance matching requirement of 40Gb/s high-speed submount. Equivalent circuit of the submount was proposed to analyze the influence of contact resistance on the reflection characteristics at high frequencies. And the resistance tolerance of the thin-film resistor was determined based on the numerical simulation. Ta₂N thin-film with a stable and adjustable sheet resistance was fabricated by reactive sputtering. Specific contact resistivity between the Ta₂N thin-film and metal electrode was reduced to 10⁻⁶ Ω·cm² by optimizing the annealing temperature. Based on these results, high-speed submount with stable and high transmission performance was fabricated for the packaging of 40Gb/s optoelectronic devices.

Key words: impedance matching; Ta₂N thin-film; contact resistance; specific contact resistivity

引言

目前, 作为光纤通信系统核心器件的高速半导体光源正朝着 40Gb/s 的调制速度方向发展^[1]. 为实现其产品化, 必须解决从微波驱动电路到集成光源管芯的过渡封装这一重要问题. 为了达到这一目的, 本研究小组曾设计并制作出基于蓝宝石晶体衬底的高速共面波导(CPW)传输线过渡热沉, 并将其应用于 40Gb/s 高速电吸收调制器的管芯级封装^[2].

为了减小微波调制信号的传输反射与损耗, 必须获得稳定且尽可能接近 50 Ω 的匹配电阻. 氮化钽薄膜是一种电阻温度系数小、稳定性高的中低阻薄

膜, 常用于制作精密薄膜电阻器^[3], 其方块电阻可控制在 10 ~ 100Ω 之内, 很适合用于制作匹配电阻. 但是, 氮化钽薄膜与加载微波信号的金属电极之间并非理想无阻接触^[4, 5], 接触电阻对热沉的微波传输性能及其稳定性可能造成的影响尚待深入研究. 同时, 由于不同工艺条件下制作的氮化钽薄膜在晶体结构和热稳定性等方面均有较大差异, 为此需要对其制作工艺参数进行仔细优化, 以获得阻值稳定可靠的薄膜.

本文在前期高速过渡热沉的研究基础上, 通过建立仿真模型从理论上分析了薄膜电阻与接触电阻对热沉传输特性的影响. 采用磁控反应溅射方法制

收稿日期: 2006-12-21, 修回日期: 2007-06-18

Received date: 2006-12-21, revised date: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60536020, 60390074), "973" 重大国家基础研究计划(2006CB302801)

作者简介: 张明俊(1983-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向为 40Gb/s 高速集成光源模块封装.

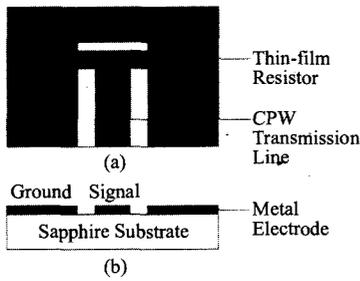


图 1 过渡热沉结构示意图 (a) 俯视图 (b) 侧视图
 Fig. 1 Schematic structure of the submount (a) top view (b) cross section view

备了性能稳定且较大范围内阻值可调的 Ta₂N 薄膜, 并根据 Ta₂N 薄膜与金属电极之间比接触电阻率的评测结果, 对制作工艺进行了改进, 获得了稳定、具有良好接触特性的热沉匹配电阻。

1 理论分析

图 1 为本实验室设计的 CPW 传输线过渡热沉结构示意图^[2]. 该结构利用并联的两块方形 Ta₂N 薄膜作为匹配电阻, 采用 Ti/Cu/Ni/Au 多层金属作为 CPW 传输线电极. 实验中发现, 仅仅以直流总电阻的大小作为匹配电阻的评价标准, 忽略其中接触电阻与薄膜电阻的相对关系可能带来的影响, 给热沉制作工艺带来了不确定性, 并造成过渡热沉反射特性呈现出一定程度的不稳定。

为了进一步深入讨论薄膜电阻与信号电极之间接触电阻以及附加寄生电容对过渡热沉阻抗匹配特性的影响, 建立了如图 2 所示的过渡热沉等效电路^[2]. 图中的 R_{se} 和 C_{se} 分别为电阻薄膜与信号电极间的接触电阻和电容, R_{ee} 和 C_{ee} 为电阻薄膜与地电极间的接触电阻和电容, R_f 和 C_f 则是单块 Ta₂N 薄膜的方块电阻和与其并联的寄生电容. 其中, Ta₂N 薄膜具有良好的电阻特性, 其上的寄生电容 C_f 较小^[4, 6], 大约在 fF 量级, 在 0 ~ 40GHz 频率范围内对阻抗匹配的影响很小; 而根据实验结果拟和得到的参数 C_{se} 、 C_{ee} , 大小则在几十 pF 量级^[2]. 当热沉工作在低频区时, 各电容均等效为断路, 总匹配电阻 $R_{tot} = R_{se} + (R_f + R_{ee})/2$; 在高频区, C_f 仍可等效为断路, 而 C_{se} 、 C_{ee} 产生的阻抗变得很小, 接触电阻 R_{se} 、 R_{ee} 被其分别短路, 于是有 $R_{tot} = R_f/2$. 比较可知, 接触电阻的大小对传输线的阻抗匹配将有很大的影响, 因而减小接触电阻对于提高热沉传输性能及其稳定性将具有重要意义。

为了定量分析接触电阻对热沉传输特性的影

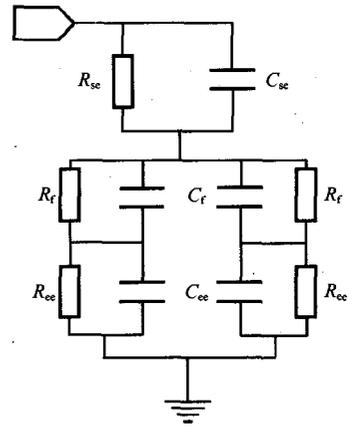


图 2 热沉等效电路图
 Fig. 2 Equivalent circuit of the submount

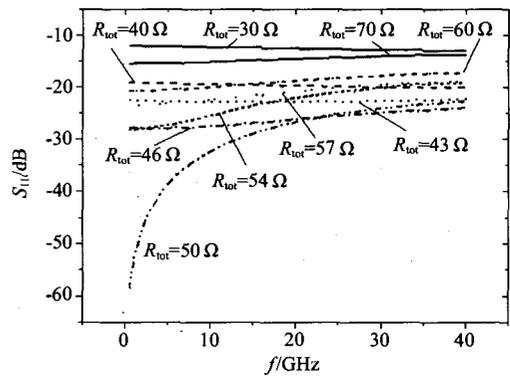


图 3 热沉反射仿真曲线 ($R_{tot} = 30 \sim 70\Omega$)
 Fig. 3 Calculated reflection response curve of the submount ($R_{tot} = 30 \sim 70\Omega$)

响, 本文还利用 Ansoft 公司高频仿真软件 HFSS 针对上述结构的热沉进行了反射系数的仿真计算. 模型中主要考虑 CPW 波导本身的特性和终端匹配电阻的影响。

如前所述, 在高频区域, C_f 仍可等效为断路, 但由于 C_{se} 和 C_{ee} 的影响, 接触电阻被短路, 总匹配电阻发生变化. 为了集中说明这种变化对热沉性能的影响, 同时由于 C_{se} 和 C_{ee} 的具体数值难以准确测量, 只能对其量级进行估计, 因而在仿真计算中忽略了电容 C_f 、 C_{se} 和 C_{ee} . 图 3 所示为具有不同匹配电阻阻值的热沉反射系数仿真曲线. 从图中可以看出, 匹配电阻偏离 50Ω 越大, 反射特性恶化越多, 匹配电阻变化 10Ω, 反射系数增加约 5dB.

根据仿真结果, 当匹配电阻大小在 43 ~ 54Ω 范围变化时, 反射系数在 0 ~ 40GHz 范围内均保持在 -20dB 以下. 但是考虑到电容 C_{se} 和 C_{ee} 的影响, 等效的总电阻在高频区会发生变化, 直流下匹配的电阻在高频区的等效阻值会偏离 50Ω, 造成高频反射

特性的恶化. 因此, 为了保证过渡热沉在 0 ~ 40GHz 的整个频段内保持良好稳定的反射特性, 需要在匹配电阻制作过程中将接触电阻控制在 10Ω 以下.

2 Ta₂N 电阻薄膜的磁控溅射技术

利用磁控反应溅射方法制备的氮化钽薄膜, 其性能和结构与溅射方式和工艺参数密切相关, 不同结构的氮化钽薄膜, 其电阻率差别可达 7 个量级之多^[6]. 氮化钽薄膜具有 3 种稳定的结构, Ta₂N、Ta₃N₅ 以及 Ta₅N₆, 其中 Ta₂N 具有最为类似金属的性质^[7], 其电阻率一般为 250μΩ · cm, 电阻温度系数为 -50 ~ -100ppm/°C, 适合做高性能的薄膜电阻^[3].

本文采用直流磁控反应溅射方法制备 Ta₂N 电阻薄膜, 靶材为高纯钽靶(99.99%), 反应气体为高纯氮气(99.999%), 放电气体为高纯氩气(99.999%), 溅射电流 400mA, 溅射气压 0.5Pa, 气体流量 20sccm, 溅射温度 80°C. 实验表明, 在制备过程中影响薄膜结构和质量的最关键因素是氮气分压比, 即高纯氮气与总气体的流量比, 当氮气分压比为 5% 时获得的氮化钽薄膜主要成分为 Ta₂N. 图 4 为氮气分压比 5% 条件下得到的氮化钽薄膜样品的 X 射线衍射(XRD) 图样. 图中 41.7° 附近尖锐的峰是蓝宝石晶体的 [100] 特征峰, 而 35.9° 附近的峰为氮化钽薄膜的特征峰, 与 Ta₂N 的 [200] 特征峰相符.

为了评价所得 Ta₂N 薄膜的电学特性, 本文采用四探针法测量其方块电阻. 图 5 为不同溅射时间下的薄膜样品方块电阻与溅射时间 t_s 之间的关系. 可以看出, 二者基本呈倒数关系, 这是由于薄膜方阻与其厚度成反比, 而薄膜厚度则与溅射时间成正比的

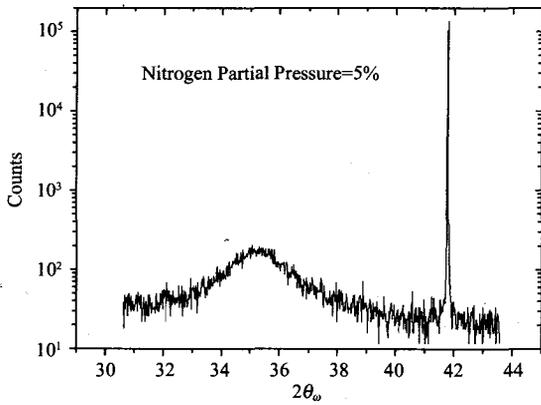


图 4 N₂ 分压比 5% 下的 Ta₂N 薄膜 XRD 摇摆曲线
Fig. 4 XRD rocking curve of Ta₂N thin-film (N₂ partial pressure: 5%)

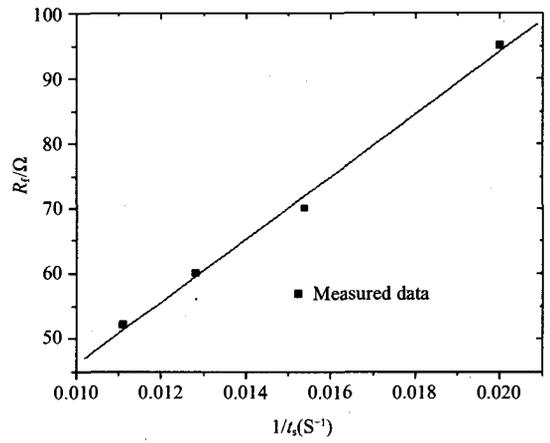


图 5 Ta₂N 薄膜方阻与溅射时间之间的关系
Fig. 5 Relationship between the sheet resistance of Ta₂N thin-film and the sputtering time

缘故. 通过控制溅射时间, 可以实现对 Ta₂N 薄膜电阻阻值的精确控制, 其方块电阻的测量值与理论值之间的误差小于 4Ω.

3 Ta₂N 电阻薄膜与金属电极接触特性的优化

如前所述, 接触电阻的大小将在很大程度上影响热沉的传输性能尤其是高频区的反射特性. 因此, 降低接触电阻, 对于改善热沉性能, 提高其反射特性稳定性有着重要的意义.

金属电极与电阻薄膜之间的接触特性, 通常由二者之间的比接触电阻率来评价, 根据比接触电阻率即可计算出接触电阻的大小. 本文采用圆环传输线模型(CTLM)方法测量电阻薄膜与金属电极间的比接触电阻率. 与文献中通常采用的传输线模型(TLM)法^[4, 5]相比, 它在图形结构上做了改进, 避免了边缘处寄生电阻带来的误差, 同时在理论上没有采用 TLM 中关于方块电阻的近似计算, 因而结果更为精确^[8]. 利用比接触电阻率、电阻薄膜的方阻值 R_f 以及几何尺寸, 可以根据近似公式(1) 计算接触电阻 R_c^[8]

$$R_c = \frac{\sqrt{\rho_c \cdot R_f}}{W} \quad (1)$$

其中, ρ_c 为比接触电阻率, W 为金属电极与电阻薄膜接触部分的宽度. 实验中, 对于未经退火等后步工艺的热沉, 测得的 Ta₂N 薄膜与 Ti/Cu/Ni/Au 金属电极间比接触电阻率为 10⁻⁴ Ω · cm² 量级, 与文献报道中的类似结果吻合^[4, 5]. 根据比接触电阻率计算得到的接触电阻大约在 10 ~ 20Ω 之间.

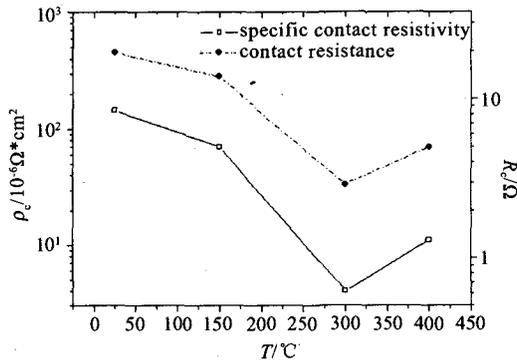


图6 不同退火温度下的比接触电阻率与接触电阻
Fig.6 Specific contact resistivity and contact resistance after annealing at different temperatures

为了进一步降低接触电阻,本文优化了匹配电阻制作过程中的退火工艺,其中的关键是退火温度的选择.图6所示为从常温到400℃范围内,电极退火5分钟后测得的比接触电阻率以及计算所得接触电阻.当退火温度高于400℃时,金属电极表面Au层向内扩散,电极表面变粗糙,并失去光泽,导致热沉微波特性恶化,无法满足器件制作工艺的要求.从图中可以看出,退火温度为300℃时,薄膜与金属间接触特性获得很大的改善,比接触电阻率降低了一个多数量级,达到 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$,接触电阻则降至3~5Ω.

4 实验验证

本文采用前述优化的 Ta_2N 薄膜制作以及退火工艺,最终得到了接触电阻5Ω左右的匹配电阻.考虑到薄膜电阻的控制精度带来的误差,匹配电阻在0~40GHz频率范围内的大小变化可以控制在 $\pm 7\Omega$ 之内.在此基础上,本文制作了应用于40Gb/s高速封装的过渡热沉.

实验中,首先在蓝宝石衬底上利用磁控反应溅射制备一层 Ta_2N 薄膜,其方阻值 R_f 通过溅射时间控制在100Ω附近.随后,采用湿法腐蚀的方法,利用氟硝酸溶液($\text{HF}:\text{HNO}_3=2:1$)腐蚀出如图1所示的匹配电阻图形.匹配电阻由两块并联的 Ta_2N 方块薄膜组成,其宽度 W 为55μm.然后,以光刻胶为掩膜,利用磁控反应溅射制作Ti/Cu/Ni/Au(厚度分别为50nm/150nm/100nm/60nm)金属电极,并在300℃下退火5分钟,以使金属电极与匹配电阻之间接触电阻降至5Ω以下.最后,利用电镀的方法,在金属电极最上层Au之上再电镀一层2~3μm的Au层,以减小微波损耗.

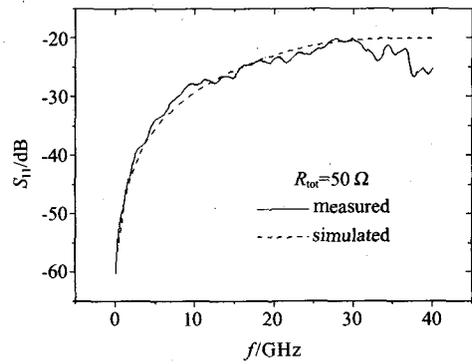


图7 热沉反射曲线测量结果与仿真结果对比
Fig.7 Measured and calculated reflection response curves of the submount

通常用 S 参数来评价CPW传输线的微波传输特性,对于没有焊接管芯的热沉而言, S_{11} 参数反映了传输线终端薄膜电阻的匹配特性.

图7中实线为利用Agilent 8722型网络分析仪测得的热沉反射特性曲线,而虚线为直流总匹配电阻 $R_{tot}=50\Omega$ 的仿真结果.可以发现,二者在低频区吻合的很好,而在高频区则略有差异,这正是由于高频区接触电阻被短路使得总匹配电阻减小造成的结果.

5 结论

本文对光电子器件高速封装用过渡热沉中的匹配电阻制作工艺进行了研究.根据过渡热沉的等效电路模型,分析了 Ta_2N 薄膜电阻与传输线电极间接触电阻对高频反射特性的影响,并通过理论分析仿真确定了热沉匹配电阻的容差范围.通过优化溅射条件,确定 N_2 分压比为5%,获得了性质稳定、方阻可调的 Ta_2N 电阻薄膜.确定了匹配电阻制作工艺中300℃的优化退火温度,将电阻薄膜与金属电极之比接触电阻率降至 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级,接触电阻降至3~5Ω.利用改进工艺,制作了0~40GHz内大小可控,变化在 $\pm 7\Omega$ 范围内的匹配电阻,并在此基础上制作了传输性能稳定的应用于40Gb/s高速封装的过渡热沉.

REFERENCES

- [1] Takeuchi H, Tsuzuki K, Sato K, et al. Very high-speed light-source module up to 40Gb/s containing an MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3 (2): 336-343.
- [2] TIAN Jian-Bai, XIONG Bing, WANG Jian, et al. High-speed Al_2O_3 -based submount for 40Gb/s electroabsorption modulator [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (田建柏, 熊兵,

- 王健,等. 应用于 40Gb/s 电吸收调制器的 Al_2O_3 高速热沉研究. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(2):105—108.
- [3] Qu Xi-Xin. *Handbook of Materials for Electronic Components* [M]. Beijing: Electronic Industry (曲喜新. 电子元件材料手册. 北京: 电子工业出版社), 1989, 559—563.
- [4] Obata M, Sakuda T, Hayashibe R, *et al.* Characterization of contact resistance between electrode and TaN_x thin-film resistor prepared by reactive sputtering[J]. *Electronics and Communications in Japan Part II-Electronics*, 2004, **87**(9): 30—37.
- [5] Obata M, Sakuda T, Abe K, *et al.* Contact property between metal and tantalum nitride film characterized by using transmission line model[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2004, **180**:136—139.
- [6] Kim Deok-kee, Lee Heon, Kim Donghwan, *et al.* Electrical and mechanical properties of tantalum nitride thin films deposited by reactive sputtering [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **283**(3-4): 404—408.
- [7] Stampfl C, Freeman A J. Stable and metastable structures of the multiphase tantalum nitride system[J]. *Physical Review B*, 2005, **71**(2): No. 024111.
- [8] Wu Ding-fen, Yan Ben-da. *Principle, Test and Processing of Ohmic Contact Between Metal-semiconductor Interface* [M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, (吴鼎芬, 颜本达. 金属-半导体界面欧姆接触的原理、测试与工艺. 上海: 上海交通大学出版社), 1989, 22—45.
-
- (上接 339 页)
- [5] ChaoYong-Feng, Ru Guo-Ping, Chen Yong-Ping, *et al.* Temperature dependence of the vanadium oxide films for micro-bolometer detectors[J]. *Semiconductor Technology* (曹永峰, 茹国平, 陈永平, 等. 用于微测辐射热计的氧化钒热敏薄膜材料的温度特性. 半导体技术), 2003, **27**(5):58—62.
- [6] Hideo Wada, Mitsuhiro Nagashima. Fabrication process for 256×256 bolometer-type uncooled infrared detector[J]. *SPIE*, 1997, **3224**:40—51.
- [7] Yang Zhao, Mingyao Mao. Opto-mechanical un-cooled infrared imaging system design, micro-fabrication and performance. [J], *J. Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(2):136—146.
- [8] Ay F, Andinli A. Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguide. [J], *Optical Materials*, 2004, **26**:33—46.